

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1202

September 2009

載荷試験を活用した鋼管杭の設計・施工管理手法の体系化

菊池 喜昭

水谷 崇亮

森川 嘉之

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

1.	はじめに	4
2.	現状の杭基礎の設計・施工の流れ	4
2.1	設計・施工の流れ	4
2.2	設計状況の現状	19
3.	現行の支持力推定手法の課題	25
3.1	諸外国の設計法と日本の設計法の比較	25
3.2	実測値と諸設計法との比較	27
4.	鋼管杭（開端）の支持機構	31
4.1	鋼管杭の軸方向抵抗力について	31
4.2	支持力推定式の発展と各基準で用いられている推定式	31
4.3	開端杭の先端抵抗メカニズム	32
4.4	まとめ	48
5.	各種載荷試験方法の特徴および適用性	48
5.1	載荷試験の計画	48
5.2	載荷試験の種類	51
5.3	押し込み試験，急速載荷試験，衝撃載荷試験の特徴	52
5.4	各載荷試験の適用性	61
6.	施工管理方法の検討	63
6.1	施工時の杭の挙動	63
6.2	施工時の衝撃載荷試験	63
6.3	動的支持力管理式の修正方法の提案	69
6.4	動的支持力管理式の修正の実施例	70
6.5	衝撃載荷試験の実測データ	72
6.6	従来の動的支持力管理式の精度	74
7.	提案する設計・施工の流れ	75
7.1	各ステップの説明	76
7.2	トラブル回避策とトラブル時対策のためのチェックリスト	91
8.	結論	96
9.	終わりに	96
付録 A	杭の施工中に生じうるトラブルとその予測方法・対策	98
A.1	杭打設工事の実績（1次アンケート結果）	98
A.2	杭打設工事の実績（2次アンケート結果）	107
A.3	杭打設における主なトラブルの内訳	120
付録 B	トラブル時の対策工とその効果	135
B.1	試験施工後の対策	135
B.2	本杭施工後の対策（試験施工無しの場合）	136
B.3	高止まりの場合の原因および対策の具体例	137
B.4	支持力不足の場合の原因および対策の具体例	142
B.5	支持力不足対策として事前試験を実施した具体例	156
B.6	杭が損傷した場合の原因および対策の具体例	161

Systematization of Design Verification and Installation of Steel Pipe Piles with Pile Loading Tests

Yoshiaki KIKUCHI*
Taka-aki MIZUTANI**
Yoshiyuki MORIKAWA***

Synopsis

At first, a design and construction flow of pile foundation in the present knowledge and experience situation is presented to indicate the state of the art of this field in this Technical note. Then, issues of the design method for the bearing capacity of open-ended piles were presented. To overcome these issue, mechanism of the development of the bearing resistance of open-ended piles were observed. Furthermore, currently developed pile loading methods were surveyed and applicable pile loading methods for estimating the bearing capacity of a pile and construction control used in port facilities were summarized. Finally new method for estimating pile bearing capacity was presented based on the above research works and appendices A and B in this note.

Main conclusions of this research are as follows;

- 1) It is inadequate to apply the existing bearing capacity estimation method used in Japanese standards utilizing SPT-N values for the piles with more than 50 m embedded length.
- 2) End bearing capacity of open-ended piles were consisted of both pile annulus and inner friction between pile and soil inside the pile from pile tip to 2 times of pile diameter.
- 3) Because of the simplicity of dynamic pile loading tests which are getting popular, they can be used for the estimation of bearing capacity of piles and pile construction control.
- 4) New design and construction control method with utilizing the pile loading tests are proposed.

Key Words: design, construction control, bearing capacity of piles, deep embedded piles, large diameter piles, steel pipe piles, pile loading methods

* Director, Geotechnical & Structural Engineering Department
** Senior Researcher, Geotechnical & Structural Engineering Department
*** Head, Soil Stabilization Group, Geotechnical & Structural Engineering Department

載荷試験を活用した鋼管杭の設計・施工管理手法の体系化

菊池 喜昭*
水谷 崇亮**
森川 嘉之***

要 旨

本稿では、まずはじめに、現在の技術水準を示すため、現在の考え方に基づく設計施工の流れを示した。次いで現在の開端杭の支持力に関する設計法の課題を示した。これらを背景に、開端杭の先端支持力の発現メカニズムに関する検討を行なった。さらに、近年の載荷試験方法の動向について紹介し、杭の支持力推定に用いることのできる載荷試験方法についてまとめ、施工管理までを含めた載荷試験結果の利用法をまとめた。以上の検討結果と付録 A, B に示した杭の施工に伴うトラブルの実態調査結果に基づき、新しい杭の支持力推定手法の考え方を提案した。

本研究の主たる結論は以下のものである。

- 1) N 値を基本とした現在の日本の杭の先端支持力推定手法は、根入れ長が 50 m を超える杭に対しては適用が困難である。
- 2) 開端杭の先端抵抗は、杭実質部の先端抵抗と杭先端から杭径のほぼ 2 倍までの区間の杭の内周面摩擦によって発揮されているようである。
- 3) 動的荷重を載荷する杭の載荷試験方法が普及してきており、その簡便さから、杭の支持力推定や杭の施工管理に新しい杭の載荷試験を活用できる。
- 4) 以上の検討結果から、杭の載荷試験をより積極的に活用した杭の設計施工の考え方を示した。

尚、本稿は、独立行政法人港湾空港技術研究所、社団法人日本埋立浚渫協会、鋼管杭協会（現一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会）の 3 者で平成 18 年から平成 20 年まで実施した共同研究の成果を中心に取りまとめたものである。

キーワード：設計，施工，杭の支持力，大深度杭，大口径杭，鋼管杭，杭の載荷試験

* 地盤・構造部 部長（基礎工研究チームリーダー）
** 地盤・構造部 主任研究官
*** 地盤・構造部 地盤研究領域 地盤改良研究チームリーダー
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5037 Fax：046-844-0255 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

1. はじめに

昭和 30 年頃から港湾工事で盛んに鋼杭が用いられるようになってきた。それから 50 年余にわたり鋼杭が用いられてきている。特に鋼管杭が港湾工事では多用されてきている。その理由は、長尺杭となったときでも使いやすく、打ち込み時のトラブルが少ない、たわみに対して強いなどの理由によるものであると考えられる。

現在の港湾の技術上の基準・同解説の原型は昭和 42 年に発行された港湾構造物設計基準であろう。この基準が執筆された当時、他の基準同様、杭の基準についてもその時点の世界の基準の動向や自らの港湾工事の事例を集積して、最先端の技術レベルを具体化されたものであると思われる。それから 40 年の月日がたつて、施工技術、現場の要請とも大きく変化し、杭の設計施工にまつわる環境が大幅に変化した。技術基準の執筆内容には大きな変化が無かった。変更を要しなかった可能性もあるが、その一方で、鋼管杭という先端が開放された杭を用いることによる現場の苦勞も計り知れないものがあったと考えられる。世界的な基準をとりまく動向の変化や近年の杭の載荷試験方法の進歩などを勘案すると、杭の支持力推定手法の考え方を改めるべき時期が来ていると考えられる。

鋼管杭のような先端開放の杭を打撃工法によって施工する例は、現在、日本では港湾工事以外にはほとんどなく、この種の杭の設計・施工に関する問題は、港湾工事に携わるものが自ら解決しなくてはならない状況にある。

このような技術的背景を受けて、独立行政法人港湾空港技術研究所、社団法人日本埋立浚渫協会、鋼管杭協会（現 一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会）の 3 者で平成 18 年から平成 20 年まで共同研究を実施してきた。この共同研究では、鋼管杭を打撃によって施工することを前提に、その杭の支持力を合理的に推定し、確実に施工するにはどのようにしたらよいかについて検討した。

その主たる検討項目は、以下のとおりである。

諸外国の杭の支持力推定手法と日本における支持力推定手法の比較

開端杭の支持力メカニズム

過去の杭の支持力調査結果の収集

杭の載荷試験方法の効果的利用方法

施工中のトラブル事例及びその解決方法の調査

これらの調査の最終的な成果として、載荷試験を活用することによって、鋼管杭の支持力推定値の妥当性を把握するとともに杭の施工管理手法を改善する方法を提案した。

本資料では、以上の研究の成果を基にして、2 章以降の各章で以下の項目を取りまとめた。

- 現在の技術水準を示すため、現在の考え方に基づく杭基礎の設計施工の流れを示した。あわせて、近年の杭の設計の実体を調査した結果を示した。
- 杭の支持力に関する諸外国の設計法と日本の設計法の違いについて述べるとともに、現在の設計法の考え方の課題を示した。
- 開端杭の先端支持力の発現メカニズムに関する室内実験を紹介するとともに、原位置における載荷試験結果から開端杭の支持力特性について考察した。
- 近年の杭の載荷試験方法の動向について紹介し、杭の支持力推定に用いることのできる載荷試験方法についてまとめた。
- 主として衝撃載荷試験に着目し、衝撃載荷試験結果を利用した杭の施工管理方法の考え方について明らかにした。
- 以上の検討結果と付録 A、B に示した杭の施工に伴うトラブルの実態調査結果に基づき、載荷試験を用いた杭の支持力推定方法と施工管理方法の新しい考え方を提案した。
- 本資料の結論を示した。

また、付録では以下のような情報を提供している。

付録 A 杭の施工中に生じたトラブルに関するアンケート結果

付録 B 実際にトラブルが生じた際に、どのような解決方法を採用したか、トラブルの原因ごとに類型化したものを示した。

2. 現状の杭基礎の設計・施工の流れ

検討に先立ち、杭基礎の設計施工に関しての現状での考え方を整理した。ここでは、まずはじめに標準的な設計施工のフローとフローの各段階において考慮すべき事項を説明し、その後、最近の杭の設計状況を紹介する。

2.1 設計・施工の流れ

図-2.1 に港湾の施設に使用される鋼管杭基礎の設計、施工の流れを示し、以降その内容を説明する。

(1) 地盤調査

地盤条件は、杭の設計及び施工方法を決定するうえで最も基本的かつ重要な情報である。地盤条件の決定にあたっては、資料調査から得られた過去の地盤の情報（デ

データベース等を含む)を積極的に活用しながら、必要に応じて地盤調査を新たに実施する。

a) 杭の設計、施工に必要な地盤情報

杭基礎の設計、施工に必要な主な地盤情報および追加調査項目は以下のとおりである。また、設計に用いる地盤情報を調査するための試験項目および試験方法の一覧を表-2.1に示す。

1) 杭の設計に必要な主な地盤情報

地層構成(支持層の厚さ、凹凸、傾斜連続性)

支持層の先端抵抗力

中間層の杭周面抵抗力

粘土層などの圧密特性

地震時に不安定となる地盤(液状化地盤等)の判定

2) 杭の施工に必要な主な追加調査項目

支持層の起伏や地層厚のばらつきが大きい場合に個々の杭長を決定するための追加ボーリング

転石や大径の礫等が考えられる場合の追加ボーリング

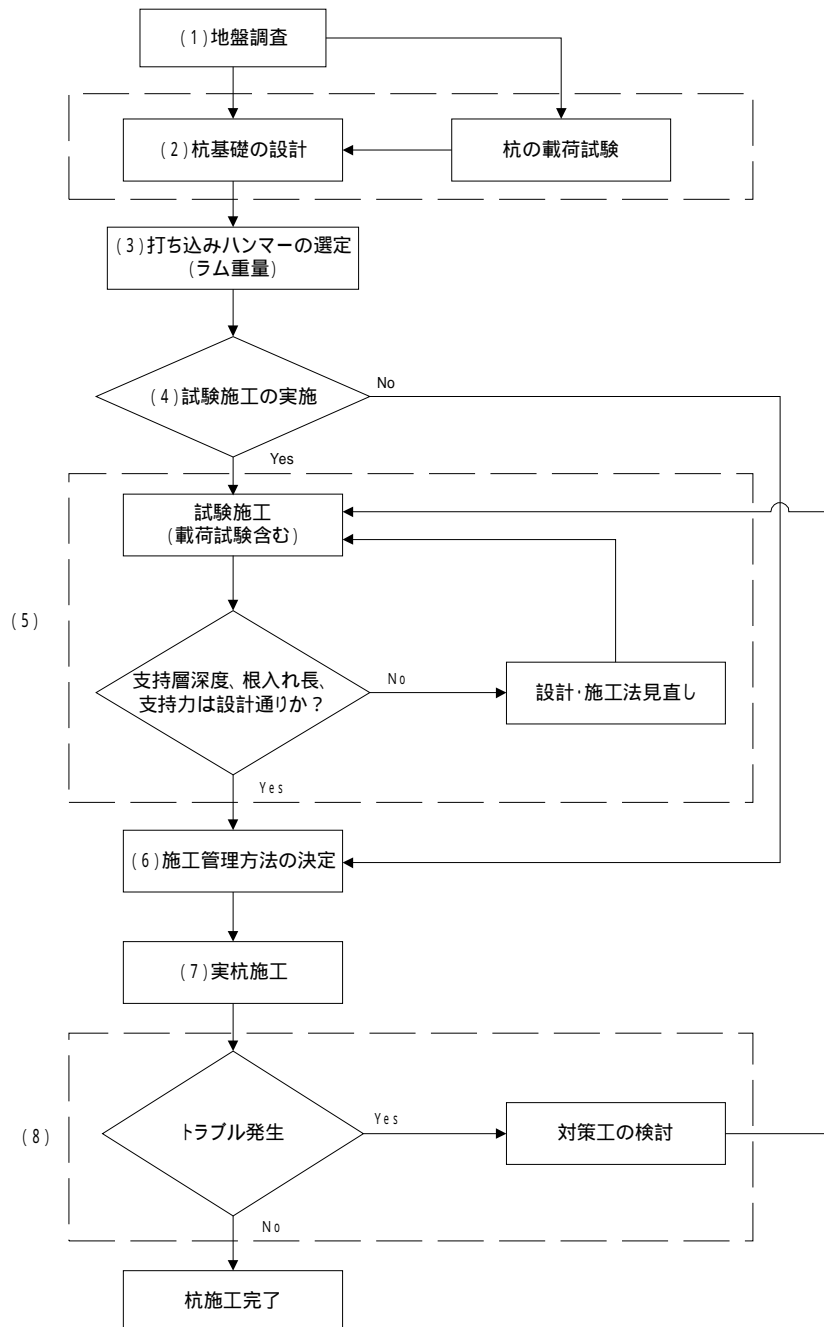


図-2.1 鋼管杭基礎の設計・施工フロー

表-2.1 地盤調査及び試験項目

調査項目	試験方法	対象土質	設計・施工で主に用いる内容
地層区分	ボーリング	すべての土質	支持層決定、凸凹、傾斜連続性
N 値	標準貫入試験	すべての土質	周面摩擦力、先端支持力、水平抵抗
内部摩擦角	室内土質試験	主に砂質土	土圧、支持力係数
粘着力	室内土質試験	主に粘性土	周面摩擦力、先端支持力、土圧
粒度分布	室内土質試験	すべての土質	液状化判定
地下水位	地下水調査	すべての土質	液状化判定、土圧
単位体積重量	室内土質試験	すべての土質	土圧、先端支持力
塑性・液性限界	室内土質試験	粘性土	圧密沈下、先端支持力、水平抵抗
圧密降伏応力	室内土質試験	粘性土	圧密沈下
変形係数	孔内水平載荷試験	すべての土質	水平抵抗、土圧

表-2.2 ボーリング及びサウンディングの調査地点の目安¹⁾

成層状態が水平方向にも鉛直方向にも比較的均質な場合 (単位：m)

		法線方向		法線直角方向			
		配置間隔		配置間隔		法線からの距離(最大)	
		ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング
概略調査	広範囲の地域	300～500	100～300	50	25	50～100	
	小範囲の地域	50～100	20～50				
精密調査		50～100	20～50	20～30	10～15		

成層状態が複雑な場合 (単位：m)

		法線方向		法線直角方向			
		配置間隔		配置間隔		法線からの距離(最大)	
		ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング
概略調査		50以下	15～20	20～30	10～15	50～100	
精密調査		10～30	5～10	10～20	5～10		

注) サウンディングにはボーリング孔を必要とするものと、必要としないものがある。
 表中のサウンディングはボーリング孔を必要としないもののみを対象とする。
 ボーリング孔を必要とするサウンディングはボーリングの欄を適用する。

b) 調査地点の位置，間隔及び深度

1) 調査位置

調査位置，数量の決定には地盤の不均質性を考慮することが最も重要であり，過去に行われた調査結果，陸地の地形，音波探査や表面波探査などの物理探査手法によって，地盤の不均質性を推定することが有効である．調査地点の間隔を機械的に決めることはできるだけ避けるべきであるが，参考としてボーリング及びサウンディングの調査地点の間隔の目安を表-2.2 に示す．

なお，地盤調査の必要間隔は，地盤の複雑さ，地層構成の複雑さによって変えるべきである．また，設計段階で必要な項目，頻度と，施工段階で必要となる項目や頻度は異なることに留意する必要がある．さらに，押込み試験，急

速載荷試験などいわゆる本格的な載荷試験を実施する際には，載荷試験を実施するジャストポイントでの地盤調査が不可欠である．これは，本格的な載荷試験の結果を当該施工地点での代表的な杭の支持力特性であると考えられる場合，杭の支持力特性と地盤特性の相関性を把握しておくことが重要であるためである．すなわち，杭の支持力特性は地盤条件によって変わると考えるべきであり，広い設計施工サイトの中では地点ごとに地盤条件が少しずつ変化するので，地盤条件が変わっていることを考慮して杭の載荷試験結果を用いることが重要である．

2) 調査深度

調査深度は十分な支持力を有する地層を確認するまでとする．十分な支持力を有する地層は，施設の規模形式，規

模によって異なる。目安としては比較的規模の小さな施設や先端支持杭でない場合は N 値 30 以上、大型施設で杭の先端支持に期待する場合は N 値 50 以上の地層とする。

調査は、この層を数 m (杭径の 5 倍かつ 5 m 程度) 以上確認してから終了する。耐震性能照査を行う場合には、せん断波速度 300 m/s 以上となる地層 (工学的基盤) を確認するまでとする。

(2) 杭基礎の設計

a) 杭基礎の性能照査

杭基礎は上部構造を支えることが本来的な目的であるため、杭基礎に求められる要求性能は、上部構造物の性能を達成するという間接的なものとなる。つまり、上部構造物の要求性能が定まるとそれに応じて杭基礎に対する要求性能が決定されるということになる。

杭基礎の設計では、地盤調査結果や杭の載荷試験結果により性能を満足するように性能照査を行い、杭径、杭長、支持層への根入れ長、静的最大軸方向押し込み抵抗力を決定する。特に重要工事や、地盤条件のばらつきが大きい場合等々ときには、概略設計後に載荷試験を実施し、支持力を確認したうえで詳細な性能照査を行うことが望ましい。表-2.3 に各設計状態について照査手法、要求性能を簡単にまとめた。また、杭基礎の性能照査の手順を図-2.2 に示す。

b) 杭仕様の決定

杭の仕様は上記に述べた性能照査により決定する。なお、杭仕様の主な決定要因を表-2.4 に示す。

c) 港湾の基準における軸方向抵抗力の推定式

「港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省港湾局監修)」¹⁾ (以下、港湾基準という。) では、打込み杭の静的最大軸方向抵抗力を推定する際に、杭の先端抵抗と杭の周面抵抗に分けて算定し、和を取る方法を示している。杭の先端抵抗を推定する方法として、 N 値に基づいて計算する方法、支持力係数を用いて計算する方法、空洞拡張理論に基づいて計算する方法の 3 つの方法を示している。ただし、これらはいずれも、閉端杭に対するものであり、開端杭の場合には別途、杭先端が開放であることに対する考慮を必要とする。

1) 周面抵抗の算定方法

杭周面抵抗力は杭周面が接している各層における単位面積あたりの平均周面抵抗力に接触面積を乗じたものの総和として求めてよい。すなわち、式 (2.1) を用いることができる。

表-2.3 設計状態と照査方法

設計状態	主たる作用	性能照査手法	要求性能
永続状態 変動状態	自重、土圧、船舶接岸など レベル 1 地震動	信頼性設計法 (部分係数法) など	使用性
偶発状態	レベル 2 地震動など	数値解析法など	使用性 修復性 安全性

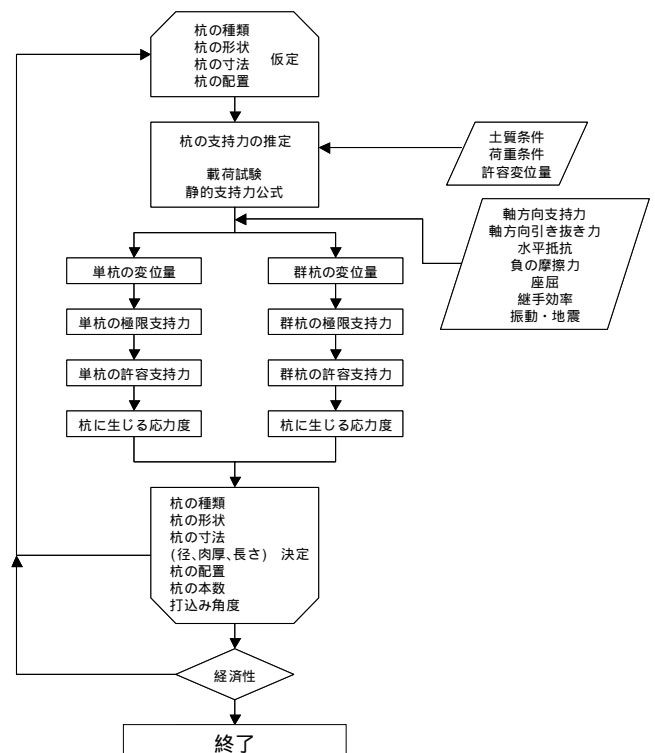


図-2.2 杭基礎の性能照査の手順¹⁾

表-2.4 杭仕様の決定要因

仕様項目	主な決定要因	備考
杭径	支持力、杭耐力 (応力度)、変位量	
杭長 (支持層根入れ長)	支持力、引抜き力	
板厚	変位量、杭耐力 (応力度)	打撃応力により決定する場合があります
材質	杭耐力 (応力度)	

$$R_{f_k} = \sum \overline{r_{f_{ki}}} A_{s_i} \quad (2.1)$$

ここに、

R_{f_k} : 杭周面抵抗力の特性値 (kN)

$\overline{r_{f_{ki}}}$: i 層の単位面積あたりの平均周面抵抗力 (kN/m²)

A_{s_i} : i 層において地盤と接している杭の周面積

(= 外周長 U_s × 層厚 l) (m²)

砂質土地盤に対しては、式(2.2)を用いることができる。

$$\overline{r_{f_{ki}}} = 2\overline{N} \quad (2.2)$$

ここに、

\overline{N} : i 層の平均 N 値

粘性土地盤に対しては式(2.3)を用いることができる。

$$\overline{r_{f_{ki}}} = \overline{c_a} \quad (2.3)$$

ここに、

$\overline{c_a}$: i 層の杭の平均付着力 (kN/m²)

ここで、杭の付着力の値は地盤の非排水せん断強さ c により次のように求めてもよい。

$c \leq 100$ kN/m² の場合 $c_a = c$

$c > 100$ kN/m² の場合 $c_a = 100$ kN/m²

しかし、杭の付着力を地盤の非排水せん断強さ c から求めることには理論的に問題もあるので、地盤の特性、杭の条件などに十分注意を払って、とり得る付着力の値について検討すべきである。

2) 先端抵抗の算定方法

i) N 値に基づいて計算する方法

砂質土地盤を支持層とする場合の杭先端抵抗力の推定には、式(2.4)を用いることができる。

$$R_{p_k} = 300NA_p \quad (2.4)$$

ここに、

R_{p_k} : 静力学的抵抗力算定式による杭の杭先端抵抗力の特性値 (kN)

A_p : 杭先端の有効面積 (m²)

開端杭の有効面積の設定にあたっては、杭先端の閉塞の程度を考慮に入れることが必要である (p.9 参照)。

N : 杭先端地盤の N 値

ただし、 N は式(2.5)によって算定する。

$$N = \frac{N_1 + \overline{N_2}}{2} \quad (2.5)$$

ここに、

N_1 : 杭先端位置での N 値 ($N_1 \leq 50$)

$\overline{N_2}$: 杭先端より上方へ $4B$ までの範囲内の平均の N 値 ($\overline{N_2} \leq 50$)

B : 杭の直径又は幅 (m)

式(2.4)は、Meyerhof (マイヤホフ) が砂地盤における静的貫入試験と標準貫入試験との相関性から提案した式の係数を実状に合わせて変更した式である。

なお、 N 値が 50 以上であるような地盤を支持層とした杭の極限先端抵抗力の推定にあたっては、50 より大きい N 値の信頼性が乏しく、また、そのように強固な地盤に対して式(2.4)がそのまま適用できるかどうか十分に確かめられていないので、注意が必要である。

粘性土地盤に杭の先端が根入れされている場合の杭の先端抵抗力の推定には、式(2.6)を用いることができる。

$$R_{p_k} = 6c_p A_p \quad (2.6)$$

ここに、

c_p : 杭先端位置での非排水せん断強さ (kN/m²)

なお、ここで用いる非排水せん断強さとしては、これまでは、一軸圧縮試験から求められる非排水せん断強さ c_u が用いられることが多かった。

ii) 浅い基礎の支持力理論の拡張

支持層が砂もしくは砂礫地盤の場合には、支持層のせん断抵抗角がわかれば、浅い基礎の支持力理論の拡張として杭の先端抵抗力を推定することができる。この場合、杭の先端抵抗力は式(2.7)によって求める。

$$R_{p_k} = N_q \sigma'_{v0} A_p \quad (2.7)$$

ここに、

N_q : Berezantzev (ベレザニエフ) による支持力係数 (図-2.3 参照)

σ'_{v0} : 杭先端における有効土かぶり厚 (kN/m²)

なお、図-2.3 から N_q を求める場合には、せん断抵抗角を求める必要がある。せん断抵抗角を求める場合には、 N 値から推定できる¹⁾。また、三軸圧縮試験によってせん断抵抗角を求めることもできる。

iii) 空洞拡張理論

杭先端付近が圧縮力によって破壊するときのモードとして、杭先端部付近の球状の剛性域の外側に塑性域が形成され、その外側の弾性域と釣り合うとする破壊モードが考えられる²⁾。この理論を空洞拡張理論と言う。この理論は支持層が砂もしくは砂礫層の場合に用いることができる。

空洞拡張理論による杭の先端抵抗力は次式で表される。

$$q_p = \frac{3(1 + \sin \phi'_{cv})}{(1 - \sin \phi'_{cv})(3 - \sin \phi'_{cv})} [I_{rr}]^{(4 \sin \phi' / (3(1 + \sin \phi')))} \times \left(\frac{3 - 2 \sin \phi'_{cv}}{3} \right) \sigma'_{v0} \quad (2.8)$$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta_{av}}$$

$$I_r = \frac{3G}{(3 - \sin \phi'_{cv}) \sigma'_{v0} \tan \phi'_{cv}}$$

ここに、

q_p : 単位面積あたりの先端抵抗 (kN/m²)

I_{rr} : 修正剛性指数

I_r : 剛性指数

ϕ'_{cv} : 限界状態でのせん断抵抗角 (°) で $\phi'_{cv} = 30 + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2$ とする。 $\Delta\phi_1$ と $\Delta\phi_2$ の値は、表-2.5 によるものとする。

Δ_{av} : 地盤の圧縮性を定める係数。 I_r の関数で、 $\Delta_{av} = 50(I_r)^{-1.8}$ 。

G : せん断剛性。 $G = 7000N^{0.72}$ (kN/m²) として求めてよい。 N は杭先端付近の N 値である。

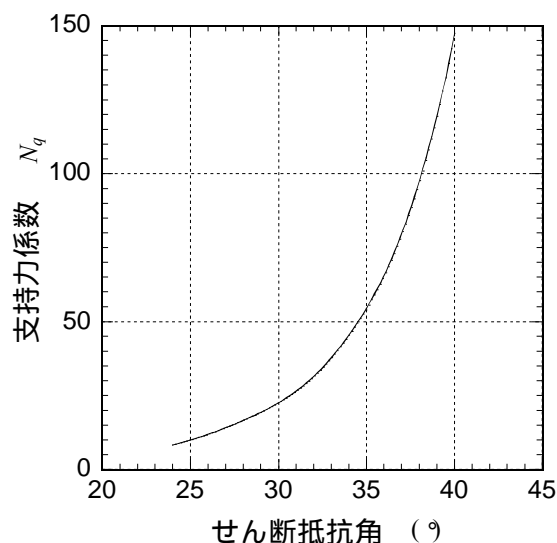


図-2.3 Berezantzev による支持力係数

表-2.5 砂及び礫の $\Delta\phi_1$ と $\Delta\phi_2$

(粒子形状に依存)	$\Delta\phi_1$ (°)	(均等係数)	$\Delta\phi_2$ (°)
丸い	0	均一 ($U_c < 2$)	0
やや角張っている	2	適度な粒度分布 ($2 < U_c < 6$)	2
角張っている	4	よい粒度分布 ($6 < U_c$)	4

iv) 開端杭の有効面積

以上に示した杭先端支持力の評価手法を開端杭に適用する場合には、個々の式における A_p (有効断面積) については、先端閉塞率を考慮することが必要である。過去の実績より、 $R_{pk} = 300N\alpha A_p$ とした場合、杭径 600 mm 以下の場合で $\alpha = 0.3 \sim 1$ 、杭径 600 mm を越えるものは $\alpha = 0.2 \sim 1.4$ 程度となっている¹⁾。

なお、閉塞率は施工、地盤条件の影響を受けるので、試験施工において載荷試験を行い、数値を把握することが重要である。本稿の 4.3 節に先端閉塞効果に関する理論が記載されているので、参照されたい。

また、軸方向押込み抵抗力の設計用値は、以下の内容を勘案した適切な数値とする。

地盤から決まる要素

- N 値、層厚、支持地盤下層の地盤強度 (支持地盤が良好でない場合)
 - 群杭の支持力への作用 (杭間隔の考慮)
 - 中間層、薄層支持による低減
 - 負の周面抵抗
- 杭材から決まる要素
- 杭材の圧縮応力度
 - 継手による低減
 - 杭体の細長比による低減
- 変位から決まる要素
- 杭頭の沈下量

d) 各基準の支持力推定式

港湾基準以外の主な基準における静的支持力推定式を表-2.6 に示す。

(3) 打ち込みハンマーの選定

ハンマーの選定にあたっては、土質条件や杭の諸元などをもとに、打込みに適したハンマーを選定する。

a) 油圧ハンマー

油圧ハンマーは、その多くがラムの落下高さを 10 cm 程度ごとに調整できるようになっており、一般的にハンマーの適用杭種や杭径が広い。したがって、大きなハンマーのラム落下高さを下げて小さな径の杭を打込む例も多く、適正ハンマーを一義的に選定することは難しい。鋼管杭打設時の油圧ハンマー選定の例を図-2.4 に示す。

油圧ハンマーは近年大型化が進められ、新しいハンマーも開発されている。したがって、ハンマーの選定にあたっては各油圧ハンマーの規格を確認する必要がある。現在使用されている主な油圧ハンマーの仕様例を表-2.7 に示す。

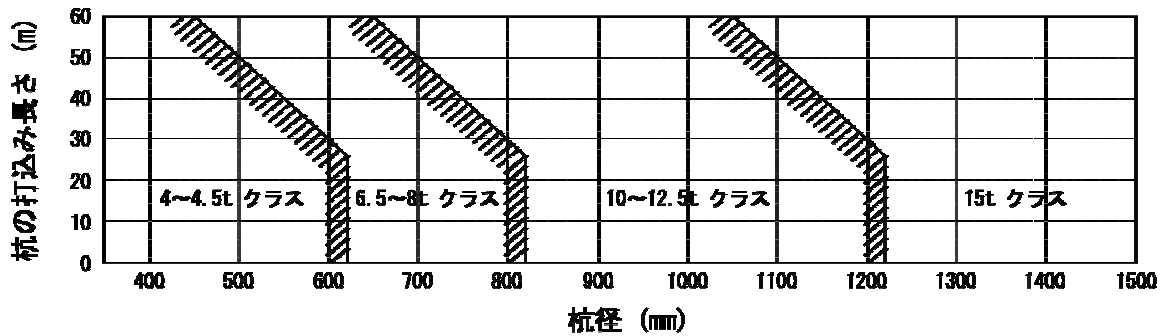
表-2.6 主な基準における静的支持力推定式

構造物	基準	静的支持力推定式（打込み杭）
道路	道路橋示方書・同解説 ³⁾ 平成 14 年 3 月 (日本道路協会)	$R_u = q_a A + U \sum L_i f_i$ R_u : 極限支持力 (kN) q_a : 杭先端極限支持力度 (kN/m ²) A : 杭先端面積 (m ²) U : 杭の周長 (m) L_i : 層厚 (m) f_i : 最大周面摩擦力度 (kN/m ²) <div style="text-align: center;"> <p>杭先端地盤の極限支持力度 q_a の算定図</p> </div>
鉄道	鉄道構造物等設計標準・同解説 ⁴⁾ 平成 12 年 6 月 (鉄道総合技術研究所)	$R_{vd} = R_f + R_p$ $R_p = q_p A_p$ $R_f = U \sum r_i L_i$ R_{vd} : 杭の設計鉛直支持力 (kN) R_f : 杭の最大周面支持力 (kN) R_p : 杭の基準先端支持力 (kN) q_p : 杭の基準先端支持力度 (kN/m ²) 先端地盤, 杭径, 根入れ長により算出 A_p : 杭先端面積 (m ²) U : 杭の周長 (m) r_i : 杭の最大周面支持力度 (kN/m ²) L_i : 層厚 (m)
建築	建築基礎構造物設計指針 ⁵⁾ 平成 13 年 10 月 (日本建築学会)	$R_u = R_p + R_f$ $R_p = q_p A_p$ q_p : 300N (砂質土), $6c_u$ (粘性土) 杭先端閉塞効果を考慮する $R_f = \tau L \Phi$ R_u : 極限支持力 (kN) R_p : 極限先端支持力 (kN) q_p : 極限先端支持力度 (kN/m ²) R_f : 極限周面摩擦力 (kN) A_p : 杭先端の閉塞断面積 (m ²) τ : 極限摩擦力度 (kN/m ²) L : 層厚 (m) Φ : 杭の周長 (m)

もし、施工が不可能となった場合はハンマーの再選定や補助工法（オーガー併用など）の適用を検討する。

また、最近では波動理論による打込み検討ができ、施工性や打撃による杭体応力の推定が可能である。波動理論による杭の事前打込み解析とは、杭を弾性体、地盤の抵抗をバネ、スライダ（弾塑性）とダッシュポットでモデル化（図-2.5）し、一次元波動理論に基づいた波動伝播モデル

により、杭頭に打撃力を受けた杭～地盤の挙動をシミュレートし、その結果から、杭体仕様及び施工条件の妥当性を検討する方法である。事前打ち込み解析では、近隣の施工結果などを反映させた適切な地盤パラメータを採用することが重要である。図-2.6 に杭の事前打ち込み解析実施フローを示す。



- (注) 1. 杭の打込み長 15 m 以上で下記の条件の場合には 1 ランク大きい規格を用いる。
 N 値 30 以上で層厚 3 m 以上の砂、砂れきの中間層を打ち抜く場合。
 層厚 3 m 以上の粘土 (N 値 15 以上) 等の中間層を打ち抜く場合。
 2. 杭の打込み長 (m) にはヤットコ打ち長さ (m) を含む。

図-2.4 鋼管杭打設時の油圧ハンマー選定例

表-2.7 油圧ハンマーの仕様例

製作会社	型式 (呼称)	ハンマ							パワーユニット				備考	
		寸法		全重量 t	ラム重量 t	ラムストローク m	打撃回数 打/min	1打撃の仕事量 kgf·m	種類	出力 PS	回転数 rpm	油圧圧力 kgf/cm ²		重量 t
		径 m	全長 m											
日本車輛製造	NH-20	0.83	4.47	5.4	2.0	1.6F	30~90	3,200	Hino EH700	110	2,000	185	2.4	ガイドパイプの間隔 330 330 330 600 600 600
	NH-40	1.05	5.62	9.8	4.0	1.52F	30~80	6,080	Hino EM100	144	1,800	210	4.3	
	NH-70	1.25	5.73	14.3	7.0	1.28F	30~72	8,960	"	144	1,800	210	4.3	
	NH-100	1.35	7.98	22.5	10.0	1.44F	27~62	14,400	"	155	2,000	210	4.3	
	NH-115B	1.68	8.51	27.5	11.5	1.8F	23~62	20,700	"	320	2,000	300	6.4	
	NH-150B	1.9	8.42	33.5	15.0	1.6F	20~52	24,000	"	320	2,000	300	6.4	
日立建機	HNC-65	1.3	6.96	12.3	6.5	1.2	20	7,800	Diesel	140	1,750	175	4.4	前・後傾20°
	HNC-80	1.3	7.36	14.2	8.0	1.2	20	9,600	"	140	1,750	175	4.4	
	HNC-100	1.3	7.88	16.8	10.0	1.2	20	12,000	"	152	2,000	185	4.4	
	HNC-125	1.46	6.92	21.0	12.5	1.2	20	15,000	"	171	2,000	240	5.0	
	HNC-125 (斜杭打)	1.55	6.88	24.8	12.5	1.2	22	15,000	"	171	2,000	240	5.0	

製作会社	型式(呼称)		S-90	S-200	S-280	S-400	S-500	SC-110	SC-150	SC-200
IHC	能力									
	最大打撃エネルギー/回	t·m	9.2	20.4	28.6	40.8	51.0	10.7	14.3	20.9
	最小打撃エネルギー/回	t·m	0.3	0.7	1.0	2.0	2.0	0.5	0.6	1.0
	打撃回数 (最大打撃エネルギー時)	回/分	50	45	45	45	45	45	45	45
	重量									
	ラム	トン	4.5	10.0	13.6	20.0	25.0	7.9	11.0	13.6
	本体重量(ラムを含む)	トン	9.6	24.5	29.0	47.0	55.0	14.1	18.7	26.5
	寸法									
	本体外径	mm	610	915	915	1220	1220	1020	1020	1330
	本体長さ	mm	7880	8920	10190	9400	10200	5600	6380	5660
油圧仕様										
作動圧	bar	280	250	300	250	300	260	280	280	
油流量	t/分	220	700	750	1400	1400	460	460	750	
原動機	kW	40	450	450	880	880	255	255	400	
油圧ホース(内径)	mm	32	50	2×50	2×50	2×50	38	38	50	

注) F は強制落下方式であることを意味する。

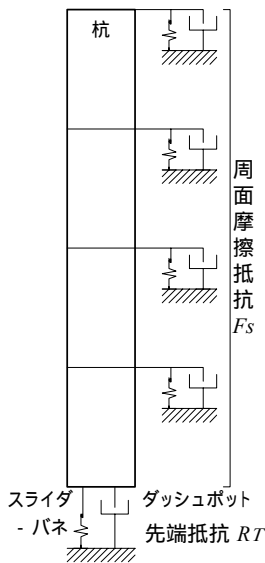


図-2.5 波動解析モデル

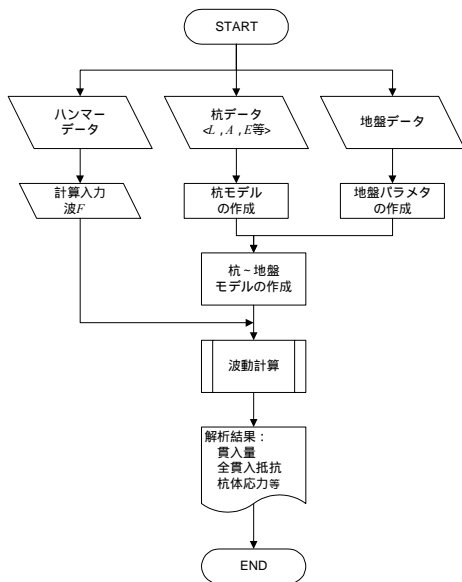


図-2.6 杭の事前打ち込み解析実施フロー

b) バイブロハンマー

油圧ハンマーと同様に、振動打ち込み工法（バイブロハンマー工法）についても近年施工機械の大型化が進み、本設杭の施工にも使用される場合が多くなってきている。バイブロハンマーは、主として杭の建て込みから支持層へ到達するまでの施工に使用することが多く、その場合、電流値の変動を管理することにより支持層までの到達を確認した後、油圧ハンマーを用いて支持層への根入れ施工を行う。

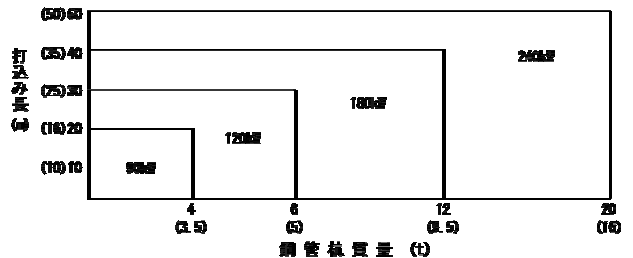
バイブロハンマーにより支持層へ根入れし、打ち止めまで行う場合、杭の打ち込みの原理は打撃工法による打ち込みとは異なるため、抵抗力の算定については注意が必要で

ある。この工法を利用する場合には、打ち止め部付近で打撃打ち込みを実施するか、載荷試験を実施して対象地盤の抵抗力特性を確認することが望ましい。標準的なバイブロハンマーの選定例を図-2.7に、現在使用されている主なバイブロハンマーの仕様例を表-2.8に示す。

(4) 試験施工の実施の判断

試験施工は、実杭施工に先立ち、設計において決定された杭について、施工性や打ち止め条件、載荷試験による支持力の確認など、実杭の施工管理方法を確立するのに必要な資料を得るために実施するものである。ここでいう試験施工とは、載荷試験による支持力確認の実施を含むものを指している。一般に、支持層深度や打ち込み性状のみを確認するために、本杭をあらかじめ長くして、その施工現場で最初に打設する杭のことを試験杭と呼ぶことがあるが、本報告書ではそれを確認試験杭と位置づけ、試験施工には含めない。

試験施工の要否は、既往の資料を調査し、施工地点における杭の施工性や支持力が十分把握されているかどうかを確認してから決定する。施工性や支持力が十分把握されている場合や施工の規模が小さい場合については、試験施工を省略することができる。施工性が十分把握されていない場合、既往の資料と杭の仕様が異なる場合、土質条件が複雑であったり支持層に傾斜や不陸があったりするなど支持力の確認が必要あるいは不明確と判断された場合などでは、必ず試験施工を実施する。



- 注1 表の縦軸・横軸の()内の数値は、鋼管矢板に適用する。
- 注2 バイブロハンマーには鋼管専用チャックの装備を標準とする。外径 600 mm 未満の鋼管杭・鋼管矢板には材料頭部にチャッキングプレートを取り付け、標準チャックを装備するバイブロハンマーで把持する。
- 注3 杭の打込み長 15 m 以上で次の条件の場合には、1 ランク上位の規格を用いる。N 値 30 以上で層厚 3 m 以上の砂・砂礫の中間層を打ち抜く場合。N 値 15 以上で層厚 4 m 以上の粘性土の中間層を打ち抜く場合。
- 注4 鋼管矢板の場合は、杭質量に継手質量を加える。
- 注5 打込み可能な N 値は中間層において N 値 50 以下、支持層においては換算 N 値 100 以下を目安とする。

図-2.7 標準的なバイブロハンマーの選定例

表-2.8 パイプロハンマーの仕様例 (90 kW 以上)

製作会社	型式	駆動方式	寸法			起振機				原動機出力 kW	所要電機容量 KVA	質量		備考
			全高	全幅	全奥行	振動数	起振力	無負荷時振幅	偏心モーメント			本体	操作装置	
			mm	mm	mm	Hz	kN	mm	N・m			kg	kg	
エコー	EP-120	電気式	3675	2470	1265	18.3	0~547.0	0~5.1	0~403.8	90	300	9300	-	鋼管チャック時
	EP-180	電気式	4600	2432	1404	16.7	0~844.0	0~7.4	0~754.6	135	400	12000	-	鋼管チャック時
	EP-240	電気式	8143	3452	1488	9.3	0~1030.0	0~17.0	0~2940.0	180	600	23500	-	鋼管チャック付
	EP-270	電気式	8143	3452	1722	11.0	0~1432.0	0~16.0	0~2940.0	200	600	23500	-	鋼管チャック付
	EP-320	電気式	8868	3730	1720	11.3	0~1824.0	0~12.0	0~3528.0	240	800	29500	-	鋼管チャック付
調和工業	ZERO-120VR	電気式	3619	1770	1310	18.3	0~567.9	0~7.2	0~421.8	90	300	7140	800	
	ZERO-160VR	電気式	3984	1968	1411	16.3	0~681.1	0~8.2	0~637.7	120	400	9800	850	
	ZERO-200VR	電気式	6810	2650	1693	13.3	0~1116.2	0~9.8	0~1569.6	180	600	19800	1350	鋼管チャック付
	ZERO-320VR	電気式	8205	3500	1785	11.7	0~1943.5	0~13.5	0~3531.6	240	800	31300	2530	鋼管チャック付
	ZERO-400VR	電気式	8101	3714	1850	13.3	0~2232.4	0~9.2	0~3139.2	360	1200	42960	2700	鋼管チャック付、連動型
	ZERO-640VR	電気式	9600	4460	2380	11.7	0~3887.0	0~15.2	0~7063.2	480	1600	62300	5000	鋼管チャック付、連動型
	VM2-25000A	電気式	7106	2650	1470	10.3	1046.0	19.4	2452.5	150	500	15600	1300	鋼管チャック付
	VM4-30000A	電気式	8564	2950	1581	11.0	1431.6	15.5	2943.0	200	600	21500	1300	鋼管チャック付
	VM4-36000A	電気式	8689	3500	1591	11.3	1812.9	11.6	3531.6	240	800	27100	1400	鋼管チャック付
	VM4-40000A	電気式	6579	3145	1650	9.3	1364.4	18.7	3924.0	300	1000	31810	-	鋼管チャック付
	VM4-50000A	電気式	6645	3145	1640	9.3	1705.5	22.5	4905.0	360	1200	32760	-	鋼管チャック付
	KM2-12000EH	電気式	2850	1190	1202	9.7	443.0	15.0	1200.0	90	250	11000	550	鋼管チャック付
	KM2-17000EH	電気式	3000	1540	1402	9.3	585.0	18.9	1670.0	120	300	12000	600	鋼管チャック付
	VM2-25000EH	電気式	3360	1800	1470	10.3	1050.0	21.0	2450.0	150	500	15500	700	鋼管チャック付
	VM4-30000EH	電気式	4200	1550	1588	11.0	1430.0	20.0	2940.0	200	600	20000	650	鋼管チャック付
	VM4-40000EH	電気式	4335	2900	1511	9.3	1370.0	15.0	3920.0	300	600	33500	650	鋼管チャック付
VM4-50000EH	電気式	4400	2900	1527	10.3	2100.0	19.0	4900.0	360	1200	34000	900	鋼管チャック付	
日本車両	VS-500	電気式	3877	1610	1183	18.3	544~731	6.7~9.0	402.1~539.4	90	300	6900	520	

(5) 試験施工 (載荷試験を含む)

a) 試験施工の目的

試験施工の目的は、下記項目の調査、確認、判定を行い、実杭の施工管理方法を確立することである。

1) 施工性と打ち止め条件

施工中および打ち止め時の入力エネルギー (ハンマー落下高)、貫入量、リバウンド量などを計測し、打ち止め深度、支持層への所定根入れ長の確認、中間層の打ち抜き可能性を判断し、施工機械の適性や打ち止め条件の確認を行う。施工機械の適性は、打ち止め時において、油圧ハンマーの場合は最大能力の 70 ~ 80 % 程度の入力エネルギー (表-2.7 参照) であることを確認する。パイプロハンマーの場合は電流値が定格の 100 ~ 150 %、杭の貫入速度が 10 mm/sec 以下になること (表-2.9 参照) を確認する。

表-2.9 パイプロハンマー運転時の電流値

定格出力 (kW)	90	120	180	240
定格電流値 (A)	180	240	360	480
定格電流値 (A) の 150% 値	270	360	540	720

- 注1 発動発電機の標準的な周波数 (60Hz) で運転した場合の数値を示す。
- 注2 電圧値 380 V ~ 440 V の範囲内にある場合の数値を示す。
- 注3 連続運転時間は定格電流値で 60 分、定格電流値の 150 % 値では 10 分間以下とする。
- 注4 定格電流値の 150 % 値で制限時間を超えて運転するとパイプロモータ焼損の危険がある。

2) 杭体の健全性

所定の深度まで杭を破損することなく施工可能か判断する。施工時の打撃応力は、杭材の公称降伏応力値の 80 ~ 90 % 程度を目安とする。

総打撃回数は地盤と杭長によって差があるが、杭体の損傷を防ぐ目安として、3000 回以下とする。過去の試験によると、1 万回以上打撃しても材質の点で問題ないことが確認されているが、やむを得ない場合を除いて避けるべきである。また、1 打撃あたりの貫入量が 2 mm 以下で打撃しつづけると、杭体だけでなく、ハンマーの損傷の原因となるので注意する。

3) 支持力確認

動的支持力管理式は支持層を確認するために用い、支持力の確認には用いないのが望ましい。試験施工では、動的載荷試験や静的載荷試験を実施することで杭の支持力確認を行う。実杭施工では、この載荷試験結果を反映して修正した動的支持力管理式により施工管理を行う。

施工管理方法の修正として、事前に載荷試験を実施する場合には、載荷試験結果に基づいて Hiley (ハイリー) の式を修正することで修正動的支持力管理式を現場ごとに設定できる。このときに利用可能な載荷試験の方法としては次のものがある。

施工時の衝撃載荷試験および養生後の載荷試験 (押し込み試験、急速載荷試験、衝撃載荷試験) を実施した場合

施工時の衝撃載荷試験のみ実施した場合

さらに、それぞれの各ケースで、全体の支持力を計算する方法と先端と周面を分離して計算する方法を提案することが出来る。具体的な計算方法は、6.3節を参照されたい。

4) 地盤条件に適合した杭先端形状の選定

密な砂層、礫、転石、玉石等を含む層に貫入させる場合は、打込みに対する補強および打ち込み性の向上のための杭先端補強バンドを取り付ける。ただし、設計において摩擦杭としている場合には、杭先端補強バンドを外側には取り付けないように注意する。また、支持層における先端支持力の不足に対しては、十字リブ等の加工により支持力を向上させる。

b) 試験杭の選定

1) 位置と本数

試験杭は、本杭の施工性や支持力などの情報が十分得られるように、その位置と本数を決定しなければならない。なお、試験施工は、通常、最初に施工する本杭を用いて実施することが多い。

試験杭の位置は、杭の配置、地盤構成の状況などを考慮し、支持層の状態がわかるような位置を選ぶ必要がある。とくに、試験杭の貫入挙動とボーリング調査データとを対比して、概略の傾向を把握することが重要であるので、試験杭の位置はボーリング調査位置に近い方がよい。また、支持層が極端に変化しているような場合は、試験杭の本数を増やす方がよい。

2) 使用する杭

試験杭は基本的には寸法、種別、先端形状等が本杭と同一のものを使用する。ただし、高止まりや支持力不足が生じる場合があるので、それらに対応できる仕様とする。具体的には、高止まりの場合は、設計の断面変化位置とのずれが問題とならないように板厚構成を調整する。支持力不足の場合は、設計より長く打ち込むことになるため、上杭を1～2m長く準備する。

衝撃載荷試験を実施する場合は、打ち止め付近でセンサーが水没する可能性があるため、潮位の影響も考慮して、杭長を長くしておく。

c) 測定項目

試験杭の測定項目で重要なことは、施工の方法および施工記録を実杭施工に反映できるように詳細に整理しておくことである。表-2.10に必要な測定項目と報告内容を示す。この中で、打ち止め管理は重要な項目であり、柱状図、杭の根入れ長さ、入力エネルギー(ハンマー落下高)、貫入量、リバウンド量、支持層の状態などを詳細に記述する。貫入

量、リバウンド量は図-2.8のように測定し、図-2.9のように貫入量、総打撃回数などを記録する。打撃回数は適正な値(3000回を目安)を超えると、鋼管杭の杭頭座屈の原因となることもあるので注意が必要である。なお、打ち止め時の支持力は、載荷試験により確認する。

衝撃載荷試験を実施した場合には、ハンマー打撃による杭体内の応力の発生状況などを知ることができ、ハンマーの適正な選定や杭材断面の大きさを検討する資料を得ることができる。

d) 支持力確認方法(載荷試験)

支持力確認のための載荷試験は、動的載荷試験(衝撃載荷試験、急速載荷試験)と静的載荷試験(押し込み試験)がある。表-2.11に各試験の特徴を示す。押し込み試験と急速載荷試験は、かなり精密な調査であり、十分なエネルギーで載荷試験ができるため、杭施工後、十分に養生してから載荷試験をするのが望ましい。また、これら二つの方法によるときは、必ずジャストポイントで地盤調査をする必要がある。これは、ジャストポイントで地盤調査をすることにより、載荷試験結果と地盤条件の関連性を明確にするためであり、このような関連性を把握することで、載荷試験結果を施工区域全般の地盤の支持力特性の評価に使えるようになる。なお、載荷試験の詳細は、5章「各種載荷試験方法の特徴および適用性」を参照されたい。

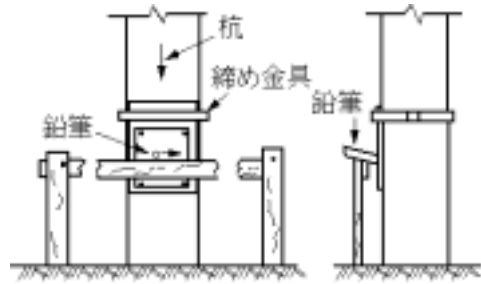
施工時に衝撃載荷試験を実施する場合は、あわせて養生後の載荷試験も実施し、セットアップ後の支持力確認することが望ましい。なお、養生後に衝撃載荷試験を実施する場合には、セットアップにより杭の貫入抵抗が増大するために、ハンマーのエネルギー不足により、貫入抵抗を十分に把握できなくなることが起こりうるため、養生期間の取り方には十分な注意が必要である。

載荷試験を複数実施する場合に異なる種類の載荷試験を組み合わせる例を表-2.12に示す。特に、周面摩擦力が大きいと判断される場合や、支持力確認の精度が要求される場合などでは、養生後試験を実施する。支持力に余裕のあることが確認できた場合では、養生後試験を省略することができる。養生後試験の養生期間は、「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」⁹⁾では、砂質土5日、粘性土14日以上とするとしているが、この記述にこだわることなく、試験の目的、ハンマーの能力、杭の断面性能などから適切な養生期間を決定することが必要である。

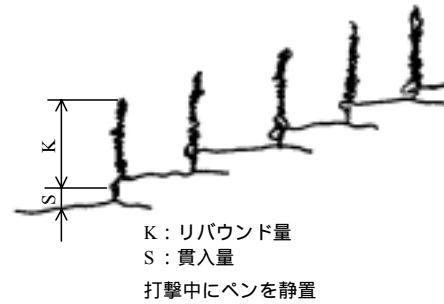
なお、現場の規模が大きく、時間的制約が少ない場合は、急速載荷試験や押し込み試験を実施するのがよい。

表-2.10 試験杭の測定項目

項目	報告内容	
施工準備	一般事項	施工年月日, 天候, 地盤条件 杭仕様 (杭種, 寸法・形状) ヤットコ
	施工機械仕様	杭打ち機 ハンマー
打ち込み時	一般事項	施工方法および施工順序 施工精度 (鉛直および平面的位置ずれ) 施工の際に発生した特殊な事項 (周辺地盤の変状, 杭体の異常, 騒音や振動など) 施工時地盤高
	作業開始時刻および作業時間	準備 建て込み 溶接 打ち込み
	施工記録	打撃回数 ハンマー落下高 貫入量 リバウンド量
打ち止め時	一般事項	杭頭標高 杭先端標高 根入れ長さ 支持層の確認
	施工記録	ハンマー落下高 貫入量 リバウンド量 総打撃回数
支持力確認	載荷試験	試験方法 周面摩擦力 先端支持力 セットアップ率



(a) 貫入量リバウンド量の計測の方法



(b) 貫入量, リバウンド量の計測結果の例

図-2.8 貫入量, リバウンド量の測定例

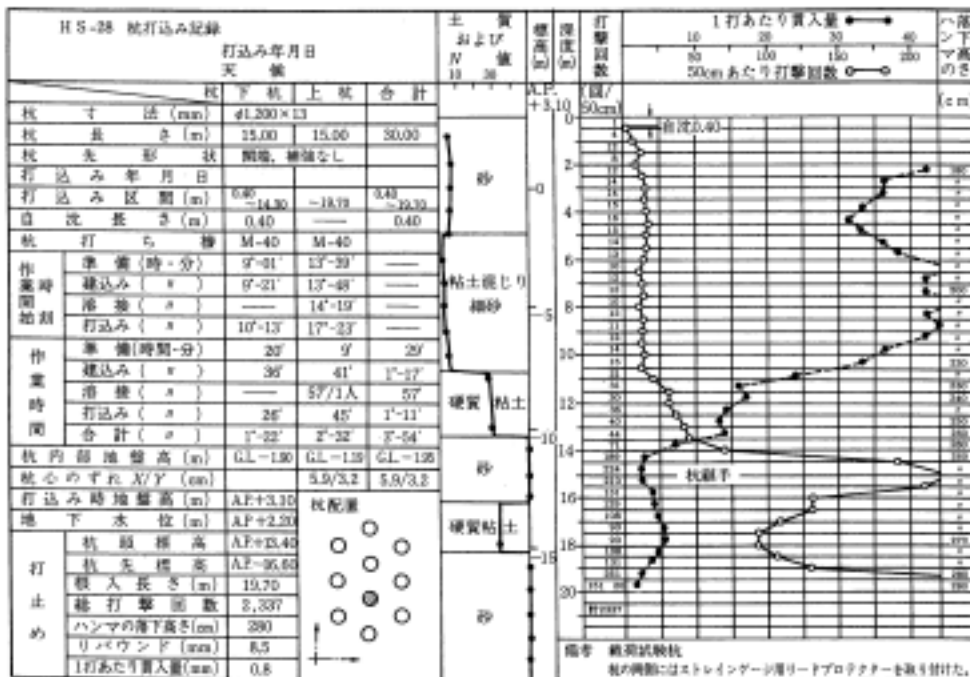


図-2.9 施工記録の例⁶⁾

表-2.11 押込み試験，急速載荷試験，衝撃載荷試験の特徴

	試験イメージ	作業性	荷重の性質・結果の解析	養生期間
押込み試験		反力杭が必要 装置が大掛かり	載荷中の杭体は全圧縮 地盤の抵抗は静的 測定結果をそのまま設計に利用できる。	砂質土 5 日，粘性土 14 日以上 「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」 ⁶⁾ に準拠
急速載荷試験		反力杭が不要 試験時間が短い (組立 2 ~ 3 日，試験 1 日，解体 1 日)	載荷中の杭体は全圧縮 杭体が慣性抵抗を持つ 地盤の抵抗は動的 除荷点法解析	砂質土 5 日，粘性土 14 日以上 「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」 ⁶⁾ に準拠
衝撃載荷試験		現場のハンマーが利用可能 試験時間が短い(1 ~ 2 時間)	載荷中の杭体に波動現象 地盤の抵抗は動的 波動理論に基づいたシミュレーション解析	短期間で実施可能 大きな貫入抵抗が予想される場合には，ハンマーの能力に応じて養生期間を短くする。

表-2.12 複数の載荷試験を実施する場合の組み合わせ例

	施工時試験	養生後試験
1	衝撃載荷試験	押込み試験
2		急速載荷試験
3		衝撃載荷試験
4	なし	押込み試験 + 急速載荷試験
5		押込み試験 + 衝撃載荷試験
6		急速載荷試験 + 衝撃載荷試験

e) 設計・施工法見直し

支持層深度や根入れ長が設計と異なる場合，載荷試験による支持力が設計支持力を下回る場合，施工性が著しく劣る場合などは，必要に応じて設計や施工方法の見直しを行う（杭長や断面変化位置の調整，先端十字リブ等の加工，ハンマーの変更等）．設計や施工法を見直した後，再度試験施工を実施し，実杭の施工管理方法を確立する．

(6) 施工管理方法の決定

施工管理方法は，試験施工での結果を基に，杭体の健全性を保ちながら支持層に確実に根入れできることと，支持力確認が適切に行える条件を選定する．具体的には打ち止

め深度の決定，採用するハンマーの打ち止め時の適正な入力エネルギーの設定，その際の貫入量・リバウンド量の目安の設定，および動的支持力管理式を決定する．

以下に各項目についての説明をする．試験施工が必要ないと判断された場合は，既往のデータや近隣での施工実績等に基づいて適切な施工管理方法を決定する．

a) 打ち止め深度の決定

載荷試験結果を含む試験施工の結果を基に，適切な打ち止め深度を決定する．載荷試験の結果から抵抗力に十分な余裕があることが確認され，試験施工において打撃回数が 3000 回を超える，あるいは貫入量が 2 mm を切るなど，施工が著しく困難になると予想される場合は，再度試験施工を実施し支持力を確認したうえ，打ち止め深度を浅く設定することも可能である．ただし，支持層上端の不陸や強度のバラツキなどを十分考慮する必要がある．

b) 入力エネルギーの設定

試験施工の結果に基づいて，杭体を損傷させず効率的に施工できる打ち止め時の入力エネルギーを設定する．その際，地盤強度のバラツキにより施工不能になる杭が出ない

ようハンマーの能力に対し 20 % 程度の余裕を確保しておくことが望ましい。また、設定した入力エネルギーに対し施工機械能力に著しく余裕がある場合は、施工機械の変更も検討する。

c) 貫入量・リバウンド量の目安

貫入量・リバウンド量の目安は、試験施工で得られた値とする。これらの値は、動的支持力管理式のための数値であるとともに、適正な施工が行われていることの照査となる。例えば、実杭施工において試験施工と著しく異なる値となった場合は、杭体の損傷やハンマーの故障などトラブル発生を疑う必要がある。また、動的支持力管理式の精度を確保するうえで、試験施工の貫入量・リバウンド量の傾向に近い状態で施工されていることを確認する必要がある。

d) 動的支持力管理式の決定

試験杭施工においては、動的支持力管理式は支持力確認には用いず載荷試験により支持力確認を行うとした。実杭施工においては、載荷試験結果を含む試験施工の結果を基に動的支持力管理式を修正して用いる。具体的な修正方法については、6.3 節を参照されたい。試験施工時から仕様の変更（入力エネルギー、杭外径等）があった場合は、それに応じて動的支持力管理式へ補正を加えなくてはならない。

従来の動的支持力管理式はあくまでも参考として用いる。以下に従来の動的支持力管理式を紹介する。

港湾基準では Hiley の式が示されている¹⁾。この式は杭の極限支持力が打込み時の貫入抵抗に等しいと仮定し、損失を除いた有効エネルギーが、杭が抵抗に逆らって貫入するときになす仕事および杭、地盤、キャップなどを弾性変形させるときになす仕事に費やされるものとして、エネルギーの平衡方程式により得られる。実用的にはこれを簡略した Hiley の簡略式が一般的に用いられている。

その他各基準でも Hiley 式を簡略した旧建設省告示の式（通称を 5S の式という）、波動理論から導いた“道示式”などが示されている。以下に各動的支持力管理式を示す。

1) Hiley の簡略式

$$R_{du} = \frac{e_f F}{S + \frac{K}{2}} \quad (2.9)$$

ここに、

R_{du} ：杭の動的最大軸方向抵抗力 (kN)

e_f ：ハンマーの効率，上式では 0.5 とする。

S ：杭の貫入量 (m)，最後の 10 ~ 20 回の打ち込みに対

する 1 回当たりの平均貫入量 (m)

K ：リバウンド量 (m)

F ：打撃エネルギー (kN m)

油圧ハンマーの場合、 $F = 2W_H \times H$

H ：ハンマーの落下高 (m)

W_H ：ハンマーの重量 (kN)

2) 道示式

$$R_a = \frac{1}{3} \left(\frac{AEK}{e_0 l_1} + \frac{\bar{N} U l_2}{e_f} \right) \quad (2.10)$$

ここに、

R_a ：杭の許容支持力 (kN)

A ：杭の純断面積 (m²)

E ：杭のヤング係数 (kN/m²)

l_1 ：動的先端支持力算定上の杭長 (m)

l_2 ：地中に打込まれた杭の長さ (m)

U ：杭の周長 (m)

\bar{N} ：杭周面の平均 N 値

K ：リバウンド量 (m)

e_0, e_f ：補正係数

3) 5S の式

i) 長期応力に対する基礎杭の先端の地盤の許容支持力

$$R_a = \frac{F}{5S + 0.1} \quad (2.11)$$

ii) 短期応力に対する基礎杭の先端の地盤の許容支持力

$$R_a = \frac{2F}{5S + 0.1} \quad (2.12)$$

ここに、

F ：ハンマーの打撃エネルギー (kN m)

油圧ハンマーの場合、 $F = 2WH\gamma$

S ：杭の貫入量 (m)

W ：ハンマー重量 (kN)

H ：ハンマー落下高 (m)

γ ：換算係数

4) パイプロハンマー工法の打止め管理式⁷⁾

$$R_a = \frac{1}{3} \left(\frac{P_w}{V_v} \cdot \alpha + \frac{NUI}{e_f} \right) \quad (2.13)$$

ここに

R_a ：杭の許容支持力 (kN)

P_w ：モータの全消費電力 (kW) で次式により求める

$$P_w = 1.3 \times I_A \times E \times 10^{-3}$$

I_A : 電流 (A)

E : 電圧 (V)

V_v : 杭の変位速度 (m/sec) で次式により求める

$$V_v = 2 \times A_v \times f$$

A_v : 計算振幅 (m) で次式により求める

$$A_v = \frac{K / g}{W_v + W_p}$$

K : 偏芯モーメント (N m)

g : 重力加速度 (= 9.8 m/sec²)

W_v : パイプロハンマーの振動質量 (kg)

W_p : 杭質量 (kg)

f : 振動周波数 (Hz)

α : 補正係数 (= 1.5 程度を目安とする)

N : 杭周面平均 N 値

U : 杭の周長 (m)

l : 杭の根入れ長さ (m)

e_f : 補正係数 (= 0.25)

(7) 実杭施工

実杭の施工は、試験杭施工で決められた修正動的支持力管理式を用いた施工管理方法に基づいて、すべての杭について、入力エネルギー（ハンマー落下高）、リバウンド量、貫入量を計測して、支持層および支持力確認を行う。

施工中にトラブルが発生した場合は、施工管理の記録が原因究明と対策のための重要な判断資料となる。特殊な条件や施工中に生じた問題は詳細に記録しておく。

(8) トラブル発生時の対応について

杭施工時のトラブルとして、支持力不足、高止まり、座屈などによる杭体の損傷がある。トラブルの具体的事例、対策は、本報告書の付録を参照されたい。

a) 本報告書におけるトラブルの定義

用語の混乱を避けるため、本報告書で問題とするトラブルを以下のように定義する。あわせて図-2.10 に図解する。

1) 高止まり

硬い土層があるなどで、予定深度まで杭が打ち込めないこと。

これについては、図-2.10 に示したように、中間に硬い層があり、それを打ち抜くことが出来ない場合（-a）と、支持層が想定より浅いところにあるか、支持層があまりにも硬質なために所定の深度まで支持層に根入れできない場合（-b）とがある。

2) 支持力不足

予定深度においても必要な鉛直押し込み支持力（又は引抜き支持力）が得られないこと。

この課題については、支持層に関する問題、中間層に関する問題、支持力評価方法の問題に分けることができる。支持層に関する問題では、支持層の不陸などにより -b とは逆に支持層が想定より深いところにあるために支持層に届かない（-a）、所定深度までの打設では支持層への根入れが不足する（-b）という問題とともに、支持層が想定以上に風化しているために、想定どおりの支持性能を有していない（-c）などの問題が生じることが考えられる。

中間層に関する問題では、中間層の周面摩擦力が想定より小さい（-d）、中間層に支持層がある場合でもその層が薄い、あるいは弱いなどのために、支持層として期待できない（-e）などの問題が生じることが考えられる。

従来、施工管理方法として、動的支持力管理式を用いて打ち止め管理が行なわれているが、この式よりほかに現場での打設時の支持力評価方法が普及していないため、この管理式で支持力を評価する例が非常に多い。この場合に時として、支持力不足といった判断を下すことがある（-f）。この支持力管理式を用いたままでは、逆に、本来は十分な支持力がないにもかかわらず、誤って支持力があるという判断をするおそれもある。

なお、予定深度では支持力が得られず、支持力が得られるまでさらに杭を打ち下げることを「打ち下げ」という（この場合、継杭が必要となる）。

3) 杭の損傷

杭の打設中に、何らかの理由で杭頭や杭先端部で損傷・座屈現象が生じることがある（ ）。

4) 「根入れ不足」

「根入れ不足」という用語は、一般に、設計打設長さに対し打ち込み長さが不足する状態（高止まり）と、設計打設長さでは押し込み支持力が不足する状態（支持力不足）の2通りの意味で用いられるが、本報告書では「高止まり」の場合に用いる。

b) 高止まり

高止まりとは、中間層の杭周面摩擦や先端支持力が大きい場合、支持層が浅い場合や想定より硬い場合などに、設計上の所定深度まで杭が打ち込めない状況をいう。

対策方法としては、ジャケット杭など杭の板厚および仕様が特殊（塗装、重防食等）な場合や水平力による上杭板厚の必要長さが決まっている場合は、ハンマーを大きくしたり、先行掘削で地盤をゆるめたりするなど施工法を工夫して設計通りの根入れ長さまで打ち込む。ハンマーを大き

くする場合は杭の破損に注意が必要であり、先行掘削する場合は支持力の確認が必要となる。それ以外では、高止まりした時点で打ち止め、高止まりした部分を切断する方が多く採用されている。

c) 支持力不足

支持力不足とは、支持層に傾斜や不陸がある場合、支持層が予想より弱い場合などに、設計上の所定深度においても必要とする支持力が得られない状況をいう。

対策方法としては、ジャケット杭など杭の板厚および仕様特殊（塗装、重防食等）で杭長を延長することができない場合は、先端十字リブ等の加工杭への変更や地盤改良などで対応する場合がある。また、杭の手配が容易な場合、杭の板厚および仕様が特殊でない場合は、杭を継ぎ足し、杭長を延長する方法が用いられる。

d) 杭体の損傷

杭体の損傷とは、ハンマー容量が過大な場合や、過剰打撃、偏打、局部応力の発生等の理由により、杭頭部や杭先端部で座屈や損傷を生じる現象をいう。

対策方法としては、杭頭部の補強や杭先端補強バンドを取り付けることが行われる。また、偏打などが発生しない

ように、杭や施工機械の打ち込み（鉛直）精度を確認して施工する。

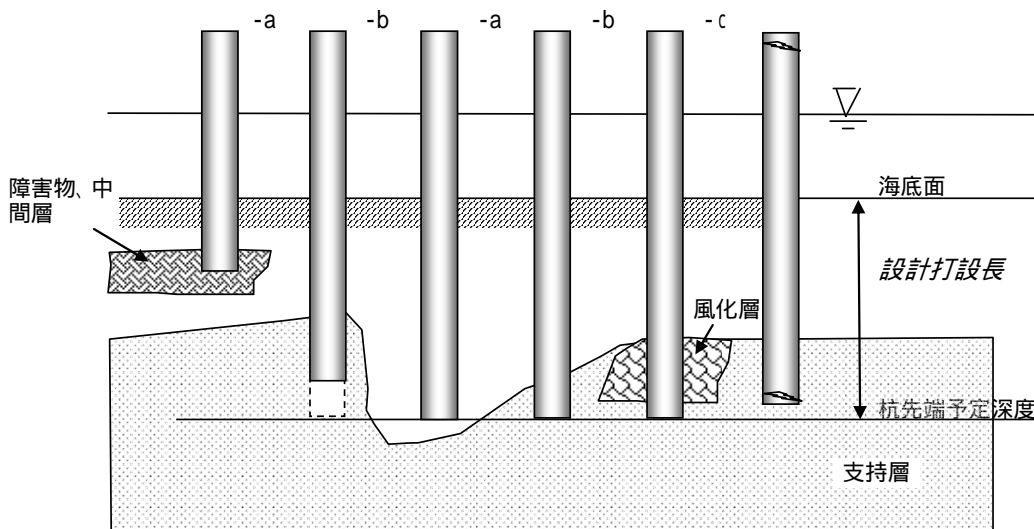
2.2 設計状況の現状

(1) 概要

2003年11月に、主として平成元年（1989年）以降の杭の設計状況に関するアンケートを実施した。このアンケートは、北海道開発局、沖縄総合事務局を含む各地方整備局に対して直轄工事における杭の軸方向抵抗力の設計に関する現状を調査したものである。

この調査は、主として平成元年以降に設計された施設を対象に行ったが、施設によっては昭和時代に設計されたものもある。8つの地方整備局と北海道開発局、沖縄総合事務局の計10の機関からあわせて93施設の資料を入手した。報告された杭は3事例がRC場所打ち杭であったほかは、ほとんどの事例で鋼管杭が用いられていた（97%は鋼管杭）。ここでは、鋼管杭についてのみデータの整理を行う。

収集した資料のうち、ここでの整理の対象とした施設は、主として岸壁であり、杭式防波堤、橋梁基礎がわずかに含まれている。岸壁の場合には、栈橋構造が主体である。



高止まりの理由

- a: 中間層が硬い
- b: 支持層が硬いか浅い

支持力不足の理由

- a: 支持層に届かない（支持層不陸など）
- b: 支持層への根入れ不足
- c: 支持層の風化度が高いなど
- d: 周面摩擦力の低下
- e: 中間支持層が薄い
- f: 動的支持力管理式の誤差

杭体の損傷

: 何らかの理由により打設中に杭が損傷

図-2.10 トラブルの定義の模式図

設計時に想定していた工法は、多くが打撃工法であった。それ以外の工法としては、打撃工法にオーガーを併用した工法(6例)、ジェットパイプロ工法(3例)、パイプロ工法(2例)(打撃工法のひとつではあるがメカニズムが異なるので取り上げた)、オールケーシング工法(2例)、

中掘り工法(2例)があった。いずれも、打撃工法では杭が損傷する場合や、打撃工法による振動が近隣施設等に影響を及ぼすと考えられるときに採用される工法であると考えられる。

なお、種々の理由からアンケートの全項目への回答が得られていない事例もあるため、整理項目によってデータの総数に違いがある。ただし、いずれの項目についても60個以上のデータを得ることができた。

(2) 用いられる杭の変化

過去に設計状況を調査した事例として、昭和42年に行われた、昭和36年から昭和40年までの設計状況の調査⁸⁾がある。この時、横棧橋54施設における杭の材質は、鋼管杭が80%、H鋼杭が11%を占め、鋼管杭だけで90%を占めていた。この調査結果と今回の調査結果から、この40年間の杭の設計状況の変化について考察する。

図-2.11に2回の設計状況調査における用いられた杭の杭径の変化を示した。図によると、昭和30年代までは杭径が800mm以下であったものが、近年では、半数以上の事例で杭径が1000mmを超えており、最も頻度が高いのが径が1200~1400mmのもので、最大径は1600mm(1例)であった。このように、港湾で用いられる杭径は非常に大型化している。

図-2.12に杭の根入れ深さの変化について示した。昭和30年代までは20m程度が主流であったが、現在では杭の根入れ長は20~30mのところ以最頻値を持ち、さらに50mまでの範囲で広く分布している。また、最長では70mに近いものもある。さらに、2003年の調査結果には含まれていないが、調査実施以降に70mを超える杭が多数施工されている。

これらの変化には、施設の大型化に伴う荷重の増加に対応するために大支持力の杭が必要とされたこと、杭の製作技術の進歩と施工機械の進歩により杭の打設技術が向上したことが影響している。

杭径の変化(大径化)、杭の根入れ長の変化(長尺化)は、杭の設計を考える上で重要な点である。現在の港湾基準の原型は昭和42年に作成されたもの⁹⁾であり、杭の支持力に関する記述は昭和42年当時の記述からあまり変更されていない。つまり、現在の設計状況を十分には反映できておらず、ここに示したような杭径や杭の根入れ長の著しい

増大に対する対応が十分とは言えない。このため、従来用いられている設計の考え方が現在用いられている杭にそのまま適用できるかどうかは不確実な状況となっている(なお、この点については、3章で議論する)。

図-2.13に杭径と根入れ長の関係を示す。この関係は広くばらついており、特に関連性は見出せない。これは、杭の根入れ長がある程度以上長ければ杭径は杭に要求される曲げ抵抗の大きさに決定する傾向にあり、杭の根入れ長は適切な支持層の出現深度に依存するためであると考えられる。すなわち、杭径と杭長は独立に決定されるファクターである。

(3) 杭の先端抵抗

設計では杭の軸方向抵抗力は周面抵抗と先端抵抗に分けて考えられることが多い。先端抵抗の推定にはいろいろな方法が提案されているが、港湾基準で標準的に用いられてきたのは、標準貫入試験によって得られる N 値から推定する方法である。 N 値から杭の先端支持力を求めるには、まず、単位面積当たりの先端抵抗力を求め、それに杭の断面積をかけて杭の支持力としている。従来の(この調査時点での)港湾基準では次式により先端抵抗力を求める。

$$Q = 300NA_p \quad (2.14)$$

ここで、 Q は杭の全先端抵抗、 N は杭先端と上方 $4D$ 区間(D :杭径)の平均 N 値、 A_p は杭先端の断面積である。

この式は、中実杭の場合にはそのまま適用できるが、鋼管杭のような開端杭ではそのままでは使えない。それは、杭先端が開放しているため、杭の先端が閉塞しているという仮定が成立せず、有効な面積が A_p とは異なると考えられるためである。そこで、開端杭の場合には、杭の先端支持力は次式で表す。

$$Q = 300\alpha NA_p \quad (2.15)$$

ここに、 α は開端杭の場合の補正係数である。

一方、開端杭の先端抵抗のメカニズムは、建築学会の基準等では、図-2.14のような概念で示されている。つまり、開端杭の先端抵抗は、杭の実質部の先端抵抗と、杭の内部に侵入した土と杭内周面との間の抵抗によるものであるとする考え方である。この場合、開端杭の先端抵抗は、

$$Q_{open} = R_p + R_{fI} \quad (2.16)$$

と表される。そこで、閉端杭の先端抵抗 Q_{close} との比 $\eta = Q_{open} / Q_{close}$ を閉塞効率と呼んでいる。これこそが閉塞率というべきものである。

従って、厳密には α は閉塞率ではないが、ここでは α は閉端杭と開端杭とで期待できる先端支持力の比率を意味しているため、 α を閉塞率と呼ぶことにする。

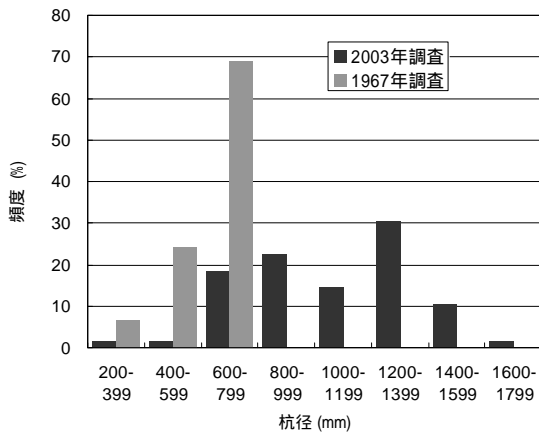


図-2.11 用いられる杭径の変化

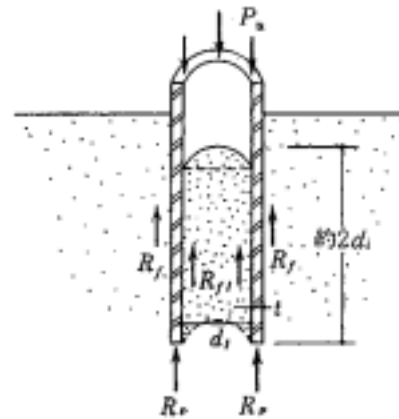


図-2.14 開端杭の先端抵抗メカニズム

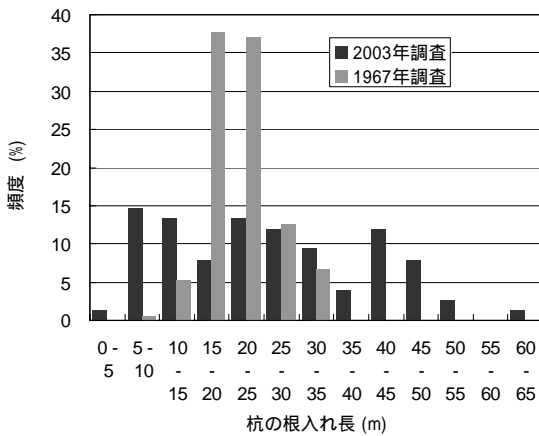


図-2.12 用いられる杭の根入れ長の変化

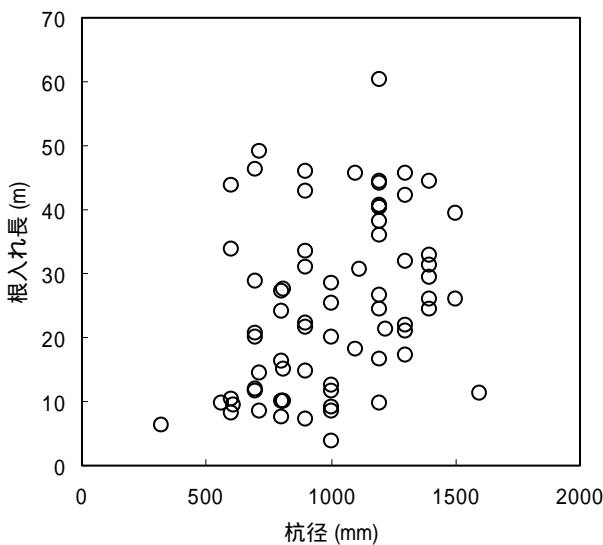


図-2.13 杭径と杭の根入れ長の関係

(4) 設計に用いられている閉塞率

図-2.15 に杭径と用いられている閉塞率 α との関係を示す。設計で用いられる閉塞率は地盤条件、根入れ深度、杭径、支持層への根入れ深さなどによって決定されるべきパラメータであると考えられ、港湾基準では、設計者の判断によって決定されるパラメータとしている。図-2.15 はこのことを反映して大きくばらついている。ただし、杭径ごとの閉塞率の最小値を見ると、杭径が大きくなるにつれて小さな値となっており、杭径 1000 mm で、最小閉塞率が 0.36、杭径 1400 mm では最小閉塞率が 0.22 という例があることがわかる。その一方で、杭径 1200 mm でも閉塞率として 1.0 を用いているケースもある。

一方、道路橋示方書³⁾等では、開端杭の場合、杭の閉塞率が杭の支持層への根入れ比 (= 支持層への換算根入れ深さ l / 杭径 D) が 5 以下の場合には十分な閉塞率が期待できないとし、先端支持力として $60(l/D)NA_p$ という関係式を示している。ここで、

$$60(l/D)NA = 300 \times 0.2(l/D)NA_p \quad (2.17)$$

であるから、式(2.15)との対比より、用いるべき閉塞率 α として $0.2(l/D)$ を規定していることがわかる。

図-2.16 は設計に用いられた閉塞率と杭の支持層への根入れ比の関係を示したものである。この図を見ると、根入れ比が 5 までは、道路橋示方書の提案している関係を下限として、それ以上の閉塞率が使われている例が多いことがわかる。なお、道路橋示方書³⁾では、用いるべき閉塞率として $0.2(l/D)$ を規定しているものの、 N 値が大きい層に無理に杭径の 5 倍の根入れをすることを推奨しているわけではないと記述されており、この関係式は「中間層と支持層の境界が明確ではない場合」に適用すべきであるとも記述されている。港湾地域で杭が用いられるような現場では、

礫層の上面が明確な場合が多く、このような場合に、道路橋示方書の記述内容も加味した上で、設計者が0.2 (l/D) を上回るような閉塞率を用いているものと考えられる。その例証として、図-2.17 に支持層への根入れ比の頻度分布を整理した。この結果では、杭の支持層への根入れ比は2以下で60%以上を占めており、杭をむやみに支持層に根入れされる設計をしていないことがわかる。なお、その一方で、根入れ比が8に近い例もあり、地盤条件を考慮した設計がなされていることが予想される。

なお、用いられる根入れ比と杭径の間に何らかの相関が有る可能性もあるので、図-2.18 に杭径と用いられている支持層への根入れ比について整理した。この結果によると、杭の支持層への根入れ比の判断は地盤条件に左右されるようで、杭径の影響は現れていない。

(5) 先端支持力

ここでは、はじめに、杭の極限抵抗と設計との関係について考える。港湾基準に従って杭の設計をしようとすると、杭の極限抵抗は、次式で表される。

$$Q_u = R_b + R_s \quad (2.18)$$

ここに、 Q_u ：極限抵抗、 R_b ：先端抵抗、 R_s ：周面抵抗
 R_b は既に記述してきたように、次式で表される。

$$R_b = 300\alpha N\pi D^2 / 4 \quad (2.19)$$

一方、 R_s は、平均周面抵抗（摩擦力が付着力）度と杭軸の周面積の積で与えられる。

$$R_s = \bar{f}\pi DL \quad (2.20)$$

ここに、 \bar{f} ：平均周面抵抗度、 L ：杭の根入れ長

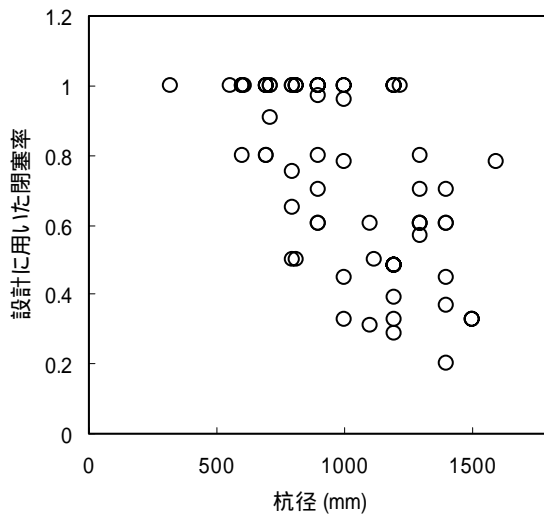


図-2.15 杭径と用いられている閉塞率の関係

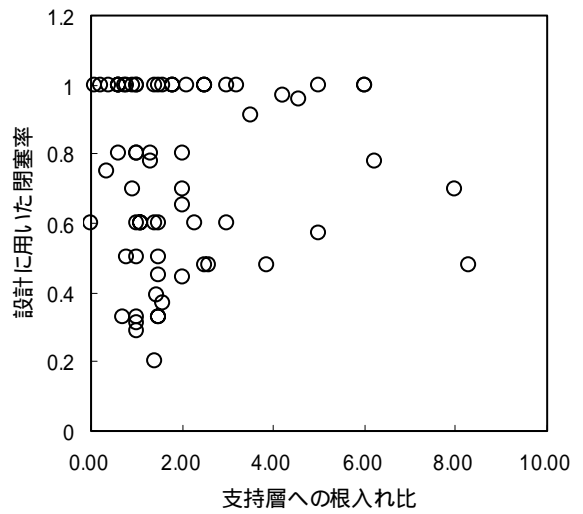


図-2.16 根入れ比と用いられている閉塞率との関係

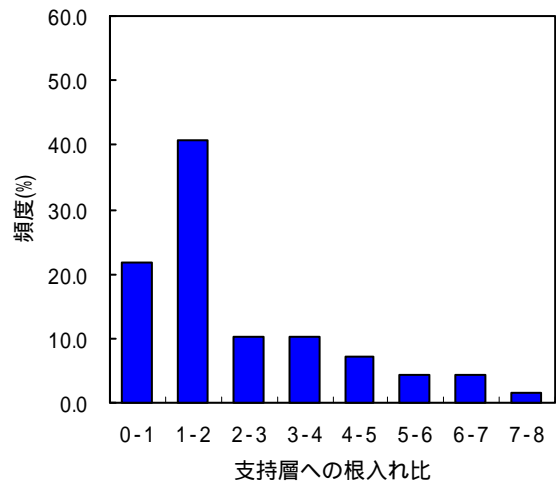


図-2.17 支持層への根入れ比の頻度分布

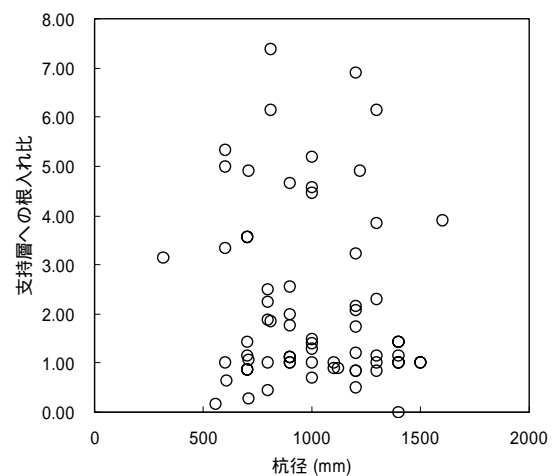


図-2.18 杭径と支持層への根入れ比の関係

ここで、正規圧密地盤のようなものを考えると、深度ごとの周面抵抗は深度にほぼ比例する形で増加すると考えられるので、周面抵抗の増加率を β とすれば、概ね、 $\bar{f} = \beta L / 2$ と表すことができる。この時、 Q_u は、次のように表すことが出来る。

$$Q_u = 300\alpha N\pi D^2 / 4 + \pi\beta DL^2 / 2 \quad (2.21)$$

$$= \pi(D/2)^2(300\alpha N + 2\beta L^2 / D)$$

つまり、杭径が大きくなると全極限抵抗に及ぼす先端抵抗力の割合が大きくなるが、杭の根入れ長が大きくなると周面抵抗の割合が大きくなる。

具体的に現状の設計における先端抵抗の割合の頻度分布を調べてみると図-2.19 のようであった。この結果によると杭の先端支持力が全抵抗力に対する割合はほとんどのケースで30%以上であり、30%以上であれば、ほぼ等分布状態となっていることがわかる。つまりは、杭径と杭の根入れ長さの組み合わせにはバラエティがあることを意味している。ただし、約60%の杭では全支持力の50%以上を先端支持力に期待する設計となっており、杭の先端支持にかなり期待した設計がなされているようである。

次に、現状の設計で1本の杭にどの程度の極限支持力を期待しているのかを見てみた。図-2.20 に根入れ長と極限支持力の関係を示す。データは大きくばらついており、1本の杭に期待する極限抵抗力は、1 MN に満たないものから、30 MN に近いものまでである。またこの図からわかるように、杭の根入れ長と極限抵抗の間にはゆるい相関関係があるようではあるが、大きくばらつく結果となっている。

図-2.21 には杭の根入れ長と全極限支持力に対する先端支持力の比を示した。例外的なデータも存在するが、一般的な傾向としては、根入れ長が長くなるほど先端支持力の割合の小さなものが現れるようになる。すなわち、根入れ長が30 m以下では先端支持力の割合が概ね50%以上であるのに対し、30 m以上では、その比率が低下する傾向にあることがわかる。

図-2.22 には、常時荷重と周面摩擦力との関係を示す。周面摩擦力が小さい場合には、周面摩擦力が常時荷重を下回るものがあるが、周面摩擦力が5000 kNを上回るものでは、周面摩擦力が常時荷重よりも大きくなり、場合によっては常時荷重の2.5倍を超えるものもある。周面摩擦力の常時荷重に対する比の頻度分布を示したのが図-2.23 である。これを見ると、比の最頻値は0.75 ~ 1の範囲にあるものの、多くのデータは1を超えている。以上のことは、ほとんどの杭で常時荷重は周面摩擦で支えることが出来ることを示している。

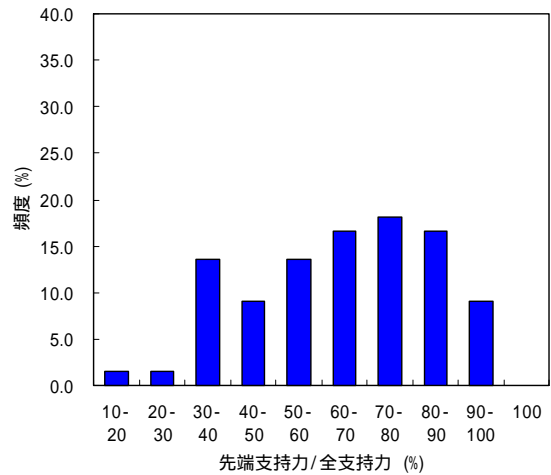


図-2.19 全支持力に対する先端支持力の割合の分布

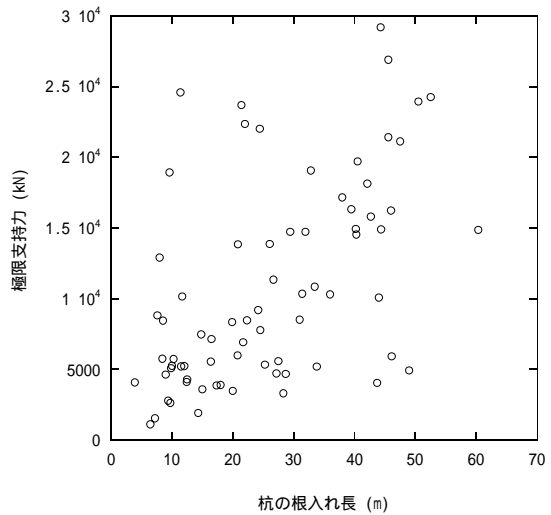


図-2.20 根入れ長と極限支持力の関係

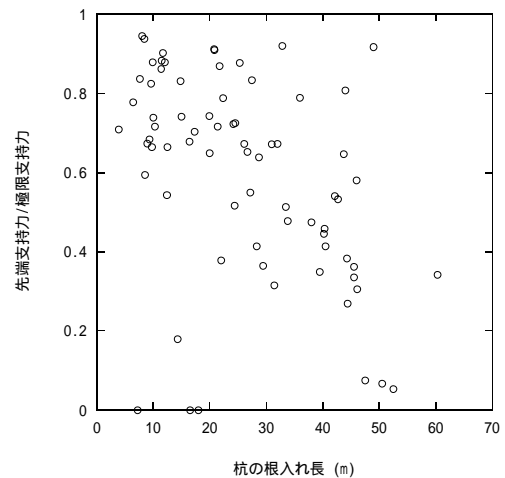


図-2.21 杭の根入れ長と先端支持力比の関係

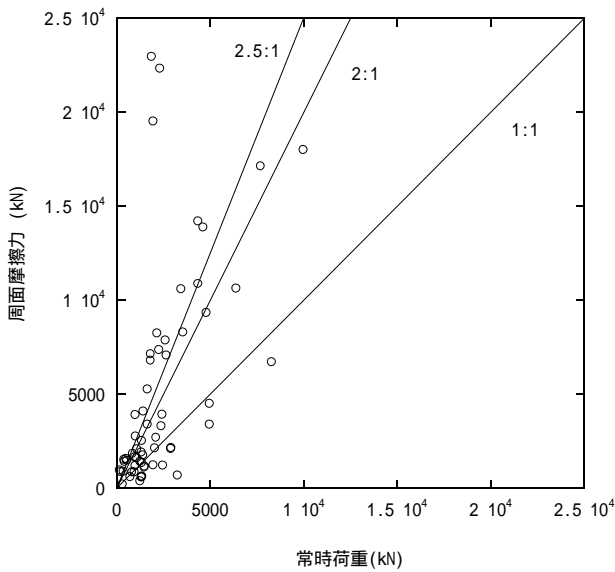


図-2.22 常時荷重と周面摩擦力の関係

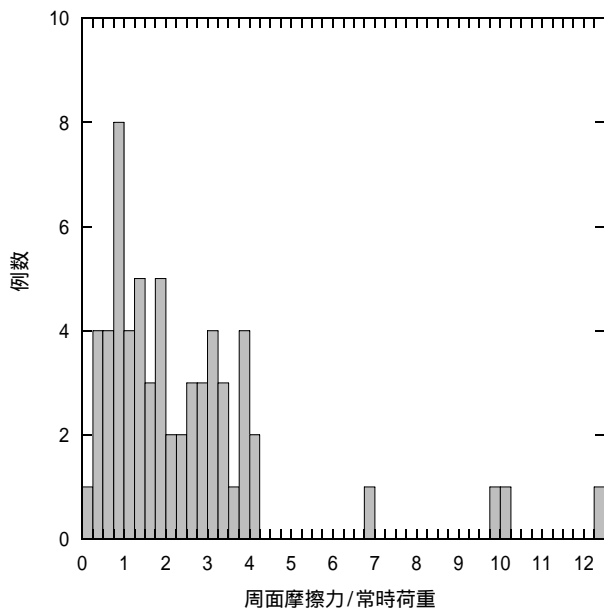


図-2.23 周面摩擦力/常時荷重の頻度分布

最後に図-2.24 に異常時荷重に対する周面摩擦力，先端支持力，極限支持力の関係を示す．図中で濃く塗ってあるのが周面摩擦力の異常時荷重に対する比であり，薄く塗ってあるのが先端支持力の異常時荷重に対する比である．さらに棒の全体の長さが，極限支持力の異常時荷重に対する比となっている．これはいわゆる異常時の安全率である．この結果で特徴的なことは，異常時の安全率が非常に大きなものほど先端支持力の分担率が大きくなっていることである．このような傾向が現れたひとつの理由としては，周面摩擦力だけでは安全率が確保されない場合，健全と思わ

れる支持層に杭を貫入させることになるが，その場合，健全な支持層には大きな支持力が期待できるため，全体として過大な安全率が生じることになる．このような現象が生じるひとつの理由は，わが国の港湾区域では，杭の支持層付近での層の境界が明瞭で，支持層より上の層と支持層とで想定できる支持力に大きな差があるためであると考えられる．このような場合，杭を支持層に不用意に深い根入れをする必要はなく，確実に支持層に貫入させることだけが要求されるものと思われる．

(6) まとめ

以上の結果をまとめると以下のとおりである．

港湾工事で用いられる鋼管杭の径は 1000 mm を超える大径のものが数多くある．根入れ長についても 30 m を超える長尺杭がよく用いられる．

設計に用いられる閉塞率は杭径や支持層への根入れ比だけでは決められていない．地盤条件の詳細を考慮に入れている．全体として高い閉塞率を取るケースが多い．

周面摩擦力が常時荷重を上回るケースがかなりある．異常時の安全率がかなり高い場合があるが，これは十分に健全と思われる支持層に杭を貫入させているためであると考えられる．

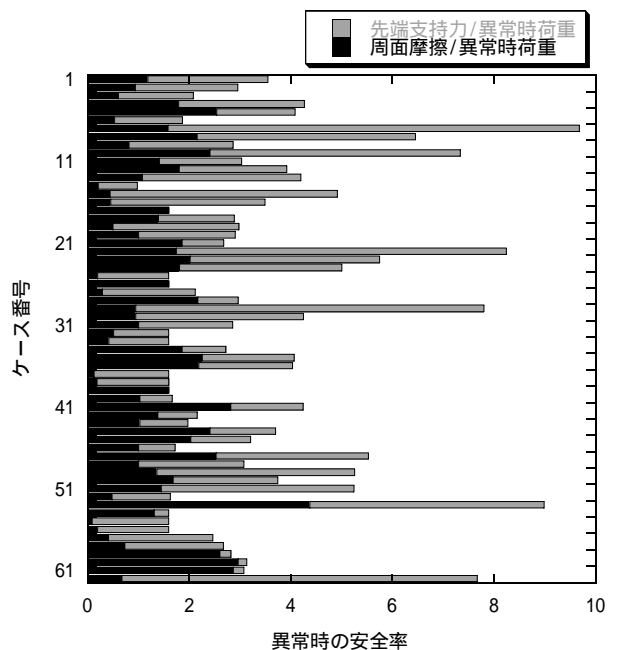


図-2.24 異常時荷重に対する周面摩擦力，先端支持力，極限支持力の比

3. 現行の支持力推定手法の課題

3.1 諸外国の設計法と日本の設計法の比較

杭の抵抗性は、軸方向の抵抗と軸直角方向の抵抗に分けて考えるのが一般的である。また、軸方向抵抗力については、設計では、杭の先端での抵抗と杭軸の周面抵抗に分けて考えるのが一般的である。ここでは、杭軸方向の抵抗を議論する。

現状の設計法の課題を考えるには、実測値と設計値の相違や他の基準との比較をするとわかりやすい。はじめに、諸外国の基準との比較を示す。

表-3.1 に杭の軸方向抵抗力の推定に用いられる静的支持力式の国際的な比較^{1),10),11)}の結果を示す。杭の抵抗を推定するのに、周面抵抗と先端抵抗に分けて考えることが洋の東西を問わず行なわれている。また、砂地盤と粘土地盤を分けて考えるという点も同じである。

表-3.1 には日本の基準として港湾の基準を示したが、道路橋示方書、鉄道設計標準、建築学会の基準ともほぼ同じような考え方によっている。つまり、砂地盤は N 値によって設計し、粘土地盤は c (実際には、一軸圧縮強度の半分) を用いて設計する方法である。このうち、砂地盤の先端抵抗の推定式は Meyerhof の提案¹²⁾した方法を経験によって修正したものであり、同様の方法はかつてイギリスでも用いられていた¹³⁾。なお、Meyerhof は深さ数 m までのコーン貫入抵抗と N 値との相関性から N 値と杭の支持力を求めたものである。その方法を修正し、1 m を超える杭径で 50 m を超える根入れ長の杭に用いているということは驚くべきことである。また、現在の式は Meyerhof の考え方をそのまま踏襲し係数だけを経験に基づいて修正している点から見て、きわめて経験に依存する方法であるといえる。

欧米諸国の設計法を見ると、粘性土地盤中の杭については日本とほぼ類似の推定手法を用いている。ところが、砂地盤中の抵抗については、欧米諸国と日本とで全く異なった考え方が適用されている。実務的にも、砂地盤の先端抵抗の考え方の違いの影響は大変大きなものがある。

近年では欧米諸国では、表-3.1 に示すとおり砂地盤中の杭の先端支持力を内部摩擦角 ϕ から決定される支持力係数 N_q と土被り圧から求める方法が用いられている。この方法は理論的である。ただし、図-3.1 に示すように、多くの研究者によって提案されている ϕ と N_q の関係は非常にばらついており、提案者の用いたモデルの違いにより N_q は一桁くらいばらついて¹⁴⁾いる。これではどんなに理論的に正しいといっても実務に用いるのは困難である。

表-3.1 杭の静的支持力式の国際比較^{1),10),11)}

		港湾基準	ユーロコード 7 (EC7)	米工兵隊 (USACE)
砂地盤	先端抵抗 q_p (kN/m ²)	300N	$N_{qs}\sigma'_{v0}$	$N_q\sigma'_{v0}$
	周面抵抗 q_s (kN/m ²)	2N	$K_s\sigma'_{v0}\tan\delta$	$K_s\sigma'_{v0}\tan\delta$
粘土地盤	先端抵抗 q_p (kN/m ²)	$6c_u$	$9c_u + \sigma'_{v0}$	$9c_u$
	周面抵抗 q_s (kN/m ²)	c_u	αc_u	αc_u

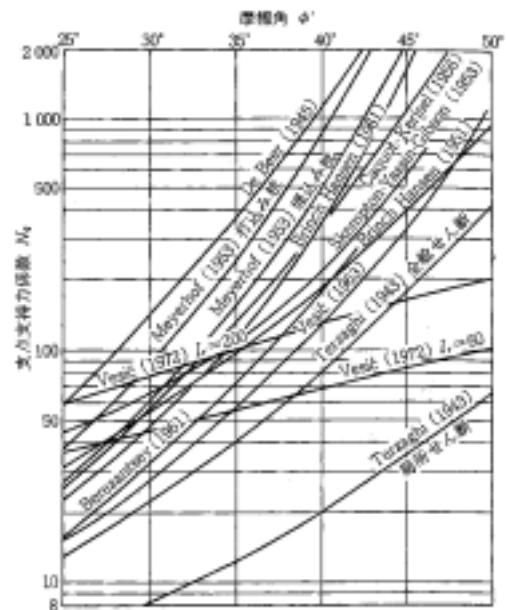


図-3.1 様々な研究者による杭の支持力係数とせん断抵抗角の関係

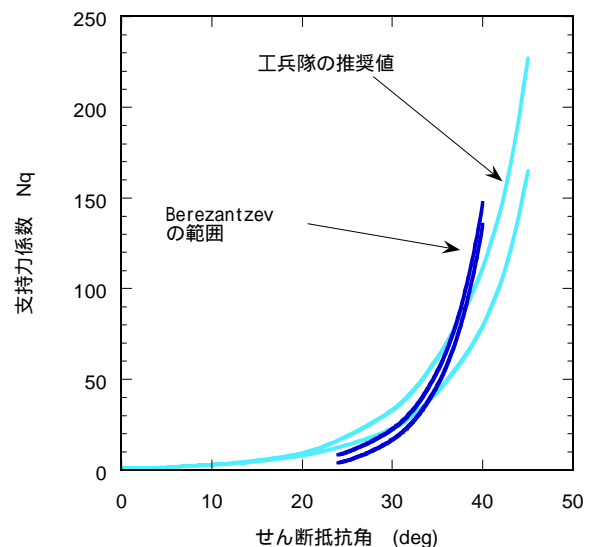


図-3.2 Berezantzev と米工兵隊 (USACE) の提案する N_q

ところが、その中で、EC7 のテキスト¹⁰⁾ で紹介されている Berezantzev の式と米工兵隊 (USACE) で用いている式¹¹⁾ は N_q としてやや小さめの値を推定し、しかも N_q の値が比較的似通っており、参考としやすいものである。

図-3.2 にそれらの比較を示した。この図は、図-3.1 と異なり、縦軸を算術目盛りになっている。この両者の係数は、図-3.1 に示した係数のばらつきに比べるとほとんど差がないと言えるが、それでも、 ϕ が 30 度以下の場合には、USACE の式の方が最大で 2 倍程度支持力係数が大きく、 ϕ が 37 度程度以上になると逆に、Berezantzev の用いている係数の方が 1.5 倍から 2 倍くらい大きくなるという傾向がある。

なお、 N_q を用いた計算では、 ϕ を推定する必要がある。 ϕ を求めることが実際には大変難しいということも支持力係数を用いる上での障害となりやすい。以降の比較では、現行の港湾基準で用いられている式¹⁾ を用いて、 N 値から ϕ を推定した。

USACE の式では、以上の違いのほかに土被り圧の取り方に特徴がある。具体的には次式のとおりでである。

$$\begin{aligned} q_b &= N_q \sigma'_v \\ \sigma'_v &= \gamma' D \quad \text{for } D \leq D_c \\ \sigma'_v &= \gamma' D \quad \text{for } D \geq D_c \end{aligned} \quad (3.1)$$

D_c は地盤性状によって $D_c = 10B \sim 20B$ とする。 B は杭径である。

一方、EC7 同様に Berezantzev の支持力係数を用いるものの、せん断抵抗角の採り方を変えることで別の方法で杭の先端支持力を求める方法がある。これは、Neely(ニーリー) が考えたものであるが、Fleming(フレミング) らの著した本¹⁵⁾ の中で詳細に紹介されているので、ここでは、Fleming の方法として紹介する。この方法では、せん断抵抗角は次式で計算する。

$$\phi' = \phi'_{cv} + 3I_R \quad (3.2)$$

ここで、

ϕ'_{cv} : 限界状態のせん断抵抗角

I_R : 修正相対密度

$$I_R = I_D (5.4 - \ln(p'/p_a)) - 1 \quad (p' > 150 \text{ kPa の場合})$$

$$I_R = 5 I_D - 1 \quad (p' < 150 \text{ kPa の場合})$$

I_D : 補正前の相対密度

p' : 次式によって求めた平均応力

$$p' = \sqrt{N_q} \sigma'_v$$

p_a : 大気圧 (基準圧力) (100 kPa)

σ'_v : 鉛直有効応力

なお、砂地盤の先端支持力推定方法としては、表-3.1 に示した方法のほかに、空洞拡張理論に基づいて推定する方

法がある。この方法は、Vesic¹⁷⁾ (ベシッチ) が最初に提案し、それを安福ら¹⁷⁾ が修正したもので、次式で表わされる。

$$q_p = \frac{\sigma'_v}{1 - \sin \phi'_{cv}} \cdot \frac{3(1 + \sin \phi'_{cv})}{3 - \sin \phi'_{cv}} \cdot \frac{(1 + 2K_0)}{3} \times \left\{ \frac{G/\sigma'_v}{\left[\frac{(1 + 2K_0)/3 \tan \phi'_{cv} + 50 \left(\frac{(1 + 2K_0)/3 \tan \phi'_{cv}}{3} \right)^{1.8} \cdot (G/\sigma'_v)^{-0.8} \right]} \right\}^{\frac{4 \sin \phi'_{cv}}{3(1 + \sin \phi'_{cv})}} \quad (3.3)$$

せん断抵抗角の取り方については、Fleming の方法と同様に ϕ'_{cv} を基準とするが、一般的には、 $\phi'_{cv} = 34^\circ$ としてよい。

以上のように、現在主流となっている杭の先端支持力の考え方には、5 つの方法がある。

次に砂地盤の周面摩擦力について考えてみる。先ほど見たように、日本の基準は N 値依存である。一方、EC7 と USACE では同じ式を用いている。この式の意図するところは、杭の単位面積当たりの周面抵抗は、杭と砂の間の摩擦抵抗で決まるとするものである。つまり、 $K_s \sigma'_{v0}$ が杭面に作用する直応力であり、 $\tan \delta$ が摩擦係数である。非常に論理的である。ここで問題となるのは、周面直応力を決定するために K_s をどのように設定すべきかということである。USACE の式では、砂の場合、1 ~ 2 の間の値を取ることができるとされている。これも、このままでは論理的には素晴らしいが実務に用いるにはかなり困難を伴うものであることがわかる。

粘性土地盤においても先端支持力では、支持力係数に多少の食い違いがあったり、土被り圧の影響を考慮したりという違いがあるが、あまり大きな違いではない。周面抵抗については、せん断強度に α という係数がついているのが欧米諸国の基準の特徴である。ここに示した α は、粘土の過圧密の状態や、杭の根入れ長が非常に長いときに、杭と地盤の相対変位が地盤の深さによって異なることを考慮したものである。特に、過圧密地盤での抵抗力の評価が重要なポイントとなっている。この点については、日本も事情は同じである。すなわち、周面抵抗の違いについても大きな違いがあるわけではない。

以上の比較から、粘性土地盤の周面抵抗、先端抵抗の推定式には大きな違いはなく、現行基準式においても国際的に見て特段の問題は生じないと考えられる。問題は砂地盤の場合である。砂地盤の周面抵抗の考え方は現段階では、欧米諸国と日本で隔たりがあるが、少なくとも欧米諸国の考え方が合理的とはいえず、実務上の有利性を持っているとは考えにくい。本質的に大きな違いがあるのは、砂地盤の先端支持力問題である。そこで、ここでは、まず、砂地盤における支持力推定式の違いについて比較する。

図-3.3 は、ここで紹介した 5 つの支持力式による支持力の計算結果を比較したものである。この図は、次のように仮定して作図してある。まず、想定する地盤は深さ方向に

N 値一定の地盤である。地盤の有効単位体積重量は 7 kN/m^3 である。このような条件で、ある深度まで根入れしたときのその深度で計算される先端支持力を示したものである。たとえば、深度 20 m のところに杭を止めた場合に、EC7 で計算される先端支持力は 20.7 MN であり、港湾基準では 15.0 MN 、空洞拡張理論では 11.9 MN 、Fleming の方法では 11.3 MN 、USACE の式では 15.6 MN となるということである。深度 90 m で打ち止めた場合は、それぞれ 26.1 、 15.0 、 23.1 、 21.3 、 7.2 MN という計算結果となる。

この場合のそれぞれの式の特徴は次のとおりである。EC7 がほとんどの深さにおいて最大の推定値を示す。港湾基準は深度の影響をまったく受けない。USACE は深くなるほど支持力は小さくなる。Fleming と空洞拡張理論は全深度にわたりほぼ同じ値を算出し、深くなるにつれて少しずつ支持力が大きくなっていく。この結果を見る限り、EC7 は支持力の過大評価につながる傾向にあるといえる。また、従来多かった深さ 40 m くらいまでの根入れの杭であれば、EC7 を除く 4 つの支持力式のいずれを用いても結果にあまり差がないことがわかる。しかし、 60 m を超えるような大深度になるとどの支持力式によるかによって計算結果が著しく異なってくることになる。

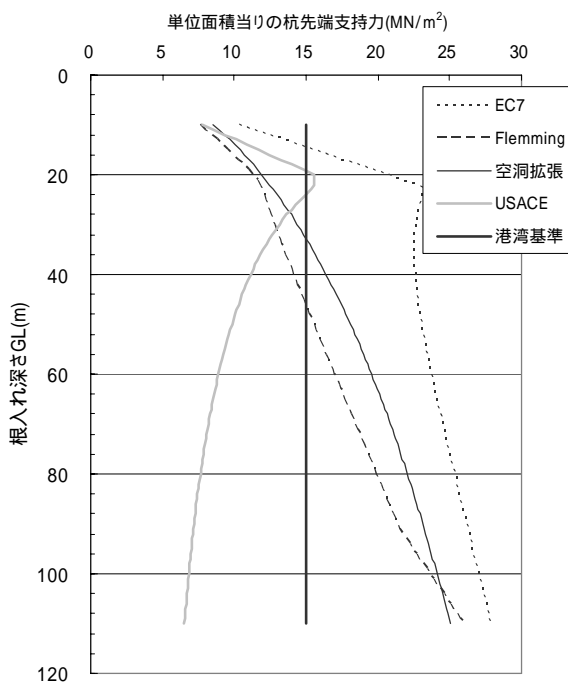


図-3.3 先端抵抗力推定式の比較

従来から、杭の支持力メカニズムを考えると、均一と考えられる地盤であれば、根入れ深度が深くなるにつれて少しずつ先端抵抗力が増加すると言われている。そのとおりだとすると、現行の港湾基準の式を、 60 m を超える大深度杭に適用するのは無理があると考えられる。

次節では、この点について実測結果との比較により検討する。

3.2 実測値と諸設計法との比較

(1) 開端杭の支持力に関するこれまでの情報

従来、道路橋示方書³⁾などを中心として、開端杭の支持力は杭の支持層への根入れの影響を強く受けるとされている。図-3.4は現在の道路橋示方書に記載されている杭の先端支持力と支持層への根入れ長の関係の図である。この図は大変よく知られており、鉄道標準⁴⁾でも、建築基準⁵⁾でもほぼ同じような考え方の設計法が示されている。なお、ここで道示³⁾の場合には、 N は N 値であり、 40 を最大とすることが規定されている。

同じ道路協会が出版している杭基礎設計便覧⁷⁾には、この図面の根拠として図-3.5が示されている。これは主として、1974年に出版された土木研究所資料第899号¹⁸⁾で報告されているデータに基づくものである。この資料には、全体で223本の実杭の載荷試験の結果が示されており、大変貴重な成果である。この結果を見る範囲でもデータにはかなりのばらつきがあることがわかる。

この原データを詳細に確認し、極限支持力が得られていると思われる鋼管杭のデータすべてについて整理すると図-3.6のようになる。なお、実際には、根入れ比、支持力比の双方でこの図の範囲を大きく外れるデータが数点あるが、ここでは削除している。図-3.5でもかなりのばらつきがあるが、図-3.6においても著しいばらつきがあることがわかる。また、この結果を見ると杭径による差もあまり見られない。図-3.6と図-3.4を比較すると図-3.4はいかに割り切って決定されたものであるかがよくわかる。

ところで、図-3.6を横軸を杭径に変えて整理し直すと、図-3.7のようになる。この結果では、データはかなりばらつくものの、単位面積当たりの先端支持力/ 300 N (図の縦軸)が杭径の増大とともに低下していく傾向が明らかに見て取れる。ここでは、図-3.7の事実を念頭において、杭の先端抵抗力に杭径の影響があるものと考えて実測データを紹介していく。

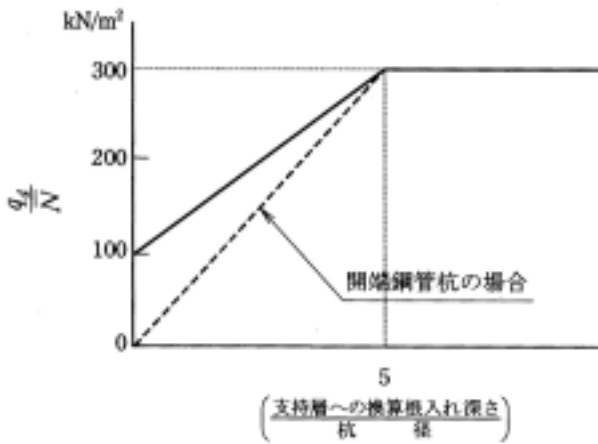


図-3.4 杭先端地盤の極限支持力度

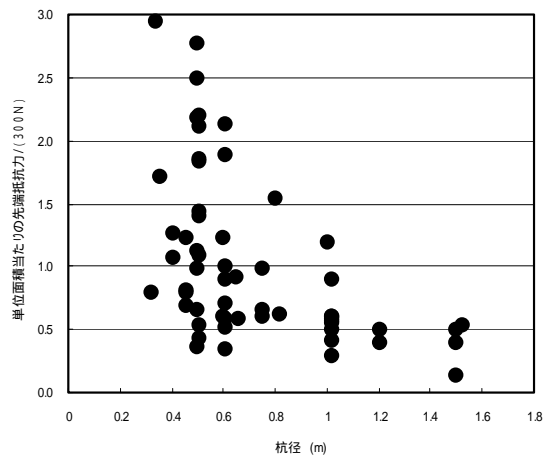


図-3.7 土木研究所資料より作成した杭径と杭の極限支持力の関係

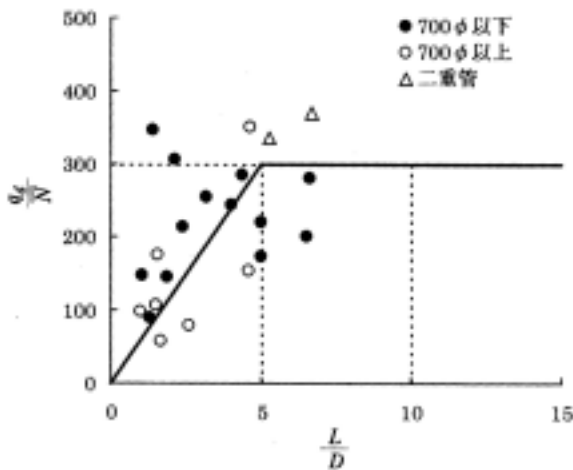


図-3.5 杭基礎設計便覧における実例

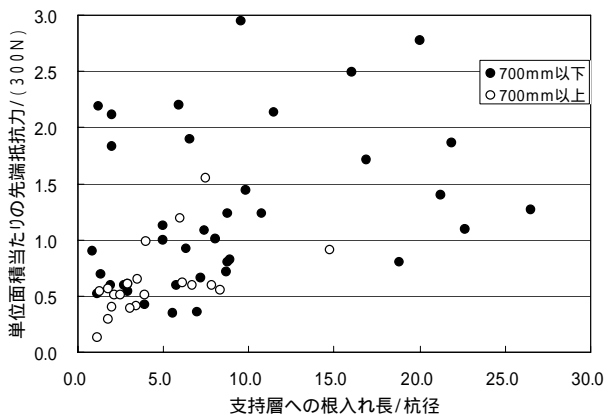
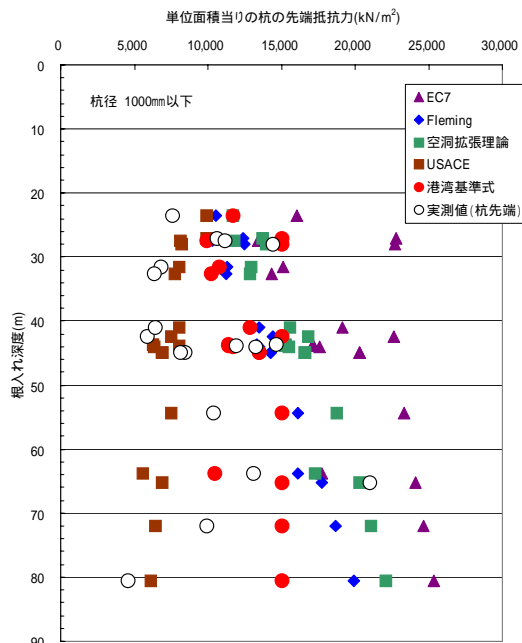


図-3.6 土木研究所資料第 899 号より作図した鋼管杭における支持層への根入れ比と杭の先端支持力の関係

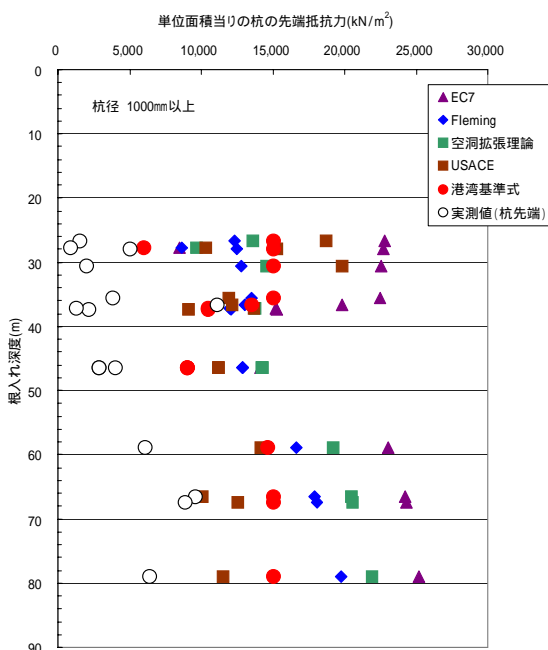
(2) 根入れ深度の影響

ここでは、載荷試験結果と前項で示した支持力推定式とを比較していく。その際、図-3.7において、杭の支持力には杭径の影響が大きいことがわかったので、ここでは、便宜的に杭径が 1000 mm 以下の場合と 1000 mm 以上の場合に分けて整理する。また、この節では、既に鋼管杭協会が「鋼管杭 - その設計と施工 - 2004」¹⁹⁾にまとめてある載荷試験結果のほかに、今回の検討のために独自に調査した杭の載荷試験結果も加えて比較することにする。載荷試験データの一覧を表-3.2 に示す。

図-3.8 に実測の単位面積当たりの先端抵抗と(1)で述べた推定式によって計算される先端抵抗を比較したものを示す。図-3.8 (a) は杭径が 1000 mm 以下のものに関する比較であり、(b) は 1000 mm 以上のものである。図-3.8 (a) を見ると、実測データは概ね 5000 kN/m² から 15000 kN/m² の範囲にあるが、根入れ深度 65 m 程度のもので、15000 kN/m² を超えているものがある。実測値を見ると、深度によって単位面積当たりの先端支持力が増加しているのかわかりませんが、一部は明確ではないが、一部の例外的なデータを除くと、深度が増えるにつれて多少支持力が増加しているようにも見受けられる。また、支持力推定式との比較を見ると、根入れ長が 45 m 程度までは、港湾基準、空洞拡張理論、Fleming の方法の推定値と実測値のうちの大きめの値とが一致する傾向にある。一方、USACE の推定結果は今回検討している推定式では最も低い推定値を与えるものであり、この推定値と実測値のうち小さめの結果となったものが一致する傾向にある。ただし、USACE の推定結果を上回る実測値がかなり現れている。根入れ深度が 50 m を超えると、2 つの実測値で、港湾基準の推定結果を超えていることがわかる。



(a) 杭径 1000 mm 以下



(b) 杭径 1000 mm 以上

図-3.8 杭の先端支持力の実測値と計算値の比較

ここでは、杭の閉塞に関する考慮を入れていない推定式と開端杭の実測結果を比較しているため、実測値よりも小さな推定値を示すものは推定方法があまりにも安全側であるという問題を含んでいると考えられる。そのような意味で、USACE は安全側過ぎるという問題があり、港湾基準式においても根入れ深度が深くなると安全側過ぎる場合が出てくるのが懸念される。実際、 N 値に定数 (SI 単位では、 300 kN/m^2) をかけて先端支持力を推定する現在の方法は、山肩ら²⁰⁾によってコンクリート杭に対してキャリブレーションされたものであり、根入れ深度 40 m 付近までのデータに基づいたものである。この深度を超える深度については、十分な検討がなされていない。今後、長尺杭の利用が盛んになると考えられるので、長尺杭の先端抵抗特性について十分に検討を加えていくことが必要である。

図-3.8 (b) は杭径 1000 mm 以上の場合の結果である。実測値はすべていずれの推定値よりも小さな支持力しか示していない。これは杭の閉塞の問題が顕在化しているためであると考えられる。ただし、ここで注目すべきことは、支持力の実測値が根入れ深度とともに増加する傾向にあることである。この傾向は、空洞拡張理論や、Fleming の式、EC7 の式の深度方向への支持力の増加傾向と類似の傾向を持っている。このことは今後閉塞効果を考える上で重要な点である。

(3) 支持層への根入れ比が支持力に及ぼす影響

(1) で、土木研究所の研究成果を示した。その傾向の有効性を再確認するために、今回調査した結果と土木研究所の結果を重ね合わせて示すことにする。

はじめに、根入れ比の影響について示す。図-3.9 は鋼管杭協会がこれまでに収集してきた結果と今回収集した載荷試験結果について、道路橋示方書の整理と同じ方法で、支持層への根入れ比と杭の先端支持力 (実際には、港湾基準で推定される推定支持力で除したもの) についてまとめたものである。この結果を見ると、データは大きくばらついているが、杭径が大きくなると根入れ比を長くしても大きな支持力が期待できないこと、杭径が小さい場合 (杭径 1000mm 以下) に根入れ比が大きくなっても支持力が増大する傾向にはないことなどがわかる。

この図にさらに、土木研究所のデータを追加すると図-3.10 のようになる。図によるとさらにばらつきが大きくなる傾向にあることがよくわかる。このように、支持層の根入れ比と杭の支持力の間には、有意な相関関係は見られないと言える。

表-3.2 今回調査した載荷試験結果

番号	杭径(m)	実測先端支持力 (kN)	根入れ深さ	支持層への根入れ比	支持層の土質	推定土被り圧 (kN/m ²)	平均 N 値 (ただし, 50 を上限とした)	港湾基準により推定した	$Q=300N_p$ (kN)
1	0.600	4,081	28.0	1.70		196	50.0	38.9	4,241
2	0.700	2,280	42.5	2.24	FS	298	50.0	36.8	5,773
3*	0.711	4,230	27.0	6.05	FS	189	50.0	39.1	5,959
4*	0.711	5,820	43.7	6.47	FS	306	38.0	35.2	4,529
5*	0.711	5,260	44.0	6.89	FS	308	39.0	35.3	4,648
6*	0.711	3,350	45.0	8.30	FS	315	45.0	35.9	5,363
7*	0.711	3,230	45.0	8.30	FS	315	45.0	35.9	5,363
8	0.800	2,280	80.5	2.75	FS	564	50.0	34.0	7,540
9	0.800	5,240	54.4	3.23	FS	381	50.0	35.7	7,540
10	0.800	6,590	63.8	0.53	GS	447	35.0	33.3	5,278
11	0.800	5,000	72.0	4.00	FS	504	50.0	34.4	7,540
12*	0.800	3,420	31.6	1.75	GS	221	36.0	36.3	5,429
13*	0.800	5,610	27.5	1.88	S	193	33.0	36.3	4,976
14*	0.800	3,830	23.5	2.63	GS	165	39.0	38.1	5,881
15*	0.813	3,290	32.6	0.92	GS	228	34.0	35.8	5,292
16*	0.813	3,360	41.0	2.71	GS	287	43.0	36.1	6,693
17*	0.813	10,920	65.3	6.52	S	457	50.0	34.9	7,783
18*	0.914	7,850	43.8	5.14	FS	307	38.0	35.2	7,481
19	1.000	1,700	37.3	1.00	GS	261	35.0	35.4	8,247
20	1.000	3,000	35.6	1.61	S	249	50.0	37.7	11,781
21*	1.118	10,920	36.6	0.49	S	256	45.0	36.9	13,243
22	1.118	4,955	28.0	1.00		196	50.0	38.9	14,715
23	1.200	10,857	66.6	3.00		466	50.0	34.8	16,965
24	1.500	15,700	67.5	3.00		473	50.0	34.7	26,507
25	1.500	11,300	79.0	3.00		553	50.0	34.1	26,507
26	1.500	2,200	37.1	0.67	GS	260	35.0	35.4	18,555
27	1.500	5,067	46.5	1.00		326	30.0	33.8	15,904
28	1.500	7,073	46.5	1.00		326	30.0	33.8	15,904
29	1.500	5,067	46.5	1.00		326	30.0	33.8	15,904
30	1.600	3,136	26.6	5.20		186	50.0	39.1	30,159
31	1.600	1,790	27.8	0.00	C	194	20.0	33.8	12,064
32	1.600	12,164	58.8	3.00	S	412	48.8	35.2	29,435
33	2.000	6,213	30.6	8.80		214	50.0	38.4	47,124

- 1) * は「鋼管杭 - その設計と施工 - 2004」より。
- 2) 支持層の土質については記載が明らかなもののみ示した。FS: 細砂, GS: 礫混じり砂, S: 砂
- 3) 土被り圧は推定値である。

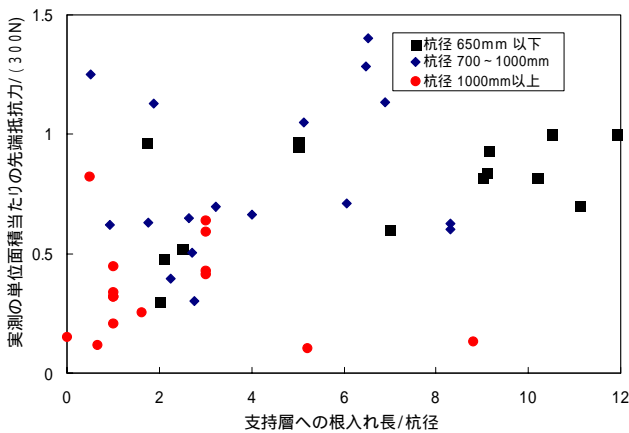


図-3.9 支持層への根入れ比と杭の先端支持力の関係 (今回の調査結果)

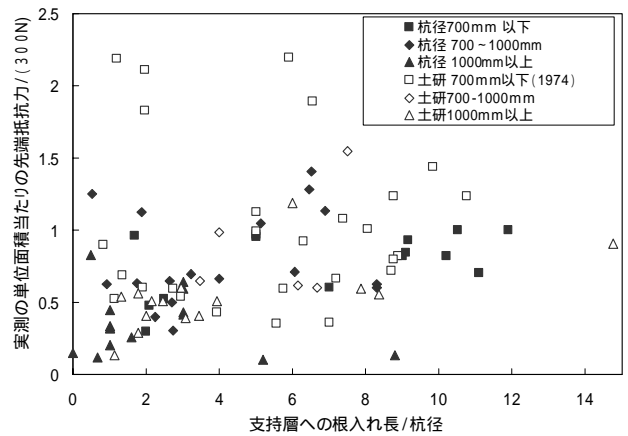


図-3.10 支持層への根入れ比と杭の先端支持力の関係 (全データ)

(4) 大径杭の課題

鋼管杭のような先端が開放された杭でも、杭径が小さければ、先端が閉じたものとほぼ同じ先端抵抗力を期待できる。これは杭の内部に土の栓ができて杭先端部分を閉塞するためである。しかし、杭径が大きくなると、栓が十分には発達せず、杭の閉塞が十分ではないとの評価をすることになる。杭の先端部分の閉塞には、杭径のほかに、根入れ部分の地盤条件や、支持層への根入れ長などが影響すると考えられている。

いずれにせよ、開端杭の先端支持力 R_{toe} は、杭の実質部の先端抵抗 R_p と、杭の内部に侵入した土と杭内周面との間の抵抗 R_{f1} によるものであると考えることができ、式(3.4)のように表現される。

$$R_{toe} = R_p + R_{f1} \quad (3.4)$$

ここで、 R_{f1} は杭の内周面摩擦による抵抗であると考えられるので、杭の内周面単位長さあたりの抵抗を r_{f1} 、杭の内径を D_1 とすると、 $R_{f1} = r_{f1} \pi D_1$ と表すことができる。

一方、閉端杭の先端支持力 R_{pc} は、単位面積当たりの支持力 q_{pc} と杭先端の閉塞面積 $\pi D_o^2 / 4$ (D_o : 杭外径) の積で式(3.5)のように示すことができる。

$$R_{pc} = q_{pc} \times \pi D_o^2 / 4 \quad (3.5)$$

したがって、開端杭と閉端杭の先端抵抗の $\eta = R_{toe} / R_{pc}$ は式(3.6)のようになる。

$$\eta = \frac{R_{toe}}{R_{pc}} = \frac{R_p + r_{f1} \pi D_1}{q_{pc} \pi D_o^2 / 4} \quad (3.6)$$

杭の内径 D_1 と外径 D_o がほぼ等しいと考えれば、式(3.6)より、 η は概ね杭径に反比例する傾向にあると考えられる。

そこで、図-3.10 に示したデータを用いて、実測の杭先端抵抗力を港湾基準における推定式で除した見かけの閉塞率と杭径の関係を図-3.11 に示した。

この結果を見ると、データはかなりばらついているものの、すべてのデータの分布形状から、杭径と単位面積当たりの支持力との間にはある程度の相関性があることが伺える。また、土木研究所のデータと今回新たに整理したデータとで、データの分布の様子が大変よく似ていることなど、杭の先端支持力に及ぼす杭径の影響が強いことがわかる。既に見てきたように、杭の先端支持力には根入れ深さの影響があり、また、式(3.6)からわかるように杭の肉厚(杭内径 D_1 と杭外径 D_o の差の 1/2) によって R_p の R_{toe} に対する比率が異なるなどの影響がある。さらに、 r_{f1} がどの程度の値になるかについても地盤等の影響を受ける可能性がある。図-3.11 のデータが大きくばらついているのは、このような要因の影響によるものと思われる。

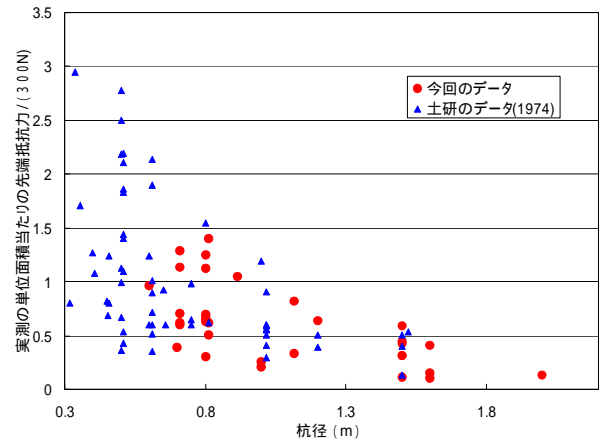


図-3.11 見かけの閉塞率と杭径の関係

内周面抵抗については以上のように定性的な説明はできるものの、定量的で具体的な特性は不明な点が多いため、定量化を目的としたメカニズムの検討が必要である。また、模型実験等による検討には限界があるため、実際に施工されている杭での検証が不可欠である。特に、支持地盤の特性の影響、施工方法の影響については、最終的には現場での計測データの集積が不可欠である。

4. 鋼管杭(開端)の支持機構

4.1 鋼管杭の軸方向抵抗力について

杭の軸方向抵抗力は、杭先端抵抗力と杭周面摩擦力の和として考えられている。ここで、杭の先端抵抗力とは杭先端部に発現する抵抗力であり、周面摩擦力とは杭外面とそれに接する地盤との摩擦抵抗によって発現される抵抗力のことで、これらの抵抗力の特性は、杭の仕様(杭径、杭長)や地盤特性および支持層と呼ばれる良質な地盤への杭根入れ長さ、杭の施工法に大きく依存する。

また、杭はその支持機構の点で、支持杭と摩擦杭に分類されることがある。杭先端が良質な層に根入れされ高い先端抵抗力を有する杭を「支持杭」、これに対して、杭先端が良質な層に達しておらず軸方向抵抗力の大半が周面摩擦力による杭を「摩擦杭」としている。しかし、この分類はきわめて便宜的なものであり、「摩擦杭」と呼ばれるものであっても、杭の先端抵抗と周面抵抗の和が杭の軸方向抵抗力であることには変わりがない。

4.2 支持力推定式の発展と各基準で用いられている推定式

杭の軸方向抵抗力は、一般に、 載荷試験、 静力学的支持力推定式、 動力学的支持力推定式、 既往の資料、

により推定されている。これらのうち、杭の静力学的推定式はこれまでに数多く提案されてきており、それらには土圧論を基礎として極限支持力を求める古典的支持力推定式と、杭と土との極限平衡状態を考える土質工学的支持力推定式などがある。

古典的支持力推定式として有名なものには Dörr (デー ル), Bierbaumer (ビールパウマー) の推定式がある。Dörr は 1922 年 杭の支持力は先端抵抗と周面摩擦抵抗の和から成り立ち、杭の周面に働く土圧は主働土圧と受働土圧の中間にあると考えた式を示している。一方 Bierbaumer は 1932 年、軟弱な地盤に打ち込まれた長い杭は主として周面摩擦によって支持されるが、この摩擦力は地中に伝わり杭先端付近に圧縮力として現れるという考えから、支持力推定式を示している²¹⁾。こうした古典的支持力推定式は、この他 1900 年頃から半世紀にわたり数多くの研究者によって提案されている。Dörr 等の古典的支持力推定式はわが国でも一時期用いられたことがあるが、土質工学の進歩により深い基礎の破壊状態が明らかになるにつれて示された土質工学的支持力推定式に次第に取って代わられるようになった。

これらのほかに、1970 年代に Vesic¹⁶⁾ によって提唱された空洞拡張理論による先端抵抗力の推定理論がある。多くの研究者がこのモデルの改良を検討した。近年では安福ら¹⁷⁾ の提案している方法が実現象によくあった支持力を推定するものとして知られている。

これらの推定式のうち、従来から日本の技術基準類に利用されてきた代表的ものに、Terzaghi (テルツァーギ) の式²²⁾ (土質試験結果を用いた支持力推定式)、Meyerhof の式¹²⁾ (標準貫入試験結果を用いた支持力推定式)がある。Terzaghi, Meyerhof の理論の概要を表-4.2 に示す。

日本において、各基準で用いられている静力学推定式の多くは、Terzaghi や Meyerhof の理論より導びかれている。わが国においては、土質調査法として標準貫入試験が主流であり、 N 値による推定式が使われるのがほとんどである。しかし、載荷試験データが豊富になり、理論と実測値を比較すると、Meyerhof の式は実測値より過大な値を与えることが明らかにされ、Meyerhof の式の修正がなされてきた。国内の各基準で用いられている支持力算定式は、すでに 2.1(2) で述べた通りである。

4.3 開端杭の先端抵抗メカニズム

開端杭の先端抵抗メカニズムに関する理論としては、山肩、永井らをはじめとして、これまで多くの研究者から様々な提案がなされている。最近では、港湾空港技術研究所で、開端杭の先端抵抗メカニズムの検討に資するための模型実験が行なわれている²³⁾。また、現場で行われた載荷試験で

先端抵抗力について検討された例もみられる²⁴⁾。

開端杭の先端抵抗は、杭先端の実質部の先端抵抗と杭内周面の抵抗力の和として考えることができる。杭の内周面抵抗は、杭の周長と内周面に作用する直応力とから決まると考えられる。杭の断面積が杭径の 2 乗に比例するのに対し、周長は杭径に比例するので、杭の直径が大きくなるにつれて杭の全断面積が抵抗力に対して有効であるとの考え方をするのが適切でなくなる。

こうした杭では先端が閉鎖したとして考える抵抗力のうち、期待できる割合を考慮する必要がある。この割合を閉塞効率と呼ぶ。この大きさは、杭の直径、支持層への根入れ、地盤の性質などにより変化することに留意を要する。

(1) 開端杭の先端抵抗機構に係わる小型模型実験²⁵⁾

a) 先端閉塞現象の把握 (地盤密度と閉塞現象の関係)
まずはじめに、模型地盤の相対密度を変えて杭の静的貫入実験を行った。実験では、地盤の相対密度が異なることによって、杭の貫入抵抗力と杭内部の土の閉塞の発現状況がどのように変わるかを観察した。

1) 実験に用いた材料と実験方法

実験に用いた土槽はアクリル製の円筒で、内径 $\phi 85$ mm、深さ 160mm である。側面の肉厚は、15 mm である。実験に用いた模型杭はステンレス製管 (外径 $D = 16$ mm、板厚 $t = 0.3$ mm、長さ 80 mm、 $D/t = 53$) である。模型地盤には豊浦砂 ($D_{50} = 0.2$ mm、 $U_c = 1.6$) を気乾状態で用いた。

この実験では、非常に高密度の地盤と低密度の地盤を作製することを目的としていたため、砂をスプーンで土槽に入れ、必要に応じて振動を加えることによって地盤の密度を調整した。密度管理は、地盤高さや重量とによって行った。作製した地盤の厚さは 150 mm である。

ここでは、3 つの相対密度の地盤を作製して実験を行った。相対密度 5% の地盤での実験を Case 1、相対密度 70% の地盤での実験を Case 2、相対密度 98% の地盤での実験を Case 3 と呼ぶ。

作製した地盤に静的に模型杭を挿入した。模型杭の貫入速度は 1 mm/min とした。模型杭の貫入には一軸圧縮試験装置を用い、杭頭荷重と杭頭変位量を計測した。杭の最大貫入量は 60 mm とした。

初期地盤及び杭を地盤に 30 mm、60 mm 貫入させた時に X 線 CT スキャナによって模型地盤の撮影を行った。なお、CT 撮影時は土槽を載荷装置からはずして CT スキャナ装置内へ移動させるため、杭頭荷重を完全に除荷した。

表-4.1 杭先端支持機構の代表的な理論

	Terzaghi の理論	Meyerhof の理論
図		
基本思想	<ul style="list-style-type: none"> 破壊面 ab を仮定し、ab 面には、土の上載重量と杭側面のせん断抵抗を作用させて検討する。 本来は浅い基礎を対象とした理論のため、杭先端が浅い場合、N 値が 30 以下の場合に用いる。 	<ul style="list-style-type: none"> 対数らせり線からなる滑り破壊を仮定する。 本来は深い基礎を対象とした理論である。
設計式	$R_u = q_d A_p + U l f_s$ <p> R_u : 杭の極限支持力 (kN) q_d : 杭先端地盤の極限支持力度 (kN/m²) A_p : 杭先端面積 (m²) U : 杭の周長 (m) l : 地中部分にある杭長 (m) f_s : 杭周面摩擦力 (kN/m²) </p> <p>円形段面の場合</p> $q_d = 1.3 c N_c + 0.6 r \gamma_1 N_r + \gamma_2 D_f N_q$ <p> c : 土の粘着力 (kN/m²) γ_1 : 杭先端から下の土の単位体積重量 (kN/m³) (地下水位以下は水中単位体積重量) γ_2 : 杭先端から上の土の単位体積重量 (kN/m³) (地下水位以下は水中単位体積重量) r : 杭の半径 (m) D_f : 地盤表面から杭先端までの深さ (m) </p> <p> $\left. \begin{matrix} N_c \\ N_r \\ N_q \end{matrix} \right\}$: 杭先端地盤の支持力係数 (下図から求める) </p>	$R_u = q_c A_p + \frac{1}{200} \overline{q_c} A_s + \frac{q_u}{2} A_c \quad \dots\dots\dots \text{式}$ $R_u = 400 N A_p + 2 \overline{N_s} A_s + 5 \overline{N_c} A_c \quad \dots\dots\dots \text{式}$ <p> R_u : 杭の極限支持力 (kN) A_p : 杭の先端面積 (m²) q_c : 杭先端地盤のコーン支持力 (kN/m²) $\overline{q_c}$: 杭先端までの砂層のコーン支持力の平均値 (kN/m²) A_s : $U l_s$ (m²) l_s : 砂層中の杭長 (m) q_u : 杭先端までの粘土層の一軸圧縮強さ (kN/m²) N : 杭先端地盤の N 値 $\overline{N_s}$: 杭先端までの砂層の N 値の平均値 $\overline{N_c}$: 杭先端までの粘土層の N 値の平均値 A_c : $U l_c$ (m²) l_c : 粘土層中の杭長 (m) U : 杭の周長 (m) </p> <p>式 はコーン支持力 q_c 及び一軸圧縮強さ q_u を測定した場合に、式 は N 値を測定した場合に適用する。</p>

2) 実験結果

図-4.1 に杭の貫入量と貫入抵抗の関係を示す。いずれの

実験結果においても貫入量 20 mm までは、貫入抵抗はほとんど発現していない。しかし、貫入量 20 mm を超えると貫入抵抗が増大し始めた。貫入抵抗が増大し始めると相対密度の違いによって貫入抵抗の増加の仕方に違いが生じ、模型地盤の相対密度が高いほど貫入抵抗が大きくなった。

図-4.2 に杭中心縦断面の CT 画像を示す。画像中の白色の部分が杭体であり、灰色部が砂地盤、黒色部は空気である。いずれの画像においても、画像上端が模型地盤の表面となっている。相対密度が 5 % の地盤における実験 (Case 1) では、杭貫入量 30 mm 時点で管内土表面が原地盤より沈下する現象が見られており、60 mm 貫入した時点では、管内土表面が初期位置から大きく沈下する現象が見られた。相対密度が 70 % の地盤における実験 (Case 2) では、杭貫入量 30 mm 時点では管内土表面が沈下する現象は見られないが、60 mm 貫入した時点では、わずかに沈下する現象が見られた。相対密度が 98 % の地盤における実験 (Case 3) では、杭貫入量が 60 mm に達するまで杭内部の地盤面が沈下する現象は見られなかった。

3) 考察

一般的に杭の閉塞現象とは、先端が開端形状の杭において、杭の打設に伴って杭内部に貫入した土が詰りを生じて、閉端形状の杭と同様に先端抵抗力を発揮する現象をさしている。しかし、この定義ではあまりにもあいまいである。つまり、「土が詰まりを生じること」が閉塞なのか、「閉端杭と同様の先端抵抗力を示すこと」が閉塞なのか分からない。

建築基礎構造設計指針⁵⁾では、閉塞効率 η を式(4.1)で示している(図-4.3)。

$$\eta = \frac{R_p + R_f}{R_{PC}} \quad (4.1)$$

ここで、 R_p ：開端杭の先端肉厚部の極限支持力、 R_f ：閉端杭の内部に詰まった土による最大周面摩擦力、 R_{PC} ：閉端杭の極限先端支持力である。

式(4.1)で考える閉塞効率は「閉端杭と同様の先端抵抗力を示すこと」という考えの上に立っており、十分に閉塞していれば、「閉端杭と等しい先端抵抗力」が発揮され $\eta=1$ となる。 $\eta < 1$ のときは十分には閉塞していない。一方、 $\eta > 1$ は基本的に生じない。なぜなら、 R_f は $R_{PC} - R_p$ の反力として生じるものであるからである。

なお、式(4.1)では、それぞれの杭の極限支持力の比較から閉塞効率が定義されている。この定義を今回の実験条件に合うように拡張すると、式(4.1)の各記号は、 R_p ：ある深度まで貫入させたときの開端杭の先端肉厚部の軸方向抵抗力、 R_f ：ある深度まで貫入させたときの開端杭の内部に詰まった土による周面摩擦力、 R_{PC} ：ある深度まで貫入させたときの閉端杭の軸方向抵抗力となる。

この定義によって η を求めるには、必ず閉端杭の先端抵抗力を知ることが必要となる。ところで、今回の実験のように、地表面から杭を貫入させた場合には、特に緩詰めや密詰めの場合、杭の貫入に伴って、地盤が圧縮したり、膨張したりする可能性がある。閉端杭の場合には、杭の内部に土が入り込む余地があるが、閉端杭の場合には、杭の内部には土が入り込むことはなく、余分な土は杭の外側に逃げることも考えられるが、いずれにしても体積変化の状態が異なることが予想されるため、 R_{PC} を求めている地盤の条件と $R_p + R_f$ を求めている地盤の条件が異なっている可能性が高い。このような違いは、特に、Case 1のような非常にゆるい状態の地盤ではその差が顕著となる可能性が高い。このため、初期地盤を同じ条件にして閉端杭と開端杭の貫入抵抗を求めても、正しい意味での閉塞効率は決められないと思われる。

このように、閉塞を抵抗力の観点から定義するのは難しい場合が多い。ところで、 $\eta > 1$ は基本的に生じないと述べたが、仮に $\eta > 1$ になりそうになったときには、実際には、杭内部に詰まった土が移動せず、杭の下の地盤が破壊されることが考えられる。このように、杭内部の土の移動を考えることによっても閉塞の程度を議論することができる。この場合には、杭内部の土が移動しないので、杭内部の土の表面が杭とともに下がるということが観察される。この現象を観察するのは力を測定するのに比べて簡単である。

そこで、ここでは、杭の閉塞現象とは、杭内部に貫入した土が栓となって、さらに杭を貫入したときに杭内部に土が貫入しにくくなる現象のことをさすことにする。つまり、簡単に観察できる現象として、杭を地盤に貫入させるにつれて杭内部の地盤面が低下していく現象を杭の閉塞現象という。

たとえば、Case 1では、貫入量 30 mm になる前に杭内部の地表面の低下が生じており、このことは、杭内部の土が杭の貫入とともに少しずつ下がったことを意味している。このことが杭の閉塞が生じている証拠であると考えられる。このように考えると、Case 2では、貫入量が 60 mm に達する前に閉塞が生じたものと考えられる。しかし、Case 3では、貫入量 60 mm に至るまで杭の閉塞は生じなかったと考えられる。

一方、貫入抵抗についてみると、Case 1の貫入抵抗は最後まで極めて小さく、一方、Case 3では貫入量 20 mm を超えたところから貫入抵抗が増加し始め、貫入量が 30 mm を超えてからは、貫入量に対してほぼ直線的に貫入抵抗が増加している。このような貫入抵抗の変化だけを見ると、Case 1では閉塞が生じないために貫入抵抗が増大せず、Case 3では貫入量 20 ~ 30 mm あたりで閉塞が起こり始め貫入

量 30 mm 以上では完全な閉塞が生じて大きな抵抗が生じたものと思いがちである。しかし、そのように考えることは間違っている。つまり、Case 1 の貫入抵抗が小さいのは杭下端以下の地盤の抵抗が小さいことによるものであって、杭内部に貫入した土が栓を作らなかったために抵抗が小さかったのではない。一方、Case 3 では、杭下端以下の地盤の抵抗が大きいので、杭内部に貫入した土が栓とならない状態で大きな貫入抵抗を示したものであると考えられる。

以上のように、杭内へ地盤が侵入するか杭に閉塞が生じるかは、杭下端面の地盤反力と杭内部の土の周面摩擦力及び自重との釣合いによって相対的に決まるものである。

- b) 杭の閉塞現象と杭周辺地盤挙動関係
 - 1) 粒子の移動追跡による地盤変形挙動の解析
 - i) 実験に用いた材料と実験方法

実験に用いた土槽はアクリル製の円筒形で、内径 ϕ 100 mm、高さ 440 mm である。この土槽は、土槽を移動させないで CT 撮影ができるように、CT 装置内で载荷をしながら CT 撮影できるように設計されている。つまり、土槽に上蓋を設置し、その上にジャッキ、ロードセル、変位計を配置した（写真-4.1）。

模型杭は直径 $D = 15$ mm のアルミニウム製とし、開端杭（肉厚 $t = 1$ mm、 $D/t = 15$ ）と閉端杭（中実）の 2 種類を用いた。杭の長さは 140 mm であり、载荷の途中で 30 mm の長さのロッドを繰返し継ぎ足すことによって、杭を地盤に深く貫入できるようになっている。

模型地盤には豊浦砂を気乾状態で用いた。杭貫入による周辺地盤の挙動を可視化するため、ターゲットとして鉄粒（ $\phi 0.3$ mm）を用いた。

なお、杭径に対する土槽内径比 B/D （容器の内径 / 杭の外径）は 6.7、砂の粒子径と杭径の比 D/D_{50} は 75 となっている。これらの諸元は、X線 CT スキャナ装置の能力（これは土槽の最大径を決める要因となる）と実験に用いやすい砂の粒径（気乾状態であまりに細かい砂を用いると粘着力の影響が出るおそれがあり、模型の最小断面を決める要因となる）の関係から、実験結果になるべく土槽側面の影響が出ないように決定したものである。

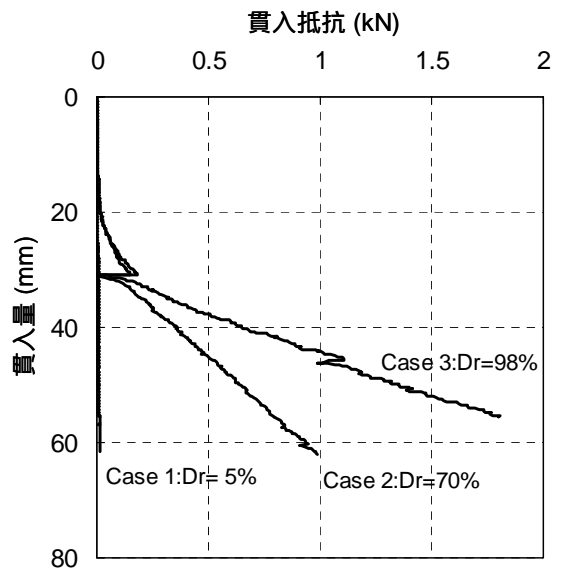


図-4.1 杭の貫入量と貫入抵抗の関係

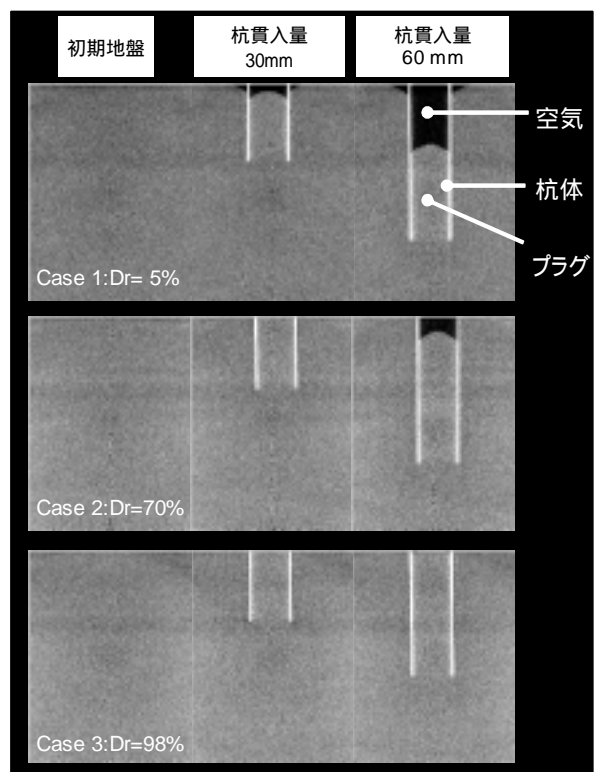


図-4.2 杭中心鉛直断面の CT 画像

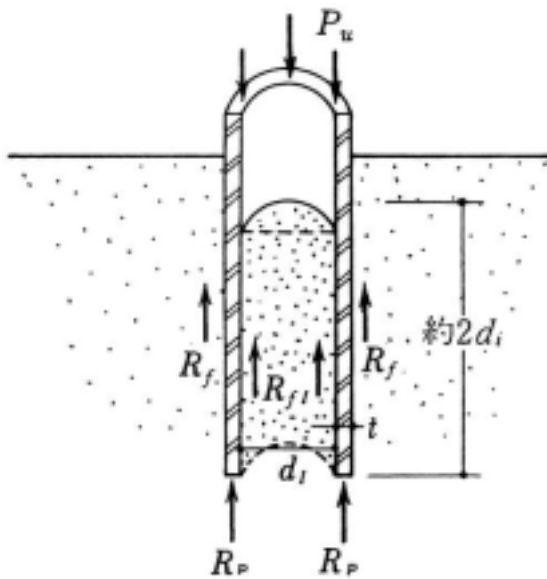


図-4.3 閉塞効率の概念⁵⁾

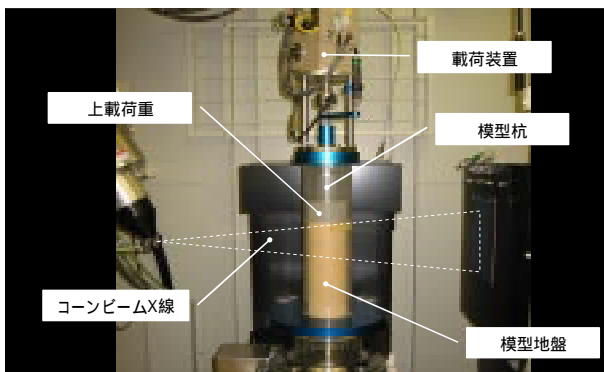


写真-4.1 実験状況

地盤は乾燥した豊浦砂を空中落下法により目標相対密度 D_r を 65 % として、層厚 $H = 270$ mm となるように作製した。この際、ターゲットとする鉄粒を 5% 混ぜた豊浦砂を地盤作製完了時に表面から 75 mm から 48 mm の範囲で、約 6 mm 間隔で、一層あたり概ね 3 mm の厚さとなるように 5 層作製した。また、杭貫入に伴う周辺地盤の変形挙動は上載荷重の影響を受けるため、特に、周辺地盤が地表面方向へ移動するのを抑える目的でステンレス球 ($\phi 2$ mm) を模型地盤表面に設置した。これによる上載圧は 2.5 kPa となるようにした。なお、杭体側面にはステンレス球が触れないようにパイプ状の治具を設置した。

杭は地表面より一定速度 (1 mm/min) の変位制御で貫入

させ、最大貫入量は 81 mm とした。その間、杭の貫入量と貫入抵抗は連続的に測定した。また、貫入量 42 mm から貫入量 3 mm ごとに一時的に貫入を停止して、杭頭荷重が安定してから CT 撮影を行った。なお、貫入量約 30 mm ごとに载荷ピストンの継ぎ足しを行っており、そのたびに杭頭荷重を一旦除荷している。

なお、ここでは、閉端 (中実) 杭の実験結果を Case 5、開端杭の実験結果を Case 6 と称する。

ii) 実験結果

図-4.4 に杭の貫入量と貫入抵抗の関係を示す。図-4.4 を見ると閉端杭の場合、貫入の初期から貫入抵抗を發揮し始め、貫入量が 40 mm 程度を過ぎると貫入抵抗が著しく大きくなる傾向にあることがわかる。

開端杭の場合には、貫入量 18 mm まではほとんど貫入抵抗がなく、その後貫入抵抗が増大する。貫入量 40 mm を超えてからは貫入抵抗の増大傾向が顕著で、貫入量 55 mm 程度では、貫入抵抗が閉端杭とほぼ一致する状況となった。その後、貫入量 62 mm 程度まで貫入抵抗が一時低下し、貫入量 75 mm 付近で再び閉端杭と貫入抵抗がほぼ一致した。

この実験条件において、土圧係数が 0.5 程度であるとすると閉端杭の周面抵抗が全抵抗に及ぼす影響はきわめて小さく、貫入量 20 mm で 0.001 kN 程度、貫入量 80 mm で 0.007 kN 程度である。このようなことから、測定された貫入抵抗がすべて先端抵抗によるものであるとしても誤差はほとんどない。そこで、同じ深度での開端杭と閉端杭の貫入抵抗の比 (R_{open} / R_{close}) を求めた。その結果を図-4.5 に示す。

図-4.5 の横軸 (R_{open} / R_{close}) は先端閉塞効率を表すものであると考えてよい。貫入抵抗の比は貫入量 40 mm 程度で 50 % に達し、その後も徐々に増えて貫入量 50 mm 程度で 90 % を超える。その後貫入抵抗比は一度下がるが、再び 90 % を超える抵抗比となることがわかる。なお、貫入量 55 ~ 70 mm にかけて生じた開端杭の顕著な貫入抵抗力の減少と再増加は、すでに水谷ら²³⁾の実験でも観察されており、開端杭が完全閉塞に近い状態に達したときに現れる特徴的な現象である。これは、開端杭では、閉塞は一度生じたらそのまま続くのではなく、閉塞の発現と減退が繰返し発生することを物語っている。

図-4.6 と図-4.7 に杭を貫入させた時のターゲットの移動状況を示す。これらの図は、CT イメージを 2 値化したものを、杭芯を軸にして 360 度重ね合わせたものである。それぞれの図において、貫入量 0 mm (初期) と 42 ~ 81 mm までの貫入量 3 mm ごとのターゲットの状態を示している。

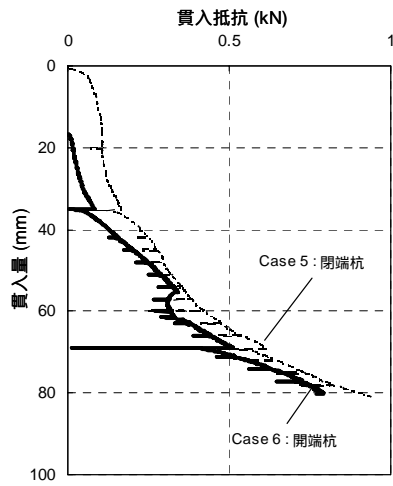


図-4.4 杭の貫入量と貫入抵抗の関係

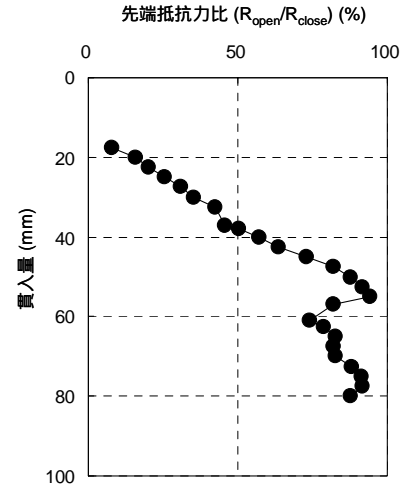


図-4.5 杭の貫入量と貫入抵抗比の関係

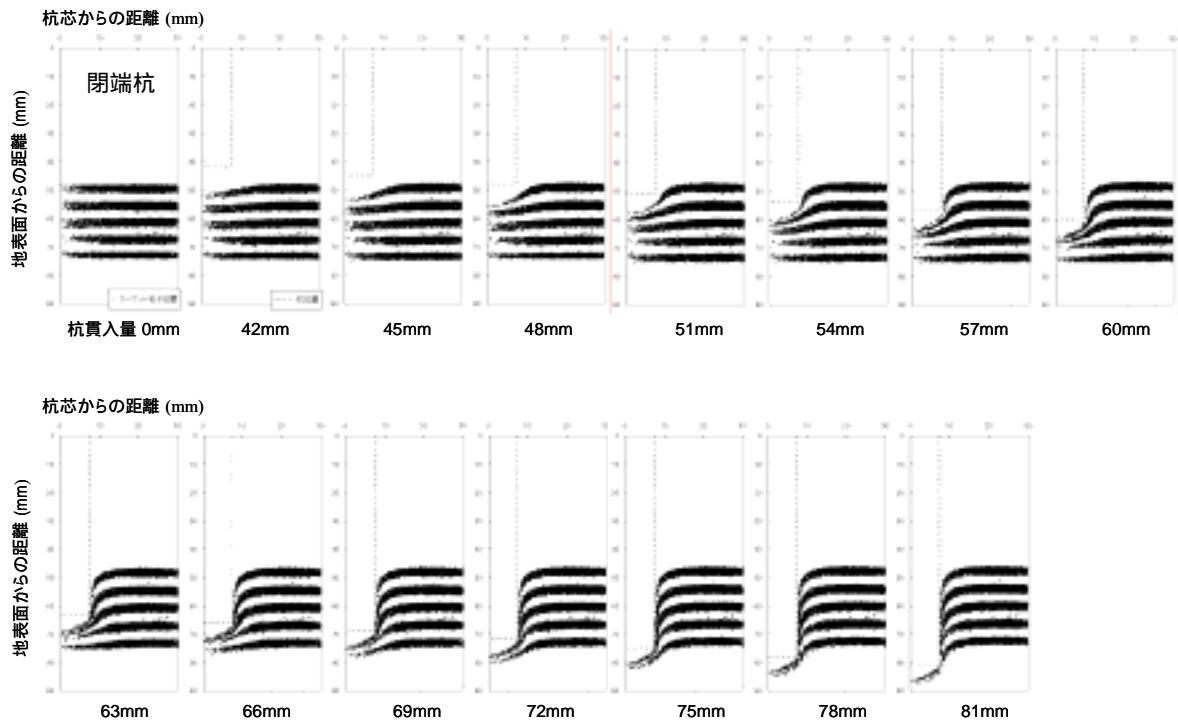


図-4.6 杭の貫入に伴うターゲットの移動（閉端杭）

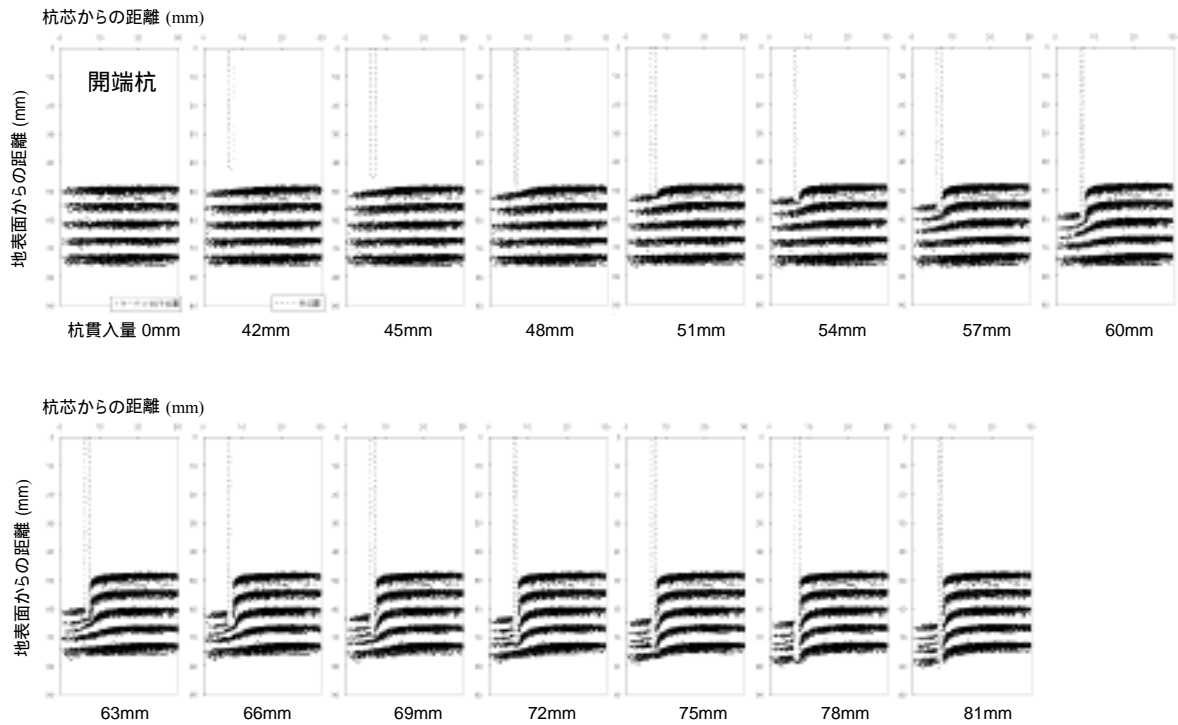


図-4.7 杭の貫入に伴うターゲットの移動（開端杭）

図-4.6は閉端杭のケースの結果である。この図からわかるターゲットの移動の特徴は次のとおりである。杭芯下端部には、最上層のターゲットよりも上にあつた土が残っており、ターゲットの位置の土は、杭下端には到達しない。

杭の下に残るターゲットは下向きに湾曲する。杭下端がターゲット位置に到達した時に、杭の端部において強くせん断を受ける。杭の外側3mm程度の範囲では、杭の貫入によって下方に引き込まれる。杭の外側では、わずかであるがターゲットが上方方向に移動する。

図-4.7は開端杭のケースの結果である。この場合には次のような特徴がある。ターゲットは杭の中にほぼ水平を保った状態で侵入する。ターゲットの上下方向の間隔は、杭の内部に侵入するまでに短くなり、侵入後はほぼ一定である。杭の外側のターゲットの連れ込み沈下量は閉端杭の場合よりも小さい。

iii) 考察

図-4.8と図-4.9に杭の内側にあたるターゲットの移動の様子を示した。これらの図では、第1層、第3層、第5層の杭中心下のターゲットと杭外縁部のターゲットの移動を図化している。

図-4.8は閉端杭の結果である。杭中心下のターゲットは、杭軸から側方への移動はほとんど示さず、ターゲットの間隔が狭められ、最後にはいずれのターゲットもほぼ同じ位置に集まっている。外縁部のターゲットは、杭先端が到達

する前に側方外側に移動する。その後、杭の側面に沿った位置にとどまる。ターゲットの間隔は多少開く傾向にある。

図-4.9は開端杭の結果である。開端杭では、杭の貫入量48mmまでは目立った変化はない。その後、貫入量63mmまでの間で、各層のターゲットの間隔が狭まるとともに第3層の杭外縁部のターゲットだけが外側に大きく移動している。ここでは示したターゲットの数が少ないので、第3層の外縁部のターゲットだけが動いているのが観察されているが、実際には、このターゲットの周辺のターゲットがすべて外側に移動したものと考えられる。杭の貫入量81mmに達しても杭外縁部のターゲットで杭外側に移動したのは第3層のターゲットだけであり、その他のターゲットは側方への移動はわずかであったことが分かる。

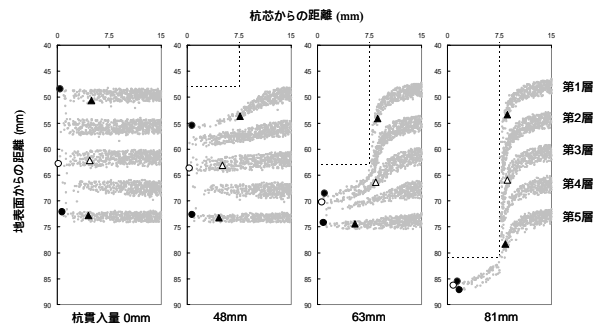


図-4.8 杭の内側に位置する代表的なターゲットの移動の様子（閉端杭）

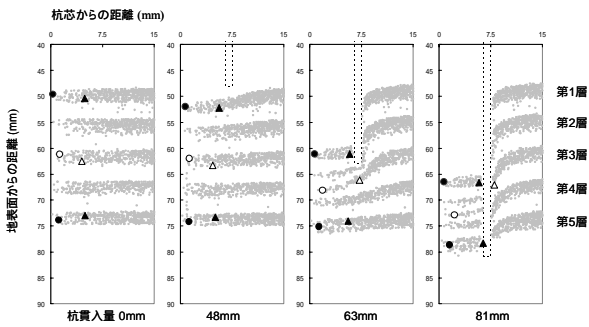


図-4.9 杭の内側に位置する代表的なターゲットの移動の様子（開端杭）

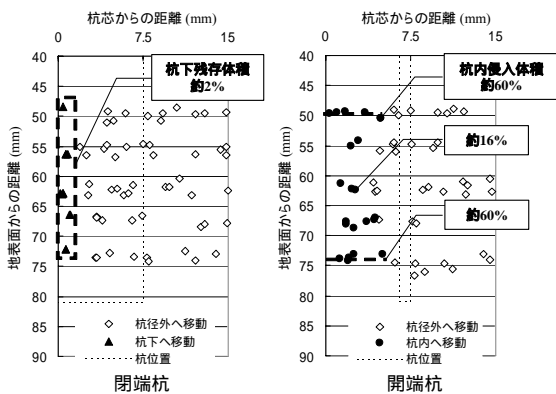


図-4.10 杭下、もしくは杭内側に残ったターゲットの初期位置

図-4.10 ではより多くのターゲットについて、杭が 81 mm 貫入するまでにそれぞれのターゲットが杭の外側に移動するか、杭の内側もしくは杭断面下にとどまるかを調べた結果を示した。なお、ここでは、ターゲットのプロット位置は初期位置であり、外側に移動したかどうかはプロットの記号を変えることで表している。閉端杭では、どの層においても、杭中心軸直下のターゲットだけが杭の下にとどまっており、その部分の体積を計算すると元の体積の 2% 程度である。一方、開端杭については、層ごとに様子が異なり、第 2 層と第 3 層では、杭の外側に移動するターゲットが多く、その他の層では、杭中心から 5 mm 離れたあたり付近を境界として、その外側に位置するターゲットが杭の外側に移動した。全体として、各層の約 60% から 16% が杭の内側に移動していたことになる。

次に、杭周辺地盤の体積変化傾向について検討した。杭貫入量が 42 mm 地点での任意の粒子ターゲット 4 点を格子点として選択し、杭貫入量 3 mm ごとの各格子点変位量から格子内地盤の体積圧縮（膨張）量と格子の重心座標を求めた。なお、体積量は粒子ターゲット 4 点で囲まれる格子平面が杭中心軸に対して軸対称 3 次的に存在すると仮定

し、2次元の面積を3次元の体積に拡張して概算した。

この検討では杭貫入量が 42 mm のときを調査の始点とし、杭下端から約 1.5D 下にある各格子の体積変化傾向について検討した。検討の対象とした格子重心の始点を図-4.11中に A1 ~ A5, B1 ~ B3 として示す。閉端杭は A1 ~ A5 の 5 格子、開端杭は B1 ~ B3 の 3 格子について貫入過程における体積を算出し、格子重心座標と格子の体積圧縮（膨張）傾向の分布を図-4.11 に模式的に表した。つまり、地表面から 65 mm 程度のところにあった地盤は、杭の貫入につれて、杭下端から 1.5D から 0.5D に達するまでは、杭下端の下方に位置する地盤は膨張傾向にあるものの、杭下端からの距離が 0.5D 以下に近づくと圧縮傾向になることが分かった。以上の傾向は開端杭と閉端杭で類似であるが、仔細に見ると、開端杭と閉端杭で圧縮傾向となる領域、膨張傾向となる領域の広がり程度は異なっている。すなわち、杭中心直下（A1 と B1 付近）の膨張傾向領域の分布が異なり、開端杭が広い領域を持つ結果となった。

以上の観察結果から次のことが分かった。開端杭であっても、杭下方の土が杭の外側に移動することがある。杭の外側に移動するかどうかと杭の閉塞状況とは関連性がある。第 5 層のターゲットの移動状況から、十分に杭先端から離れている部分の土の体積変化傾向を把握できた。

この実験では、開端杭の支持力は貫入量 54 mm 付近で閉端杭の貫入抵抗にほぼ一致したが、これらの観察結果によると開端杭と閉端杭では周辺地盤の変形挙動には大きく差があることがわかる。

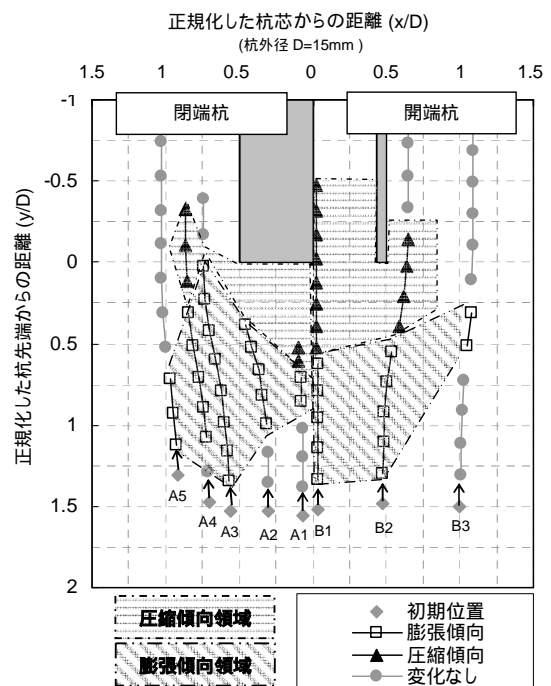


図-4.11 第 5 層付近の層の杭貫入に伴う体積変化傾向

2) PIV を用いた地盤変形解析

1) で述べた実験では、鉄粒を地盤内に分散して配置することにより地盤の変形を観察した。しかし、いくつかの点で問題があった。ひとつは粒子の追跡が比較的困難であったことである。また、粒子の配置できる範囲に限界があるため、やむを得ず十分な観察ができない範囲が生じた。そこで、杭先端付近の地盤挙動をより詳細に検討するために粒子画像流速計測法 (PIV) により地盤の変形を検討した。

なお、前節では閉塞効果が発揮された後の杭先端地盤での地盤挙動に着目したが、この実験では閉塞効果が発揮されるまでの地盤挙動に着目した。すなわち、杭をあらかじめ地盤中に貫入しておき、杭内部に土をつめ、これを初期状態として、その後、杭の貫入につれて地盤がどのように変形するかを観察した。

i) 実験条件と実験方法

実験に用いた土槽は前述のものと同じものである。地盤材料には 相馬硅砂 4号 ($D_{50} = 0.7 \text{ mm}$, $U_c = 1.6$) を用いた。これは、X 線 CT 装置による撮影画像に対して PIV の手法を用いるために、粒径の大きな地盤材料を用いる必要があったためである。杭内の土の挙動が少しでも詳しくわかるように、模型杭の杭径も大きなものに変更した。具体的には、直径 $D = 32 \text{ mm}$ (肉厚 $t = 1.5 \text{ mm}$, $D/t = 21.3$)、長さ 140 mm のアルミニウム製の杭を用いた。

本実験では、まず、厚さ 220 mm の乾燥砂地盤 (目標相対密度 65%) を空中落下法によって作製し、土槽の中心部分に杭を設置した後さらに 50 mm 地盤を作製した。地盤作製後、杭内部に、杭の外側地盤と同じ層厚となるように乾燥砂を投入した。杭の外側地盤には、鉄球を上載荷重 2.5 kPa となるように設置した。

杭貫入は一定速度 (1 mm/min) の変位制御で行い、最大貫入量は杭設置深さから 48 mm (地盤深さ 98 mm) とした。なお、貫入量約 36 mm で載荷ピストンの継ぎ足しを行っており、その際には杭頭荷重を一旦除荷している。杭を 3 mm 貫入するごとに貫入を停止し、CT 撮影を行った。

図-4.12 に杭貫入実験前後の X 線 CT 画像を示す。図から、CT 画像で砂粒子が判別できることがわかる。なお、杭体は画像中に白色で示されている。

ii) 実験結果

図-4.13 に杭の貫入量と貫入抵抗の関係を示す。この図における杭の貫入量の原点は、杭の初期設置深度である深度 50 mm である。この実験では、あらかじめ杭を根入れさせておいたこと、また杭内に土を詰めておいたことから、貫入の初期から貫入抵抗が生じている。しかし、その後の貫入抵抗の変化をみると、貫入量が 36 mm までは貫入抵抗の増大の仕方がそれ以降よりもやや小さい傾向にあった。

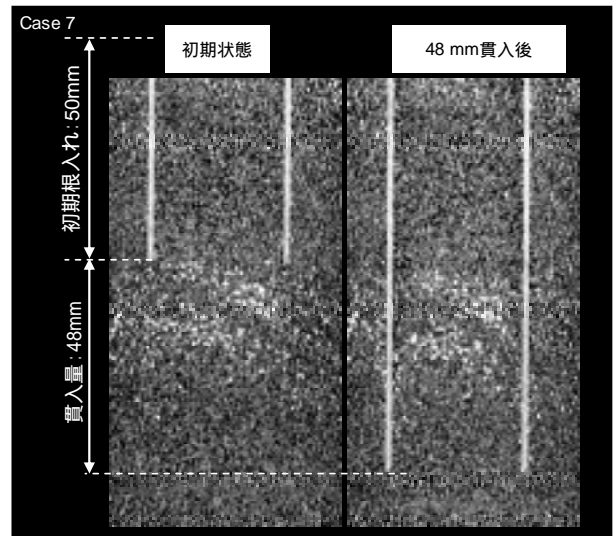


図-4.12 貫入実験前後の CT 画像 (相馬硅砂 4号)

図-4.14 には CT 画像を基に市販の PIV ソフト (株式会社ディテクト製 DIPP-FLOW ver.1.21-1) を用いて解析した地盤内の変位ベクトルを示す。各図の上を示した数字は、図示した変位ベクトルを求めた区間の杭の貫入量である。図中には、PIV の解析結果による一定変位量以上 (杭貫入量に対して 10% 以上) の変位ベクトルをカラーで示した。なお、この図では、ベクトルの大きさが小さく、ベクトルの向きが分かりにくいので、各領域のベクトルの主要方向を示す矢印を図中に示した。以下に貫入抵抗力と変位ベクトルの関係について説明する。

0 ~ 3 mm 貫入時

本実験条件では貫入初期から抵抗力が発揮された。0 ~ 3 mm 貫入時の画像中のベクトルからは杭内及び杭下地盤が一体的に挙動したことが見受けられる。この区間では、杭下地盤に球根状に鉛直下向きの変位場が存在していることが確認された。これは初期に杭の根入れを与え杭内に土を詰めたことによる、内周面抵抗の発現によるものであることが考えられる。ここでは、摩擦抵抗が杭下の地盤反力を上回り、閉塞現象が生じていたと考えられる。

3 ~ 33 mm 貫入時

貫入量がわずかに増えるとすぐに抵抗力の増加速度は減少した。3 ~ 33 mm 貫入までその傾向がみられる。画像からは杭内土と杭下地盤が一体挙動をしていないことから、この区間では杭の閉塞は生じていなかったものと思われる。

9 ~ 12 mm 貫入時には杭内では土の移動が観察され、杭より下部の地盤では移動が観察されていない。また、杭内部の土は鉛直上向きに移動していた。

18 ~ 21 mm 貫入時には杭内土および杭より下の土が広い範囲で鉛直下向きに変位していた。これは、全体として

杭内に土が入りにくい状況が起きていたことを意味するものであるが、杭の貫入量に対する移動量が小さく、閉塞は不完全であったと思われる。

21 ~ 24 mm 貫入時には杭内部の土に移動が見られず、杭より下の土が移動していた。特に杭先端付近の土は上方方向に移動しており、杭の先端の実質部付近の土は下向きに変位していた。

杭の閉塞が起こるまではこれら 9 ~ 12 mm, 18 ~ 21 mm, 21 ~ 24 mm の画像で見たような地盤変形を繰り返している可能性が高い。

33 ~ 45 mm 貫入時

貫入抵抗力の増加速度は 33 mm 貫入以降に上昇した。33 ~ 45 mm 貫入時の画像では杭内土や杭下の土が杭の貫入に伴って移動する傾向にあることがわかる。ただし、その変化は周期的であるようであり、例えば、36 ~ 39 mm の貫入量の際には、地盤の移動量が大きいですが、引き続く 39 ~ 42 mm では相対的に土の移動量が少なくなっている。

ただし、これらの区間で特に顕著に見られる傾向として、杭の内周面付近の移動量が杭中心部の移動量よりも大きいことがあげられる。これはすなわち、杭内周面摩擦の影響で、杭内周面付近の土が杭に対して移動しにくい状況にあることを意味している。

42 ~ 45 mm 貫入時には、杭内部、杭下とも一体的に下方方向に移動しているように見え、あたかも閉塞が生じたかのようであるが、実際には、杭体の変位量に対しては最大で 30 % 程度の変位量あり、この実験では、十分な閉塞状況が生じるまでの観察はできていない。

次にこのベクトル分布を用いて地盤の連続的な変形解析を行い、せん断ひずみ分布及び間隙比の変化量分布を求めた。

図-4.15 にせん断ひずみ分布を示す。杭の貫入初期には杭実質部先端にせん断領域が発生する。杭の貫入が 12 mm, 21 mm と進んでくると杭実質部先端付近のひずみ集中部分が杭先端で連結するようになる。更に貫入が進んで、杭の貫入量が 30 mm, 39 mm, 45 mm に達すると杭内部の杭体壁近傍にせん断ひずみが集中する。杭外周面近傍においてもせん断ひずみの集中する領域があり、ひずみの絶対値では外周面のほうが大きい。

図-4.16 に間隙比の変化率を示す。図より、杭の貫入が 3 mm 程度の時にすでに杭実質部周辺に膨張領域が発達していることがわかる。その後、貫入が進むに従い、膨張領域は杭内に侵入している。これらは、実質部の貫入によって地盤がせん断膨張した領域であると考えられる。更に 30 mm, 39 mm と貫入が進んでも杭内周面部、杭外周面部には膨張領域が存在する。また、45 mm 貫入時には杭先端部

分に圧縮領域がはっきり現れ、これが主動くさび領域にあたると考えられる。

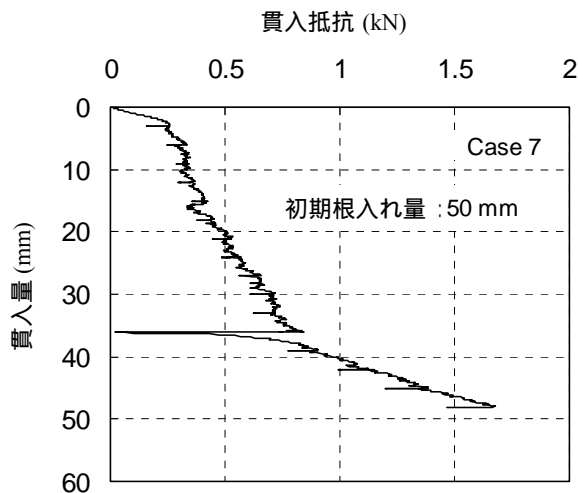


図-4.13 貫入抵抗と貫入量の関係 (初期根入れ 50 mm)

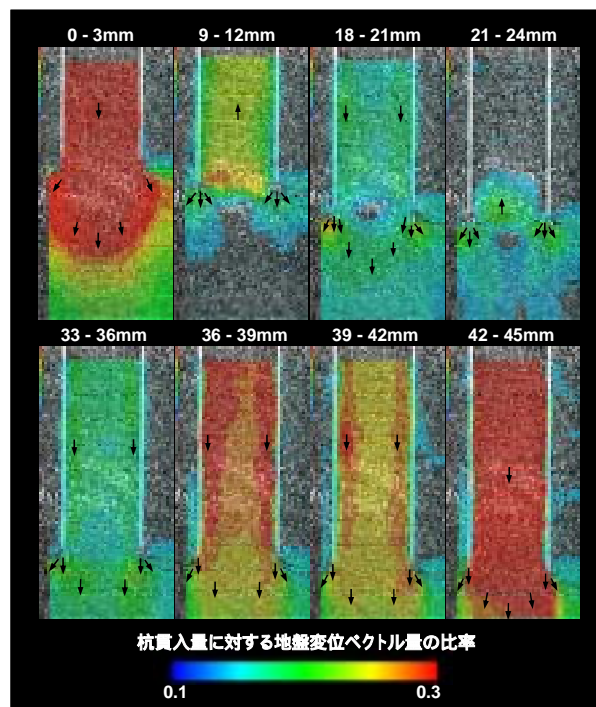


図-4.14 貫入過程における地盤内ベクトル分布の変化 (PIV 計測)

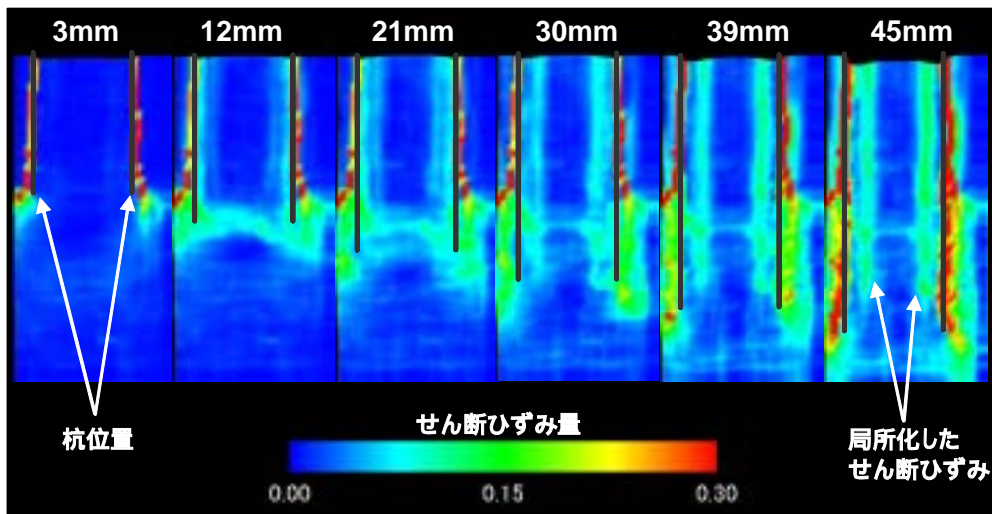


図-4.15 PIVに基づく変形解析により求めたせん断ひずみ分布

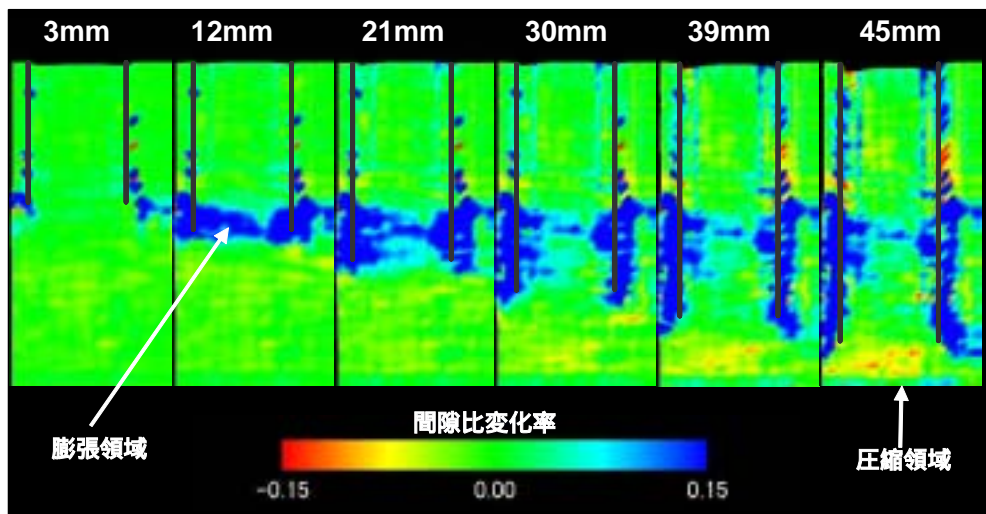


図-4.16 PIVに基づく変形解析により求めた間隙比の変化率分布

c) 杭の閉塞メカニズムに関する考察

ここまで述べた開端杭の先端抵抗機構に係わる小型模型実験の結果から得られた知見をまとめると、以下のよう
なものである。

開端杭の閉塞現象は杭下端面の地盤反力と杭内土の周面摩擦力及び自重との釣合いによって相対的に決まるものである。

閉塞効果発揮後の開端杭は閉塞の発現と減退が貫入過程で繰返し生じる。

開端杭の杭下地盤および閉塞発現後の開端杭の杭下地盤は貫入に伴い杭外側へ排除される方向に側方移動する。

開端杭には杭下および杭内側で杭との相対速度が低

下する領域は存在するが、閉端杭のように完全な主働くさび領域は維持されず、地盤は断続的に杭内に侵入する。

閉塞発現後の開端杭先端付近及び閉端杭先端には圧縮傾向にある領域が存在しており、その周囲には膨張傾向領域が分布する。

開端杭の杭内壁面部近傍にせん断が集中する領域が存在する。

あらかじめ根入れされた開端杭では杭貫入初期には杭実質部周辺にせん断膨張領域が発達した。杭の貫入が進むに従って膨張領域が杭内に侵入し壁面部には膨張領域が残る。閉塞傾向が強まってくると、杭先端部分に圧縮領域が現れる。

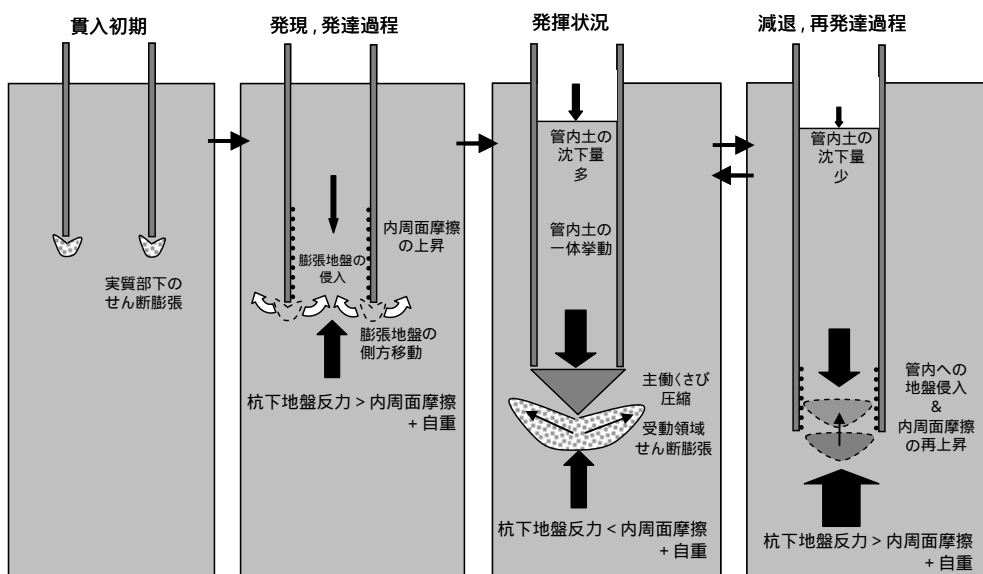


図-4.17 先端閉塞発現メカニズムの推察

以上の観察結果から予想される閉塞発現メカニズムの概略を図-4.17に示す。

杭の貫入初期には、実質部の先端抵抗が杭の貫入抵抗として発揮される。その後貫入が進むにつれて、杭先端部の抵抗が増加するとともに、内周面抵抗も増大する。この間、内周面抵抗は断続的に増加する。内周面摩擦力が増加すると、ついには杭下地盤の杭内への侵入を阻害し、閉塞現象が発現する。この後、杭下地盤反力を内周面摩擦力が完全に上回ると完全閉塞状態となるが、完全閉塞が生じなくても地盤の侵入を阻害するため、杭内土の上面が沈下する。閉塞現象が発達すると杭直下地盤の圧縮変形が生じ、主働くさびに似た領域を形成する。主働くさび領域と杭下の深い地盤に囲まれた受働領域はせん断変形を受けて体積膨張と側方移動を生じる。更に杭の貫入が進むと杭より下の地盤の地盤反力が上昇し、閉塞状態は維持されなくなり、それまで主働くさび領域であった地盤が杭内に侵入する。杭内に押込まれた土は杭内壁部分で強いせん断を受ける。またその長さが増すことにより、内周面摩擦力が上昇する。そして先端抵抗力がさらに上昇すると考えられる。このように地盤の侵入が繰り返されることによって先端支持力が上昇していくと考えられる。

(2) 大型土槽を用いた杭の閉塞に関する模型実験²⁶⁾

小型実験土槽を用いた実験をすることにより、杭先端付近の地盤の挙動を把握した。しかし、杭の先端閉塞メカニズムを把握した上で、先端閉塞によって杭の内周面にどのような抵抗が生じるかを調べなければ、メカニズムに適合

した支持力推定は困難である。一方、X線CT装置内で使うことのできる土槽の大きさには限りがあり、そのため、大型の模型実験の実施は不可能である。これまでに述べたような小型の実験では、荷重の測定が困難、もしくは、誤差が大きく、杭内周面の抵抗を十分な精度で計測することが難しい。そこで、大型土槽を用いた杭の載荷実験を行い、杭が地盤に貫入する際に杭の内周面に作用する内周面摩擦の分布を測定することを試みた。

a) 実験装置

実験に用いた砂は珪砂4号である。杭模型は3重管構造となっており、さらに杭内部に剛版を有している。これらは、杭に作用する荷重を分離して測定することを目的としたものである(図-4.18)。この杭は、先端外径246mm、先端内径200mmで、管内の剛版の外径は197mmである。杭径外径 D_0 と肉厚 t の比 D_0/t は10.7である。図-4.19に模型杭の概観を示す。図-4.19の右側の図に示すように、この杭には、4つのロードセルがついており、杭全体の抵抗力、先端の抵抗力、内周面抵抗力、杭内の剛版の抵抗力をそれぞれ測定できるようになっている。また、杭内部にはジャッキを擁しており、このジャッキによって杭内の剛版の位置を変えられるようになっている。剛版の高さは、計測棒の位置によって測定できるようになっている。さらに、杭内の剛版には、図-4.20に示すように、土圧計が埋め込まれている。この土圧計は、杭心からの距離が21, 42, 63, 84mmとなる位置にそれぞれ2個ずつ配置されており、杭内の剛版に作用する土圧の半径方向の分布を測定できる

ようになっている。

土槽は、横 200 cm × 縦 200 cm × 深さ 150 cm のコンクリート製のものである。載荷装置は、容量 130 kN、ストローク 2 m のものを用いている。

b) 実験方法

この実験では、まず、気乾状態の砂 4 号を空中落下法により土槽に降らせ、高さ 150 cm の地盤を作製した。この時の地盤の相対密度は 40% であった。

その後、杭を地盤に静的に貫入させ、杭に作用する全荷重、中管に作用する荷重（これは先端抵抗に相当する）、内側管に作用する荷重、杭内剛版に作用する荷重、剛版に設置した土圧計に作用する荷重、杭の貫入量、杭内剛版の高さを測定した。

なお、杭内剛版の位置は、外管先端から $0D$ 、 $0.5D$ 、 $1.0D$ 、 $1.5D$ 、 $2D$ (D : 杭内径) 上がった高さに固定して貫入実験を行った。また、貫入中に剛版の位置を変化させる実験も行った。図-4.21 に杭貫入実験のイメージを示す。

載荷試験終了後、地盤の条件を確認するために、コーン貫入試験を実施した。

c) 実験結果

図-4.22 に、代表的な実験結果として、杭内剛版の設置位置が杭先端から $0D$ 、 $1.0D$ および剛版無しの場合の、杭の全抵抗、外周面抵抗、先端抵抗、内周面抵抗、杭内剛版抵抗の貫入量ごとの変化を示した。まず、外周面摩擦はどのケースも小さく、実質的に問題とならない。これは、模型実験に特有の現象で、杭の根入れ長さが小さいため、相対的に外周面摩擦が小さくなっているものと考えられる。杭の先端抵抗については、ケースごとに多少の違いはあるが、剛版の位置が $0D$ のケースを除けばほぼ同じ値となっている。杭内剛版の抵抗についてみると、剛版の位置が $0D$ のときは大変大きく、先端抵抗の 3.5 倍程度の抵抗を示している。この実験では、先端抵抗を受けている杭の実質部の面積は 161.3 cm^2 、杭内剛版の面積は、 314 cm^2 で、その比率は 1.95 倍である。にもかかわらず、剛版の抵抗が杭の先端部の抵抗の 3.5 倍ということは、杭内剛版の方が単位面積当たり 1.7 倍の抵抗を示していることになる。

杭内剛版の位置が高くなると、それにつれて剛版の受け持つ抵抗が小さくなる。図-4.22 (b) に示したように、剛版の位置が $1.0D$ (杭先端から 20 cm 上がったところに杭内剛版を設置) のケースでは、杭が 20 cm をわずかに超えて貫入したところから急激に内周面抵抗が増大しだし、それにつれて、先端抵抗の全抵抗に対する分担が小さくなる。

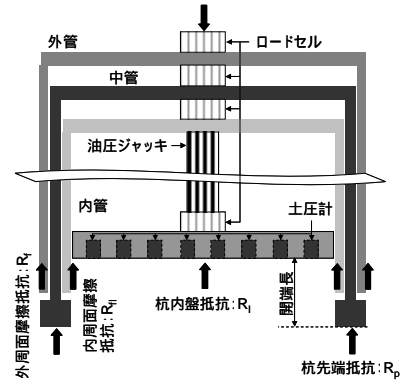


図-4.18 実験に用いた杭の概念図

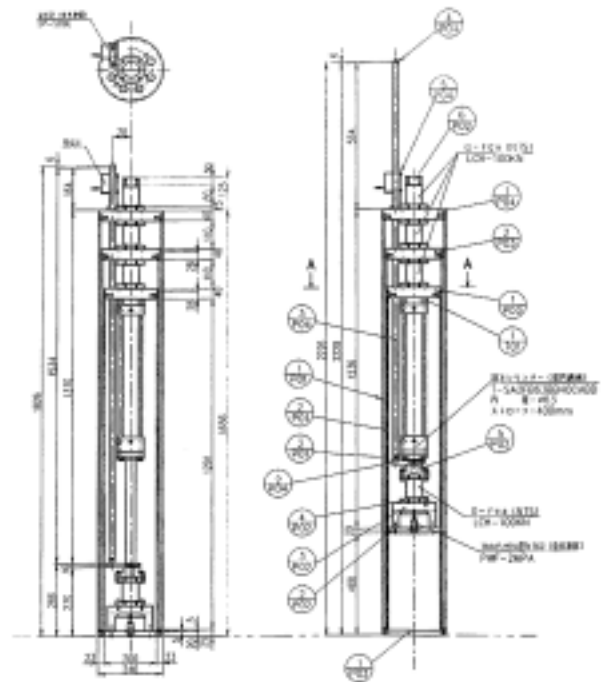


図-4.19 模型杭の概観

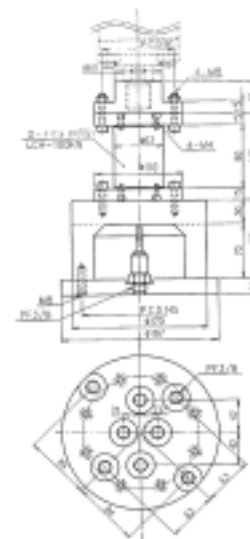


図-4.20 模型杭に設置された土圧計

このケースでは、貫入量が27 cmを越えたあたりから、杭の先端抵抗と内周面抵抗がほぼ等しい値を示し、これらは杭内剛版の抵抗より大きいという傾向にあった。図-4.22 (c) に示した杭内剛版がない場合には、現象が連続的に変化している様子が伺える。杭の貫入量28 cm くらいから徐々に内周面抵抗が増大し始め、貫入量75 cm 付近で内周面抵抗が杭の先端抵抗を超える現象が見られた。地表面から杭を貫入した場合には、このように、内周面抵抗を大きく発揮するには大きな貫入量を必要とするものの、貫入に伴っていずれは杭の先端部の抵抗のかなりの部分を内周面抵抗で受け持つようになることがわかった。

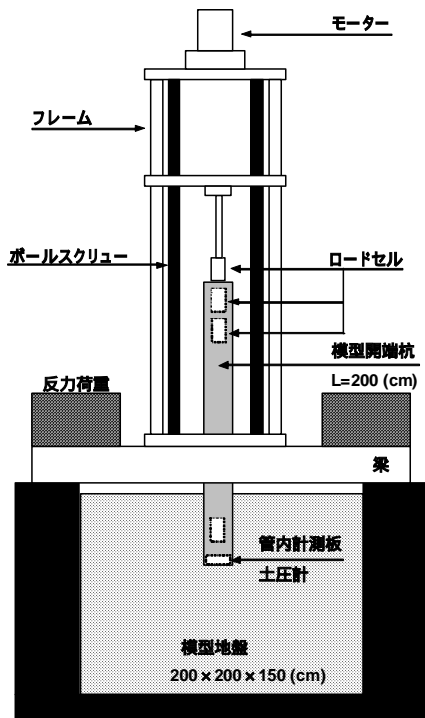


図-4.21 実験のイメージ

このことを詳しく検討するために、杭の全抵抗が40 kN のときの、杭内剛版と内周面抵抗、先端抵抗の全抵抗に対する比率を図-4.23 にまとめた。図によると、内周面抵抗は、杭先端(0D) から杭内剛版を上を設置するにつれて大きくなるのがわかる。ただし、その増加の割合を見ると、杭先端から離れるにしたがって小さくなっていることがわかる。これは、内周面抵抗は杭先端に近いほど大きく効いていることを意味している。なお、先端抵抗については、剛版の位置が0D の場合のみ分担率が27% と小さいが、その他の場合には40% となっている。杭の実質部(肉厚部)の面積は全面積の36% であるから、0.5D より上に剛版を設置した場合、単位面積当たりの杭の実質部の先端抵抗は、杭の全先端抵抗の単位面積当たりの抵抗の平均値となっていることがわかる。

図-4.24 に載荷重が40 kN (0.8426 MPa) のときの杭内剛版に設置した土圧計による計測結果を示した。この図には、杭内剛版を先端から0D~2D までの範囲に設置した全てのケースを示している。図-4.24 を見ると、剛版を杭先端(0D) に設置したときは、杭中心からの距離によらずに、ほぼ同じ土圧を示しているのに対し、それ以外の場合には、杭中心ほど大きな土圧を示し、外側に行くにつれて土圧が小さくなる傾向にある。また、杭内剛版の位置が高くなるほど作用する土圧が小さくなっていく。前者は、管内土によるプラグの拘束が外側ほど大きく、内側ほど小さいことが原因ではないかと考えられる。つまり、杭の内周面に近いところでは、杭先端付近で鉛直荷重が周面抵抗に変わったのに対し、杭中心部分では十分なせん断が発生するほどにプラグが強くないため、上の方まで圧縮力が伝わったのではないかと考えられる。これについては、今後、詳細な追加検討が必要である。後者については、図-4.23 に示したのと同様、内周面摩擦が働いていることを示している。

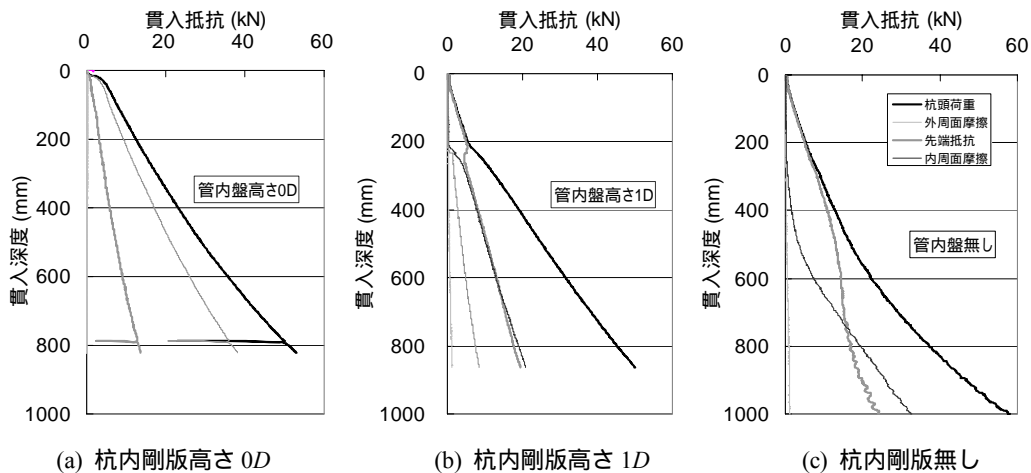


図-4.22 杭の貫入抵抗の分担の変化

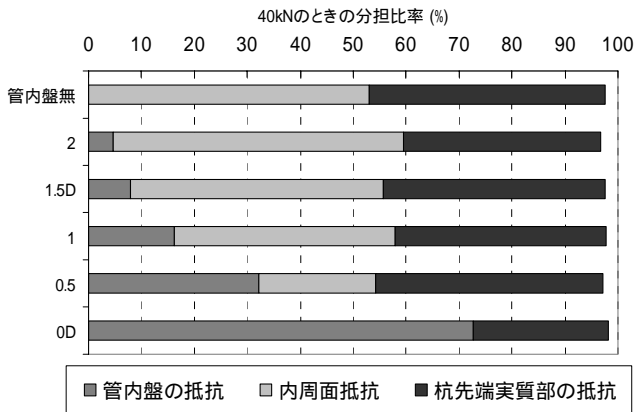


図-4.23 貫入抵抗の割合

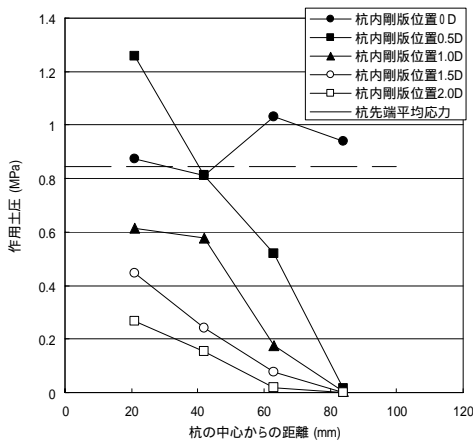


図-4.24 杭内剛版で測定された土圧の分布

d) 大型実験のまとめ

杭の内周面摩擦について検討するために、杭内剛版を有する3重管構造の杭模型を試作し、乾燥砂地盤に対して貫入試験を実施した。杭の内周面、外周面の抵抗などを分離して測定できるように模型杭を作製したため、杭の外径と杭の肉厚の比は10.7となっており、一般に用いられる杭に比べると非常に肉厚が大きくなっている。このことは、結果として杭の閉塞を生じさせやすい効果を持っていると考えられる。そのような限界はあるものの、実験により以下のような特徴的な傾向が見られた。

閉端杭の場合、多少の変動はあるものの、杭の先端での地盤反力分布はほぼ均一分布となる。一方、開端杭では、杭の実質部の抵抗は閉端杭の結論と大きく変わらない。

内周面摩擦は杭先端から2Dの範囲でほとんど発揮されている。ただし、模型杭の肉厚が大きいことが影響していることも考えられるため、今後D/tや地盤条件を変えた追加実験を実施してみる必要がある。

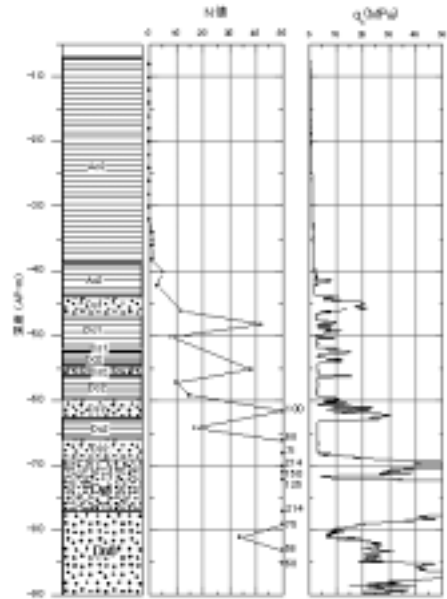


図-4.25 土質柱状図およびN値とqcのプロファイル

内周面摩擦による抵抗は杭先端付近ほど大きく、杭先端から離れるにつれて小さくなる。今回の実験条件では、杭内の土は完全なプラグになっていなかったため、杭内剛版に反力が生じている。不完全プラグとなっている際には、杭の中心に近いほど上方向に力が伝わりやすいようである。これは、大口径杭になると、土のプラグの生成が難しくなることを意味しているものと考えられる。

(3) 現場載荷試験における先端抵抗機構の検討例

本節では、打込み工法による大口径の鋼管杭の先端閉塞状況を把握するために実施された載荷試験について検討した例を示す。このプロジェクトでは、AP-70 ~ -80 m付近にある礫層と砂層が支持層の候補として検討された。しかし、過去の近隣の杭の施工結果によると当該礫層や砂層の支持力が不十分となる恐れがあり、杭の先端支持力を詳細に観察することが必要であった。

図-4.25に原地盤の地層構成とN値とコーン貫入抵抗qcの関係を示す。当該地盤は、AP-43 m付近まで軟弱な粘性土層、その下はAP-69 mまで砂とシルトの互層となり、AP-69 mからN値が50を連続して超える層が現れる。この層ではqc値についても30 MPaを連続して超えている。この層が支持層の第一候補として考えられる。さらに、AP-82 m以下にも硬質砂層が存在する。

そこで杭径1500 mmの鋼管杭をAP-73.5 mとAP-86 mまで打撃工法により根入れして、杭の静的載荷試験を実施した。

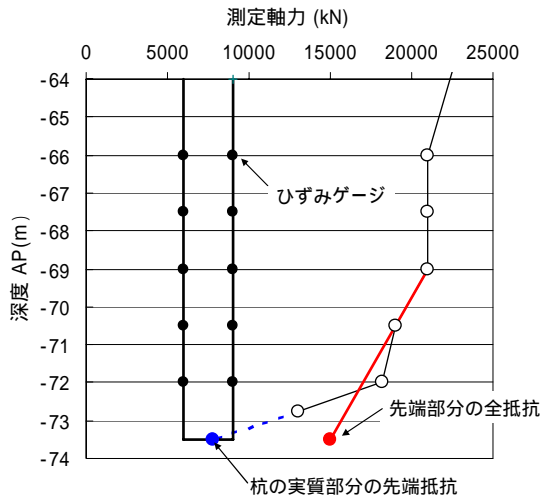
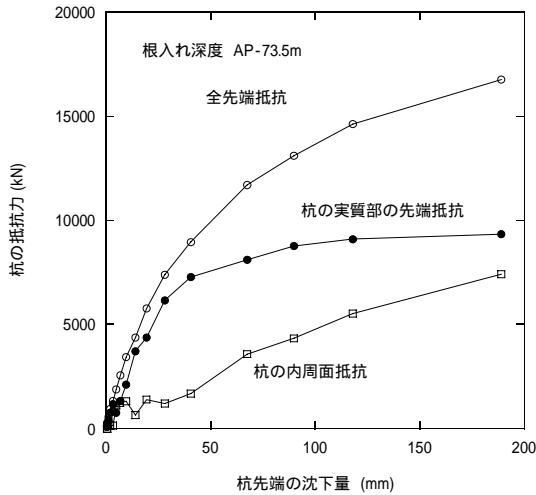
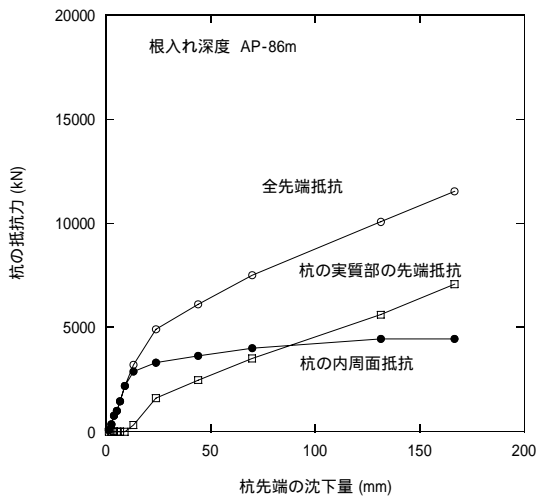


図-4.26 杭先端部付近の軸力分布



(a) 根入れ深度 AP-73.5m



(b) 根入れ深度 AP-86m

図-4.27 杭の先端抵抗の成分分離

開端杭の先端支持力は、内周面摩擦による成分と杭実質部の抵抗とに分離される²⁴⁾と考えることができる。図-4.26にはAP-73.5 mまで根入れした試験杭の載荷試験終期の杭先端付近の軸力分布とそれをもとに杭先端での全先端抵抗と杭実質部分の先端抵抗をどう推定したかを示す。ここでは、杭の全先端支持力から、杭の実質部の先端支持力と推定される分を差し引いたものを内周面摩擦による先端支持力であると考えている。図-4.27には、この結果をもとに、荷重の増加とともに杭の先端抵抗のそれぞれの成分がどのように変化したかを示した。

図-4.27を見ると、杭の実質部分の抵抗力は早い段階で最大荷重に達している。一方、杭の内周面摩擦による抵抗は、杭が地盤に貫入するにつれて大きくなる。また、この二つの載荷試験事例では、最大先端抵抗が根入れ深度がAP-73.5 mの杭のほうが大きい。この差は、先端抵抗による差であり、内周面抵抗の抵抗の違いによるものではない。

実物大の開端杭の押し込み試験結果から、Nicola (ニコラ) & Randolph (ランドルフ)²⁷⁾は開端杭の杭の実質部分の抵抗力度 q_b とCPT試験の q_c の間に次式のような相関性を提案している。

$$q_b = \left\{ \frac{\lambda m (w_b / D)}{(w_b / D) + c} \right\} q_c \quad (4.2)$$

ここに、

$$m = 0.7$$

$$c = 0.015$$

w_b / D : 正規化先端沈下

$$\lambda = \begin{cases} 1.75 - (\sigma'_v / 200) & (\sigma'_v < 200 \text{ kPa}) \\ 0.75 & (\sigma'_v \geq 200 \text{ kPa}) \end{cases}$$

一方、山肩²⁸⁾は、杭先端の実質部分の極限支持力度を次式で表している。

$$q_b = 400N \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.3)$$

ここに、 N は杭先端における N 値である。

上記の式に載荷試験前の q_c 値と換算 N 値を用いて計算した結果とAP-73.5 m, AP-86 mまで根入れした試験杭の静的載荷試験から得られた値との比較を表-4.2と表-4.3に示す。

実測値としているデータの精度を考慮すると、表-4.2と表-4.3の結果はいずれも良くあっており、杭の実質部分の支持力推定はそれなりに説明できている。

図-4.27から、AP-73.5 m, AP-86 mに根入れされた杭の内周面摩擦力による抵抗力はそれぞれ7.5 MNと6.7 MNであったと推定される。実験の結果を見るとこれが $1D \sim$

2Dの範囲ですべて抵抗していたと考えられる。そこで、主として1D区間で抵抗していたとして、その区間の平均周面抵抗が $\tau = K \sigma_v \tan \delta$ で表すことができるとすると、この区間の平均周面抵抗と平均 σ_v の関係から、 $K \tan \delta = 0.38 \sim 0.40$ となる。ここで、 $\tan \delta$ は別の検討からおよそ0.63と想定されているので、結局 K は0.6 ~ 0.63程度であると予測される。この検討はわずかに2事例であり、また予測精度も高いものとはいえないが、内周面摩擦を考える際の土圧係数としては0.6程度の値を考えればよいことがわかる。

表-4.2 Nicola & Randolph 提案式による先端実質部分の抵抗力度

杭	q_c (MPa)	$\frac{\lambda m(w_b/D)}{(w_b/D)+c}$	提案式 抵抗力度 (kN/m ²)	試験結果 抵抗力度 (kN/m ²)	比率
4	97	0.46	44500	47600	0.93
5	50	0.46	22600	26700	0.85

表-4.3 山肩らの提案式による先端実質部分の抵抗力度

杭	杭先端 N 値 (換算)	提案式 抵抗力度 (kN/m ²)	試験結果 抵抗力度 (kN/m ²)	比率
4	125	50000	47600	1.05
5	68	27200	26700	1.02

4.4 まとめ

杭の先端抵抗については、多くの研究がなされ関係する推定式が提唱されてきている。このうち、代表的なものは Terzaghi, Meyerhof の式である。これらの式は原則的に開端杭を前提としたものであるため、各基準では、開端杭の支持力推定に当たっては、特段の注意が払われている。

しかし、開端杭の閉塞メカニズムの検討はいまだに不十分なところがあるため、ここでは、X線CT装置、室内模型実験、現地載荷実験結果を元に開端杭の閉塞メカニズムについて議論した。その結果、開端杭の支持力推定には、杭の内周面抵抗の評価が重要であることが示された。また、杭の実質部分の抵抗については、既に提案されている方法の適用性が高いことが示された。

5. 各種載荷試験方法の特徴および適用性

5.1 載荷試験の計画

載荷試験は実杭において杭の抵抗力を直接確認できる有効な手段である。載荷試験においては地盤を破壊させることにより杭の抵抗力を確認する。もし、押す力が弱い場合には、地盤の破壊を知ることはできない。杭の載荷試験と

したときに、杭に作用させるエネルギーが小さい場合には、地盤を破壊させるまでのエネルギーを杭を介して地盤に与えることができないことがある。そのような載荷試験を行った場合には、得られるのは、「地盤の破壊に関する情報」ではなく、「地盤の破壊以前の情報」となる。それを地盤の破壊の情報だと考えてしまうと、地盤の強度を過小評価することになる。

つまり、杭の抵抗のどの部分を知りたいかによって、載荷試験の計画が変わることに注意が必要である。たとえば、杭の極限支持力が知りたいならば、設計荷重を大幅に超えるような荷重を杭に作用させることになるので、載荷装置、杭ともにそれに見合った準備をしておくことが必要となる。また、試験の方法を間違えると目的を満たすような検討ができなくなる。

以下に載荷試験の実施を計画するにあたって留意すべき事項を、図-5.1のフローに沿って述べる。

(1) 試験目的の設定

載荷試験の目的の設定とは「載荷試験を実施することにより何を求めてそれを何に使うのか」を明確にしておくことである。試験の目的を明確に設定することは載荷試験計画の基本であり、試験目的が明確であれば適切な載荷試験を計画実行することが出来る。目的の設定が曖昧であったり関係者に周知されていなかったりすると試験後に重要なデータの欠落や有効に使えないなどのトラブルの原因となる。

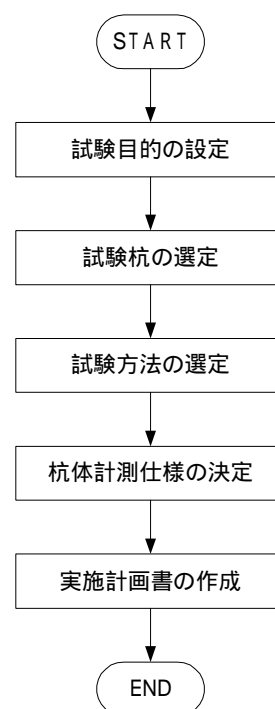


図-5.1 載荷試験の計画フロー

地盤工学会の杭の鉛直載荷試験基準・同解説では、載荷試験の目的は以下のように述べられている。

目的：杭の施工方法開発のための調査や本杭の実施設計に先立って行われる現地での基礎的調査など、鉛直支持特性に関する資料を得ることを目的とする。「特性調査試験」と呼ぶ。

目的：施工された本杭が設計支持力を満足しているかどうか確認することを目的とする。「確認試験」と呼ぶ。

目的は、工法の開発や大きなプロジェクトで、事前に設計支持力を決めるために実施される場合で、第2限界抵抗力（定義は5.3(1)e)参照）まで載荷するのが一般的である。

目的は、既に設計済みの杭に対して、地盤の特殊性や確立されていない工法を採用した場合に設計の妥当性を確認するために実施される場合で、一般に設計荷重に安全率などの支持力低減要因を考慮した抵抗力を確認する。

試験目的の設定にあたって考慮しなければならない事項は以下の通りである。

どの大きさまでの抵抗力を確認するのか

- 第2限界抵抗力または極限抵抗力（目的）
- 荷重に設計上の支持力係数を考慮した抵抗力（目的）
- 地震時、短期の許容支持力または荷重（目的）
- 常時、長期の許容支持力または荷重（目的）

どの深度の抵抗力を確認するのか

- 杭頭以深の抵抗
 - 周面抵抗
 - 先端抵抗
 - 所定深度以深または以浅の抵抗
- 計測結果として何を求めるのか
- 杭頭での抵抗
 - 先端抵抗
 - 周面抵抗
 - 抵抗（杭頭、周面、先端）～変位置関係

(2) 試験杭の選定

載荷試験に供する試験杭の条件は、想定している本杭と完全に一致していることが理想である。しかし、現実にはすべての条件を一致させることは困難である。ここでは主に試験杭の条件が本杭とは異なる場合に考慮すべき事項について述べる。

a) 杭径、支持層への根入れ長

杭径または支持層への根入れ長の異なる試験杭は基本的に採用すべきでない。それは載荷試験結果から杭径や支持

層根入れ長の異なる条件の抵抗力特性を求めることが出来ないからである。周面抵抗力についても厳密には異なると考えた方がよい。

上記は一般論ではあるが、場合によっては、試験杭として実際に用いる杭とは異なるものを用いなければならないことがある。この場合には、試験杭と実際に用いる杭の条件の違いを合理的に考慮して、試験結果を評価することが必要となる。

b) 抵抗力の評価範囲

試験杭の杭頭高さが設計杭頭と異なったり、圧密沈下や液状化を考慮して所定範囲の抵抗を設計上無視したりすることなどにより、試験杭が地盤と接する範囲が設計上と異なる場合がある。このような場合は、設計上の杭頭や抵抗考慮範囲の境界の深度で必ず軸力を測定する必要がある。設計上の杭頭においては軸力とともに変位置を測定し設計上の杭頭における荷重～沈下特性を把握することが望ましい。

一方で、計画最大荷重を設定する際には、設計上無視する範囲も含めて試験杭が接する全ての地盤抵抗を考慮しなければならないことに注意する必要がある。

c) 試験杭の材料

通常、設計においては杭の材料強度と地盤の抵抗力の安全係数の設定が異なる。そのため、載荷試験において地盤の極限まで載荷しようとする、本杭と同じ仕様では杭の材料強度が不足するケースが多い。その場合は、試験杭の板厚の増厚や材質の仕様変更などの処置が必要となる。

また、動的載荷試験を実施する場合は、計画荷重として確認する静的抵抗力に動的抵抗力分を加えて杭の材料を検討する必要がある。

d) 施工方法

施工方法は本杭と同じでなければならない。試験目的が先端抵抗のみの確認で周面抵抗を低減する処置をした場合なども先端の施工条件が本杭と等しくなるように注意する必要がある。

e) 地盤調査

一般的には、試験を実施する位置において、試験杭の先端深度から杭径の4倍以上下方までの地盤調査情報が必要である。試験位置における地盤調査結果がない場合には、近傍の地盤調査結果を用いてもよい。ただし、その調査結果が適切に使用できるかについては慎重に検討する必要がある。試験位置の近傍の地盤調査結果も入手できない場合

には、追加して地盤調査を実施することが必要である。

このように、載荷試験を実施した地点の地盤情報を確実にすることは大変重要である。それは、載荷試験を行うのが限られた地点のみとなる場合が多く、その結果を少しずつ地盤条件の違う近傍の杭の支持力推定に反映させるためには、地盤情報と杭の載荷試験結果を関連付けることが重要であるためである。

f) 本杭を試験杭とする場合

埋込み杭や場所打ち杭などの排土系の杭は載荷試験により荷重履歴を受けた場合、受ける前と後で杭頭剛性が異なるので基本的には本杭を試験杭とすべきでない。

ただし、ハンマーやバイブロハンマーによる打撃工法で施工された杭は、載荷試験による地盤の乱れが施工過程におけるものとほぼ等しいと考えてよいので、本杭を試験杭とすることについて支障はないと考えて良い。

また本杭を押し込み試験の反力杭とする場合は、試験時に引抜き力が作用するので、反力杭の周面抵抗力が載荷試験時に作用する引き抜き力に対し十分余裕があるように計画するとともに、試験中は反力杭の杭頭変位量を測定して、有害な残留変位が発生していないか確認する。

(3) 試験方法の選定

載荷試験方法の選定は 5.4 節を参考に適切なものを選定する。

載荷試験の実施数は、設計支持力の妥当性を確認することを目的とする場合には、プロジェクトの代表的な杭仕様を選定して 1 試験行う場合が多い。この場合は、支持力推定精度の高い静的押し込み試験が急速載荷試験を行うのが望ましい。施工管理のために杭の載荷試験を実施する場合には、複数本の杭で載荷試験を実施することが望ましい。この場合は、1 本は静的押し込み試験を実施したうえで、数本の杭について衝撃載荷試験を実施することが望ましい。いずれも、静的載荷試験や急速載荷試験は代表的な仕様の杭に対して実施することが望ましい。

代表的な杭仕様の選定にあたっては以下に示す条件などを勘案する。

- 地盤条件の悪い位置の杭であること
- 杭径の大きい杭であること
- 重要性の高い杭であること
- 本数の多い仕様の杭であること

重要なプロジェクトや大規模なプロジェクトである場合、また杭仕様や地盤条件が多様な場合は載荷試験を複数実施することを検討する必要がある。載荷試験を複数実施する場合、プロジェクトで施工される杭を以下の条件でグルー

プ分けをする。

- 杭の仕様
- 地盤条件（周面，先端）
- 施工範囲の広さ
- 施工機械の違い

グループ分けが 1 グループに集約された場合は、載荷試験は 1 試験で良いことになる。複数のグループに分かれた場合は、グループ間で補完できるかどうかを検討する。例えば地盤条件のみが異なる場合は、地盤の悪い（発現抵抗力が小さい）側のグループで試験をすれば、地盤条件の良いグループでの試験の実施の必要性は低くなる。また杭径が違う場合は、一般に径が大きくなるほど先端閉塞率が下がり先端抵抗力度も下がるので、杭径の大きいグループで試験をして試験で得られた先端抵抗度を先端面積比で小径側に適用すれば、小径側の正しい値は得られないが安全側の評価になる。

複数の載荷試験が必要な場合は、急速や衝撃などの動的載荷試験を採用することによりコストダウンが図れる。一般に押し込み試験を複数回実施するより動的載荷試験を複数回実施した方が追加費用は少なくすむ。特に施工に用いるハンマーで衝撃載荷試験を実施する場合は、コストが低いのでできるだけ多くの条件を網羅する形で複数実施するのが望ましい。

重要プロジェクトなどで、押し込み試験のデータが必要でかつ複数の載荷試験を実施する必要がある場合は、代表試験杭に対し押し込み試験を実施し、他の杭については動的載荷試験を採用することも考えられる。その際は、同じ杭が同条件の杭で動的載荷試験の妥当性を検証しておくことが望ましい。

打撃杭の載荷試験をして、その結果を施工管理に用いる場合は、養生後の載荷試験と併せて施工時の衝撃載荷試験を実施すると良い。施工時の衝撃載荷試験を実施することにより、様々な支持力や施工管理に関する情報を得ることができる（詳細は 6 章参照）。

載荷試験を複数実施する場合に種類の異なる載荷試験を組み合わせる例を表-5.1 に示す。

(4) 杭体計測仕様の決定

周面抵抗の分布や先端抵抗挙動の情報が必要な場合には杭体に計測用センサーを取り付ける。ここでは杭体計測をする場合の仕様についての基本的な考え方を述べる。

衝撃載荷試験の場合は波形マッチング解析により抵抗を深度方向に分離することが可能であるが、その分離に高い精度が求められる場合には、杭体計測を実施することが望ましい。

表-5.1 複数の載荷試験を実施する場合の組み合わせ例

組み合わせ例	施工時試験	養生後試験
1	衝撃載荷試験	押込み試験
2		急速載荷試験
3		衝撃載荷試験
4	なし	押込み試験 + 急速載荷試験
5		押込み試験 + 衝撃載荷試験
6		急速載荷試験 + 衝撃載荷試験

a) 所定深度以深の測定

試験目的や試験条件に以下の事項が含まれている場合は、所定深度レベルでの荷重、変位量の測定が必要となる。

- 設計上の杭頭と試験杭の杭頭が異なる場合
- ネガティブフリクションや液状化により設計上の摩擦力有効範囲が限定されている場合
- 設計上の先端抵抗力と載荷試験結果を比較検討する場合

杭体での荷重、変位量の測定は表-5.2のセンサーを用いるのが標準的である設置方法を図-5.2、図-5.3に示す。

b) 周面抵抗分布の測定

土層毎の周面抵抗の情報が必要な場合は、土層境界深度での荷重の測定が必要となる。センサーはいずれの試験においてもひずみゲージが一般的である。周面抵抗 変位量関係の情報が必要な場合は通常ひずみから変位量を計算するが、所定深度で変位量を計測すれば精度は良くなる。

(5) 実施計画書の作成

実施計画書には地盤工学会基準に従って、以下の内容を含むものとする。

- 試験の目的
- 地盤条件
- 本杭に作用する荷重条件
- 本杭の施工方法
- 本杭の寸法、本数、配置、杭頭レベル
- 計画最大荷重
- 試験杭の仕様、本数、位置
- 試験装置
- 載荷、測定方法
- 実施体制

表-5.2 杭体の所定深度での測定

載荷試験の種類	標準計測項目	センサーの種類
押込み試験	荷重	ひずみゲージ
	変位量	静的変位計（沈下棒）
急速載荷試験 （衝撃載荷試験）	荷重	ひずみゲージ
	変位量	加速度計（積分値）

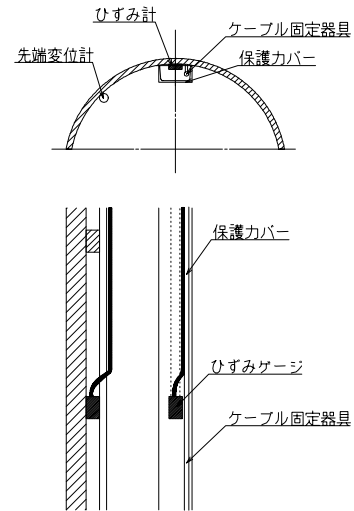


図-5.2 杭体ひずみゲージ、沈下棒の設置例

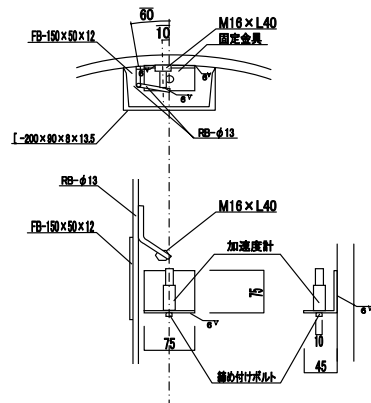


図-5.3 杭体加速度計の設置例

5.2 載荷試験の種類

杭の鉛直載荷試験方法は、地盤工学会において6種類の方法が標準化されている。種類は荷重の性質により静的載荷試験と動的載荷試験に分けられる。さらに、静的載荷試験は、載荷方向と載荷位置により押込み試験、引抜き試験、鉛直交番載荷試験および先端載荷試験に分けられ、動的載

荷試験は荷重の性質により急速荷試験と衝撃荷試験に分けられる。表-5.3 に地盤工学会で標準化されている杭の鉛直荷試験方法の種類を示す。

ここでは、一般的に抵抗力確認のための荷試験として採用されている試験方法で、杭頭で押し込み方向に荷する押し込み試験 (SLT: Static Load Test)、急速荷試験 (RLT: Rapid Load Test) および衝撃荷試験 (DLT: Dynamic Load Test) について、それぞれの特徴、適用性について以下に述べる。

5.3 押し込み試験、急速荷試験、衝撃荷試験の特徴

押し込み試験は静的荷試験であり、急速荷試験と衝撃荷試験は動的荷試験である。急速荷試験と衝撃荷試験の違いは、荷時間の違いであり、荷時間が比較長い場合 (相対荷時間 $5 \leq T_r < 500$) が急速荷試験で、短い場合 (相対荷時間 $T_r < 5$) は衝撃荷試験である。各荷試験の特徴を表-5.4 に示す。また、荷中の地盤と杭体の挙動の比較を図-5.4 に、相対荷時間の定義を図

-5.5 に示す。

以下に各荷試験について概要、特徴を述べる。

(1) 押し込み試験 (SLT)

a) 押し込み試験の概要

押し込み試験は、油圧ジャッキによる荷重を杭頭に荷する静的荷試験であり、杭の荷試験の標準である。現状の設計では地震力や波力などの動的な荷重を想定していても、それを静的な荷重に置き換えて計算することが一般的である。このことから押し込み試験の結果は設計上の支持力関連の数値と直接対応させることができる。ただし、静的な荷重であってもクリープなどの地盤の長期的な特性は評価できない。

荷条件は、現標準では、1 サイクルの荷や連続荷も可能であるが、過去の試験結果とのデータの連続性という面からは、多サイクル、段階荷で実施することが望ましい。

表-5.3 杭の鉛直荷試験方法の種類


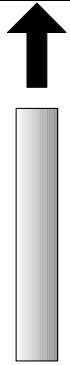
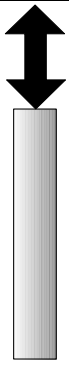
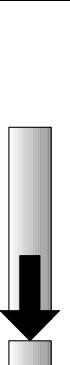
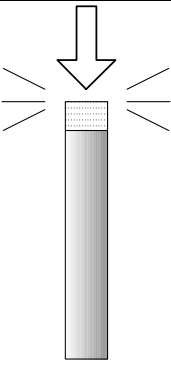
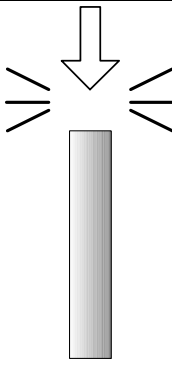
種類	鉛直荷試験					
	静的荷試験 静的荷重：ゆっくりの荷重				動的荷試験 動的荷重：速い荷重	
	押し込み試験	引き抜き試験	交番荷試験	先端荷試験	急速荷試験	衝撃荷試験
基準	JGS 1811-2002	JGS 1813-2002	JGS 1814-2002	JGS 1812-2002	JGS 1815-2002	JGS 1816-2002
荷重	静的荷重	静的荷重	静的荷重	静的荷重	0.1s 程度の 動的荷重	0.01s 程度の 動的荷重
荷方向	押し込み	引き抜き	押し込み, 引き抜き両方	押し込み	押し込み	押し込み
荷位置	杭頭	杭頭	杭頭	杭先端	杭頭	杭頭
加力装置	油圧ジャッキ	油圧ジャッキ	油圧ジャッキ	油圧ジャッキ	重錘軟クッション 反力体慣性力	ハンマー 重錘
試験イメージ						

表-5.4 押し込み試験，急速荷試験，衝撃荷試験の比較

	作業性	荷重の性質	試験結果
押し込み試験	<ul style="list-style-type: none"> 反力杭が必要 試験装置が大掛かりで組立・解体に時間がかかる（組立 7 日，解体 5 日） 試験時間は 1 日（計器のチェック 1 日） 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重中の杭体は全圧縮 地盤の抵抗は静的 	<ul style="list-style-type: none"> 測定結果をそのまま設計に利用できる 第 1 限界抵抗力 第 2 限界抵抗力
急速荷試験	<ul style="list-style-type: none"> 反力杭が不要 押し込み試験よりも比較的簡易な試験装置のため，組立・解体の時間は短い（組立 3 ~ 4 日，解体 1 日） 試験時間は 1 日 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重中の杭体は全圧縮 杭体が慣性抵抗を持つ 地盤の抵抗は動的 	<ul style="list-style-type: none"> 除荷点法解析により杭体の慣性力，地盤の動的抵抗を補正する 除荷点抵抗力（第 1，第 2 限界低効力の判定は $P-S$ 曲線の形状により判定）
衝撃荷試験	<ul style="list-style-type: none"> 反力杭が不要 現場のハンマーが利用可能で大掛かりな試験装置は不要 試験時間が短い（0.5 日） 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重中の杭体に波動現象 杭体が慣性抵抗を持つ 地盤の抵抗は動的 	<ul style="list-style-type: none"> ケース法により全抵抗（動的 + 静的）を推定する 波形マッチング解析により静的抵抗を推定する

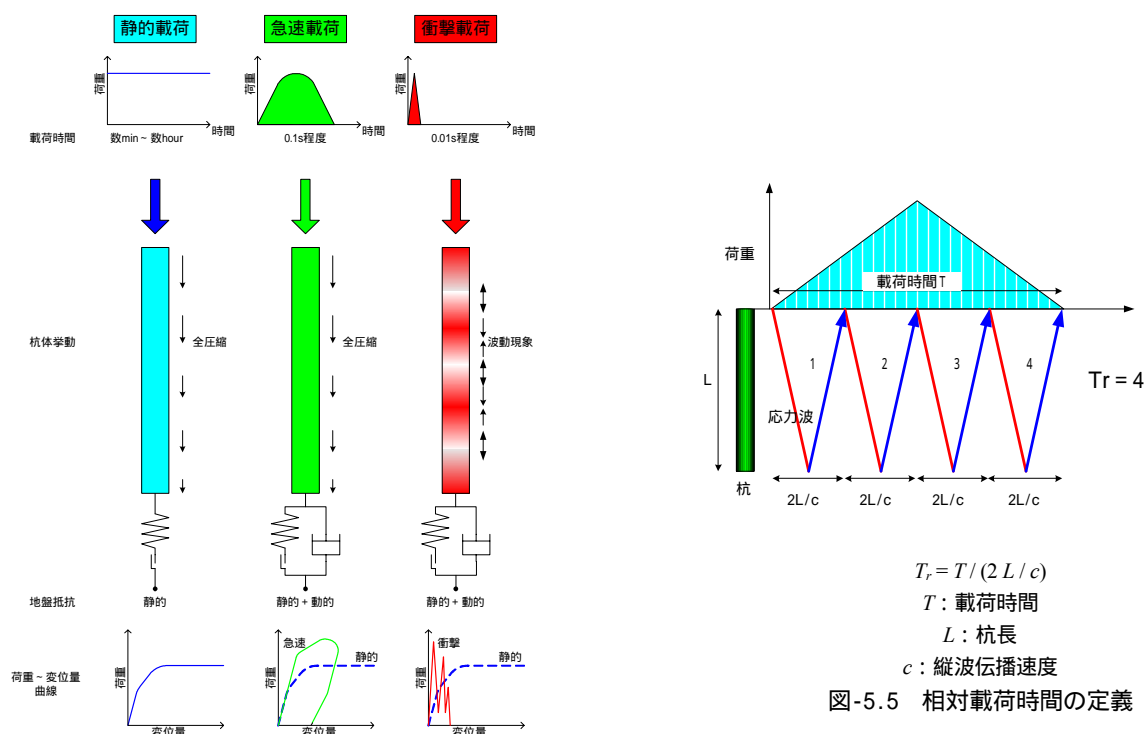


図-5.4 荷重試験時の杭 地盤挙動の比較

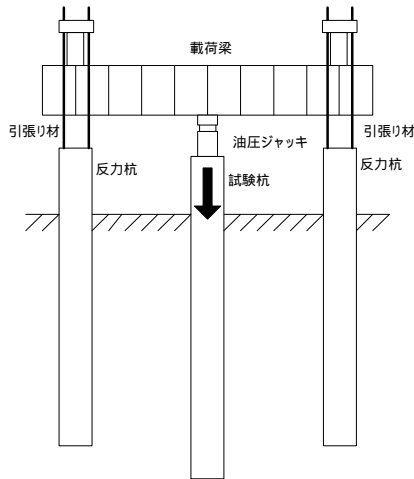


図-5.6 押し込み試験装置

b) 押し込み試験の試験装置

押し込み試験の概要を図-5.6 に示す。試験装置は反力杭、アンカーなどの反力装置が必要となり、一般的に大掛かりで時間も費用も要する。押し込み試験では、試験杭の杭頭に油圧ジャッキを設置し杭を地中に押し込む。反力は載荷梁を介して反力杭やグラウンドアンカーの引き抜き抵抗を利用する。

c) 測定項目

測定項目は杭頭荷重、杭頭変位量が基本であるが、先端抵抗力や先端の沈下量、周面抵抗力の分布状態を得たい場合には、杭体に軸力計や先端沈下計を設置する必要がある。

d) 試験期間

試験に要する期間は、規模にもよるが、装置組み立てに7日程度、計器設置1日、試験1日および解体に5日程度である。

e) 試験結果の整理

押し込み試験の結果は、杭頭の荷重～変位量曲線が基本データであり、そこから以下の情報を得る。

1) 第2限界抵抗力

図-5.7 に示すように、押し込み抵抗力が最大となったときの荷重を第2限界抵抗力とする。ただし、先端変位量が先端直径の10%以下の範囲で決定する。この値は、極限状態の抵抗力を表す。設計においては第2限界抵抗力を極限支持力としそれに基づいて許容支持力が決められる。

試験最大荷重において変位量が杭径の10%に達しない場合は、最大荷重を第2限界抵抗力として扱う方法以外に、第1限界抵抗力が確認できていれば図-5.8 に示すようにワ

イブル曲線を用いて10%変位時の荷重を推定する方法がある。

2) 第1限界抵抗力

図-5.9 に示すように、荷重～変位量曲線を対数で表した $\log P - \log S$ 曲線に現れる明瞭な折れ点の荷重を第1限界抵抗力といい、降伏状態の抵抗力を表す。第1限界抵抗力までが弾性領域であると判断できる。

3) 先端抵抗、周面抵抗力度

杭体に設置した軸力計と先端沈下計により先端抵抗力、先端変位量関係および周面抵抗の分布を得ることができる。これらの情報により、設計時に採用した地盤パラメータや支持力式の評価を行う。

(2) 急速載荷試験 (RLT)

a) 急速載荷試験の概要

比較的長時間の動的荷重（相対載荷時間 $5 \leq T_r < 500$ ）を載荷する試験方法で、杭体の軸方向の応力状態は静的と見なせるが、押し込み試験に相当する値を得るためには載荷中の杭体の慣性力と地盤の動的抵抗成分を解析により補正する必要がある。試験装置として、反力杭などの反力装置を必要としないことから、海上杭や狭い場所での試験に適用しやすい。

b) 急速載荷試験の試験装置

急速載荷試験の試験装置が国内に導入された当初は、重錘を推進燃料の燃焼ガス圧で打ち上げるスタナミック試験（図-5.10）が主流であったが、現在では多サイクル試験が容易にできる重錘落下方式（図-5.11）が一般的である。

スタナミック試験では、まず、試験杭の杭頭に設置した

燃烧室に推進剤を装填し、その上に荷重の5～10%の重錘を載せる。その後、推進剤の燃烧压により重錘を打ち上げ、その際に生ずる慣性反力で杭を地中に押し込む。重錘落下方式では、試験杭の杭頭にエラストマーやバネによる軟クッションを設置し、1～3mの高さから重錘を杭頭に落下させ杭を地中に押し込む。落下高さを変えることにより容易に多サイクル試験を実施できる。いずれの方法も反力杭を必要としない。

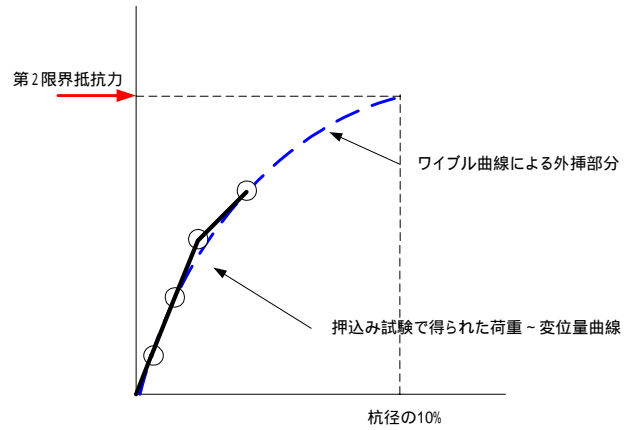


図-5.8 ワイブル曲線による第2限界抵抗力の推定

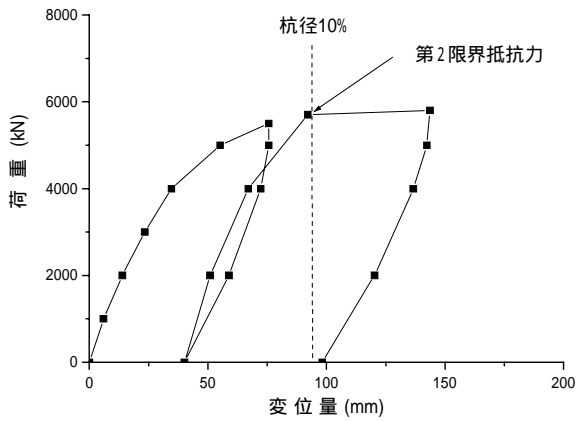


図-5.7 第2限界抵抗力の判定

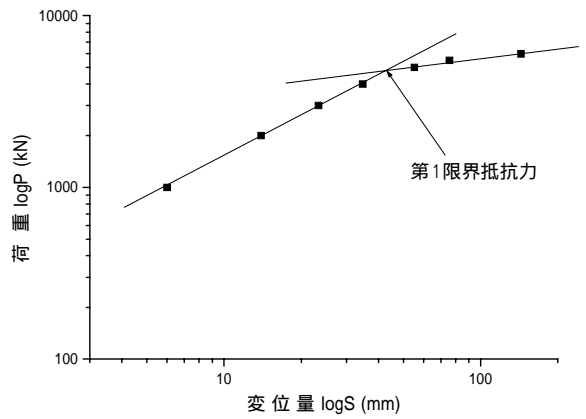


図-5.9 第1限界抵抗力の判定

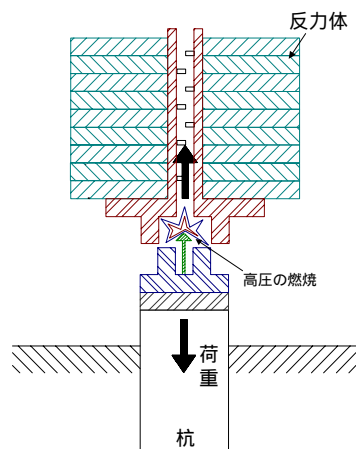


図-5.10 スタナミック試験

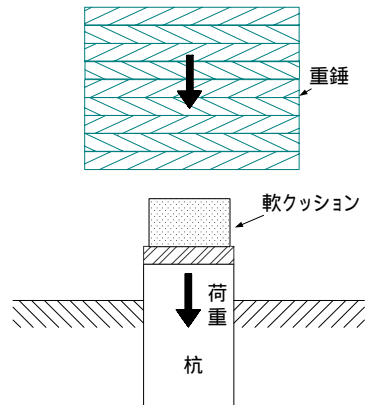


図-5.11 重錘落下方式急速載荷試験

c) 測定項目

計測は、杭頭荷重、杭頭変位量および杭頭加速度が基本測定項目で、変位量は光学式変位計を用いて測定する。先端抵抗力の分離、周面抵抗の分布を確認したい場合は杭体に軸力計や先端加速度計を設置する。

d) 試験期間

試験に要する期間は装置組み立てに 4 日程度、計器設置・試験で 1 日および解体 1 日程度である。

e) 試験結果の整理

急速載荷試験から得られた杭頭の荷重 変位量曲線をそのまま静的な試験結果として利用することは出来ない。図-5.12 に示すように、押し込み試験においては静的荷重と地盤の静的抵抗力が釣り合うが、急速載荷試験の場合は急速荷重と地盤の静的抵抗成分に杭の慣性抵抗力および地盤の動的抵抗成分を加えたものが釣り合う。

そこで、急速載荷試験においては、最大変位時の荷重に杭の慣性抵抗力および地盤の動的抵抗成分を考慮して除荷点抵抗力を算出する。除荷点抵抗力は 1 回の急速載荷の最大変位時における静的な抵抗力である（図-5.13）。多サイクルの載荷を実施した場合には各サイクルの除荷点抵抗力を結んで静的な荷重 変位量曲線を描くことができる。

また 杭体に軸力計や先端加速度計を設置した場合には、波形マッチング解析により先端抵抗力の分離、周面抵抗の分布を得ることができる。

したもので、ハンマーの打撃力などの短い時間の動的荷重（相対載荷時間 $T_r < 5$ ）を載荷する試験方法である。載荷方法そのものは、杭の打設と良く似ている。載荷時間が短いことから、試験中の杭体の応力状態は静的や急速とは異なり、杭体中に波動現象と呼ばれる力の伝播現象が生じている。また、急速載荷より杭の貫入速度が大きいので発揮される動的抵抗成分の割合も大きい。衝撃載荷試験では、ハンマーの打撃により杭に生じる波動現象に伴う現象を測定し、解析により押し込み試験の結果に相当する杭の抵抗力を求める。解析には、一次元波動理論に基づいた波形マッチング解析と呼ばれるシミュレーション解析手法を用いるのが一般的である。

衝撃載荷試験は、打撃杭の施工時に試験が行える唯一の載荷試験方法である。

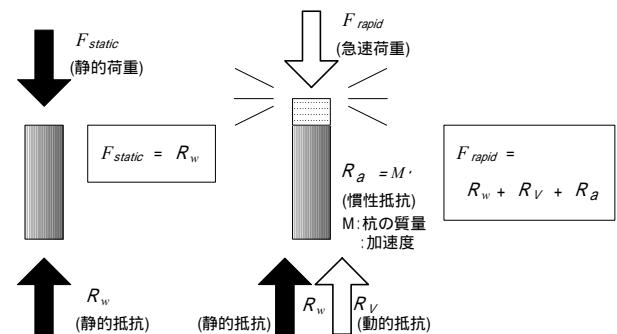


図-5.12 静的荷重と急速荷重の抵抗力

(3) 衝撃載荷試験 (DLT)

a) 衝撃載荷試験の概要

衝撃載荷試験は、元来、打撃杭の施工管理手法から発達

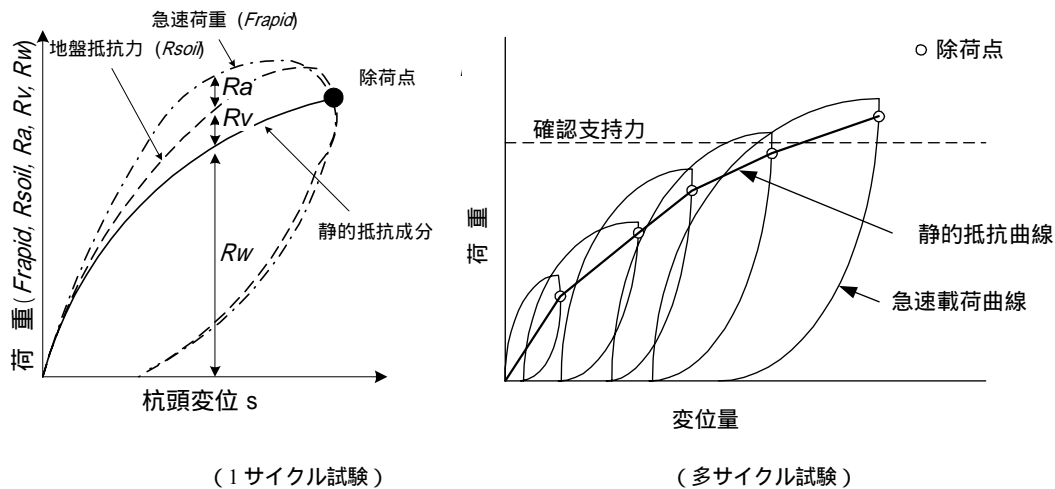


図-5.13 除荷点法解析

b) 衝撃載荷試験の試験装置

衝撃載荷試験の試験装置の例を図-5.14 に示す。

載荷は重錘落下装置により行い、施工に使用するハンマーを利用できれば非常に安いコストで実施できる。ただし、施工ハンマーを養生後試験に適用する場合は、ハンマーエネルギーの不足に注意しなければならない。施工可能なハンマーであっても、養生後には地盤が回復しており必要な抵抗力を確認できない場合がある。通常 10 ton クラスの油圧ハンマーで、衝撃載荷試験で確認できる静的抵抗力は 6000 ~ 7000 kN である。また、養生後の試験においては施工時より大きな衝撃力を加えることになるので、杭材の耐力についてもチェックしておく必要がある。

ハンマー能力より大きい抵抗力を確認する場合は、十分なエネルギーを有する重錘落下装置を持ち込むことになる。装置は急速載荷試験の重錘落下軟クッション方式に近い設備となるが、クッションが不要なことから急速載荷試験よりも低いエネルギーの装置で対応可能である。

c) 計測項目

杭頭から 1.5D 以上離れた位置にひずみ計と加速度計を軸対称に 2 組取り付け、杭頭荷重と杭頭加速度を測定する。

d) 試験期間

試験に要する期間は、施工で使用しているハンマーを載荷装置として使用する場合は半日程度である。

別途重錘落下装置を使用する場合は、装置組み立てに 4 日程度、計器設置・試験に 1 日程度および解体に 1 日程度要する。

e) 衝撃載荷試験の基本原則

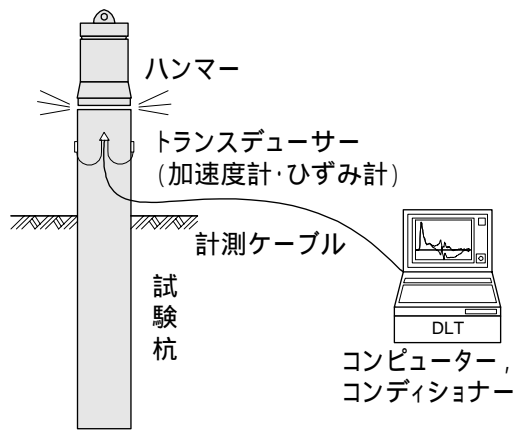
衝撃載荷試験においては、載荷時間が非常に短いため杭体に波動現象が生ずる。そのため、押し込み試験や急速載荷試験のような荷重-変位置曲線を直接得ることはできない。

衝撃載荷試験の原理を分かりやすく説明するために図-5.15 に示す列車のイメージを用いる。

図中の列車が杭であり、車列の右端が杭重、左端が杭先端とする。図-5.15 の左図は抵抗力が無い杭をイメージしており先端フリー、右図は強固な先端抵抗力を持つ杭をイメージしており先端に剛な壁が存在する。

まず図-5.15 左図の先端フリーの場合を説明する。右端の車両に 1000 kN の衝撃力を加えたたとすると入力された衝撃力は圧縮力として次々と左隣の車両に伝わる。この力の伝播現象を波動現象という。衝撃力が左端の車両に伝わった段階で左端の車両はフリーであるため飛び出そうとする。その際に右隣の車両を 1000 kN の力で引っ張ることになる。そして次々と右隣の車両へ引っ張り力が伝播し、最後に右端の車両に戻ってくる。力の伝播の過程でエネルギーの損失がないものとする、1000 kN の引っ張り力 (-1000 kN) が右端の車両に戻ってくる。

一方、図-5.15 右図の先端に剛な壁がある場合を考える。右端の車両に 1000 kN の衝撃力を加えた場合に左端の車両まで衝撃力が圧縮力として伝わるまでは左図と同様である。しかし、今度は先端に剛な壁があるために飛び出そうとした左端の車両は壁にぶつかり跳ね返される。すると、跳ね返された車両は右隣の車両を 1000 kN の圧縮力として押し出すことになる。そして次々と右隣の車両へ圧縮力が伝播し、最後に右端の車両に 1000 kN の圧縮力が戻ってくる。



ひずみ計 加速度計



計測システムの例

図-5.14 衝撃載荷試験の試験装置

以上の説明を式で表すと以下の通りである。

$$\text{全抵抗} = \text{入力 } F_d + \text{反射力 } F_u \quad (5.1)$$

すなわち、図-5.15 左図の先端フリーの場合は入力が圧縮力の +1000 kN で、戻ってきた反射力が引っ張りの -1000 kN であるから全抵抗は次式の通りとなり抵抗力は 0 kN となる。

$$\text{全抵抗} = +1000 \text{ kN} + (-1000 \text{ kN}) = 0 \text{ kN} \quad (5.2)$$

一方、図-5.15 右図の先端が剛の場合は入力が圧縮力の +1000 kN で、戻ってきた反射力が圧縮の +1000 kN であるから全抵抗は次式の通りとなり抵抗力は 2000 kN となる。

$$\text{全抵抗} = +1000 \text{ kN} + (+1000 \text{ kN}) = 2000 \text{ kN} \quad (5.3)$$

図-5.15 の下図は三角形形状の入力波の杭中の伝播を模式的に表したものである。

衝撃載荷試験は右端の車両で入力と反射力を測定して上

記の原理で抵抗力を求める試験方法である。実際の杭は周面摩擦力が存在するので列車の動きはもっと複雑になるがこれが衝撃載荷試験の基本原理である。

ここで説明した全抵抗を求める方法はケース法 (CASE 法) と呼ばれる。衝撃力を受けた杭のケース法で求まる全抵抗は静的と動的な抵抗が両方含まれたものとなる。

f) 試験結果の整理

1) 測定データ

衝撃載荷試験では、杭頭でひずみと加速度を測定し (図-5.16 参照)、以下の式により力と速度を算出する。

$$\text{軸方向力: } F(x_0, t) = A_p \cdot E \cdot \varepsilon(x_0, t) \quad (5.4)$$

$$\text{速度: } v(x_0, t) = \int \alpha(x_0, t) dt \quad (5.5)$$

得られた力と速度を、一次元波動理論に基づく下記の式に代入し、入力と反射力を求める。

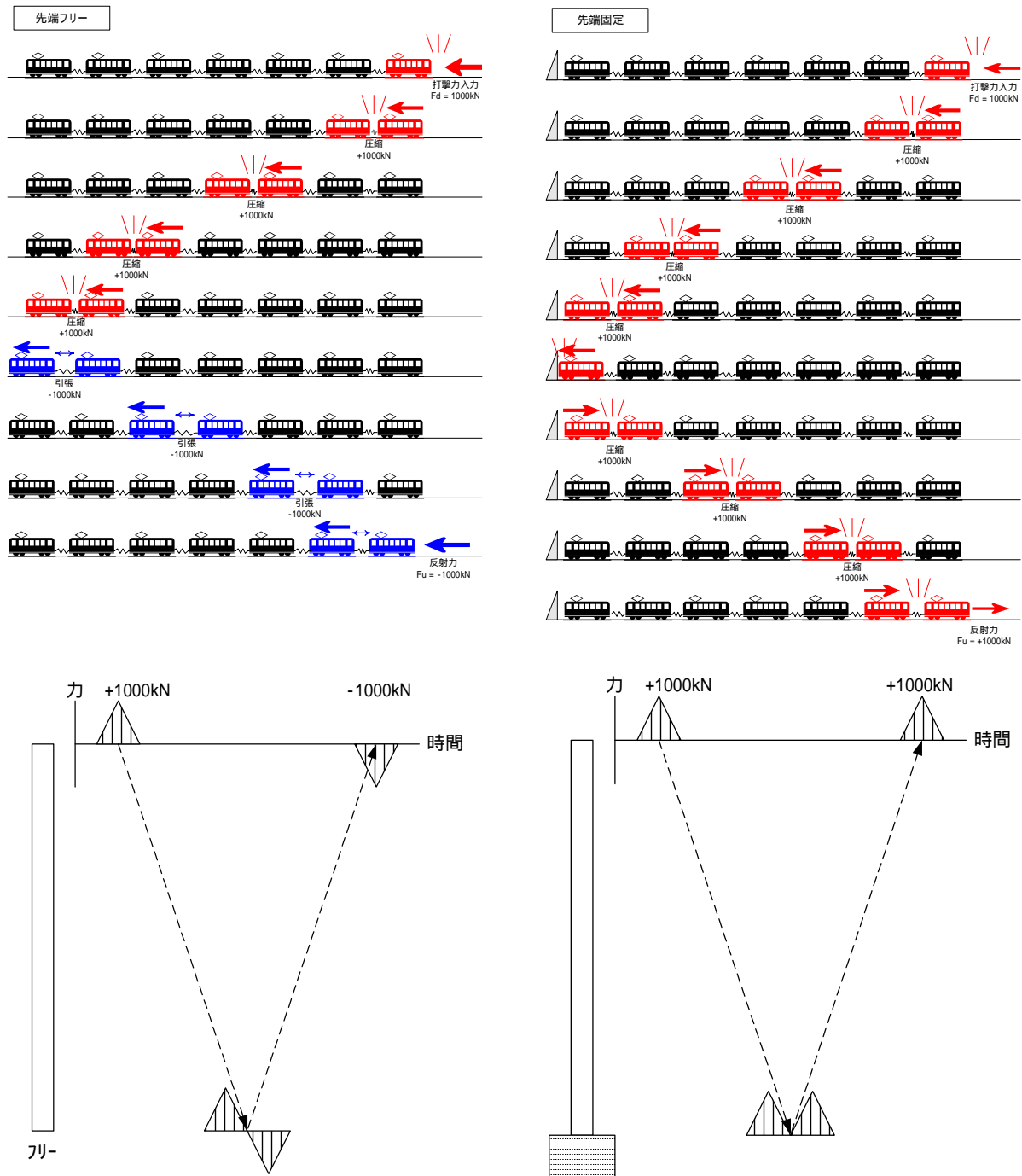


図-5.15 衝撃载荷試験の基本原理

$$\text{入力} : F_d(x_0, t) = \frac{(F(x_0, t) + Z \cdot v(x_0, t))}{2} \quad (5.6)$$

$$\text{反射力} : F_u(x_0, t) = \frac{(F(x_0, t) - Z \cdot v(x_0, t))}{2} \quad (5.7)$$

ここに、

$F(x_0, t)$: 計測位置における軸方向力

$\varepsilon(x_0, t)$: 計測位置におけるひずみ

$v(x_0, t)$: 計測位置における速度

$\alpha(x_0, t)$: 計測位置における加速度

$F_d(x_0, t)$: 計測位置における入力

$F_u(x_0, t)$: 計測位置における反射力

Z : 計測位置での杭体のインピーダンス ($Z = EA_p / c$)

E : 計測位置での杭体のヤング係数

A_p : 計測位置での杭体の断面積

c : 縦波伝播速度 ($c = \sqrt{E/\rho}$)

鋼杭で $c = 5000$ m/s 程度, コンクリート系の杭で $c = 4000$ m/s 程度

ρ : 杭体の密度

2) ケース法 (CASE 法)

ケース法を用いることにより, 衝撃载荷試験時にリアルタイムに抵抗力を計算できる. ケース法で得られる抵抗力はハンマーの衝撃力に応じて発揮された地盤の全抵抗であるが, 先に説明したように静的と動的の抵抗が含まれる. しかし, 全抵抗はリアルタイムに得られることから, 6章で述べるように, 現場で杭の支持力についての判断をする重要な指標となる. また, 精度は高くないが式 (5.9), 式 (5.10) により周面抵抗と先端抵抗を分離することができる.

$$R_t(x_0, t) = F_d(x_0, t - L_m/c) + F_u(x_0, t + L_m/c) \quad (5.8)$$

$$R_{fj}(x_0, t) = 2 \cdot F_u(x_0, t + L_m/c - \Delta t) \quad (5.9)$$

$$R_{fp}(x_0, t) = R_t(x_0, t) - R_{fj}(x_0, t) \quad (5.10)$$

ここに,

$R_t(x_0, t)$: 計測位置における全抵抗,

$F_d(x_0, t - L_m/c)$: 計測位置における入力

$F_u(x_0, t + L_m/c)$: 計測位置における入力応力波が 1 往復した時間後の反射力

L_m/c : 応力波が計測位置から杭先端まで届く時間

L_m : 計測位置から杭先端までの距離

c : 応力波伝播速度

$R_{fj}(x_0, t)$: 全抵抗の周面部分

$F_u(x_0, t + L_m/c - \Delta t)$: 計測位置における入力応力波が 1 往復する直前の反射力

$R_{fp}(x_0, t)$: 全抵抗の先端部分

ケース法で用いられる値を図-5.17 に, 杭体中の波動の伝播の様子を図-5.18 に示す.

3) 波形マッチング解析

波形マッチング解析は一次元のモデルを用いたシミュレーション解析である. 図-5.19 に示すように杭を 0.5 ~ 1.0 m のセグメントに分割して, 各セグメントに地盤強度パラメータとしてダッシュポット (動的抵抗成分) とバネ (静的抵抗成分) を並列に付けたモデルを作成する. バネにはスライダーが直列に付いており静的抵抗成分は図-5.20 に示すバイリニアのモデルで表現される.

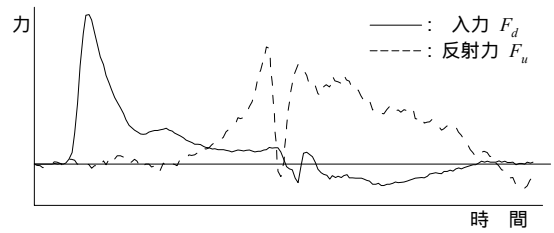


図-5.16 衝撃载荷試験の測定データ

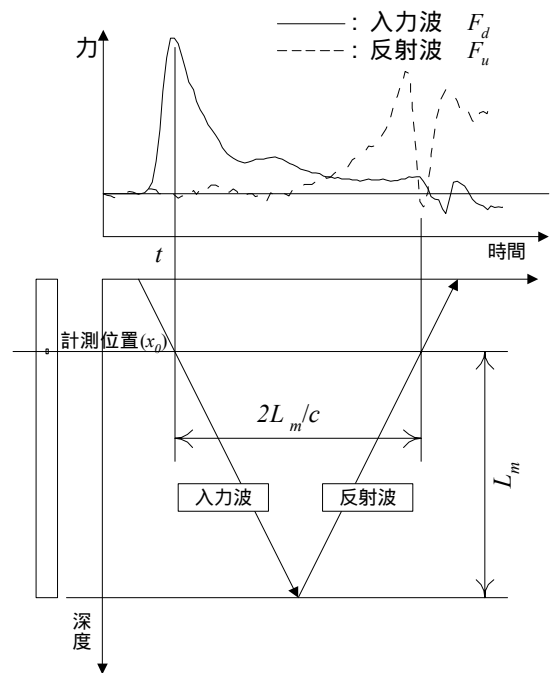


図-5.17 ケース法の考え方

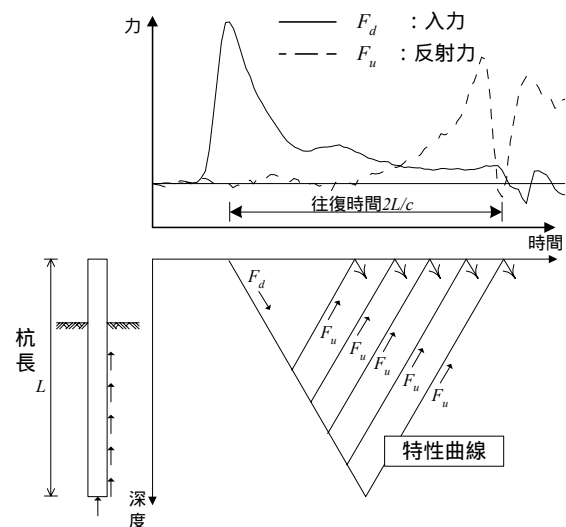


図-5.18 杭体中の波動の伝播

一次元モデルの杭頭に測定で得られた入力 $F_d(m)$ を境界条件として入力する。そして、モデル上で波動の伝播を計算することにより地盤強度パラメータに応じた計算上の反射力 $F_u(c)$ 波形が得られる。これを測定した反射力 $F_u(m)$ 波形と比較し、波形の形状が合うまで地盤強度パラメータを調整する。これを波形マッチング解析と呼ぶ。解析で得られた地盤強度パラメータのうち静的抵抗成分のみを取り出して静的抵抗力とする。波形マッチング解析のフローを図-5.21 に示す。

さらに、波形マッチング解析で得られた静的な地盤強度パラメータを図-5.22 に示す静的な一次元のモデルに当てはめて荷重伝達法と呼ばれる静的な計算を行うことにより、押し込み試験の結果に相当する荷重 変位量曲線（図-5.23）を得ることができる。

衝撃載荷試験の特長は、載荷時間が短いため反射力波形の形状が周面摩擦の分布や先端抵抗の特性を比較的明瞭に表していることである。すなわち、浅い場所の情報は時間的に早く戻り、深い場所の情報は遅く戻り、先端の情報が最も遅れて戻ってくる。したがって、各深度の地盤強度パラメータを変化させると敏感に反射力波形の形状に反映される。この性質のため、波形マッチング解析を適用することが可能となっている。

5.4 各載荷試験の適用性

現行の設計体系の中では、設計上の荷重や支持力の値と載荷試験結果を直接照査することのできる押し込み試験 (SLT) を選択することが望ましい。しかし、押し込み試験は動的載荷試験と比較して、時間と費用が多く掛かり、また反力杭が必要になるなど現場での制約条件も多い。したがって、押し込み試験に代わって動的な急速載荷試験、衝撃載荷試験を選択するケースも多いと考えられる。動的載荷試験は経済的で短期間に実施できる特長がある。

動的載荷試験を採用する上で注意しなければならないことは、動的載荷試験における杭 地盤系の挙動が静的載荷試験のそれとは全く同じではないということである。このため、現状で採用されている解析により地盤の動的抵抗成分が補正されたとしても静的載荷試験結果厳密には一致しない。

例えば、杭の貫入速度が大きいほど地盤の変形範囲が狭くなるため、見かけ上の周面地盤の変形剛性は大きくなる（図-5.24）。また、杭先端地盤の破壊形態は体積変化を伴う変形が起きることから、変形範囲の違いに加えて、地盤の慣性抵抗や過剰間隙水圧の発生の影響など未解明な部分が多い。

これらの違いが必ずしも抵抗力の過大評価（危険側）に

なるとは限らないが、現状の知見では動的載荷試験において地盤を極限状態にまで至らせた場合、その結果を押し込み試験と同等に扱うことには注意をする必要がある。

よって、現状では押し込み試験との比較などの裏付けとなるデータが無い場合は、動的載荷試験は地盤工学会の基準で規定されている「確認試験」の範囲で選択することが望ましい。言い換えれば、プロジェクト前に設計の詳細を決めるために実施する極限抵抗力を求める載荷試験としては押し込み試験を採用すべきである。

一方で、動的載荷試験の特長として容易に複数回の試験ができることが挙げられる。杭の種類が多い場合や、地盤の構成が一様でない場合などは、押し込み試験を1試験実施したうえで、網羅的に動的載荷試験を複数実施することによって基礎全体の支持力品質の確認ができるようになる。

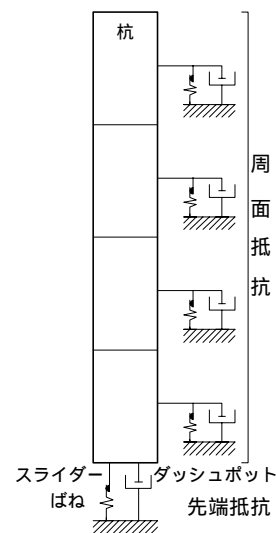


図-5.19 波形マッチング解析における杭 地盤モデル

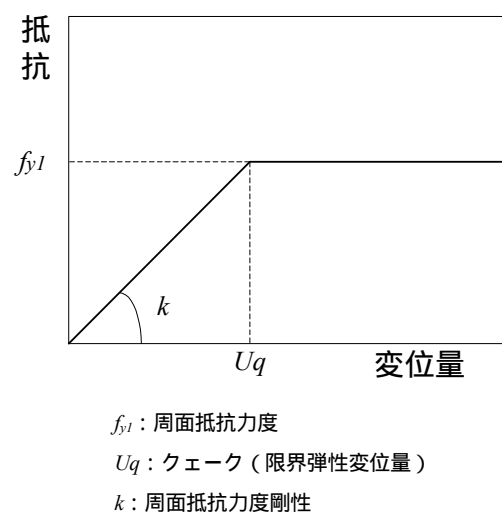


図-5.20 波形マッチング解析の静的抵抗モデル

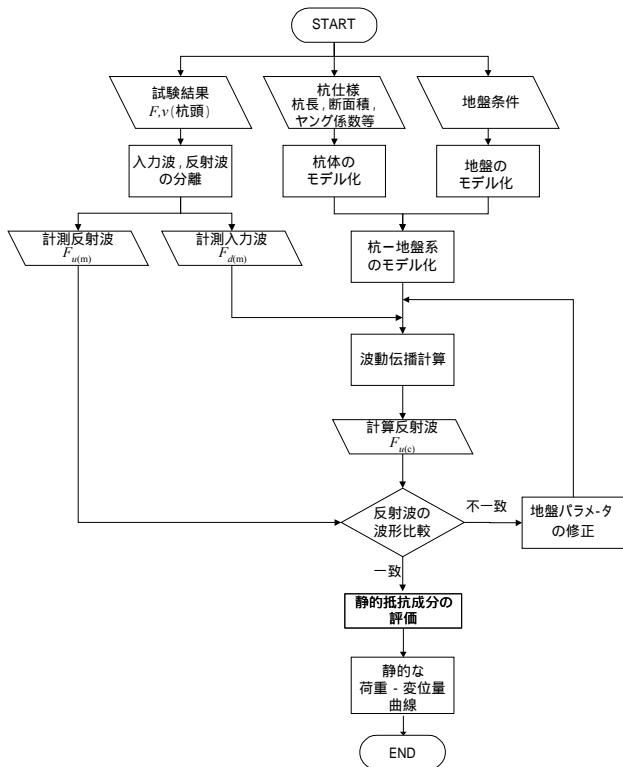


図-5.21 波形マッチング解析フロー

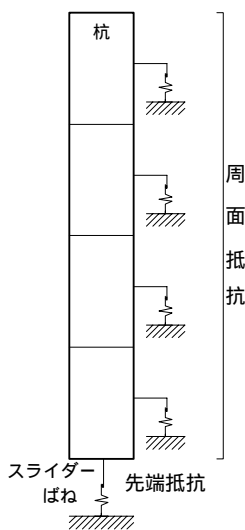


図-5.22 荷重伝達法による杭 地盤モデル

また、衝撃載荷試験は打撃杭の施工管理のために施工時の杭～地盤挙動を測定できる唯一の試験方法である。ただし、衝撃載荷試験を養生後試験に適用する場合は、ハンマーエネルギーが十分であることを確認して採用する必要がある。よって、ここでは養生後試験には十分な変位量を与えることのできるように、養生期間を短めにして衝撃載荷試験で概略の支持力特性を評価しようとするか、十分に養

生して押し込み試験か急速載荷試験を採用し、精度の高い支持力を評価することにするかどちらかを推奨する。

一方で、今後は動的解析による設計・解析手法の導入が進むと、動的な杭の支持力性能を把握することが要求される可能性がある。これまでの説明とは逆に、動的な杭の支持力特性は静的載荷試験結果からは間接的な情報しか得られず、動的載荷試験を実施することが必要となってくる。

杭は自然材料である地盤により支持される構造である。地盤の支持力特性は特殊土、地域差、局所的なバラツキなど不確定要素が多い。これらの不確定要素は設計時点の情報だけでは把握しきれない場合がある。また、経済性の追求から安全係数ぎりぎりの設計も増えている。そのような情勢下で、実杭により支持力を確認できる載荷試験の重要性は高い。現場での載荷試験は杭の支持力の安全性を担保する最善の手段である。載荷試験を実施するにあたっては、以上述べてきたように各種載荷試験の特性を理解した上で適用することが重要である。

最後に、各載荷試験の適用性を表-5.5 にとりまとめる。

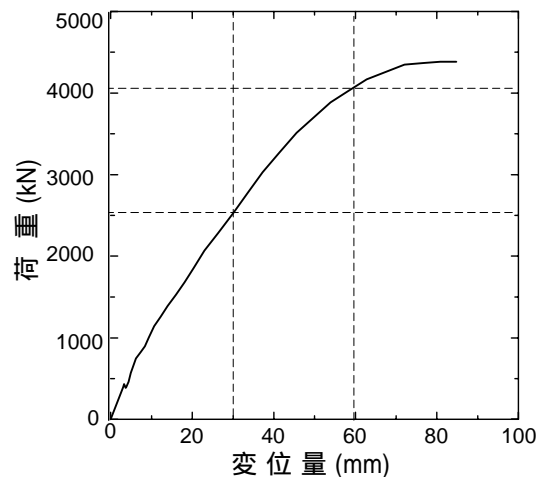


図-5.23 計算静的抵抗 変位量曲線

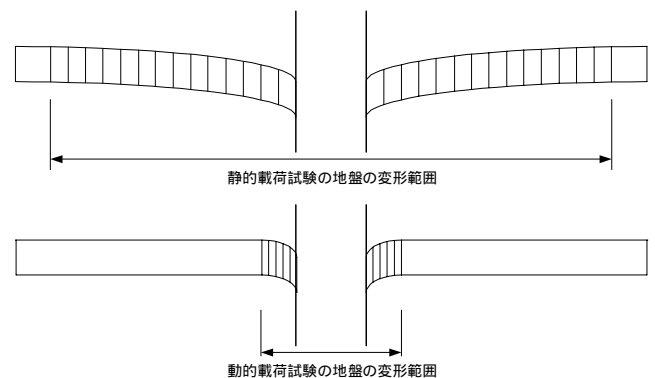


図-5.24 動的載荷試験における地盤剛性の増加

表-5.5 載荷試験の適用性

載荷試験の種類	極限抵抗力の確認 (特性調査試験)	荷重×安全率 の確認 (確認試験)	複数杭へ の対応	打撃杭の施 工時試験	動的な抵 抗特性	工期
押込み試験				×	×	組立：7日 計器・試験：2日 解体：5日
急速 載荷試験				×		組立：4日 試験：1日 解体：1日
衝撃 載荷試験			**			試験：0.5日

○：最適，△：適，◇：可能だが不適，×：不可

** 衝撃載荷試験は載荷装置を別途用意する場合は急速載荷試験のコストに近くなり工期も準ずる。

6. 施工管理方法の検討

6.1 施工時の杭の挙動

施工管理の目的は、施工時の杭の挙動（入力ハンマーエネルギーやリバウンド・貫入量）に基づいて養生後の支持力を推定し、得られた支持力が設計上の要件を満足するかどうかを確認することである。

施工時の杭の挙動と設計上の杭の荷重状態の違いを図-6.1により説明する。施工時の杭と養生後の杭（設計上の杭）には以下の違いがあり、施工時の杭の挙動から養生後の杭の支持力を算定するためにはこれらの違いを考慮する必要がある。

施工時の杭は、

- ハンマーによる動的な打撃力を受けて地盤に貫入される。
- 地盤の抵抗は動的成分と静的成分の両方が発現される。静的と動的とを合わせて全抵抗という。
- 地盤は杭の貫入によって乱されて強度が低下している。一方、養生後の杭は、
- 設計上は静的な構造物の荷重を受ける。
- 地盤の抵抗は静的である。
- 地盤の乱れは回復（セットアップ）している。

6.2 施工時の衝撃載荷試験

本来は養生後の載荷試験を実施して杭の支持力を把握することが理想であるが、現実には費用、工期の面で養生後の載荷試験を実施するケースは比較的少ない。それに対し、施工時の衝撃載荷試験は比較的容易に実施可能である。ここでは、施工時の衝撃載荷試験をより有効に活用するために試験から得られる情報を整理する。試験施工において施工時の衝撃載荷試験を実施することにより、表-6.1に示す

支持力や施工管理に関する様々な情報を得ることが出来る。以下、表-6.1の各項目について解説する。

(1) 施工性

a) 打撃時刻歴

衝撃載荷試験ではほぼすべての打撃を計測することが可能であり、試験杭の施工開始から計測することにより、打撃の時刻歴を詳細に記録することができる。ただしノイズを打撃として計測したり、施工サイクルの速いハンマーの場合は計測漏れが発生したりするので、計測の途中で衝撃載荷試験の打撃回数と実際の打撃回数を照合しておく必要がある。

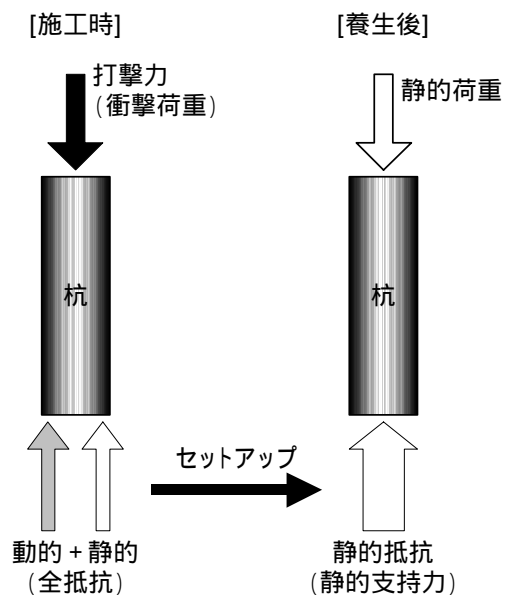


図-6.1 施工時と養生後の杭の抵抗状態の違い

表-6.1 施工時の衝撃載荷試験で得られる情報

項目	情報	内容
施工性	打撃時刻 歴	ほぼ全打撃の時刻を記録することができる。
	ハンマー 効率	測定した伝達エネルギーと入力エネルギーによりハンマー効率がわかる。
杭体の 健全性	発生応力	打撃中に杭体に発生する応力を深度方向に算定できる。
支持力 確認	支持層深 度	全抵抗の深度方向の変化を見ることにより支持層深度を確認することができる。 また、支持層内での全抵抗の変化を見ることにより、根入れ長の違いによる先端抵抗の変化を推定することができる。
	静的先端 抵抗	施工時の波形マッチング解析から静的先端抵抗を評価できる。ただし、先端抵抗もセットアップするので、できれば施工後 1 ~ 2 日程度において短期間の養生後試験を実施することが望ましい。
	養生後静 的抵抗 の推定	施工時試験の結果から、大まかな養生後の支持力を確認することができる。 a) 現場での判断 現場での判断指標として全抵抗の 1/2 から大まかな施工時の支持力を確認することができる。 (養生後静的抵抗の推定値 A) セットアップ率を 2 倍と仮定して施工時の全抵抗を養生後の支持力と見なす。 (養生後静的抵抗の推定値 B) 全抵抗の 1/2 を支持層以深の支持力と見なして、支持層以浅の周面抵抗については設計値を採用し養生後の支持力と見なす。 b) 波形マッチング解析を実施した場合 (養生後静的抵抗の推定値 C) セットアップ率を 2 倍と仮定して、施工時の波形マッチング解析結果で得られた施工時の静的抵抗の 2 倍を養生後の静的抵抗と見なす。 (養生後静的抵抗の推定値 D) 支持層以深の施工時の波形マッチング解析結果に、支持層以浅の周面抵抗については設計値を採用し養生後の支持力と見なす。

b) ハンマー効率

衝撃載荷試験ではハンマーから杭体に伝達されるエネルギーを計測することができるので、入力エネルギー ($W \times H$) との比から実際のハンマー効率を求めることができる。ヤットコを使用した場合やクッションが異なることによる影響も実測して評価することもできる。

ハンマー効率は以下のように定義されている。

$$\text{ハンマー効率} : e = \frac{E_{ht}}{E_{h0}} \quad (6.1)$$

ここに、

$$\text{入力ハンマーエネルギー} : E_{h0} = W \cdot H \quad (6.2)$$

$$\text{伝達ハンマーエネルギー} : E_{ht} = \int F(t) \cdot v(t) dt \quad (6.3)$$

W : ラム重量

H : ラムの落下高さ

$F(t)$: 計測位置での力

$v(t)$: 計測位置での速度である。

(2) 杭体の健全性

a) 発生応力

試験施工において打撃中の杭体の発生応力を測定することは、適切な施工ハンマー、施工条件を決める上で重要な

情報である。衝撃載荷試験ではセンサを取り付けた杭頭部のみならず、杭体全長に渡って発生する応力を測定することが可能であり、板厚変化点位置や杭下部の板厚の妥当性の評価も可能である。

衝撃載荷試験においては万一施工中に杭体が破損した場合には、試験データから破損位置や破損時期の評価をすることができる。

なお、測定される応力は式(6.4)で表され、ハンマーからの入力応力と反射応力の両方の成分の和となっている。

$$\sigma(z) = \frac{1}{A_p} (F_d(t_0) - F_u(t_0 + 2z/c)) \quad (6.4)$$

ここに、

$\sigma(z)$: 計測位置から z 離れた位置の応力

A_p : 計測位置の杭の断面積

$F_d(t_0)$: 計測位置でのハンマーからの入力

$F_u(t_0 + 2z/c)$: 計測位置での1往復後の反射力

である。

(3) 支持力確認

a) 支持層深度

衝撃載荷試験においてはケース法によりリアルタイムで

全抵抗を測定することができる。杭先端が支持層に到達する前から計測を実施し、全抵抗の深度方向の変化を観察することにより、杭先端の支持層到達を判断することができる。

図-6.2は施工時に連続的に衝撃載荷試験を実施して得られたデータである。図-6.2のうち、左から5,6,7番目の図がそれぞれ衝撃載荷試験の結果から得られた全抵抗、先端抵抗、周面抵抗を示している。これらはすべて動的抵抗を示したものである。一番右側の図は、Hileyの式から得られた支持力推定値である。これは、左から2番目と3番目の図で示した貫入エネルギーと貫入量、リバウンド量より求めたものである。

また、支持層に到達してからの先端抵抗の深度方向の変化を観察することにより、支持層への根入れ長に対する先端支持力の評価をすることができる。図-6.3は支持層に根入れしてからの杭先端付近での抵抗の変化の状態を示したものである。この結果の場合には、支持層への根入れが増えるにつれて少しずつ内周面摩擦による抵抗が増加していく傾向が見て取れる。このような検討をすることにより、杭先端部分の実質部の抵抗と内周面の抵抗が杭打設に伴ってどのように変化するかを知ることができる。

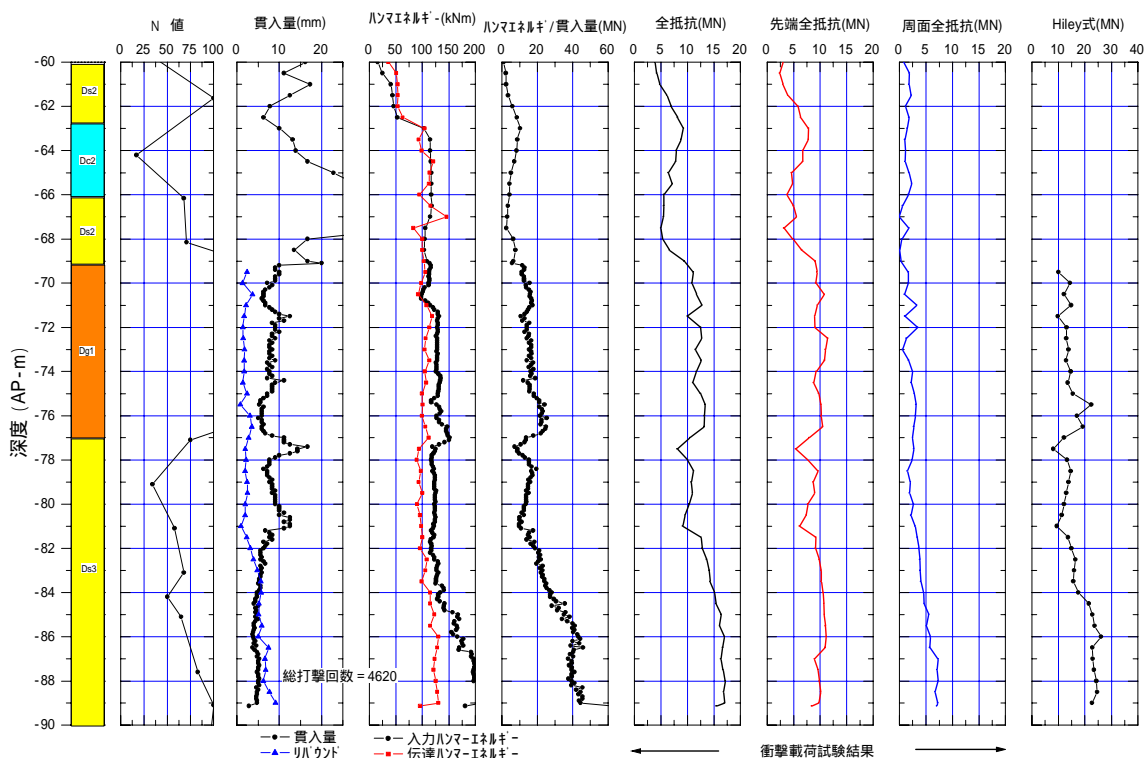


図-6.2 施工時の衝撃載荷試験（深度方向の抵抗の変化）

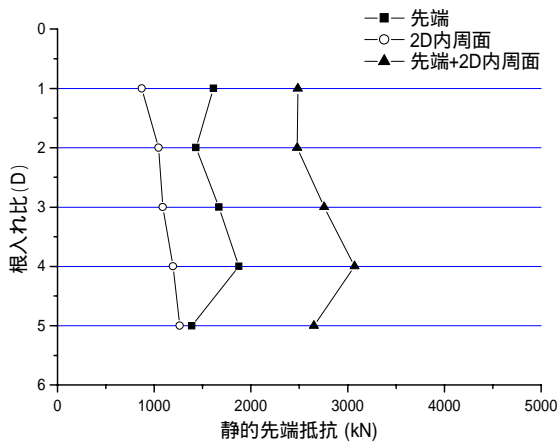


図-6.3 支持層内での先端抵抗の変化

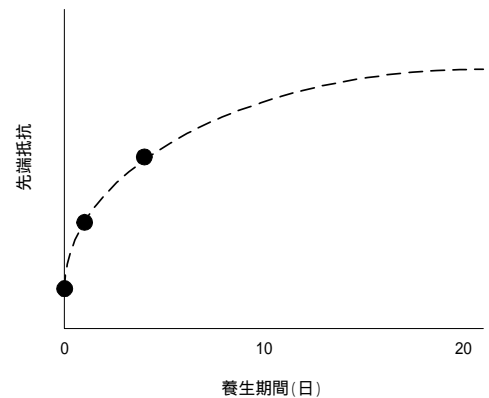


図-6.4 先端抵抗のセットアップ曲線

b) 静的先端抵抗

波形マッチング解析をすることにより、施工時の静的抵抗成分を得ること可能であるが、施工時には周面抵抗が大きく乱れており、養生後の支持力を施工時の衝撃載荷試験から導くためにはセットアップ率を設定する必要がある。しかし、セットアップ率は施工条件、地盤条件により大きなばらつきがあり、適切なセットアップ率を設定することは難しい。

一方で先端抵抗は支持層が砂質土系の場合が多いことから、施工時の先端抵抗をそのまま養生後の先端抵抗として支持力を評価することが可能である。ただし、開端鋼管杭の場合の先端抵抗は管内土の周面摩擦に依存する傾向が高く、先端抵抗もある程度セットアップする(図-6.4)。そこで、砂質土地盤のセットアップが相対的に早いことを利用して、短期の養生期間による養生後の衝撃載荷試験を実施し、周面抵抗が回復する前に先端抵抗を測定する方法が考えられる。この方法のメリットは、周面が回復する前に載荷試験を実施するので、比較的小さなハンマーエネルギーで試験を実施することが出来ることと、短期間に複数の試験を実施すればセットアップの傾向が把握でき、それに基づいてセットアップ後の支持力を推定することができることである。

c) 養生後支持力の推定

施工時の衝撃載荷試験から養生後の杭の支持力を直接導き出すことはできない。しかし、施工時の試験結果から養生後の支持力に関してある程度の判断ができれば、施工管理において有効な情報となる。ここでは過去の載荷試験データに基づいて、施工時の衝撃載荷試験結果から導くことができる養生後の静的抵抗の推定値の考え方を提案する。

なお、ここに示した方法はすべてで4種類である。これらは、現場で杭施工中に判断できるものと、施工後簡単な解析(波形マッチング解析)を行ってから判断するものの二種類に分類でき、それぞれについて、二つずつの提案を行っている(表-6.1)。なお、現場での施工中の判断はあくまでも一次判断のための指標であり、精度を上げるためには、後者の解析を伴った判断が必要となる。

1) 現場での判断のための養生後静的抵抗の推定

試験施工においては、現場において打ち止めの判断を求められる場合が多い。適切に打ち止めるためには、養生後の支持力を現場で推定できることが望ましい。なお、ここで提案する推定値AおよびBはあくまでも現場での一次判断のための指標である。

i) 養生後静的抵抗の推定値 A

養生後静的抵抗の推定値の1つ目の提案値は、養生後の静的抵抗 $R_{S(t)}$ をケース法により得られる全抵抗値 R_T に等しいとするものである。その根拠は以下の通りである。

まずはじめに、ケース法で得られる施工時の全抵抗 R_T には、動的、静的双方の抵抗成分が含まれるため、施工時の静的抵抗 $R_{S(t)}$ を正しく評価するためには、静的な抵抗と動的な抵抗に分離する必要がある。施工時の全抵抗に対する静的抵抗の占める割合を静的抵抗比 S_r とすると、施工時の静的抵抗 $R_{S(t)}$ は次式で表される。

$$R_{S(t)} = R_T \times S_r \quad (6.5)$$

本来、全抵抗を静的成分、動的成分に精度良く分離するには波形マッチング解析を行う必要がある。しかしながら、地盤にもよるが、過去の衝撃載荷試験の実績から、静的抵抗比 S_r は概ね50%である(図-6.5参照)ことから、ここでは以下の近似を行う。

$$R_{S(t)} = \frac{R_T}{2} \quad (6.6)$$

載荷試験において必要な情報は、養生後、つまり施工中の地盤の乱れが回復した後の静的抵抗 $R_{S(t)}$ である。養生後の静的支持力を求めるためには、正確なセットアップ率 S_t を知る必要がある。セットアップ率とは、施工時の静的抵抗 $R_{S(t)}$ と養生後の静的抵抗の比 $R_{S(t)}$ であり、次式で表される。

$$R_{S(t)} = R_{S(t)} \times S_t \quad (6.7)$$

近隣に静的押込み載荷試験データがあれば、養生後の杭の静的抵抗を精度よく測定できる。養生後の静的抵抗を得ることができれば、施工時の静的抵抗と比較することによりセットアップ率を精度良く決定することが可能となり、他の杭についても回復後の静的支持力を精度よく推定できるようになる。

セットアップ率は、地盤の性質や、使用するハンマーの種類により異なる。一般に粘性土地盤ではセットアップ率が大きく、回復までに時間を要する。一方、砂質土地盤ではセットアップ率は小さく、回復時間も早い。また、杭の貫入による乱れの影響が大きい周面抵抗はセットアップ率が大きく、先端抵抗は砂質土層を支持層とすることが多いのでセットアップ率が小さい傾向にある。さらに、施工能率の良いハンマーの方がセットアップ率は大きくなる。これは、施工能率の高いハンマーほど杭周辺の地盤の強度を大きく低下させているからであり、地盤はその後もとの抵抗（あるいはそれ以上の抵抗を発揮することもある）を発揮するようになるためである。以上述べた、セットアップ率の特徴を表-6.2に示す。

過去の衝撃載荷試験の実績を整理した結果から全体のセットアップ率が2を下回るケースは少ない(図-6.6)。そこで、ここでは、セットアップ率を2と考え、以下の近似式を用いる。

$$R_{S(t)} = 2 R_{S(t)} \quad (6.8)$$

式(6.5)～(6.8)の関係を図示すると図-6.7のようになり、最終的に、現場における養生後の静的抵抗の推定値として次式が得られる。

(養生後静的抵抗の推定値 A)

$$R_{S(t)} = R_T \quad (6.9)$$

この考え方を適用するに際しては以下の注意が必要である。

- 杭が短く(15 m程度以下)先端地盤が岩や砂礫地盤の場合にはセットアップ率は低く、場合によっては2より

り小さくなる場合がある。

- 施工性の高いハンマーにおいては養生後静的抵抗力の過小評価となる場合が多い。
- 杭が長く(15 m程度以上)貫入量が2～3 mm以下の場合には養生後静的抵抗力の過小評価となる場合が多い。

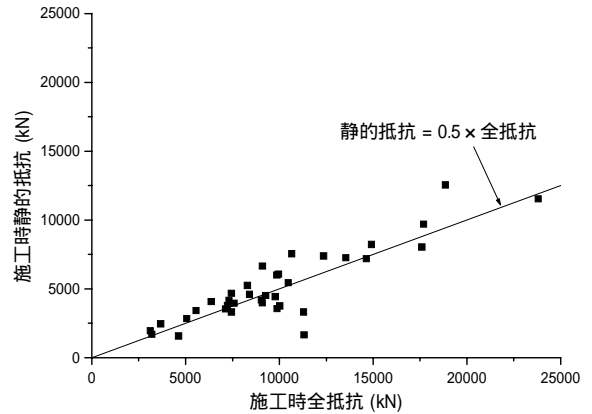


図-6.5 静的抵抗比

表-6.2 セットアップ率の特徴

項目	セットアップ率	
	小	大
地盤の種類	砂質土	粘性土
抵抗場所	先端	周面
ハンマーの性能	打撃間隔が長い	打撃間隔が短い

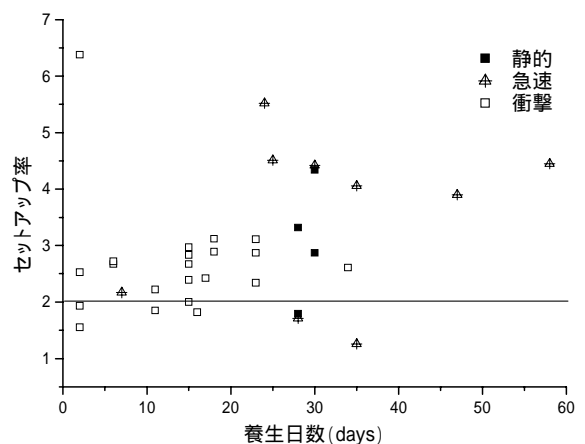


図-6.6 セットアップ率(全体)

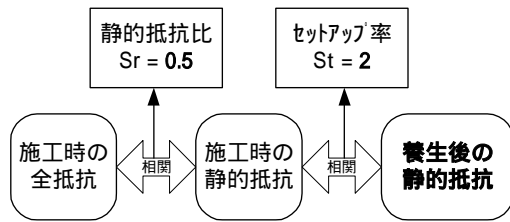


図-6.7 施工時全抵抗と養生後の静的抵抗との相関

ii) 養生後静的抵抗の推定値 B

2 つ目の提案値は、養生後の静的抵抗をケース法による全抵抗と支持層以浅の設計周面抵抗から求める方法である。その考え方は以下の通りである。

まず、ケース法により得られる全抵抗 R_T から施工時の静的抵抗 $R_{S(i)}$ を求める。これに関しては、前述の推定値 A を求める際と同様の仮定を用い、式(6.6)により計算する。次に、セットアップ率について検討する。推定値 A を求める際には、先端抵抗、周面抵抗の区別なく、式(6.8)でセットアップ率を 2 と仮定している。しかしながら、施工時には杭の周面地盤が乱されているため周面抵抗はあまり発揮されておらず、施工時の静的抵抗 $R_{S(i)}$ は支持層以深の地盤による先端抵抗が支配的と考えられる。従って、ここでは、施工時の静的抵抗 $R_{S(i)}$ はすべて先端抵抗であると仮定することにする。

過去の载荷試験結果から、先端抵抗のセットアップ率を調査すると図-6.8 のようになる。図から、先端抵抗のセットアップ率は概ね 1 ~ 1.5 の間であり、1 を下まわることではない。そこで、先端抵抗のセットアップ率を 1 とし、養生後の静的抵抗のうちの先端抵抗として施工時の静的抵抗のうちの先端抵抗（先の仮定により施工時の静的抵抗 $R_{S(i)}$ と等しい）をそのまま用いる。

一方、周面抵抗については、施工時には全く発揮されておらず養生後には完全に回復すると考え、養生後の周面抵抗として支持層以浅の設計周面抵抗 R_f を用いる。

これにより養生後の静的抵抗 $R_{S(r)}$ が次式のように推定される。

$$R_{S(r)} = \frac{R_T}{2} + R_f \quad (6.10)$$

これが現場における養生後静的抵抗の推定値 B である。

この方法は、杭長が長く、セットアップ率が大きくなる場合に適している。過去の载荷試験結果により式(6.10)の妥当性を検証した結果を図-6.9 に示す。図-6.9 によると、この推定値が概ね妥当な値を与えていることが分かる。

2) 施工時の波形マッチング解析結果からの養生後静的抵抗の推定

衝撃载荷試験を実施した後、データを持ち帰って波形マ

ッチング解析を行う。解析結果に基づいて 1) の考え方を適用することにより以下の養生後の静的抵抗の推定値が得られる。

i) 養生後の静的抵抗の推定値 C

推定値 A で用いた施工時の静的抵抗の近似値(式(6.6))に換えて、波形マッチング解析により得られる施工時の静的抵抗 $R_{S(i) \text{ analyzed}}$ を用いる方法である。セットアップに関しては、推定値 A の考え方を踏襲し、全体のセットアップ率を 2 として(図-6.6 参照)、施工時の静的抵抗から養生後の静的抵抗を推定する。つまり、式(6.8)より次式が得られる。

$$R_{S(r)} = 2 R_{S(i) \text{ analyzed}} \quad (6.11)$$

考え方は推定値 A と同じであるが、波形マッチング解析を実施することにより不確定要素(静的抵抗比 S_r の値)が減り、精度が高くなる。ただし、推定値 A と同様に以下の点に注意する必要がある。

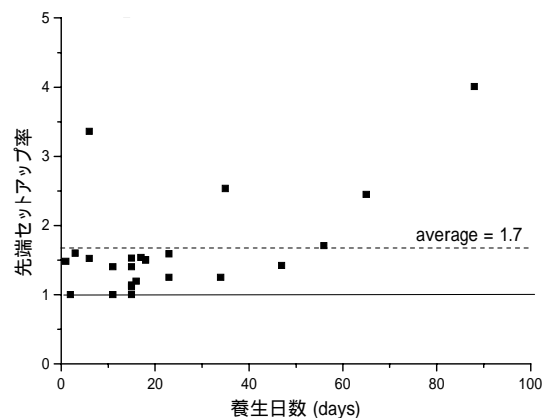


図-6.8 先端抵抗のセットアップ

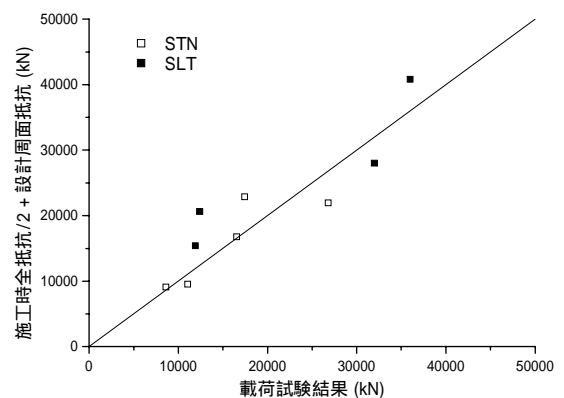


図-6.9 養生後の実際の静的抵抗と推定値 B(全抵抗 / 2 + 設計周面抵抗) の相関

- 杭が短く（15 m 程度以下）先端地盤が岩や砂礫地盤の場合にはセットアップ率は低く，場合によっては2より小さくなる場合がある．
- 施工性の高いハンマーにおいては過小評価となる場合が多い．
- 杭が長く（15 m 程度以上）貫入量が2～3 mm 以下の場合には過小評価となる場合が多い．

ii) 養生後の静的抵抗の推定値 D

施工時の静的抵抗の近似値（式（6.6））に換えて，波形マッチング解析により得られる施工時の静的抵抗 $R_{S(i)}$ を用い，セットアップについては，推定値 B と同様に静的抵抗を先端抵抗と周面抵抗に分けて考える方法であり，次式で表される．

$$R_{S(r)} = R_{S(i) \text{ analyzed}} + R_f \quad (6.12)$$

R_f は支持層以浅の設計周面抵抗である．

推定値 C と同様に不確定要素（静的抵抗比 S_r の値）が減ることにより精度は高くなる．

過去の載荷試験結果から，推定値 D と載荷試験の値との相関を図-6.10 に示す．図から，概ね良い相関が得られていることが分かる．

6.3 動的支持力管理式の修正方法の提案

動的支持力管理式によって養生後の支持力（静的抵抗）を正しく求めるためには，図-6.11 に示す各項目の相関を明らかにする必要がある．図-6.11 に示す相関を Hiley 式を基本として表現すると式（6.13）のように表すことができる．

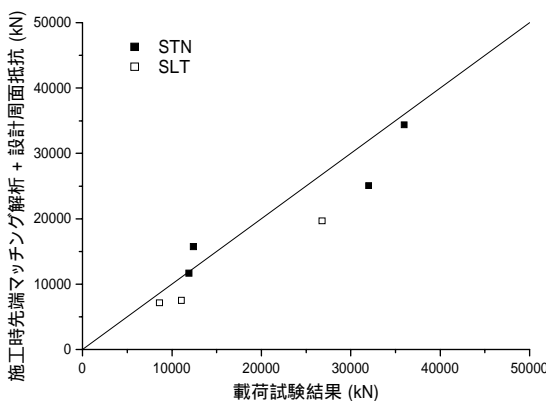


図-6.10 養生後の静的抵抗と施工時静的抵抗+設計周面抵抗の相関

$$R_{S(r)} = \frac{e \cdot E_{h0}}{s + k/2} \times C_f \times S_r \times S_t \quad (6.13)$$

ここに，

$R_{S(r)}$ ：養生後の静的抵抗（静的支持力）

e ：ハンマー効率 = E_{ht} / E_{h0}

E_{ht} ：伝達ハンマーエネルギー

E_{h0} ：入力ハンマーエネルギー

s ：貫入量 (m)

k ：リバウンド量 (m)

C_f ：全抵抗の補正係数

S_r ：静的抵抗比

S_t ：セットアップ率

式（6.13）の中で，全抵抗の補正係数 C_f と静的抵抗比 S_r は施工時の衝撃載荷試験を実施することにより得ることができる．セットアップ率 S_t は養生後の載荷試験を実施することにより得ることができる．各相関係数を以下に詳しく説明する．

a) 全抵抗の補正係数 C_f

全抵抗の補正係数は，リバウンド量，貫入量から計算する動的支持力管理式の値と，施工時の衝撃載荷試験による全抵抗 R_T （動的 + 静的抵抗）を換算する係数で，次式で表される．

$$C_f = R_T / \left(\frac{e \cdot E_{h0}}{s + k/2} \right) \quad (6.14)$$

b) 静的抵抗比 S_r

静的抵抗比 S_r は，施工時の全抵抗 R_T の中の静的抵抗成分 $R_{S(i)}$ の割合で，施工時の衝撃載荷試験の解析により得られる．

$$S_r = R_{S(i)} / R_T \quad (6.15)$$

c) セットアップ率 S_t

セットアップ率 S_t とは，施工時の衝撃載荷試験および養生後の載荷試験で得られた静的抵抗成分の比と定義され，次式で求められる．また，セットアップ率の概念を図-6.12 に示す．

$$S_t = \frac{R_{S(r)}}{R_{S(i)}} \quad (6.16)$$

ここに，

$R_{S(r)}$ ：施工時試験で得られた静的抵抗成分

$R_{S(i)}$ ：養生後試験で得られた静的抵抗成分

セットアップは、杭の貫入により杭の周辺地盤に過剰間隙水圧が発生し有効応力が低下したものが、時間とともに排水されて有効応力が増加することによるものと、施工中に乱された土骨格が時間とともに再形成されることによるものに分けられると考えられている。先端抵抗は前者に周面抵抗は後者に起因するものが大きいと考えられる。このことから、透水性の低い粘性土地盤においてセットアップが顕著である。セットアップは水圧が速く下がる施工直後に急激に進み、その後時間の経過とともに緩やかに進む。

また、一般に周面摩擦力の方が先端支持力よりセットアップが顕著である。これは、支持層が砂質土地盤である場合が多いこと、施工の際の周面地盤は杭の凹凸や振れなどで地盤との隙間ができやすいのに対し、先端地盤は圧縮される力を受け締め固まること等によるものと考えられる。

同一の地盤条件であっても、周辺地盤の乱れ方は、杭径、根入れ長さなどに影響される。また、用いるハンマーの性能によって、打込み時の地盤の攪乱程度は異なる。そのため、現状ではセットアップ率を正確に予測することは難しい。したがって、試験施工などによりその現場状況でのセットアップ率をあらかじめ把握しておくことが望ましい。

セットアップ終了のおおよその目安は、地盤工学会基準⁶⁾では、砂質土では5日以上、粘性土では14日以上とされている。

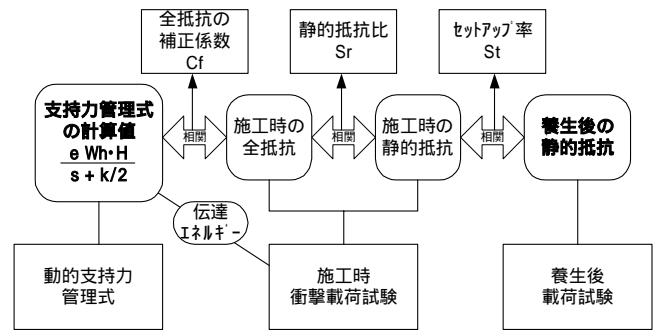


図-6.11 支持力管理式と養生後の静的抵抗との相関

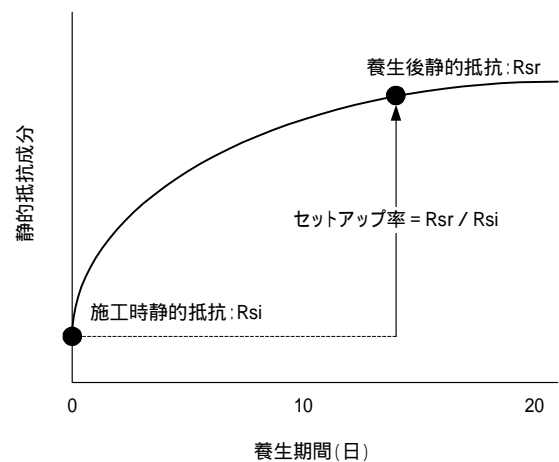


図-6.12 セットアップ率の概念

6.4 動的支持力管理式の修正の実施例

動的支持力管理式の修正例を以下に示す。

a) 工事概要

- 1) 対象とする構造物：組杭式岸壁
- 2) 実施する載荷試験：施工時衝撃載荷試験，養生後衝撃載荷試験（養生期間：14日）
- 3) 杭の諸元・地盤条件

用いる杭の杭径はφ1100 mm，杭長は44 mである。地盤条件を図-6.13に示す。

4) 設計支持力・載荷試験確認支持力

設計支持力及び載荷試験で確認する支持力は表-6.3に示す通りである。

表-6.3 設計条件

荷重状態	発生押込力 P (kN)	安全率 F_s	確認支持力 $P F_s$ (kN)
常時	919	2.5	2,298
地震時	5,606	1.0	5,606

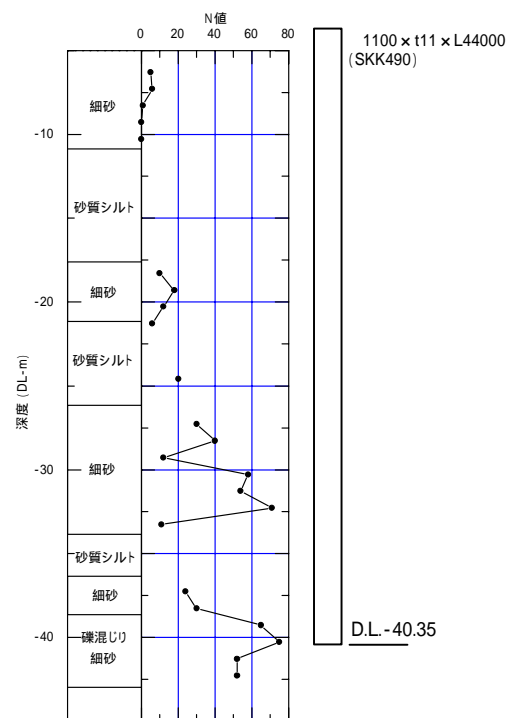


図-6.13 地盤条件

5) ハンマー

使用するハンマーは、日本車両製造 NH-115B (ラム重量 11.5 ton, 本体重量 27.5 ton, ハンマーエネルギー 203 kNm) である。

b) 打ち止め記録

打ち止め時に得られた記録は以下のとおりである。

入力ハンマーエネルギー: $E_{h0} = 127 \text{ kNm}$

貫入量: $s = 3.6 \text{ mm}$

リバウンド: $k = 17.5 \text{ mm}$

c) 衝撃載荷試験

1) 施工時衝撃載荷試験

施工時の衝撃載荷試験結果を図-6.15 に、波形マッチング解析結果を表-6.4 に示す。結果は以下のとおりである。

施工時全抵抗: $R_T = 72100 \text{ kN}$

施工時伝達エネルギー: $E_{ht} = 92 \text{ kNm}$

施工時静的抵抗: $R_{S(i)} = 3081 \text{ kN}$

2) 養生後衝撃載荷試験結果

施工時の衝撃載荷試験結果を図-6.14 に、波形マッチング解析結果を表-6.5 に示す。結果は以下のとおりである。

養生後静的抵抗: $R_{S(r)} = 6409 \text{ kN}$

d) 施工管理式の係数の算定

ここまで述べた施工記録ならびに施工中と養生後の 2 回の衝撃載荷試験により得られた各値をまとめると、表-6.6 のようになる。表-6.6 に示した値をもとに、施工管理式(式(6.13))の各係数を算定すると以下のとおりである。

ハンマー効率 e

$$e = E_{ht} / E_{h0} = 92 / 127 = 0.724$$

全抵抗の補正係数 C_f

$$\text{式(6.14)より } C_f = R_T(s + k/2) / e E_{h0} = 7210 \times (0.0036 + 0.0175/2) / 92 = 0.968$$

静的抵抗比 S_r

$$\text{式(6.15)より } S_r = R_{S(i)} / R_T = 3081 / 7210 = 0.427$$

セットアップ率 S_t

$$\text{式(6.16)より } S_t = R_{S(r)} / R_{S(i)} = 6409 / 3081 = 2.08$$

以上より修正動的的支持力管理式として次式が得られる。

$$R_{S(r)} = \frac{e \cdot E_{h0}}{s + k/2} \times C_f \times S_r \times S_t = \frac{E_{h0}}{s + k/2} \times 0.62 \quad (6.17)$$

表-6.4 施工時波形マッチング解析結果

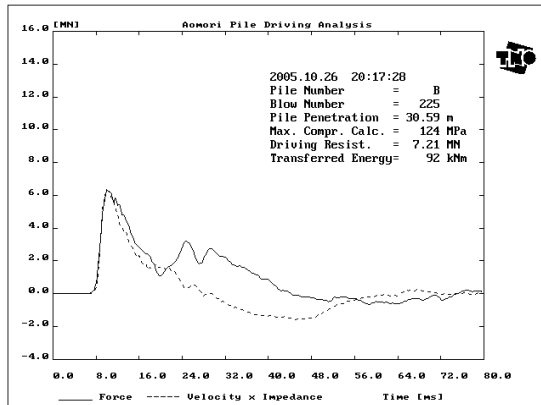
	深度 D.L. (m)	層厚 (m)	降伏強度 (kN/m ²)	静的抵抗 (kN)
1	-10.80	7.05	1	24
	-17.61			
2	-21.16	3.68	1	13
	-26.16			
3	-33.76	5.18	15	269
	-38.66			
4	-40.35	6.83	40	944
	-33.76			
5	-38.66	6.11	50	1,056
	-40.35			
6	-38.66	2.80	60	362
	-40.35			
周 面				2,667
先 端			6,000	414
合 計				3,081

表-6.5 養生後波形マッチング解析結果

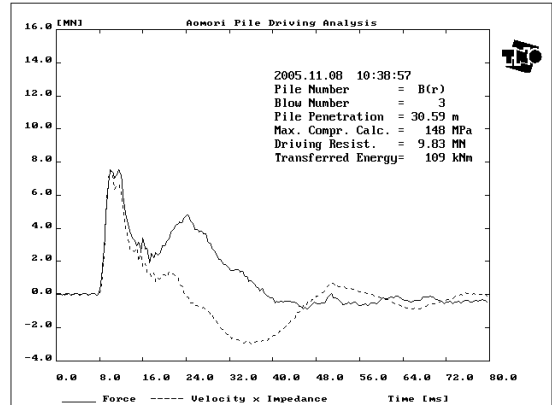
	深度 D.L. (m)	層厚 (m)	降伏強度 (kN/m ²)	静的抵抗 (kN)
1	-10.80	7.05	25	609
	-17.61			
2	-21.16	3.68	20	254
	-26.16			
3	-33.76	5.18	35	627
	-38.66			
4	-40.35	6.83	70	1,652
	-33.76			
5	-38.66	6.11	60	1,267
	-40.35			
6	-38.66	2.80	80	482
	-40.35			
周 面				4,891
先 端			22,000	1,518
合 計				6,409

表-6.6 施工記録・載荷試験結果

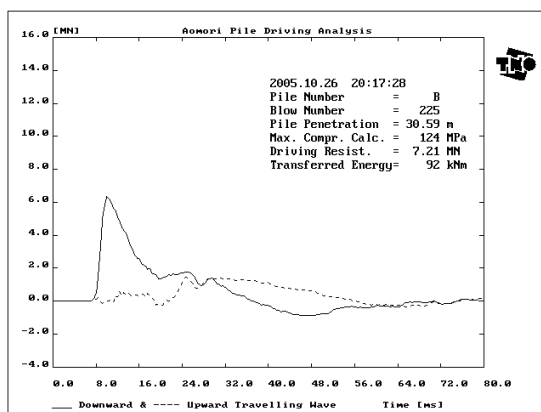
施工記録	貫入量	s (m)	0.0036
	リバウンド量	k (m)	0.0175
	ハンマーエネルギー	E_{h0} (kNm)	127
衝撃載荷 試験結果	伝達エネルギー	E_{ht} (kNm)	92
	全抵抗	R_T (kN)	7,210
	施工時の静的抵抗	$R_{S(i)}$ (kN)	3,081
	養生後の静的抵抗	$R_{S(r)}$ (kN)	6,409



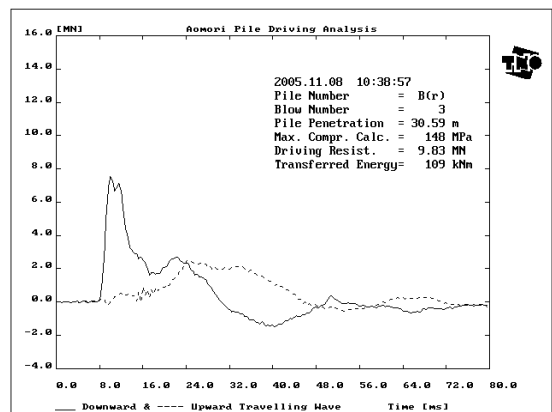
(計測波形 力, 速度 × インピーダンス)



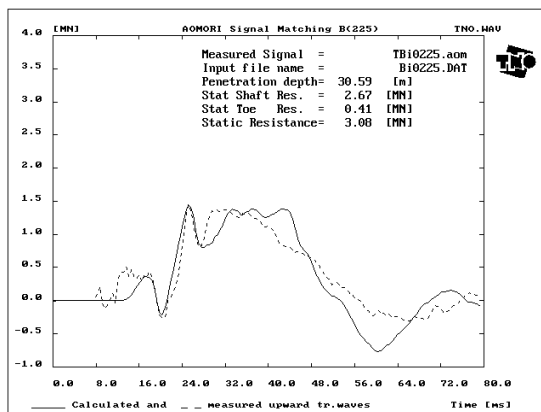
(計測波形 力, 速度 × インピーダンス)



(入力波形, 反射力波形)

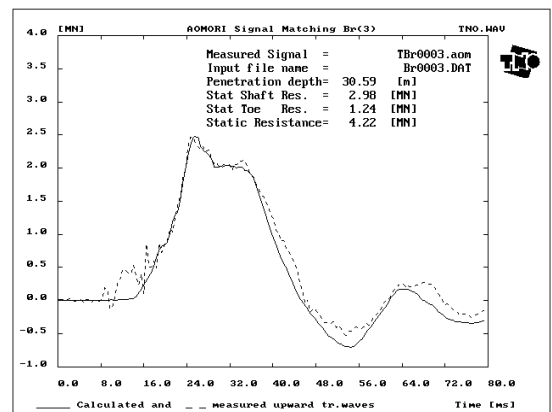


(入力波形, 反射力波形)



(測定反射力, 計算反射力)

図-6.15 施工時衝撃载荷試験データ



(測定反射力, 計算反射力)

図-6.16 養生後衝撃载荷試験データ

6.5 衝撃载荷試験の実測データ

動的支持力管理式の適切な相関係数を得るためには、施工時の衝撃载荷試験と養生後の载荷試験を実施する必要がある。施工時や養生後に载荷試験を実施しない場合は、実績により相関係数を推定する必要がある。

そこで、これまで国内で実施された鋼管杭の衝撃载荷試

験データを整理し、このデータに基づき修正動的支持力管理式の相関係数を推定する²⁹⁾。

(1) エネルギー効率

過去に施工時の衝撃载荷試験を実施しているプロジェクトについて、式(6.13)中のハンマー効率 e を整理した。

その結果を図-6.17 に示す。図により、IHC ハンマーは平均で $e = 81\%$,NH(日本車輛)のハンマーは平均で $e = 61\%$ である。

(2) 全抵抗補正係数

全抵抗の補正係数 C_f は式 (6.14) で表される。これを過去の結果より求めたものを図-6.18 に示した。図よりバラツキはあるが C_f は 75% 程度であるといえる。

(3) 静的抵抗比

施工時の衝撃載荷試験における全抵抗に対する静的抵抗成分の割合を示す静的抵抗比 S_r を図-6.19 に示す。図によると、静的抵抗成分の割合は、全抵抗に対して概ね 50% となっている。

(4) セットアップ率

施工時の衝撃載荷試験から得られた静的抵抗成分と養生後試験（静的、急速、衝撃）結果から求めたセットアップ率を、図-6.20 ~ 図-6.24 に示す。

これらの図より以下のことが言える。

- 全体のセットアップ率はバラツキが大きいがい最低 2 倍程度は見込める。
- 先端のセットアップ率は、平均 1.7 倍である。
- 周面のセットアップはかなりバラツキが大きい。平均で 6.8 倍である。
- 周面のうち沖積層のセットアップ率は、施工時の乱れが大きく平均 11.8 倍である。
- 周面のうち洪積層のセットアップ率は平均 5.5 倍である。

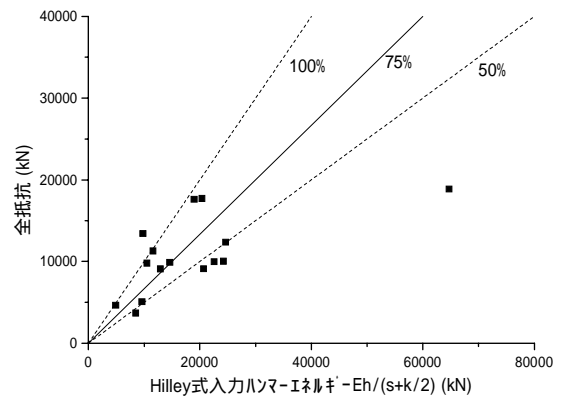


図-6.18 全抵抗補正係数

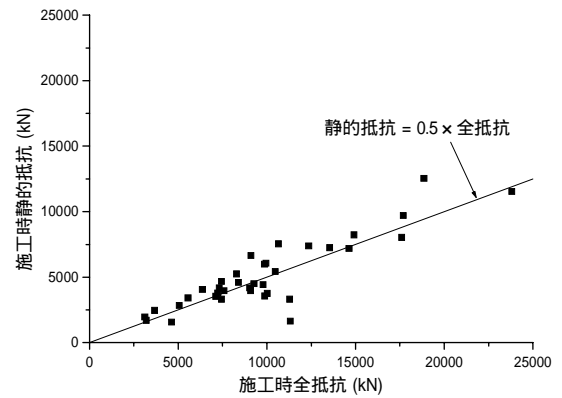


図-6.19 静的抵抗比

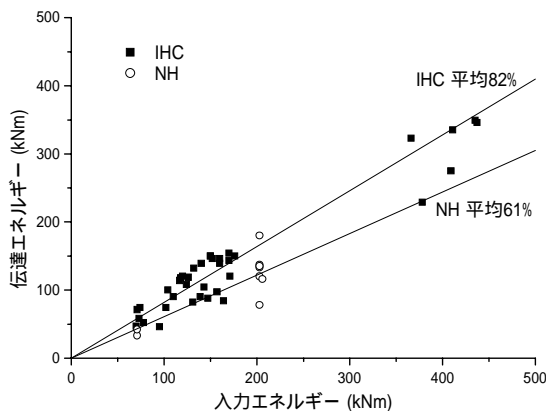


図-6.17 ハンマー効率

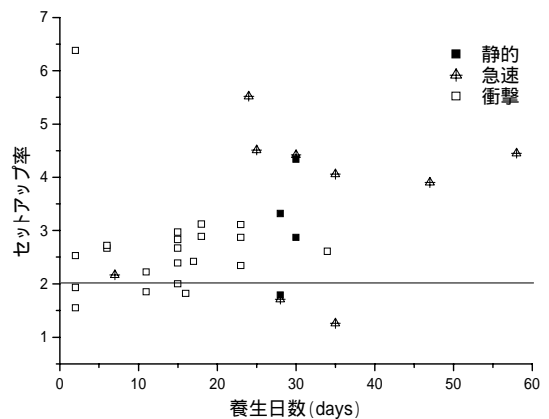


図-6.20 セットアップ率（全体）

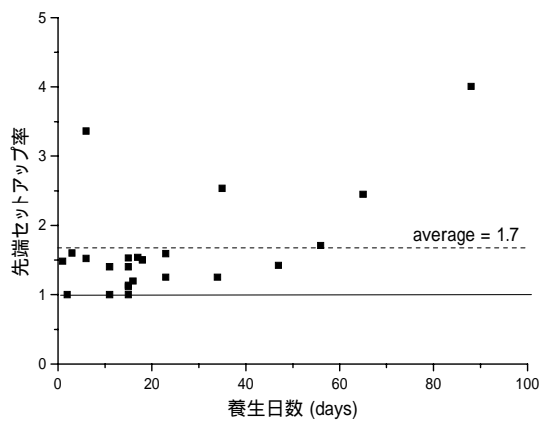


図-6.21 セットアップ率（先端実断面積）

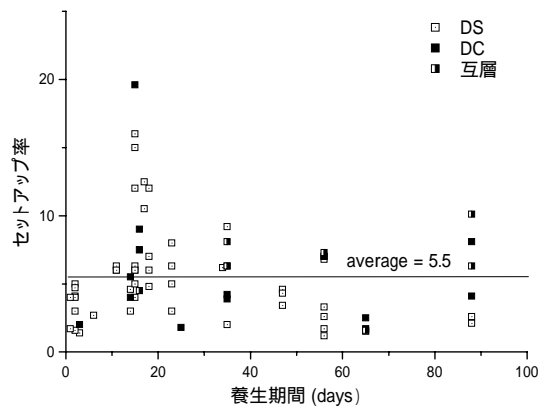


図-6.24 セットアップ率（周面：洪積層）

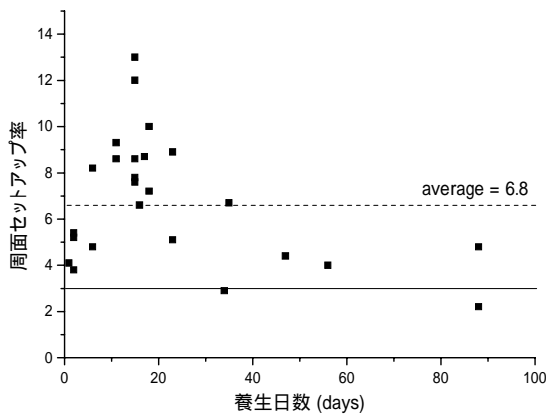


図-6.22 セットアップ率（周面全体）

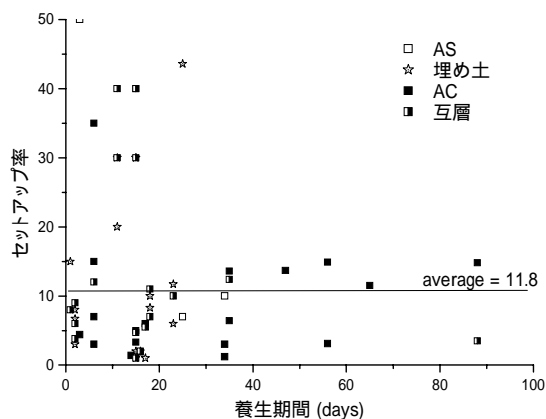


図-6.23 セットアップ率（周面：沖積層）

表-6.7 各動的支持力管理式の計算方法

	道示式	Hiley 式	5S 式
推定式	$R_a = \frac{1}{3} \left(\frac{AEK}{e_0 l_1} + \frac{NUI_2}{e_f} \right)$	$R_{du} = \frac{e_f F}{S + \frac{K}{2}}$	$R_a = \frac{2F}{5S + 0.1}$
e_0	$(1.5W_H/W_p)^{1/3}$		
e_f	0.25	0.5	
F		$2W_H H$	$2W_H H$
N	杭根入れ長を平均		

6.6 従来の動的支持力管理式の精度

従来の動的支持力管理式と載荷試験結果（杭頭）の関係を図-6.25 および図-6.26 に示す。なお、載荷試験結果は、3.2 節で整理したデータを採用した。

表-6.7 に、各動的支持力管理式の計算方法を示す。なお、各動的支持力管理式の詳細は 2.1 節を参照されたい。

動的支持力管理式と載荷試験結果の関係は、バラツキがあるものの概ね 1/2 ~ 2 倍の範囲に収まる結果となった。このバラツキは、動的支持力管理式は杭の許容支持力や極限支持力を算定するものではなく、杭が支持層に到達しているかどうかの判断に用いるものであれば問題ない範囲であると考えられる。なお、5S 式については、ディーゼルハンマーの場合は比較的良好だが、油圧ハンマーの場合はバラツキが大きくなる傾向があるので、その適用には注意が必要がある。

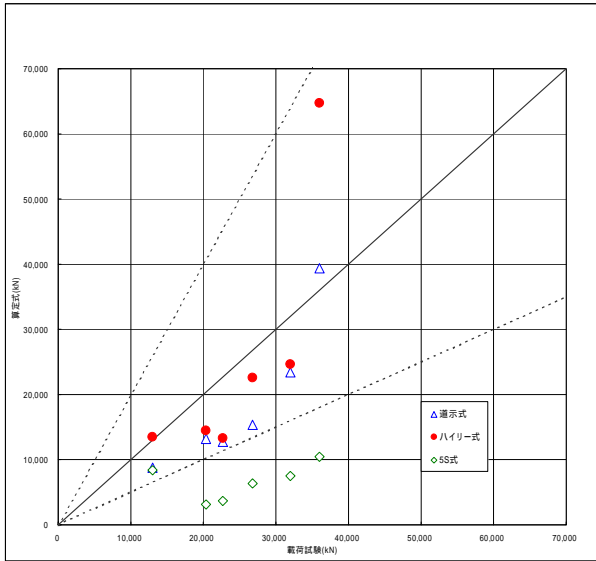


図-6.25 載荷試験結果と動的支持力管理式の関係（油圧ハンマー）

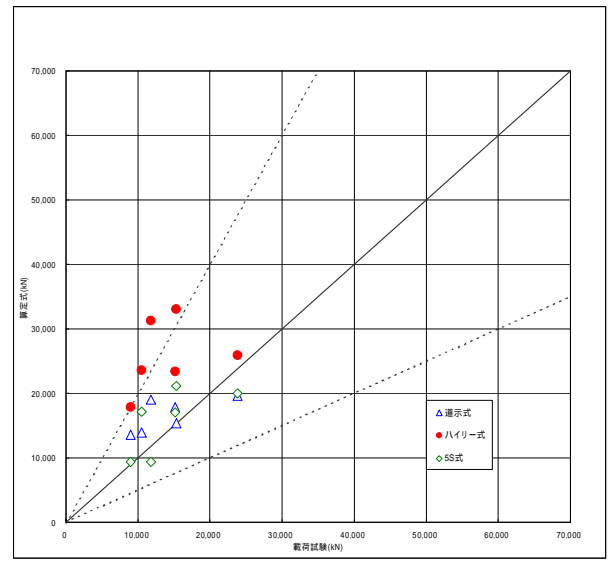


図-6.26 載荷試験結果と動的支持力管理式の関係（ディーゼルハンマー）

7. 提案する設計・施工の流れ

港湾施設においては、従来から鋼管杭（一般に、開端杭）を打設して基礎とする構造形式が、最も多く用いられている。これは、構造物条件（規模が大きいこと、荷重が大きいことなど）、地盤条件（支持層が深いことなど）、施工条件（港湾や海上での施工であることなど）、および環境条件（周辺への振動・騒音が比較的許容されることなど）から総合的に判断して、選択されてきたためである。鋼管杭の使用は、近年顕著な大口径化・長尺化の傾向を強めながら今後も継続されると考えられる。

しかし、付録 A のアンケート結果からもわかるように、杭打設に関して施工中に問題が発生することも少なくない。特に、現場において高止まりや支持力不足に遭遇するケースが多く見られる。これらは、事前および施工中に行われる杭の支持力推定の不正確さによるものである。その原因として以下のような要素が考えられる。

支持層となる地盤状態は複雑であること：支持層の傾斜，支持層の不陸，支持層が風化岩・凝灰岩，硬い中間層の存在など

動的支持力管理式（杭打ち式）が多数ある上に，その精度に問題があること：Hiley 式，道示式，IHC 提案式など

静的支持力を確認する手段としての各種載荷試験の採用が少ないこと：事前調査の補完や設計妥当性確認のための載荷試験が工費や工期の制約で行われないなど

施工トラブルを未然に防止するためには，基本的ではある

が，施工前の施工計画および施工中の各段階において，課題や問題点を事前に想定し，発注者と施工者の認識を共通にさせておくことが重要である。また，施工中に問題が生じた場合の対処方法についても，速やかに対策が取れるように，発注者と施工者の認識を共通化させておくことが必要である。

ここでは，トラブルの予防と発生後の対処，および施工時の合理的な支持力判定のための提案をしている。その主要なポイントは，以下の通りである。

設計および施工計画に使用する地盤条件を決定するための地盤調査・試験は，一般にボーリング，標準貫入試験（SPT），一軸圧縮試験（UCT）であるが，大きな軸方向抵抗力を要求される場合や，閉塞率が問題となる大口径杭や支持層への根入れ比が小さい場合などは，現場ベーン試験（FVT），静的コーン貫入試験（CPT），一面せん断試験（DST）などを行って支持力評価の精度向上を図るのが望ましい。また，地層の変化が激しい場合や支持層の深さ，厚さ，傾斜等が一定でない予想される場合は，港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾などで目安としているボーリングやサウンディングの間隔よりも密に実施するべきである。

工事請負契約書³⁰⁾および港湾工事共通仕様書³¹⁾等では，請負者の「設計照査」を義務付けており，施工計画作成に先立ち現場条件などの十分な理解を求めている。この「設計照査」は，施工時のトラブルを未然に防止するために有効な手段であり，確実な実施が望ましい。

重要構造物や工事規模が大きな場合で、トラブル発生リスクが高かつトラブル発生時の損害（大幅な工期遅延や高額的设计変更など）が大きいと予想される場合には、支持力確認のために静的載荷試験または次善の策としての急速載荷試験の実施が望ましい。

現在の杭打ち工事の主流である設計根入れレベルでの動的支持力管理式による打ち止め判定において、支持力管理式の精度を上げるために、簡易で安価な衝撃載荷試験の積極的な採用を進めることが望ましい。

図-7.1に打込み杭の設計および施工管理のフロー（案）を示す。施工管理部分については、大きく施工計画、載荷試験、施工管理の3段階に分類されており、各段階でのトラブルの予測と対策を含めた仕事の流れと判断基準を示している。重要なポイントとして、各々の段階で問題が生じた場合には、発注者と施工者が協議・協力して速やかに解決することを基本としている。以下に各段階における検討項目を示す。次節以降、図-7.1のフローに示した1～24の各ステップ（以下、S1～S24と表記する）について、詳細に説明する。

7.1 各ステップの説明

(1) S1. 調査・設計

a) 一般

ここでは、調査設計の段階は比較的シンプルに記述している。基本的には、港湾基準の考え方に従って調査設計を行うことになる。ただし、ここで、あえて設計段階での杭の載荷試験の可能性を提示した。すべての施設について設計段階での杭の載荷試験が必要ということではないが、重要施設や、大規模プロジェクトの場合には設計段階での杭の載荷試験を検討するとよい。

また、ここでは、一般的な設計・施工分離発注方式を念頭においている。このため、調査設計段階は工事請負の範囲に含まないとの前提で施工フローを作成している。

ただし、以下のような発注契約方式の場合は、調査設計段階の一部または全部が工事範囲に含まれる。

- 「設計施工一括発注方式（DB方式）」
- 「詳細設計付き発注方式」

これらの発注方式は、技術的難易度が高く施工全般において工夫が求められる場合や、設計段階から施工者の技術力を反映する必要がある場合などを対象にすでに採用されている。今後は、更に、調査設計段階から施工者が関与す

る「性能発注方式」の導入も予定されている。設計は、概略設計・基本設計・詳細設計と進められるのが通常であるが、その進捗に沿って調査も予備調査・本調査と段階的に実施していくが普通である。

平成19年7月に、港湾の施設の技術上の基準・同解説が、国際規格への対応の観点から全面的に改訂され、仕様規定型から性能規定型へ移行した。図-7.2に技術基準への性能規定化の導入について示す。

港湾の技術基準（下巻 p. 584）では、杭の性能照査の基本について以下のように記述されている。

1) 杭基礎の定義

杭基礎とは、単独の杭もしくは複数の杭によって上部の施設を支える基礎のこと、あるいは、上部に施設が無くて単数もしくは複数の杭によって、施設や基礎への作用を地盤に伝達する基礎のことをいう。

2) 杭の定義

杭とは、施設や基礎への作用を地盤に伝達するために地中に設ける柱状の構造体である。

3) 杭の性能照査の基本

作用による杭が受ける荷重は複雑であるが、一般に、杭が受ける荷重の成分を杭軸方向荷重と杭軸直角方向荷重の成分に分解し、それぞれの方向への荷重に対する杭の抵抗性能によって照査することができる。

杭基礎が支える上部構造物の種類、杭が受ける荷重の種類によっては、上部構造物と杭基礎を連成して解析を行う必要がある場合がある。

b) 調査

杭基礎の合理的、経済的な設計、施工を行うためには、適切な調査が必要である。調査が不十分、不適切な場合、設計段階や施工段階で手戻り作業が生じやすく、工期・工費に影響が及ぶことから、事前に適切な調査を行うことは非常に重要である。

調査を行う上で、まずはじめに、

構造物の規模、重要度（構造物の大きさ、荷重、許容沈下量など）

基礎の設計・施工時に必要な検討項目（鉛直支持力、沈下量など）

設計に必要な土質定数（粘着力、内部摩擦角など）などを整理、把握して、調査項目、方法、調査位置、数量等を決定する必要がある。

1) 杭の設計に必要な地盤調査項目とその調査方法

杭の設計に必要な地盤情報（調査項目）とその調査方法を以下に示す。

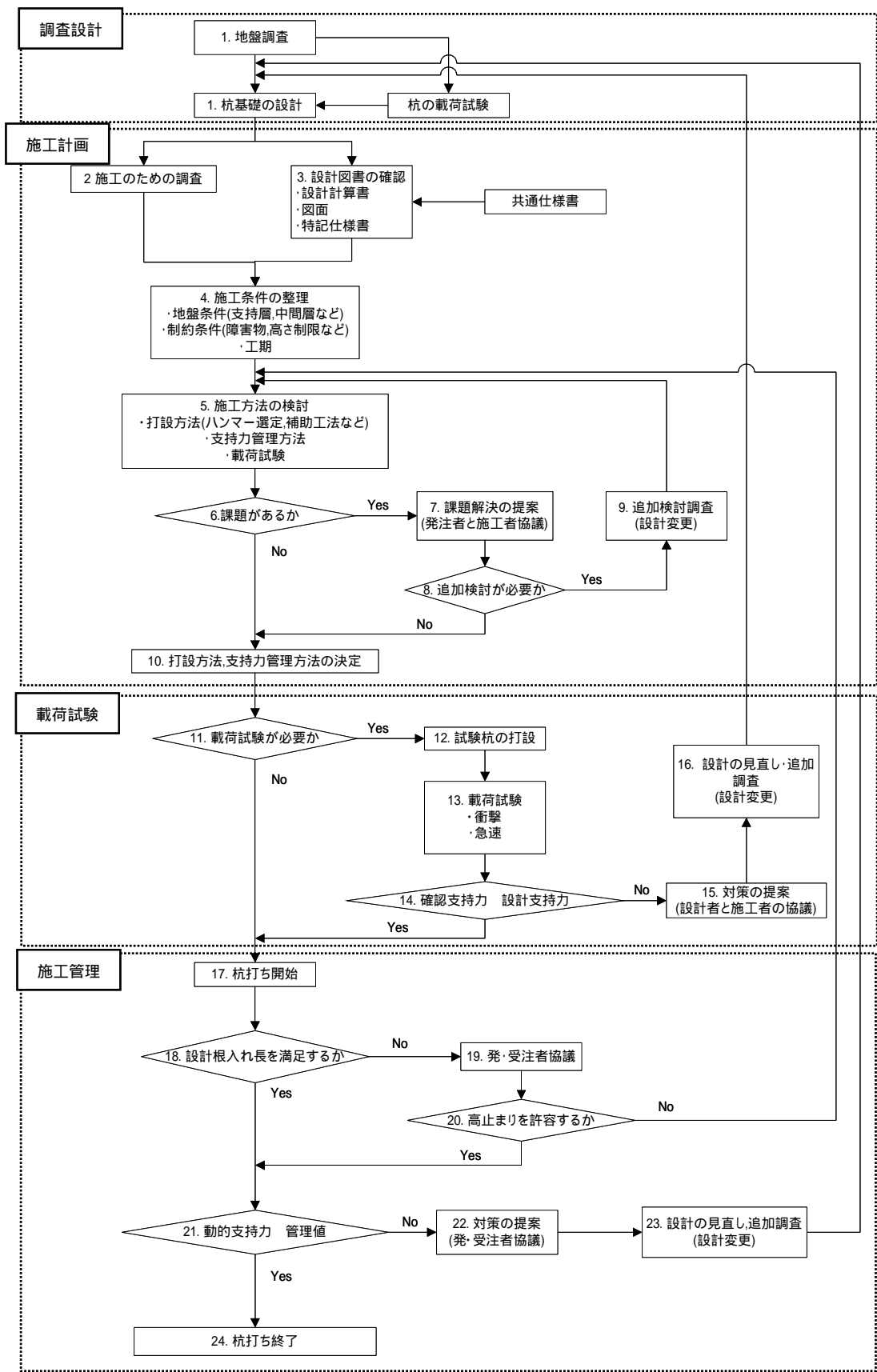


図-7.1 打込み杭の施工フロー (案)

「技術基準の性能規定化」：技術基準改訂

性能照査の標準手法
「信頼性設計法」付属書に記載

多様な設計方法可能
「適合性確認制度」

図-7.2 技術基準への性能規定化の導入

支持層の深さと厚さ，凹凸，傾斜，連続性

- ボーリング調査と標準貫入試験 (SPT) が一般的
- 静的コーン貫入試験 (CPT)，動的コーン貫入試験 (DPT) による調査も有効

CPTは深度方向に連続的に密にデータを得ることができ，地層構成の判定や支持層深度などを精度よく計測できる手段である。

支持層の先端支持力

- SPTによるN値の利用が一般的
- 乱さない試料を採取し一軸・三軸圧縮試験を実施
サンプリング位置は代表的な数地点について深度方向に数多く配置するのが土性を把握する上で有効である。

中間（貫通）層の杭周面摩擦力

- SPT や DPT から概略値を求める（精度上 CPT が望ましい）
- 詳細には，乱さない試料の採取と一軸・三軸圧縮試験などを実施

2) 地盤調査位置・数量の決定

調査地点の位置，間隔及び深度は，対象とする施設の大きさ，施設の重量によって生じる地盤内の応力分布，及び地盤の成層状態の均質性を考慮して決定する。しかしながら，施設の工費や重要度の問題もあり，調査地点の数やその深度を一概に規定することはできない。参考として，港湾の施設の技術上の基準・同解説のボーリング及びサウンディングの調査地点の間隔を表-7.1に示す。

i) 栈橋，岸壁など

本構造物は形式上横方向に施設規模が長い為，地盤の成層状態が施工予定地域内で大きく変化する可能性がある。調査地点が1,2点しかない場合，平面的，あるいは3次元的に地盤条件を把握することができないため，ボーリング調査地点を増やす措置が必要である。

ii) 橋梁など

橋梁基礎は，単独の面積毎の基礎地盤について設計を行うために，橋台ごとに1箇所，橋脚では1脚ごとにボーリング調査を計画する。

表-7.1 ボーリング及びサウンディングの調査地点の間隔の目安¹⁾

①成層状態が水平方向にも鉛直方向にも比較的均質な場合

(単位：m)

		法線方向		法線直角方向			
		配置間隔		配置間隔		法線からの距離(最大)	
		ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング
概略調査	広範囲の地域	300~500	100~300	50	25	50~100	
	小範囲の地域	50~100	20~50				
	精密調査	50~100	20~50	20~30	10~15		

②成層状態が複雑な場合

(単位：m)

		法線方向		法線直角方向			
		配置間隔		配置間隔		法線からの距離(最大)	
		ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング	ボーリング	サウンディング
概略調査		50以下	15~20	20~30	10~15	50~100	
精密調査		10~30	5~10	10~20	5~10		

注) サウンディングにはボーリング孔を必要とするものと，必要としないものがある。

表中のサウンディングはボーリング孔を必要としないもののみを対象とする。

ボーリング孔を必要とするサウンディングはボーリングの欄を適用する。

c) 設計

1) 杭基礎の静的最大軸方向押し込み抵抗力

鉛直杭よりなる杭基礎の軸方向抵抗力の設計用値は、一般に、鉛直単杭に対する地盤の抵抗による静的最大軸方向押し込み抵抗力を基準とし、次の項目に対する考慮を行って決定する。

- 地盤破壊および地盤の変形に基づく軸方向変位量に関する安全値の余裕
- 材杭の圧縮応力度
- 継手
- 杭体の細長比
- 群杭としての作用（杭間隔の考慮）
- 負の周面抵抗
- 杭頭の沈下量

ここで、の評価は本来杭の静的載荷試験によるのが望ましい。地盤の抵抗による単杭の軸方向押し込み抵抗の特性値として、静的載荷試験や静的押し込み試験により得られる第二限界抵抗力、第一限界抵抗力、杭頭の鉛直抵抗ばね定数などがある。なお、適切な計算による静的最大軸方向押し込み抵抗力は、第二限界抵抗力に相当すると考えてよい。

地盤の抵抗に基づく単杭の軸方向押し込み抵抗力の設計用値 R_d は次の式 (7.1) ~ (7.3) から求める。

$$R_d = R_{pd} + R_{fd} \quad (7.1)$$

$$R_{pd} = \gamma_{Rp} \cdot R_{pk} \quad (7.2)$$

$$R_{fd} = \gamma_{Rf} \cdot R_{fk} \quad (7.3)$$

ここに、

R_p : 杭の先端押し込み抵抗力

R_f : 押し込み時の杭の周面抵抗力

γ : 部分係数

k, d : それぞれ特性値および設計用値

周面抵抗力, 先端抵抗力, 全抵抗力に対する部分係数の標準値は、各構造物で決められているのでそれに従うものとする。

2) 地盤の抵抗による単杭の静的最大軸方向抵抗力

単杭の静的最大軸方向抵抗力は、適切に地盤調査を実施したうえで、鉛直載荷試験によって求めるか、静力学的支持力算定式によって算定することができる。地盤の抵抗による単杭の静的最大軸方向抵抗力の推定方法には以下のものが考えられる。

- 各種載荷試験による推定
- 静力学的支持力算定式による推定
- 既往の資料による推定

上記のように載荷試験は設計の一部と位置づけられるが、工期や費用の都合や設計段階で実施できない場合は、施工

の当初に実施して設計の妥当性の確認とすることもある。

3) 載荷試験による静的最大軸方向抵抗力の推定

杭の静的最大軸方向抵抗力を求めるための載荷試験方法としては、静的押し込み試験、急速載荷試験、衝撃載荷試験がある。これらのどの載荷試験方法を取るかによって、計測項目、載荷装置、推定精度が異なる。最大軸方向抵抗力を求めるためには、静的押し込み試験が最も精度がよく情報量も多いが、十分な情報を得るためには、計測のための準備が重要である。十分な計測準備ができていなければ、静的押し込み試験をする効果は薄い。衝撃載荷試験は、もっとも簡便な試験で、最大抵抗力推定手法としては一定の限界があるが、準備も簡単であり、施工管理を含めて利用する価値がある試験方法である。

4) 静力学的抵抗力算定式による静的最大軸方向抵抗力の推定

通常用いられている静力学的抵抗力算定式は閉塞杭に対して定義されているものである。杭が閉塞しているものとしてまず静的抵抗力を求め、そののち、開端杭としての影響を考慮した支持力推定を行なう。

港湾基準では、港湾で最も利用されている鋼管杭を打ち込み工法で施工した場合の支持力推定式を提示している。ほかの材質の杭、ほかの施工方法による杭の場合には、それぞれ他の期間の基準や各協会が提供している技術資料を参考にして、軸方向抵抗力を推定することが必要である。なお、パイプロハンマーによって施工する場合には、この工法による杭の打込みの原理が打撃工法による打込みと異なるため、抵抗力の算定については注意が必要である。中掘り杭工法を適用した場合に抵抗力を推定するのに参考となる記述は、道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編³⁾に記載されている。

標準貫入試験結果および地盤の非排水せん断強さを用いた算定式

港湾で従来より用いられている標準貫入試験結果や一軸圧縮試験結果から軸方向抵抗力を推定する式である。

-1 砂質土地盤に打ち込まれた杭の許容支持力: R_a

$$R_a = \gamma_{Ri} (300 N A_p + 2 \overline{N} A_s) \quad (7.4)$$

ここに、

A_p : 杭の先端面積 (m²)

A_s : 杭周の全長面積 (m²)

N : 杭先端地盤の N 値

\overline{N} : 杭根入れ全長に対する平均の N 値

γ_{Ri} : 部分安全係数

ただし、

$$N = (N_1 + \overline{N_2}) / 2 \quad (7.5)$$

N_1 : 杭先端位置での N 値

$\overline{N_2}$: 杭先端より上方へ $4B$ までの範囲内の N 値

B : 杭の直径または幅 (m)

現段階ではこの式を基準として設計してよい。ただし、図-7.3 に示すように、この式では、土被り圧の影響を十分に評価することができないため、大深度杭の場合には杭の支持力を過小評価する可能性のある式であることに注意する必要がある。大深度杭か否かの判定の目安は、概ね、根入れ深度 50 m と考えてよい。

-2 粘性土地盤に打ち込まれた杭の許容支持力: R_a

$$R_a = \gamma_{R_i} (6 c_p A_p + \overline{c_a} A_s) \quad (7.6)$$

ここに、

c_p : 杭先端位置での非排水せん断強さ (kN/m²)

$\overline{c_a}$: 杭根入れ全長に対する平均付着力 (kN/m²)

$c \leq 100$ kN/m² の場合 $c_a = c$

$c > 100$ kN/m² の場合 $c_a = 100$ kN/m²

γ_{R_i} : 部分安全係数

注) N 値 50 以上の地盤に式 (7.4) を単純に適用することは望ましくない。

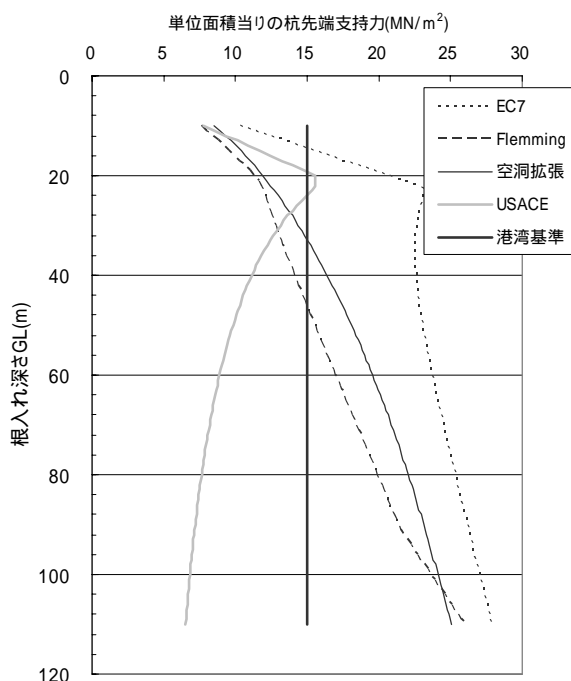


図-7.3 根入れ深度の違いによる先端抵抗力推定値の違い (地盤は N 値が 50 であると仮定している)

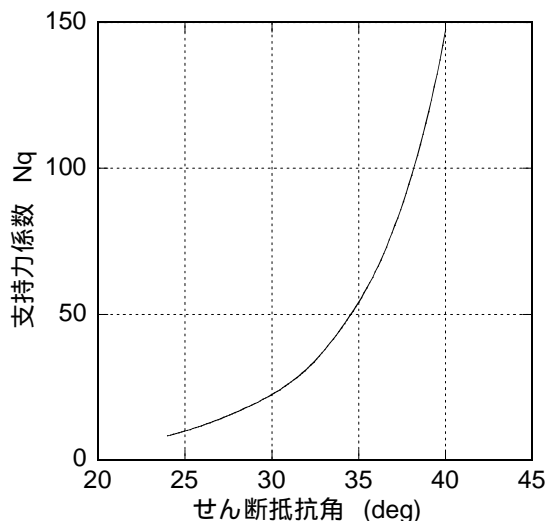


図-7.4 Berezantzev による杭の支持力係数

砂質地盤中に打止めされた杭の先端抵抗力を支持力理論によって推定する方法

これは、欧米諸国で従来から使われている方法である。ここでは、支持力係数として Berezantzev によるものを指定しているが、実際には多岐に渡る支持力係数が提案されている。

-1 浅い基礎の支持力理論の拡張

$$R_{pk} = N_q \sigma'_{v0} A_p \quad (7.7)$$

ここに、

N_q : Berezantzev による支持力係数 (図-7.4)

σ'_{v0} : 杭先端における有効土かぶり圧 (kN/m²)

-2 空洞拡張理論

杭先端付近が圧縮力によって破壊するときのモードとして、杭先端部付近の球状の剛性域の外側に塑性域が形成され、その外側と釣り合うとする破壊モードを考えたものである。この理論を空洞拡張理論という。

安福ら³²⁾が修正した空洞拡張理論の式は次式で表わされる。

$$q_p = \frac{\sigma'_{cv}}{1 - \sin \phi'_{cv}} \cdot \frac{3(1 + \sin \phi'_{cv}) \cdot (1 + 2K_0)}{3 - \sin \phi'_{cv}} \cdot \frac{1}{3} \times \left\{ \frac{G/\sigma'_{cv}}{\left((1 + 2K_0)/3 \right) \tan \phi'_{cv} + 50 \left((1 + 2K_0)/3 \right) \tan \phi'_{cv}} \right\}^{1.8} \cdot (G/\sigma'_{cv})^{-0.8} \cdot \frac{4 \sin \phi'_{cv}}{3(1 + \sin \phi'_{cv})} \quad (7.8)$$

なお、せん断抵抗角は ϕ'_{cv} を基準とする。一般的には、 $\phi'_{cv} = 34^\circ$ としてよい。

5) 開端杭としての先端抵抗力の考慮

過去の載荷試験結果を見ると大径開端杭の場合には、際立って杭の支持力が小さくなる傾向にあった。また、室内実験、原位置の杭の載荷実験で、管内土の周面抵抗につい

で議論した結果によると、杭先端付近の $2D$ (D : 杭径)の範囲の内周面抵抗が杭の先端支持力に大きく寄与していることがわかっている。現段階では、地盤ごとにこの数字を毎時するレベルには達していないが、杭径が、杭の先端抵抗力に及ぼす影響の評価として、図-7.5が参考になる。

6) 杭基礎の性能照査一般

荷重分担、杭の打込み中心間隔等が照査項目として挙げられる。

(2) S2. 施工のための調査

施工のための調査は、施工計画および施工管理計画の作成に必要な調査であり、一般に以下のような項目で構成される。

現地踏査・地形測量

土質・地下水等の調査

周辺状況調査（環境、近隣施設、法規制など）

調査は、既存資料や現況確認によるとともに、設計段階での調査結果を精査し、追加調査の必要性についても検討する。これら施工のための調査は、設計図書の確認と平行して進めるのが合理的であり、施工上の制約条件を抽出することが重要である。

これに対し、S1の設計段階における調査は、設計に必要な地盤定数を求めるために行なう。なお、S1の調査では、支持層の不陸・傾斜など施工の時には必要な情報となる地盤情報が不足していることもある。そもそも物理的に調査数量や調査項目等を十分に行うことは困難であり、さらに経済的理由からも十分な調査を行なえない場合もある。しかしながら、調査不足による工期延長や施工方法の変更などは、総合的にコスト高の原因となる可能性が高い。したがって本ステップで実施する施工のための調査において、設計図書にある地盤情報が不十分で施工上のトラブルの原因となり得ると判断された場合には追加調査地点などを提案することが必要である。

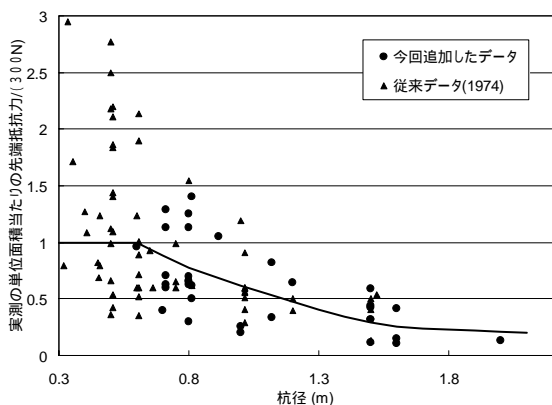


図-7.5 杭径の違いによる開端杭の見かけの閉塞率

施工上の地盤情報不足とその対策として以下のようなものが挙げられる。

調査地点数の不足

- 既存の地盤情報だけで判断できない地層構成の連続性・傾斜・不陸などが予想される場合は追加調査を実施
- 補間調査の実施(例えば既存調査地点の間を簡単な調査を実施)
- 調査深度の不足
- 確定できる支持層深度や支持層厚の調査を実施
- 調査項目の不足
- 一般には標準貫入試験が実施されているが、必要によっては他の調査(コーン貫入試験など)を行う
- 硬さ: 支持層や貫通層が硬質な場合は硬質部分の試料採取と強度試験を実施する。ケーシングに働く摩擦予測などのための原位置せん断摩擦試験などもある。
- 転石(や大径の礫): 必要に応じて大口径ボーリングなどを実施する。

(3) S3. 設計図書の確認

施工のための調査と平行して、設計図書(特記仕様書、図面、工事数量総括表、現場説明書、現場説明に対する質問解答書など)の内容確認を行う。

工事請負契約書および土木工事共通仕様書では、請負者の「設計照査」を義務づけており、施工計画作成に先立ち現場条件等を十分に理解することを求めている。照査の結果、現場条件の不一致等の事実が確認された場合は、請負者は発注者に通知し、必要に応じて発注者は設計図書の変更または訂正等の措置をとる。この「設計照査」は、杭打ち工事のトラブルを未然に防止するために有効な手段であり、その実施は発注者・請負者双方にとって利益となる。工事請負契約書(第18号 条件変更)および土木工事共通仕様書(1-1-3 設計図書の照査)の抜粋を以下に示す。なお、一部の地方整備局は「設計図書の照査ガイドライン」を発行して、具体的な照査要領を示しているため、その内容も確認する必要がある。

工事請負契約書(第18号 条件変更)

第18条 乙は、工事の施工に当たり、次の各号の一に該当する事実を発見したときは、その旨を直ちに監督員に通知し、その確認を請求しなければならない。

- 一 図面、仕様書、現場説明書および現場説明に対する質問回答書が一致しないこと(これらの優先順位が定められている場合を除く。)
- 二 設計図書に誤謬又は脱漏があること
- 三 設計図書の表示が明確でないこと

四 工事現場の形状、地質、湧水等の状況、施工上の制約等設計図書に示された自然的又は人為的な施工条件と実際の工事現場が一致しないこと

五 設計図書で明示されていない施工条件について予測することのできない特別な状態が生じたこと

(第2項～第5項は省略。なお、第5項に工期の変更、請負代金額の変更、乙の必要費用の負担が記載されている。) 土木工事共通仕様書、港湾・空港工事共通仕様書(第1編共通編 第1章総則)

1-1-3 設計図書の照査等

1. 請負者からの要求があり、監督職員が必要と認めた場合、請負者に図面の原図を貸与することができる。ただし、共通仕様書等市販されているものについては、請負者が備えなければならない。

2. 請負者は、施工前及び施工途中に、自らの負担により契約書第18条第1項第1号から第5号に係わる設計図書の照査を行い、該当する事実がある場合、監督職員にその裏実が確認できる資料を書面により提出し、確認を求めなければならない。なお、確認できる資料とは、現場地形図、設計図との対比図、取り合い図、施工図等を含むものとする。また、請負者は、監督職員から更に詳細な説明又は書面の追加の要求があった場合は、それに従わなければならない。

(第3項は省略)

(4) S4. 施工条件の整理

施工計画および施工管理計画を行う上で、前述のS2、S3を通して、設計内容、施工条件(地盤条件、制約条件など)を事前に整理することは、施工中のトラブルを未然に防ぐためにも必要である。

以下に整理対象項目をあげる。

地盤条件についての課題

支持層が深い、支持層が浅い、支持層が薄い、支持層が傾斜している、層が複雑である、支持層の土質(風化岩や土丹など)、支持層に不陸、中間層に硬い層が存在、など

支持層についての課題

高止まり、支持力不足、先端閉塞率、など

工法

油圧ハンマー、バイプロハンマー、ディーゼルハンマーなど

補助工法の有無

施工条件の制約

地盤条件、既設物、周辺地盤の影響、工期、など

杭先端補強バンドの採用

(5) S5. 施工方法の検討

S4で整理された施工条件に基づき具体的な施工方法を検討する。検討すべき項目は、杭打設方法(ハンマーの選定、補助工法など)、使用機械・船舶、作業手順と工程計画、支持力管理方法と打止めの判定方法、載荷試験の是非、仮設構造物(栈橋、構台等)、安全環境対策等がある。

また、杭基礎の施工時に照査すべき項目を書き出すと以下のとおりである。

完成後の作用のみでなく、運搬、建込み及び打込み時の作用に対しても検討する。

運搬に対する検討

- 杭を水平にして2～4点支持するため、杭の自重により曲げモーメント及びせん断力が発生
- 遠心力鉄筋コンクリート杭は大きな衝撃が加わるおそれがある場合は検討

- 鋼管杭は大径で肉厚の薄い場合には積み重ねることによって断面変形をするおそれがあるので注意

建込みに対する検討

- 杭が吊り下げられた場合の自重による軸方向引張り力に対する検討

動的支持力管理式(杭打ち式)による打止め管理

- 動的支持力管理式は原理的に無理がある。
- 判定はきわめて簡便であるが、精度には問題がある。
- 動的支持力管理式による静的最大軸方向抵抗力と載荷試験結果を比較すると、きわめて大きなばらつきがある。

- ほぼ同一地盤に多数の杭を施工する場合は杭ごとの相対的な軸方向抵抗力の違いの推定には動的支持力管理式が参考になる。

- 動的支持力管理式の適用は施工管理に限るべきである。

- 衝撃載荷試験を行えば杭軸の抵抗と杭先端の抵抗が分離できるようになるので、動的支持力管理式だけにたよるよりは正確な打ち止め管理ができる。

- バイプロハンマーの打ち止め管理は道路橋示方書を参考にできる。

打込みに対する検討

- 杭の打込み時には非常に大きな圧縮力あるいは引張り力を生じる。したがって、杭打ち機などの施工条件がわかる場合には、性能照査の段階で打込み時の杭の安全性を検討する。

- 軟弱地盤に打込まれる杭のハンマーの衝撃によって杭本体に生じる動的引張り力

- 打込み時における杭の地上に突出している部分の長柱座屈

継手

- 継手の位置は断面に余裕があり、腐食などの影響が少ないところに設けるのが望ましい。
- 継手の位置によっては施設の完成後に継手に働く力が杭の全強度よりはるかに小さくなる場合もあるが、施工時の打込み応力、将来の荷重増加および断面に生じる不測の応力に対し継手の安全を期する必要がある。

鋼管杭の板厚及び鋼種の変更

- 杭の断面力は深さ方向に変化し地中部の深いところで小さくなるのが、一般的である。このため、経済性の観点から鋼管杭の板厚または鋼種を変更することがある。
- 鋼管杭の板厚または鋼種を変更する場合、変更する位置は杭に生じる断面力が大きくならないところとすべきである。ただし、大きな負の周面摩擦力が作用する場合には、これらの変更ができないことがあるので注意する必要がある。

杭の先端

- 杭の先端の役目は杭に伝わる軸力を支持層に確実に伝えること、既成杭にあっては打込み中、杭を保護し貫入しやすくすることである。
- 杭先端開放と先端閉塞杭
- 先端閉塞方法：一般には鋼材（平底、シューなど）。打込み後は先端土を排除してコンクリート閉塞。
- 杭先端補強：一般には先端切り離しのもの。硬層に支持させる場合は補強をすることもある。

これらの検討結果が、施工計画書に記載される項目となる。課題解決の方法や追加検討・調査の結果、施工計画書の内容に変更が生じた場合には、工事着手前に変更し、発注者に提出・許諾される必要がある。施工計画書の記載項目については、共通仕様書および特記仕様書に準ずる。以下に、一般的に記載すべき事項を挙げる。

工事概要

計画工程表

現場組織表

指定機械

主要船舶・機械

主要資材

施工方法（主要機械、仮設備計画、工事用地等を含む）

施工管理計画

安全管理

緊急時の体制及び対応

交通管理

環境対策

現場作業環境の整備

再生資源の利用の促進と建設副産物の適正処理方法

その他

(6) S6. 課題があるか

S2 ~ S5 の作業を通して、事前に把握した課題があるかどうかを評価する。課題とは、杭打ちで予想されるトラブルと発生リスク（例えば高止まり、支持力不足、根入れ不足、杭体の損傷、打設不能など）や施工方法と工程の問題などである。

付録 A に杭の施工事例を調査し（1次アンケート）、事前に問題が生じると想定していた事例や実際施工中に問題が生じた事例について、問題点をより詳細に把握する目的でさらに2次アンケートを実施した結果を示している。その結果によると、施工中に発生したトラブルのうち、「高止まり」と「支持力不足」で全体の約8割を占めていた。

以下に、「高止まり」と「支持力不足」の2項目において、事前に把握していた状況や想定していた課題を交えてトラブル発生背景と想定される原因について紹介する。

<高止まり>

高止まりは、地盤条件的として、

- 支持層の不陸や傾斜（これは支持力不足とも表裏の関係にある）
- 硬い中間層や、表層の障害物
- 支持層の土質の不均一性（部分的に硬い箇所がある）などが原因となって引き起こされる。このうち「硬い中間層や、表層の障害物」については事前調査で明らかになっていることが多く、あらかじめ補助工法を採用することにより高止まりが回避されているケースが多い。このため、実際に高止まりが生じるのは、上述の「支持層の不陸や傾斜」、「支持層の土質の不均一性」の条件があることに加え、「支持層が深い」という不確定要素の増幅要因が重なったケースが多い。

高止まりの予測的中率はさほど高くなく、予測しにくい傾向にある。

高止まりを生じた場合は、杭を高止まりのまま打ち止めた事例が多い（この場合、杭の断面変化点での応力照査や引抜き支持力の照査が別途必要である）。

高止まりが生じても支持力的には問題が少ないので、追加試験（載荷試験など）や追加地盤調査は行われないうケースが多い。

<支持力不足>

支持力不足は、地盤条件的には

- 支持層の不陸や傾斜（これは高止まりとも表裏の関係

にある)

- 支持層の土質の不均一性(支持層の土丹の風化度が異なるなど)
- 支持層が薄い(支持層厚が十分でない)

などが原因となって引き起こされる。また実際には、これらの条件に加え、「支持層が深い」という不確定要素の増幅要因が重なっているケースが多い。

支持力不足の予測的中率はさほど高くないが、高止まりの予測的中率よりは高く、比較的予測しやすい傾向にある。これは支持力不足の要因が多岐にわたっていることに起因する結果と思われる。

補助工法としてジェットを併用するなど、打設時の周面摩擦を低減する工法が採用されることがあるが、支持力不足の原因に結びつくケースもある。また、支持層を乱さないような工法を採用するように十分注意する必要がある。

先端補強バンドは杭先端の保護の為に必要になることも多いが、外側にバンドを巻く場合は周面摩擦を低下させる要因となるので、支持力不足につながる場合には外側バンドを採用しない選択も必要である。特に、周面摩擦力の比率の大きい杭の場合には、注意が必要である。

支持力不足を生じた場合は、杭長を延長した事例が多い。その他として、増し杭、補助工法として先端根固めを採用した事例がある。

支持力不足の場合、高止まりの場合よりも追加試験(載荷試験など)を実施した割合がやや増えている。内容的には衝撃載荷試験が多い。これは、杭先端が想定した支持層に到達したにもかかわらず支持力不足が生じた原因を検証するため、または杭を延長した際の支持力確認のために載荷試験が必要になったものと推測される。

支持力不足の場合、追加地盤調査は、高止まり時には無かった「施工中(トラブル後)追加調査」が増えている。これは、杭長の延長を決定するため、もしくはトラブルの原因となったジャストポイントでの地層情報を得るためと推測される。

支持力不足の場合、杭長を延長するにせよ、材料手配などで現場が止まる期間が長い。まして、増し杭や工法変更を実施しようとするれば、検討期間や協議期間がさらに必要となり、大幅な工期変更や工費増につながる結果となる。

(7) S7. 課題解決の提案(受・発注者協議)

前述 S6 の通り、杭打ちでのトラブル発生、施工上の不

都合、工程・工期の問題などの課題が想定される場合は、その対応策について発注者・受注者双方で提案・協議する。

S3 で実施する設計図書の確認において、設計照査の重要性について述べたが、トラブルへの対応のための費用負担や工期への影響は、工事が進むほど大きなものになる。すなわち、工事開始前に手当てする場合と施工中に処理する場合を比較すると、後になるほど金額・工期両面で工事に与える影響は大きくなる。

国土交通省港湾局が平成 20 年 8 月に HP に公表した設計変更事例集においても、変更金額は着工前に処理した場合に比較して、施工中に処理した場合は増加する傾向が見られる。別途、トラブルへの対応費用比較ケーススタディ³³⁾でも、支持力不足を想定して対策費用を検討した場合、以下のような試算結果を得ている。

事前に予想したケース：

当初工事費の 2.5% 増加(地質再調査と杭長変更)

施工中に発生して継杭を実施したケース：

当初工事費の 15% 増加(継杭と船団待機費)

施工中に発生したが支持力を確認したケース：

当初工事費の 5%(衝撃載荷試験と船団待機費)

上記試算には工程短縮費用を考慮していないが、のケースで工程挽回のためのキャッチアップ費用を考慮すると実際の追加費用は更に大きくなる。また、支持力不足が軽微な場合などは、のケースのように簡便な衝撃載荷試験による現地での確認が費用対効果面で有効な方法であることを示している。

(8) S8. 追加検討・調査が必要か

課題解決の提案と協議の過程で、追加検討や追加調査が必要かどうか判断する。

ここで、追加検討とは主に S5 の施工方法の見直し作業を意味するが、内容次第では S1 の設計の見直しと変更が必要となることもある。

追加調査については、課題に応じて S1 の調査や S2 の施工のための調査から採用すべき項目と数量を選択する。

(9) S9. 追加検討・調査(設計変更)

前述 S8 で必要とされた追加検討や追加調査を実施し、その結果を反映して施工方法を再検討する。結果次第では、S1 の設計の見直しと変更が必要となることもある。

追加調査の実施、および追加検討の結果による設計の一部見直しや施工方法の変更が契約条件の変更に該当するとその共通認識が受・発注者間で得られれば、それらは設計変更として取り扱う。

(10) S10. 打設方法，支持力管理方法の決定

地盤の複雑さや施工方法（新工法，新技術）を総合的に判断し，杭打設の方法と支持力管理の方法を最終的に決定する．杭の支持力管理方法の選定にあたっては支持層確認と支持層への根入れ長確認が適切に行えるものとする．基本的には動的支持力，打止め時一打当たり貫入量とリバウンド量などにより 総合的に検討し選定するのが望ましい．なお，衝撃載荷試験を併用することでより正確な施工管理が期待できる．

一般的に，打込み杭の支持力管理は設計根入れ深さに到達した時点における動的支持力管理式による貫入抵抗で確認する方法が採用される．ただし，動的支持力管理式による貫入抵抗の算定は，簡便であるというメリットがある一方で，極めて精度が低いという特長を有している．したがって，後述するように各種載荷試験による静的支持力と試験杭の打設データにより動的支持力管理式の係数等を見直し，補正を行った上で打止め管理を行えば，動的支持力としての精度を高めることができる．以上のような内容を記載した施工計画書を発注者に提出し，許諾を得て施工開始となる．

a) 動的支持力

動的支持力管理式は過去に数多く発表されているが，港湾の基準では Hiley の式が示されている．この式は杭の極限支持力が打込み時の貫入抵抗に等しいと仮定し，損失を除いた有効エネルギーが，杭が抵抗に抗して貫入するときになす仕事および杭，地盤，キャップなどを弾性変形するときになす仕事に費やされるものとして，エネルギーの平衡方程式により得られる．実用的にはこれを簡略した Hiley の簡略式が一般的に用いられている．その他各基準でも，波動理論から導いた道示式，Hiley 式を簡略した旧建設省告示の式（通称を 5S の式という）などが示されており，実務的にもよく用いられている．以下に各動的支持力管理式を示す．Hiley の式に衝撃載荷試験の結果を導入した例がある（S21 を参照）．

1) Hiley の簡略式

$$R_{du} = \frac{e_f F}{S + \frac{K}{2}} \quad (7.9)$$

ここに，

R_{du} ：杭の動的最大軸方向抵抗力 (kN)

e_f ：ハンマーの効率，上式は 0.5 とする．

S ：杭の貫入量 (m)，最後の 10 ～ 20 回の打ち込みに対する 1 回当たりの平均貫入量 (m)

K ：リバウンド量 (m)

F ：打撃エネルギー (kN m)

油圧ハンマーの場合， $F = 2W_H \times H$

H ：ハンマーの落下高 (m)

W_H ：ハンマーの重量 (kN)

2) 道示式

$$R_a = \frac{1}{3} \left(\frac{AEK}{e_0 l_1} + \frac{\overline{N}Ul_2}{e_f} \right) \quad (7.10)$$

ここに，

R_a ：杭の許容支持力 (kN)

A ：杭の純断面積 (m²)

E ：杭のヤング係数 (kN/m²)

l_1 ：動的先端支持力算定上の杭長 (m)

l_2 ：地中に打込まれた杭の長さ (m)

U ：杭の周長 (m)

\overline{N} ：杭周面の平均 N 値

K ：リバウンド量 (m)

e_0, e_f ：補正係数

3) 5S の式

i) 長期応力に対する基礎杭の先端の地盤の許容支持力

$$R_a = \frac{F}{5S + 0.1} \quad (7.11)$$

ii) 短期応力に対する基礎杭の先端の地盤の許容支持力

$$R_a = \frac{2F}{5S + 0.1} \quad (7.12)$$

ここに，

F ：ハンマーの打撃エネルギー (kN m)

油圧ハンマーの場合， $F = 2WH\gamma$

S ：杭の貫入量 (m)

W ：ハンマー重量 (kN)

H ：ハンマー落下高 (m)

γ ：換算係数

4) パイプロハンマー工法の打止め管理式

$$R_a = \frac{1}{3} \left(\frac{P_w}{V_v} \cdot \alpha + \frac{NUI}{e_f} \right) \quad (7.13)$$

ここに

R_a ：杭の許容支持力 (kN)

P_w ：モータの全消費電力 (kW) で次式により求める

$$P_w = 1.3 \times I_A \times E \times 10^{-3}$$

I_A ：電流 (A)

E ：電圧 (V)

V_v : 杭の変位速度 (m/sec) で次式により求める

$$V_v = 2 \times A_v \times f$$

A_v : 計算振幅 (m) で次式により求める

$$A_v = \frac{K / g}{W_v + W_p}$$

K : 偏芯モーメント (Nm)

g : 重力加速度 (= 9.8 m/sec²)

W_v : パイプロハンマーの振動質量 (kg)

W_p : 杭質量 (kg)

f : 振動周波数 (Hz)

α : 補正係数 (= 1.5 程度を目安とする)

N : 杭周面平均 N 値

U : 杭の周長 (m)

l : 杭の根入れ長さ (m)

e_f : 補正係数 (= 0.25)

b) 打止め時 1 打あたり貫入量

打止め時 1 打あたり貫入量は、杭の種類、長さ、形状、地盤の状況等により異なるため、一義的に定めることは不可能であるが、既往の資料等を参考にして、2 ~ 10 mm を目安とする。特に、1 打あたりの貫入量を 2 mm 以下でち続けると杭体のみならず、ハンマーにも悪影響を及ぼし、損傷の原因となるので注意しなければならない。

なお、支持力が十分得られると判断される場合や摩擦杭

とする場合は、貫入量にこだわらなくてもよい。

(11) S11. 載荷試験が必要な

載荷試験は、設計段階と施工着手の段階の二段階で実施される可能性がある。ここで言う載荷試験は、主として施工管理のための載荷試験であり、その主たる目的は、設計上の支持層に打設した際に設計抵抗力を満足しているかの確認、施工管理手法の決定あるいは改善、施工時の必要な計測項目の洗い出しなどとする。

載荷試験の実施は、原則的に、仕様書に準拠、または発注者指示によるものとする。しかしながら、トラブル発生リスクが高く、トラブル発生時の損害（大幅な工程遅延や高額な設計変更）が大きいと予想される場合には、受注者側であっても実施の提案を考慮すべきである。

S10 では 動的支持力管理式について詳述した。中でも、(10a)1) で示した Hiley の式が従来より良く用いられている。しかし、S10 で示した式は、打ち止め管理のための概略式であり、支持力の評価式としては原則的に用いることができない。このため、打ち止め管理をただ単に支持層への到達を確認するためのものとして用いる場合には、S10 に示した式をそのまま用いることもできるが、一般的にはそれだけでは不十分であり、支持力の評価もあわせて行なうことが必要である。支持力を評価するためには、杭の載荷試験が不可欠となる。載荷試験の得失については表-5.4 や表-5.5 が参考になる。いずれの載荷試験方法を採用するか判断基準として、表-7.2 の様なものが想定される。

表-7.2 載荷試験の種類と判断基準

	施設の分類 ^{*1}			工事規模 ^{*2}			地盤の種類 ^{*3}	
	普通	重要	特に重要	小規模	中規模	大規模	均一 支持層不陸なし	複雑 支持層不陸あり
衝撃載荷試験								
静的試験(又は急速載荷試験)	-			-			-	

注) - : 必要性低い, : 必要に応じ実施, : 実施が望ましい, : 実施必須

*1: 施設の重要度を示す。

特に重要: 耐震強化岸壁, 防災用施設, 旅客施設など
重要: 被災・損傷により人的・経済的損失が甚大なもの
普通: 上記以外のもの

*2: 発注単位としての工事規模というよりは施設規模を示す。

大規模: 工事金額が大きく工期が長い工事でトラブルの発生による工費・工期両面での影響が顕著なもの
中規模: 工事金額が比較的大きな工事でトラブルの発生による工費・工期両面での影響が大きいもの
小規模: 上記以外のもの

*3: 地盤の均質性や成層状況を示す

均一・支持層に不陸なし: 土層構造が均一で支持層の深さや土質の変化が少ないケース
複雑・支持層に不陸あり: 土層構造が複雑であったり、支持層の深さや土質の変化が見られたりするケース

載荷試験は、費用と精度が、衝撃 急速 静的の順に高くなり、載荷試験の採用の是非を決定するための明快な判断基準を示すのは困難であるが、表-7.2 の項目に加えて、以下のような要素を含めて積極的に採用を図るべきである。

- 支持層としての軟岩や中間層に打止めするような、先端抵抗力の評価が難しい地盤。
- 摩擦杭や杭周面抵抗力が支配的な場合に、正確な周面抵抗が把握しにくい地盤。
- 支持層への根入れ比が小さい場合や、閉塞率に問題があると予想される大口径杭の使用。
- その他、代替案やコストダウン要請に応じるために、正確な支持力を把握する必要がある場合。

また、載荷試験の実施に際しては、その組み合わせを検討して静的支持力の精度向上や施工管理用のデータの収集を目指すことが望ましい。例えば、衝撃載荷試験+急速載荷試験などが挙げられる。

更に、簡便で費用負担も小さい衝撃載荷試験の現場での追加採用が、杭打設開始後に支持力不足に遭遇した場合の継杭の是非を含む支持力判定の結果として、トータルコストの節減をもたらす可能性もある³³⁾。

施工管理を主とした載荷試験方法としては、6章で詳述しているように、衝撃載荷試験の実施が適切である。

載荷試験結果の利用についてはS21を参照する。

(12) S12. 試験杭の打設

載荷試験用の杭（試験杭、反力杭）は、ハンマーの選定等を含む施工計画の妥当性評価を考えると、本杭と同じ施工機械で打設するのが望ましい。打設記録（リバウンド量、貫入量など）は、杭の打止め管理に用いられる動的支持力管理式の係数決定に利用することにより、動的支持力算定の精度を向上することができる。表-7.3に杭の鉛直載荷試験方法一覧表を示す。試験杭の設計、施工、養生および試験装置の設置などの詳細は、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」⁶⁾を参照のこと。

(13) S13. 載荷試験

S11で述べた通り、一般的に適用可能な載荷試験には3種類あり、目的に応じて適切な試験を選択する。各種載荷試験方法の特徴と適用性などの詳細は、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」⁶⁾を参照のこと。

(14) S14. 載荷試験による支持力判定

載荷試験の主目的は、S11の通り設計の妥当性確認としての設計支持力の確認である。確認支持力の判定方法と試験結果のまとめかたについては、地盤工学会基準「杭の鉛

直載荷試験方法・同解説」に準拠するものとする。

また、試験結果は、設計支持力の確認に加えて、支持力特性の評価、施工方法の適否の確認、施工管理用データなどとしても利用できる。

(15) S15. 対策の提案（受・発注者協議）

載荷試験の結果が、設計支持力を満足しない場合は、その対応策について受・発注者による提案・協議を行う。

対応策は、設計・施工両面で検討されるが、主に設計面で考慮されることが多く、以下のような設計内容の見直しが行われ、発注者から指示される。

- 設計根入れ長の変更
- 杭本数の変更
- 杭径の変更、など

また、設計内容の見直しのための追加調査が必要と判断される場合には、精度の高い地盤条件の把握と支持力算定に用いる土質条件の再評価を目的に調査を計画する。杭の設計に必要な地盤情報と調査項目および位置・数量の決定は、S1を参照のこと。

(16) S16. 設計の見直し・追加調査（設計変更）

S15で採用が決定された調査を実施し、調査結果を設計の見直しに反映する。追加調査の実施、および設計の見直し結果が契約条件の変更に該当すると共通認識が受・発注者間で得られれば、必要となる工期延伸や追加費用は設計変更の対象として扱う。

(17) S17. 杭打ち開始

最終的に決定された打込み方法により、杭打設を開始する。ここでいう打込み方法とは、発注者に承認された施工計画に準じた選定ハンマー、補助工法、使用機械・船舶、作業手順、工程などを指す。

(18) S18. 設計根入れ長を満足するか

原則として、杭は設計図書に定められた深度まで打ち込まなければならない。

杭は指定の深さまで打ち込まれる前に、打設不能となる場合がある。打設不能の原因がハンマーの重量不足のような施工方法による場合は別であるが、指定深さで浅で支持層に相当する強固な地盤に達しているにも拘らず打撃を継続すると杭体の損傷やハンマートラブルの原因となる。

(19) S19. 受・発注者協議

杭が設計根入れ長に達する前に、打設不能となった場合には、発注者に通知し、その対応方法を発注者・受注者に

より協議・決定する。

引抜き抵抗（周面摩擦力の確保）や横抵抗杭（横方向載荷杭）のために根入れ長を確保する必要がある場合は、設計的に高止まりが許容されないため、補助工法を追加しての再打込みや設計、施工両面での見直しが生じることになる。高止まりの発生原因が、支持層の予見できない不陸などのように地盤にあるにせよ、ハンマーの選定ミスや不適切な打込み順序などのように施工方法にあるにせよ、早急

に有効な対策を講じる努力が必要である。

(20) S20．高止まりを許容するか

S19 の受・発注者協議の結果、構造的にも支持力的にも高止まりを許容するとの指示が発注者からなされた場合には、該当する杭の打設の終了となる。杭打ちの終了のために、次のステップである S21 の動的支持力の確認へ移る。

表-7.3 杭の鉛直載荷試験方法一覧表⁶⁾

試験名称	静的載荷試験				急速載荷試験	衝撃載荷試験
	押込み試験	先端載荷試験	引抜き試験	鉛直交番載荷試験		
試験方法の概要	杭頭部に静的な軸方向押込み荷重を加える試験	試験杭の先端抵抗と周面抵抗とを互いに反力として、杭先端付近に静的な軸方向荷重を加える試験	杭頭部に静的な軸方向引抜き荷重を加える試験	杭頭部に静的な鉛直交番荷重を加える試験	杭頭部に急速荷重を押込み力として加える試験	杭頭部にハンマーなどにより衝撃荷重を加える試験
試験方法の特徴	・杭の鉛直支持力を評価するときの信頼性が高い。 ・実績が非常に多い。	・反力装置が不要 ・精度のよい先端支持力特性が確実に得られる。	・引抜き抵抗力を評価するときの信頼性が高い。	・鉛直交番載荷に対する押込み側・引抜き側の両方にわたる挙動として評価できる。	・載荷時間は 0.05 ~ 0.2sec であり、載荷時の応力状態は静的載荷とほぼ同じ ・反力杭が不要なため準備時間が短い ・試験時間が短い	・載荷中の杭体に波動現状が生じる ・試験結果に動的抵抗成分が含まれる ・反力装置が不要なため簡便で低コストである
適用杭種	・すべての杭種	・場所打ち杭 ・既製コンクリート杭	・すべての杭種	・すべての杭種	・すべての杭種	・鋼杭 ・既製コンクリート杭
荷力装置	・油圧ジャッキ	・杭先端に設置した油圧ジャッキ	・油圧ジャッキ	・2 セットの油圧ジャッキ	・反力体 ・軟クッション重錘	・ハンマー
計測装置	圧力計，ロードセル，変位計	圧力計，変位計	圧力計，ロードセル，変位計	圧力計，ロードセル，変位計	ロードセル，ひずみ計，レーザー式変位計	ひずみ計，加速度計
載荷時間	段階載荷：新規荷重段階は 30 分保持 連続載荷：連続保持時間を設けずに載荷	段階載荷：新規荷重段階は 30 分保持 連続載荷：連続保持時間を設けずに載荷	段階載荷：新規荷重段階は 30 分保持 連続載荷：連続保持時間を設けずに載荷	連続載荷：連続保持時間を設けずに載荷	連続載荷：0.1 秒 ~ 0.2 秒	連続載荷：0.01 秒 ~ 0.02 秒
静的支持力を得るための解析手法	-	-	-	-	・CASE 法 ・波形マッチング法	・CASE 法 ・波形マッチング法
結果の利用	・杭の支持力特性の評価 ・押込み時のばね特性，周面摩擦力の評価 ・設計支持力の確認	・先端地盤の支持力特性の評価 ・周面摩擦力特性の評価 ・設計支持力の確認	・杭の引抜き抵抗特性の評価 ・引抜き時のばね特性，周面摩擦力の評価 ・設計引抜き支持力の確認	・交番載荷の杭押込み・引抜き抵抗特性の評価 ・交番載荷時のばね特性，周面摩擦特性の評価 ・交番載荷の復元力特性，減衰定数の把握	・静的な支持力特性の評価 ・設計支持力の確認 ・急速荷重に対する支持力特性の評価	・静的な支持力特性の評価 ・設計支持力の確認 ・衝撃荷重に対する支持力特性の評価
問題点	・大荷重の試験の場合，反力装置が大掛かりになる	・先端支持力と周面抵抗力の極限值の小さいほうまでしか載荷できない	・コンクリート系の杭では，杭体のひびわれの影響を受け，第 1 限界引抜き抵抗力の判定が難しい。	・加力装置や反力装置がやや複雑となる。	・先端地盤が大きく変形した際の静的抵抗成分の推定精度に問題がある。	・大きな変位量を与えることができない ・コンクリート杭では杭体の破損に十分注意する必要がある

(21) S21. 動的支持力管理式による支持力判定

支持力を確認する方法として、動的支持力管理式が使用される。各種の動的支持力管理式が提案されているが、一般的に採用が多いのは Hiley 式である。また、陸上では「道路橋示方書・同解説 (IV 下部構造編)」(日本道路協会)による式もよく用いられている。ただし、これらの動的支持力管理式は信頼性に問題があり、ヤットコを利用する場合などは適用できない場合もある。信頼性については、前述 S12 のように試験杭 (載荷試験用杭の打設、試験打設など) の記録がある場合には、動的支持力管理式の係数を補正することで、その精度を向上させることができる。

a) 動的支持力管理式の考え方

動的支持力管理式は、施工時の入力ハンマーエネルギーやリバウンド、貫入量に基づいて養生後の杭の支持力を算定するものである。施工時の杭と養生後の杭 (設計上の杭) は以下の違いがあり、施工時の杭の挙動から養生後の杭の支持力を算定するためにはこれらの違いを考慮する必要がある。図-7.6 に施工時と養生後の杭の抵抗状態の違いを示す。

施工時の杭は、

- ハンマーによる動的な打撃力を受けて地盤に貫入される。
- 地盤の抵抗は動的と静的と両方が発現される。静的と動的な抵抗を合わせて全抵抗という。
- 地盤は杭の貫入によって施工によって乱されて、強度が低下している。

一方、養生後の杭は、

- 設計上は静的な構造物の荷重を受ける。
- 地盤の抵抗は静的である。
- 地盤の乱れは回復 (セットアップ) している。

b) 動的支持力管理式の補正方法の提案

動的支持力管理式によって養生後の支持力 (静的抵抗) を正しく求めるためには、図-7.7 に示す各項目の相関を明らかにする必要がある。図-7.7 に示す相関を Hiley 式を基本として表現すると式 (7.14) のように表すことができる。

$$R_{s(r)} = \frac{e \cdot E_{h0}}{s + k / 2} \times C_f \times S_r \times S_t \quad (7.14)$$

ここに、

$R_{s(r)}$: 養生後の静的抵抗 (静的支持力)

e : ハンマー効率 $= E_{ht} / E_{h0}$

E_{ht} : 伝達ハンマーエネルギー

E_{h0} : 入力ハンマーエネルギー

s : 貫入量 (m)

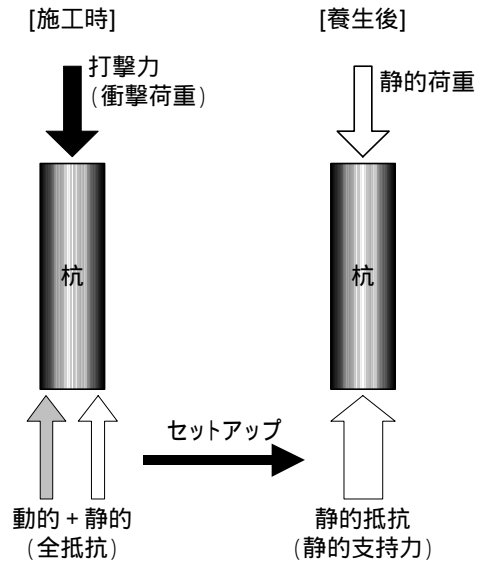


図-7.6 施工時と養生後の杭の抵抗状態の違い

k : リバウンド量 (m)

C_f : 全抵抗の補正係数

S_r : 静的抵抗比

S_t : セットアップ率

式 (7.14) の中で、全抵抗の補正係数 C_f と静的抵抗比 S_r は施工時の衝撃載荷試験を実施することにより得ることができる。セットアップ率 S_t は養生後の載荷試験を実施することにより得ることができる。各相関係数を以下に詳しく説明する。

1) 全抵抗の補正係数 C_f

全抵抗の補正係数は、リバウンド量、貫入量から計算する動的支持力管理式の値と、施工時の衝撃載荷試験による全抵抗 R_T (動的 + 静的抵抗) を換算する係数である。

2) 静的抵抗比 S_r

静的抵抗比 S_r は、施工時の全抵抗の中の静的抵抗成分の割合で、施工時の衝撃載荷試験の解析により得られる。

3) セットアップ率 S_t

セットアップ率 S_t とは、施工時の衝撃載荷試験および養生後の載荷試験で得られた静的抵抗成分の比と定義され、次式で求められる。また、セットアップ率の概念を図-7.8 に示す。

$$S_t = \frac{R_{s(r)}}{R_{s(i)}} \quad (7.15)$$

ここに、

$R_{s(r)}$: 施工時試験で得られた静的抵抗成分

$R_{s(i)}$: 養生後試験で得られた静的抵抗成分

一般に、鋼管杭の場合、杭体の損傷を防ぐための目安として、総打撃回数は3000回以下、1打撃あたりの貫入量は2mm以下とされる。また、支持層への打込み深さは、強固な地盤で杭径の1～2倍、あまり強固でない地盤で杭径の5～10倍という基準例がある。

打設が終了した杭は、発注者から指示された所定の書式で全数の杭打ち記録を取り、発注者に提出する。港湾工事の場合は、「港湾工事出来形管理基準」に基づき、以下の記録を取る。

- 杭の貫入量
- 杭の打撃回数
- 打ち止まり付近のリバウンド量
- 打ち止まり付近のラム落下高又は打撃エネルギー

7.2 トラブル回避策とトラブル時対策のためのチェックリスト

以上のフローでは杭施工に伴うトラブルをできるだけ事前に回避することを念頭においているが、施工時には不測の事態が生じ、トラブルに通じることが多くあると考えられる。

トラブルの事前回避に当たっては、過去の実績・経験の蓄積が重要である。そこで、付録Aで紹介したアンケート結果や既存の書籍等^{7) 19) 32) 34)}を参考にして、トラブル回避策とトラブルが生じた際の対策の考え方についてチェックシートを作製した。

表-7.4～表-7.5に示した杭打設前(施工計画時)にチェックすべきトラブル回避策のチェックリストは、杭打設のトラブルによる影響を回避もしくは最小限にするためのものである。また、表-7.6～表-7.7に示したチェックリストは施工時にトラブルが発生した後のトラブル時対策である。

表-7.4 杭トラブル回避対策（施工計画時）チェックシート（その1）

想定される トラブル	チェック項目	トラブル回避対策（施工計画時）		
		回避対策項目	留意点	
杭頭の座屈	ハンマが過大でないか	適正な大きさのハンマを使う	杭先端が支持層に達していない場合でも、ハンマ過大で座屈する。	
		杭頭、杭先端の補強		
	過剰打設（貫入量少ない、打撃回数が多い）	試験杭を施工し、動的支持力管理式を補正する	動的支持力管理式のみでは、支持力を過小評価するケースがある。	
	偏心打設	杭の建て込み精度の向上を図る。		
		杭打機の施工地盤を強化を図る。鉄板養生。		
局部応力	杭補強バンドの直下で断面急変するので、座屈しそうな場合には補強バンドの長さを長くする。	杭頭補強は、バンドよりアングルによる縦添補強材の方が効果がある		
高止まり	一般共通項目			
	設計図書の杭長の根拠となるボーリング数は不足していないか、ボーリング調査位置は適切か。	追加地盤調査を実施する。 ex. 10～30mの間隔の追加ボーリング 音響トモグラフィーによる支持層調査	支持層の傾斜や不陸の把握	
	支持層の地層判定は適切か	ボーリング調査報告書と設計図書の照査	支持層の土性、支持層の層厚。	
	ボーリングの高さレベルと設計図書の高さレベルは合致しているか	ボーリング調査報告書と設計図書の照査	TP、CDL、GLなどの混同	
	支持層が予想よりも浅く現れる 支持層が傾斜している、または不陸がある	近接地区で杭打ちの施工実績があれば、資料を入手し、問題点を確認する。		
		試験杭を施工し、支持層の深さを確認する。		
		支持層の傾斜や不陸を、H鋼 + バイプロで事前確認する。		
		高止まり深度を想定し、杭の設計照査を行う。		
		杭の断面変化点の深度を深くする。		
	中間層に硬い層がある（中間層の打ち抜き）。	ハンマを大きくする。	杭頭部や杭先端部の補強	
		中掘工法を併用する。		
		フリクションカッターを採用する。		周面摩擦力が低下するので、設計にフィードバックさせる。
		試験杭を施工し、補助工法などを検討する。		
地中に障害物がある	海底面付近に転石があると推定される箇所は掘削撤去するか、オーガやケーシングを用いて転石を除去する。			
	事前地盤調査後、地盤改良を施工した箇所に打設する場合は、杭の設計や施工方法を再検討する。			
杭打ち施工により地盤が締め固まる（砂質土）	打込み順序を検討する			
杭打ちを中断したことによる周面摩擦力の回復				

（次頁へ続く）

表-7.5 杭トラブル回避対策（施工計画時）チェックシート（その2）

想定される トラブル	チェック項目	トラブル回避対策（施工計画時）	
		回避対策項目	留意点
支持力不足	一般共通項目		
	設計図書の杭長の根拠となるボーリング数は不足していないか、ボーリング調査位置は適切か。	追加地盤調査を実施する。 ex. 10～30mの間隔の追加ボーリング 音響トモグラフィーによる支持層調査	支持層の傾斜や不陸の把握
	支持層の地層判定は適切か	ボーリング調査報告書と設計図書の照査	支持層の土性、支持層の層厚。
	ボーリングの高さレベルと設計図書の高さレベルは合致しているか	ボーリング調査報告書と設計図書の照査	TP、CDL、GLなどの混同
	支持層に杭先端は達したようだが、所定支持力が得られない。	支持層としている土質性状を確認する。 支持力層への根入長不足が生じていないか	風化度の違いによって、同じ支持層でも層境付近の強度が低く、所定の支持力が得られない場合がある。
	支持層の土質が想定と異なる（風化岩や土丹など）	試験杭を施工し、動的支持力管理式を補正する	動的支持力管理式のみでは、支持力を過小評価するケースがある。また、セットアップも考慮すること。
		試験杭を施工し、支持層への必要根入れ長さを確認する。	
		近接地区で杭打ちの施工実績があれば資料を入手し、問題点を確認する。	
		設計思想や支持力の形態（摩擦力和先端支持力の分担率）を確認する。	周面摩擦力の比率の大きい杭では、摩擦力の回復が遅いと支持力不足となる。
		杭の建て込みを先行し、数日後に支持層への打ち込みを行う。	周面摩擦力の回復
		中掘先端根固め工法を検討する。	拡径による支持力増加を期待。
	支持層が予想よりもさらに深い（杭先端が支持層に達しない）。	近接地区で杭打ちの施工実績があれば資料を入手し、問題点を確認する。	
	支持層が傾斜している、または不陸がある	試験杭を施工し、支持層の深さを確認する。	
		支持層の傾斜や不陸を、H鋼 + パイプロで確認する。	
		杭の建て込みを先行し、数日後に支持層への打ち込みを行う。	支持層上端部の確認、周面摩擦力の回復
	中間支持層が薄い（杭径の5倍以下）	試験杭を施工し、載荷試験で支持力が得られるか層厚かを確認する。	
		打止めの判断基準を検討しておく（期待する支持力に応じて、打止め支持層厚さの1/3～1/2程度）	打止め支持層厚さの1/2を超すと打抜いてしまう
		中掘先端根固め工法を検討する。	拡径による支持力増加を期待。
	支持層の信頼性に疑問がある場合（層厚変化）は、H鋼 + パイプロで打ち抜き、層厚を確認する。		
補助工法の適否	地盤に応じ、支持力に悪影響を与えない適切な補助工法を検討する。	パイロ+ウォータージェットなどでは、土質により周面摩擦力が回復しない場合がある。 中掘工法（最終打撃工法）では、中掘り時に支持層を乱さないよう配慮する。	
	フリクションカッターは摩擦杭では使用しない。	摩擦杭ではフリクションカッターは逆効果となり、支持力不足の原因となる。	
傾斜・偏心	地中障害物の存在	地中障害物の撤去、杭の建込み精度の向上	
	杭の施工方法	フライングハンマ工法で斜杭を打設する場合、偏心に注意する。 傾斜角に影響	傾斜角が変わると、高止まりや支持力不足の原因となる（リーダー装備の杭打ち船への変更も要検討）
近接構造物の 変状	地盤の側方移動による近接構造物への影響	杭の打設順序の検討。 中掘工法を検討する（最終打撃工法・先端根固め工法）。	杭を近接構造物から遠ざかる方向に杭打設する
	振動による近接構造物への影響	中掘先端根固め工法を検討する。	

表-7.6 杭トラブル時の対策（施工時）チェックシート（その1）

想定される トラブル	チェック項目	トラブル時対策（施工時）	
		対策項目	留意点
杭頭の座屈	ハンマが過大でないか	適正な大きさのハンマに替える	
		杭頭の補強	座屈の初期段階では、リブ補強で座屈の進行を防ぐことも可能
	過剰打設（貫入量少ない、打撃回数が多い）	監督員の指示を受けて、座屈する前に打ち止め、打ち込み長さを変更する	設計長さを絶対のものと思わないよう認識する
	偏心打設		
	局部応力		
高止まり	一般共通項目		
	設計図書の杭長の根拠となるボーリング数は不足していないか。ボーリング調査位置は適切か。		
	支持層の地層判定は適切か		
	ボーリングの高さレベルと設計図書の高さレベルは合致しているか		
	支持層が予想よりも浅く現れる	設計上問題ないことを確認した上で、高止まりで止める。 杭頭の切断	支持力（押し込み・引抜き）の確認、断面変化点での応力照査 必要ならば杭の補強
	支持層が傾斜している、または不陸がある	載荷試験を実施し、支持力の確認をする。	ハンマの大きさの不適当、動的支持力管理式の誤差
	中間層に硬い層がある（中間層の打ち抜き）。	ハンマを大きくする。 中掘工法を併用する。 フリクションカッターを採用する。	杭頭部や杭先端部の補強 周面摩擦力が低下するので、設計にフィードバックさせる。
	地中に障害物がある	海底面付近に転石があると推定される箇所は掘削撤去するか、オーガやケーシングを用いて転石を除去する。	
	杭打ち施工により地盤が締め固まる（砂質土）	杭径より小さい径での先行掘削をする（排土しない）。	
杭打ちを中断したことによる周面摩擦力の回復	ハンマを大きくする。 摩擦が切れるまで、時間をかけて打撃する。	杭頭部の補強	

（次頁へ続く）

表-7.7 杭トラブル時の対策（施工時）チェックシート（その2）

想定される トラブル	チェック項目	トラブル時対策（施工時）	
		対策項目	留意点
支持力不足	一般共通項目		
	設計図書の杭長の根拠となるボーリング数は不足していないか、ボーリング調査位置は適切か。		
	支持層の地層判定は適切か		
	ボーリングの高さレベルと設計図書の高さレベルは合致しているか		
	支持層に杭先端は達したようだが、所定支持力が得られない。	継杭により杭を延長する（硬い部分まで根入れする）。	追加地盤調査が必要になることがある。打止め深度の確認。
	支持層の土質が想定と異なる（風化岩や土丹など）	載荷試験を実施し、支持力を確認する。	動的支持力管理式のみでは、支持力を過小評価するケースがある。また、セッアップも考慮すること。
		杭先端の補強を行う（今後打設する残りの杭）。	十字仕切板、井桁、閉塞蓋により杭先端閉塞率の向上をはかる。
		杭の建て込みを先行し、数日後に支持層への打ち込みを行う。	周面摩擦力の回復
		増杭をする。 設計を見直して、1本当りに作用する荷重を低減。	
		中掘先端根固め工法への変更（今後打設する残りの杭）。	杭先端部のリブ加工も必要。
		支持層が予想よりもさらに深い（杭先端が支持層に達しない）。	継杭により杭を延長する（支持層まで根入れする）。
	支持層が傾斜している、または不陸がある		
	中間支持層が薄い（杭径の5倍以下）	継杭により杭を延長する（さらに下方の支持層まで）	追加地盤調査が必要になることがある（打止め深度の確認）。
		次の杭にて載荷試験を実施し、支持力を確認する。	動的支持力管理式のみでは、支持力を過小評価するケースがある。
		中掘先端根固め工法への変更（今後打設する残りの杭）。	杭先端部のリブ加工も必要。
	補助工法の適否		
傾斜・偏心	地中障害物の存在	打込み初期の場合は、引抜いて打ち直す。	
	杭の施工方法	引抜けない場合は、傾斜したまま打込み、無理な修正は行わない。切断し、増杭による補強	無理な修正を行った場合、打設中杭を破損させることがある。
近接構造物の変状	地盤の側方移動による近接構造物への影響		
	振動による近接構造物への影響		

8. 結論

本資料では、まずはじめに、現在の技術水準を示すため、現在の考え方に基づく設計施工の流れを示した。次いで現在の開端杭の支持力に関する設計法の課題を示した。これらを背景に、開端杭の先端支持力の発現メカニズムに関する検討を行なった。さらに、近年の載荷試験方法の動向について紹介し、杭の支持力推定に用いることのできる載荷試験方法についてまとめ、施工管理までを含めた、載荷試験結果の利用法をまとめた。以上の検討結果と付録 A、B に示した杭の施工に伴うトラブルの実態調査結果に基づき、載荷試験を活用した鋼管杭の設計・施工管理手法の体系を提示した。

本研究の主たる結論は以下のものである。

- 1) N 値を基本とした現在の日本の杭の先端支持力推定手法は、根入れ長が 50 m を超える杭に対しては適用が困難である。
- 2) 開端杭の先端抵抗は、杭実質部の先端抵抗と杭先端からほぼ杭径の 2 倍までの区間の杭の内周面摩擦によって発揮されているようである。
- 3) 動的荷重を載荷する杭の載荷試験方法が普及してきており、その簡便さから、杭の支持力推定や杭の施工管理に新しい杭の載荷試験を活用できる。
- 4) 以上の検討結果から、鋼管杭の設計・施工時における杭の載荷試験の役割を位置づけを明確にし、載荷試験を活用した設計・施工法の体系を新たに示した。

9. 終わりに

本報告の 7 章は本報告で目指している考えを杭の設計施工の実務に供することができるように執筆したものである。現段階では共同研究グループの試案としての位置づけであるが、整備局の技術者各位及び施工に当たる技術者との議論によって、ブラッシュアップを図っていきたいと考えている。ここで提案している考え方を実務で活用していただき、施工に伴ってさまざまなデータを蓄積いただくことが杭の支持力推定精度の向上に不可欠であると考えている。関係各位のご理解をお願いしたい。

付録 B はトラブルが生じる典型的なケースについて取りまとめたものである。施工に伴うトラブルとその解決方法に関する情報を共有することは実務実施上非常に有効である。杭の設計施工に携わる技術者各位には、業務の実施に先立って一読していただくようお勧めしたい。

本研究は、国土交通省港湾局および国土交通省関東地方整備局から御支援いただくことにより実施可能となった。

関係各位に心より感謝します。

以下に本研究を実施するに当たり共同研究のメンバーとして御尽力いただいた方の氏名を公表し、関係各位の御協力に対する感謝の意を表したい(敬称略)。

社団法人日本埋立浚渫協会技術委員会委員

- 吉原 到, 齋藤正樹, 深澤 薫 (あおみ建設 (株))
杉田 謙二, 工藤 和重 ((株) 大本組)
柴田 清二 (株木建設 (株))
佐々木 広輝, 原 基久 (五洋建設 (株))
外山 幸男 (東亜建設工業 (株))
鈴木 亘, 北出 圭介 (東洋建設 (株))
石田 太 ((株) 本間組)
釜戸 則幸, 石川 健二, 為広 哲也, 伊藤 潔 (りんかい日産建設 (株))
中山 久之 (若築建設 (株))
関谷 千尋, 佐藤 茂樹 (みらい建設工業 (株))
(事務局)
田口 博文 (東亜建設工業 (株))
寺内 潔 ((社) 日本埋立浚渫協会調査役)

鋼管杭協会

- 山下 久男 (新日本製鐵 (株))
中川 敬, 福家 靖夫 ((株) クボタ)
横幕 清, 山口 昭 (JFE スチール (株))
林 正宏 (JFE 技研 (株))
渡辺 米利 (新日本製鐵 (株))
才村 幸生 (住友金属工業 (株))
西村 真二 ((株) 地盤試験所)
(事務局)
近藤佳宏 ((一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会技術次長)

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) Vesic, A. S.: Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, Journal of SMFE, Vol.98, No.SM3, pp.265-290, 1972.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2002.
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 基礎構造物・抗土圧構造物, SI 単位版, 2000.
- 5) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2003.
- 6) 地盤工学会: 地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」, 2002.
- 7) 日本道路協会: 杭基礎施工便覧 平成 18 年度改訂版, 2007.

- 8) 北島昭一・柿崎秀作・花木芳雄・田原寿子：クイの軸方向支持力について 港湾技研資料 No.36 ,66 p. ,1967 .
- 9) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準，1967 .
- 10) Orr, T. L. L. and Farrell, E. R.: Geotechnical Design to Eurocode 7, p.113, 1999.
- 11) US Army Corps of Engineers: Design of Pile Foundations, p.20, 1993.
- 12) Meyerhof, G. G.: Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soil, J. of SMFE, ASCE, Vol.82, No.SM1, pp.1-10, 1956.
- 13) Thorburn, S. and MacVicar, R. S. L.: Pile load tests to failure in the Clyde alluvium, Behavior of piles, Proc. of ICE, pp.1-7, 1971.
- 14) 地盤工学会編：地盤工学ハンドブック，3.4 杭基礎，p.790，1999 .
- 15) Flemming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F. and Elson, W. K.: Piling engineering, 2nd edition, pp.95-98, 1992.
- 16) Vesic, A. S.: Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, Journal of SMFE, Vol.98, No.SM3, pp.265-290, 1972.
- 17) Yasufuku, N., Ochiai, H. and Ohno, S.: Pile End-bearing Capacity of Sand Related to Soil Compressibility, Soils and Foundations, Vol.41, No.4, pp.59-71, 2001.
- 18) 土木研究所：鉛直載荷試験による単ぐいの極限支持力の推定，土木研究所資料第 899 号，1974 .
- 19) 鋼管杭協会：鋼管杭 - その設計と施工 - ，2004 .
- 20) 山肩邦男：各種施工法によるクイの許容支持力，土と基礎，Vol.23，No.7，pp.13-20，1975 .
- 21) 横山幸満：鋼杭の設計と施工 増補版 ,pp.45-51 ,1963 .
- 22) 土質工学会：杭基礎の設計法ととその解説，pp.257-260，1985 .
- 23) 水谷崇亮・菊池喜昭・田口博文：コーン貫入試験による開端杭の先端閉塞状況の評価手法に関する実験 港湾空港技術研究所資料 No.1053，2003 .
- 24) Kikuchi, Y., Mizutani, M., and Yamashita, H.: Vertical bearing capacity of large diameter steel pipe piles, Advances in Deep Foundations, pp.177-182, 2007.
- 25) 菊池喜昭・佐藤宇紘・森川嘉之：開端杭貫入時の杭先端周辺地盤の変形挙動の観察 港湾空港技術研究所資料，No.1177，2008 .
- 26) 菊池喜昭・佐藤宇紘・森川嘉之：大型土槽における開端杭の先端閉塞に関する鉛直貫入実験 土木学会年次学術講演会発表講演集，CD-ROM Vol.1，No.3-114，2008 .
- 27) De Nicola, A. and Randolph, M. F.: Plugging behaviour of driven and jacked piles in sand, Geotechnique, 47(4), pp.841-856, 1997.
- 28) 山肩邦男・永井興史郎：開端鋼管ぐいの支持力に関する考察（その 2），日本建築学会論文報告集，第 213 号，1973 .
- 29) 独立行政法人港湾空港技術研究所・社団法人日本埋立浚渫協会・鋼管杭協会：杭の支持力推定手法の合理化に関する共同研究報告書，239 p.，2009 .
- 30) 工事請負契約書
- 31) 港湾工事共通仕様書
- 32) 土質工学会：杭基礎のトラブルとその対策，土質工学会（地盤工学会），1992 .
- 33) 独立行政法人港湾空港技術研究所・社団法人埋立浚渫協会・鋼管杭協会：杭の支持力推定手法の合理化に関する共同研究報告書，2009 .
- 34) 地盤工学会：杭基礎の調査・設計・施工から検査まで，地盤工学・実務シリーズ 17，2004 .

付録A 杭の施工中に生じうるトラブルとその予測方法・対策

A.1 杭打設工事の実績（1次アンケート結果）

(1) 杭の施工事例調査（1次）の概要

杭の支持力を適切に推定し、杭のトラブルを未然に防ぐために、どのような状況でトラブルが生じているかを知ることが非常に重要である。平成18年に、近年施工された事例をアンケート調査し、110件の施工事例を収集することができた。調査の内容は杭諸元および施工方法の特徴、地盤条件、施工上の制約、トラブルの有無およびその内容等である。

110件の事例の施工開始年度は、表-A.1に示すとおり平成14年度以降の工事が65%ほどである。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」は平成元年、平成11年に改定されているが、工事開始年度から判断すると平成11年度版の基準で設計された構造物(平成12年度以降に行われた工事と仮定)はアンケート全体の80%以上の工事と推測できる。

表-A.1 各事例の施工開始年度

施工開始年度	件数
H3	2
H4	2
H5	0
H6	0
H7	0
H8	2
H9	4
H10	5
H11	5
H12	9
H13	8
H14	14
H15	19
H16	17
H17	22
H18	1
合計	110

(2) 杭の施工事例調査（1次）の統計処理結果

a) 発注者

発注者に関する回答結果を図-A.1に示す。今回収集した施工事例は、国土交通省をはじめとする官発注工事が全体の8割を占める。アンケート調査の際に工事規模等の制限を設けていなかったが、回答者は比較的大規模な公共工事に意識があったものと推測される。「その他」は国土交通省以外の省庁発注工事であった。

b) 地域

施工地域に関する回答結果を図-A.2に示す。関東から中国地方での工事件数が多かったが、全国の施工事例を収集することができており、全体的な偏りも少ないものと考えられる。

c) 構造物種類

構造物の種類に関する回答結果を図-A.3に示す。杭が用いられている構造物としては岸壁が最も多く、続いて橋梁、護岸の基礎杭として用いられている場合が多い。杭は主として地盤条件が悪いところで用いられることが多い。また、構造物の沈下量の制限に厳しいところで用いられる。このため、橋梁や岸壁での利用が多いことが想像され、今回のアンケートはその傾向を再現していると考えられる。

以上の結果から、今回のアンケートは、多少大規模工事に偏った結果となっているおそれはあるものの、全体としては、杭が用いられる工事の特性を表すデータが集積されているものと思われる。

そこで、工事の規模、用いられる杭のサイズについて整理した。

d) 打設杭本数

工事1件あたりの打設杭本数の回答結果を図-A.4に示す。工事1件あたりでは20本以下が全体の30%を占め、約6割が40本以下である。全体として100本以下の工事が75%であった。200本を超えているものは、橋梁基礎(3件)と護岸、岸壁(各1件)であった。

	回答数	構成比
国土交通省	47	42.8 %
自治体	28	25.5 %
公団・公社等	14	12.7 %
民間	14	12.7 %
その他	3	2.7 %
不明	4	3.6 %
計	110	100.0 %

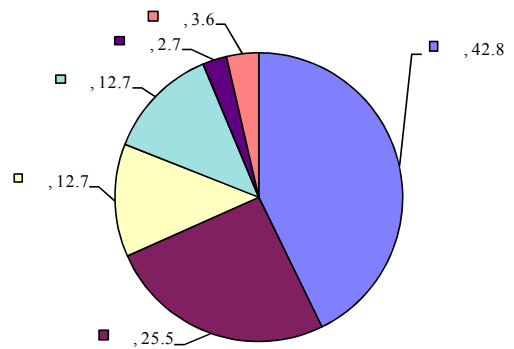


図-A.1 発注者比率

	回答数	構成比
北海道	2	1.8 %
東北	10	9.1 %
北陸	5	4.5 %
関東	37	33.7 %
中部	12	10.9 %
関西	10	9.1 %
中国	11	10.0 %
四国	8	7.3 %
九州	11	10.0 %
不明	4	3.6 %
計	110	100.0 %
無回答	0	

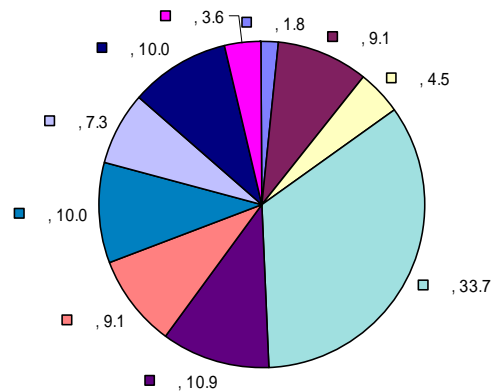


図-A.2 施工地域比率

	回答数	構成比
橋梁基礎	25	22.7 %
防波堤	9	8.2 %
岸壁	46	41.8 %
護岸	11	10.0 %
不明	6	5.5 %
その他	13	11.8 %
計	110	100.0 %

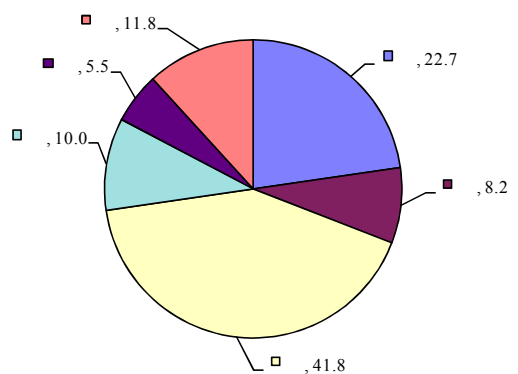


図-A.3 構造物種別比率

	回答数	構成比
0～20本	33	30.0 %
20～40	26	23.7 %
40～60	13	11.9 %
60～80	10	9.1 %
80～100	11	10.0 %
100～120	4	3.6 %
120～140	3	2.7 %
140～160	2	1.8 %
160～180	2	1.8 %
180～200	1	0.9 %
200～	5	4.5 %
計	110	100.0 %

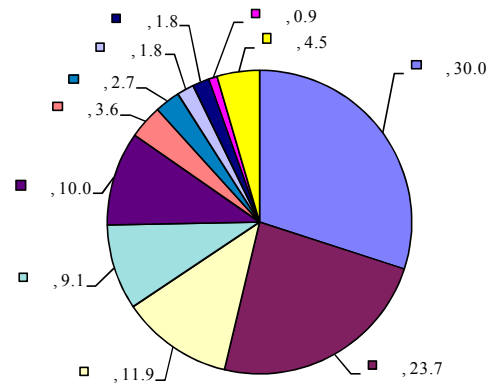


図-A.4 杭打設本数

	回答数	構成比
～599	6	5.5 %
600～799	9	8.2 %
800～999	20	18.2 %
1000～1199	30	27.3 %
1200～1399	18	16.3 %
1400～1599	23	20.9 %
1600～1799	1	0.9 %
1800～1999	2	1.8 %
2000	1	0.9 %
計	110	100.0 %

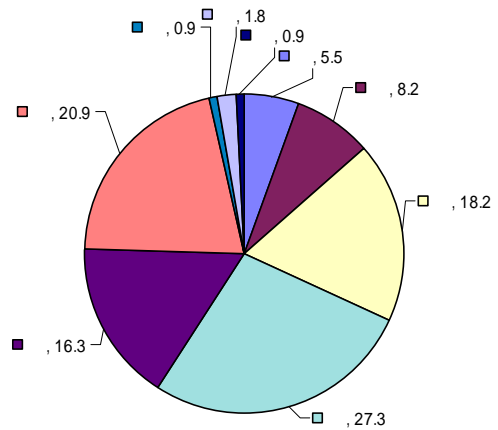


図-A.5 杭最大径の分布

e) 打設杭杭径（最大）

打設した杭の最大径の回答結果を図-A.5 に示す。使用される杭の最大径はφ1,000 mm 前後に集中する傾向が得られたが、大径杭、小径杭の施工もある。

参考のため図-A.6 に2006年（平成15年）の調査結果¹⁾を示す。2006年に報告されている調査内容は、1967年と2003年の2回の調査結果を比較したものである。このうち、2003年調査ではφ600mm以下の杭径から最大φ1,600mmの杭径の施工事例があり、φ1,000mm前後の杭径の事例が多かった。図-A.5によると、本アンケートにおいても同様にφ1,000mm前後の杭径が多いが、φ1,400mm以上の径杭の使用頻度が多くなっているような傾向も読み取れ、最大杭径はφ2,000mmとなっている。杭径は上部工の荷重（鉛直力、水平力、モーメント）と杭間隔が決定要因になるが、施設の規模、構造形式が幾分大規模化しているものと推測される。

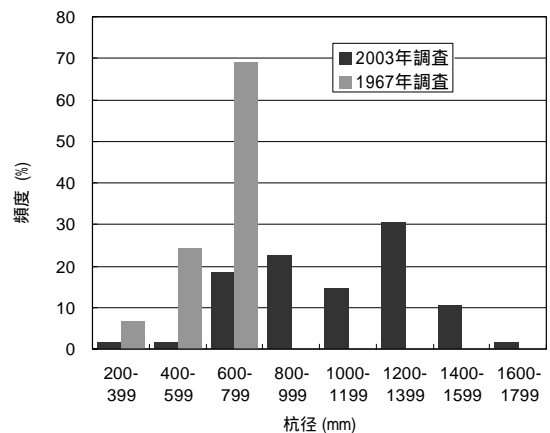


図-A.6 用いられる杭径の変化¹⁾

f) 打設杭杭長（最大）

杭の打設長の最大値の分布を図-A.7 に示す。0 ~ 50 m の最大杭長の工事が全体の 6 割を超えているが、100 m 近い杭を打設した事例も収集できた。

参考として図-A.8 に 2006 年の調査結果¹⁾を示しているが、1967 年と 2003 年の調査結果の比較では明らかに根入れ長が長くなっており、施設の大型化、施工機械の進歩、深い支持層の場所での施工になっていることを示しているものと考えられる。

図-A.7 に示した本アンケートの調査結果は杭長（杭全長）での回答であるのに対し、図-A.8 は杭の根入れ長さでまとめているため単純な比較ができない。現に、今回のアンケートの工事において突出長を考慮すると、根入れ長が大きな工事もいくらか見受けられる。しかしながら、根入れ長が 20 ~ 30 m 程度と想定される杭長（30 ~ 40 m）が多く、2003 年の調査結果と大きな傾向の違いは無いようである。

杭長 (m)	回答数	構成比 (%)
10 ~ 20m	10	9.1 %
20 ~ 30	20	18.2 %
30 ~ 40	21	19.1 %
40 ~ 50	30	27.3 %
50 ~ 60	12	10.9 %
60 ~ 70	10	9.1 %
70 ~ 80	5	4.5 %
80 ~ 90	1	0.9 %
90 ~ 100	1	0.9 %
計	110	100.0 %

g) 使用ハンマー

使用したハンマーの比率を図-A.9 に示す。今回の結果では、85 % 程度が油圧ハンマーであり、それ以外にパイプハンマーを用いた工事が少数ある。ディーゼルハンマーを使用した工事は 1 件のみで、スチームハンマーを使用したとの回答は無かった。

油圧ハンマー使用の工事のうち、形式が記述されていたものが 76 件あったが、そのうち半数近い 35 件の工事で IHC のハンマーが使用されていた。

今回のアンケートのように既成杭の打設工法におけるトラブルはハンマーと深い関係にある。このため、どのハンマーを用いたか（あるいは用いることを前提に設計したか）ということがトラブルの評価の上でも重要である。しかし、施工年、打設杭径、打設本数等による使用ハンマーの相関は見られなかった。

なお、回答中の「その他」は埋め込み杭である。

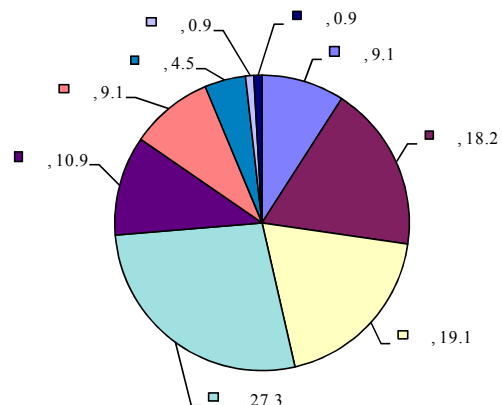


図-A.7 杭長の分布

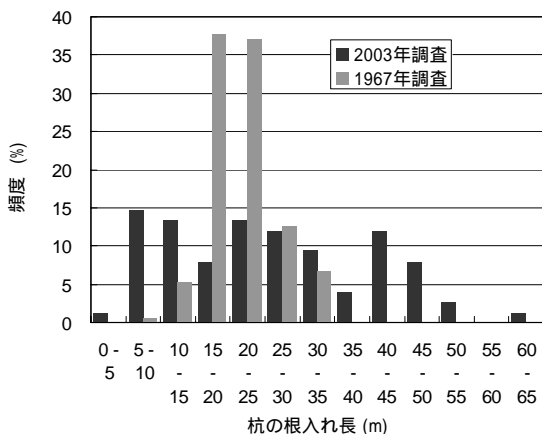


図-A.8 用いられる杭の根入れ長の変化¹⁾

h) 支持（杭先端）地盤

杭先端地盤の種別に関する回答結果を図-A.10 に示す。杭先端の支持地盤は、砂質土、岩盤（含む土丹）で 90 % 程度を占めていた。このようにほとんどの杭が良質な支持層へ根入れされたものである。

先端支持力にかなり期待した設計の場合には、先端支持力が確実に把握できることが重要となる。その一方で、杭を良質支持層に入れることで支持力に十分余裕がある場合には、支持層の支持力自体にはあまり問題は生じないが、そのような支持層に確実に根入れすることが必要である。

	回答数	構成比
ディーゼル	1	0.9 %
油圧	93	84.6 %
スチーム	0	0.0 %
パイプロ	15	13.6 %
その他	1	0.9 %
計	110	100.0 %

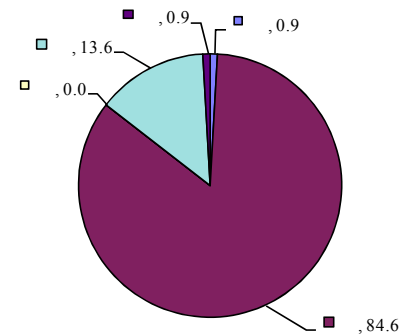


図-A.9 使用ハンマー比率

	回答数	構成比
砂質土	80	72.7 %
粘性土	7	6.4 %
岩盤（含む土丹）	22	20.0 %
その他	0	0.0 %
不明	1	0.9 %
計	110	100.0 %

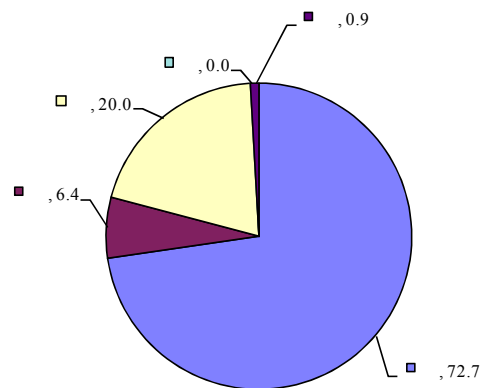


図-A.10 支持地盤種別

	回答数	構成比
補助工法あり	47	42.7 %
補助工法なし	63	57.3 %
計	110	100.0 %

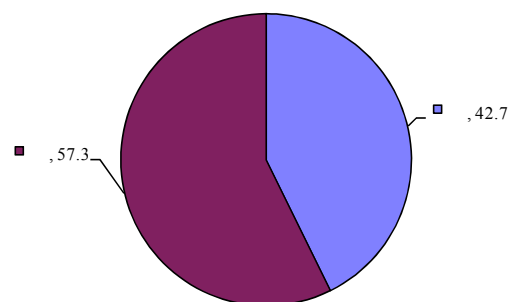


図-A.11 補助工法の有無

i) 補助工法の有無
補助工法の有無に関する回答結果を図-A.11 に示す。補助工法を使用しているケースが半数程度あった。

j) 補助工法の内容（複数回答可）
補助工法の内容についての回答結果を図-A.12 に示す。

本質問では複数回答を許している。47 件の「補助工法あり」のうち、3 件の工事で複数の補助工法を使用した。補助工法の種類は多いが、騒音・振動を低減する目的でウォータージェット、パイプロハンマーを使用（ただし、打ち止め時の動的支持力管理は打撃工法）捨石層の打抜きのために先行掘削・置換工法が用いられているようであった。

k) 動的支持力管理式

使用した動的支持力管理式についての回答結果を図-A.13に示す。動的支持力管理式は、Hileyの式が半数、次いでIHC提案式、三建の式が用いられていた。

回答中、「その他」が21件と多いが、主な内容は以下のとおりである。

「g) 使用ハンマー」でパイプロハンマーを用いたと回答のあった15件の工事では、パイプロハンマー設計施工便覧²⁾に則った施工管理を行っている。また、護岸あるいは岸壁工事での杭打設では、支持力を特に規定されていない工事もあったようである。更に、衝撃載荷試験を行い、その杭の根入れ深さまで貫入すれば所定の支持力が得られると判断した工事も3件あった。

工事件数は5件(回答4件 + 1件)と少ないが、

Hiley式と他の動的支持力管理式による管理を行った工事もあった。

なお、三建の式、IHC提案式ともエネルギー平衡式を基本理論としたHiley式から発展したもので、IHC製ハンマー等のハンマーエネルギーの大きな油圧ハンマーを対象として、Hiley式のエネルギー効率を変更したものである。

l) 管理基準

今回のアンケートでは、管理基準は以下のように規定している。

杭打ち式により算定される動的極限支持力が設計上の静的極限支持力以上であること

杭打ち式により算定される動的極限支持力が設計上の許容支持力に対して安全率3.0を満足すること

	回答数	構成比
オガ-による先行掘削・置換	5	10.0 %
全回転による先行掘削・置換	3	6.0 %
オガ-による中堀	9	18.0 %
サドコンパクション	2	4.0 %
ウォータージェット	10	20.0 %
フライングハンマー	5	10.0 %
パイロハンマーによる下杭建込	9	18.0 %
不明	7	14.0 %
計	50	100.0 %

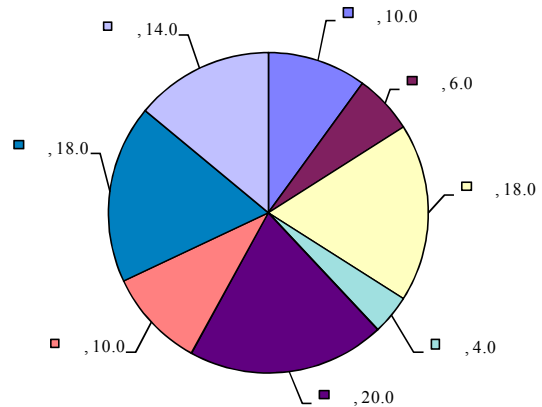


図-A.12 補助工法の内容

	回答数	構成比
ハイリー式	54	50.0 %
三建の提案式	4	3.7 %
道示式	11	10.2 %
IHC提案式	13	12.0 %
その他	21	19.5 %
ハイリー式 + 道示式	4	3.7 %
ハイリー式 + IHC提案式	1	0.9 %
計	108	100.0 %
無回答	2	

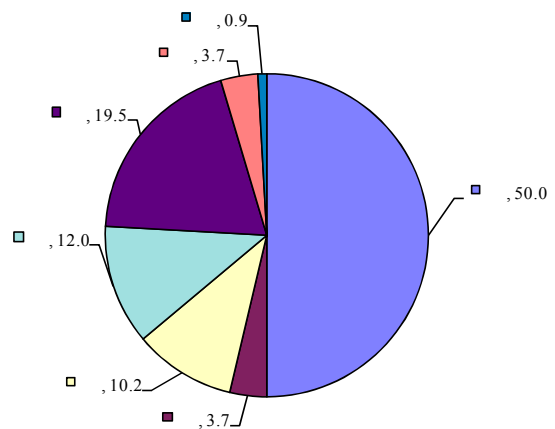


図-A.13 用いた動的支持力管理式

杭打ち式により算定される動的極限支持力が設計上の発生軸力に対して安全率 3.0 を満足すること

杭打ち式により算定される動的極限支持力が発生軸力に対して所定の安全率を満足すること、常時の安全率 (=3.0)、地震時の安全率 (=2.0)

アンケート結果を図-A.14 に示す。図をみると が少なく、このことから、支持力管理は、動的極限支持力が、設計上の静的極限支持力以上であること、設計上の発生軸力に対して所定の安全率を満足すること(常時の安全率:3.0、地震時の安全率:2.0)、設計上の許容支持力に対して安全率 3.0 を満足することの大きく 3 タイプに分かれており、これらのうちどれを用いるかについては特に傾向に差がないことがわかった。

「その他」の主なものは、載荷試験を実施しその結果により独自に支持力管理を定めた工事(7件)、支持力管理

基準を規定せず、所定の深度までの打設のみを規定された工事(7件)である。

m) 載荷試験の有無

載荷試験の実施状況を図-A.15 に示す。全体の 20 ~ 25 % の工事で載荷試験が実施されている。発注者別では、15 件が国土交通省発注の工事であったが、公社・公団等、自治体、民間の工事でも載荷試験が行われている。近隣工事で行われた載荷試験の結果をその工事に採用された例もあった。しかし、打設杭本数や打設杭杭長に対する相関は認められなかった。

n) 載荷試験の種類(複数回答可)

実施された載荷試験の種類を図-A.16 に示す。載荷試験の中では、衝撃載荷試験が 8 割を占めていることがわかる。

	回答数	構成比
管理基準	34	30.9 %
管理基準	21	19.1 %
管理基準	6	5.4 %
管理基準	29	26.4 %
その他	20	18.2 %
計	110	100.0 %

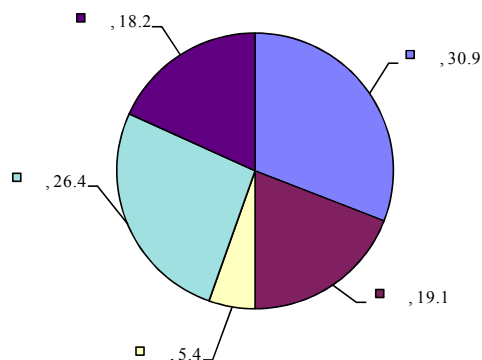


図-A.14 管理基準

	回答数	構成比
載荷試験あり	23	20.9 %
載荷試験なし	87	79.1 %
計	110	100.0 %

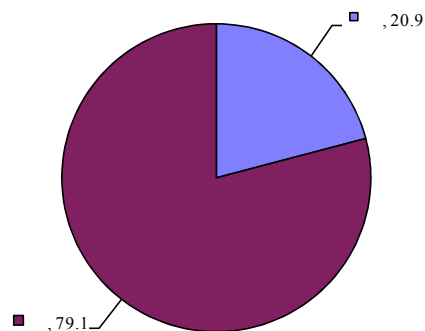


図-A.15 載荷試験実施の有無

	回答数	構成比
衝撃载荷試験	19	63.3 %
水平载荷試験	2	6.7 %
急速载荷試験	5	16.7 %
静的载荷試験	3	10.0 %
引抜き载荷試験	1	3.3 %
計	30	100.0 %

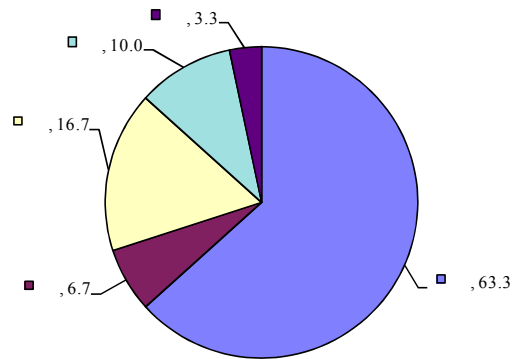


図-A.16 実施した载荷試験の種類

	回答数	構成比
回答あり	53	48.2 %
回答なし	57	51.8 %
計	110	100.0 %

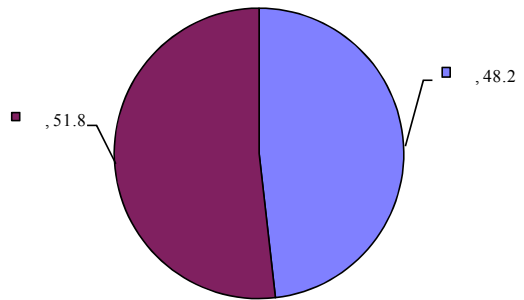


図-A.17 施工中の課題・問題点の有無

	回答数	構成比
高止まり	8	15.1 %
支持力不足	10	18.9 %
杭体の損傷	5	9.4 %
打設不能	0	0.0 %
中間層・障害物	3	5.7 %
その他	27	50.9 %
計	53	100.0 %

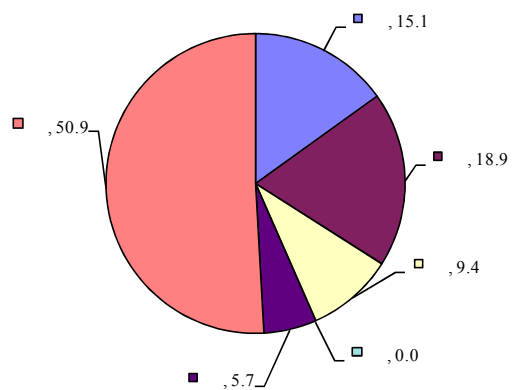


図-A.18 施工中の課題の内容

o) 施工中の課題・問題点について

施工中の課題・問題点があったかという問いに対する回答を図-A.17 に示す。施工中に課題・問題点のあった工事が約半数であり、杭打設工事は施工を進めると何らかの課題・問題点が発生する機会が多いことが読み取れる。しかし、事前に対策を行うことで課題を解決した例もあり、課

題・問題点があったと回答した53件の全てで施工中にトラブルが起きたのではないことに注意する必要がある。

p) 施工中の課題の内容

施工中の課題の内容についての回答結果を図-A.18 示す。「その他」の回答中、多かったのは、近接施工による既設

構造物への影響、パイプロハンマー使用時の打ち止め管理方法に関する課題を挙げていたもので、それぞれ3件ずつあった。他には、杭打ち機械（杭打ち船）の選定や杭心のずれ等の施工計画、出来型管理方法を課題としてあげているものが多かった。

q) 高止まりの解決方法

施工中に高止まりの問題が生じたものについて、その解決方法は図-A.19 に示すとおりであり、杭を切断した事例が最も多かった。杭が高止まりすると、半無限長の杭として設計していたものが有限長の杭に変更して再設計が必要になる場合がある。回答のあった4件の工事は全て、高止まりした杭の根入れ長で構造的に問題ないかどうかを発注者と協議して決定し、杭切断に至ったようである。

	回答数	構成比
杭切断(高止まり)	4	50.0 %
杭諸元変更	0	0.0 %
所定位置まで打設(工法等変更)	1	12.5 %
不明	3	37.5 %
計	8	100.0 %

r) 支持力不足の解決方法

支持力不足の場合の解決方法を図-A.20 に示す。支持力不足の解決策としては、杭長延長が最も多く、十字リブの取り付けもあった。先端リブを取り付けた工事の事例では、当初杭長延長を計画したが、経済性により先端リブの取付けに変更している。この事例では、先端リブ取付けにより所定の動的支持力が得られている。杭長延長のうち、3件は杭打設後に延長しているが、事前のH鋼を使用した支持層確認により杭長を延長した工事が2件、試験施工（試験杭）結果により事前に杭長を延長して施工した工事が1件であった。この結果より、支持力不足が懸念されるかどうかの事前検討が十分行われ、杭打設前に対策をとっているようである。

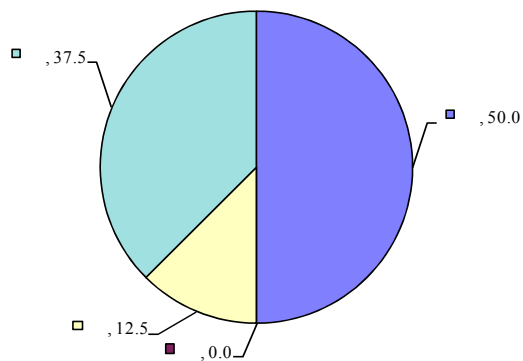


図-A.19 高止まりの解決方法

	回答数	構成比
杭長延長	6	60.0 %
杭諸元変更	0	0.0 %
十字リブの取付	1	10.0 %
不明	3	30.0 %
計	10	100.0 %

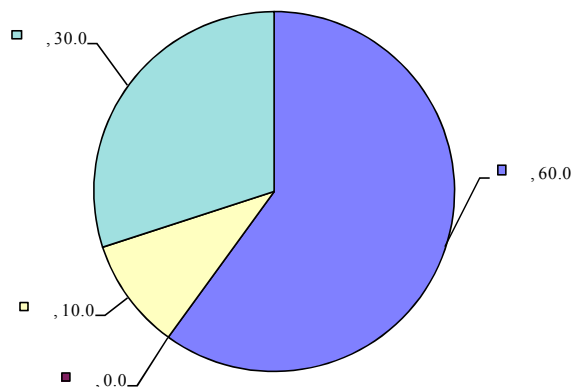


図-A.20 支持力不足の解決方法

A.2 杭打設工事の実績（2次アンケート結果）

(1) 施工事例調査（2次）の概要

杭施工の一般事例（1次調査）の調査数 110 件の中から、事前に問題が生じると想定していた事例や実際施工中に問題が生じた事例について、問題点をより詳細に把握する目的で 34 件を抽出し、さらに新規事例 2 件を含め、36 件の事例について 2 次アンケート調査を実施した。得られた 2 次アンケート調査について統計処理を行い、事前に想定した課題や施工途中に発生した問題およびその対応方法を整

理、分析した。なお、アンケートは工事単位（発注単位）で 1 件とカウントして整理している。統計対象項目を表-A.2 に示す。

2 次アンケートには、表-A.3 に示すように施工中に問題が生じた事例（杭長を変更するなど事前回避したものを含む）が 24 件含まれている。ただし、アンケートは工事単位（発注単位）であるので、同じ工事のなかで複数の問題が生じている場合も。なお、2 次アンケートの処理の際に回答内容を精査した結果、1 次アンケートの回答結果とは各項目の回答数が変化している。

表-A.2 2次アンケートの統計対象項目

事前に把握していた状況、想定していた課題	
地盤条件	支持層が深い、支持層が浅い、支持層が薄い、支持層が傾斜している、層が複雑である、支持層の土質（風化岩や土丹など）、支持層に不陸、中間層に硬い層が存在、その他、なし
支持力に関する懸念	高止まり、支持力不足、先端閉塞率、その他、なし
打ち込み工法	ディーゼルハンマー、油圧ハンマー、パイプロハンマー、その他
補助工法の有無	補助工法あり、補助工法なし
施工条件の制約	地盤条件、既設物、周辺地盤の影響、工期
杭先端補強バンドの採用	補強バンドあり、補強バンドなし
施工状況、施工管理方式、施工中に生じた問題・課題	
施工計画時から変更した打ち込み工法	ディーゼルハンマー、油圧ハンマー、パイプロハンマー、その他、変更なし
施工中に生じた問題や課題	高止まり、支持力不足、杭体の損傷、打設不能、周辺地盤への影響、既設物、工期、その他、なし
動的支持力管理式（杭打ち式）	ハイリー式、三建の式、道示式、IHC 提案式、その他
杭打ちの打止め管理基準	杭打ち式による動的極限支持力が、 ・設計上の静的極限支持力以上であること ・設計上の許容支持力に対して安全率 3 を満足すること ・発生軸力に対して安全率 3 を満足すること ・発生軸力に対して所定の安全率を満足すること その他
打止め管理基準の結果	全ての杭で満足した、ほぼ満足した、ほぼ満足しなかった、全て満足しなかった、その他
設計・施工変更	
設計変更した項目	杭を高止まりで止めた、杭長を延長した、杭諸元を変更した、十字リブの取り付け、その他、なし
追加試験	静的載荷試験、急速載荷試験、衝撃載荷試験、その他、追加試験なし
追加地盤調査	施工前事前調査、施工中追加調査、その他、追加試験なし
実施負担	発注者、受注者

表-A.4 二次アンケート結果の大まかな傾向

地盤に対する不安材料		支持力に対する懸念		施工中の問題発生		件数
有り	無し	有り	無し	有り	無し	
						17
						6
						1
						4
						6
						2

表-A.5 地盤条件と杭トラブルの大まかな傾向

	トラブルあり	トラブルなし
地盤不安あり	23	10
地盤不安なし	1	2

表-A.6 支持力懸念と杭トラブルの大まかな傾向

	トラブルあり	トラブルなし
支持力不安あり	17	4
支持力不安なし	7	8

表-A.7 地盤条件・支持力懸念と杭トラブルの大まかな傾向

	トラブルあり	トラブルなし
地盤 or 支持力不安あり	23	10
地盤 and 支持力不安なし	1	2

(2) 統計処理結果 (調査数 36 件)

a) 事前に把握していた状況, 想定していた課題

1) 地盤条件

事前に把握または想定していた地盤条件について質問した結果をまとめると図-A.21 のとおりである。「支持層が深い」という回答が最も多く、「中間層に硬い層が存在」と「支持層に不陸」が次いで多い。この3項目で全体の65%を占めている。地盤条件でこれらの要素がある場合には、特に留意する必要がある。

「支持層が深い」と杭トラブルが懸念されるのは、地盤の不確定要素が増えるという側面と、施工時に杭の施工精度が低下するという側面が重なるからであると推測される。

2) 支持力に関する懸念

事前に把握または想定していた支持力に関する懸念についての回答は図-A.22 に示すとおりである。事前予想した支持力に関するトラブルでは、「高止まり」と「支持力不足」との回答がほとんどを占めている。問題発生を想定していなかった「なし」も全体の4割近くとなっているが、地盤条件的には何らかの不安要素を抱えている場合がほとんどである(表-A.5 参照)。

次に、事前に想定していた地盤条件と支持力に関する懸念との関係を図-A.23 に示す。事前に「支持層が深い」、「中間層に硬い層」、「支持層に不陸」、「支持層が傾斜」、「支持層の土質(に問題)」があると想定していた場合は「高止まり」や「支持力不足」の問題が生じると予測する傾向がある。高止まりと支持力不足は、支持層条件の裏返しで生じるので、同一工事で同時に起こる可能性も高い。

事前に「中間層に硬い層」があると想定していた場合に、「支持力不足」が生じると予測した回答が多かったのは予想外であった。しかし中間層の打ち抜きには補助工法を用いて対応し、最終的な支持層での支持力不足の方を心配していたとも解釈できる。

項目	回答数	割合
支持層が深い	16	30.8 %
支持層が浅い	1	1.9 %
支持層が薄い	2	3.8 %
支持層が傾斜している	4	7.7 %
層が複雑である	3	5.8 %
支持層の土質(風化岩や土丹など)	4	7.7 %
支持層に不陸	8	15.4 %
中間層に硬い層が存在	10	19.2 %
その他	1	1.9 %
なし	3	5.8 %
計	52	

調査数 36, 重複回答を含む

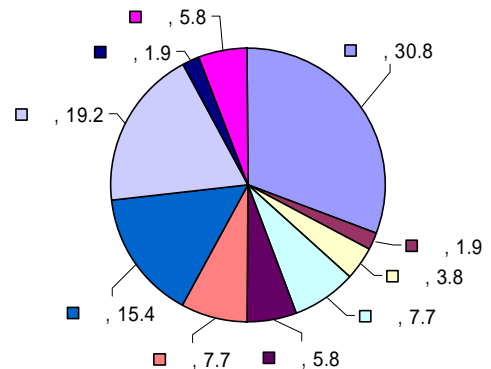


図-A.21 地盤条件に関して事前に把握していた状況, 想定していた課題

項目	回答数	割合
高止まり	10	27.0 %
支持力不足	12	32.4 %
先端閉塞率	1	2.7 %
その他	0	0.0 %
なし	14	37.8 %
計	37	

調査数 36, 未回答 1, 重複回答を含む

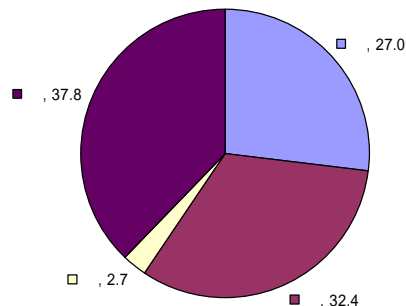


図-A.22 事前に想定していた支持力に関する懸念

選択項目	総計	事前に想定した地盤条件											
		支持層が深い	支持層が浅い	支持層が薄い	支持層が傾斜	層が複雑	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
事前に想定した課題	高止まり	10	27.0%	4	23.5%	1	100.0%	0	0.0%	3	60.0%	0	0.0%
	支持力不足	12	32.4%	8	47.1%	0	0.0%	1	50.0%	0	0.0%	2	100.0%
	先端閉塞率	1	2.7%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	1	20.0%	0	0.0%
	その他	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	なし	14	37.8%	5	29.4%	0	0.0%	1	50.0%	1	20.0%	0	0.0%
計	37		17		1		2		5		2		

選択項目	総計	事前に想定した地盤条件(続き)									
		支持層の土質	支持層に不陸	中間層に硬い層	その他	なし	回答数	割合	回答数	割合	
事前に想定した課題	高止まり	2	50.0%	6	66.7%	2	20.0%	0	0.0%	0	0.0%
	支持力不足	1	25.0%	1	11.1%	4	40.0%	0	0.0%	0	0.0%
	先端閉塞率	0	0.0%	1	11.1%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	その他	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	なし	1	25.0%	1	11.1%	4	40.0%	1	100.0%	3	100.0%
計	4		9		10		1		3		

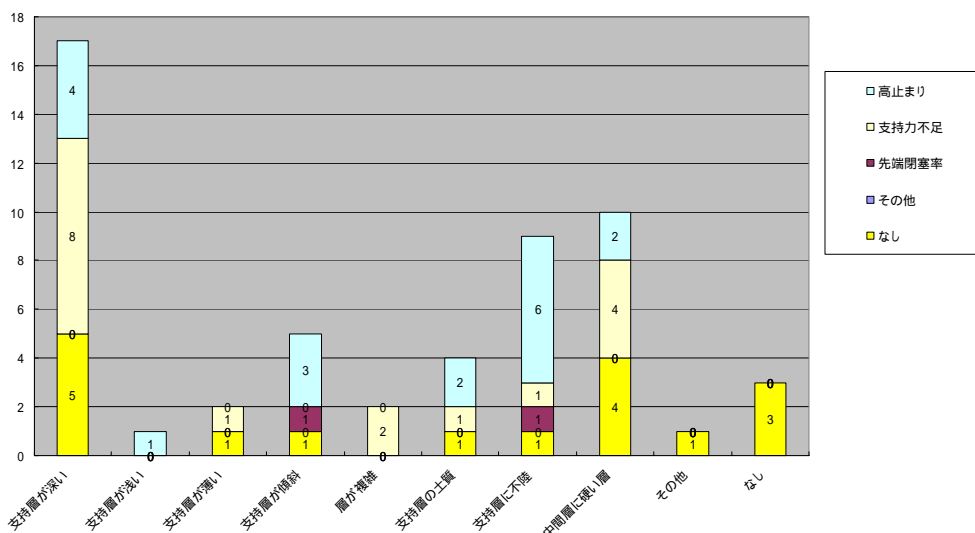


図-A.23 事前に想定していた地盤条件と支持力に関する懸念の関係

3) 打ち込み工法

事前に想定した打ち込み工法についての回答を図-A.24に示す。事前の想定では「油圧ハンマー」が9割近くを占めていて、最近では油圧ハンマーが主力であることがわかる。

ディーゼルハンマーまたはパイプロハンマーとの併用が1件ずつある。

パイプロハンマーのみの2件はウォータージェット併用であり、その他1件は中掘最終打撃工法である。

杭打ち船が近寄れない場合、騒音対策が必要な場合、仮設の場合などでは、パイプロハンマーが用いられることがある。

4) 補助工法の有無

事前に想定していた補助工法の調査結果を図-A.25 に示す。「補助工法あり」の割合は、1次アンケートとほぼ同様である。補助工法の具体事例を次に示す。

- スパイラルオーガによる中掘り工法
- パイプロハンマーにより建て込み、打設は油圧ハンマー
- ケーシング併用アースオーガ工法
- ウォータージェット併用（打設はパイプロハンマー）
- ドーナツオーガ先行削孔
- 捨石層を先行削孔全周回転掘削機

アンケート時には補助工法の定義をしなかったが、回答は土層が硬い場合の先行削孔、中掘り工法系（杭打設時の抵抗を小さくする）と、上部軟弱層が厚いためパイプロ建て

み + 最終打撃（建て込みの効率化）の大きく 2 パターンに分かれた。

次に、事前に想定していた地盤条件と補助工法の有無との関係を、図-A.26 に示す。図より、地盤条件で「支持層が深い」、「中間層に硬い層」、「支持層に不陸」があると想定していた場合に、補助工法を採用する傾向が見られる。

5) 施工条件の制約

事前に想定した施工条件の制約について図-A.27 にまとめる。回答のあった中では、騒音・振動などの「周辺地盤の影響」が最も多く、その中でも騒音との回答が多い。また支持層が深いなどの「地盤条件」、高さ制限や狭隘地などの「既設物」が次いで多い。

また、施工の制約条件（地盤以外）と補助工法の有無の関係を図-A.28 に示す。施工条件の制約で事前に「周辺環境への影響（騒音・振動）」が有ると想定した場合に補助工法を検討したものが多い。

項目	回答数	割合
ディーゼルハンマー	1	2.6 %
油圧ハンマー	33	86.8 %
パイプロハンマー	3	7.9 %
その他	1	2.6 %
計	38	

調査数 36, 重複回答を含む

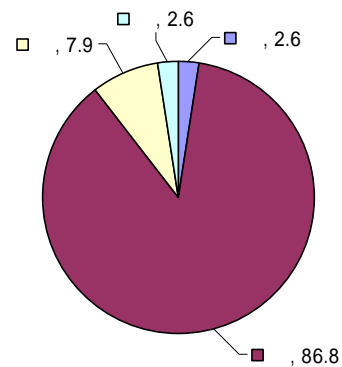


図-A.24 事前に想定していた打ち込み工法

項目	回答数	割合
ディーゼルハンマー	1	2.6 %
油圧ハンマー	33	86.8 %
パイプロハンマー	3	7.9 %
その他	1	2.6 %
計	38	

調査数 36, 重複回答を含む

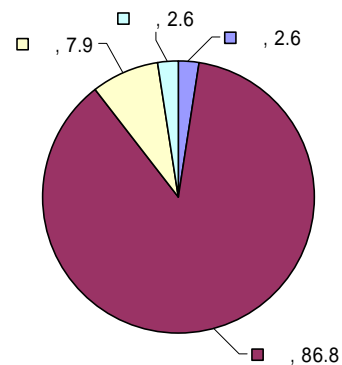


図-A.25 事前に想定していた補助工法の有無

選択項目	事前に想定した地盤条件												
	総計		支持層が深い		支持層が浅い		支持層が薄い		支持層が傾斜		層が複雑		
	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
事前に想定した補助工法	補助工法あり	16	44.4%	10	62.5%	0	0.0%	0	0.0%	2	50.0%	2	66.7%
	補助工法なし	18	50.0%	5	31.3%	1	100.0%	2	100.0%	2	50.0%	1	33.3%
	不明・未回答	2	5.6%	1	6.3%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
計	36		16		1		2		4		3		

選択項目	事前に想定した地盤条件(続き)										
	支持層の土質		支持層に不陸		中間層に硬い層		その他		なし		
	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
事前に想定した補助工法	補助工法あり	1	25.0%	5	62.5%	4	40.0%	0	0.0%	0	0.0%
	補助工法なし	3	75.0%	2	25.0%	5	50.0%	1	100.0%	3	100.0%
	不明・未回答	0	0.0%	1	12.5%	1	10.0%	0	0.0%	0	0.0%
計	4		8		10		1		3		

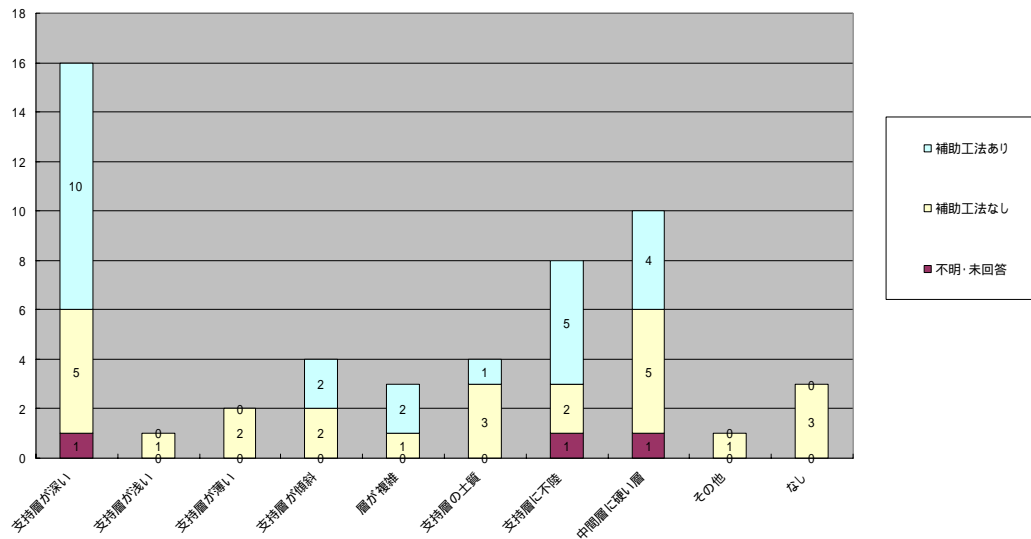


図-A.26 事前に想定していた地盤条件と補助工法の有無の関係

項目	回答数	割合
地盤条件	10	22.7 %
既設物	7	15.9 %
周辺地盤の影響	13	29.5 %
工期	5	11.4 %
不明・未回答	9	20.5 %
計	44	

調査数 36, 重複回答を含む

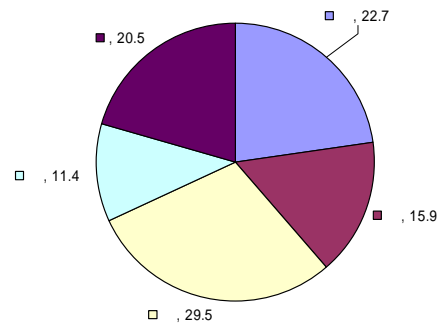


図-A.27 事前に想定していた施工条件の制約

選択項目		総計		施工の制約条件					
				既設物		周辺環境への影響		工期	
		回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合
事前に想定した補助工法	補助工法あり	16	44.4%	4	57.1%	7	53.8%	3	75.0%
	補助工法なし	18	50.0%	2	28.6%	4	30.8%	1	25.0%
	不明・未回答	2	5.6%	1	14.3%	2	15.4%	0	0.0%
計		36		7		13		4	

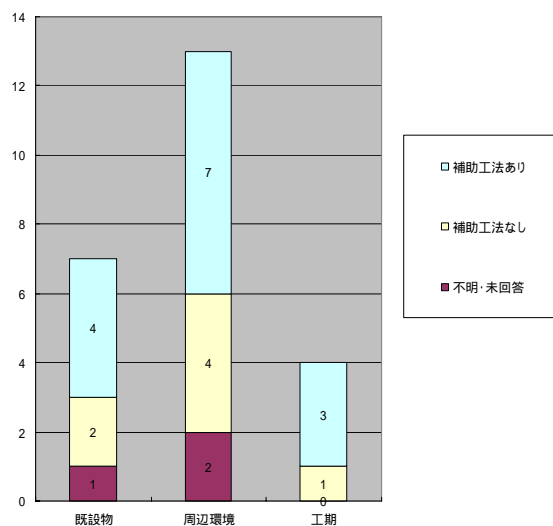


図-A.28 事前に想定していた施工条件の制約と補助工法の有無の関係

項目	回答数	割合
あり	26	74.3 %
なし	9	25.7 %
計	35	

調査数 36, 無回答 1

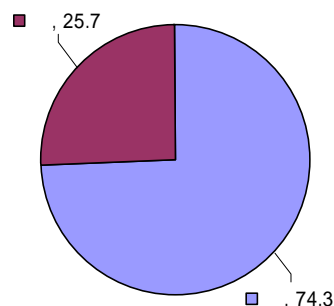


図-A.29 事前の先端補強バンドの採用状況

6) 杭先端補強バンドの採用

杭先端補助バンドの採用の有無について調査した結果を図-A.29に示す。回答のあったうち7割強が「杭先端補強バンドの採用」をしている。調査対象としている事例がトラブルが事前予想された事例であるため、支持層が深い、中間層が硬いなどの地盤要素を反映して採用率が高いものと考えられる。また比較的安価に実施できることも、採用率が高かったことに寄与していると思われる。

b) 施工状況, 施工管理方法, 施工中に生じた問題・課題

1) 施工計画時からの打ち込み工法変更

施工計画時から打ち込み工法を変更したかどうかに関する回答を図-A.30に示す。回答によると、大部分が打ち込み工法の変更をしていない。またはと回答した事例は、同種ハンマーでの規格変更である。と回答のあった事例は、振動の影響から中掘最終打撃で計画されたが、支持力不足が生じたため、噴射攪拌による先端根固めを併用したケースである。

大幅な工法変更の場合には、検討期間や施主との協議時間が長くかかっている。

2) 施工中に生じた問題や課題

施工中に生じた問題や課題について質問した結果得られた回答を図-A.31 に示す。施工中に問題や課題が生じた中では、「高止まり」と「支持力不足」が大部分を占める。一方で、実際には問題が生じなかった事例が3割ある。支持力不足14件のうち5件は、事前調査などによって杭長を延長し、施工中にトラブルが生じる前に事前回避されていた。

次に、事前に想定していた地盤条件と施工中に生じた問題や課題との関係を図-A.32 に示す。「支持層が深い」、「支持層に不陸」、「中間層に硬い層」、「支持層の傾斜」と想定した場合には、「高止まり」や「支持力不足」が生じたケースが多い。これは、順位こそ違え、a)2) で述べた事前に想定した地盤条件と支持力に関するの懸念との関係と同じ傾向である。それ以外の項目は、回答数が少ないこともあり、傾向は定かではない。

また、事前の支持力に関するの懸念と施工中に生じた問題や課題との関係を表-A.8 に示す。高止まりを当初から予

測していたのは3件（予想件数の3割弱）に留まり、高止まりはやや予測しにくい傾向にある。打設不能の2件を含めると的中率は予想件数の5割弱となる。一方、「支持力不足」を事前に想定し、施工的にも「支持力不足」が生じた事例が8件（予想件数の6割強）である。この割合は「高止まり」を事前に想定できた割合より高く、支持力不足は予測が的中しやすい傾向にある。これは支持力不足の要因が多岐にわたっていることに起因するのかもしれない。

3) 動的支持力管理式（杭打ち式）

施工に用いた動的支持力管理式は図-A.33 のようである。動的支持力管理式では、「Hiley 式」が全体の半数近くを占める。構造物別に確認すると、岸壁（栈橋）では17件中の13件（76%）で Hiley 式が使われていた。また、橋梁の基礎杭は「道示式」、IHC 社製のハンマーの場合は「IHC 提案式」を採用する傾向が見られた。なお、全体の傾向は1次アンケートと同様である。

項目	回答数	割合
ディーゼルハンマー	0	0.0 %
油圧ハンマー	3	9.1 %
パイプロハンマー	1	3.0 %
その他	1	3.0 %
変更なし	28	84.8 %
計	33	

調査数 36，無回答 3

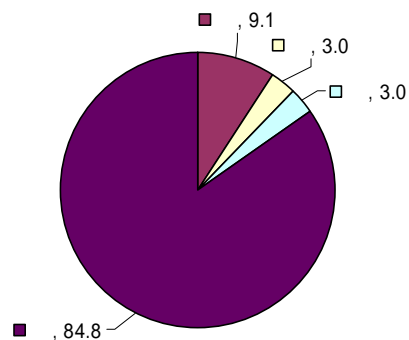


図-A.30 打ち込み工法の変更状況

項目	回答数	割合
高止まり	8	20.0 %
支持力不足	14	35.0 %
杭体の損傷	2	5.0 %
打設不能	3	7.5 %
周辺地盤への影響	0	0.0 %
既設物	0	0.0 %
工期	1	2.5 %
その他	0	0.0 %
なし	12	30.0 %
計	40	

調査数 36，重複回答を含む

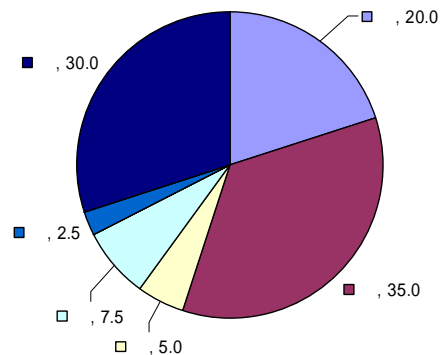


図-A.31 施工中に生じた問題や課題

選択項目		事前に想定した地盤条件											
		総計		支持層が深い		支持層が浅い		支持層が薄い		支持層が傾斜		層が複雑	
		回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合
施工中 に生じ た問題 や課題	高止まり	8	20.0%	5	27.8%	0	0.0%	0	0.0%	1	20.0%	1	33.3%
	支持力不足	14	35.0%	7	38.9%	0	0.0%	1	50.0%	2	40.0%	1	33.3%
	杭体の損傷	2	5.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	打設不能	3	7.5%	0	0.0%	1	100.0%	0	0.0%	1	20.0%	0	0.0%
	周辺地盤への影響	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	既設物	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	工期	1	2.5%	1	5.6%	0	0.0%	0	0.0%	1	20.0%	0	0.0%
	その他	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	なし	12	30.0%	5	27.8%	0	0.0%	1	50.0%	0	0.0%	1	33.3%
	計		40		18		1		2		5		3

選択項目		事前に想定した地盤条件(続き)									
		支持層の土質		支持層に不陸		中間層に硬い層		その他		なし	
		回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合
施工中 に生じ た問題 や課題	高止まり	2	50.0%	3	27.3%	1	10.0%	0	0.0%	0	0.0%
	支持力不足	1	25.0%	4	36.4%	1	10.0%	1	100.0%	1	33.3%
	杭体の損傷	0	0.0%	1	9.1%	1	10.0%	0	0.0%	0	0.0%
	打設不能	1	25.0%	0	0.0%	2	20.0%	0	0.0%	0	0.0%
	周辺地盤への影響	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	既設物	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	工期	0	0.0%	1	9.1%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	その他	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	なし	0	0.0%	2	18.2%	5	50.0%	0	0.0%	2	66.7%
	計		4		11		10		1		3

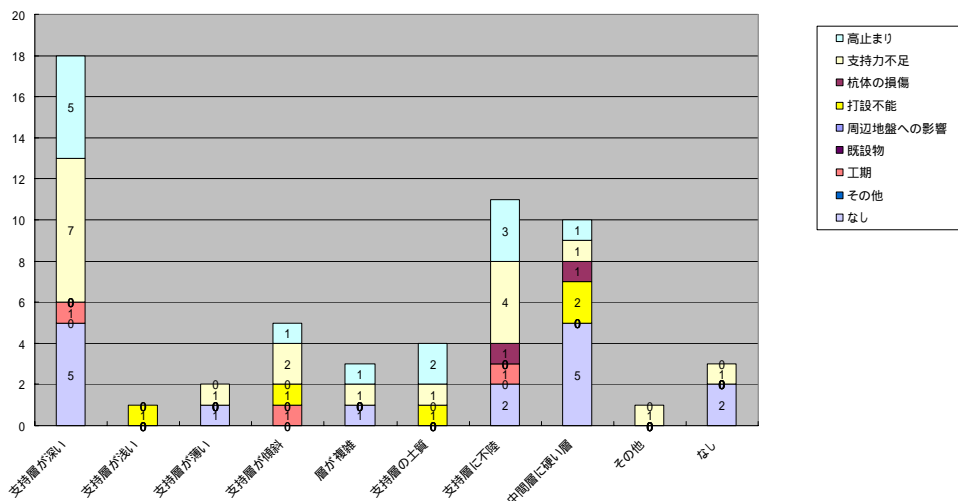


図-A.32 事前に想定していた地盤条件と施工中に生じた問題や課題との関係

表-A.8 事前の支持力についての懸念と施工中に生じた問題や課題との関係

		施工中に生じた問題						
		高止まり	支持力不足	杭体の損傷	打設不能	工期	なし	小計
支持力について の懸念(施工前)	高止まり	3	2	0	2	1	3	11
	支持力不足	2	8	1	0	0	2	13
	先端閉塞率	0	1	0	0	0	0	1
	なし	3	4	1	1	0	7	16
	小計	8	15	2	3	1	12	41

項目	回答数	割合
ハイリー式	18	46.2 %
三建の式	2	5.1 %
道示式	8	20.5 %
IHC提案式	5	12.8 %
その他	6	15.4 %
計	39	

調査数 36, 重複回答を含む

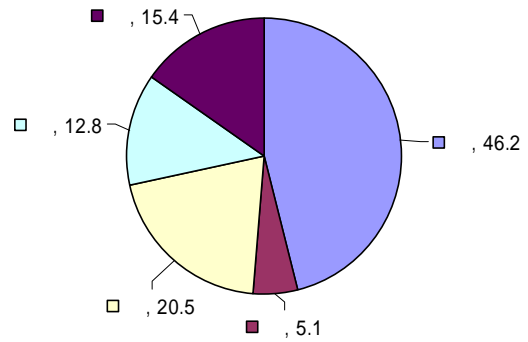


図-A.33 動的支持力管理式（杭打ち式）

項目	回答数	割合
杭打ち式による動的極限支持力が、設計上の静的極限支持力以上であること。	14	37.8 %
" 設計上の許容支持力に対して安全率3を満足すること。	8	21.6 %
" 発生軸力に対して安全率3を満足すること。	3	8.1 %
" 発生軸力に対して所定の安全率を満足すること。	6	16.2 %
その他	6	16.2 %
計	37	

調査数 36, 重複回答を含む

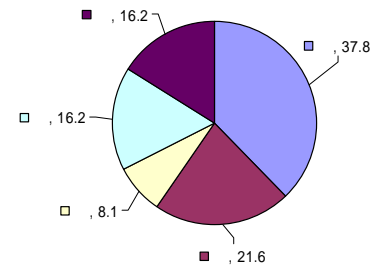


図-A.34 杭打ちの打止め管理基準

項目	回答数	割合
全て満足した	28	71.8 %
ほぼ満足した	4	10.3 %
ほぼ満足しなかった	1	2.6 %
全て満足しなかった	1	2.6 %
その他	1	2.6 %
計	35	

調査数 36, 無回答 1

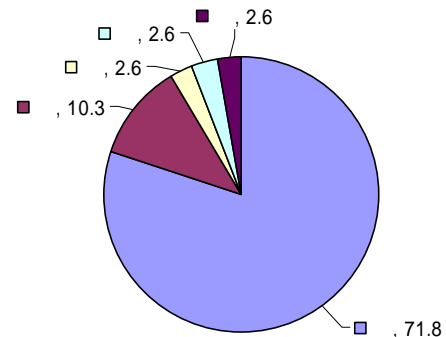


図-A.35 打止め管理の結果

4) 杭打ちの打止め管理基準

施工の際の打止め管理基準についての回答結果を図-A.34 に示す。発生軸力に対する管理（発生軸力に対して安全率3を満足すること、発生軸力に対して所定の安全率を満足すること）よりも、設計上の静的極限支持力もしくは許容支持力に対する管理（設計上の静的極限支持力以上であること、設計上の許容支持力に対して安全率3を満足すること）を行った事例が多く、全体の6割程度を占める。この傾向は1次アンケートと同様である。

トラブルが生じた場合に管理手法を変更したかどうかはこのアンケートからは読み取れないが、動的支持力推定式で求めた極限支持力が設計上の極限支持力をわずかに下回る場合においても、安全率の考え方については発注者との

協議が必要である。管理基準の変更を検討するよりは、むしろ動的支持力管理式に含まれる誤差を補正する努力が望ましい。

5) 打止め管理の結果

実施工の際に打止め管理基準を満足したかどうかに関するアンケート結果を図-A.35 に示す。管理基準を満足した場合が大部分であるが、「ほぼ満足しなかった」、「全て満足しなかった」との回答も各1件あった。うち1件は周面摩擦の回復を待って衝撃載荷試験を行い、必要支持力が得られることを確認している。打設直後では周面摩擦が低下して

いるので、載荷試験を実施する場合も地盤のセットアップを十分配慮する必要がある。もう1件は、補助的に噴射工法による先端根固め工法で対処し、載荷試験により支持力を確認している。

c) 設計・施工変更

1) 設計変更した項目

設計変更した項目に関する調査結果を図-A.36 に示す。

b)2) で紹介したとおり施工中に問題や課題が生じたとの回答が24件あったが、これらの事例に関してはほとんどの場合何らかの設計変更が行われている。「杭を高止まりで止めた」と「杭長を延長した」も大きな割合を占めるが、このことは問題が生じた事例で「高止まり」と「支持力不足」が多いことが影響している。また施工前に行った事前調査の結果、杭長を延長した事例もある。

次に、施工中に生じた問題や課題と設計変更した項目との関係を、図-A.37 に示す。「高止まり」したケースは、結果的に杭を高止まりで止めた場合が多い（高止まりで杭を延長した事例は2件とも同一工事内で支持力不足も生じたためである）。また、「支持力不足」のケースでは6割が杭の延長を実施した。支持力不足では、その他として増し杭、先端根固めの事例もある。

2) 追加試験

実施した追加試験について質問した結果を図-A.38 に示す。約30%の工事で追加試験を実施しているが、1次アンケートの結果においても載荷試験を実施した事例が20%程度であったので、トラブルが事前予想された又は実際に生じたからといって載荷試験が特に多かった訳では無い。静的載荷試験は大規模工事のごく初期に実施されることが多いが、実績の少ない工法の裏付けとして実施され

る場合もある。

実施した試験の種類としては、衝撃載荷試験が多い傾向にある。費用が比較的安価で所要日数も短いといった理由から衝撃載荷試験の採用率が高かったものと思われる。

次に、施工中に生じた問題や課題と追加試験との関係を図-A.39 に示す。「高止まり」、「支持力不足」の場合について追加試験を実施する事例があり、「支持力不足」の方が事例数が多かった。「高止まり」の場合、支持層が高いだけであれば支持力的には問題が少ないことから、追加試験が少なかったものと思われる。「支持力不足」の場合についても、杭先端が明らかに支持層に到達していない場合には追加試験を実施せず継杭で杭を延長するケースが多いように思われる。しかし、杭先端が十分支持層に到達しているにもかかわらず、支持力が出ないという場合には載荷試験により確認する必要がある。

3) 追加地盤調査

追加地盤調査の実施状況に関する回答を図-A.38 に示す。追加地盤調査を実施したのは全体の3割程度である。中でも施工前に実施したケースが多い。杭トラブルが生じても、追加地盤調査は必ずしも行わなくてもよい。しかし、「支持力不足」で杭先端が支持層に達していない場合には、他に確認方法がなければ追加地盤調査を実施して杭の延長を検討するのが望ましい。また、静的載荷試験などを追加する場合には、必ず地盤調査の追加が必要である。

次に、施工中に生じた問題や課題と追加地盤調査との関係を、図-A.39 に示す。施工前に追加地盤調査をしたにもかかわらず「高止まり」、「支持力不足」など施工中の問題が生じた事例（計5件）もあるが、追加地盤調査をしないでトラブルの発生する割合の方が多い。工期的に追加地盤調査を実施できないケースが多いものと推測される。

項目	回答数	割合
杭を高止まりで止めた	7	18.4 %
杭長を延長した	10	26.3 %
杭諸元を変更した	0	0.0 %
十字リブの取り付け	0	0.0 %
その他	6	15.8 %
なし	15	39.5 %
計	38	

調査数 36, 重複回答を含む

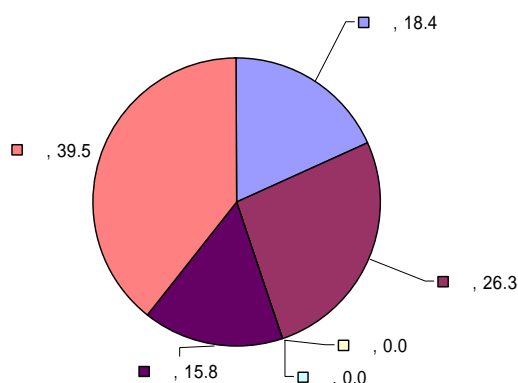


図-A.36 設計変更した項目

選択項目	総計		施工中に生じた問題や課題								
			高止まり		支持力不足		杭体の損傷		打設不能		
	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
設計・ 施工変更	杭を高止まりで止めた	7	18.4%	6	66.7%	1	6.3%	1	33.3%	1	33.3%
	杭長を延長した	10	26.3%	2	22.2%	10	62.5%	1	33.3%	0	0.0%
	杭諸元を変更した	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	十字リブの取り付け	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	その他	6	15.8%	1	11.1%	3	18.8%	1	33.3%	0	0.0%
	なし	15	39.5%	0	0.0%	2	12.5%	0	0.0%	2	66.7%
計	38		9		16		3		3		

選択項目	施工中に生じた問題や課題(続き)										
	周辺地盤への影響		既設物		工期		その他		なし		
	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
設計・ 施工変更	杭を高止まりで止めた	0	-	0	-	1	100.0%	0	-	0	0.0%
	杭長を延長した	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	0	0.0%
	杭諸元を変更した	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	0	0.0%
	十字リブの取り付け	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	0	0.0%
	その他	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	1	8.3%
	なし	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	11	91.7%
計	0		0		1		0		12		

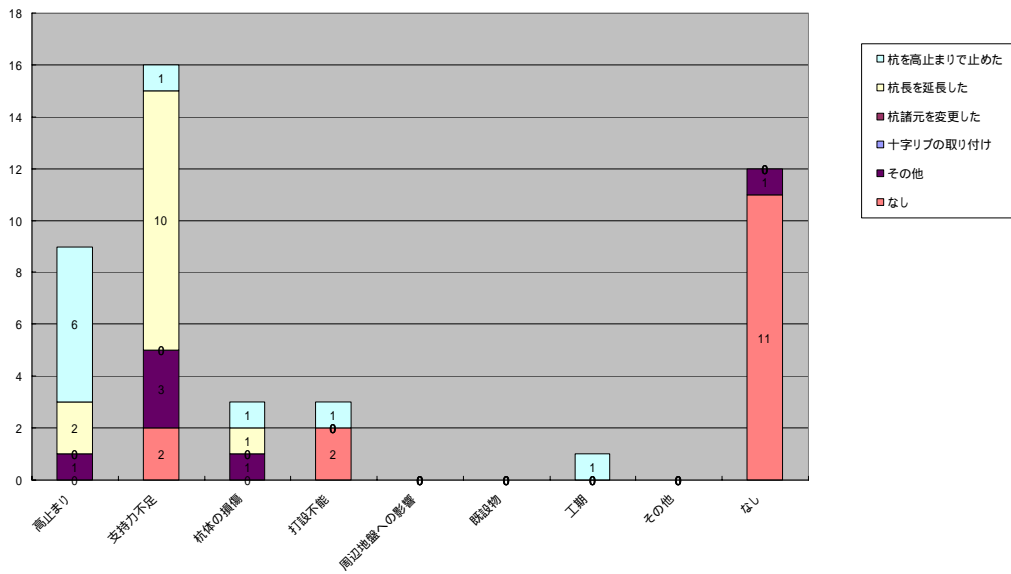


図-A.37 施工中に生じた問題や課題と設計変更項目との関係

項目	回答数	割合
静的載荷試験	2	5.4 %
急速載荷試験	1	2.7 %
衝撃載荷試験	6	16.2 %
その他	2	5.4 %
追加試験なし	26	70.3 %
計	37	

調査数 36, 重複回答を含む

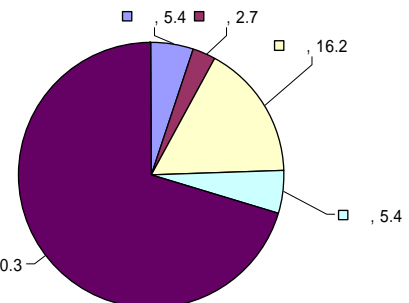


図-A.38 追加試験の実施状況

選択項目	総計		施工中に生じた問題や課題								
			高止まり		支持力不足		杭体の損傷		打設不能		
	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
追加試験	静的載荷試験	2	5.4%	1	12.5%	1	6.7%	0	0.0%	0	0.0%
	急速載荷試験	1	2.7%	0	0.0%	1	6.7%	0	0.0%	0	0.0%
	衝撃載荷試験	6	16.2%	1	12.5%	4	26.7%	0	0.0%	0	0.0%
	その他	2	5.4%	0	0.0%	1	6.7%	0	0.0%	0	0.0%
	追加試験なし	26	70.3%	6	75.0%	8	53.3%	2	100.0%	3	100.0%
計	37		8		15		2		3		

選択項目	周辺地盤への影響		施工中に生じた問題や課題(続き)								
			既設物		工期		その他		なし		
	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
追加試験	静的載荷試験	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	0	0.0%
	急速載荷試験	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	0	0.0%
	衝撃載荷試験	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	1	8.3%
	その他	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	1	8.3%
	追加試験なし	0	-	0	-	1	100.0%	0	-	10	83.3%
計	0		0		1		0		12		

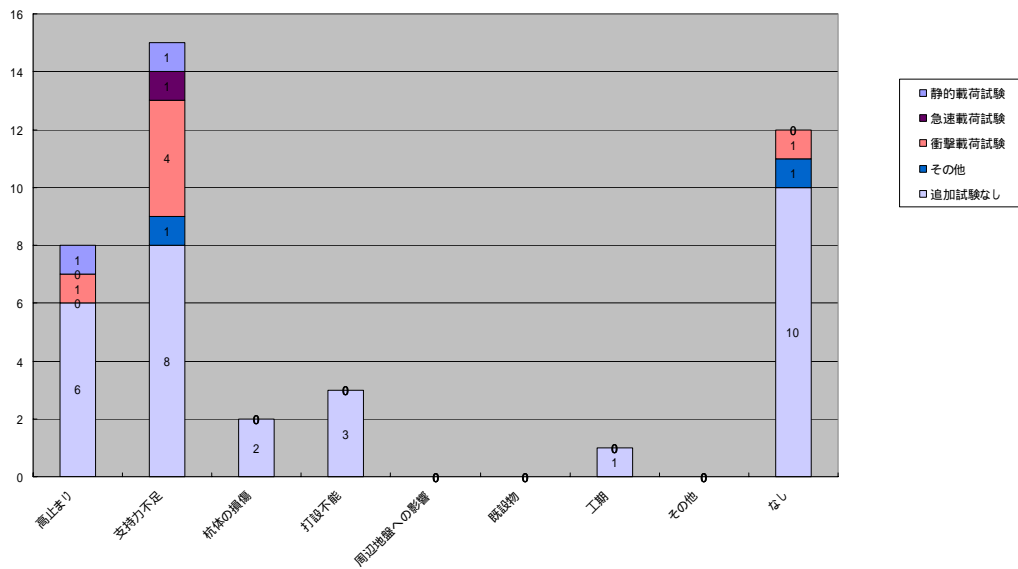


図-A.39 施工中に生じた問題や課題と追加試験の実施状況

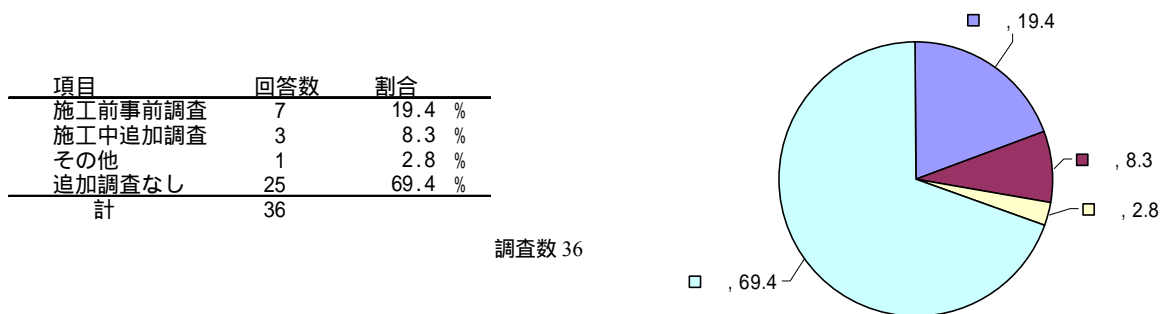


図-A.40 追加地盤調査の実施状況

選択項目	総計		施工中に生じた問題や課題								
	回答数	割合	高止まり		支持力不足		杭体の損傷		打設不能		
			回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
追加地盤調査	施工前事前調査	7	19.4%	2	25.0%	3	21.4%	0	0.0%	0	0.0%
	施工中追加調査	3	8.3%	0	0.0%	2	14.3%	1	50.0%	0	0.0%
	その他	1	2.8%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
	追加調査なし	25	69.4%	6	75.0%	9	64.3%	1	50.0%	3	100.0%
計	36		8		14		2		3		

選択項目	施工中に生じた問題や課題(続き)										
	周辺地盤への影響		既設物		工期		その他		なし		
	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	回答数	割合	
追加地盤調査	施工前事前調査	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	2	16.7%
	施工中追加調査	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	0	0.0%
	その他	0	-	0	-	0	0.0%	0	-	1	8.3%
	追加調査なし	0	-	0	-	1	100.0%	0	-	9	75.0%
計	0	0	0	0	1	0	0	0	12	0	

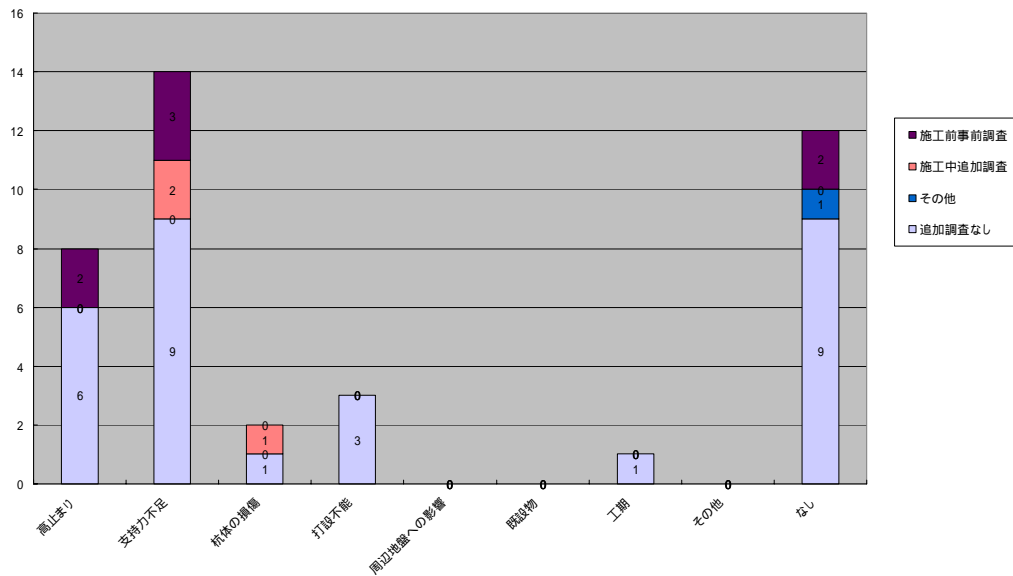


図-A.41 施工中に生じた問題や課題と追加地盤調査の実施状況との関係

項目	回答数	割合
施工前事前調査	7	19.4 %
施工中追加調査	3	8.3 %
その他	1	2.8 %
追加調査なし	25	69.4 %
計	36	

調査数 36

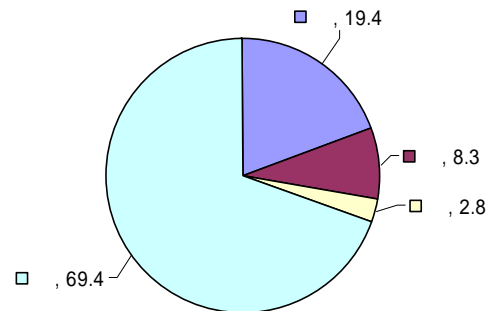


図-A.42 実施費用負担の状況

4) 実施費用負担

設計・施工変更等に伴う費用の負担状況についての回答を図-A.42に示す。設計・施工変更の実施費用負担では、杭材、追加試験費用については発注者負担の場合が多いが、追加地盤調査については受注者負担となる場合が多い傾向にある。

A.3 杭打設における主なトラブルの内訳

A.2(2)b)2) で述べた通り、施工中に発生したトラブルのうち、「高止まり」と「支持力不足」が全体の約8割を占めている。そのため、ここでは「高止まり」と「支持力不足」の2項目に絞り、事前に把握していた状況や想定していた課題を交えて、トラブル発生 の背景と想定される原因につ

いて整理を行った。

(1) 高止まりが生じた事例（8件）の統計処理

全体の傾向としては、以下のようなことがアンケート結果からうかがえる。

高止まりは、地盤条件的として、

- 支持層の不陸や傾斜（これは支持力不足とも表裏の関係にある）
 - 硬い中間層や、表層の障害物
 - 支持層の土質の不均一性（部分的に硬い箇所がある）
- などが原因となって引き起こされる。このうち「硬い中間層や、表層の障害物」については事前調査で明らかになっていることが多く、あらかじめ補助工法を採用することにより高止まりが回避されているケースが多い。このため、実際に高止まりが生じるのは、上述の「支持層の不陸や傾斜」、「支持層の土質の不均一性」の条件があることに加え、「支持層が深い」という不確定要素の増幅要因が重なったケースが多い。

高止まりの予測的中率はさほど高くなく、予測しにくい傾向にある。

高止まりを生じた場合は、杭を高止まりのままで打ち止めた事例が多い（この場合、杭の断面変化点での応力照査や引抜き支持力の照査が別途必要である）。

高止まりが生じても支持力的には問題が少ないので、追加試験（載荷試験など）や追加地盤調査は行われないケースが多い。

a) 事前に把握していた状況、想定していた課題

1) 地盤条件

高止まりが発生した事例について、事前に把握、想定していた地盤条件をまとめると図-A.43 のようになる。事前に「中間層に硬い層が存在する」ことや「表層部に障害物

項目	回答数	割合
支持層が深い	5	38.5 %
支持層が浅い	0	0.0 %
支持層が薄い	0	0.0 %
支持層が傾斜している	1	7.7 %
層が複雑である	1	7.7 %
支持層の土質（風化岩や土丹など）	2	15.4 %
支持層に不陸	3	23.1 %
中間層に硬い層が存在	1	7.7 %
その他	0	0.0 %
なし	0	0.0 %
計	13	

調査数 8、重複回答を含む

がある」ことを把握している場合には、多くの場合で施工計画時にあらかじめ補助工法を採用し高止まりが回避されるので、実際に杭が高止まったケースからはこれらの要因はほとんど見られない。したがって、「支持層の不陸」、「支持層の土質（風化岩や土丹など）」「支持層の傾斜」などの条件と、「支持層が深い」という不確定要素が重なった時に高止まりが発生することが多いという結果になっている。

2) 支持力に関する懸念

図-A.44 に示すように、高止まりが実際に生じた事例で、高止まりを当初から予測していたのは 3 件（発生件数の 4 割弱）に留まり、高止まりはやや予測しにくい傾向にある。当初は「支持力不足」を想定していて施工時に高止まりが生じた事例が 1 件、同じ工事内で高止まりと支持力不足の両方が生じた事例が 1 件ある。

3) 打ち込み工法

図-A.45 に示すとおり、高止まりが生じた事例においても油圧ハンマーによる打ち込みが主流であり、高止まりと打ち込み工法との間に特別な関係は見られない。

4) 補助工法の有無

図-A.46 に示すとおり、高止まりが生じたケースで補助工法を採用していた事例が 6 割程度ある。支持層が深く建て込みにパイプロを併用したの事例が 2 件、障害物除去の先行削孔を行った事例が 2 件、中掘圧入を行った事例が 1 件である。

5) 杭先端補強バンドの採用

図-A.47 に示すとおり、高止まりが生じた事例で杭先端補強バンドを採用していたケースは 9 割近い。2 次アンケート全体では杭先端補強バンドの採用は 7 割程度であり（図-A.29 参照）、高止まりが生じた事例での採用率はやや高いと考えられる。これは、貫入が困難と事前に予測したことが反映されたものと考えられる。

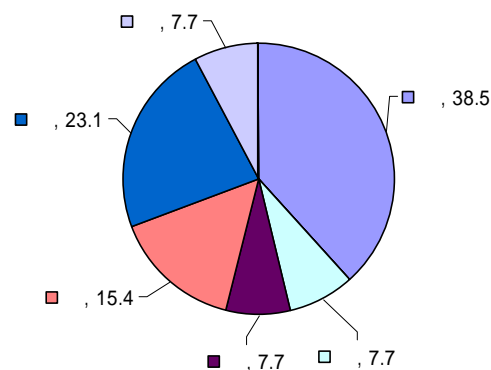


図-A.43 事前に把握または想定していた地盤条件（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
高止まり	3	37.5 %
支持力不足	2	25.0 %
先端閉塞率	0	0.0 %
その他	0	0.0 %
なし	3	37.5 %
計	8	

調査数 8

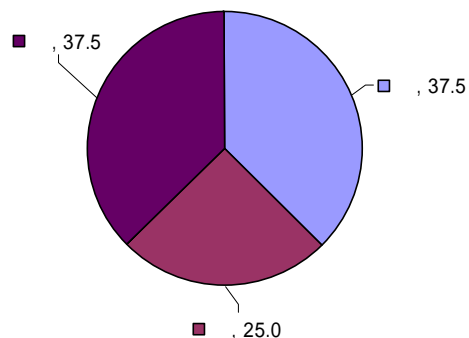


図-A.44 支持力に関する懸念（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
ディーゼルハンマー	1	11.1 %
油圧ハンマー	8	88.9 %
パイプロハンマー	0	0.0 %
その他	0	0.0 %
計	9	

調査数 8, 重複回答を含む

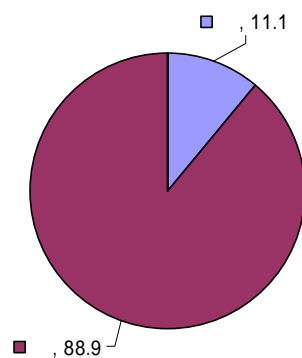


図-A.45 事前に想定していた打ち込み工法（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
補助工法あり	5	62.5 %
補助工法なし	3	37.5 %
不明・未回答	0	0.0 %
計	8	

調査数 8

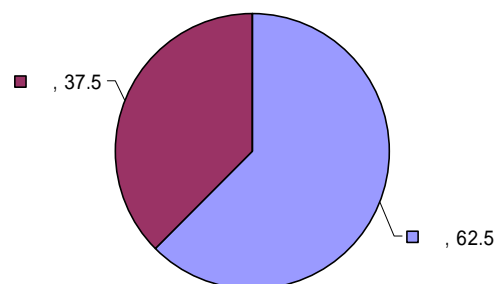


図-A.46 補助工法の有無（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
補助工法あり	5	62.5 %
補助工法なし	3	37.5 %
不明・未回答	0	0.0 %
計	8	

調査数 8

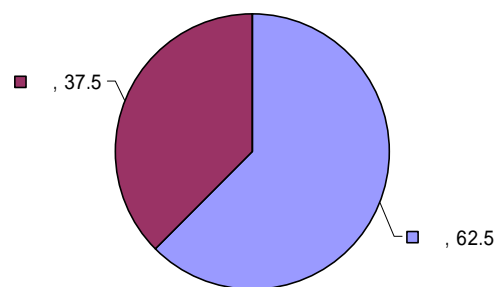


図-A.47 杭先端補強バンドの採用状況（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
杭を高止まりで止めた	6	66.7 %
杭長を延長した	2	22.2 %
杭諸元を変更した	0	0.0 %
十字リブの取り付け	0	0.0 %
その他	1	11.1 %
なし	0	0.0 %
計	9	

調査数 8, 重複回答を含む

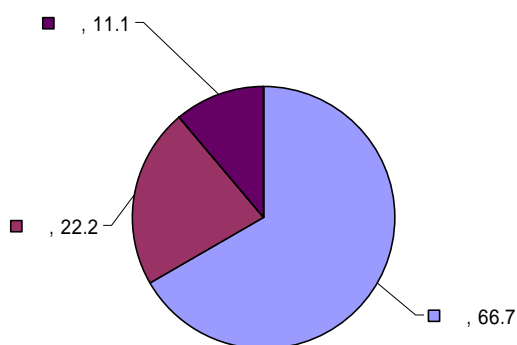


図-A.48 設計変更した項目（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
静的載荷試験	1	12.5 %
急速載荷試験	0	0.0 %
衝撃載荷試験	1	12.5 %
その他	0	0.0 %
追加試験なし	6	75.0 %
計	8	

調査数 8

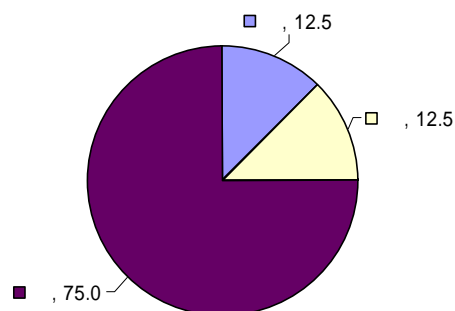


図-A.49 追加調査実施の有無（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

b) 設計・施工変更

1) 設計変更した項目

図-A.48 からわかるように、高止まりを生じた場合には、高止まりのままを杭を止めた事例が多い。高止まりで杭を延長した事例が 2 件あるが、2 件とも同一工事内で高止まりと同時に支持力不足のトラブルも発生した事例である。

2) 追加試験

図-A.49 からわかるとおり、高止まりが生じた事例では

「追加試験なし」が 7 割程度で、高止まりの場合には追加試験を行わない傾向が強い。後述するが、支持力不足の問題が生じた場合は、追加試験実施の割合がこれより高い。

3) 追加地盤調査

図-A.50 からわかるとおり「追加地盤調査なし」が 7 割程度で、前項の追加試験と同様、高止まりの問題が生じた後の追加調査を行わない傾向が強い。

項目	回答数	割合
施工前事前調査	2	25.0 %
施工中追加調査	0	0.0 %
その他	0	0.0 %
追加調査なし	6	75.0 %
計	8	

調査数 8

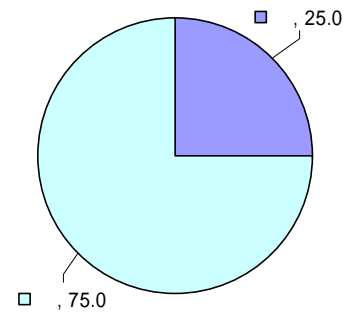


図-A.50 追加地盤調査実施の有無（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
発注者	5	71.4 %
受注者	2	28.6 %
計	7	

調査数 8，無回答 4，重複回答含む

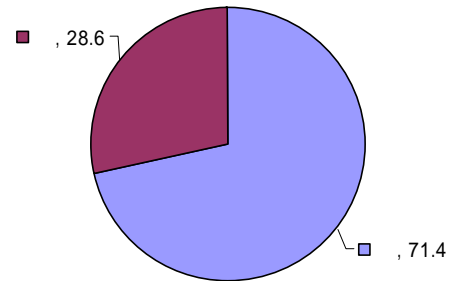


図-A.51 実施費用の負担状況（高止まりが生じた事例のみの集計結果）

4) 実施費用負担

回答数が少ないものの、図-A.51 からわかるとおり、発注者の負担となった事例が約 7 割である。

c) トラブル発生の背景とその原因および対策（高止まり等）

2 次アンケート結果から、「高止まり」等のトラブルの発生とその背景および対策を表-A.9～表-A.10(事例 A～事例 I)に示す。この表は 2 次アンケートのトラブル原因で「高止まり」「打設不能」「杭体の損傷」と回答のあった 12 事例のなかから、9 例をまとめたものである。

下表は、左列より施工前に把握していた状況、発生したトラブル、解決策、発生したトラブルについての背景・所感となっており、左列から右列へ時間が経過するようにまとめた。これは、施工前に把握している状況が似通っていた場合に、今後発生する可能性のあるトラブルに対して、予想および対策が立案し易いように配慮したものである。

(2) 支持力不足が生じた事例（14 件）の統計処理

全体の傾向としては、以下のようなことがアンケート結

果からうかがえる。

支持力不足は、地盤条件的には

- 支持層の不陸や傾斜(これは高止まりとも表裏の関係にある)
- 支持層の土質の不均一性(支持層の土丹の風化度が異なるなど)
- 支持層が薄い(支持層厚が十分でない)

などが原因となって引き起こされる。また実際には、これらの条件に加え、「支持層が深い」という不確定要素の増幅要因が重なっているケースが多い。

支持力不足の予測的中率はさほど高くないが、高止まりの予測的中率よりは高く、比較的予測しやすい傾向にある。これは支持力不足の要因が多岐にわたっていることに起因する結果と思われる。

補助工法として打設時の周面摩擦を低減する工法が採用されることがあるが、支持力不足の原因に結びつくケースもあるので、採用に当たっては支持層を乱さないよう十分注意する必要がある。

表-A.9 高止まり等のトラブルの概略事例 (1/2)

事例	施工前に把握していた状況		発生したトラブル	解決策	発生したトラブルについての背景・所感
	地盤条件	想定した課題			
A	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層が浅い ・支持層の土質 	<ul style="list-style-type: none"> ・高止まり 	<ul style="list-style-type: none"> ・海底下2 ~ 3 m付近に転石が存在したため杭打設不能となった。 打設不能 	<ul style="list-style-type: none"> ・浚渫船により転石を掘削撤去することにより、所定の深度まで杭打設を行った。 	<ul style="list-style-type: none"> ・転石は、この一箇所のみで後の杭打工程には影響なかった。
B	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層が傾斜 ・中間層に硬質層が存在 	<ul style="list-style-type: none"> ・高止まり 	<ul style="list-style-type: none"> ・中間層が想定していた以上に厚く、硬質であったため杭打設不能となった。 打設不能 	<ul style="list-style-type: none"> ・周面摩擦の低減を図る目的で、ハンマグランプにより杭内部の土砂を排土することにより、所定の深度まで杭打設を行った。 	<ul style="list-style-type: none"> ・打込みが困難となった橋脚では、15 m離れた場所でのボーリングデータにより設計されていた。よって、ジャストポイントによる土層構成の確認が必要である。
C	<ul style="list-style-type: none"> ・中間層に硬質層が存在 	<ul style="list-style-type: none"> ・特になし 	<ul style="list-style-type: none"> ・想定支持層が浅かったため、杭が高止まりした。 打設不能 	<ul style="list-style-type: none"> ・打設機械の変更 ・杭は高止まりのまま 	<ul style="list-style-type: none"> ・N値50以上の中間層(シルト質細砂)が存在した。そのため、油圧ハンマーの規格変更を行った。
D	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層が深い 	<ul style="list-style-type: none"> ・特になし 	<ul style="list-style-type: none"> ・60本中の1本で高止まり(約2 m)が発生した。 高止まり 	<ul style="list-style-type: none"> ・照査の結果、特に問題が無かった(支持力確保)ので、杭は高止まりのままとした。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高止まりの原因は、群杭による地盤圧密か、支持層が局所的に浅かったのではないかとと思われる。 ・起伏のある地盤では、支持地盤の確認が必要と思われる。
E	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層が傾斜 ・支持層が不陸 	<ul style="list-style-type: none"> ・高止まり 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持地盤が山の尾根状態の地形であり、部分的に想定支持層が浅く、杭が高止まりした(60本中6本)。 高止まり 	<ul style="list-style-type: none"> ・杭は高止まりのままとし、下杭や継手部に発生する応力を照査したが問題が無かった(現場においては高止まり杭の切断のみ施工)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持地盤の不陸や傾斜等が過年度の工事で発生している場合は、事前に高止まりや支持力不足が発生した場合の対処方法を確認しておく必要がある。 ・地盤調査が、50 ~ 100 mに一箇所の為、打設支持地盤と離れていた。よって、ジャストポイントによる土層構成の確認が必要である。

表-A.10 高止まり等のトラブルの概略事例 (2/2)

事例	施工前に把握していた状況		発生したトラブル	解決策	発生したトラブルについての背景・所感
	地盤条件	想定した課題			
F	・支持層が深い	・高止まり	・支持層が硬質（予想 N 値 150 超）であったため杭打設不能となった（24 本中 1 本）. 高止まり	・照査の結果，特に問題が無かったので，杭は高止まりのままとした．	・前年度の施工実績等の情報から，今回の高止まりはある程度予想できた． ・先端支持力を期待する杭基礎については，高止まりトラブルが多いことから，+0.5D 程度の余裕を持たせた根入れ長の杭設計・製作が望ましい．
G	・支持層が深い ・支持層の土質 ・支持層の不陸	・高止まり	・粘性土（強度大）の影響により，高止まりした．また，鉛直性の確保が難しく 1.0%（全 1300 本）程度の杭頭部損傷が発生した（PC 杭）. 高止まり	・BQ 清算のため，高止まりのままとし，損傷した杭に対しては，補填杭を施工した． ・追加試験として静的載荷試験を行った．	・周面摩擦と打撃エネルギーのロス of 想定に差異があったことと，支持地盤の不陸が大きく変化していた為．
H	・支持層が深い	・支持力不足	・偏心打設や地盤改良範囲近傍での打設により，杭が高止まりした． 高止まり	・照査の結果，引抜きに対して支持力不足が確認されたため，杭打機をランクアップし，再打撃により必要根入れ長を確保した．	・20° 斜杭はリーダーのある杭打船での打設が望ましい．
I	・中間層に硬質層が存在	・支持力不足	・非常に硬い中間層が存在したため，杭が高止まりした（最終杭 1 本のみ）. 杭体の損傷	・打設した杭の損傷（先端付近）が激しいと思われるため，杭頭を切断した．備船の関係上，仮設棧橋を設置して陸上機械により増杭を実施した．	・施工前から地盤の固さを問題としていた． ・この工事では最終杭でのトラブルであり，この事が何らかの影響を及ぼした可能性も否定できない．工程に余裕を持って施工に当たる事が重要であると感じた．

先端補強バンドは杭先端の保護の為に必要になることも多いが、外側にバンドを巻く場合は周面摩擦を低下させる要因となるので、支持力不足につながる場合には外側バンドを採用しない選択も必要である。特に、周面摩擦力の比率の大きい杭の場合には、注意が必要である。

支持力不足を生じた場合は、杭長を延長した事例が多い。その他として、増し杭、補助工法として先端根固めを採用した事例がある。

支持力不足の場合、高止まりの場合よりも追加試験(載荷試験など) を実施した割合がやや増えている。内容的には衝撃載荷試験が多い。これは、杭先端が支持層に到達したにもかかわらず支持力不足が生じた原因を検証するため、または杭を延長した際の支持力確認のために載荷試験が必要になったものと推測される。

支持力不足の場合、追加地盤調査は、高止まり時には無かった「 施工中 (トラブル後) 追加調査 」が増えている。これは、杭長の延長を決定するため、もしくはトラブルの原因となったジャストポイントでの地層情報を得るためと推測される。

支持力不足の場合、杭長を延長するにせよ、材料手配などで現場が止まる期間が長い。まして、増し杭や工法変更を実施しようとするれば、検討期間や協議期間がさらに必要となり、大幅な工期変更や工費増につながる結果となる。

a) 事前に把握していた状況、想定していた課題

1) 地盤条件

事前に把握、想定していた地盤条件についてのアンケート結果を、支持力不足が生じた事例について再集計した結果

項目	回答数	割合
支持層が深い	7	36.8 %
支持層が浅い	0	0.0 %
支持層が薄い	1	5.3 %
支持層が傾斜している	2	10.5 %
層が複雑である	1	5.3 %
支持層の土質 (風化岩や土丹など)	1	5.3 %
支持層に不陸	4	21.1 %
中間層に硬い層が存在	1	5.3 %
その他	1	5.3 %
なし	1	5.3 %
計	19	

調査数 14, 重複回答を含む

果を図-A.52 に示す。図から、「支持層の不陸」や「支持層の傾斜」などの条件に加え、「支持層が深い」という不確定要素の増幅要因が重なった時に、支持力不足が発生することが多いことが読み取れる。

2) 支持力に関する懸念

支持力が発生した事例について、事前に把握、想定していた支持力に関する懸念を集計すると図-A.53 のようになる。「支持力不足」を事前に想定し、施工的にも「支持力不足」が生じた事例が 5 割強である。この割合は「高止まり」を事前に想定できた割合より高く、支持力不足は予測的中しやすい傾向にある。これは支持力不足の要因が多岐にわたっていることに起因する結果と思われる。

3) 打ち込み工法

図-A.54 に示すとおり、支持力不足を生じた事例でも油圧ハンマーによる打ち込みが多く、支持力不足と打ち込み工法との間に特に相関はない。

4) 補助工法の有無

図-A.55 に示したとおり、支持力不足が生じた場合では補助工法を採用していた事例は 7 件で、比率で見ると 5 割とやや少ない。7 件の内訳は、支持層が深く建て込みにパイプロを併用した事例が 1 件、先行削孔や中掘併用の事例が 4 件、ジェット併用の事例が 2 件である。これは補助工法として打設時の周面摩擦を低減する工法が、14 件中 6 件採用されていたことを意味する。この影響が支持力不足に直接結びつくケースもあるので、採用に当たっては支持層を乱さないよう十分注意する必要がある。

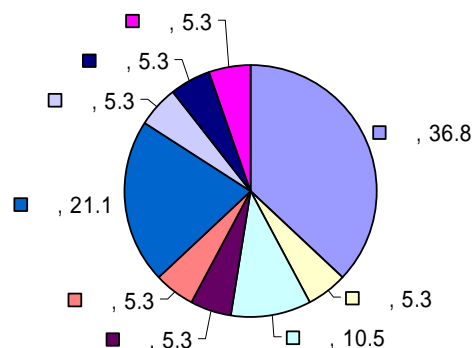


図-A.52 事前に把握または想定していた地盤条件 (支持力不足が生じた事例のみの集計結果)

項目	回答数	割合
高止まり	2	13.3 %
支持力不足	8	53.3 %
先端閉塞率	1	6.7 %
その他	0	0.0 %
なし	4	26.7 %
計	15	

調査数 14, 重複回答を含む

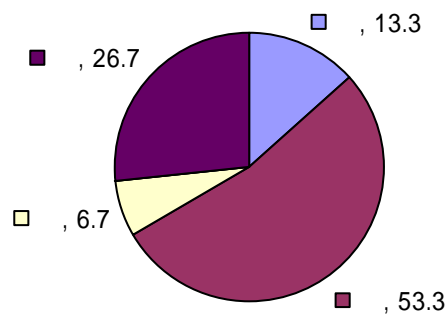


図-A.53 事前に把握または想定していた支持力に関する懸念（支持力不足が生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
ディーゼルハンマー	0	0.0 %
油圧ハンマー	11	78.6 %
パイロハンマー	2	14.3 %
その他	1	7.1 %
計	14	

調査数 14

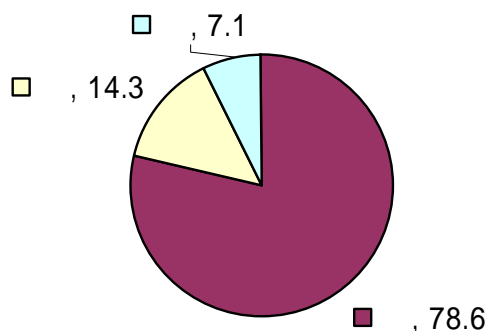


図-A.54 打ち込み工法の比率（支持力不足が生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
補助工法あり	7	50.0 %
補助工法なし	7	50.0 %
不明・未回答	0	0.0 %
計	14	

調査数 14

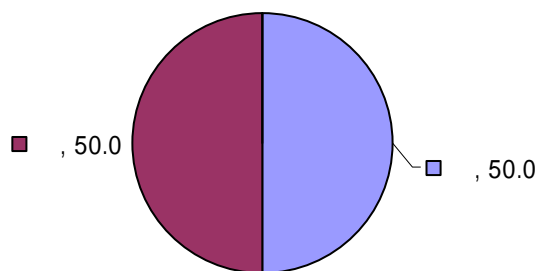


図-A.55 補助工法の有無（支持力不足が生じた事例のみの集計結果）

5) 杭先端補強バンドの採用

図-A.56 に示すとおり, 支持力不足が生じた事例のうち杭先端補強バンドを採用した事例は 80 % 弱であり, 2 次アンケート全体と同程度である。

杭を支持層に確実に打ち込むため, 杭先端の保護する目的で先端補強バンドが必要となることも多いが, 外側にバンドを巻く場合は周面摩擦を低下させる原因となるので,

支持力不足につながる場合には外側バンドを採用しない選択も必要である。特に, 全抵抗に対して周面摩擦力の占める比率の大きい杭の場合には, 注意が必要である。

b) 設計・施工変更

1) 設計変更した項目

図-A.57 に示すとおり, 支持力不足が発生した事例で「杭

長を延長した」ケースが約6割を占める。「その他」の具体例として、増し杭、先端根固めの事例がある。なお、施工前に行った事前調査の結果、杭長を延長した事例も含まれる。

2) 追加試験

図-A.58 からわかるように、支持力不足が発生した事例でも追加試験なしの場合が最も多いが、高止まりの場合よりは支持力不足の方が追加試験を実施した割合がやや増えている。内容的には衝撃載荷試験が多い。これは、杭先端が支持層に到達したにもかかわらず支持力不足が生じた原因を検証するため、または杭を延長した際の支持力確認のためと推測される。

3) 追加地盤調査

図-A.59 より支持力不足が発生した事例においても「追加地盤調査なし」が多いが、高止まりが発生した事例中では見られなかった「施工中(トラブル後)追加調査」が増えている。これは、杭長の延長を決定するため、もしくはトラブルの原因となったジャストポイントでの地層情報を得るために実施されたものと推測される。

4) 実施費用負担

回答数はやや少ないが、図-A.60 によると、支持力不足が発生した場合の費用負担について発注者の負担となった事例が約7割ある。

項目	回答数	割合
あり	11	78.6 %
なし	3	21.4 %
計	14	

調査数 14

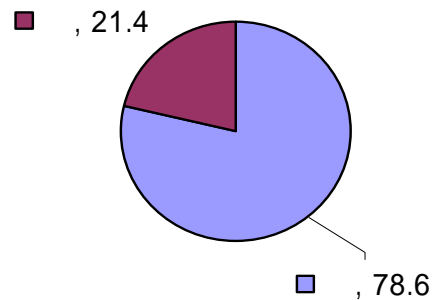


図-A.56 杭先端補強バンドの採用状況(支持力不足が生じた事例のみの集計結果)

項目	回答数	割合
杭を高止まりで止めた	1	6.3 %
杭長を延長した	10	62.5 %
杭諸元を変更した	0	0.0 %
十字リブの取り付け	0	0.0 %
その他	3	18.8 %
なし	2	12.5 %
計	16	

調査数 14, 重複回答を含む

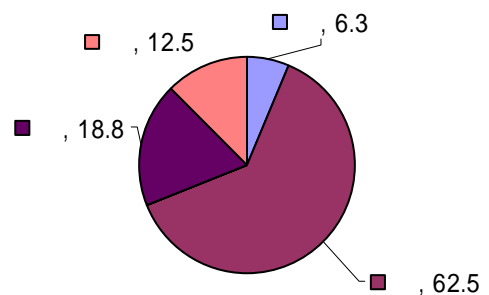


図-A.57 設計変更した項目(支持力不足が生じた事例のみの集計結果)

項目	回答数	割合
静的載荷試験	1	6.7 %
急速載荷試験	1	6.7 %
衝撃載荷試験	4	26.7 %
その他	1	6.7 %
追加試験なし	8	53.3 %
計	15	

調査数 14, 重複回答を含む

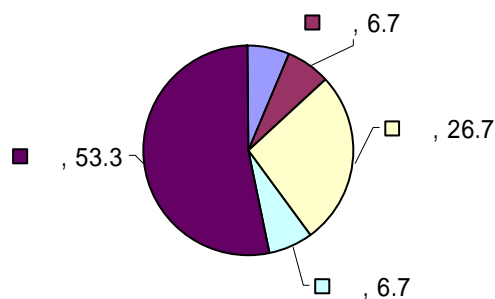


図-A.58 追加試験実施の有無（支持力不足が生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
施工前事前調査	3	21.4 %
施工中追加調査	2	14.3 %
その他	0	0.0 %
追加調査なし	9	64.3 %
計	14	

調査数 14

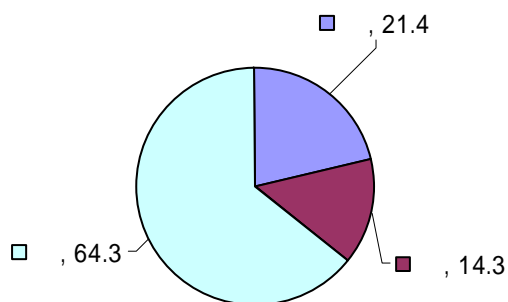


図-A.59 追加地盤調査の有無（支持力不足が生じた事例のみの集計結果）

項目	回答数	割合
発注者	11	73.3 %
受注者	4	26.7 %
計	15	

調査数 14, 無回答 5, 重複回答含む

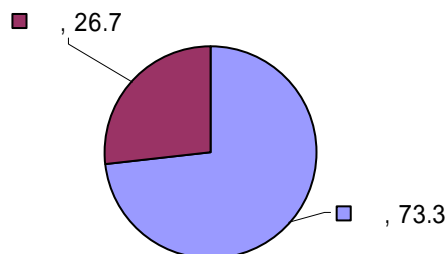


図-A.60 追加地盤調査の有無（支持力不足が生じた事例のみの集計結果）

c) トラブル発生の背景とその原因および対策（支持力不足）

2次アンケート結果から、「支持力不足」のトラブルの発生とその背景および対策を表-A.11～表-A.14（事例～事例）に示す。この表は2次アンケートのトラブル原因で「支持力不足」と回答のあった14事例（杭長を変更するなど事前回避したものを含む）のなかから、12例をまとめたものである。

下表は、左列より施工前に把握していた状況、発生したトラブル、解決策、発生したトラブルについての背景・所

感となっており、左列から右列へ時間が経過するようにまとめた。これは、施工前に把握している状況が似通っていた場合に、今後発生する可能性のあるトラブルに対して、予想および対策が立案し易いように配慮したものである。

付録Aの参考文献

- 1) 菊池喜昭：港湾における杭基礎の変化と変遷，土と基礎，Vol.54，No.6，pp.17-20，地盤工学会，2006。
- 2) パイプロハンマ工法技術研究会：パイプロハンマ設計施工便覧，2003。

表-A.11 支持力不足のトラブルの概略事例 (1/4)

事例	施工前に把握していた状況		発生したトラブル ^(注)	解決策 / 回避策	発生したトラブルについての背景・所感
	地盤条件	想定した課題			
	・支持層は風化泥岩	・特になし	・総打設本数約 100 本 (φ500 ~ 900)の内、最も細いφ500の杭(本中 7 本)で支持力不足が発生した。 支持力不足	・継杭(最長 1.5 m)の実施による再打撃を行なった	・風化泥岩の特徴として、層境部分の強度は弱いのではないか ・軟弱層の直下に支持層がある場合、周面摩擦力が小さく、先端支持力だけでは、設計支持力が確保されないケースがあるのではないか。 ・他の杭に比較して、設計時の支持層への根入れ長が短くなっていた。
	・支持層に不陸 ・土質は礫混じり粘土質細砂	・特になし	・試験杭の支持力が管理基準値の 60% となった。 支持力不足	・試験杭の結果から支持層深度を推定して、継杭の実施による再打撃を行なった。	・図面に添付されている柱状図は、杭の打設深度よりも浅い所のデータである。また、土質調査間隔に比較して、設計杭長が細かく変化していた。 ・近接工事(20 m 離れ)では支持力不足が確認されていない為、支持力についての問題意識が無かった。
	・支持層に不陸 ・支持層は風化岩層	・支持力不足 ・前年度実施した隣接工区で支持力不足が確認されていた	・杭打設前に支持力不足を想定していた。 支持力不足(事前回避)	・事前のH鋼杭による支持層の確認によって、打設前に杭長を 1.5 m 長くするように変更した。	・支持地盤が風化岩層であったため、地盤の不陸が激しく、事前のボーリング調査では支持層の不陸を把握するのは困難である。

注) 事前に回避したトラブルを含む

表-A.12 支持力不足のトラブルの概略事例 (2/4)

事例	施工前に把握していた状況		発生したトラブル ^(注)	解決策 / 回避策	発生したトラブルについての背景・所感
	地盤条件	想定した課題			
	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層に不陸 ・支持層は泥岩 	<ul style="list-style-type: none"> ・高止まり 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層への根入れ不足による、支持力不足（約 50 本中 1 本）が発生した。 <p>支持力不足</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・継杭の実施による再打撃を行なった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・設計時の土質調査箇所が少ないものと思ひ追加調査を実施するが、ピンポイントでの調査が不可能であった為、全ての杭を網羅する事ができなかった。
	<ul style="list-style-type: none"> ・層が複雑で、支持層に不陸あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力不足 ・事前の試験施工により摩擦力の回復を確認済み 	<ul style="list-style-type: none"> ・周面摩擦力が回復していない為、全ての杭で支持力不足（Hiley 式による支持力）が発生した。 <p>支持力不足</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・周面摩擦力が支持力の 70 % を占める為、打設完了後周面摩擦力の回復を待って、衝撃載荷試験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・周面摩擦力の比率が大きい杭では、一連の作業では摩擦力が回復しておらず、動的貫入支持力が得られない場合がある。設計支持力を事前に良く把握した上での施工計画立案が大切である。 ・確実な判断には、追加試験が必要である。
	<ul style="list-style-type: none"> ・NF 層直下の中間砂層に打ち止め 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・当初の設計時から計画されていた試験杭に対する衝撃載荷試験結果より支持力不足を確認した。 <p>支持力不足</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・当初の設計段階から、試験杭の結果で継杭の長さを決定する事となっていた。工期も鋼管杭の再発注期間が考慮されていた。継杭の実施による再打撃を行なった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・当初より、NF 層の直下に打ち止めることは、支持力不足が懸念された。しかし、その下の層を支持層とした場合には、杭長が十数 m 程度伸びてしまう為、経済性を考慮して試験施工を行い、中間層の支持力が NG の場合は、杭を伸ばす事を前提として施工した。
	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層に不陸 ・土層は凝灰岩、凝灰質砂岩、凝灰質シルト岩 	<ul style="list-style-type: none"> ・高止まり ・支持力不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層の不陸によって高止まりと支持力不足が発生した。 <p>支持力不足 & 高止まり & 杭体の損傷</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・高止まりの杭を切断し、それを支持力不足の杭に継杭して再打撃を行なった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層の不陸に加え、支持地盤の軟岩の組成の違いが、支持力の発現深度へ影響を与えた事も考えられる。

注) 事前に回避したトラブルを含む

表-A.13 支持力不足のトラブルの概略事例 (3/4)

事例	施工前に把握していた状況		発生したトラブル ^(注)	解決策 / 回避策	発生したトラブルについての背景・所感
	地盤条件	想定した課題			
	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層が深い (GL-50) ・中掘り最終打撃工法 ・周面摩擦力が小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・長さ 50 m 程度の杭を中掘り最終打撃で施工したところ、支持力の不足する杭が発生した。 <p>支持力不足</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・継杭による試験施工を行なったが支持力が確保できなかった。 ・噴射工法により先端根固めを行なった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・周面摩擦力が殆ど考慮できない軟弱層の下に支持層があり、その近辺まで中掘りを実施した為、支持層が緩んだ可能性がある。 ・支持層の土質が影響し、先端閉塞効果が得られなかった可能性がある。 ・あまり実績の無い場所での施工では、事前の試験杭を実施するのが良い。
	<ul style="list-style-type: none"> ・中間層が支持層 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力不足 ・工期が無く、施工中の継杭は不可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・杭打設前に支持力不足を想定していた。 <p>支持力不足 (事前回避)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・事前に設計支持層に対してパイプロ + H 鋼による支持力探査を実施して、杭長を延長した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・事前の土質調査の充実が大切である。 ・特に時間が無い場合は、パイプロハンマー + H 鋼により支持層としての適正を判断するのも良い方法であると思われる。
	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層が深い (-41) ・周面摩擦力が大きい ・大口径 (φ1800) 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・周面摩擦力が回復していない為ほぼ全ての杭で支持力不足 (Hiley 式による支持力) が発生した。 <p>支持力不足</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・パイプロ + 最終打撃工法で、パイプロ打設後 3 日間放置してからハンマー打撃とする事で支持力確認した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・周面摩擦力の比率が大きい杭では、一連の作業では摩擦力が回復しておらず、動的貫入支持力が得られない場合がある。設計支持力を事前に良く把握した上での施工計画立案が大切である。

注) 事前に回避したトラブルを含む

表-A.14 支持力不足のトラブルの概略事例 (4/4)

事例	施工前に把握していた状況		発生したトラブル ^(注)	解決策/回避策	発生したトラブルについての背景・所感
	地盤条件	想定した課題			
	<ul style="list-style-type: none"> ・特殊工法(ジェット+パイプロ) ・近接工区の支持力不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・杭打設前に支持力不足を想定していた。 <p>支持力不足(事前回避)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・パイプロハンマー + ウォータージェット工法をテグメス工法に変更した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・パイプロ+ジェット工法では、周面支持力が回復せず、支持力が期待できない場合がある。同様の工法を実施している隣接工区にて、支持力不足が確認された為、施工前にテグメス工法を追加。周辺地域での類似工事の実績は、できる限り収集分析し、施工計画へ生かす事が大切。
	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層が深い 	<ul style="list-style-type: none"> ・支持力不足 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリングデータが施工対象地域から離れていたため、支持層天端高の相違による杭の支持力不足が懸念された。 <p>支持力不足(事前回避)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・工期が厳しかったため、ジャストボーリングの代わりに前工種の SCP の施工管理データより支持層の高さを推定し、そのデータをもとに事前に杭長を変更(長く)した 	<ul style="list-style-type: none"> ・非常に深く厚い軟弱層が続いて、急激に硬い支持層へと変化する地層であったため、支持層天端高を推定するにあたり、ボーリングの代わりに SCP 施工管理のデータが活用できた。

注) 事前に回避したトラブルを含む

付録B トラブル時の対策工とその効果

B.1 試験施工後の対策

(1) 試験杭および本杭流用試験杭施工後の支持力不足の場合

支持層に不陸がある場合や支持層が予想より軟らかい場合には、支持力不足が発生することがある。

支持力不足が発生した際の対処方法として、杭の手配が容易な場合や杭の板厚および仕様が特殊（塗装、重防食等）でない場合は、杭を継ぎ足し、杭長を延長する方法がよく用いられている。その際、現場で杭を継ぎ足す場合は、現場継手部の応力照査が必要となる。

一方、ジャケット杭のような杭の板厚および仕様が特殊（塗装、重防食等）で杭長を延長できないケースでは、フーチング基礎杭の場合は増し杭で、栈橋杭の場合は先端十字リブ等の先端加工杭への変更で対応するのが一般的である。なお、十字リブ等の先端加工杭の取り付け延長は、既往の文献¹⁾²⁾³⁾⁴⁾等から推定すると、最低長として杭径 (D) 以上ないと効果が現れていない。また、4章や文献⁵⁾⁶⁾等によれば杭内周面の摩擦力が杭先端閉塞効果に有効に働く範囲は杭先端から $2D$ 部分であると言われている。このようなことから、先端支持力を向上させるためには、最低でも杭径の2倍 ($2D$) 以上取り付けを推奨する。当然、この十字リブ等の先端加工部分は、支持層に全長打設することが必要である。十字リブの設置例を図-B.1、写真-B.1に示す。なお、これらの対策を実施した杭については、改めて載荷試験を実施して発現支持力を確認する必要がある。

いずれの対応策を取る場合でも、設計の見直しや、施工管理方法を修正する必要がある。

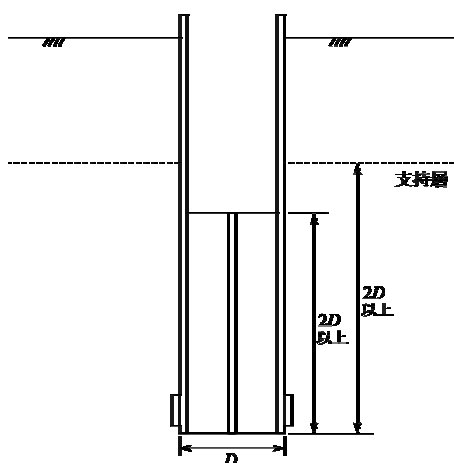


図-B.1 十字リブの設置例



写真-B.1 十字リブの設置例

(2) 試験杭および本杭流用試験杭施工後の高止まりの場合

中間層の杭周面摩擦や先端支持力が大きい場合、支持層が浅い場合、想定より硬い場合などで杭が高止まりすることがある。その対応策として、施工法を工夫し設計どおりの根入れ長さまで打ち込む場合と、高止まりした時点で打ち止める場合がある。

ジャケット杭などのように杭の板厚および仕様が特殊（塗装、重防食等）な場合や、水平力による上杭板厚の必要長さが決まっている場合は、高止まりした状態で打ち止めることが出来ないことが多い。そのため、施工方法を工夫して貫入させることが必要となる。

施工方法の工夫には、以下の方法がある。

- ハンマーを大きくする。その際は、杭の破損について検討する必要がある。
- 事前にプレボーリングにより先行掘削を行って、周面摩擦力、先端支持力を低下させた後、打撃にて貫入する。この際は、地盤を緩めているので杭の支持力の再検討が必要となる。

いずれの場合も、追加ボーリングによる土質状況の再確認を行い、支持力の再検討とともに先行掘削など地盤を緩める工法の採用した場合は載荷試験による支持力の確認が必要となる。

支持層が浅い場合や想定より硬い場合などで杭が高止まりしたときは、高止まりした部分を切断する方が多く採用されている。この場合、追加ボーリングによる土質状況の確認や支持力確認を行うとともに、設計の根入れ長が不足する場合には増し杭等を検討する。水平耐力を考慮して杭頭部の板厚を増している杭の場合には、切断した長さだけ板厚が不足するため、設計によって再検討する必要がある。検討の結果、杭頭部の剛性が不足する場合は、その部分の管内土を掘削排出して、コンクリートの中詰めして補強する方法が行われている。

また、仕様が特殊（塗装、重防食等）で、施工方法の工夫でも打設困難な場合は、特殊仕様部分を切断して現場にて複合被覆（ペトロラタムライニング + FRP カバー）など

を施して対応する場合もある。

B.2 本杭施工後の対策（試験施工無しの場合）

(1) 本杭施工後の支持力不足の場合

施工工期の関係や小規模の工事では、試験施工無しで杭施工をする場合がある。その際、施工管理方法により杭施工が終了した時点で支持力不足が判明することがある。

このようなケースの対策方法としては、杭の手配が容易な場合、杭の板厚および仕様が特殊（塗装、重防食等）でない場合は、杭を継ぎ足し杭長を延長する方法がよく用いられている。この方法で、現場で杭を継ぎ足す場合は、現場継手部の応力照査が必要となる。

また、継ぎ足しに時間を要したときは、杭周面摩擦力のセットアップが完了している場合がある。このような状況になったときは、まず杭周面摩擦を低減するために、ハンマー落下高を低落下高に設定して杭が5～10cm貫入するまで打設した後、打ち止め管理状態で施工すると杭の損傷を起こさずに施工できる。ただし、杭長が長い場合は、杭周面摩擦力のセットアップによりハンマー打撃力が杭先端まで伝達できなくなり施工不能となることが多いので、継ぎ足し作業は迅速に行う必要がある。

一方、杭の板厚および仕様が特殊（塗装、重防食等）で杭長を延長できない場合は、フーチング基礎杭の場合は増し杭で対応することが多い。また、栈橋杭の場合は、杭周面をボーリングマシンで地盤改良して周面摩擦力を向上させて対応する方法や、杭先端部分を地盤改良（ジェットグラウト工法）した後、杭内部も固めて杭先端支持力を増大させる方法で対応したケースがある。

なお、これらの対策を実施した杭については、改めて載荷試験を実施し、発現支持力を確認する必要がある。

(2) 座屈した場合

油圧ハンマーの最大ハンマー能力で長時間施工する必要があるときに、杭頭部が座屈する場合がある。この場合には、杭頭部の座屈対策が必要となる。杭頭座屈の原因を大別すると、ハンマー容量の過大によるもの、過剰打撃によるもの、偏打によるもの、局部応力によるものに分けられる。

座屈対策としては、杭施工が継続中の場合は、図-B.2、写真-B.1 に示すよう杭頭補強を実施して対応する必要がある。

支持層が風化岩等の硬質地盤で傾斜していたり、土中に転石、玉石等が存在したりする場所での杭施工のときは、杭先端が硬質地盤や転石、玉石に片当たり状態となり座屈

する場合がある。この場合、杭打設中のリバウンド量が急に小さくなる（ほとんどゼロとなる）とともに貫入量が急に大きくなるので、このような状況になったら杭先端が座屈しているものと判断して、杭打ちを即時中断する必要がある。対策としては、杭先端補強バンドがない場合は所定の補強バンドの取り付け、有る場合は内バンドを追加するなどの補強が必要である。また、API基準⁶⁾に沿って杭先端板厚の1.5倍の板厚を杭先端部分に杭径以上厚くする方法で対応する場合もある。その他、このような地盤を事前にプレボーリングして、地盤を緩めてから杭を施工する場合もある。この場合は、地盤を緩めることによる支持力不足の懸念があるため、載荷試験により杭支持力の確認が必要である。

杭先端が座屈した杭は、引き抜くか、引き抜けない場合は近くに増し杭を打設して対応することが多い。通常はパイロハンマーで引き抜くが、引き抜けない場合は、打設杭より一回り大きい鋼管径にジェット配管を取り付け、打設杭周辺地盤を緩めてパイロハンマーで抜く。その他、ジェット配管を取り付けたH形鋼を杭周辺に打設して杭周辺地盤を緩めて引き抜く方法が用いられる場合もある。

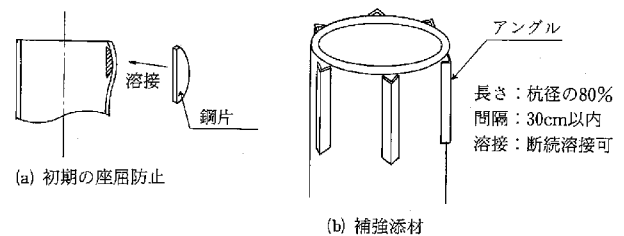


図-B.2 杭頭補強例



写真-B.2 杭頭補強の例

B.3 高止まりの場合の原因および対策の具体例

(1) 栈橋基礎杭の高止まりによるハンマーの変更事例 (鋼管杭, 中間に硬い層)

a) 概要

本事例では、横栈橋の直杭および斜杭の打込み杭の事例で、中間の地層が予想以上に硬く、杭打設中に数本の杭が貫入不能になった。

1) トラブルの発生した杭

鋼管杭で、杭径は直杭 ϕ 1400 mm, 斜杭(傾斜角 15 度) ϕ 1300 mm である。標準断面を図-B.3 に示す。

2) 地盤概要

施工地点の水深は 15 ~ 6 m で、 N 値 50 以上の支持層が DL-40 m 程度のところにある。柱状図を図-B.4 に示す。地層の特徴は以下のとおりである。

上層のシルトを除くと良好な砂質土と砂質シルト層が続いていて、それぞれ N 値が 30 以上、20 以上ある。

上層のシルト層の下に N 値 > 50 の砂礫層があり、そこから支持層に至るまでの間に N 値 > 50 の砂れき層が 2 箇所ある。

支持層はそれほど傾斜しておらず、DL-40 m のところにある。

3) トラブルの発生状況

D.L. -23 m 付近の地盤は図-B.4 に示したとおり N 値 > 50 の砂れき層である。また、設計では D.L. -40 m 以深の支持層周辺の N > 50 の層への根入れ長さが 4 m 程度あった。それらの値を考慮して波動理論による鋼管杭の打込み性能検討を行い、ハンマー規格を求めた。そのハンマーにより施工時の杭頭部座屈照査を行い最終的なハンマー諸元を決定し施工を開始した。しかし、施工中、所定の深度までの打設が困難な杭があった。

b) トラブルの原因

支持層に達するまでの土質は比較的良質で、しかも中間に N 値の大きな砂礫層が存在することにより、当初計画していた油圧ハンマーでは貫入が不可能になった。具体的には以下のとおりである。

一般に、鋼管杭打設では打撃エネルギーの過大による杭頭部座屈を考慮してハンマー規格を設定する。本施工においても杭頭部座屈の照査を行い、鋼管杭重量と貫入抵抗値によるハンマー規格選定表(図-B.5 参照)から ϕ 1300 mm の杭重量約 20 t に着目し、10 ~ 12.5 t のハンマーを選定した。

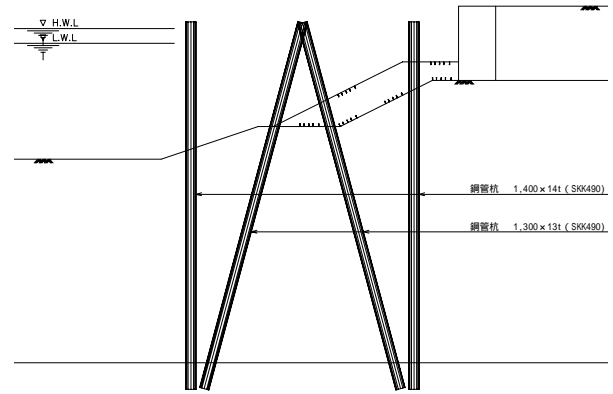


図-B.3 標準断面図

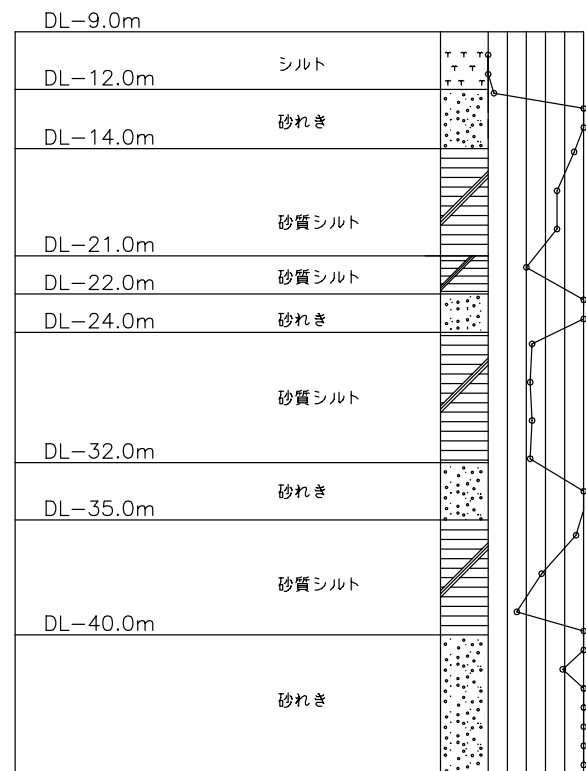
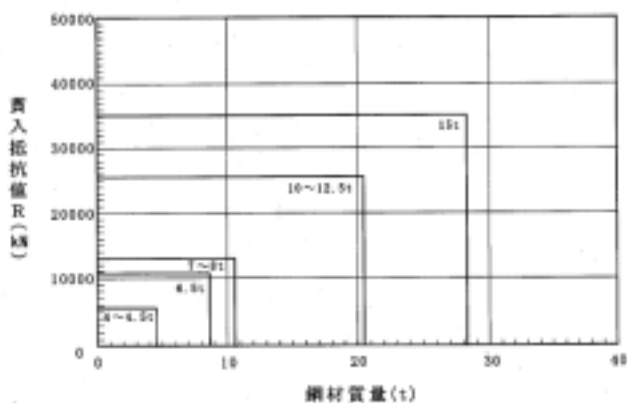


図-B.4 ボーリング柱状図

しかし、施工途中で貫入抵抗力が想定値より大きくなり、1 打撃当りの貫入量が小さくなった。1 打撃当りの貫入量が小さくなると、打ち止めに至るまでの打撃回数が非常に多くなり、施工時に鋼管杭の機能を損ねる可能性がある。そこで、それまでの施工により得られたラムストローク～貫入量の結果も考慮して対策案を検討した。

c) トラブルの対策

杭頭部座屈応力度に余裕があったため、ハンマー規格を 1 ランク上の 15 t クラスに変更して施工を再開した。それにより所定の根入れ長まで打設することができたが、依然として高止まりする杭が 2 本あった。Hiley 式による動的支持力が得られていたため、協議の結果、高止まりした杭の支持力は確保できていると考え打ち止めすることとした。



油圧ハンマーの規格選定境界値

ハンマー規格	規格選定境界値		備 考
	鋼材質量(t)	貫入抵抗値(kN)	
4~4.5 t	4.58	5,700	
6.5 t	8.71	10,900	
7~8 t	10.6	13,100	
10~12.5 t	20.4	25,600	
15.0 t	28.2	35,100	

注) N値30以上で層厚3m以上の中間層を打抜く場合は、1ランク上のハンマー規格を選定する。

図-B.5 油圧ハンマーの規格選定

d) トラブルから得た教訓

比較的N値の大きな層に鋼管杭を打設する際は、杭頭座屈等鋼管杭の健全性を確保できる範囲で大きなハンマーを選定した方が良いものと思われる。

ハンマー規格を選定するため、波動理論により鋼管杭の打込み性能を検討する際は、N値を用いて周面摩擦力、先端支持力を計算する。なお、N値のみによる打ち込み性能の判定には限界があるので、周辺の既往の測定記録なども参考にするとよい。その結果、ハンマー規格に余裕の無い場合は1ランク大きなものを選定するようにする。しかし、杭頭座屈等施工中の杭の損傷にも十分な配慮が必要である。

(2) 支持層の不陸により高止まった例

a) 概要

本事例では、鋼管式防波堤の斜杭の打込み杭(図-B.6参照)の事例で、支持地盤が傾斜している地形での杭打設中に、数本の杭が高止まりした(最大数m)。

1) トラブルの発生した杭

φ1000 ~ 1200 mm, l=60 ~ 75 mの鋼管杭である。

2) 地盤概要

対象地点は水深約10mで、軟弱な厚い粘性土層の下部に、N値50以上の砂質の支持層がある。地層の特徴は、支持層が深く(C.D.L. -40 ~ -65 m)、支持層が傾いているこ

とであり、提示された隣接するボーリング(間隔約90m)の間で、支持層深度が25m程度変化していた。ボーリング柱状図を図-B.7に示す。

b) トラブルの発生状況

防波堤法線方向に支持地盤が次第に下がり、最長の杭長は約75mとなる。-40m付近までがN値の低い粘性土層で杭が自沈する斜杭であるので、途中での継杭を行うことができず1本杭での施工となった。パイプロハンマーを用いて所定の位置へ建て込み、支持層への最終打撃は油圧ハンマーを用いて施工した。

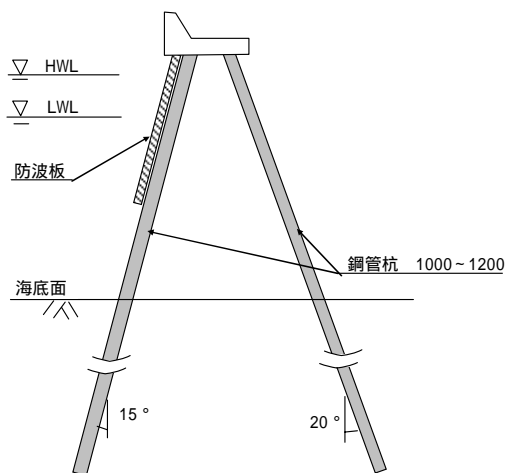


図-B.6 鋼管防波堤断面図

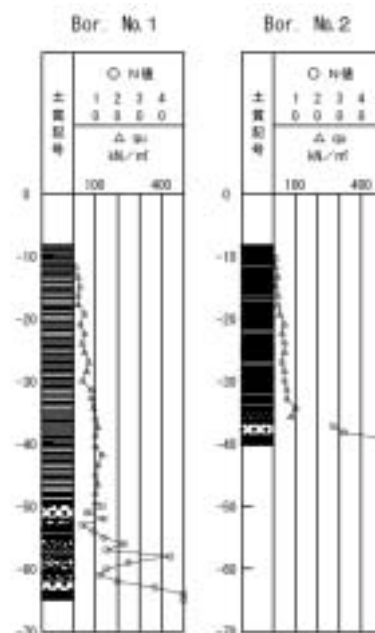


図-B.7 ボーリング柱状図

この工区での打設杭 60 本の内、後列杭 6 本について高止まり（最大数 m）が発生し、前列杭では 20 数本の支持力不足（継杭長で約 2 m）が発生した。

鋼管杭は 1 本杭ではあるが上杭と下杭で肉厚変化があったので、高止まりした杭の継手溶接部に作用する曲げモーメントが想定より大きくなり、肉厚の薄い下杭の応力が許容以内に収まるかが問題になった。

c) トラブルの原因

支持層が深く、傾斜していることは当初から予想されていた（図-B.8 参照）。当初に提示されたボーリング間隔が離れており、支持層の傾斜が法線方向に一様でなく、中間部分にある小さな尾根状の起伏が把握されていなかったことが後列杭の高止まりの主な原因である。

また支持層が法線方向のみならず、部分的には法線直角方向にも傾斜していたことが、前列杭の根入れ不足の原因であった。

d) トラブルの対策

高止まりした杭の継手溶接部に掛かるモーメントが大きくなると予想されたが、組杭としての設計を照査したところ、土中部の発生モーメントが小さく、断面変化位置が数 m 程度変化しても設計上の問題なしという結果が得られた（肉厚が外径の 1/100 の最小厚で規定されていたため応力に余裕があった）。後列杭であるため、引き抜き支持力には問題が無く、高止まり杭は切断処理した。

前列側の支持力不足の杭については、長めの杭を試験杭として根入れ不足長さを確認し（約 2 m）、頭部を現場溶接で継ぎ杭することなどで対処した。

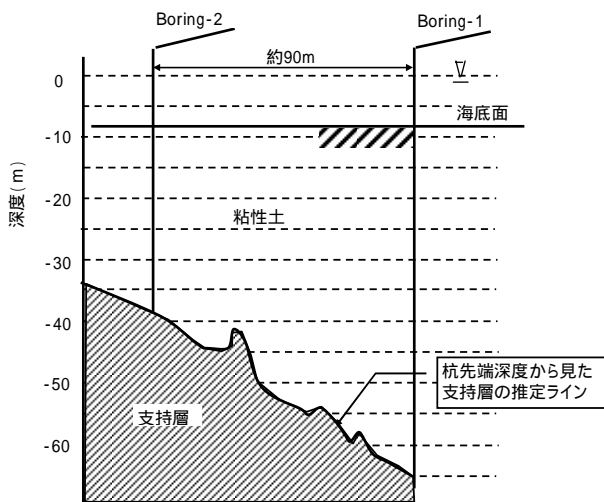


図-B.8 支持層の推定ライン（後列杭）

e) トラブルから得た教訓

既存のボーリング間隔が広がったり、支持層の傾斜が大きかったりする場合には、中間部での不陸を確認するための追加ボーリングが必要である。しかし、図-B.8 の場合のように、局所的に支持層が変化しているとなると、中間地点であと 1 本の追加ボーリングが実施されたとしても、局所的な高止まりは予想できないこともある。

ボーリングは通常、防波堤の法線中心線で行われるが、今回のように長尺の斜杭の場合には杭の先端地盤が中心線より 25 m 程度も離れてしまうことがある。このため、法線直角方向にも傾斜があれば、前列杭と後列杭では杭先端が 50 m も離れてしまう。このことを考慮して、法線直角方向の支持層の傾斜も事前ボーリングで確認するのが望ましい。

無駄に終わってしまう可能性もあるが、支持地盤の不陸や傾斜が予想されたり、過年度の工事で高止まりや支持力不足が発生したりしている場合には、事前に高止まりや支持力不足が発生した場合の対処方法を確認しておくのが望ましい（工事がストップすると、工期的にも工費的にも影響が大きい）。

(3) 前工事の情報利用による高止まりの例

a) 工事概要

本事例は、埋立護岸に接続する栈橋工事において、既施工の地盤改良工事の施工管理データから支持層天端を推定して杭長を変更し、トラブルなく工事を終えた事例である。

1) 工事概要

埋立護岸に接続する栈橋築造工事で、使用されている鋼管杭は $\phi 1,500 \text{ mm}$ 、 $t = 19 \sim 22 \text{ mm}$ 、 $l = 41.0 \sim 41.5 \text{ m}$ の直杭である。栈橋断面を図-B.9 に示す。

2) 地盤概要

施工範囲から離れたボーリングデータ（図-B.10 参照）により設計されていた。そのデータによると、海底面から支持層まではシルト質粘土で非常にやわらかい単一層、支持層は粒子が均一な粗砂で非常に密な砂層で、 N 値 50 以上、支持層天端高は -36.9 m である。支持層前後で N 値に極端に変化があるため、支持層が分かりやすい地盤であった。

b) 事前に予想されたトラブル

施工範囲から離れたボーリングデータにより設計されていたこと、設計上杭の根入れ長が $1D$ 以上と規定されていたことから、杭の高止まり、杭長不足等の杭長に関するトラブルが予見された。

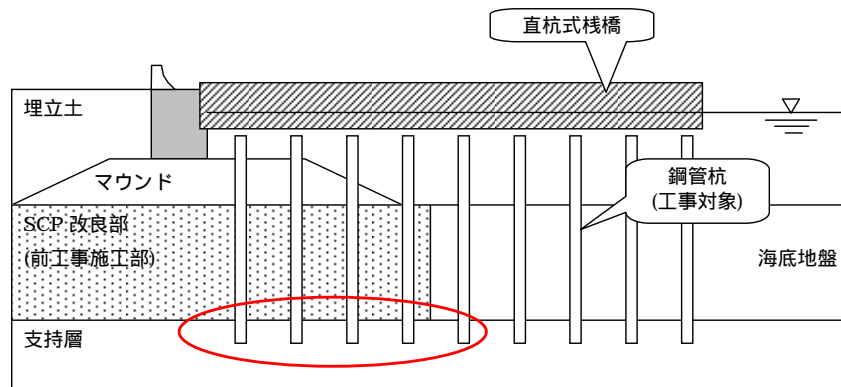


図-B.9 施工断面

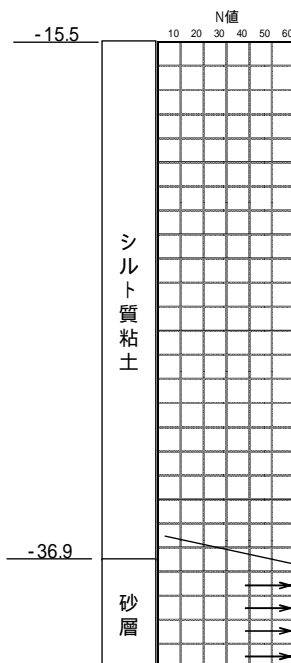


図-B.10 ボーリングデータ

また、SCP改良層に杭を打設すること、支持層N値が50以上と非常に硬いことから、杭の高止まり及び杭頭の損傷が懸念された。

c) トラブル対策

1) 杭長の変更

ジャストボーリングを実施する工程的余裕がなかったこと、支持層以浅の地盤が非常にやわらかく支持層天端が判別しやすい地盤であったことから、本工事に先立ち施工されたSCP改良工事の施工管理データであるSCP杭着底深

度より支持層天端の確認を行った。SCP杭着底深度を図-B.11に示す。

ボーリング結果と施工範囲内のSCP杭着底深度を比較すると、ボーリング結果で支持層天端高が-36.9mであるのに対し、SCPの着底深度は-37.3m～-37.6mであり、40cm～70cmの差異(支持層が深い)が生じていることが分かった。設計杭長のまま打設して1D以上根入れすると、杭長が不足することが予見された。

そこで、SCP杭着底深度を参考に、杭長を0.5～1.0m延長することを施主と協議し了承を得た上で、杭長を変更して杭打設を行った。施工の結果、所定の根入れを行い、設計支持力を確保することが出来た。

2) 地盤条件を考慮したハンマーの選定

SCP改良後の地盤強度を考慮してハンマーを選定して杭を打設し、無事打設終了した。打設不能時の対策として、1ランク上のハンマーを用意したが、使用しなかった。

3) 杭頭補強バンド

打設不能時の対策として1ランク上のハンマーに対応した杭頭補強バンドを施し、杭頭を損傷させることなく無事施工を終了した。

d) トラブルから得た教訓

所定の根入れ長を確保することが出来たので、杭長の変更は妥当であったと考える。

追加ボーリングを実施することなく、他工事の施工管理結果を活用して、杭長の変更根拠とした事例である。このように追加費用をかけなくても前工事の施工情報を活用することで、杭長不足というトラブルを未然に防いだ事例であり、今後の工事でも参考に出来る。

37.6	37.5	37.5	37.4	37.6	37.5	37.4	37.3	37.2	37.1	37.0	37.0	36.9	36.9	36.7	36.7	36.8	36.8	36.7	36.8	36.9	36.8	36.7	36.8
37.7	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.2	37.2	37.2	37.0	36.9	36.9	37.0	36.8	36.7	36.8	36.9	36.7	36.8	36.9	36.8	36.8	36.8
37.6	37.4	37.4	37.4	37.4	37.3	37.3	37.2	37.1	37.1	37.0	36.9	36.7	36.9	36.8	36.8	36.7	36.8	36.8	36.9	36.9	36.9	36.8	36.9
37.6	37.5	37.5	37.4	37.4	37.3	37.3	37.2	37.2	37.0	36.9	37.0	36.8	36.9	36.8	36.8	36.6	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.9
37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.4	37.3	37.4	37.0	37.0	36.9	37.1	36.8	36.7	36.8	36.8	36.8	36.8	36.7	36.8	36.9	36.9	36.7	36.9
37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.3	37.2	37.2	37.1	36.9	36.8	36.9	36.8	36.8	36.8	36.8	36.7	36.8	36.8	36.7	36.8	36.8	36.6	36.8
37.4	37.4	37.4	37.5	37.3	37.3	37.2	37.1	37.1	36.8	36.7	36.8	36.8	36.9	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.8	36.8
37.4	37.5	37.4	37.6	37.4	37.3	37.1	37.1	37.0	36.8	36.8	36.7	36.8	37.0	36.7	36.8	36.7	36.8	36.7	36.9	36.9	36.7	36.9	36.8
37.5	37.5	37.4	37.4	37.4	37.5	37.2	37.1	37.1	36.9	36.8	36.7	36.7	36.9	36.7	36.7	36.8	36.7	36.7	36.9	36.9	36.8	36.9	36.8
37.5	37.5	37.5	37.7	37.3	37.4	37.3	37.0	37.0	37.0	36.9	36.7	36.7	36.8	36.7	36.7	36.8	36.7	36.7	36.9	36.9	36.8	36.8	36.7
37.5	37.5	37.5	37.6	37.4	37.3	37.2	37.3	37.2	36.8	36.7	36.7	36.7	36.8	36.7	36.7	36.8	36.7	36.8	36.8	36.8	36.9	36.8	36.9
37.5	37.5	37.4	37.5	37.4	37.3	37.2	37.1	37.1	36.9	36.8	36.8	36.7	36.8	36.6	36.7	36.7	36.7	36.8	36.9	36.7	36.9	36.9	36.8
37.5	37.4	37.4	37.5	37.3	37.3	37.3	37.0	37.1	36.9	36.8	36.7	36.6	36.7	36.6	36.5	36.7	36.7	36.7	37.0	36.8	36.8	36.9	36.8
37.4	37.4	37.4	37.4	37.3	37.2	37.1	37.1	37.0	36.8	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.8	36.7	36.7	36.8	36.8	36.8	36.7
37.5	37.5	37.4	37.3	37.2	37.3	37.4	37.1	37.0	36.9	36.8	36.7	36.7	36.7	36.7	36.6	36.8	36.7	36.7	36.9	36.9	36.8	36.8	36.8
37.5	37.4	37.3	37.3	37.3	37.2	37.2	37.2	37.0	36.9	36.7	36.8	36.6	36.6	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.9	36.9	36.8	36.8	36.9
37.4	37.4	37.3	37.3	37.2	37.2	37.1	37.1	37.0	36.8	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.6	36.7	36.7	36.7	36.8	36.9	36.8	36.8	36.8

図-B.11 SCP 着底深度

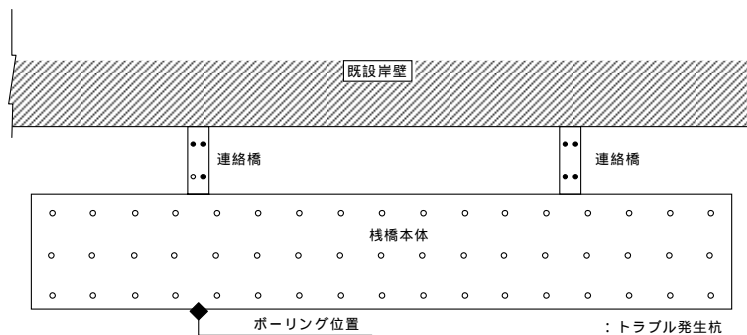


図-B.12 平面図

(4) 風化泥岩により高止まった例

本事例は、既設岸壁に隣接して新設の杭式栈橋施工中(図-B.12)に発生した支持力不足の事例である。59本の杭のうち、連絡橋部の7本で所定の支持力を満足できなかった。

a) 概要

1) トラブルの発生した杭

φ500 mm, l=25 m の鋼管杭 (SKK400) である。

2) 地盤概要

対象地点は水深約6mで、軟弱な厚い粘性土層の下に平均N値40の風化泥岩の支持層がある。地層の特徴は、支持層がやや深い(C.D.L. -20m)こと、支持層がほぼ水平であることなどである。ボーリング柱状図を図-B.13に示す。

b) トラブルの発生状況

当該工事には、栈橋本体・連絡橋部の2つの部分に構造区分され(図-B.12, 図-B.14 参照), 各々で設計された径および長さの鋼管杭を油圧ハンマにて打設した。既往の工事では風化泥岩層での高止まりのトラブルを事前に把握していた。しかし、図-B.12中に示した連絡橋部の鋼管杭について、設計深度まで打ち込みを行ったが、表-B.1に示すとおり設計支持力が得られなかった。連絡橋部の設計支持力は500 kN/本である。

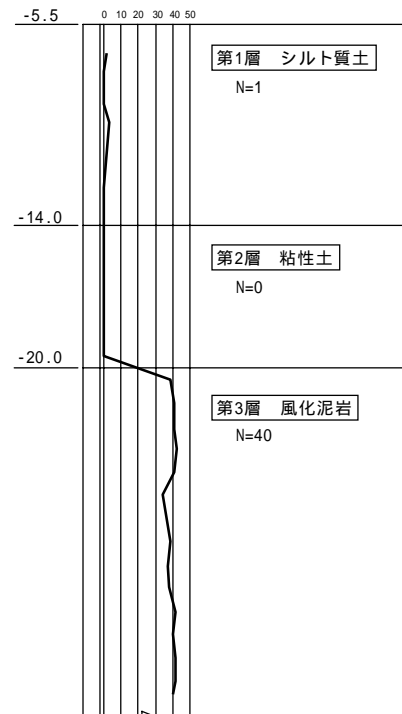


図-B.13 ボーリング柱状図

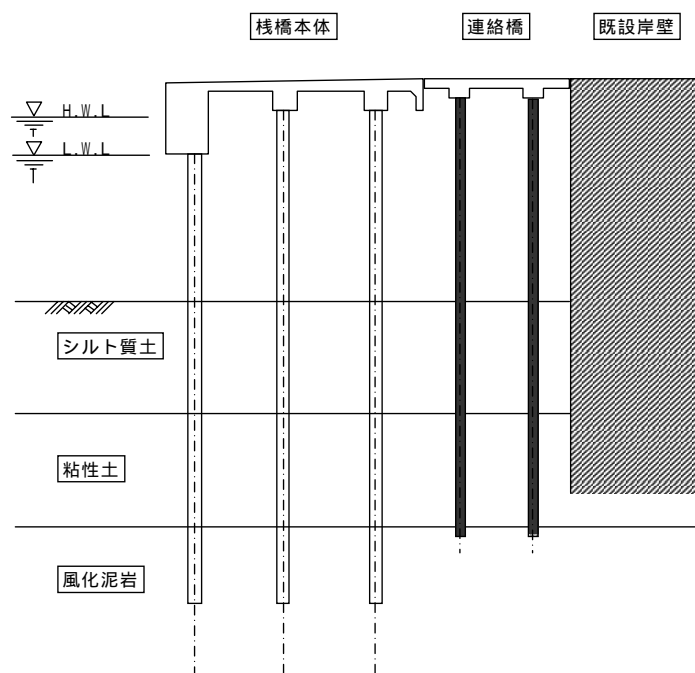


図-B.14 断面図

表-B.1 動的支持力管理式 (Hiley 式) より求められた極限支持力

杭番号	Hiley式より求められた極限支持力 (kN)	判定
連絡橋 -1	285	OUT
-2	297	OUT
-3	311	OUT
-4	306	OUT
連絡橋 -1	353	OUT
-2	376	OUT
-3	348	OUT

c) トラブルの原因

トラブル発生した杭以外は、3.0 m 以上の支持層への根入れ長があったが、トラブル杭の根入れ長は、0.5 m ~ 1.9 m と相対的に短かった。また、支持層である風化泥岩の層境部分は、風化が激しく強度が弱かったことと、軟弱層および風化泥岩の周面摩擦力が小さかったことが考えられる。

d) トラブルの対策

溶接にて継ぎ杭を行い、設計支持力が得られるまで設計深度以上の打込みを行った。1 本当りの最大継ぎ杭長は、1.5 m であった。

e) トラブルから得た教訓

今回 2 箇所でのボーリングデータがあったが、トラブルが発生した連絡橋部におけるジャストボーリングはなかった。問題のなかった杭と比較して根入れ長がなかったことと、泥岩の風化状態を確認する必要があったことを考えると、追加ボーリングによる再調査が必要であった。

今回は継ぎ杭の調達が早急にでき、工期への影響は最小であったが、杭の長さや本数、重防食の有無によっては工期やコストに大きな影響を及ぼす。施工計画が可能であれば、打設順序を変更し、周面摩擦力の回復を待って再び打込みと支持力確認を行うこともできる。動的支持力管理式のみでは支持力を過少評価する場合もあるので、衝撃載荷試験を実施すべきだったと考えられる。

B.4 支持力不足の場合の原因および対策の具体例

(1) 支持力不足で周面摩擦力を再評価した例

a) 概要

本事例は、仮設橋支持鋼管杭の設計支持力が仮設構造物のため、「先端支持力 + 周面摩擦力」の合力での設計となっており、施工時の先端支持力を求める Hiley 式のみでは、設計支持力に対する評価を行うことが出来なかった。

図-B.15 に対象構造物の断面および施工地点の土質柱状図をあわせて示す。

1) 設計条件

周面摩擦力が設計支持力の 70% を占める。

根入れ長は満足するが、薄い支持地盤層（中間層：砂質土）で打止め。

2) 対象となった杭；

$\phi 1000 \text{ mm}$ 、 $l = 56.0 \text{ m}$ の鋼管杭 6 本及び $l = 62.5 \text{ m}$ の鋼管杭 12 本で、全ての杭で問題が生じた。

3) 地盤の概要；

対象地点は水深約 10 m で N 値 0 のヘドロ層が約 25 m、以後約 20 m 間でシルト層と細砂層が互層となっており、下層に N 値 50 以上の支持層がある。

b) トラブルの発生状況

設計支持力の 70% を周面摩擦力が占めることから、杭打設時の貫入量とリバウンド測定値管理で得られる Hiley 式による動的支持力の値は、先端支持力のみであると仮定した。この場合、周面摩擦力を数値的に評価することが出来ないため設計支持力を満足する数値を得ることができず、結果的に支持力不足となる。施工管理手法として、先行工事データから考察された地盤回復後支持力推定式を用いて杭の全抵抗力を評価することとしていたが、施工時のリバウンドにより得られた先端支持力の値にばらつきにより、評価判断を行えなかった。

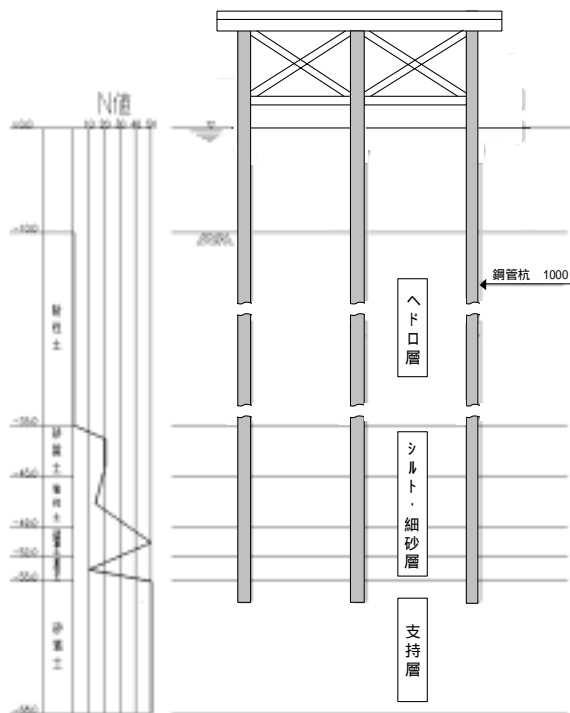


図-B.15 仮設栈橋断面図

c) トラブルの原因

設計支持力の 70% を占める周面摩擦力 (N 値 0 のヘドロ層 25 m) の評価方法が先行工事データのみで行われる設計となっていたため「回復推定換算係数」が本工事と合致していなかったことが原因の 1 つである。また、地層の状態として鋼管杭が 30 m 程度自沈することから予想以上に周面摩擦力が低かったと推定されたことや、支持層の傾斜や中間層が複雑に変化している事も原因と考えられる。

d) トラブルの対策

設計時に、鋼管杭打込後の地盤回復による周面摩擦力増大が確認されていたため本工事でも打設後 6 日と 10 日経った 2 本の杭に対して当初計画していなかった衝撃載荷試験を行い、地盤回復後の支持力測定を行った。この衝撃載荷試験により新たに「回復推定換算係数」と「施工管理式」を導き、全杭に対して再評価を行った結果、全杭が確認支持力を満足することが出来た。

e) トラブルから得た教訓

先行工事のデータにより管理式を求めて施工管理を行ったが、結果は大きく異なっていた。今回の様に周面摩擦を期待する杭の設計では、地盤の回復が大きなポイントなるため支持力の回復確認のためには工事単位で衝撃載荷試験による確認が必要である。

当初設計条件に疑問が感じられたが、工期を守るために施工前の検討時間および協議期間を十分に取ることが出来なかった。結果的には、支持力の判定は合格となったが、仮設構造物であっても設計条件が最も必要であることを再認識した。

(2) 支持層の不陸による支持力不足を事前回避した例

a) 概要

本事例は、ジャケット式栈橋（図-B.16 参照）の基礎杭の打込み事例で、起伏のある支持層に対して、一部中間層での打ち止めが計画されていたが、事前の調査によりトラブルの発生を防止した事例である。

1) 工事内容

鋼管杭： $\phi 1200 \text{ mm}$ 、 $l = 40 \sim 55 \text{ m}$ 、36 本

仮受杭：H 型鋼 (H-400 × 400 × 13 × 21)、 $l = 30 \text{ m}$ 、24 本

2) 地盤概要

対象地点は、水深 -12 m、軟弱で厚さ 20 m 程度粘性土層の下に分布する、 $N > 50$ の礫層を支持層としている。ただしこの支持層は、起伏が確認されている上に、杭の打止め深度付近では、 N 値にばらつきが見られた。

b) トラブルの発生状況

この工事はバースを築造する工事であるが、隣接するバースは供用されている為、海水面占用時間を極力短縮して計画された工事であった。したがって、トラブル発生による工事中断や工期の延伸が困難であったため、事前の施工計画立案時のトラブル要因の検討が重要であった。事前の土質調査を確認すると、延長 100 m の区間で支持層高さにばらつきがある上、その支持層の N 値にも 50 以下の箇所があり、杭の支持力不足が懸念されていた。

c) トラブルの対処方法

一般的には、支持層の支持力が懸念される場合には、事前のチェックボーリングや事後の継杭等が検討されるが、この工事の場合、工期に問題があり、このような対策が不可能であった。しかし、このバースはジャケット式の栈橋構造であったため、設計時からジャケット据付け時の仮受杭として H 型鋼 (H-400×400×13×21) の打設が予定されていた。また、このジャケットは重量が大きいため、仮受杭も $N > 50$ 以上の支持層に支持させる事が求められていた。そこで、本工事においては、仮受杭の打止め管理として、パイプロハンマによる動的支持力を用いる事で、同時に基礎杭の支持層の強度確認を行った。

その結果、当初より強度のばらつきが懸念された支持層では、基礎杭反力を支持出来ないことが判明した為、基礎杭は確認された支持層深さに合わせた杭長に変更して、現場に搬入した。打設時に動的支持力管理式により確認を行なった所、設計支持力が確認され、工事は無事終了した。

d) トラブルから得た教訓

トラブルを未然に防ぐ為には、工事着手前にその工事に潜むトラブルの芽を摘み取る事が重要である。また、設計時の土質調査の頻度や試験項目は、現場の施工条件や構造物の規模及び重要度に合わせて適切に設定しなければならない。本工事においては、当初より計画にあった仮受杭を用いて支持層の確認を行なう事が出来たが、土質によっては H 型鋼の打設が困難な場合がある。そのような場合には、工期を調整の上、その他の方法による支持層確認が必要となる。

(3) 支持力不足による杭長延長の具体的事例 1

a) 概要

本事例は、大径鋼管杭の本杭施工時に所定の杭長を打設して支持力が不足したものを、杭長を延長して対策した事例である。

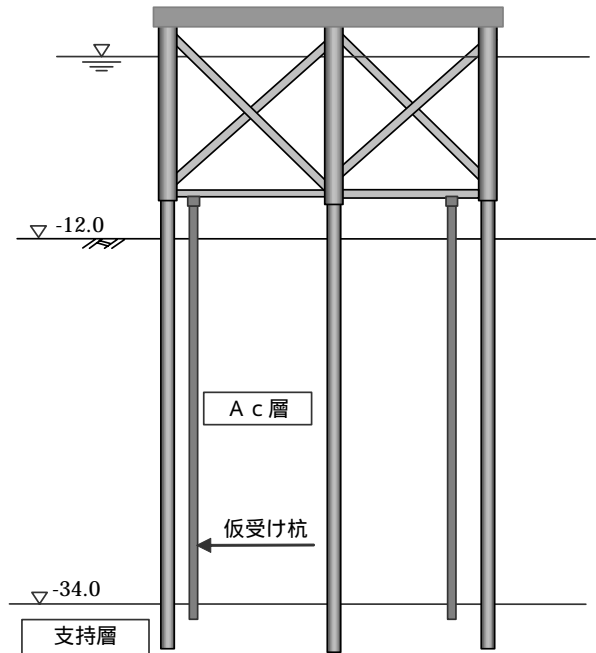


図-B.16 ジャケット式栈橋標準断面図

b) 設計

- 1) 杭サイズ： $\phi 1,600 \text{ mm}$, $t = 21 \text{ mm}$, $l = 28 \text{ m}$
- 2) 土質条件

土質条件を図-B.17 に示す。支持層は、標高 FL -17.6 m 以深の砂礫層としている。

- 3) 杭の支持力（港湾の基準⁷⁾による）

$$\begin{aligned}
 R_u &= 300 N_p A_p \alpha + 2 N A_s + C_a A_s & (9.1) \\
 &= 300 \times 44.9 \times 2.011 \times 0.78 + 3487 \\
 &= 24,600 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

式(9.1)中の α については、支持層への根入れ長を 6.2 m (FL -23.8 m) とし、道路橋示方書⁸⁾に示されている考え方(2.2(4) 参照)を参考にして、 $6.2 / 1.6 = 3.9$ より $\alpha = 3.9 / 5 = 0.78$ を採用した。

- 4) 設計上の最大押し込み力

常時：作業時のクレーン有り = 8,200 kN (< 24,600 / 2.5 = 9,840 kN)

地震時：地震時のクレーン有り = 9,900 kN (< 24,600 / 1.5 = 16,400 kN)

c) 施工

- 1) 杭の打ち止め管理

杭施工は、NH-150B の油圧ハンマーにて施工し、Hiley 式、5S の式、道示式にて管理した。打ち止め時のリバウンド及び貫入量については表-B.2 のような結果が得られ、表-B.3 に示すとおり支持力不足が判明した。

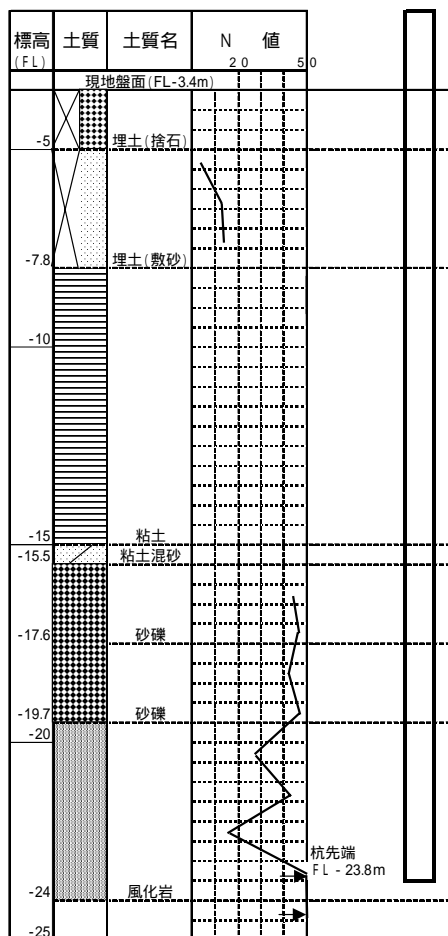


図-B.17 土質条件

表-B.2 打ち止め時のリバウンド，貫入量

No.	貫入量 (mm)	リバウンド量 (mm)	打撃エネルギー (kJ m)
1	12.0	12.1	160
2	12.1	11.0	160
3	13.1	8.4	165
4	18.1	6.0	60
5	8.1	6.8	42

表-B.3 動的支持力 (kN)

No.	Hiley 式 R_{du}	Hiley 式 $R_a=(1/3) R_{du}$	SS 式長期 R_a	道示式 R_a	設計必要 支持力
1	15,100	5,030	2,000	6,100	8,200
2	15,500	5,170	1,990	5,760	
3	16,200	5,470	1,990	4,930	
4	4,800	1,600	630	4,160	
5	6,200	2,070	600	4,430	

2) 支持力不足の原因究明

支持力不足の原因としては、以下のことが考えられる。

- 支持層（砂礫層）の強度のバラツキが大きく、換算 N 値の平均で 50 程度と強固でなかった。
- 砂礫層の N 値は、直接石をたたくケースがあり、表示通りの強度が無かった可能性がある。
- バラツキの多い地盤にしては、ボーリング本数が延長 240 m で 5 本（48 m 間隔）と少なかった。
- 杭が大径であるにもかかわらず、従来の設計方法を踏襲していた。
- 動的支持力管理式は真の支持力に対して倍半分（+100 ~ -50 %）程度の誤差のある支持力を求める式であり、真の支持力を表現できていない。
- 動的支持力管理式は、大径杭の確認が難しい。

3) 支持力不足に対する対応策

i) 法線上に追加土質調査（4 箇所）

法線上に追加土質調査（4 箇所）を実施して、詳細なる支持層高さを把握した。

ii) 杭延長の検討

土質調査結果に基づき、各杭の延長を 5 ~ 10 m に設定した。

iii) 杭延長による支持力確認

延長杭に対して、発現支持力（特に先端支持力）の確認（Hiley 式）と、他の杭の打ち止め管理方法を確立する目的で追加試験施工を実施した。なお、追加試験施工杭については衝撃载荷試験を 1 本実施した。

d) 追加試験施工結果

表-B.4 に追加ボーリングデータを表-B.5 に追加試験施工結果を示す。なお、使用ハンマーは従来使用していたものより 1 ランク大きい IHC-S280 を使用した。

1) 支持力の推定

i) Hiley 式による推定

表-B.5 の結果を用いて、支持力管理に用いている Hiley 式にて支持力を推定すると以下のとおりである。

$$R_{du} = \frac{e_f F}{S + \frac{K}{2}} \quad (9.2)$$

貫入量： $S = 0.0018$ m

リバウンド量： $K = 0.0144$ m

打撃エネルギー： $F = 460$ kNm（油圧ハンマーの場合はハンマーエネルギーの 2 倍となる）

ハンマー効率： $e_f = 0.5$ （0.5 が上限値である）

従って、 $R_{du} = 25,600$ kN となり、設計上の常時の最大押し込み力の 3 倍以上を確保できている。

表-B.4 追加ボーリングデータ

標高	地層	標高	深度	N値
-13.5				
-14.8	シルト	-14	0.5	
-15.8	シルト質砂	-15	1.5	1
		-16	2.5	12
		-17	3.5	20
	砂礫	-18	4.5	25
		-19	5.5	50/5
		-20	6.5	25
-21.0		-21	7.5	49
	礫・粘土混り砂	-22	8.5	33
		-23	9.5	26
-23.9		-24	10.5	38
		-25	11.5	50/17
	風化軟岩	-26	12.5	50/23
		-27	13.5	50/15
		-28	14.5	50/5
		-29	15.5	50/5
		-30	16.5	50/0
-30.5		-31	17.5	50/0
	中硬岩	-32	18.5	50/0
		-33	19.5	50/0
-33.5		-34	20.5	50/0

表-B.5 追加試験施工結果

杭先端 FL	(m)	-28.60
根入長	(m)	15.60
貫入量	(mm)	1.8
リバウンド量	(mm)	14.4
ハンマーエネルギー	(kNm)	230
伝達エネルギー	(kNm)	125
全抵抗	(kN)	22,200

ii) 衝撃載荷試験結果

表-B.6 に波形マッチング解析により得られた結果(抵抗力度, 静的抵抗)を示す. 波形マッチング解析は打ち止め付近の波形に対して実施した. 本解析結果により, 静的抵抗は周面摩擦 540 kN, 先端抵抗 17,000 kN と算出された.

衝撃載荷試験にて得られる静的抵抗は施工時に計測される抵抗のため, 養生後には先端支持力, 周面摩擦力の回復等のセットアップ(支持力の増加)が期待できる. 本事例では, 養生後の再打撃による支持力確認は工程上困難であることから, 安全を見て先端支持力としては衝撃載荷試験の値を採用し, 周面摩擦力が静的支持力推定式の周面摩擦力までセットアップするものと考えた. 表-B.7 に静的支持力推定式による杭の周面摩擦力の算出結果を示す.

iii) 支持力の推定結果

表-B.8 にセットアップを考慮して推定した支持力を示す.

本結果より推定支持力は 21,800kN となり, その安全率は常時最大荷重に対して 2.5 倍以上, 地震時最大荷重に対して 1.5 倍以上確保されていることが確認できた.

表-B.6 波形マッチング解析結果

No.	地盤	深度 (m)	解析層厚 (m)	周面摩擦力度 (MPa)	静的抵抗 (kN)
1	上端	シルト シルト質砂	-13.5	2.38	12
	下端			0.001	
2	上端	砂礫	-15.8	5.38	27
	下端			0.001	
3	上端	礫粘土 混り砂	-21.0	3.00	15
	下端			0.001	
4	上端	風化 軟岩	-23.9	0.020	487
	下端			0.020	
周面合計					540
先端	風化 軟岩	-28.57		71.000	17,000
合計					17,540

表-B.7 周面摩擦力の算出結果

標高	地層	標高	N値	周面摩擦力 (kN)
-13.5				
-14.8	シルト	-14		
		-15	1	10
-15.8	シルト質砂	-16	12	121
		-17	20	201
		-18	25	251
	砂礫	-19	50	502
		-20	25	251
-21.0		-21	49	492
	礫・粘土混り砂	-22	33	332
		-23	26	261
-23.9		-24	38	382
		-25	50	502
	風化軟岩	-26	50	502
		-27	50	502
		-28	50	502
		-29	50	
		-30	50	
-30.5		-31	50	合計 Ru _f 4,813
	中硬岩	-32	50	
		-33	50	
-33.5		-34	50	

$$\text{周面摩擦力 } Ru_f = 2 \cdot N \cdot A_s \text{ (kN)}$$

$$A_s = 5.024 \text{ cm}^2 \text{ (1600)}$$

表-B.8 セットアップを考慮した推定支持力

	推定支持力 (kN)	設計反力 (kN)	
		常時	地震時
周面摩擦力 (静的支持力推定式)	4,813	-	-
先端支持力 (衝撃載荷試験結果)	17,000	-	-
合計	21,800	8,200	9,900
(安全率)	BASE	2.7	2.2

表-B.9 杭の打ち止め条件

項目	施工管理値
ハンマーエネルギー	210 kNm
貫入量	2 mm 程度以下
リバウンド量	15 mm 程度以上

2) 考察

延長杭に対して実施した追加試験杭の支持力は、Hiley 式では8,500 kNと設計最大作用軸力8,200 kNを満足することが確認できた。また、衝撃載荷試験で推定した杭の支持力21,800 kNは、先端支持力のセットアップを見込まない条件でも、常時に対して2.5倍以上、地震時に対して1.5倍以上の安全率が確保されていることから、杭構造として問題無いものと考えた。

以上より、この試験杭の打ち止め管理値に基づき、今後施工される杭については表-B.9に示す打ち止め管理値にて施工することとした。

e) トラブルから得た教訓

大径杭の支持力は、従来の設計法で支持力（特に先端支持力）を算定するのは難しく、採用にあたっては当該地盤でどの程度支持力が発現するかを試験杭で確認することが重要である。また、支持力をHiley式のみで、施工管理するのは式自体誤差が大きく、特に今回のような風化岩に適用できるかどうか事前に試験で確認して用いることが重要である。

(4) 支持力不足による杭長延長具体的事例2

a) 概要

本事例は、本杭施工時に所定の杭長を打設しても支持力が不足したものを試験で確認しながら杭長を延長した事例である。

b) 設計

1) 杭サイズ： $\phi 1,000 \text{ mm}$ ， $t = 10 \text{ mm}$ ， $l = 32 \text{ m}$

2) 土質条件

土質条件を図-B.18に示す。支持層は、標高DL-17.6m以深の砂礫層としている。

3) 杭の支持力（港湾の基準⁷⁾による）

ネガティブフリクションを軟弱層の90%長について $N_f = 2,320 \text{ kN}$ を考慮する。

$$R_u = 300 N_p A_p \alpha + 2 N A_s + C_a A_s \quad (9.3)$$

$$= 300 \times 25 \times 0.785 \times 1 + 470$$

$$= 6,360 \text{ kN}$$

杭径が1,000 mmであることから閉塞率 $\alpha = 1$ と仮定した。

4) 設計上の最大押し込み力

常時： $P_{\max} = 970 \text{ kN}$ ($< 6,360 / 2.5 = 2,540 \text{ kN}$)

ネガティブフリクション作用時： $3,290 \text{ kN}$ ($< 6,360 / 1.2 = 5,300 \text{ kN}$)

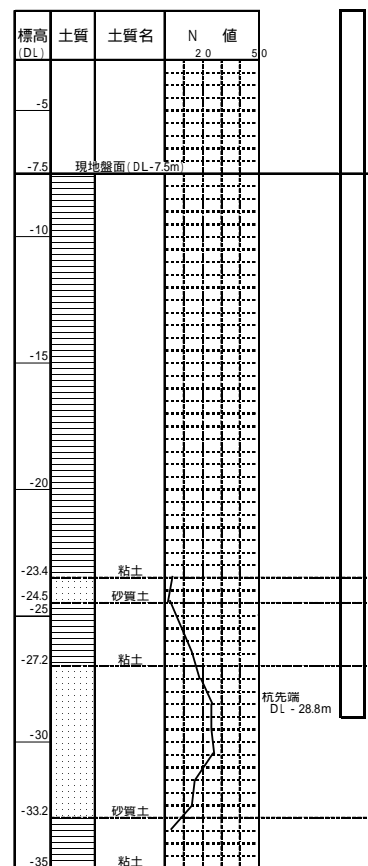


図-B.18 土質条件

c) 施工

1) 杭の打ち止め管理

杭施工は、NH-115B の油圧ハンマーにて施工し、Hiley 式、5S の式、道示式にて管理したところ、表-B.10、表-B.11 に示すような結果が得られた。ネガティブフリクションが作用する杭の支持力は、杭先端支持力を推定できる道示式の第1項のみが参考となり、支持力不足が判明した。

2) 支持力不足の原因究明

支持力不足の原因としては、以下のことが考えられる。

- 支持層（砂質土）の強度が換算 N 値の平均で 25 程度と強固でなかった。
- この強固でない支持層に杭径程度根入れして閉塞効果 100% は、やや過大設計の可能性がある。
- 動的支持力管理式は、真の支持力に対して倍半分程度の誤差のある支持力を求める式であり、真の支持力を表現できていない。
- ネガティブフリクションの働く杭を、動的支持力管理式で支持力を推定するのは難しい。

3) 支持力不足に対する対応策

i) セットアップ後の既設杭および先端井桁補強新設杭による支持力増大の確認

既設杭を十分（約1年）養生後、衝撃載荷試験によりセットアップ後の支持力を確認するとともに新たに先端井桁加工（長さ方向 1.3 m）を行った杭（新設杭）について衝撃載荷試験を実施して支持力の増大を確認した。

衝撃載荷試験結果を表-B.12 に示す。表中、静的支持力は波形マッチング解析結果による杭全体の静的抵抗、砂層支持力は正の摩擦力を示す砂層の周面摩擦力と先端抵抗力の合計とした。表-B.13 にこの砂層支持力と設計支持力を照査した結果を示す。

表-B.10 打ち止め時のリバウンド、貫入量

No.	貫入量 (mm)	リバウンド量 (mm)	打撃エネルギー (kNm)	落下高 (m)
1	8.6	5.0	41.4	0.36
2	4.4	9.3	72.5	0.63

表-B.11 動的支持力 (kN)

No.	Hiley 式 R_{du}	5 S 式 短期 R_a	道示式 R_a	道示式 第1項 (極限)	設計必要極限支持力
1	3,730	1,740	(1,690)	750	3,940
2	8,000	3,560	(1,910)	1,490	

表-B.12 衝撃的載荷試験結果

(既設杭: No.1, 新設杭: No.2)

杭 No.		1	2
養生日数		約1年	打ち止め時
杭先端 DL	(m)	-29.11	-28.80
根入長	(m)	15.01	14.70
貫入量	(mm)	22.8	4.4
リバウンド量	(mm)	13.0	9.3
ハンマー エネルギー	(kNm)	203	71
伝達エネルギー	(kNm)	98	32
全抵抗	(kN)	7,000	3,250
静的支持力	(kN)	2,790	1,410
砂層支持力	(kN)	2,260	1,320

表-B.13 設計支持力との照査

杭 No.		1	2
[衝撃載荷試験]			
静的支持力 (全支持力)	(kN)	2,790	1,410
NF無し杭との照査		OK	NG
砂層支持力	(kN)	2,260	1,320
NF作用杭との照査		NG	NG
[設計値]			
NF無し杭の必要支持力	(kN)	2,430	2,430
NF作用杭の必要支持力	(kN)	3,940	3,940

$$\text{NF 無し杭の必要支持力} = \text{軸力} \times 2.5$$

$$\text{NF 作用杭の必要支持力} = (\text{軸力} + \text{NF}) \times 1.2$$

ii) 杭長延長による支持力増大

既設杭のセットアップ後および先端井桁補強新設杭とも、設計必要支持力を発現していないことが確認されたので、杭を延長して支持力を増大させることにした。延長杭は、土質調査結果による地盤の摩擦力を期待して、No.2 杭について 16.4 m の杭を継ぎ足すことにした。延長後の No.2 杭の打ち止め時の衝撃載荷試験結果を表-B.14 に示す。

この杭について、約 1.5 ヶ月養生後、急速載荷試験を実施して支持力確認を実施した。その結果を表-B.15 表-B.16 に示す。

以上の結果より、地盤の周面摩擦力の結果より必要杭長

を求め、本杭の杭長とした。なお、打ち止め管理は、摩擦杭に近い杭になっているので、根入れ長管理を基本とし、参考としてNo.2杭の打ち止め値に基づく表-B.17のような打ち止め管理値にて施工することとした。

d) トラブルから得た教訓

今回のように軟弱層の下の中間層において設計で求まる支持力を確保するためには、設計段階から十分な調査と試験を実施し、支持力を確認する必要がある。

また、Hiley式のみによる施工管理では、ネガティブフリクションを考慮する層も含めた値を算出してしまふことから、本事例のような条件下では有効な管理方法にならないことが判明した。このような場合には、施工時であっても、セットアップ率が少ない杭先端支持力のある程度の精度で確認できる衝撃載荷試験の採用が有効である。

(5) 支持力不足を地盤改良により補強した事例

a) 概要

本事例は、橋脚基礎杭を中掘り + 最終打撃工法により施工したところ支持力不足が生じたため、杭先端を噴射攪拌工法によって地盤改良して支持力を確保した事例である。

1) 工事内容

φ1000 mm, l = 48 m の鋼管杭 32 本を中掘り最終打撃工法にて施工するものである。

2) 地盤概要

対象地点の土質柱状図を図-B.19 に示す。現地盤面から 30 m 程度が N 値 3 ~ 5 の Ac 層、一部 N 値 15 前後の砂層を介し、それ以深は N 値 10 以下の Dc 層となる。支持層は N 値 50 以上の細砂層であった。

表-B.14 衝撃載荷試験結果 (No.2 延長杭)

杭 No.		2 (延長杭)
養生日数		打ち止め時
杭先端 EL	(m)	-45.19
根入長	(m)	31.09
貫入量	(mm)	6.5
リバウンド量	(mm)	13.4
ハンマーエネルギー	(kJ)	127
伝達エネルギー	(kJ)	55
全抵抗	(kN)	5,070
静的支持力	(kN)	2,840
砂層支持力	(kN)	2,740

表-B.15 急速載荷の波形マッチング解析結果

番号	層厚 (m)	バネ定数 (kN/m ³)	周面摩擦力度 (kN/m ²)			周面抵抗 (kN)
			解析値	初期値	計	
1	3.9	5000	60.0	8.3	68.3	836
2	5.2	12000	60.0	8.3	68.3	1115
3	3.8	15000	60.0	8.3	68.3	815
4	7.2	12857	90.0	8.3	98.3	2223
5	11.0	36250	145.0	10.2	155.2	5363
計	31.1		周面抵抗合計			10354
先端		2.5 × 10 ⁶	先端抵抗力度 (kN/m ²)			先端抵抗 (kN)
			解析値	初期値	計	
			6150	245	6395	706
合計						11060

表-B.16 設計支持力との照査 (No.2 延長杭)

杭 No.	2	
[急速載荷試験]		
静的支持力 (全支持力)	(kN)	11,060
NF無し杭との照査		OK
正の摩擦と先端支持力 (4, 5層と先端)	(kN)	8,290
NF作用杭との照査		OK
[設計値]		
NF無し杭の必要支持力	(kN)	2,430
NF作用杭の必要支持力	(kN)	3,940

表-B.17 杭の打ち止め条件

項目	施工管理値
ハンマーエネルギー	127 kNm
貫入量	7 mm 程度以下
リバウンド量	13 mm 程度以上

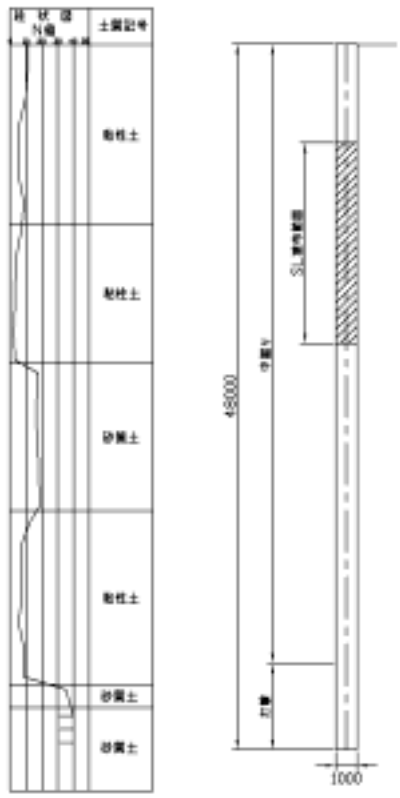


図-B.19 土質柱状図

b) トラブルの発生状況

最終橋脚の基礎杭打設時に、杭先端が打ち止め深度に到達してもリバウンドが他橋脚の 1/3 程度、1 打撃当りの貫入量 5 ~ 7 mm と打ち止め基準に適合しない杭が発生した。この橋脚では、全ての杭で同じような傾向を示し、動的支持力管理式では設計支持力を確認する事が出来なかった。

c) トラブルの原因・対処

1) チェックボーリングの実施

動的支持力管理式で支持力が確認出来なかった橋脚に対して、チェックボーリングを実施した。その結果、杭先端は N 値 50 以上の層に到達しているが、打込み長が設計より短く、支持地盤の土質がシルト分を多く含んでいる事が確認できた。

2) 衝撃載荷試験の実施

支持力不足と思われた杭に対して、周面摩擦力の回復を待って、衝撃載荷試験により現状の支持力を測定した。その結果、必要とする支持力を満足出来ない事が確認された。

3) 継杭の試験施工

支持力が不足する杭への対策として、継杭によって支持層への貫入長を増加させる事により先端閉塞効果が向上し、所定の支持力が得られるのではないかと考え、継杭を実施した。

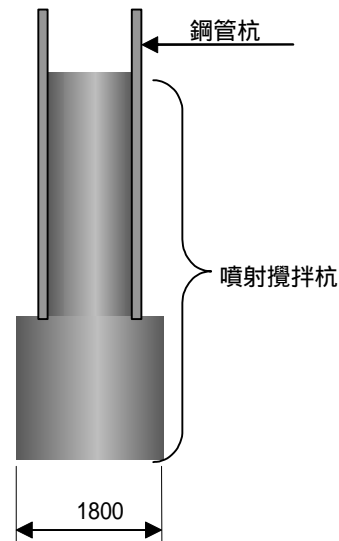


図-B.20 先端補強概要図

しかし、支持層への根入れ長を増加させても、先端支持力は期待したほど増加しなかった。また、橋脚基礎杭はネガティブフリクション対策としてスリッレイヤーが塗布されており、これ以上の打ち下げは、スリッレイヤー塗布範囲が砂層へ貫入する事となるため、得策ではないと判断し、他の対策工の検討を行なう事とした。

これらの作業を通して、支持力が確保できなかった原因を推察すると、地盤に対する中掘り最終打撃工法の適応性や支持地盤がシルト質細砂層であった事等が何らかの影響を及ぼしていたのではないかと考える。

4) 先端根固め工法の実施

杭の先端支持力を増加させる為、図-B.20 に示す杭先端に高圧噴射攪拌工法によるモルタル杭を造成する方法を採用した。モルタル長は、杭先端作用力に対して安全であるように決定した他、鋼管杭とモルタル杭との付着力を確保する為に、鋼管内部に対しても噴射攪拌を実施した。対策杭は、養生後静的載荷試験を実施して、作用力に対し十分な安全率が確保される事を確認した。

d) トラブルから得た教訓

本トラブルの発生原因については、不明な点も多い。しかし、中掘り + 最終打撃工法による場合には、先端十字リブ等を設置する事が出来ない為、先端閉塞効果が発現しにくい傾向があるとも考えられる。また、ネガティブフリクション対策としてスリッレイヤーが塗布されていた為、杭長の変更が困難であった事も対策の選択肢を狭める結果となった。杭の継手やスリッレイヤーのように、その高さが変更できないような杭を打設する場合には、トラブル対策の自由度が低下する事が多い為、事前の危険予知が非

常に大切である。

ひとたびトラブルが生じると、対策工に多大な時間と費用が必要となる事が多い。したがって、事前の土質調査の頻度が不足している場合や特殊な工事となる場合は、試験工事及び載荷試験の実施等を計画することが重要である。

(6) 支持力不足を杭周面地盤改良による対策事例⁹⁾

a) 概要

本事例は、本杭施工時に所定の杭長を打設しても支持力が不足したものに対して地盤改良により対策した事例である。

b) 設計

1) 杭サイズ：φ1,200 mm，*t* = 14 ~ 17 mm，*l* = 47 m

2) 土質条件

土質条件を図-B.21 に示す。支持層は標高 CDL-42 m 以深の互層としている。

3) 杭の支持力（港湾の基準⁷⁾による）

本施工地点は、近隣の環境を配慮し、ウォータージェット併用パイロハンマー工法（JV 工法）を採用した。この工法の支持力は、港湾の施設の技術上の基準に従い、さらにパイロハンマ設計施工便覧¹⁰⁾に基づき表-B.18 に示すような高圧ジェット水による低減値を用いて周面摩擦を低減して求めている。なお、支持層への根入れ長を 2 m (CDL-45.0 m) とし、先端十字補強（延長方向 0.5 m）を施すことにより杭先端閉塞率 $\alpha = 1$ とした。求めた設計支持力を表-B.19 に示す。

4) 設計上の最大押し込み力

常時：3,970 kN (< 14,540 / 2.5 = 5,820 kN)

地震時：4,480 kN (< 14,540 / 1.5 = 9,690 kN)

c) 施工

1) 杭の支持力（打ち止め）管理

杭施工は、打ち止め深度 (CDL-45.0 m) より上 5D よりジェット水を停止して、パイロハンマー単独にて 5D 打ち込んだ。打ち止め時には、パイロハンマ設計施工便覧¹⁰⁾ に示されているパイロの打ち止め式で管理する方法と、NH-115B の油圧ハンマーを用いて Hiley 式で管理する方法の両方で確認した。その結果、表-B.20 に示すように支持力不足が判明した。

2) 支持力不足の原因究明

支持力不足の原因としては、以下のことが考えられる。

- 支持層（砂質土層）の強度のバラツキが大きく、換算 *N* 値の平均で 36 程度と強固でなかった。

- 支持層が実際には砂層と粘土層との互層であるところを、全体を砂層と考えており支持力を過大評価していた。
- JV 工法の支持力を過大に評価していた。
- JV 工法の杭の打ち止めのみ油圧ハンマーで支持力管理するには、Hiley 式は適していなかった。
- 杭が大径にも関わらず、支持層に 1.6*D* 程度の根入れを十字リブで補強すると言うことで閉塞率 100 % の設計方法が過大であった。
- 動的支持力管理式は真の支持力に対して 0.5 ~ 2 倍程度の誤差のある支持力を求める式であり、真の支持力を表現できていない。
- 動的支持力管理式は、大径杭の確認が難しい。

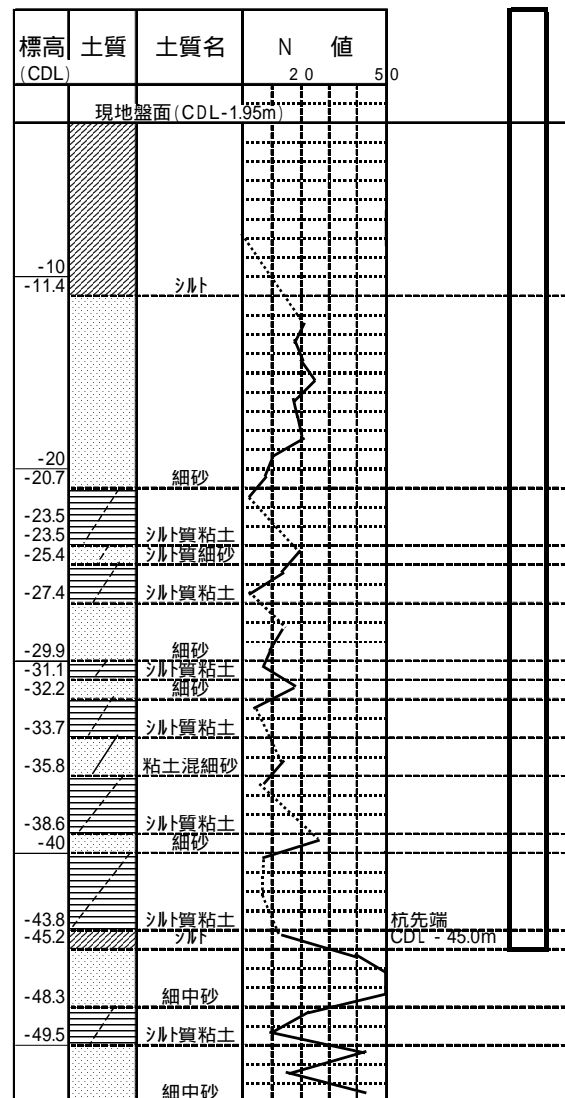


図-B.21 土質条件

表-B.18 周面摩擦力の低減

施工法 地盤の種類	高圧ジェット水を併用する場合 (kN/m ²)		
	水圧・水量を制限する層厚部	水圧・水量を制限しない層厚部	杭打ち完了後グラウトする場合
砂質土 「低減率*」	2N(≤100) 「1.0」	1N(≤50) 「0.5」	2N(≤100) 「1.0」
粘性土 「低減率*」	0.5Cまたは 5N(≤150) 「0.5」	0.2Cまたは 2N(≤100) 「0.2」	Cまたは 10N(≤150) 「1.0」

* 低減率 α_s , α_c は打ち込み杭に対する値

表-B.19 支持力・安全率の計算結果

		JV工法を考慮した設計支持力 (十字リブ有り)
砂質土の周面摩擦力 ($l=8.5\text{ m}$) R_u		740 kN (低減率 0.5)
粘性土の周面摩擦力 ($l=24.5\text{ m}$) R_u		1,600 kN (低減率 0.2)
先端支持力 R_u		12,200 kN(閉塞率 $\alpha=1.0$, $N=36$)
極限支持力 $R_{u1} + R_{u2} + R_{u3}$		14,540 kN
安全率 Fs	常時 (2.5)	4.0
	地震時 (1.5)	3.1

表-B.20 動的支持力 (kN)

No.	パイプロ式 R_u	パイプロ式 許容支持力	Hiley 式 R_{du}	Hiley 式 許容支持力	必要 支持力
1	6,200	6,200	10,100	3,370	3,970
2	5,550	5,550	9,580	3,190	
3	3,590	3,590	8,510	2,840	
4	5,330	5,330	9,510	3,170	
5	5,240	5,240	8,450	2,820	

表-B.21 衝撃載荷試験結果

杭 No.		
養生期間 (日)	240	220
周面 (kN)	3,830	4,300
先端 (kN)	1,420	2,020
合計 (kN)	5,250	6,320

3) 支持力不足に対する対応策

i) JV工法杭の支持力の確認

JV工法の正確な支持力を把握するためには、載荷試験を実施する必要がある。しかし、正確な支持力が把握できる静的載荷試験は、その実施に多くの費用と時間を必要とすることから、まず、簡易に実施できる衝撃載荷試験を実施した。その結果、表-B.21 に示すように、設計支持力を満足していないことが判明した。

さらに、JV工法の正確な支持力を確認するため同様の杭について静的載荷試験を実施した。その結果を図-B.22 に示す。静的載荷試験からも、JV工法の支持力は、3,600 kN程度であることが確認された。

ii) 杭の対応策

既に施工済みの既設杭の対応策として、杭の周面にセメント系固化材を注入し周面摩擦を増大する工法、杭の先端を固め先端支持力を増大する工法等が考えられ、現場での施工性・経済性より、試験工事としての工法（注入工法）を採用することとした。

なお、ケーソン基礎用に捨石マウンドが既に設置されていることから、捨て石層を削孔するロータリーパーカッションドリルによる補助工法も併用することとした。注入工法の施工手順を図-B.23 に示す。

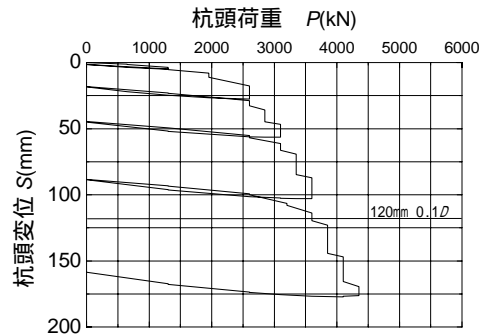


図-B.22 静的載荷試験結果

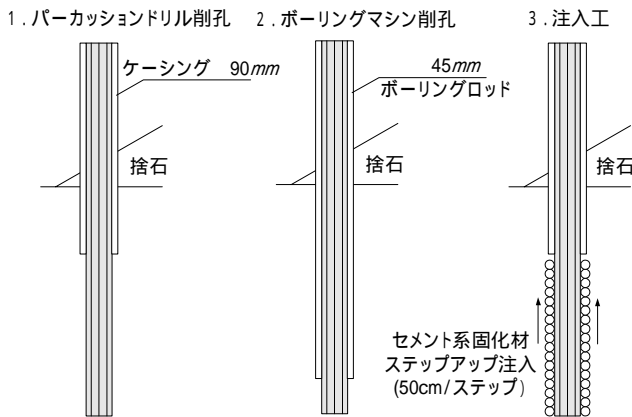


図-B.23 注入工法の施工手順

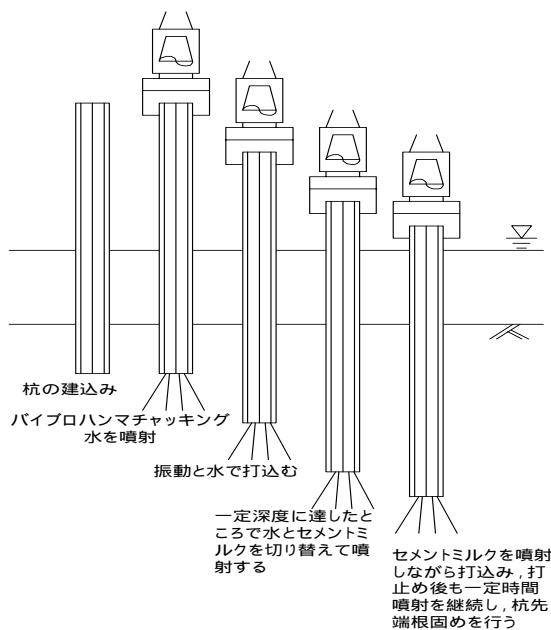


図-B.24 CJV工法の施工手順

iii) 新設杭の対応策

これから打設する新設杭の対応策として、杭の周面に薬液等を注入し周面摩擦を増大する工法、杭の先端を固めて先端支持力を増大する工法、JV工法のジェット水に替えセメントを噴射し周面摩擦を増大する工法(CJV工法)等が考えられ、このうち現場での簡易性・経済性より、試験工事としてはこのCJV工法を採用することとした。

CJV工法の施工手順を図-B.24に示す。なお、この工法はこれまで実績がなく初めての実施であった。

4) 対策杭の支持力の確認

注入工法杭は衝撃載荷試験にて、CJV工法杭は静的載荷試験を実施して支持力を確認した。その結果、表-B.22、図-B.25に示すように極限支持力は11,000 ~ 12,000 kNと設計支持力を満足する結果であった。

表-B.22 注入工法の衝撃載荷試験結果

	1		2	
	改良前	改良後	改良前	改良後
周面摩擦力 (kN)	3,970	7,440	3,660	7,740
先端支持力 (kN)	1,470	3,280	600	3,280
静的支持力 (kN)	5,440	10,720	4,260	11,020

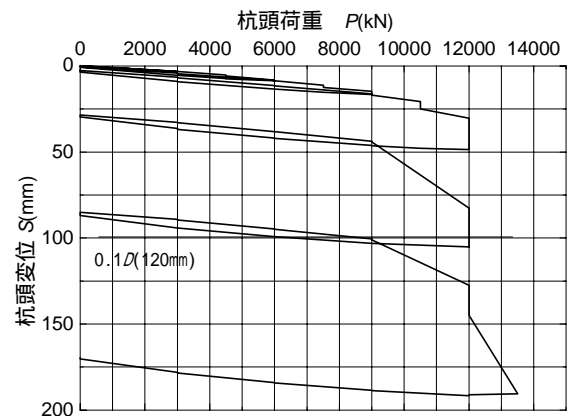


図-B.25 CJV工法の静的載荷試験結果

d) トラブルから得た教訓

今回のような支持力性能がオーソライズされていないJV工法を採用するに当たっては、設計段階から十分な調査と試験により発現支持力を把握しておくことが重要である。

また、JV工法の支持力を最終打撃するにしてもHiley式やパイロロ式で施工管理するのは難しいことが判った。このような工法は、施工時であっても杭先端支持力がある精度で確認できる衝撃載荷試験の採用が有効であると思われる。さらに、周面摩擦力もある程度の精度で確認する必要がある場合は、養生後の衝撃載荷試験の実施も必要であると考えられる。

(7) 支持力不足を杭先端地盤改良による対策事例

a) 概要

本事例は、鋼管杭のジャケット部に厚い板厚(32mm)が採用された本杭施工時に、所定の杭長を打設しても支持力が不足したものを、杭先端地盤改良工法(コラムジェットグラウト工法)にて支持力不足を解決した事例である。

b) 設計

本事例の構造を図-B.26に示す。鋼管杭の杭径はφ1,200mmであった。

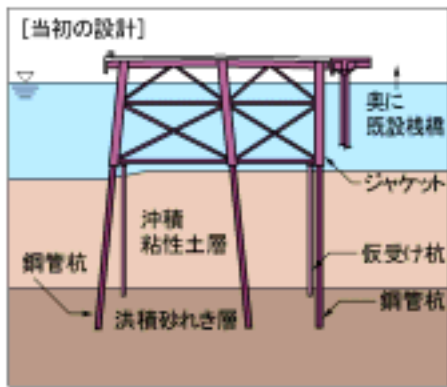


図-B.26 設計構造図

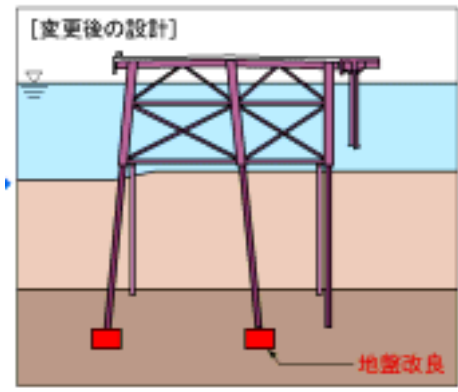


図-B.27 杭先端地盤改良の例

c) 施工

1) 杭の打ち止め管理

杭施工は、油圧ハンマーを用いて Hiley 式で確認した。その結果、支持力不足が判明した。

2) 支持力不足に対する対応策

本鋼管杭は、ジャケット部に厚い板厚 (32 mm) が採用されており、この部分の追加手配に時間が掛かり工期に間に合わない等の問題が発生した。

そこで、杭先端支持力を増大させる方策として、種々検討して実績のある図-B.27 に示すような杭先端地盤改良工法 (コラムジェットグラウト工法) にて支持力不足を解決することにした。

この方法は中掘り杭工法に類似した工法であるので、上部荷重を杭内周面と中詰グラウト材との摩擦力にて杭先端の地盤改良部分に荷重伝達させる。通常の中掘り杭はこの荷重伝達部分にずれ止めが施されているが、今回の杭はすでに打設されている杭のため、このずれ止めが施されていない。そこで、別途、杭内周面と中詰グラウト材との摩擦力を検討し、通常の中掘り杭より長い杭内グラウト高さを決定して施工した。

施工後、衝撃載荷試験にて先端支持力を確認して、必要支持力を満足することを確認した。

d) トラブルから得た教訓

大径杭の支持力は、従来の設計法で支持力 (特に先端支持力) を算定するのは難しく、採用にあたっては当該地盤でどの程度支持力が発現するかを試験杭で確認することが重要である。

また、支持力を Hiley 式のみで、施工管理するのは式自体が誤差が大きく、特に今回のような杭長に制限のある杭に適用して、必要支持力が発現されるかどうかを判断するのは困難であると考えられる。よって、事前に試験で確認して用いることが重要である。

(8) 打ち止め管理で不具合となった杭についてリドライブ衝撃載荷試験による判断を行った事例

a) 概要

φ1,200 mm の鋼管杭基礎において、施工時に Hiley 式により支持力管理を行ったところ支持力不足が生じたので、養生後の支持力を確認するためリドライブ衝撃載荷試験を実施した。その結果所定の支持力が発現された事例を紹介する。

b) 設計

1) 試験杭：φ1,200 mm, t = 14, 17, 18 mm, l = 48.1 m (SKK490, SKK400)

2) 土質条件

土質条件を図-B.28 示す。支持層は、標高 TP -42.7 m 以深の砂礫層としている。

3) 設計支持力

設計支持力は表-B.23 に示すとおりである。

c) 施工

1) 杭の打ち止め管理

試験杭を油圧ハンマー (NH-115B) にて施工し、Hiley 式で管理した結果、表-B.24 に示すように確認極限支持力を満足することができなかった。

表-B.23 設計支持力

長期許容支持力 (kN)	安全率	確認極限支持力 (kN)
3,652	2.5	9,130

B.5 支持力不足対策として事前試験を実施した具体例

(1) 支持力不足を十字リブにより対策した事例

a) 概要

打込み工法による大口径開端鋼管杭の先端支持力を増加させる方法として 先端に十字リブを設置する方法がある。しかし、この効果については、試験事例も少なく、不明な点が多いのが実状である。本事例は、大口径鋼管杭の先端支持力が、先端に十字リブを設置することにより如何に変化をするかを事前に比較試験により確認した結果を紹介する¹⁾¹¹⁾。

b) 比較杭諸元

杭 No.1 : $\phi 1,500 \text{ mm} \times t 22 \text{ mm} \times l 93 \text{ m}$, 十字リブ無し
 杭 No.6 ; $\phi 1,500 \text{ mm} \times t 22 \text{ mm} \times l 93 \text{ m}$, 先端十字リブ付 (長さ $2.5D$)

c) 土質条件

土質条件を図-B.28 に示す。支持層は標高 AP-81.5 m 以深の砂層 (江戸川層) としている。

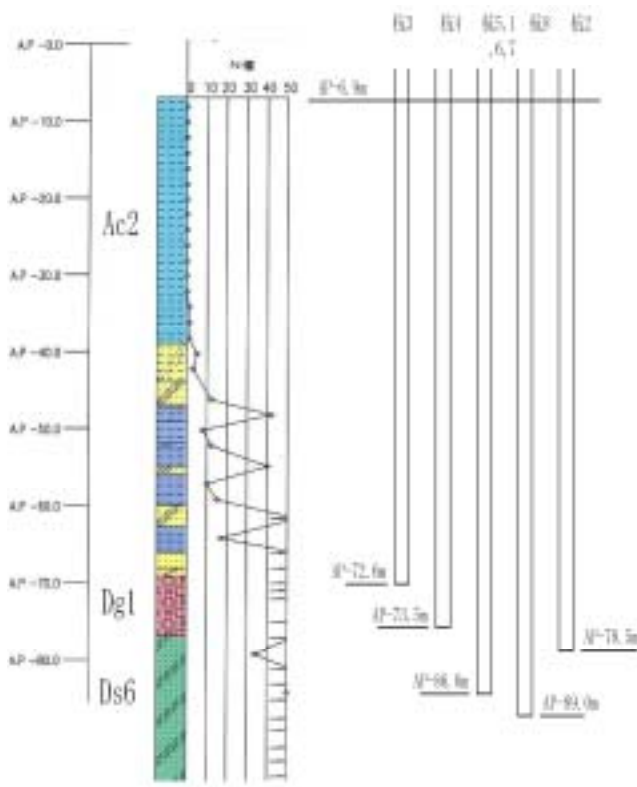


図-B.29 土質条件

d) 十字リブ効果の比較方法

試験杭における杭先端形状を図-B.30 に示す。図に示すように、杭先端には、板厚 22 mm の杭本体下端部分に、板厚 22 mm の十字リブを長さ 3.75 m ($= 2.5D$, D : 杭径) 区間に設置してある。

比較方法は、十字リブ無し杭 (No.1) と十字リブ付き杭 (No.6) とを、同じ施工機械、落下高での施工時の衝撃載荷試験結果より求まる貫入抵抗を比較検討した。貫入抵抗としては、以下に示す 4 つの指標を選定した。

ハンマーエネルギー / 貫入量 (E_h/s): ハンマーエネルギー = 抵抗 \times 貫入量というエネルギー平衡式に基づいたものである。

全抵抗: 抵抗 = 入射力 + 反射力という波動理論に基づいたケース法による計算結果である。

先端静的抵抗: 先端抵抗のみを評価する指標として、波形マッチング解析結果から先端の実断面積部分を取り出したものである。

先端静的抵抗 + $2D$ 内周面摩擦: 先端静的抵抗に杭先端 $2D$ 部分の周面摩擦力の $1/2$ を内周面摩擦として加えたものである。

e) 試験結果

打止め時 (AP -86.0 m) の貫入抵抗結果を図-B.31 に示す。試験杭 No.1 と試験杭 No.6 の打止め時貫入抵抗は全ての指標において、試験杭 6 の方が大きくなっている。

以上より、今回の試験結果では、十字リブによる貫入抵抗の増加があり、その効果は 1.3 倍 ~ 1.7 倍程度であった。

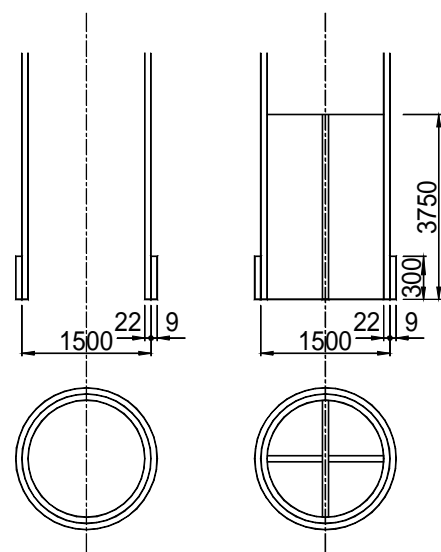


図-B.30 杭先端形状 (単位: mm)

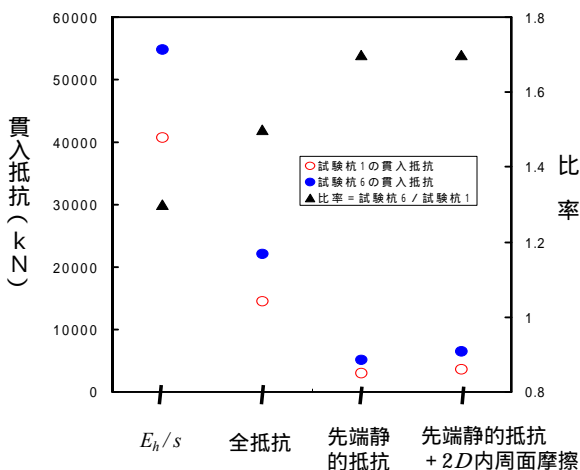


図-B.31 施工結果

f) 試験から得た教訓

今回実施した大径杭の場合は、支持層地盤による支持力について不明な点が多いことから、大径杭の支持力不足が生じた場合の対策方法として十字リブの効果について、事前試験により確認したケースである。

今回のように、事前試験が実施できるケースはまれであると考えられるが、構造物の重要性、同様の支持地盤での試験データの有無によっては工期、工費の面から検討して事前試験を考慮する参考になると考えられる。

(2) 薄層中間支持層の支持力不足を十字リブによる対策例

a) 概要

打込み工法による大口径開端鋼管杭において、経済的な方策として薄層中間支持層が支持層として採用可能かどうか確認した事例を紹介する。

併せて、薄層中間支持層での大口径鋼管杭の先端支持力が、先端に十字リブを設置することによりどの程度向上するかも事前に確認した事例として紹介する。

b) 設計

1) 杭諸元

$\phi 1,500 \text{ mm} \times t 17 \text{ mm} (23 \text{ m}) / 15 \text{ mm} (27 \text{ m}) \times l 50 \text{ m}$ (SKK490)

先端補強バンド無し

十字リブ：板厚 22 mm × 長さ 1.5 m (= 1D , D : 杭径)

2) 土質条件

土質条件を図-B.32に示す。支持層は標高 NP -40 m 以深の砂礫層としている。

3) 杭の支持力 (港湾の基準⁷⁾による)

地盤は、図-B.32に示すように NP -40 m 付近まで沖積粘性土層があり、その下に N 値 50 を越える 4.5 ~ 6.5 m 程度の薄層の礫礫の中間層が存在している。さらに洪積粘性土層を挟んで NP -40 m 以深に強固な砂層が存在する。今回は、この薄層の中間層を支持層とするものである。

このような薄層の中間支持層における大径鋼管杭の先端閉塞効果、薄層支持特性については明確な指標がない。薄層の中間支持層に杭を打ち止める場合の先端支持力は、先端閉塞効果を含む中間支持層自体の支持力 R_1 および下部洪積粘土層の支持力を考慮した薄層の支持力 R_2 を考慮しなければならない。

先端支持力の設計においては、 R_1 を港湾基準により算定し、図-B.33に示す阪神高速道路公団提案の方法により下部洪積粘性土層の強度を反映して R_1 を低減する形で R_2 が決定されている。

本試験においては、 R_1 を向上させるため十字リブを取り付けた試験杭を用意し、通常の開端の試験杭と比較することで、その効果を確認した。十字リブによる支持力は山原の式¹²⁾を用いて算定しており、補強していない杭に対して 1.5 倍増加する結果である。各々の杭の支持力を表-B.26に示す。なお、この支持力の先端閉塞率は、ジャケット式鋼製護岸設計指針(案)¹³⁾に基づき、 $\alpha = 0.333$ を用いている。また、作用軸力を表-B.27に示した。

表-B.26 地盤から決まる設計支持力 (R_2) (単位 : kN)

試験 No.	試験 ケース	先端支持力	摩擦力 (沖積粘性土以下)	摩擦力 (埋土)	予想極限荷重
V-1	開端	4,700	12,098	1,735	18,500
V-2	十字補強	7,000	12,098		20,800

表-B.27 作用軸力

	設計作用軸力	安全率	必要極限支持力
杭 (陸側杭)	常時 3,450 kN	2.5	8,630 kN
	地震 4,400 kN	1.5	6,600 kN
杭 (海側杭)	常時 3,900 kN	2.5	9,750 kN
	地震 3,900 kN	1.5	5,850 kN

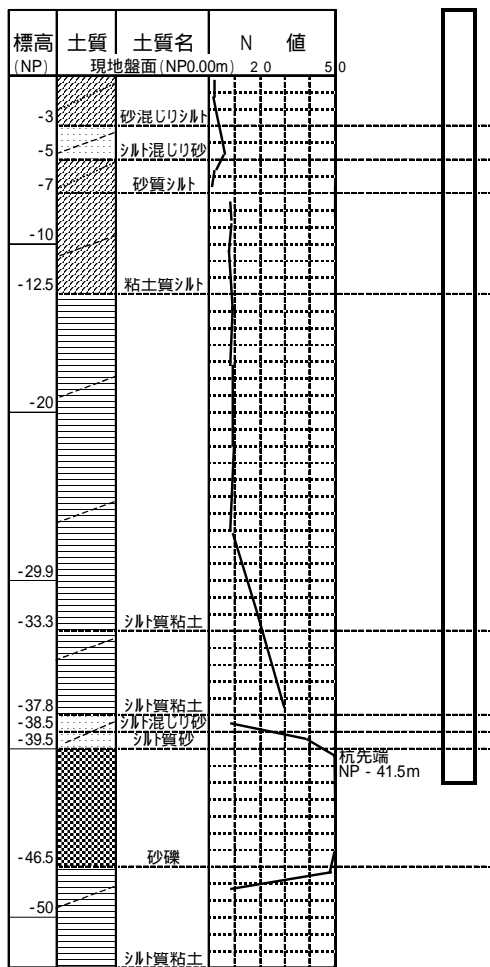


図-B.32 土質条件

c) 施工

1) 杭の打ち止め管理

杭施工は、IHC-S90 の油圧ハンマーにて施工し、本杭施工時の施工管理方法として修正動的支持力式を採用することを前提として、衝撃載荷試験、Hiley 式、5S の式、道示式にて管理した。その結果を表-B.28、表-B.29、表-B.30 に示す。

2) 急速載荷試験結果

急速載荷試験を実施した結果を、図-B.34、図-B.35、表-B.31 に示した。

この急速載荷試験結果と、打ち止め管理時の衝撃載荷試験、Hiley 式、旧建設省告示式、道示式結果とを整合して動的支持力管理式を修正し、本杭の施工管理に利用した。

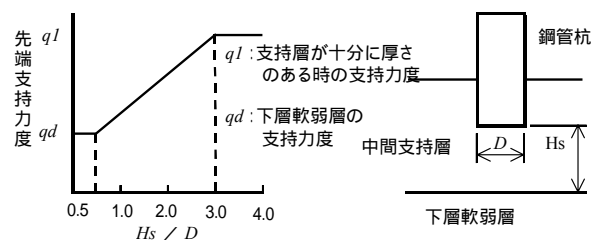


図-B.33 薄層の支持力と有効支持圧比の関係（阪神高速道路公団中掘り杭の方法）

表-B.28 衝撃載荷試験およびリバウンド貫入量の計測結果

杭番号	全抵抗 (kN)	ハンマ エネルギー (kJ)	伝達 エネルギー (kJ)	リバウンド量 (mm)	貫入量 (mm)
V-1 開端杭	8,908	58	48	4	2
V-2 十字リブ	10,860	73	58	3	4

表-B.29 衝撃載荷試験および波形マッチング解析結果

杭番号	全抵抗 (kN)	周面抵抗 (kN)	先端抵抗 (kN)	全静的抵抗 (kN)
V-1 開端杭	8,910	1,050	2,460	3,510
V-2 十字リブ	10,900	1,060	3,360	4,420

表-B.30 動的支持力 (kN)

No.	Hiley 式 R_{du}	5S 式 短期 R_a	道示式 (極限)	設計必要 極限支持力
V-1	14,500	3,160	13,200	9,750
V-2	13,300	3,650	12,700	

表-B.31 急速載荷試験解析結果一覧表

シグナルマッチング解析結果 (STN)		V-1	V-2
地盤		STN	STN
シルト質砂 層厚 11.0 m	降伏強度 f_{y1} (kN/m ²)	20.4	20.4
シルト質粘土 層厚 20.0 m		20.4	20.4
シルト質粘土 層厚 9.0 m		81.6	81.6
シルト質粘土 層厚 4.3 m		81.6	81.6
砂礫 層厚 2.3 m		81.6	81.6
先端砂礫		102.0	102.0
先端砂礫		102.0	102.0
先端砂礫		122.4	153.1
先端砂礫		122.4	153.1
先端砂礫		45,900	40,800
周面抵抗	(kN)	155,940	159,250
先端抵抗	(kN)	51,700	72,180
全静的抵抗	(kN)	207,640	231,430
除荷点法解析結果			
除荷点荷重 (kN) (杭頭加速度値)		21,820	24,610
除荷点加重 (kN) (平均加速度値)		20,490	23,760
予想極限荷重 (kN)		18,500	20,833
作用軸力 × 2.5 (kN)		10,300	10,300

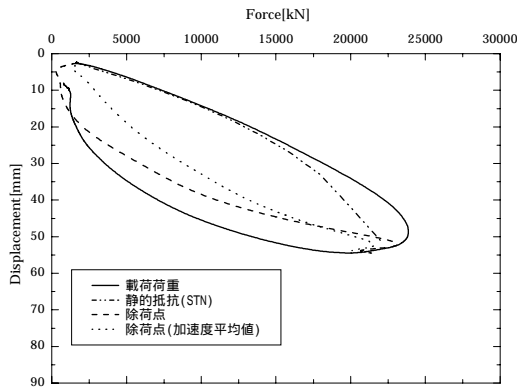


図-B.34 V-1の除荷点法解析結果，STN 荷重変位曲線図

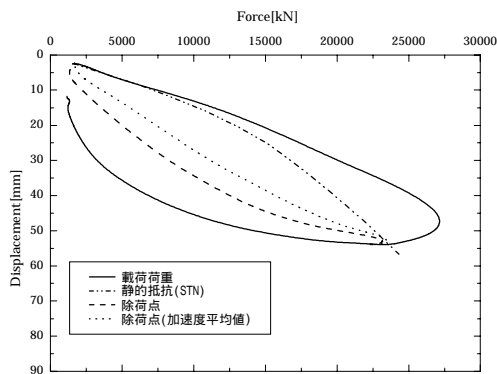


図-B.35 V-2の除荷点法解析結果，STN 荷重変位曲線図

3) 支持力の評価

急速載荷試験を実施することで，薄層での大径杭の支持力が地盤から決まる設計支持力に対して十字リブを取り付けなくても十分発現できることが確認できた．さらに，支持層に杭径程度貫入させれば，設計で採用したジャケット式鋼製護岸の先端閉塞効果 ($\alpha = 0.333$) 程度は十分取れることも併せて確認することができた．

4) 十字リブ効果

本事例では 板厚 15 mm の杭本体下端部分に 板厚 22 mm の十字リブを長さ 1.5 m (= 1D, D: 杭径) 区間取り付けである．この十字リブの効果は，表-B.31 に示すように先端支持力で $72,180 / 51,700 = 1.40$ 倍増加する結果であった．また，設計時に用いた山原の式で求めた先端支持力値 (70,000 kN) と同等に支持力を発現しており，このような地盤では山原の式に基づいて設計しても良いことが確認された．

5) 本杭の打ち止め管理

以上の結果より，この薄層支持層での本杭の打ち止めは，開端杭 (V-1)，十字リブ付き杭 (V-2) の管理値に基づき，表-B.32 に示す打ち止め管理値にて施工することに決めた．

表-B.32 杭の打ち止め管理値 (案)

杭番号	全抵抗 (kN)	ハンマエネルギー (kJ)	リバウンド量	貫入量
V-1 開端杭	8,000	58	4 mm 程度 以上	2 mm 程度
V-2 十字リブ	10,000	73	3 mm 程度 以上	4 mm 程度

d) 試験から得た教訓

今回実施した大口径開端鋼管杭を，経済性より薄層中間支持層が支持層として採用可能かどうか確認した．

中間薄層支持層地盤は，支持力について不明な点が多いことから，大径杭の支持力の把握，支持不足が生じた場合の対策方法として十字リブの効果について，事前試験により確認したケースである．

今回のように，事前試験が実施できるケースはまれであ

ると考えられるが、構造物の重要性、経済設計の可能性の追及等において、同様の支持地盤での試験データの有無によっては事前試験を考慮する場合の参考になると考えられる。

(3) 大径鋼管杭の事前試験の支持力確認による経済設計の例

a) 概要

杭の設計を実施するにあたっては既往の載荷試験結果を参考にして実施しているのが実情である。しかし、大口径開端鋼管杭の支持力は、載荷試験事例も少なく、特に杭先端の閉塞効果がどの程度発現されるかは明らかにされていない。本例は、大口径鋼管杭の先端支持力を事前に載荷試験工事を実施して把握し経済設計を可能にした事例として紹介する¹⁾²⁾。

b) 設計

1) 杭サイズ： $\phi 1,500 \text{ mm} \times t 28 \text{ mm} \times l 79.5 \text{ m}$ (SKK490)

2) 土質条件

土質条件を図-B.36 示す。支持層は、標高 AP-69.0 m 以深の砂礫層としている。

3) 設計支持力

打込み大口径開端鋼管杭の設計支持力は、地層別の周面摩擦力については港湾の基準⁷⁾で計算して良いと考える。一方、杭先端支持力については、先端閉塞率の考え方を確立する必要がある。港湾の基準では、 $\phi 600 \text{ mm}$ 以下の鋼管杭では閉塞率 100%、 $\phi 1,100 \text{ mm}$ 以上の場合には不明であり、大径鋼管杭の場合は鉄筋コンクリート中詰めや先端部シュー、仕切板の取り付けを推奨している。本事例では、東京湾横断道路の杭径 $\phi 1,600 \text{ mm}$ 、根入れ長 $8.3D$ の大口径杭の試験結果より、先端閉塞率 $\eta = 0.26$ を採用した。

その結果、支持層へは $5D$ 根入れし、設計支持力としては、周面摩擦力 22,966 kN、先端支持力 5,510 kN、合計 28,476 kN となった。

c) 施工

1) 杭の打ち止め管理

杭打ちは、大径、長尺であることを考慮して施工能力の大きい大型油圧ハンマー (IHC-S280) を採用して施工した。施工管理は、動的載荷試験および Hiley 式にて管理した。

動的載荷試験およびジャストボーリングの結果、支持層上端が AP-69.0 m であること、AP-79 m 付近に粘性土 (N 値 = 35) が存在することが判明した。杭の支持層への根入れ長は、この粘性土を考慮して杭下端より粘性土上端まで

$3D$ (D : 杭径) 以上確保することを前提として、設計の根入れ長 $5D$ を $3D$ に短くして打ち止めた。

2) 衝撃載荷試験結果

動的載荷試験結果を表-B.33 に、計測した打ち止め時の波形マッチング解析結果を表-B.34 に示す。

3) 静的載荷試験結果

静的載荷試験結果の荷重沈下曲線を図-B.37 に、杭頭の限界抵抗力を表-B.35 に示す。また、杭先端の支持力を表-B.36 に、周面摩擦力度を表-B.37 に示す。試験の結果、先端閉塞率は 60% となり、当初設計を大きく上回る値が得られた。また、周面摩擦力度についても、港湾の基準を上回る結果が得られている。

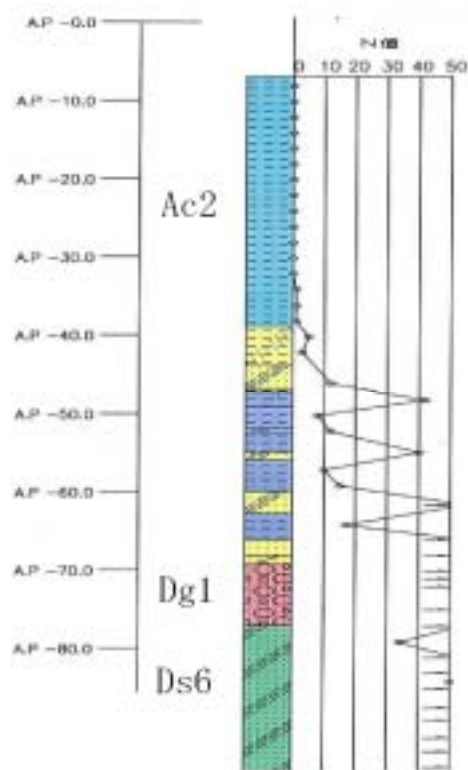


図-B.36 土質条件

表-B.33 衝撃載荷試験打ち止め時計測結果一覧表

先 端 形 状	開端	
杭 先 端 深 度 $A.P.$	(m)	-73.5
根 入 長	(m)	66.0
貫 入 量	(mm)	308
ハ ン マ ー		S-280
ハ ン マ ー エ ネ ル ギ ー	(kJm)	149
伝 達 エ ネ ル ギ ー	(kJm)	103
全 抵 抗	(kN)	12,364

表-B.34 波形マッチング解析結果

杭先端 A.P (m)		-73.50		
【抵抗力度】				
	地 盤	深度 A.P (m)	層厚 (m)	抵抗力度 (kN/m ²)
1	粘性土・シルト	-7.500	36.00	2
	礫混りシルト	-43.500		
2	シルト質細砂	-46.500	3.00	2
	細砂			
3	シルト	-50.600	4.10	5
4	細砂・シルト			
5	シルト	-55.900	5.30	15
6	シルト			
6	シルト質細砂	-60.850	4.95	20
	細砂			
7	シルト	-63.950	3.10	20
8	シルト			
8	シルト質細砂	-69.000	5.05	15
	細砂			
9	砂礫	-71.050	2.05	50
	砂礫			
9	砂礫	-77.050	6.00	150
10	砂礫			
10	礫混り粗砂	-83.500	6.45	
11	礫混り粗砂			
	先 端		-	16,800
【静的抵抗】				
周 面 摩 擦 (kN)				4,148
先 端 抵 抗 (kN)				3,232
合 計 (kN)				7,380

表-B.35 杭頭限界抵抗力

第一限界抵抗力	20,000 kN
第二限界抵抗力 (杭頭極限支持力)	32,000 kN

表-B.36 杭先端極限支持力

杭径 (mm)	φ1,500
支持層の種類	礫層
支持層への根入れ長	3D (4.5 m)
先端支持力 (kN)	15,700
みかけの閉塞率 (%)	60

みかけの閉塞率 $\alpha = \text{先端支持力値} / (300 N A_p)$

ここに、 $N = 50$, A_p : 杭断面積

表-B.37 周面摩擦力度 (kN/m²)

地層種別	試験値	技術基準
砂質土層	3.1N	2N
粘性土層	9.2N	≈ 6N
砂礫層	4.0N	2N

d) 試験から得た教訓

本事例は、大径杭の支持力に関して不明な点が多いことから、事前試験を実施し支持力を確認したケースである。

その結果、上述のように、杭周面摩擦力度は当初設計通りの値を発現することを確認した。先端支持力については、当初設計では東京湾横断道路の結果に基づき 5D 根入れして閉塞率 26 % と設定していたが、試験により 3D 根入れで閉塞率 60 % と大きな支持力を発現することが確認でき、試験を実施したことで経済設計を実施できることになった。

今回のように、支持力性能を事前試験によって確認できるケースはまれであると考えられるが、構造物の重要性、同様の支持地盤での試験データの有無によっては、経済設計、工期、工費の面から検討して、事前試験を検討すると良い考えられる。

B.6 杭が損傷した場合の原因および対策の具体例

(1) 座屈時の対応で増杭した例

a) 概要

本事例は、大口径長尺の棧橋基礎杭を打設したものである。杭が高止まりしたので、当該杭を調査したところ、無理な打撃により杭の先端が破損していた事が判明した事例

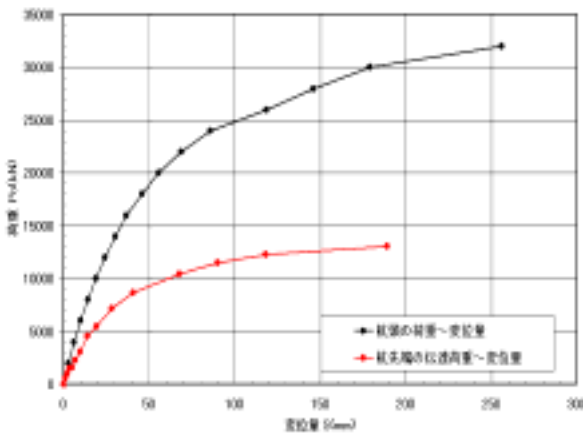


図-B.37 荷重 沈下曲線図

である。

1) 工事内容

鋼管杭打設：φ1200 mm， $l=62.0$ m

2) 地盤概要

地表面から 25 m 程度は N 値 30 程度の砂層があり，その下に厚さ 5 m 程度で換算 N 値が 70 を越える中間層が分布している．この層の打抜きにはオーガーによる先行削孔を実施している．その下には概ね N 値 10 ~ 40 の砂層が続く， N 値 25 程度で厚さ 8 m 程度のシルト層の下にある N 値 50 以上の中砂層を支持層としている（図-B.38 参照）．

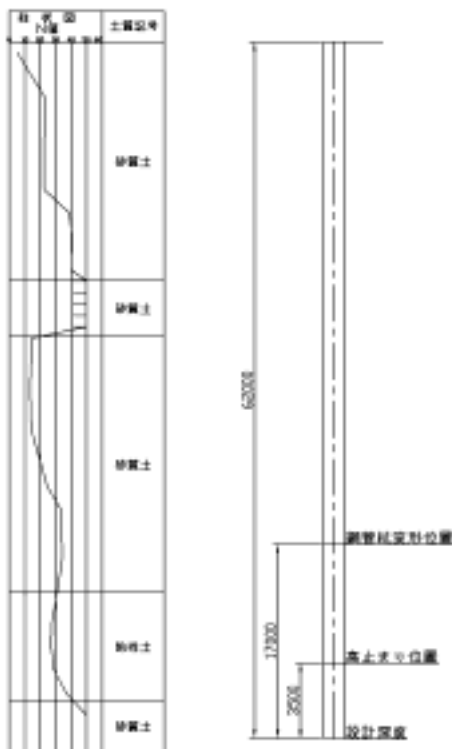


図-B.38 土質柱状図

b) トラブルの発生状況

打設地盤には，非常に固い中間層（5 m）があり，打設区間中の N 値が概ね 30 前後である事から打込み抵抗が大きく，当初より杭体の損傷が懸念された．その為，事前にオーガーを用意し，中間層の先行削孔を実施した．また，過度の打撃による杭体の損傷を回避する為，打設深度毎に標準打撃回数を設定して，連続して 4 m の区間で標準打撃回数の 1.2 倍を越えた場合，リバウンド量を測定し，一当たり 15 mm 以上となった時は，打込み異常と判断し，打込みを中止する事としていた．

しかし，標準打設回数を超える事はあったが，貫入量が一当たり 10 mm 程度ある事や，リバウンド量が少ない事，杭頭に変形が見られない事から打撃を続行し，最終的には

貫入量 2.0 mm 以下を目標に施工を行った．その結果，当杭は目標深度よりも 3.5 m 浅いところで打設不能となった．

この杭に関しては，後日オーガースクリューによる管内削孔を実施したところ，45 m 削孔を行なった所で削孔不能となった．この結果から，杭はこの位置で変形し破損していると考えられる．

c) トラブルの原因

トラブルの原因としては，以下の 3 つの要因が重なり合って発生したものと思われる．

- 残存するマウンド割石や地中の玉石による障害物による杭の閉塞
- 打設途中の鋼管杭先端の変形及び損傷
- 中間層内の固結層の存在

特に，増し杭打設中に，土質柱状図では確認されていない玉石が確認された事から，玉石の影響により杭先端に損傷を受けた杭を固い層に打撃し続けた為に，杭先端が破損した可能性が高いのではないかと考えられる．

d) トラブルへの対処

トラブルの発生した杭は，杭先端での損傷が考えられた為，付加的な対策では，信頼性が確保できないと判断し，施工の確実性から新規に杭を打ち増す方法によって対処した．

打設に際しては，深度毎の標準打撃回数を設定する他，杭先端まで届くオーガースクリュー及びハンマーグラブを用意して，異常打撃が確認された場合には，削孔により障害となる物を直ちに排除した上で再打撃を行なう手はずを整えて施工に当たった．中間層をオーガースクリューで抜く際異常な音が確認された為，ハンマーグラブによる掘削を実施したが，その時には 50 cm 程度の玉石が 10 個発見された．しかしそれ以外には，標準打撃回数を越える事無く無事終了した．

e) トラブルから得た教訓

トラブルが発生した杭以外は，無事打設できたが，増し杭に於いては杭先端から土質柱状図では確認されていない玉石が確認される等，トラブルの要因が隠れていたものと思われる．また，トラブルの発生した杭は，作業中止項目のうち，総打撃回数は超えていたにもかかわらず，他の項目が規定値以下であったため，工事を続行した．特に当初から難易度が高いと思われる杭に関しては，発生したわずかな異常も見逃さず，早期に対処する事が重要である．

付録 B の参考文献

- 1) 斎藤竜司, 下司弘之, 日下部治, 菊地喜昭, 福井次郎, 佐々木宏, 吉沢幸仁, 才村幸生: 東京港臨海道路における先端補強金物を施した鋼管杭の支持力, 第 40 回地盤工学研究発表会, 第 2 分冊, pp.1681-1682, 2005 .
- 2) 富永真生, 越後勇吉, 鹿毛征二: 大口径鋼管グイの支持力について, 第 11 回土質工学研究発表会, pp.653-656, 1976 .
- 3) 赤井公昭, 辻本有一, 佐久間彰三, 半澤武志: 支笏火山灰層における鋼管杭の支持力機構, 土と基礎, Vol.32, No.3, 1984 .
- 4) 菅谷勇, 池田龍彦: 四日市港霞ヶ浦大型岸壁 (-14 m) の施工, 土木技術, Vol.42, No.7, 1987 .
- 5) 矢作枢, 大志万和也, 島崎一男: 鋼管ぐいの先端閉塞効果 (第 2 報), 土木技術資料, No.19-1, 1977 .
- 6) Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms; API Recommended Practice 2A 19th Edition, 1991.
- 7) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007 .
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2002 .
- 9) 上園晃, 高橋邦夫, 山下久男, 西村真二, 竹沢一彦, 滝口要之助: ジェットパイプロ工法で施工した栈橋鋼管杭の支持力とその増大工法について, 土木学会論文集, No.700, pp.15-29, 2002 .
- 10) パイプロハンマ工法技術研究会: パイプロハンマ設計施工便覧, 2003 .
- 11) 千葉照男, 下司弘之, 日下部治, 菊池喜昭, 福井次郎, 佐々木宏, 才村幸生: 東京港臨海道路における載荷試験の概要, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 2 分冊, pp.1669-1670, 2005 .
- 12) 山原浩: 鋼管グイの支持力機構と適用例, 土と基礎, Vol.17, No.11, 1969 .
- 13) 日本港湾協会: ジャケット式鋼製護岸設計指針 (案).