

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1388 September 2021

名古屋港飛島地区における鋼管杭の打込み記録の分析と施工管理手法に関する一考察

水谷 崇亮, 松村 聡, 藤田 亨, 竹内 泰弘, 可児 昌也, 三枝 弘幸, 岸 靖

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 既往の施工管理方法	4
2.1 ハイリー式による施工管理	4
2.2 杭の載荷試験によるハイリー式の補正方法	4
3. 名古屋港飛島地区東岸壁における杭の施工概要	5
3.1 検討対象とした杭の概要	5
3.2 地盤条件	6
3.3 追加土質調査及び施工管理上の課題の整理	6
4. 衝撃載荷試験	8
4.1 試験概要	8
4.2 本試験	9
4.3 補足試験	11
5. 杭の施工時の計測値の概要	11
5.1 施工時のデータの計測方法	11
5.2 施工時の計測値と N 値との比較	12
5.3 施工時の計測値の杭間の比較	14
6. 施工時の計測値に関する考察	17
6.1 計測値の相互関係	17
6.2 施工時の計測値の統計量	19
6.3 施工時の計測値とハイリー式の関係	21
7. 施工管理手法に関する考察	22
8. おわりに	23
参考文献	23
記号表	24

Analysis of pile driving records in the Tobishima area of Nagoya Port and consideration on construction management methods

Takaaki MIZUTANI *
Satoshi MATSUMURA **
Toru FUJITA ***
Yasuhiro TAKEUCHI ****
Masaya KANI *****
Hiroyuki SAEGUSA *****
Yasushi KISHI *****

Synopsis

It is common to manage the construction using the Hailey's formula, when steel pipe piles used for foundations of port facilities. It is known that the estimated value of the axial resistance of piles by the Hailey's formula varies greatly. Measured values such as pile penetration and temporary compression used in the Hailey's formula calculation are considered to be affected by the impact energy of the hydraulic hammer. Therefore, when constructing the pier support piles in the Tobishima area of Nagoya Port, we measured the pile penetration and temporary compression with the input energy kept constant, and tried to examine their interrelationships.

As a result, it was confirmed that the change in the depth direction of the cumulative energy obtained as the product of the input energy and the number of blow corresponds to the SPT-N value of the ground to a certain extent. In addition, by confirming the value of the penetration with the input energy at the same level, it was shown that it could be used as a reference to judge whether a certain pile has the same construction condition as the other piles. On the other hand, the amount of temporary compression varies widely even when the input energy is the same, and it seems to be inferior as a construction management index. Furthermore, according to the measured values obtained on the site, it was shown that the estimated value by the Hailey's formula was roughly proportional to the ratio of the input energy and the pile penetration. The ratio varies more than the penetration measured with the input energy constant, but it seems to be a reference for construction management to some extent.

As described above, possibly a construction management index with relatively small variation could be obtained by measuring the pile penetration and temporary compression with the input energy constant, but it is uncertain whether this relationship holds at other sites. It is a topic for future study. By carefully and comprehensively verifying the changes in the depth direction of the measured values at each site and the changes in the relationship between the measured values, it is important to confirm whether the pile is constructed in the same way as the piles used for loading tests or the other piles at the same site.

Keyword: Steel pipe pile, Quality control for pile driving, Hiley's formula, Dynamic loading test, Pile penetration, Temporary compression

* Head, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
** Senior Researcher, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
*** Director, Nagoya Port Office, Chubu Regional Development Bureau
**** Maintenance Section Chief, Nagoya Port Office, Chubu Regional Development Bureau
***** Toa, Mirai and Honma Special Construction Joint Venture
***** Research and Development Center, Toa Corporation
***** Toyo, Aomi and Kabuki Special Construction Joint Venture
Nagase 3-1-1, Yokosuka, Kanagawa, 239-0826, Japan
Phone: +81-46-844-5057, Fax: +81-46-855-0618, e-mail: mizutani-t@p.mpat.go.jp

名古屋港飛島地区における鋼管杭の打込み記録の分析と 施工管理手法に関する一考察

水谷 崇亮*・松村 聡**・藤田 亨***・竹内 泰弘****
可児 昌也*****・三枝 弘幸*****・岸 靖*****

要 旨

港湾施設の基礎工に用いる鋼管杭を打撃施工する際には、ハイリー式を用いた施工管理を行うのが一般的である。しかしながら、ハイリー式による杭の軸方向押込み抵抗力の推定値は大きくばらつくことが知られている。ハイリー式の計算に用いる杭の貫入量、リバウンド量などの計測値は、施工時の油圧ハンマーの打撃エネルギー（入力エネルギー）の影響を受けることが考えられ、ハイリー式による推定値のばらつきはその影響を受けていることが推測される。そこで、名古屋港飛島地区における栈橋支持杭の施工に際し、各杭の施工時の入力エネルギーを揃えた状態で貫入量、リバウンド量の計測を行い、その相互関係等について検討した。

検討の結果、入力エネルギーと打撃回数の積として得られる累積エネルギーの深度方向の変化が地盤のN値の変化傾向と一定程度対応することを確認した。また、入力エネルギーを一定にして貫入量の値を確認することで、ある杭が他の杭と同様な施工状況となっているかどうか判断する参考資料とできる可能性を示した。一方、リバウンド量は入力エネルギーを一定とした場合でもばらつきが大きく、施工管理指標としてはやや劣るものと思われる。さらに、今回得られた計測値によると、ハイリー式による推定値は入力エネルギーと貫入量の比に概ね比例することを示した。入力エネルギーと貫入量の比は、入力エネルギーを一定として計測した貫入量よりはばらつきが大きいものの、ある程度は施工管理の参考となりそうである。

以上のように、入力エネルギーを一定として貫入量やリバウンド量を計測することで比較的ばらつきの小さい施工管理指標を得られる可能性が示されたが、この関係が他の現場で成立するかどうかについては今後さらに検討を進める必要がある。各現場で得られる施工時の計測値の深度方向の変化傾向や計測値相互の関係の変化傾向等を慎重に、かつ、総合的に検証することで、施工した杭が、載荷試験により軸方向押込み抵抗力を実測した杭や、同現場の他の杭と同じように施工できているかを確認していくことが重要であると考えられる。

キーワード：鋼管杭、打止め管理、ハイリー式、衝撃載荷試験、貫入量、リバウンド量

* 地盤研究領域 基礎工研究グループ長
** 地盤研究領域 基礎工研究グループ 主任研究官
*** 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾事務所長
**** 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾事務所 保全課長
***** 東亜・みらい・本間特定建設工事共同企業体
***** 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター 地盤・防災技術グループ
***** 東洋・あおみ・株木特定建設工事共同企業体
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 e-mail: mizutani-t@p.mpat.go.jp

1. はじめに

港湾施設の基礎工に用いる鋼管杭を打撃施工する際には、ハイリー式を用いた施工管理を行うのが一般的である。しかしながら、杭の軸方向押込み抵抗力 R_t のハイリー式による推定値 R_h は大きくばらつくことが知られている(沢口, 1983)。また、 R_h の算定には杭の施工時の貫入量 S 、リバウンド量 K などを用いるが、施工時の動的な挙動である S 、 K などに基づき養生後の杭の静的な抵抗力である R_t を推定しようとするのは、そもそもの原理に無理がある。そのため、港湾の施設の技術上の基準・同解説(日本港湾協会, 2018)(以下、港湾基準)では、ハイリー式により算定される R_h を杭の R_t の推定値として使用してはならないとする一方、同じ現場で同じ諸元の杭を多数施工する際に各杭が概ね同じように施工できていることの確認や、杭先端の支持層への到達状況の確認等の補助的な指標とするなど、施工管理目的に限って使用することが許容されている。あわせて、港湾基準では、施工管理の際に R_h のみに着目するのではなく、杭先端の深度に対する S や K の変化傾向、それらとハンマー打撃により杭に与えられる入力エネルギー E_0 との対応関係などを合わせて確認するのがよいと述べられている。

これに対し、菊池ら(2009)は、杭の載荷試験の結果を用いてハイリー式を補正する方法を提案しており、実務においてしばしば活用されている。しかしながら、この方法はハイリー式のばらつきの改善には寄与しない(2.2で述べる)。また、杭の打撃施工時に衝撃載荷試験と同等のデータを取得し、各杭の R_t の推定に活用することも考えられるが、時間的・経済的コスト等の観点からすぐに実務に展開できる状況ではない。従って、当面はハイリー式による施工管理から脱却することが難しく、 R_h のばらつきを考慮しつつ施工管理に活用していかざるを得ない。

S 、 K などの計測値は施工時の E_0 の影響を受けると考えられるため、著者らは、名古屋港飛鳥地区における栈橋支持杭の施工に際し、各杭の施工時の E_0 を揃えた状態で S 、 K の計測を行い、その相互関係等について検討することを試みた。本稿はその具体的な実施内容について紹介するものである。

2. 既往の施工管理方法

2.1 ハイリー式による施工管理

ハイリー式は、ハンマーの打撃により杭に入力される

エネルギーと、杭が地盤に貫入する際になす仕事とが等しいと考えることにより導かれる式である。鋼管杭の場合、ハンマーと杭の衝突がほぼ弾性的であること、キャップ(杭の頭部とハンマーの間に設置する接続部)の弾性変形量が杭体や地盤の弾性変形量と比較して十分に小さく無視できることなどから、式(1)のように簡略化された式を用いるのが一般的である。

$$R_h = \frac{e_f E_0}{S + \frac{K}{2}} \quad (1)$$

ここで、 e_f はハンマー効率と呼ばれる係数であり、日本建築学会(1963)では $e_f=0.5$ とすることが提案されている。 $e_f=0.5$ とすることで、既往データを平均的に見れば R_h と載荷試験で得られた R_t が等しくなるが、個々のデータを見れば R_h は R_t の $2/3 \sim 3/5$ の範囲で大きくばらついている。

式(1)に用いる S 及び K は、施工に油圧ハンマーを用いる場合、杭の打止め直前の $10 \sim 20$ 回程度の打撃時に計測された値の平均値を用いることとされている。しかしながら、栈橋の施工等では現場都合により打止め直前に S 、 K を計測することが難しく、杭先端が打止めの予定深度よりも数十センチメートルから数メートル高い位置で計測せざるを得ない場合も見受けられる。

なお、式(1)は杭が支持杭と見なされるときに限り適用可能である。摩擦杭については適用できない点に注意が必要である。

2.2 杭の載荷試験によるハイリー式の補正方法

近年、杭の急速載荷試験や衝撃載荷試験等の手法が発達・普及し、比較的容易に実施できるようになった。特に衝撃載荷試験については、試験のための加力装置として杭の打撃施工に用いる油圧ハンマーを利用できること、特別な反力機構を必要としないことなどから、港湾の施設整備において鋼管杭を打撃施工する場合への適用性が高く、活用が進んでいる。

菊池ら(2009)は、施工現場で杭の載荷試験を実施し、その結果を用いてハイリー式を補正する方法を提案している。この方法は、対象とする現場で、少なくとも1本の杭について、施工時と養生後の2回の載荷試験を実施し、ハンマーエネルギーの伝達効率や杭のセットアップ(施工後一定の期間を経ることで杭の軸方向抵抗力が増大する現象)の比率(セットアップ率)等のパラメータを求め、それらを式(1)の右辺に乗じることで R_h と R_t を一致させようというものである。

菊池ら(2009)の方法を施工管理に適用する場合、実

務的には、次のような方法でハイリー式を補正することがよく行われている。まず、ある現場において載荷試験を実施する杭（仮に No. i 杭とする）の施工時に E_{0i} 、 S_i 、 K_i を計測する。次に所定の養生期間を設けた後、載荷試験（試験方法は現場状況等に応じて適切なものを選択）を行い R_{ti} を取得する。これらのデータから式(2)により補正係数 α を算出する。

$$\alpha = \frac{S_i + \frac{K_i}{2}}{E_{0i}} \times R_{ti} \quad (2)$$

その現場で他の杭の施工管理を行う際には、式(2)で得られた α を用いて式(3)により R'_h を計算し、 R_h の代替として用いる。

$$R'_h = \frac{\alpha E_0}{S + \frac{K}{2}} \quad (3)$$

式(3)をハイリー式の補正式などという。式(3)はその現場において実施した杭の載荷試験結果を反映しているため、 R'_h と R_h を比較すると R'_h の方が R_{ti} に近い値となることが期待される。

式(1)と式(3)を比較すると、このハイリー式の補正方法は、実質的には式(1)の e_f の値をその現場における載荷試験により修正しているのと同等であることがわかる。つまり、 α によりハイリー式の算定値の倍率を調整しているに過ぎない。従って、 R'_h のばらつきは R_h のばらつきと同程度であると推定され、ハイリー式の算定値が持つばらつきが大きさが改善されるわけではないということがわかる。

3. 名古屋港飛島地区東岸壁における杭の施工概要

3.1 検討対象とした杭の概要

本稿で検討対象とするのは、名古屋港飛島地区東岸壁において打撃施工された栈橋支持杭である。図-1に施工位置を示す。栈橋はいくつかの工区に分けて整備が進められているが、本稿ではそのうちのA工区、B1工区、B2工区で施工された杭66本を対象とした。

図-2に示すとおり、栈橋は、法線直角方向3列（海側杭・中間杭・陸側杭）、法線平行方向6列、計18本の杭で1スパン（法線方向幅25m、法線直角方向幅36m）を支持する構造となっている。A工区では4スパン、B1工区では2スパン、B2工区では5スパン、合計11スパンの栈橋を築造する。本稿では、これらの工区の海側杭66本（6本×11スパン）の施工記録を使用する。

杭には工区名と通し番号を組み合わせた杭番号を付



図-1 施工位置（Google Maps に追記）

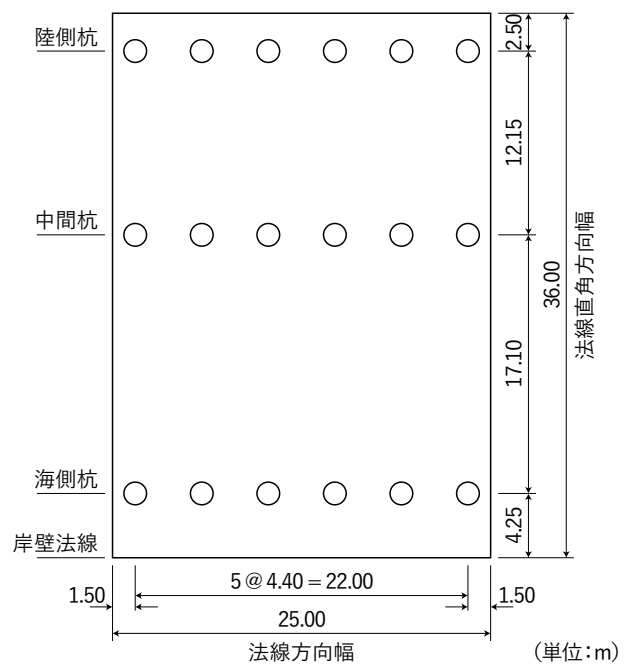


図-2 栈橋1スパン分の杭の配置

した。A工区はA-1～A-24の24本、B1工区はB1-1～B1-12の12本、B2工区はB2-13～B2-42の30本である（B1工区とB2工区は通し番号となっている）。

いずれの杭も杭径 D は1500mm、板厚 t は15mmである。杭頭（杭天端）は標高+3.6mに統一されているが、杭の先端標高は工区毎に設定されている。そのため、杭長は工区毎にわずかに異なっており、A工区では

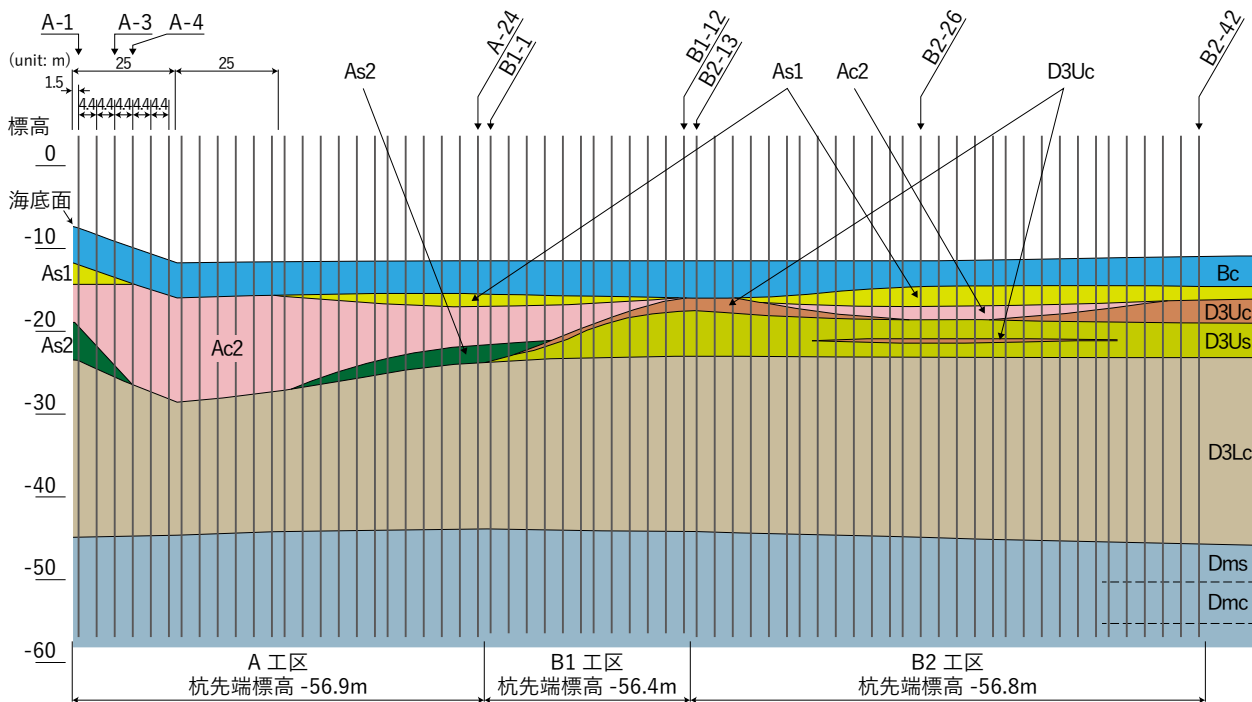


図-3 杭の打設深度及び事前の土質調査に基づく土層縦断面図

60.5m, B1 工区では 60.0m, B2 工区では 60.4m である。杭の打設深度を図-3 に示す。

いずれの杭も油圧ハンマー (IHC S-280) により打撃施工された。なお、A-3 で実施した養生後の衝撃載荷試験とその後の杭の打止めの際には、最大打撃エネルギーが大きい油圧ハンマー (IHC S-350) を使用した(4.2 参照)。

3.2 地盤条件

図-3 には杭の打設深度とあわせて土層縦断面図を示している。図-3 に示した土層縦断面図は事業前に実施された土質調査に基づくものであり海底面が標高 -10m 付近となっているが、実際には栈橋の整備に合わせて標高 -14.4m まで掘り下げられ Bc (埋土層) が取り除かれている。各土層の構成土質、N 値等を表-1 に示す。

図-3 からわかるとおり、土層の構成は B1 工区を境に A 工区側と B2 工区側で多少異なっている。A 工区側では、浅部に As1, Ac2, As2 などの南陽層 (沖積層) が存在し、その直下に熱田層 (洪積層上部) の下部粘性土層と見られる D3Lc が現れる。D3Lc の下部には海部・弥富累層 (洪積層中～下部) とされる Dms が存在しており、この層を杭の支持層としている。

一方、B2 工区側では南陽層は薄く、代わって A 工区側では見られなかった D3Uc, D3Us (熱田層の上部粘

性土層、上部砂質土層) が堆積している。それ以深は A 工区側と同様に D3Lc, Dms で構成されており、Dms が杭の支持層となる。

施工にあたり懸念事項として挙げられたのが Dmc の存在である。Dmc は Dms に挟まれる砂質シルトの土層で、N 値が 13～22 と小さくなっている。Dmc は現場全域ではなく一部の土質調査地点でのみ確認された土層ではあるものの、予定している杭先端標高に比較的近い位置に現れることから、杭先端が Dmc にあたってしまった場合にその杭の R_t (特に先端抵抗力 R_p) が小さくなることが心配された。

3.3 追加土質調査及び施工管理上の課題の整理

Dmc の分布状況をさらに詳しく把握するため、標高 -45m 以深を対象とした追加の土質調査を行った。調査は 4 地点で実施しており、調査地点は杭 A-4, A-24, B1-12, B2-26 の施工位置に対応した地点である (図-3 参照)。各地点で得られた土層と N 値の調査結果を図-4～図-7 に示す。図-4～図-7 によると、いずれの調査地点でも標高 -50～-60m の間に N 値が低い粘土・シルトを含む層が見られる。この層が Dmc に対応していると考えられる。A 工区, B1 工区, B2 工区で計画されている杭先端標高は -56.4～-56.9m であるから、ちょ

表-1 各土層の構成土質, N値等

土層名	構成土質	N 値 (平均値)	記 事
As1	中砂 シルト混じり細砂 シルト質細砂	1~22 (8)	細粒分を含む砂, 細粒分をほとんど含まない砂の混合土 シルトの薄層, 貝殻片を混入
Ac2	砂質シルト シルト質粘土	1~4 (2)	概ね均質な粘性土 貝殻片, 細砂の薄層, 植物片を含む
As2	シルト質砂 粘土質砂 砂	4~25 (11)	細粒分をやや多く含む砂が主体 希に砂質シルトの薄層, 粒径7mm以下の垂円礫を含む 部分的に貝殻片を混入
D3Uc	シルト 凝灰質シルト	6~19 (11)	凝灰質粘性土が主体 部分的に礫状に固結 概ね均一だが一部で礫や1cm程度の砂の薄層を挟む
D3Us	シルト質細砂 シルト混じり細砂 細砂	19~50 (41)	細粒分をやや多く含む砂と細粒分を含まない砂からなる 部分的に粒径7mm以下の礫を含む
D3Lc	シルト 粘土 シルト質粘土	4~20 (10)	均質な粘性土で, 上部は砂分をやや多く含む砂質シルト状 全体に貝殻片, 有機物を含む わずかに砂をブロック状に含む
Dms	シルト混じり砂 シルト質砂 細砂・中砂	11~50 (38)	上部は細粒分をやや多く含む砂でシルトの薄層を挟む 下部は細粒分を少量含む砂で概ね均質 下部の一部に礫, シルトの薄層を挟む
Dmc	砂質シルト	13~22 (16)	一部の調査地点で確認された土層 概ね均質な砂質シルトで下部に向かって細粒分が多くなる 一部で火山灰層を挟む

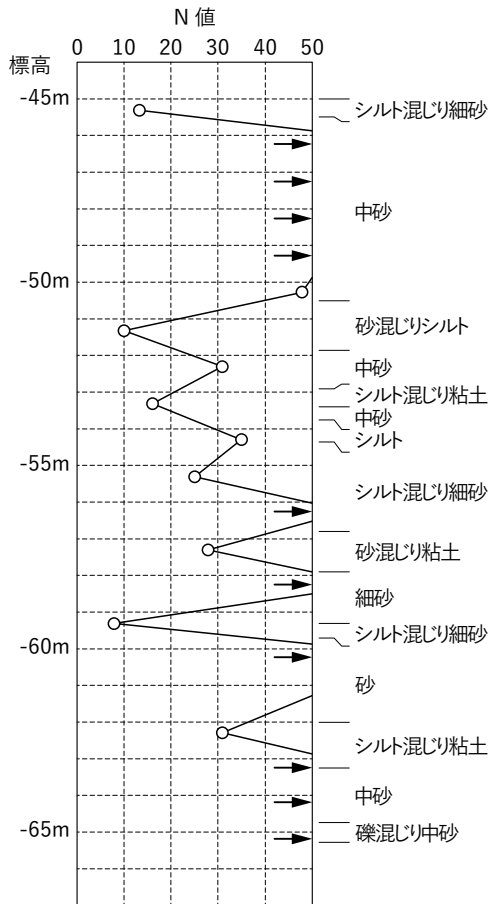


図-4 杭 A-4 施工位置での追加土質調査結果

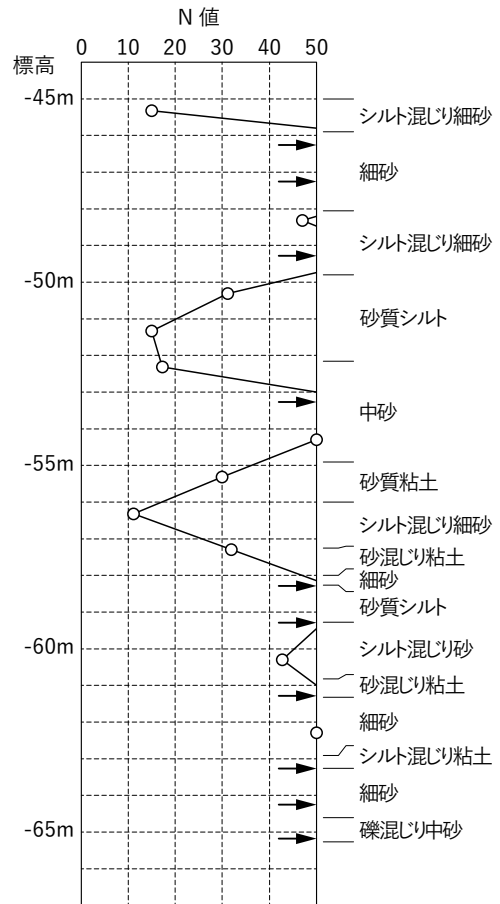


図-5 杭 A-24 施工位置での追加土質調査結果

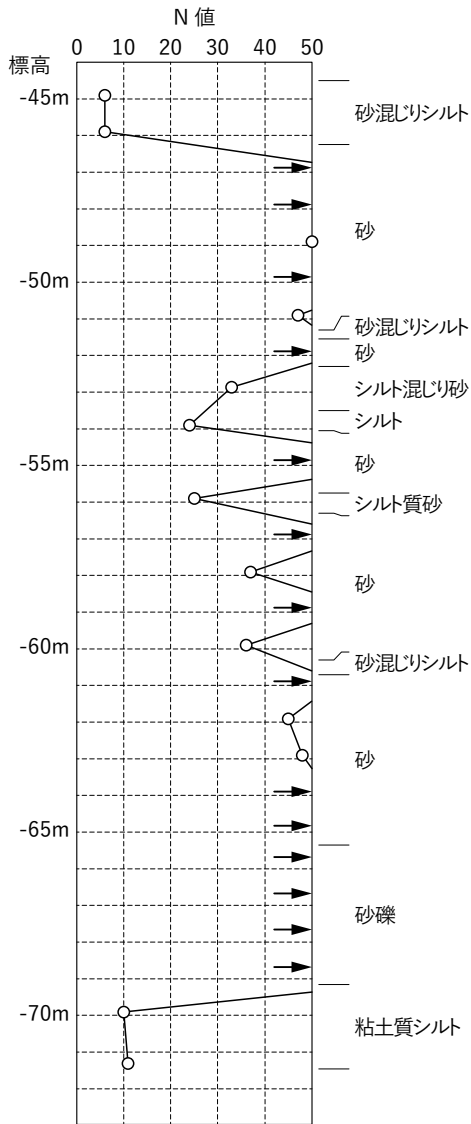


図-6 杭 B1-12 施工位置での追加土質調査結果

うどN値が小さい標高で杭を打ち止めることになり、 R_t の不足が心配される調査結果となった。

そこで、現地で杭の載荷試験を実施し、設計で期待している値に足る R_t が得られることを確認することとした。また、 R_t が十分に発揮されない杭が生じた場合にそれを確実に捕捉することができるよう、施工管理の精度を高める工夫を行うこととした。

4. 衝撃載荷試験

4.1 試験概要

杭の R_t を調査するための載荷試験方法として、押込み試験、急速載荷試験、衝撃載荷試験等がある。今回の試験では、設計上必要とされる値以上の R_t が実杭で発

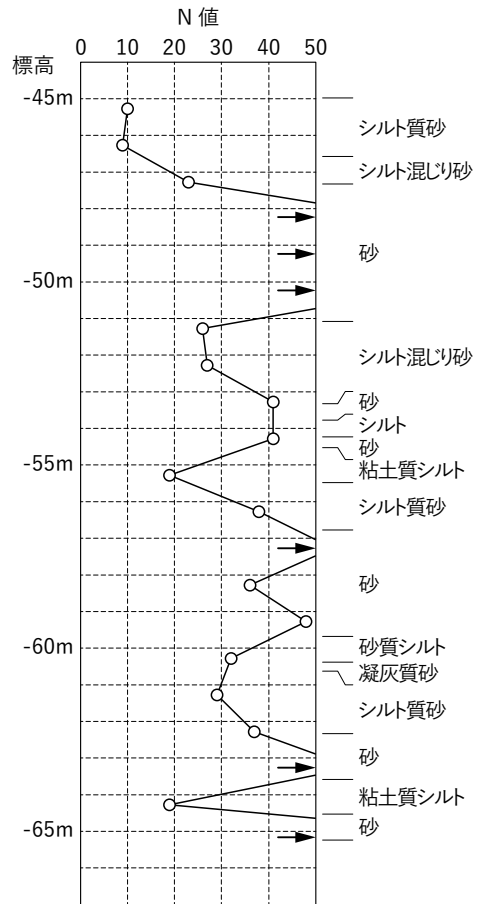


図-7 杭 B2-26 施工位置での追加土質調査結果

揮されることの確認及び杭の施工管理に用いる資料収集を試験目的としていることや、すでに隣接工区の施工が進められている現場の状況等を勘案し、衝撃載荷試験を選択した。

試験対象とする杭は、施工が進む現場の都合を考慮しつつ、施工の順序が早くかつ直近に土質調査結果が存在する杭 A-3 とした（隣接する A-4 の施工位置で追加土質調査を実施）。しかしながら、A-4 の施工位置での土質調査（図-4 参照）によると、A-3 の杭先端標高 -56.9m 付近では N 値が比較的高く、杭にとって有利な条件となる恐れもある。そこで、補足的な試験として、杭 B1-1 についても衝撃載荷試験を実施することとした。B1-1 に隣接する A-24 の施工位置における土質調査結果（図-5 参照）によると、B1-1 の杭先端標高 -56.4m 付近では N 値が 10 ～ 20 程度と小さく、 R_t の不足が懸念される状態であることが確認できる。以下、A-3 に対する衝撃載荷試験を本試験、B1-1 に対する衝撃載荷試験を補足試験という。

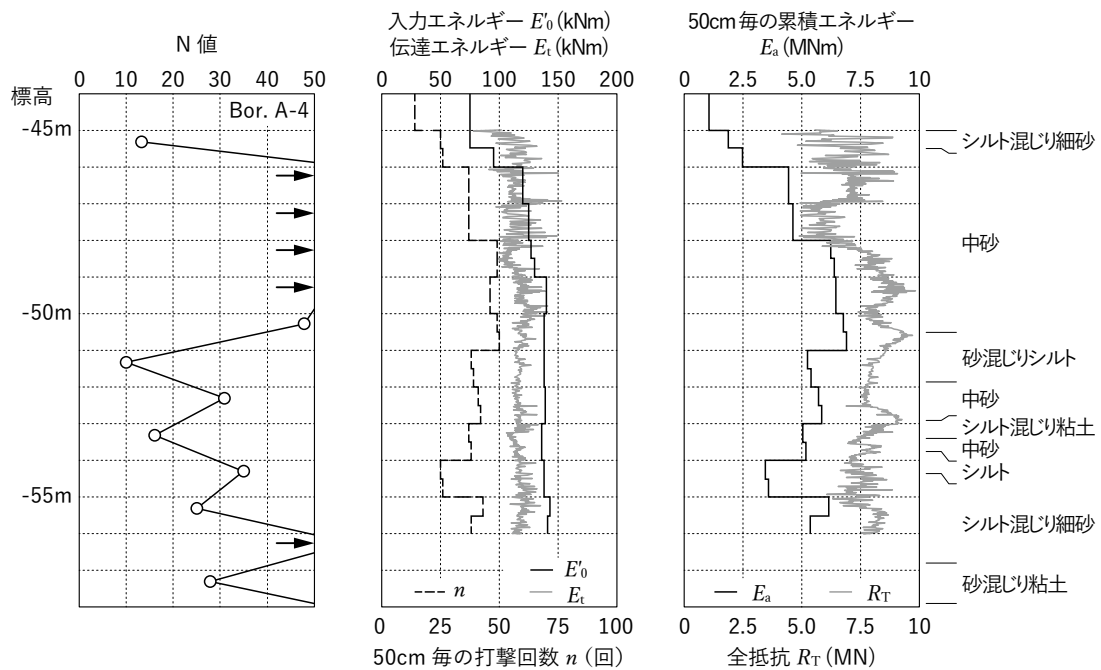


図-8 A-3 施工時の各種計測値と地盤の N 値との対比

4.2 本試験

(1) 試験条件

衝撃載荷試験は JGS 1816-2002 (地盤工学会, 2002) に従い実施した。試験対象とした杭は先述のとおり A 工区の杭 A-3 で、 $D=1500\text{mm}$ 、 $t=15\text{mm}$ である。試験は施工時と養生後 (21 日後) の 2 回実施した。この杭は試験終了後にそのまま栈橋の支持杭として使用するため、施工時の試験の際には杭先端標高 -56.0m で施工を停止し、養生後の試験を行った後に本来の打止め時の杭先端標高 -56.9m まで打ち下げた。

施工時の衝撃載荷試験は他の杭の施工に用いるものと同じ油圧ハンマー (IHC S-280) により実施した。養生後の衝撃載荷試験では、杭のセットアップにより R_t が増加し打撃エネルギーが不足することが予測されたため、最大打撃エネルギーが大きい油圧ハンマー (IHC S-350) を調達し試験に使用した。

データの計測は Pile Driving Analyzer (Pile Dynamics, Inc) (以下, PDA) により実施した。センサーは、加速度計とひずみ計各 1 台を 1 組とし、2 組を杭頭 (杭天端) から $1D$ 離れた位置に軸対称となるよう取り付け付けた。JGS 1816 では、打撃時に杭頭部で応力状態の乱れが大きいことから、センサーの取付け位置を杭頭から $1.5D$ 以上離すように規定されている。しかしながら、今回は実際の構造物に使う杭を試験対象としているため、杭頭

の重防食の関係上、杭頭から $1D$ の位置にセンサーを取り付けた。なお、詳細は割愛するが、計測された力の時刻歴と速度×インピーダンスの時刻歴の冒頭部分の一致精度を確認すること等により、取得データの妥当性を確認している。

試験終了後、取得したデータを用いて CAPWAP (Pile Dynamics, Inc) による波形マッチング解析を行い、杭の軸方向押込み抵抗力 R_t 、先端抵抗力 R_p 、周面抵抗力 R_f 、周面抵抗力度 r_f を求めた。地盤抵抗モデルには Smith (1960) のモデルを適用した。

(2) 施工状況

杭 A-3 の施工中に得られた種々の計測値を図-8 に示す。図-8 には直近の土質調査地点 (隣接する杭 A-4 の施工位置) で得られた N 値及び土質をあわせて示している。

図-8 に示した計測値のうち、入力エネルギー E_0 と打撃回数 n は施工管理記録として施工者により記録された値である (5.1 参照)。 E_0 は杭を 50cm 貫入させる間の油圧ハンマーの入力エネルギー E_0 (1 回の打撃で杭に与えられる打撃エネルギー) の平均値、 n は杭を 50cm 貫入させるのに要した打撃回数である。いずれもその 50cm 区間全体に渡る計測値として図示しており、そのためグラフが階段状になっている。 E_0 と n を乗じることでその 50cm 区間の杭貫入に要したエネルギーが得ら

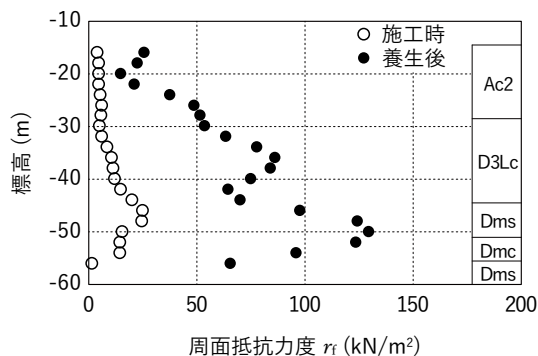


図-9 周面抵抗力度 r_f の深度方向分布

れる。これを 50cm 毎の累積エネルギー E_a として図-8 に示している。

一方、図-8 に示した伝達エネルギー E_t と全抵抗 R_T は PDA により計測された値である。これらの計測値は 1 打撃毎に記録されている。 E_t は油圧ハンマーの打撃により実際に杭に加えられたエネルギー（杭に取り付けたセンサーで計測した打撃エネルギー）である。油圧ハンマーで杭を打撃する際には、機械的なエネルギー損失やキャップ部分でのエネルギー損失が生じるため、 E_t は油圧ハンマー側で計測される E_0 より小さい値となるのが一般的である。また、 R_T は地盤の動的な抵抗成分を含む抵抗度であり、静的な抵抗度である R_t には一致しないが、杭の抵抗度の定性的な変化傾向を表す指標として利用することができる。

図-8 において N 値と E_a 、 R_T の深度方向の変化傾向を比較すると、N 値が小さい標高 -50 ~ -56m 付近で E_a 、 R_T がやや減小する傾向が見られるものの、それほど明確な変化ではない。N 値がまさにその標高における地盤状況を表しているのに対し、 E_a 、 R_T は杭の周面抵抗度を含めた杭全体での抵抗度に対応しているため、N 値ほど明確な変化が現れず、また、N 値の変化よりも深度方向にやや遅れて変化するものと推測される。このようなことから、施工管理の際は、 E_a 、 R_T 等の値そのものを見るのではなく、深度方向の変化状況を注意深く確認する必要があることがわかる。

図-8 に示した諸値とは別に、杭先端標高 -55.8 ~ -55.9m 付近で S 及び K が計測されている。7 回の打撃で 117mm の杭頭残留沈下が生じており、 $S=16.7\text{mm}$ 、 $K=5\text{mm}$ と報告されている。

(3) 波形マッチング解析の結果

施工時及び 21 日養生後に衝撃載荷試験を実施し、得られたデータを用いて波形マッチング解析を実施した。

表-2 衝撃載荷試験で確認された各抵抗度

	先端抵抗度 R_p (kN)	周面抵抗度 R_t (kN)	押し込み抵抗度 R_i (kN)
本試験 A-3			
施工時	3,308	2,040	5,348
21日養生後	4,202	13,530	17,732
補足試験 B1-1			
施工時	3,262	2,645	5,907
1日養生後	2,560	3,782	6,342

施工時の試験については、杭先端標高 -55.9m 付近での、ある 1 回のハンマー打撃により得られたデータを用いて解析を実施している。一方、養生後の衝撃載荷試験では周面抵抗度が大きいため、1 回のハンマー打撃では十分な力を杭先端まで載荷することができず、各抵抗度を精度よく推定することが難しい。このような場合、連続的にハンマー打撃を加えることにより、当初の打撃では浅部の周面抵抗度が、後になるほど深部の周面抵抗度が発揮される状況となることが知られており、このような特性を利用して、初期の打撃時のデータから浅部の周面抵抗度 r_f を、終盤の打撃時のデータから深部の r_f を推定することが行われる（鋼管杭協会支持力推定法委員会、1995）。本試験でもこの方法を採用し、養生後の試験については 4 回のハンマー打撃のデータについて解析を行って、それらの結果を組み合わせることにより抵抗度を算定することとした。養生後の試験では 79 打撃分のデータを取得したが、標高 -43m 以浅の r_f は 1 回目、標高 -43 ~ -51m 付近の r_f は 14 回目、それ以深の r_f は 20 回目の打撃時のデータの解析結果により評価した。また、先端抵抗度 R_p は 77 回目の打撃時のデータについての解析結果により算定した。なお、何回目の打撃によるデータを選択するのがよいかを決定する一般的な方法は確立されておらず、解析実施者の判断に委ねられているのが実状である。

解析により得られた周面抵抗度 r_f の深度方向分布を図-9 に、先端抵抗度 R_p 、周面抵抗度 R_t 、軸方向押し込み抵抗度 R_i を表-2 に示す。表に示した本試験の 21 日養生後の R_t は、設計で求められている値を満足しており、杭が十分な支持力を有していることが確認された。

図-9 によると、全深度にわたり施工時の r_f に対して養生後の r_f が大きく増加し、セットアップが生じやすい地盤であることが確認できる。また、表-2 によると、

R_p にもセットアップが生じているが、セットアップ率（養生後の抵抗力と施工時の抵抗力の比）は R_p で1.3程度、 R_t で6.8程度となっており、 R_t の方が大きいことがわかる。

R_p と R_t のセットアップ率が異なることにより、施工時は R_p が R_t の約60%を占めているのに対し、養生後には R_p は R_t の25%程度となり、 R_t に対する R_p の寄与率が大きく変化する。このようなことから、施工時の S や K を用いて算定される R_h 、 R'_h と、実際の杭の性能（養生後の静的な抵抗力）である R_t との対応があまり良好でないことが理解され、 R_h 、 R'_h の値そのものではなく、その鉛直方向の変化傾向や杭毎の算定値の差異に注意して施工管理することが重要であると再確認できる。

4.3 補足試験

(1) 試験条件

補足試験は杭先端標高付近で N 値が小さいと考えられる杭 B1-1 について実施した。試験方法は JGS 1816-2002（地盤工学会，2002）に準拠している。補足試験では打撃エネルギーの大きなハンマーを準備することができず、施工時・養生後とも施工に用いるハンマー（IHC S-280）を使用することとなった。そのため、養生期間を長く設定すると、養生後の載荷試験の際にハンマーの打撃エネルギー不足により杭の再打撃が困難となる可能性が想定された。4.1 で述べたとおり、補足試験の目的は N 値が小さいと想定される深度での R_p を確認することにあるが、本試験の結果（表-2 参照）で確認されたように R_p のセットアップは比較的小さいと考えられること、すでに本試験でセットアップ率が得られているので施工時の R_p を計測することで最低限必要な情報は得られると考えられること等から、補足試験で養生期間を無理に長く設定する必要性は薄いと判断された。そこで、補足試験では、施工時に衝撃載荷試験を実施した後、参考的にその翌朝（1日養生後）に試験を実施する方針とした。施工時の試験では杭先端標高-56m 付近で施工を停止し、翌日の養生後の載荷試験の際に計画通りの杭先端標高-56.4m まで打ち込んだ。施工時に S 、 K を計測し、それぞれ 13.6mm、6.7mm であったことが報告されている。

(2) 試験結果

表-2 に補足試験の波形マッチング解析により得られた各抵抗力を本試験の結果と合わせて示している。いずれも1回のハンマー打撃により得られたデータを用いて解析しており、本試験の養生後試験の場合のような複数回の打撃時のデータを用いた解析結果の組み合わせは実

施していない。

表-2 より、施工時の補足試験では本試験と同程度の R_p 、 R_t 、 R'_t が得られていることがわかる。また、養生期間は1日と非常に短いものの養生後の R_t は施工時の1.4倍に達しており、十分な養生期間を経ることで大きなセットアップが期待できると思われる。一方、養生後の R_p は施工時の値よりも小さくなっているが、このような現象は養生後の試験でハンマーの打撃エネルギーが不十分な場合にしばしば見られる。養生後の R_t が施工時よりも大きくなっていることなどを考慮すると、養生後の試験の際に R_t の値が大きくなることで杭先端まで十分な荷重が伝達されず、実際に杭が持つ R_p を適切に計測できていないと考えるのが自然である。前述のとおり施工時の R_p の値が本試験で確認された R_p と同程度であることから、補足試験を実施した B1-1 の R_p は、十分な養生期間を経た後には、本試験を実施した A-3 の R_p と遜色ない値になると推定される。

5. 杭の施工時の計測値の概要

5.1 施工時のデータの計測方法

杭の施工時に計測されるデータには大きくわけて2種類のものがある。1つはハンマーコントローラの記録用紙に記録される等の形式により施工時に連続的に計測されるデータである。具体的には、ハンマー打撃による入力エネルギーと打撃回数が挙げられ、これらは標高50cm きざみで整理されるのが一般的である。本稿でも、杭が50cm 貫入する間の1打撃当たりの入力エネルギーの平均値 E_h 、及び、杭が50cm 貫入するのに要した打撃回数 n として検討に用いる。

もう1つのデータは打止め管理記録などと呼ばれるもので、杭の貫入量 S とリバウンド量 K が挙げられる。 S 、 K は、杭の打止め直前の10～20回程度の打撃時に計測された杭頭の沈下量の時刻歴から読み取って整理する。杭頭の沈下量の時刻歴は、杭頭付近に貼付した記録用紙にペンをあてておき、杭にハンマー打撃を加える際にペンを水平にゆっくりと動かす方法で計測されるのが一般的である。杭頭の変位量の記録の例を図-10に示す。図-10に示した計測例は本試験を実施した A-3 の施工時の記録であり、4.2 (2) で述べたとおり、 $S=16.7$ mm、 $K=5$ mm である。これらの値の計測は、杭頭部に記録用紙を貼付する等の作業の必要があるため、施工中に連続的に計測することは難しい場合が多い。そのため、通常は打止め直前に1回だけ計測する。しかしながら、4.2 (2) で述べたとおり施工時の計測値の深度

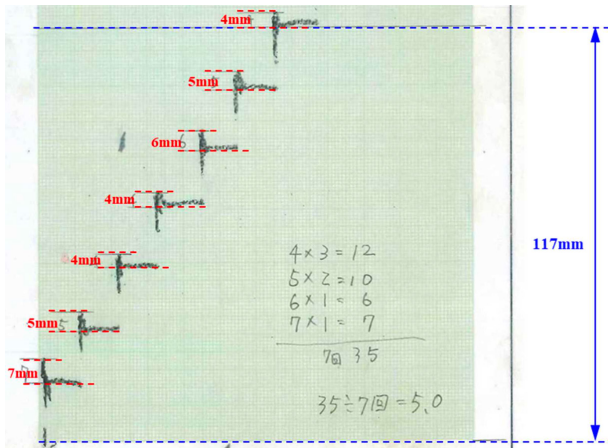


図-10 施工時の S , K の計測例 (杭 A-3). 記録用紙を杭に貼付しペンの高さを固定するので縦軸上方向が杭沈下量が大きくなる方向となる. 7回の打撃で 117mm の沈下が生じているので $S=16.7\text{mm}$. また, 各打撃時の K は赤字のとおりで, 平均値として $K=5\text{mm}$ が得られる.

方向の変化傾向を確認することが重要であると考えられることや, 次節で説明するように杭の打止め時に打撃エネルギーを小さくするようなハンマーのオペレーションが行われることなどを考慮し, 今回の検討では計画された杭先端標高まで残り 1m 程度の段階から杭先端標高の異なる 4 深度で計測を実施した.

打止め管理でハイリー式やその補正式を用いて R_h , R'_h を算定する際に用いる E_0 は, S 及び K を計測した打撃 (図-10 の例では 7 回の打撃) の平均値を用いる. そのため, 杭の貫入量 50cm 毎に整理した E'_0 とは多少値が異なる点に注意が必要である.

5.2 施工時の計測値と N 値との比較

杭施工時の E'_0 , n , E_a と地盤の N 値とを対比したものを図-11 ~ 図-14 に示す. 図に示したのは, 3.3 で述べた追加土質調査の実施地点における杭の施工時に得られた計測値である.

図-11 ~ 図-14 によると, N 値と E_a は明確には対応しないものの, N 値の高い層が続けば E_a は増加傾向, N 値の低い層に入ると減小傾向を示す. 4.2 (2) で述べた内容の繰返しになるが, N 値がまさにその標高における地盤状況を表しているのに対し, E_a は杭の周面抵抗力を含めた杭全体での抵抗力に対応しているため, N 値ほど明確な変化が現れず, また, N 値よりも深度方向

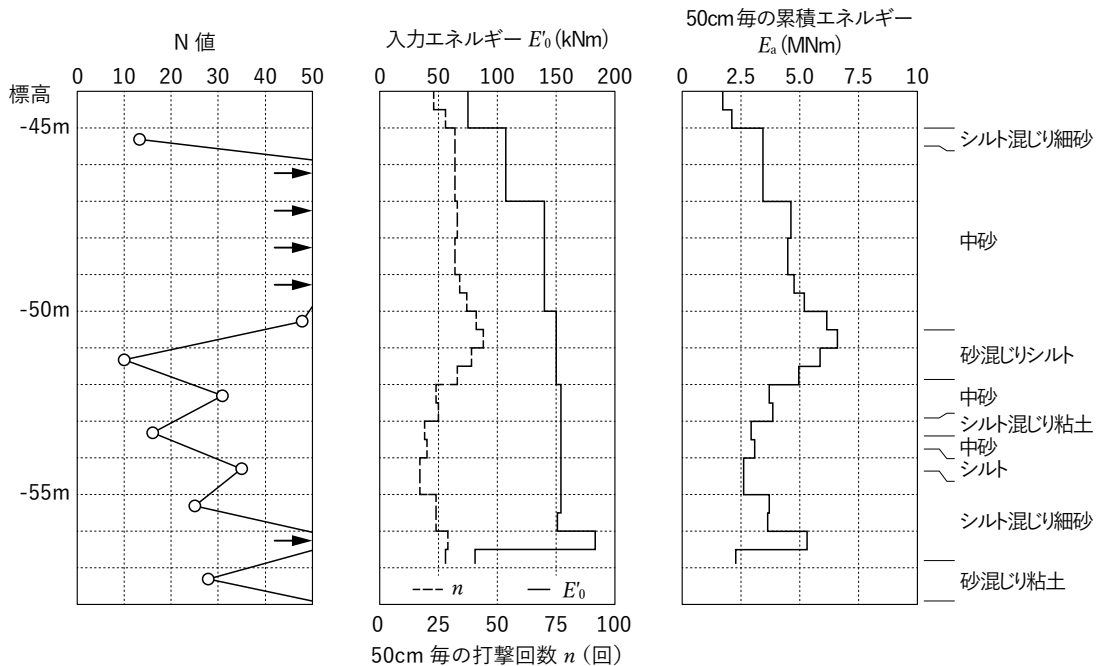


図-11 A-4 施工時の入力エネルギー E'_0 , 打撃回数 n , 累積エネルギー E_a と地盤の N 値との対比

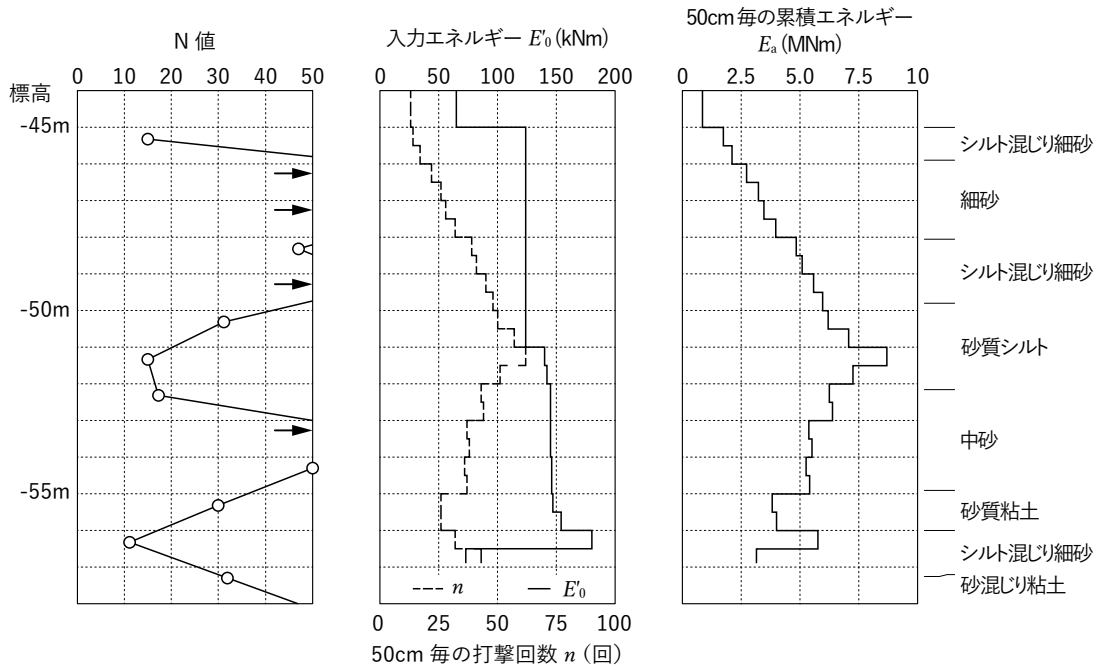


図 - 12 A-24 施工時の入力エネルギー E_0 , 打撃回数 n , 累積エネルギー E_a と地盤の N 値との対比

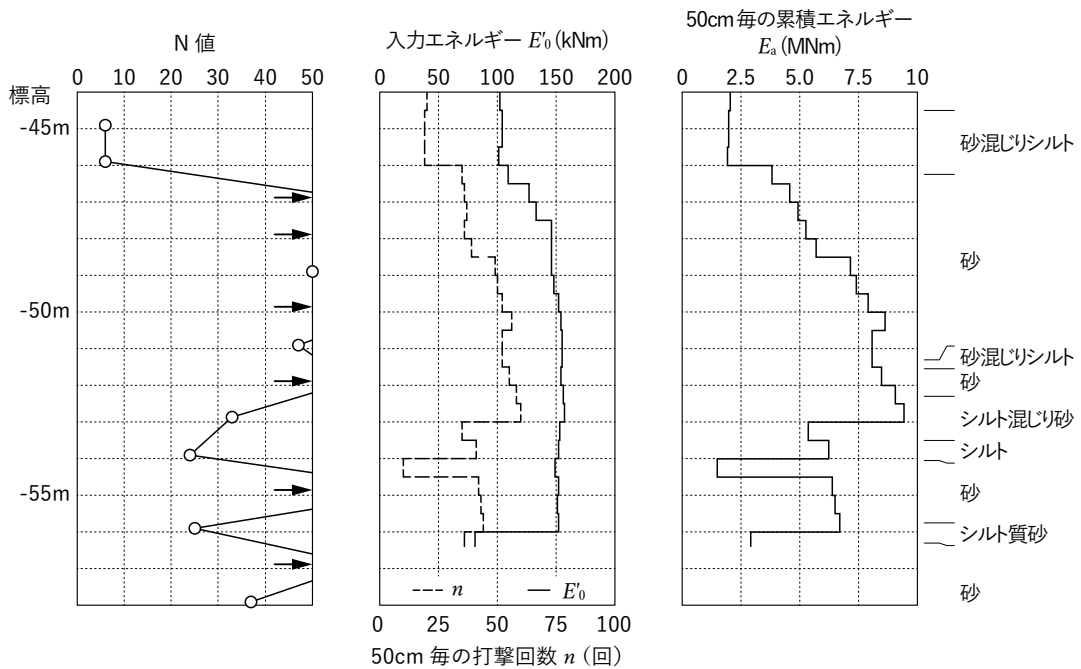


図 - 13 B1-12 施工時の入力エネルギー E_0 , 打撃回数 n , 累積エネルギー E_a と地盤の N 値との対比

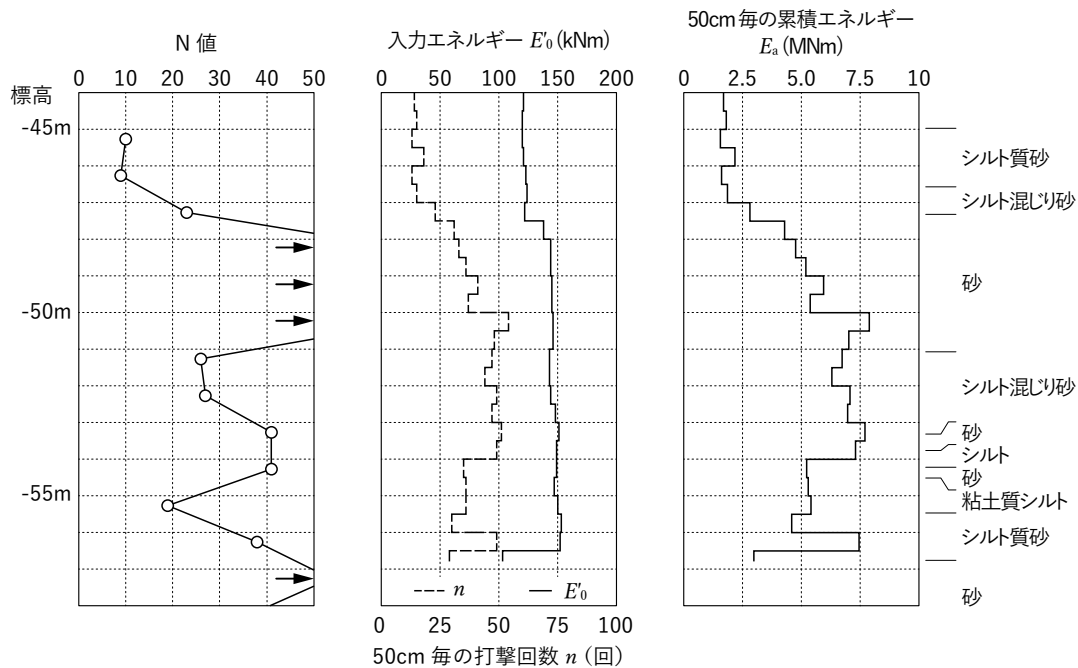


図-14 B2-26 施工時の入力エネルギー E_0 、打撃回数 n 、累積エネルギー E_a と地盤の N 値との対比

にやや遅れて変化するものと推測される。

図-11～図-14のいずれにおいても、打止め直前の50cm区間で E_0 が大幅に減少していることが確認できる。これは、杭を計画通りの天端標高で打ち止めるために、打止めが近付いたところからハンマーの打撃エネルギーを落として1打撃当たりの杭の貫入量を小さくし、高さ調整が容易になるようにしているためである。施工管理の際に、打止め直前の計測値を用いる場合には、このようなハンマーのオペレーションが行われる可能性があることに十分注意する必要がある。ここで、仮に E_0 と n の間に反比例的な関係があれば、 E_0 を減じた分だけ n が増加し、それらの積である E_a は一定に保たれることになる。しかしながら、図-11～図-14ではいずれも E_a が減少しており、 E_0 と n の関係はそういった単純なものではないことがわかる。このような施工時の計測値相互の関係については6.1で検討する。

5.3 施工時の計測値の杭間の比較

(1) 計測時の入力エネルギー E_0

前節で述べたとおり、 E_0 と n （貫入量の逆数に相当）との関係は単純なものではないことが想定される。水谷・松村(2016)においても E_0 、 S 、 K は値のばらつきが大きく相互の関係性が明確でないことが指摘されている。 E_0 、 S 、 K の相互の確認するには、いずれかの値を固定しそのばらつきを低減することが有効であると推

測される。そこで、施工時の調整が比較的容易な E_0 を固定して杭を打撃し、 S 、 K を計測することを試みた。

図-15に各杭の S 及び K の計測時の E_0 を示す。5.1で述べたとおり、 S 、 K の値は打止め時の杭先端標高の1m上から4深度で計測を行っており、図には各杭について4点の E_0 の値が示されている。現場作業の都合により、杭A1-1～B2-15とB2-16以降では、計測を行う深度の範囲を少し変更している。また、B2-16以降では、打止め前0.15m～打止めの区間で E_0 をA1-1～B2-15までよりも大きく設定している。この区間の E_0 はA1-1～B2-15では70～80kNmであるのに対し、B2-16以降では100～110kNmである。

図-15から読み取れるように、数本の杭を除き、 S 及び K の計測時の E_0 は精度よく調整することができた。打止め前0.15m～打止めの区間で E_0 が小さく設定されているのは、前節で述べたとおり計画通りの標高で杭を打ち止めるためである。図-15では、凡例に示したとおり、計測を行った深度毎にプロットを色分けしており、結果的にこの色分けは E_0 のおよその値に対応したものになっている。本稿では、これ以降、同じ凡例に統一してデータを示しているため、図を確認する際に参考にされたい。

E_0 の値が他の杭と異なるのは、A-1～A-3とB1-1～B1-2の5本の杭である。このうち、A-3及びB1-1はそれぞれ本試験、補足試験を実施した杭であるため、杭の

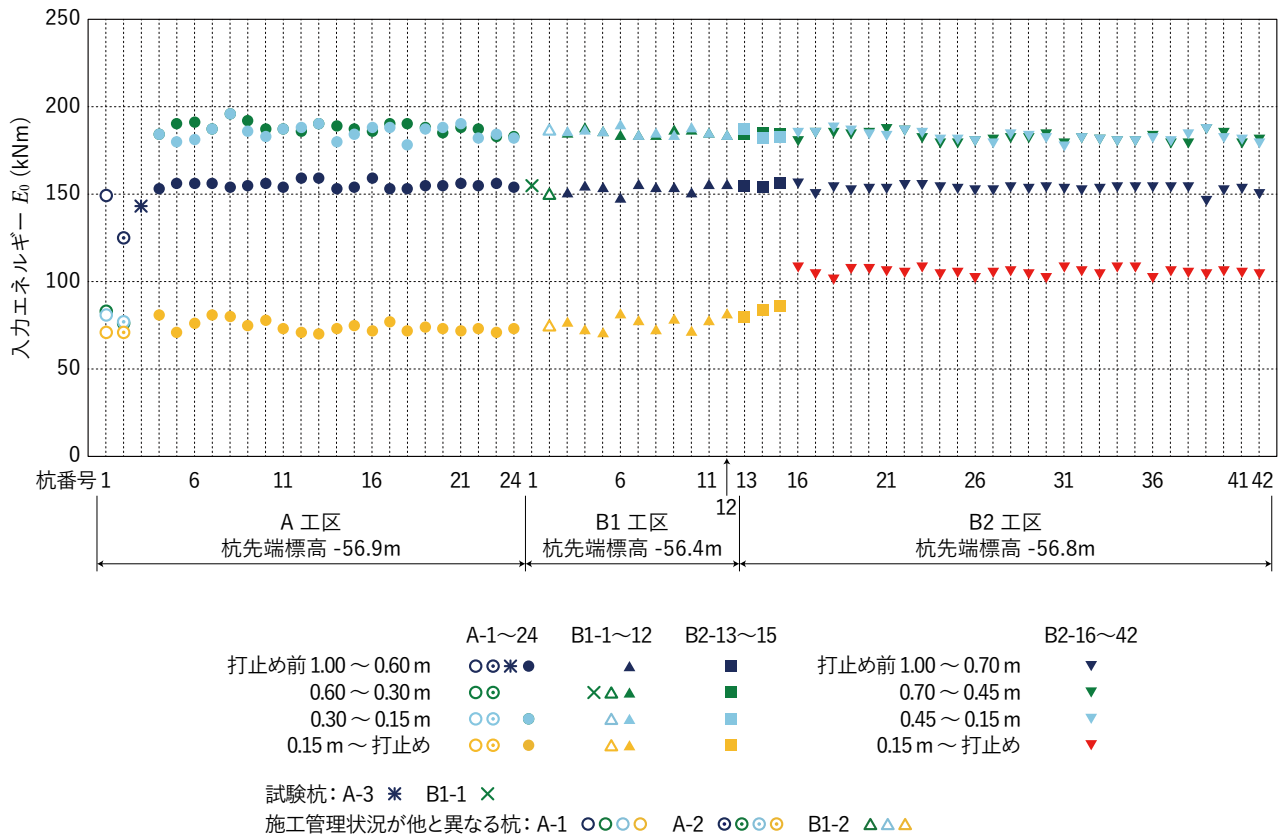


図-15 各杭の施工時の入力エネルギー E_0

施工状況が異なっている(4.2及び4.3参照)。図では、この2本の杭について他の杭とは異なる形状のプロットを用いている。その他の3本の杭A-1、A-2、B1-2は現場作業の都合により、施工時の E_0 の設定値や S 、 K の計測深度等を決定する前に施工したものである。これらの3本の杭の計測値は白抜きのプロットを用いている。あわせて参考にされたい。

(2) 貫入量 S の計測結果

図-16に各杭の施工時に計測された S の値を示す。図-16によると、A工区からB2工区に向かって S が減少していく傾向が見られる。図-3に示したとおり、B1工区を境に浅部の土層構成が異なることや、全ての工区で D_{sm} を支持層としているもののその中に含まれる D_{cm} と杭先端の位置関係が異なることなどが原因ではないかと考えられる。

また、図-16によると打止め前0.15m～打止めの区間(黄又は赤のプロット)では他の深度よりも S が小さくなっており、 E_0 の影響を受けていることが推測される。この点については次章でさらに詳しく述べる。

図-16では、例えばB2-39のように周辺の杭と計測

値が異なる杭が見られる。施工管理の実務上はこのような杭の支持力特性が他の杭とは異なる可能性に注意する必要がある。ただし、B2-39の S は衝撃载荷試験を実施したA-3やB1-1と同程度の値であり、杭の施工時の挙動として大きな問題は無いと判断するのが妥当である。

(3) リバウンド量 K の計測結果

図-17に各杭で計測された K の値を示す。 K の値は全工区にわたって概ね5～10mmの範囲に集中しており、図-16で S について見られたA工区からB2工区に向かって一定に変化するような傾向は見られない。杭毎に見ると、 S の場合と同様に打止め時の直前の区間で K が小さいように見受けられ、 E_0 の影響を受けていることが推測される。また、例えばB2-39など、 S が周辺の杭より大きい傾向を示した杭については、 K は逆に小さい値となっている。このような E_0 、 S 、 K の相互の関係は次章で検討する。

なお、B2-39については、打止め時の杭先端標高に近い計測深度では他の杭と同程度の K となっており、(2)で述べたのと同様に施工時の挙動として大きな問題は無いと判断するのが妥当である。

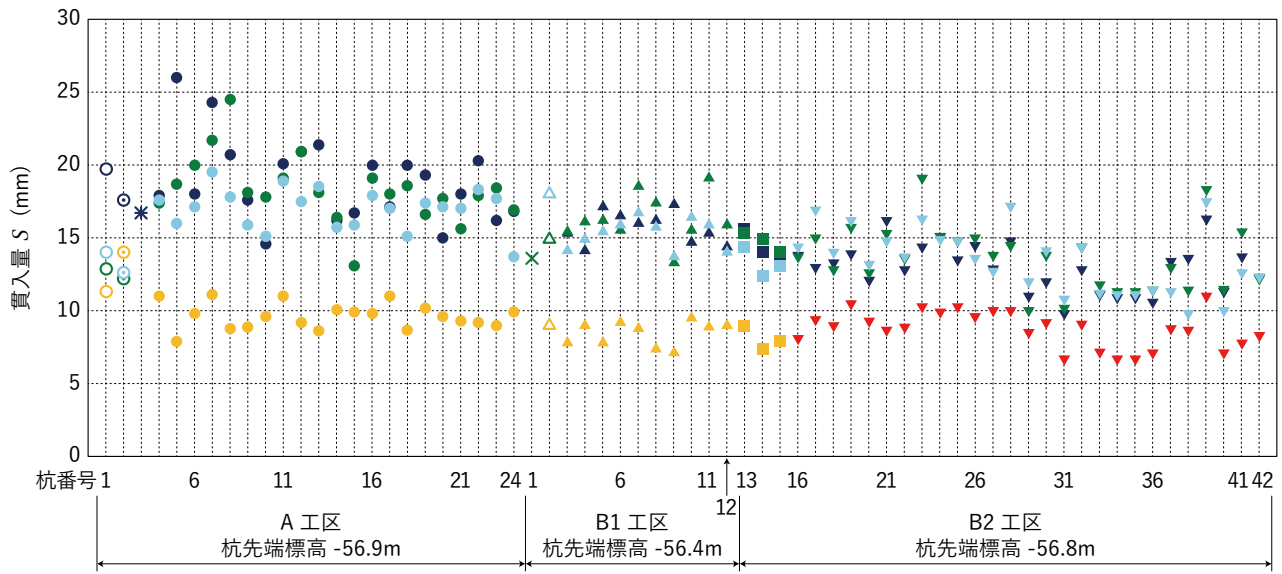


図-16 各杭の施工時の貫入量 S (凡例は図-15 参照)

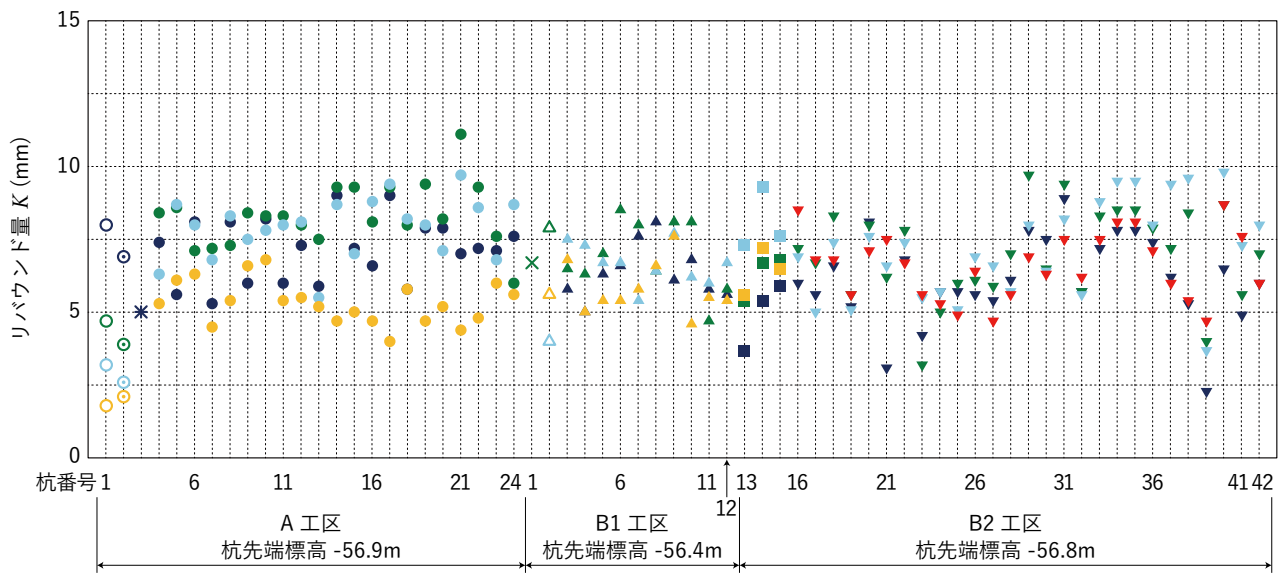


図-17 各杭の施工時のリバウンド量 K (凡例は図-15 参照)

6. 施工時の計測値に関する考察

6.1 計測値の相互関係

(1) 入力エネルギー E_0 と貫入量 S の関係

杭の施工時に計測された E_0 と S の関係を図-18に示す。全体的には E_0 が大きくなるに従い S も増加するようにも見えるが、データが大きくばらついており、関係が明確ではない。

杭毎に E_0 と S の関係を確認するため、図-16の縦軸 S を E_0 で除すことで単位入力エネルギー当たりの貫入量 S/E_0 として表示したものを図-19に示す。このように整理すると、図-16で確認されたA工区からB2工区に向かって S が減小する傾向がより明確になる。また、A工区側よりB2工区側の方が各杭毎の S/E_0 のばらつきが小さくなっている。5.3(2)で述べたとおり、B1工区を境に浅部の土層構成が異なることや、 D_{cm} と杭先端の位置関係等が影響しているものと推測される。

図-19で個別の杭に着目すると、概ね E_0 が小さいほど S/E_0 は大きくなる傾向がある(多くの杭で E_0 はプロットの色が黄/赤→濃紺→淡青・緑の順に大きくなっている。図-15の凡例参照)。すなわち、 E_0 が小さい方が相対的に効率よく杭を貫入できているということになる。考えられる原因として、ハンマーと杭の衝突時のエネルギー損失が E_0 の影響を受ける可能性があること、ハンマー打撃の時間間隔が変化すること(油圧ハンマーでは一般に E_0 が小さいとき打撃間隔が短くなる)、 E_0 の変化が杭の挙動に影響しそれに対応して地盤の動的抵抗成

分が変化する可能性があることなどが挙げられるが、詳細は今後さらに検討する必要がある。

(2) 入力エネルギー E_0 とリバウンド量 K の関係

杭の施工時に計測された E_0 と K の関係を図-20に示す。図-18に示した S と同様に、 E_0 が大きくなるに従い K も増加しているようにも見られるが、データのばらつきが大きく、関係が明確ではない。

各杭について単位入力エネルギー当たりのリバウンド量 K/E_0 を整理したものを図-21に示す。図より E_0 が小さい方が K/E_0 が大きくなるのがわかる。一般に K の支配要因は杭体の弾性変形であることが知られており(日本建築学会, 1963)、今回の計測結果は杭体の弾性変形量が E_0 の値にあまり影響されなかったことを示しているのではないかと考えられるが、詳細は今後の検討課題である。

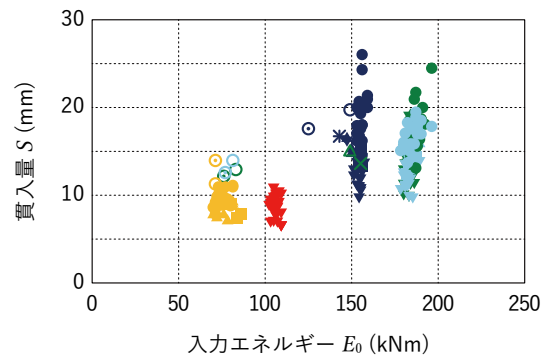


図-18 E_0 と S の関係 (凡例は図-15 参照)

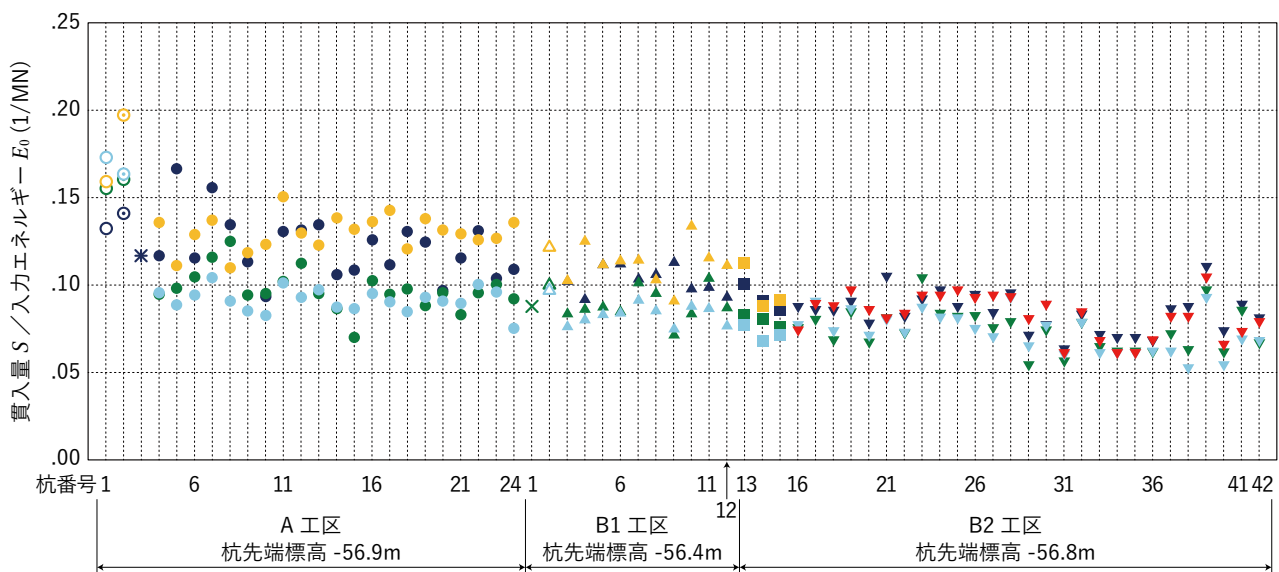


図-19 各杭施工時の単位入力エネルギー当たりの貫入量 S/E_0 (凡例は図-15 参照)

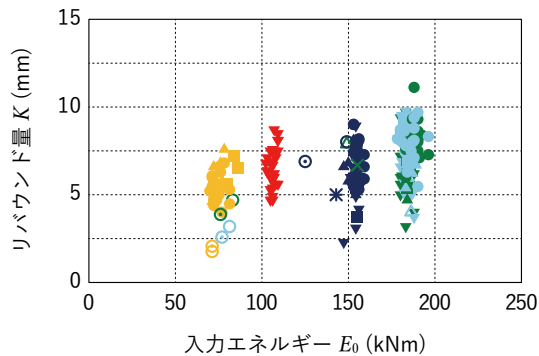


図-20 E_0 と K の関係 (凡例は図-15 参照)

(3) 貫入量 S とリバウンド量 K の関係

図-22 に杭の施工時に計測された S と K の関係を示す。図によると、一見 S と K には相関性が無いようである。しかしながら、図-22 で E_0 の値が近い計測値(概ね同色のプロットを比較すればよい、図-15 凡例参照)に着目すると、データのばらつきが大きく不明瞭ながら、 S が大きくなると K が小さくなるという関係が見られる。参考のため、水島港で計測された S と K の関係(水谷・松村, 2016) に E_0 を追記したものを図-23 に示す。水谷・松村(2016) は S と K に明確な関係は見られないとしているが、図-23 によると、 E_0 が比較的近い値となっているデータに着目することにより、 S が増加する

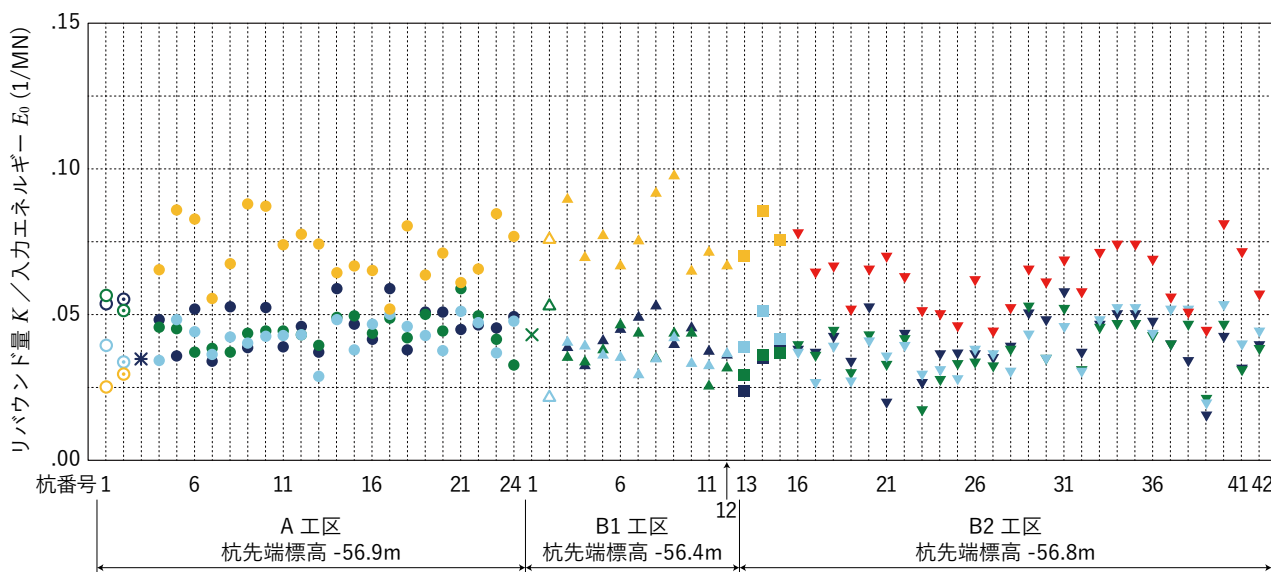


図-21 杭施工時の単位入力エネルギー当たりのリバウンド量 K/E_0 (凡例は図-15 参照)

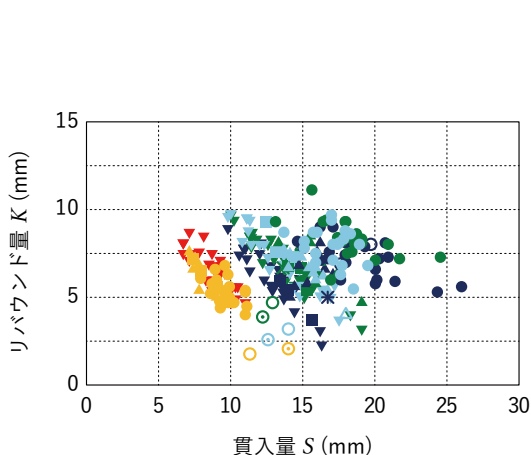


図-22 S と K の関係 (凡例は図-15 参照)

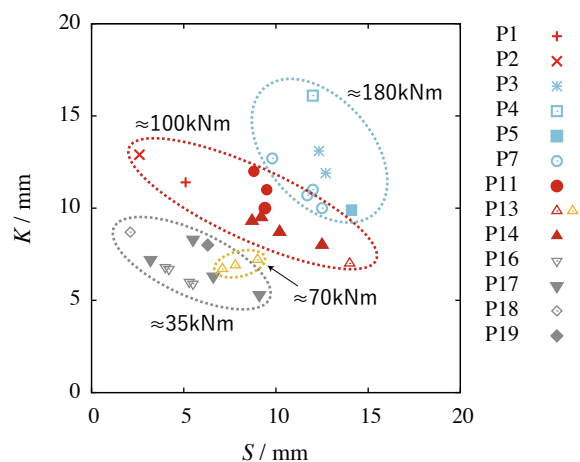


図-23 水島港における S と K の関係. 水谷・松村(2016) に加筆.

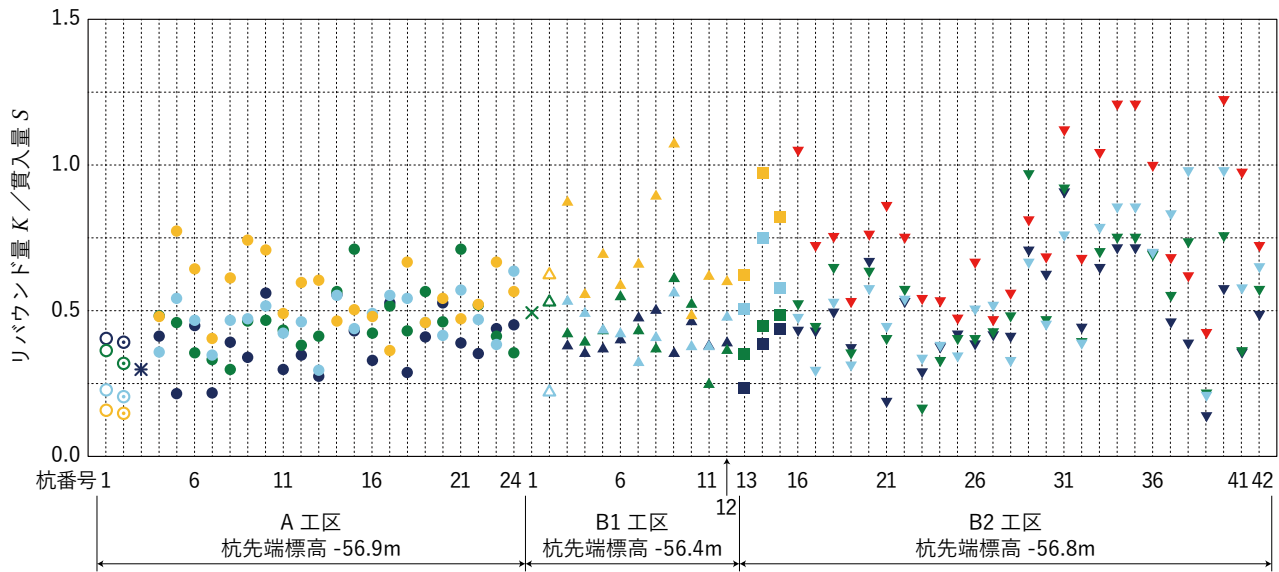


図-24 杭施工時のリバウンド量と貫入量の比 K/S (凡例は図-15 参照)

と K が減少するという関係が現れていることがわかる。

杭毎のリバウンド量と貫入量の比 K/S を図-24 に示す。図より、B2 工区側で K/S の値が増加し、またそのばらつきも大きくなっていることがわかる。 S は A 工区側から B2 工区側に向けて減少していく傾向が見られたが (図-16 参照)、 K はいずれの工区でも同程度の値となっているため (図-17 参照)、 K/S の値はこのような傾向を示すことになる。(2) で述べたとおり、 K が杭体の弾性変形量の影響を大きく受けることに起因しているのではないかと考えられるが、詳細については今後検討を進める必要がある。

6.2 施工時の計測値の統計量

施工時に計測された S と K の平均値、標準偏差、変動係数を表-3 に示す。これらの統計量の算出にあたっては、計測値を計測時の E_0 の値により 80, 100, 150, 180kNm 程度の 4 つのグループにおいて整理した。また、工区毎の違いを確認するために、工区毎の計測値を対象とした統計量と、全工区の計測値を対象とした統計量を計算した。B2 工区の B1 工区側の端部に位置する杭 B2-13 ~ B2-15 については、計測深度や計測時の E_0 が B1 工区と同等であるため、B1 工区の方に含めて整理している。なお、A-2 の打止め前 1.00 ~ 0.60m の計測値は、計測時の E_0 が 125kNm となっており他のデータとは値が離れているので、統計量の算定からは除外した。参考のため、表-3 に示した統計量の算出に使用した S 、 K の頻度分布をそれぞれ図-25、図-26 に示す。総じて

表-3 S 、 K の平均値、標準偏差、変動係数

E_0 (kNm)	標本数 (個)	貫入量 S			リバウンド量 K		
		平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	変動係数 (%)	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	変動係数 (%)
A 工区							
80	27	10.4	1.62	15.7	4.8	1.26	26.2
150	23	18.8	2.78	14.7	7.1	1.14	16.1
180	42	17.7	2.00	11.3	8.1	1.07	13.1
B1 工区から B2 工区 B2-15 まで							
80	14	8.4	0.80	9.5	5.9	0.87	14.7
150	15	15.2	1.22	8.0	6.2	1.14	18.4
180	27	15.5	1.61	10.4	6.8	1.17	17.2
B2 工区 B2-16 以降							
100	27	8.8	1.26	14.4	6.6	1.14	17.4
150	27	13.0	1.68	13.0	6.1	1.49	24.3
180	54	13.5	2.20	16.3	7.1	1.61	22.7
全工区							
80	41	9.7	1.67	17.2	5.2	1.25	24.0
100	27	8.8	1.26	14.4	6.6	1.14	17.4
150	65	15.6	3.30	21.2	6.5	1.36	20.9
180	123	15.4	2.71	17.6	7.4	1.45	19.7

大きく歪んだ形状の頻度分布にはなっていないことが確認できる。

表-3 で S の平均値に着目すると、 E_0 が 80kNm 程度、100kNm 程度の場合に 10cm 以下であるのに対し、150kNm 程度、180kNm 程度では 13 ~ 18cm 程度と大きくなっており、 E_0 が大きいときに S が増加する傾向を改めて確認できる。また、 S の変動係数は工区毎で 10 ~ 15% 程度、全工区でも 20% 程度にとどまっている。ところで、杭の軸方向押込み抵抗力 R_t の変動係数につ

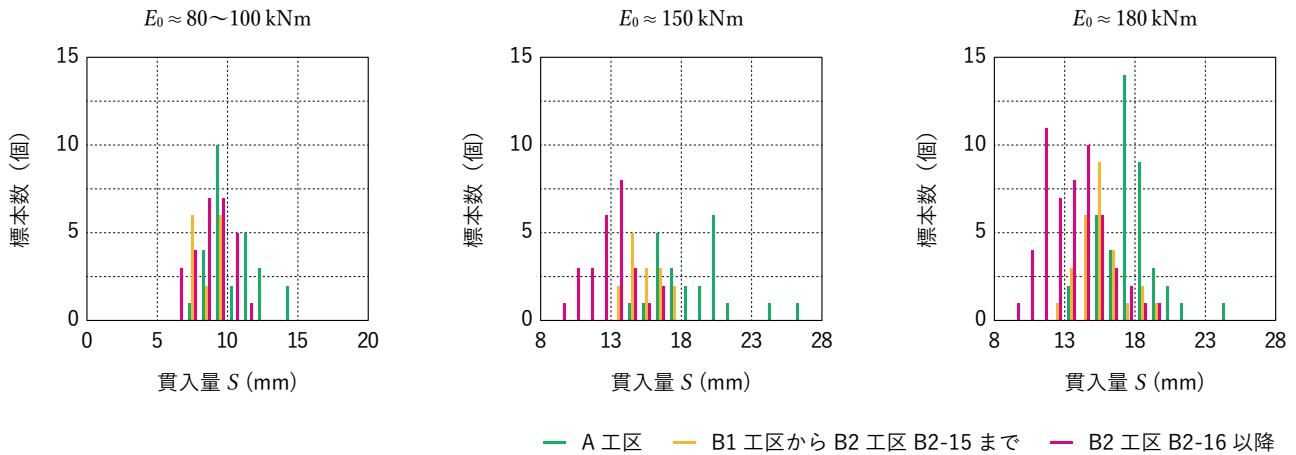


図-25 貫入量 S の頻度分布

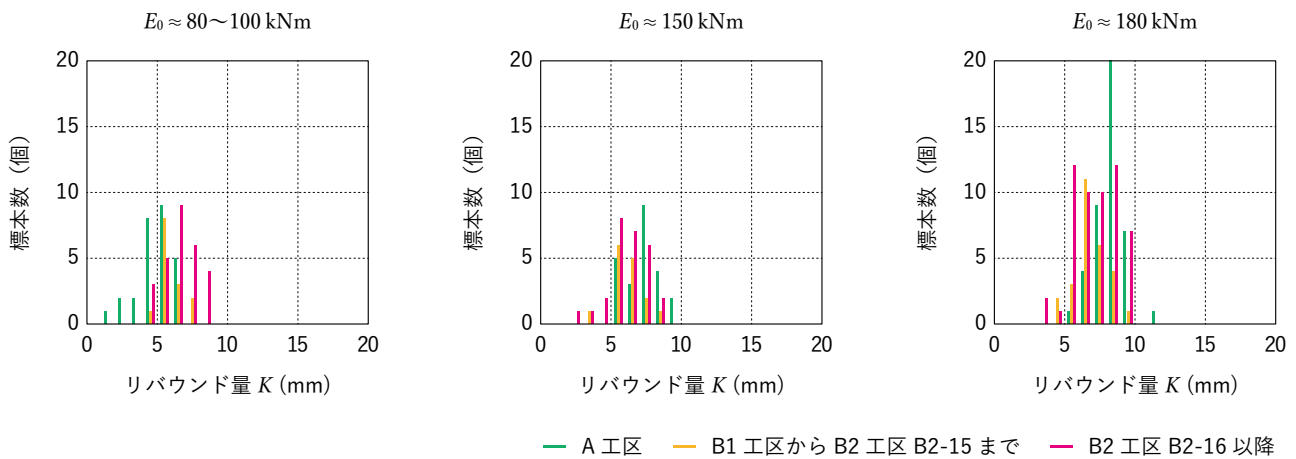


図-26 リバウンド量 K の頻度分布

いては、同一条件で15%程度、類似条件で20%程度、汎用の推定式を用いる場合には30%程度という目安が示されている(水谷, 2016)。 R_t の変動係数と施工時の計測値である S の変動係数を直接比較することに全く意味はないが、今回得られた S の変動係数が、工区毎であれば同一条件、全工区では類似条件の場合の R_t の変動係数に概ね合致している点は興味深い。なお、同一条件、類似条件に該当する具体的な条件は水谷(2016)にて定義されているので参照願いたい。

次に、表-3に示した K の統計量に着目すると、 E_0 の違いによる平均値の差は S の場合ほどは大きくないこと、変動係数は工区毎に算出した場合でも全工区で算出した場合でも最大25%程度となっており、計測値のばらつきが大きいことが確認できる。すでに述べたとお

り杭体の弾性変形等の影響を受けている可能性がある。

表-4に S/E_0 、 K/E_0 の平均値、標準偏差、変動係数を示す。表-3と同様、工区毎に分けて計算した値と、全工区まとめて計算した値を示している。計算結果によると、 S/E_0 、 K/E_0 の変動係数は表-3に示した S 、 K の変動係数よりも大きく、 E_0 と S 、 K の関係が単純なものでないことが改めて確認できる。特に K/E_0 の変動係数は最大で39%にまで達しており、施工管理等の参考とするにはばらつきが大きいと思われる。

表-3で確認したとおり、計測値を E_0 でグループ分けし、かつ、工区毎に整理した場合の S の変動係数は比較的小さく、ばらつきが抑制できていると考えられる。そこで、この整理方法により得られた S の平均値、標準偏差を用いて、各杭の S の平均値からのずれを評価する

ことを試みた。結果を図-27に示す。図の縦軸は、各杭について計測された S から、計測時の E_0 毎に算定された各工区の S の平均値を減算し、得られた差を対応する標準偏差で除した値である。縦軸の値がゼロから離れるほど平均値からのずれが大きいことになる。 S の分布が正規分布であると仮定すると、同じ母集団（ここでは同じように施工された同程度の性能を持つ杭の集団と考えてよい）に属していながら $-1 \sim +1$ の範囲を外れる確率は30%程度、 $-2 \sim +2$ の範囲を外れる確率は5%程度である。

図-27によると、 $-2 \sim +2$ の範囲を外れるような杭はあまり見られない。一部の杭の特定の計測値では $-2 \sim +2$ の範囲を外れているが、全ての深度の計測値が範囲外となるような杭は存在しない。唯一、B2-39のみ、全深度での計測値が2前後となっており、他の杭とは若干挙動が異なるように見える。このように、B2工区の杭のみで比較すると、B2-39は貫入量が大きく、他の杭と施工状況が異なっており、従って R_t も異なっている可能性がある。しかしながら、5.3ですでに述べたとおり、A工区、B1工区の杭もあわせて考えた場合、B2-39の S 、 K がとりたてて特異な値ではない。図-16などからB2工区は S が小さくなる傾向があるのに対し、 S が大きいA工区A-3での本試験、B1工区B1-1での補足試験で十分な R_t が発揮されることを確認していることなどを合わせて考慮すると、B2-39も含めすべての杭が載荷試験を行った杭と概ね同様に施工できており、

従って、十分な R_t を有していると判断するのが妥当である。

6.3 施工時の計測値とハイリー式の関係

図-22で確認したとおり、 E_0 が一定であれば S と K には傾きが負の線形的な関係があるように見られるが、 S の値に対して K の値は小さいこと、式(1)に示したハイリー式の分母の計算では K の値は1/2倍されることなどから、実質的にハイリー式の分母は S に依存することが予想される。図-28に S とハイリー式の分母 $S+K/2$ の関係を示す。図によると、 E_0 が大きくなることで同じ S に対する $S+K/2$ がごくわずかに大きくなるものの、全体的には E_0 によらず S と $S+K/2$ にほぼ直線的な関係があり、ハイリー式の分母が概ね S に支配されることが確認できる。従って、式(1)により計算される R_h は実

表-4 S/E_0 、 K/E_0 の平均値、標準偏差、変動係数

標本数 (個)	S/E_0			K/E_0		
	平均値 (1/MN)	標準偏差 (1/MN)	変動係数 (%)	平均値 (1/MN)	標準偏差 (1/MN)	変動係数 (%)
A工区						
93	0.115	0.0244	21.3	0.050	0.0142	28.1
B1工区からB2工区B2-15まで						
56	0.095	0.0148	15.6	0.048	0.0187	39.0
B2工区B2-16以降						
108	0.079	0.0126	16.0	0.045	0.0137	30.6
全工区						
257	0.095	0.0241	25.3	0.047	0.0152	32.1

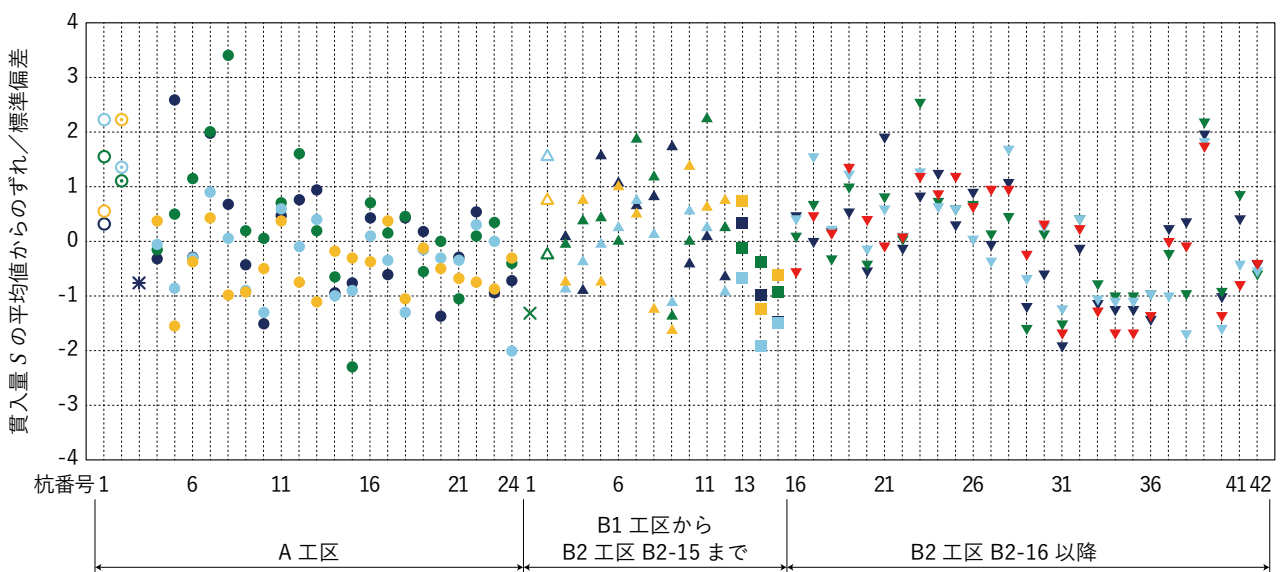


図-27 貫入量 S の平均値からのずれ（凡例は図-15参照）

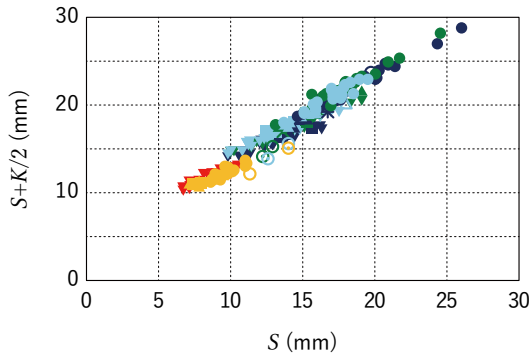


図-28 S と S+K/2 の関係

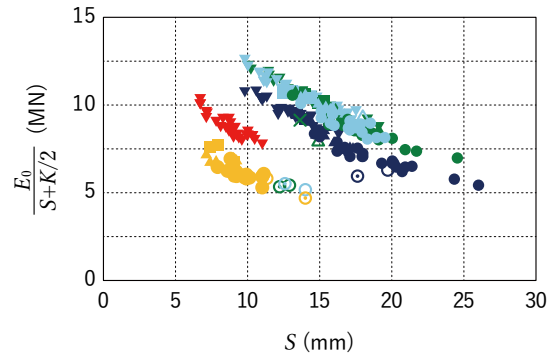


図-29 S と $E_0/(S+K/2)$ の関係

表-5 E_0/S の平均値, 標準偏差, 変動係数

標本数 (個)	平均値 (MN)	標準偏差 (MN)	変動係数 (%)
A 工区			
93	9.1	1.83	20.1
B1 工区から B2 工区 B2-15 まで			
56	10.8	1.66	15.3
B2 工区 B2-16 以降			
108	13.1	2.16	16.6
全工区			
257	11.1	2.62	23.5

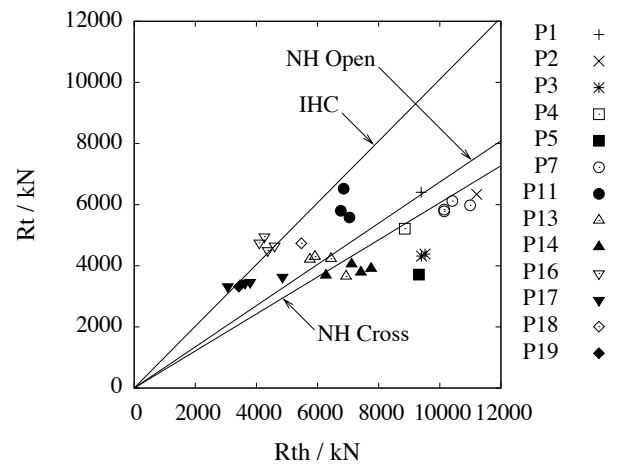


図-30 ハイリー式の計算結果 R_{th} と载荷試験で確認された R_t の関係 (水谷・松村, 2016)

質的に E_0/S に比例することになる。

E_0/S の統計量を表-5に示す。 E_0/S の逆数 S/E_0 の統計量をすでに表-4に示しているが、概ね同様な傾向である。単一の工区でも20%を超える変動係数となっておりばらつきは小さいとは言えないが、6.2で述べた R_t のばらつきと対比すると類似条件とされる場合に近い値であり、ある程度は施工管理の参考にできると思われる。

参考のため、式(1)でハンマー効率 e_f を1としたときの値 $E_0/(S+K/2)$ と S の関係を図示すると図-29のようになる。 E_0 が一定のとき、 S と $E_0/(S+K/2)$ の関係は直線的になっているが、これは式の形から当然にそのようになるのであって、この関係をもって $E_0/(S+K/2)$ 、つまりはハイリー式に有用性があるということを示唆するものではない。水谷・松村(2016)にも示されており、ハイリー式による算定値 R_h (引用文献では R_{th}) と杭の载荷試験で確認された R_t との相関性は明瞭でない(図-30参照)。従って、図-29を見る際には、縦

軸の値を見て一喜一憂するのではなく、他の杭と比較して傾向の異なる杭が存在しないか(直線的な関係から外れている計測値が無い)かという観点で確認することが重要である。

7. 施工管理手法に関する考察

R_h により R_t を推測することが困難である点は繰返し述べてきたとおりである。従って、 R_t が設計で期待している値を満足するかどうかについては杭の载荷試験を実施して確認することが望まれる。少なくとも1本の杭について载荷試験を実施し R_t を確認すれば、他の杭は試験を行った杭と同様に施工できていることを確認することで間接的に十分な能力を持つことを担保することができる。当然ながら、このような考え方は、試験を行った杭と他の杭の諸元や施工条件等が合致することを前提とするもので、種々の条件が異なる場合には別途の载荷

試験を実施することが必要となる。

載荷試験を行った杭とその他の杭が同様に施工できているかどうかについては、施工時の計測値を基に総合的に判断することとなる。前章までの分析の結果によると、参考となる指標として E_a の鉛直方向の変化傾向、 E_0 を一定としたときの S の値、 R_h と S の関係等が挙げられる。

名古屋港飛鳥地区で得られた計測値によると、 E_a の鉛直方向の変化傾向は地盤の N 値の変化傾向と比較的よく対応することが確認された。しかしながら、 N 値の変化に対する E_a の感度は非常に鈍く、杭先端が N 値の大きい部分を通過中は E_a が徐々に増加し、 N 値の小さい部分を通過中は E_a が徐々に減少するという程度のものである。従って、特定の深度における E_a の値を参照するのではなく、あくまでも E_a の深度方向の変化傾向を俯瞰的に観察し、現在の杭先端深度付近において地盤の N 値が極端に小さくなっていないか判断することが重要と考えられる。また、杭の打止め付近においては、杭頭の標高を調整するために E_0 を絞って打撃するようなオペレーションが実施される可能性がある。この場合、打止め直前の深度で E_a が小さく計測されてしまう恐れがある点に注意が必要である。

また、同様に名古屋港飛鳥地区で得られた計測値によると、 E_0 を一定としたときの S のばらつきは比較的小さく、その変動係数は工区毎に整理した場合で 10～15% 程度、全工区の計測値を一括で整理した場合でも 20% 程度におさまることが確認された。このことから、これまで一般的に行われている方法ではないが、各杭の施工時に可能な限り E_0 が近い値となるように油圧ハンマーのオペレーションを行い S の値を比較することが、施工状況の類似性を確認する指標として有用であると考えられる。その際、打止め付近で E_0 を絞った打撃が行われることを考慮し、打止めの少し手前から何点かの深度で S 、 K の計測を行うことが望ましい。また、載荷試験を実施する杭についても同様な施工を行い、比較対象とするための計測値を取得することが重要である。

さらに、名古屋港飛鳥地区で得られた計測値によると、 R_h は概ね E_0/S に比例することが確認された。また、 R_h と S の間に直線的な関係が見られることが示された。 E_0/S の変動係数は、計測値を工区毎に整理した場合でも 20% を超える場合があり、ばらつきが十分に小さいとは言いがたい。しかしながら、 E_0/S の値とあわせて R_h と S の関係を図示することなどにより、大きく施工状況の異なる杭が生じた場合にはそれを検知するための参考指標となると考えられる。

以上のような指標を参考とし、載荷試験を行った杭と

その他の杭が同様に施工できているかどうかを確認することで、単純に R_h や R_h の値のみを比較するよりも高い精度で杭の施工管理を行うことができるものと考えられる。

8. おわりに

杭の施工時の計測値 S 、 K が計測時の E_0 の影響を受けると考えられることから、名古屋港飛鳥地区の棧橋支持杭の施工時に E_0 をコントロールした施工を行い、得られた計測値の鉛直方向の変化傾向や計測値相互の関係を確認するとともに、計測値の統計量を算出し考察を加えた。また、得られた計測値で R_h を算出する場合、どのような特性になるか検討した。

検討の結果、累積エネルギー E_a の深度方向の変化が N 値の変化傾向と一定程度対応することを確認した。また、 E_0 を同程度としたときの S の値を確認することで、ある杭が他の杭と同様な施工状況となっているかどうか判断する参考資料とできる可能性を示した。一方、 K は E_0 を同程度に調整して計測した場合でもばらつきが大きく、施工管理指標としての適用性はやや劣るものと思われる。さらに、得られた計測値によると、ハイリー式の分母は S に支配され、 R_h が E_0/S に概ね比例することを示した。 E_0/S あるいはその逆数である S/E_0 は、 E_0 を一定として計測した S よりばらつきが大きいものの、ある程度は施工管理の参考となりそうである。

なお、本稿で述べた関係が他の現場でも成立するかどうかについては今後さらに検討を進める必要がある。本稿の内容を参考にしつつ、各現場で得られる施工時の計測値の深度方向の変化や計測値相互の関係の変化の傾向等を慎重に、かつ、総合的に検証することで、施工した杭が、載荷試験により R_t を実測した杭や、同じ現場で施工した他の杭と同じように施工できているか確認していくことが重要であると考えられる。

(2021年8月5日受付)

参考文献

- 菊池喜昭・水谷崇亮・森川嘉之 (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、港湾空港技術研究所資料、No. 1202, pp. 63-75.
- 鋼管杭協会支持力推定法委員会 (1995)：動的載荷試験による鋼管杭の支持力推定法, p. 51.
- 沢口正俊 (1983)：各種動的支持力推定法による計算結果の比較、第 38 回土木学会年次学術講演会講演概要集、第 III 部, pp. 605-606.

- 地盤工学会 (2002) : 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 第一回改訂版, pp. 223-271.
- 日本建築学会 (1963) : 建築鋼ぐい基礎設計施工規準・同解説, pp. 30-34.
- 日本港湾協会 (2018) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 下巻, pp. 1743-1744.
- 水谷崇亮 (2016) : 載荷試験を活用した杭の軸方向抵抗力の推定方法, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 55, No. 1, pp. 3-23.
- 水谷崇亮・松村聡 (2016) : 水島港における杭の衝撃載荷試験に基づくハイリー式の補正とその適用範囲の検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp. I_396-I_401.
- Smith, E. A. L. (1960) : Pile driving analysis by the wave equation, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 86, pp. 36-61.

記号表

- D : 杭径 (杭の外径)
- e_f : ハンマー効率
- E_0 : 入力エネルギー (ハンマーによる 1 回の打撃で杭に与えられる打撃エネルギー)
- E'_0 : 杭を 50cm 貫入させる間の E_0 の平均値
- E_a : 累積エネルギー (杭を 50cm 貫入させる間の E_0 の累積値で, E'_0 と n の積)
- E_t : 伝達エネルギー (E_0 のうち実際に杭に伝達されたエネルギー)
- K : ハンマー打撃 1 回あたりの杭のリバウンド量 (打撃中の最大沈下量から S を引いた値)
- n : 杭を 50cm 貫入させるのに要したハンマーの打撃回数
- r_f : 周面抵抗力度 (単位周面積当たりの周面抵抗力)
- R_f : 杭の周面抵抗力
- R_h : ハイリー式による算定値
- R'_h : ハイリー式の補正式による算定値
- R_p : 杭の先端抵抗力
- R_t : 杭の軸方向押込み抵抗力 (静的抵抗力)
- R_T : 全抵抗 (動的な抵抗成分を含む抵抗力)
- S : ハンマー打撃 1 回あたりの杭の貫入量 (残留沈下量)
- t : 杭の板厚

港湾空港技術研究所資料 No.1388

2021.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。