

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1374 Sep 2020

東京港新客船埠頭におけるジャケット支持杭の鉛直載荷試験

水谷 崇亮

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. 序論	4
2. 試験杭の急速載荷試験	4
2.1 試験条件	4
2.2 急速載荷試験の方法	5
2.3 試験杭の施工状況	7
2.4 試験結果	9
3. 本設杭の衝撃載荷試験	15
3.1 試験概要	15
3.2 試験結果	19
4. 施工管理への応用に関する検討	22
4.1 ハイリー式の補正の考え方	22
4.2 補正係数の検討	23
5. 結論	24
謝辞	24
参考文献	24
記号表	24

Load tests of piles that support jacket structures at Tokyo International Cruise Terminal

Takaaki MIZUTANI*

Synopsis

At the design of Tokyo International Cruise Terminal, jacket structures were adopted for the terminal foundation and pier. Piles that support the jacket were steel pipes with large diameter and partition plates at the tip, in order to withstand large action from the terminal. Since not enough knowledge accumulated about the axial resistance of such piles, test piles were constructed at the site and submitted to rapid load tests to evaluate the characteristics of the axial resistance. Moreover, in designing jackets, piles with various diameters and tip shapes were used to reduce construction costs. Since it was feared that the characteristics of the axial resistance different from those of the test piles would appear due to changes in pile diameter and pile tip shape, dynamic load tests were carried out on five piles during the construction. In this paper, the details of the tests were described, and the characteristics of the axial resistance of the piles at the construction site of Tokyo International Cruise Terminal were summarized.

As a result of the rapid load tests of the test piles, it was confirmed that the pile resistance required for design could be sufficiently secured. It was notable that the degree of plugging at the tip of the piles and the setup rate of the base resistance showed large values. In addition to the effect of the partition plates at the pile tip, it was considered that the ground conditions at the pile tip had an effect. Comparing the results of the rapid load test conducted beforehand and the dynamic load tests during the construction, the shaft resistance showed almost the same tendency, but there was a large difference in the degree of plugging at the tip of the piles and the setup rate of the base resistance. It is considered that the difference in pile diameter and pile tip shape and the difference in ground conditions around the tip of the piles affected.

In order to utilize the test results for construction management, a method for correcting the Hiley's equation using the test results was examined. It was confirmed that the correction factors obtained from the test results differed greatly from pile to pile. For more reliable construction management, it is important to pay close attention to the value of the hammer energy, pile penetration amount, rebound amount, etc. and their changes in the depth direction.

Key Words: large diameter steel pipe pile, partition plates, rapid load test, dynamic load test, correction factors for Hiley's equation

* Head, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 e-mail: mizutani-t@p.mpat.go.jp

東京港新客船埠頭におけるジャケット支持杭の鉛直載荷試験

水谷 崇亮*

要 旨

東京港新客船埠頭の整備では、ターミナル基礎及び棧橋に直杭式のジャケット工法が採用された。ターミナル基礎のジャケット支持杭は、ターミナルからの大きな作用に対抗するため、直径2mという大径で、杭先端部に井桁状の仕切板（井桁リブ）を設けた鋼管杭が採用された。このような杭の軸方向抵抗力については十分な知見が無いことから、埠頭の整備予定地に試験杭を施工し、急速載荷試験を実施して軸方向押し込み抵抗力の特性を確認した。また、ジャケットの設計では、経済性を高める目的で様々な杭径、先端形状の杭が使用されることとなった。杭径、杭先端形状が変化することで、試験杭とは異なる抵抗力特性が現れることが懸念されたため、本設杭の施工時に5本の杭に対して衝撃載荷試験を実施した。本稿ではこれらの載荷試験の試験方法や試験結果を整理し、東京港新客船埠頭用地における杭の軸方向抵抗力の特性をとりまとめた。

試験杭の急速載荷試験の結果、設計上必要とされる杭の抵抗力を十分に確保できることが確認された。特に杭先端の閉塞率や先端抵抗力のセットアップ率が大きな値を示した。杭先端の井桁リブの効果の他に、杭先端部の地盤条件が影響したものと考えられる。また、試験杭の急速載荷試験結果と本設杭の衝撃載荷試験結果を比較すると、周面抵抗力は概ね同様な傾向を示しているが、杭先端の閉塞率や先端抵抗力のセットアップ率に大きな差が見られた。杭径、杭先端形状の違いや杭先端部の地盤条件の違いが影響したものと考えられる。

試験結果を施工管理に活用するため、載荷試験結果を使ってハイリー式を補正する方法について検討した。試験結果から得られた補正係数は杭毎に大きく異なることが確認された。この補正係数を本設杭の施工管理に使用する際は、条件の近い杭の試験結果から算定された値を用いることを基本とし、かつ、施工時の入力エネルギー、杭貫入量、リバウンド量等の値や、それらの深さ方向の変化状況なども比較することが重要であると考えられる。

キーワード：大径鋼管杭，先端リブ，急速載荷試験，衝撃載荷試験，ハイリー式の補正係数

* 地盤研究領域基礎工研究グループ長

〒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. 序論

東京港新客船埠頭の整備では、ターミナル基礎及び棧橋に直杭式のジャケット工法が採用された。ターミナル基礎のジャケット支持杭は、ターミナルからの大きな作用に対抗するため、直径2mという大径で、杭先端部に井桁状の仕切板（井桁リブ）を設けた特殊な形状を有する鋼管杭を用いることが検討された。このような杭の軸方向抵抗力については十分な知見が無いことから（日本港湾協会，2018），埠頭の整備予定位置に根入れ長の異なる2本の試験杭を施工し，急速載荷試験を実施して軸方向押し込み抵抗力の特性を確認した。

また，ジャケットの設計では，経済性を高める目的で，ジャケットの各所の作用に応じて，様々な杭径，先端形状の杭が使用されることとなった。杭径，杭先端形状が変化することにより，試験杭で得られた軸方向押し込み抵抗力とは異なる特性が現れることが懸念されたため，本設杭の施工時に5本の杭に対して衝撃載荷試験を実施した。

本稿では，試験杭の急速載荷試験及び本設杭の衝撃載荷試験の試験方法や試験結果を整理するとともに，それらの結果を比較し，東京港新客船埠頭用地における杭の軸方向押し込み抵抗力の特性をとりまとめる。なお，本稿で紹介する急速載荷試験は，すでに森野ら（2018a, b），長山ら（2019）により概要が報告されているので，あわせて参照されたい。

2. 試験杭の急速載荷試験

2.1 試験条件

(1) 地盤条件

東京港新客船埠頭の整備では，ターミナル基礎となる

ジャケット4基と，棧橋となるジャケット7基が平行に配置される計画となっている。試験杭の急速載荷試験はターミナル基礎のジャケット支持杭を念頭に計画されたものである。施設の整備位置を図-1に，ジャケットの配置，試験杭，試験杭の近傍で実施された土質調査ボーリングの平面的な位置関係を図-2に示す。

急速載荷試験は2本の試験杭（試験杭1及び試験杭2）に対して実施した。試験杭の打設位置周辺では，2本の土質調査ボーリング（H26-5，H28-T）が行われている。H26-5は埠頭整備の事前の土質調査の一環として実施されたボーリングである。一方，H28-Tは，試験杭の打設に先立ち，試験位置での支持層深度を確認するために実施されたボーリングである。試験杭とボーリング地点の離隔は図-3に示したとおりである。ボーリングH26-5及びH28-Tで得られた地盤の土層構成とN値の深度方向の分布を，図-4，図-5に示す。

図-4，図-5を比較すると，H26-5とH28-Tで細部は少し異なるものの，概ね類似した土層構成を示していることが確認できる。いずれのボーリング地点においても地表面



図-1 施設の整備位置（Google Mapsに加筆）

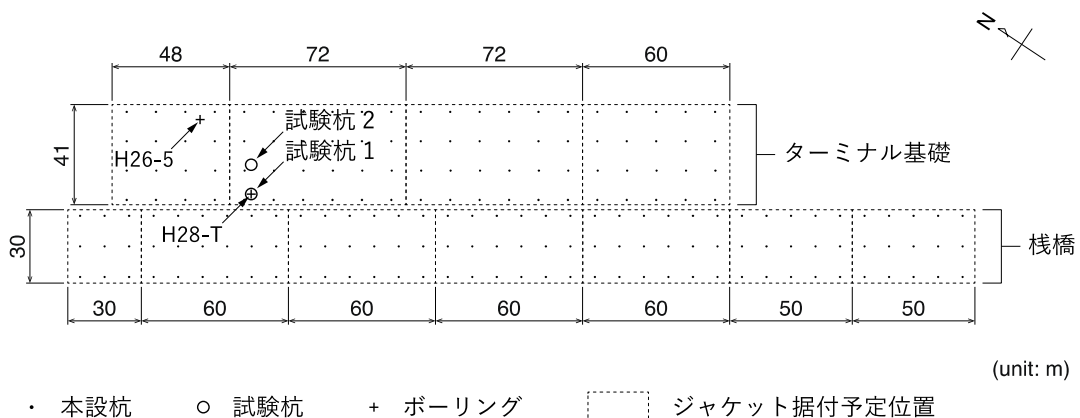


図-2 ジャケット，試験杭，土質調査ボーリングの配置

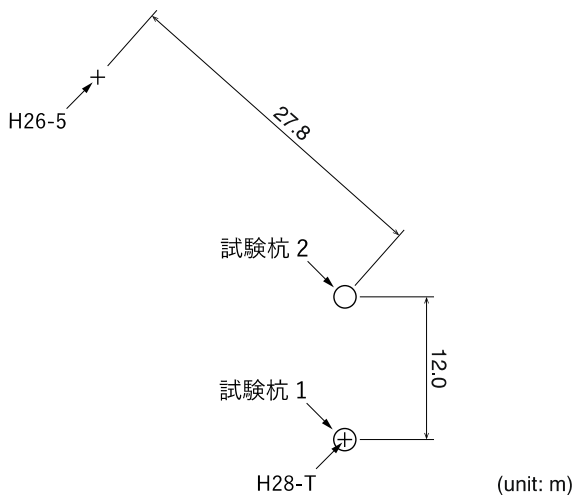


図-3 試験杭とボーリング地点の平面配置

(海底面) から層厚35m以上にわたって粘性土が続いており、この粘性土層ではN値がほぼ0である。粘性土の下には、薄い細砂の層をはさんで、砂礫、固結シルト、泥岩などが現れる。砂礫、固結シルト、泥岩ではN値が50以上となっているが、標高-50m前後までは部分的にN値の低い箇所が存在する。N値が50以上となっている深度では、換算N値が概ね100以下、最大でも150程度であったと報告されている。

急速載荷試験の試験計画では、図-4に示したH26-5を含む一連の事前調査の結果に基づき、試験杭の支持層を標高-46.1m以深と設定している。試験にあたっては、試験杭1の杭先端標高を-48.1m、試験杭2の杭先端標高を-56.1mとして試験を行うこととした。これは、試験杭の支持層への根入れ長がそれぞれ1D、5D (D: 杭径、試験杭では2m) となるように設定したものである。

試験杭の打設直前に実施したボーリングH28-T (図-5) では、標高-45.8m以深に砂礫、泥岩が確認されており、支持層の標高-46.1mという試験計画上の設定は妥当であると考えられる。ただし、H28-TでN値が50を超えるのは標高-48.6m以深であり、標高-50.6mにはN値がやや低い箇所も見受けられる。支持層への根入れ長が短い試験杭1ではこれらの影響を受けることも考えられたため、杭の施工時に根入れ長の長い試験杭2を先に施工し、その施工状況を見た上で試験杭1の杭先端標高を調整することとした。

(2) 試験杭の諸元及びセンサーの配置

2本の試験杭はいずれも杭径 $D=2\text{m}$ 、板厚 $t=24\text{mm}$ の鋼管杭SKK490で、試験杭1は杭長 $L=57\text{m}$ 、試験杭2は $L=62\text{m}$ である。

試験杭は杭径が非常に大きいため、先端閉塞効果の発現があまり期待できないことが予想された。そこで、試験杭の先端部に井桁リブを設けて先端支持力を向上させる

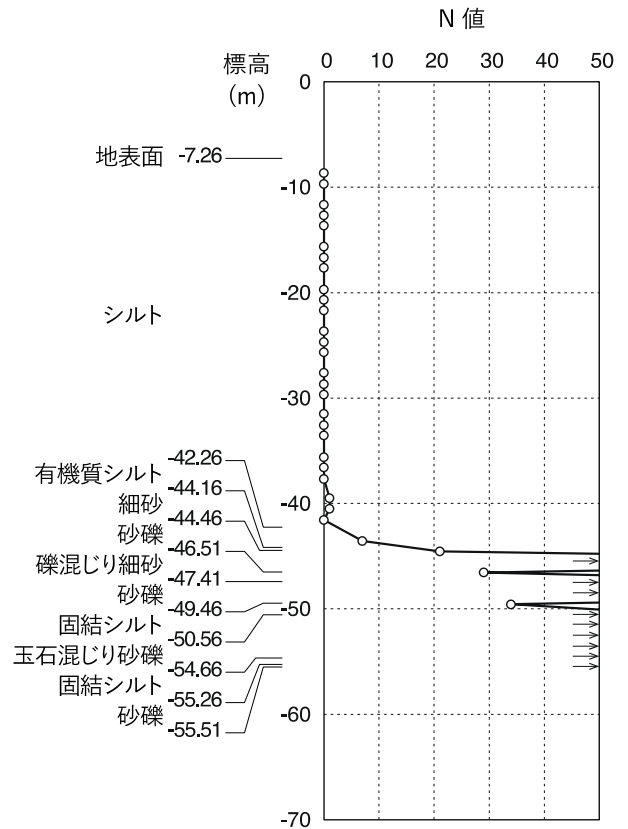


図-4 H26-5で得られた土層構成, N値

工夫が行われている。井桁リブは $t=19\text{mm}$ で、杭先端から杭頭方向に向かって $5\text{m} (=2.5D)$ にわたって取り付けられている。また、杭先端付近の外周面には先端補強バンドが取り付けられている。杭先端の形状を図-6に示す。

両試験杭には、深度方向8箇所センサーを取り付けた (杭頭に近い側から計測深度1~計測深度8)。取り付けセンサーはひずみ計と加速度計で、いずれも杭内周面に設置し、コの字型の保護カバーで保護している。ひずみ計は各計測深度に2個ずつ、杭中心軸に対して対称となる位置 (向かい合わせになる位置) に取り付けられた。加速度計は、計測深度1に2個、計測深度2及び計測深度4~8に1個ずつ取り付けられた。加速度計はひずみ計の横に 50mm ほど離して取り付けられている。

計測深度と土層構成との関係は図-5に示したとおりである。なお、図-5に示した杭先端標高は実績に基づくものであり、(1)で述べた計画とは異なっている。詳細は2.3で説明する。

2.2 急速載荷試験の方法

急速載荷試験は、JGS 1815-2002 (地盤工学会, 2002) に従い、軟クッション重錘落下方法により実施した。試験杭

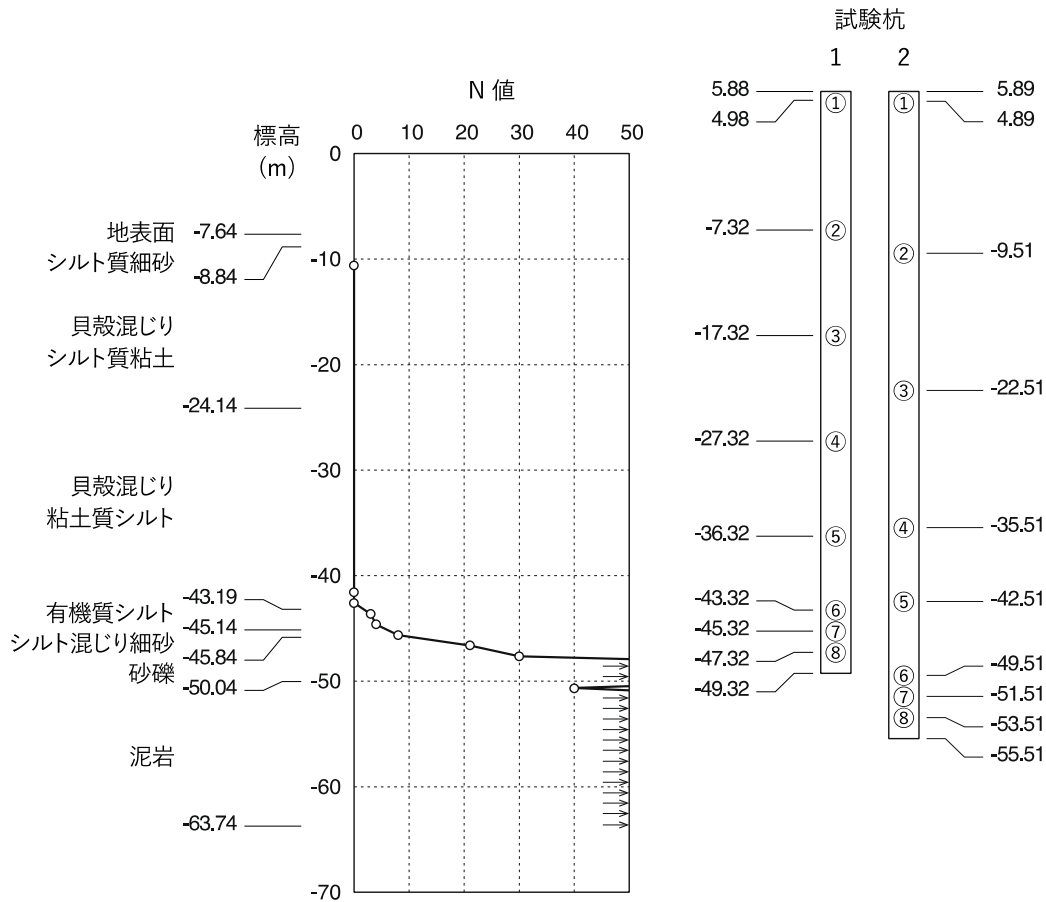


図-5 H28-Tで得られた土層構成とN値，試験杭の打設深度，計測深度（丸囲み数字）

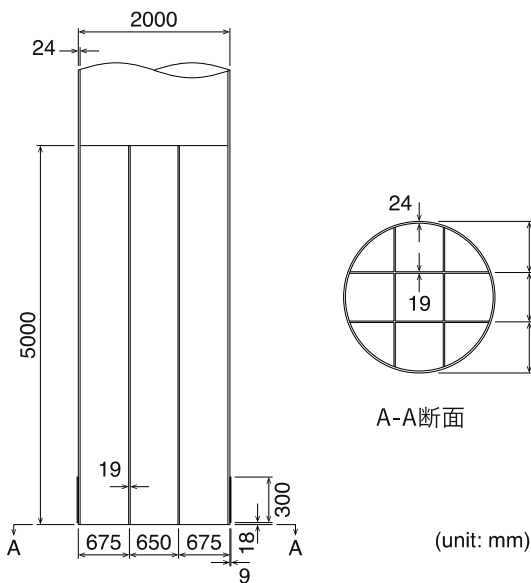


図-6 試験杭の先端形状

の施工完了から載荷試験までの養生日数は，試験杭1で36日，試験杭2で20日である。

載荷試験の目標最大荷重は，設計上，ターミナル基礎のジャケット支持杭に必要とされる軸方向押込み抵抗力を念頭に36MNと設定した。JGS 1815の規定に従い，目標最大荷重を加えた際に相対載荷時間 $T_r \geq 5$ を確保できるように試験装置及びクッション材の設計を行っている。ただし，今回の試験杭は杭の自由長（海底面からの突出長）が長く，試験機材の制限や経済性の観点から杭頭において $T_r \geq 5$ を確保することが難しいため，試験計画上は海底面付近の計測深度2において $T_r \geq 5$ を確保することを目標とした。試験後に確認したところ，試験杭1，2の計測深度2における T_r は，それぞれ6.47，5.40となっており規定を満足していた。

試験に使用した重錘は140tである。各試験杭について，重錘の落下高さを0.5mから3.0mまで0.5mきざみで変化させて6回の載荷を行った。ただし，試験杭1の6回目の載荷では落下高さ3.28mで載荷した。試験結果は除荷点法によ

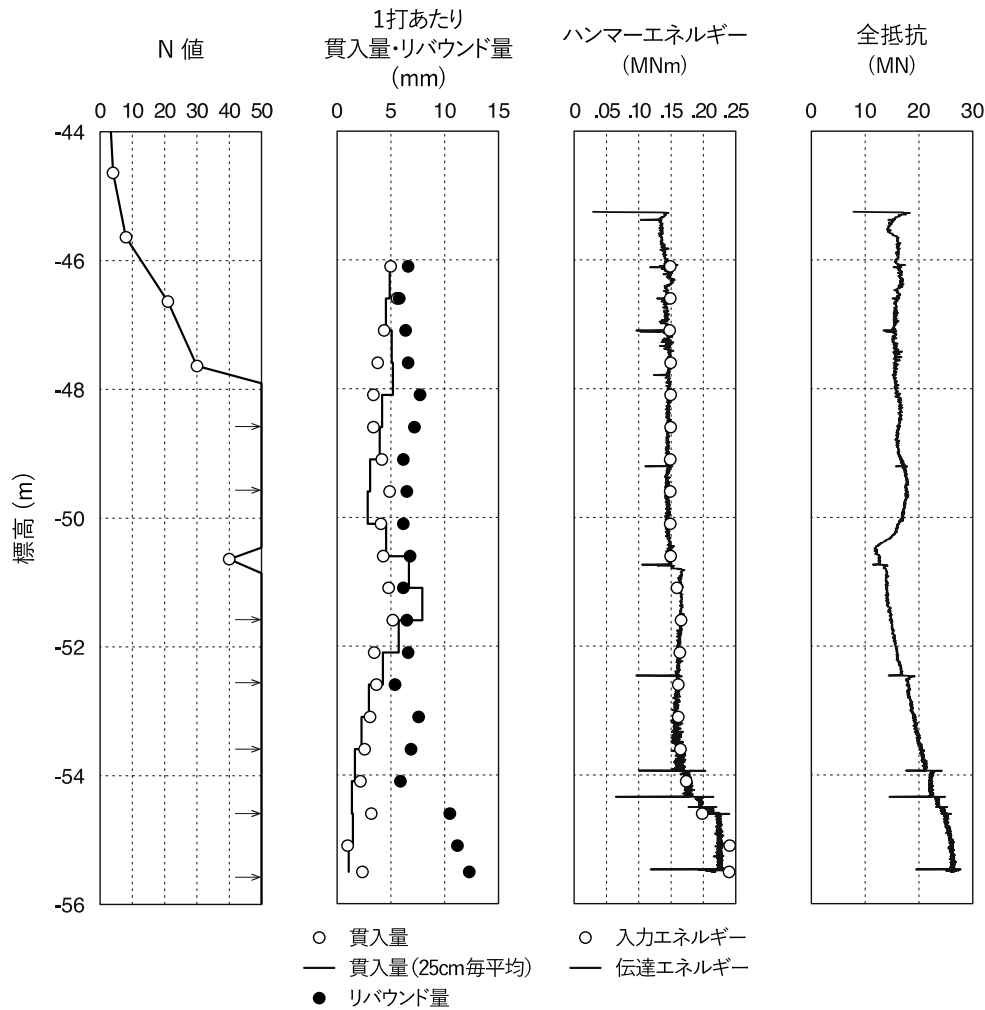


図-7 試験杭2の施工中の貫入量，リバウンド量，ハンマーエネルギー，全抵抗

り整理し，杭の変位，先端抵抗力，周面抵抗力などを求めた．整理方法については2.4(1)で概説する．

2.3 試験杭の施工状況

試験杭を建込み，パイプロンマで支持層の上端付近まで打ち込んだ後，油圧ハンマー（IHC S-280）に切り換えて打撃施工を行った．油圧ハンマーによる打撃施工時には，JGS 1816-2002（地盤工学会，2002）に規定される衝撃載荷試験に準拠したデータ計測を行った．データ計測のため，急速載荷試験用のセンサーとは別に，加速度計とひずみ計を試験杭に取り付けた．これらのセンサーは，杭頭から3m下方の杭外周面に，加速度計1台とひずみ計1台を1組として，杭中心軸に対して対象となるように2組取り付けた．データ計測はPile Dynamics Inc.（PDI）製のPile Driving Analyzer（PDA）により実施した．

前述のとおり，試験杭の施工は支持層への根入れ長が長い試験杭2から行った．試験杭2の施工中の貫入量，リバ

ウンド量，ハンマーエネルギー（ハンマーにより杭に入力したエネルギーと実際に杭に伝達されたエネルギー），PDAにより計測された全抵抗の深度方向の変化を図-7に示す．図-7に示したN値はボーリングH28-Tのもの（図-5参照）である．貫入量，リバウンド量は，杭が250mm貫入する毎に計測した．あわせて，杭を250mm貫入するのに要した打撃回数からその間の1打当たり貫入量の平均値を求め，図示している．ハンマーエネルギーについては，入力エネルギーは杭貫入量250mm毎の計測値であるが，伝達エネルギーはPDAで計測できるため深さ方向に連続的なデータを取得している．

図-7より，標高-48m付近のN値が50を超える砂礫に達したところで，入力エネルギーを変化させていないにもかかわらず，貫入量がやや減少，リバウンド量と全抵抗がやや増加する傾向が見られる．その後，標高-50.6m付近のN値が局所的に低い箇所を通過する際には，貫入量が大きく，全抵抗が小さくなっており，弱層の存在に対応した施

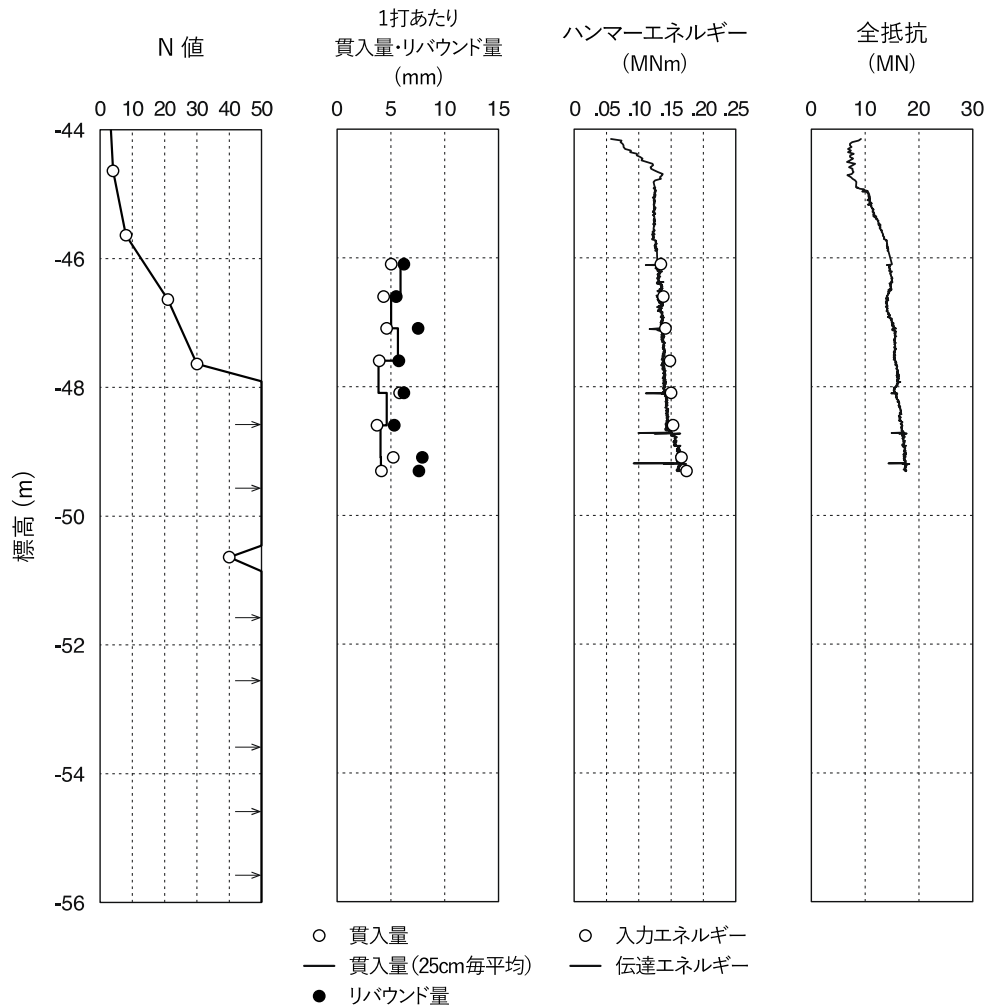


図-8 試験杭1の施工中の貫入量，リバウンド量，ハンマーエネルギー，全抵抗

工データとなっている。標高-52m以深では、貫入量の低下、リバウンド量及び全抵抗の増加が顕著となり、さらに標高-54mからは入力エネルギーを大きくしても杭が貫入し辛い状況となっている。試験杭2は、当初、杭先端標高-56.1mまで打ち込み、支持層（標高-46.1m以深と設定）に10m(=5D)根入れする計画であったが、杭先端標高-55.51mで貫入不能となり打ち止めた。結果として、支持層への根入れ長は9.41m（約4.7D）となった。

図-7に示した試験杭2の施工状況から、標高-48～-50m付近まで根入れすることで、ある程度の全抵抗が確保できる見込みが得られた。そこで、試験杭1の施工では、この付近で最大の全抵抗17MNが得られた標高-49.6mを目標打ち止め深度とし、それ以浅でも全抵抗が安定した時点で打ち止めることとした（当初計画の杭先端標高は-48.1m）。試験杭1の施工中の貫入量、リバウンド量、ハンマーエネルギー、全抵抗の深度方向の変化を図-8に示す。

図-7と図-8を比較すると、貫入量やリバウンド量、全抵

抗の値は試験杭1と2の間でそれほど大きな違いが無いことが確認できる。試験杭1では、試験杭2の施工データよりも少し浅い地点で全抵抗17MNが発現し、安定的に推移したため、杭先端標高-49.32mで打ち止めた。支持層（標高-46.1m以深）への根入れ長は3.22m（約1.6D）である。

試験杭1、2とも、打ち止め時の計測データを用いて、PDI製の解析プログラムCAPWAPによる波形マッチング解析を実施した。解析により得られた周面抵抗力及び先端抵抗力を、打ち止め時のハンマーエネルギー、貫入量、リバウンド量とともに表-1に示す。解析により得られた杭の軸方向押し込み抵抗力（杭頭抵抗力）は、全抵抗の約半分となっており、一般的に言われている傾向とよく一致している（菊池ら、2009）。

なお、表-1に示した各抵抗力の値は杭打ち止め時（杭施工直後）の値であり、施工後のセットアップが現れる前の値であるため、試験杭が実際に発揮し得る抵抗力よりも小さな値となっている点に注意を要する（2.4(6)参照）。ま

表-1 試験杭の波形マッチング解析の結果

		試験杭 1	試験杭 2
入力エネルギー	(kNm)	174	240
伝達エネルギー	(kNm)	162	213
貫入量	(mm)	4.1	2.1
リバウンド量	(mm)	7.6	12.3
全抵抗	(MN)	17.7	26.6
周面抵抗力	(MN)	2.4	5.0
先端抵抗力	(MN)	6.4	7.6
杭頭抵抗力	(MN)	8.8	12.6

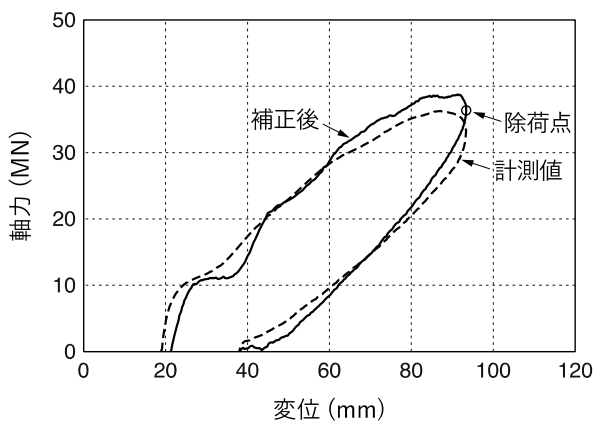


図-9 急速載荷試験で得られた変位と軸力の例
(試験杭1, 計測深度2, 重錘落下高さ3.28m)

た、試験杭2では、打止め時に計測された杭先端からの反射波が圧縮波であったことから、ハンマーの能力不足により十分に載荷できておらず、先端抵抗力が過小評価されていると推測される(3.1(3)参照)。

急速載荷試験時の作業性等を確保するため、試験杭の施工後、杭の突出長が作業栈台の覆工板から1.2m程度(杭頭標高+5.9m前後)となるように杭頭部を切断した。この結果、試験杭と土層、計測深度の位置関係が図-5に示したとおりとなった。

2.4 試験結果

(1) データ整理方法の概要

急速載荷試験で得られた試験結果には、杭体の慣性力の影響と地盤の動的な抵抗成分の影響が含まれている。これらの影響を取り除くため、除荷点法というデータ整理の方法が広く用いられている(地盤工学会, 2002)。ここではその概要を説明する。

2.1(2)で述べたとおり、試験杭には加速度計とひずみ計が深度方向8箇所に取り付けられている。はじめに、加

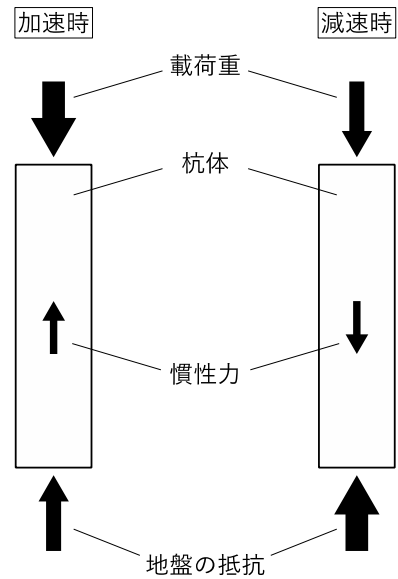


図-10 試験杭の先端形状

速度計の計測値から変位を、ひずみ計の計測値から杭体に発生した軸力を計算する。計測値から得られた変位と軸力の関係の例を図-9に破線で示す。

次に、杭体に発生した軸力から杭体の慣性力の影響を取り除く。杭体の慣性力は、杭が加速している間は抵抗側の成分として、杭が減速している間は作用側の成分として働く(図-10参照)。そこで、杭体の加速時には軸力から慣性力を減算、減速時には軸力に慣性力を加算することにより軸力のデータを補正する。慣性力の大きさは杭質量と加速度の計測値から算定することができる。軸力を補正した例を図-9に実線で示している。この補正を行うことで、ひずみ計の計測値より求めた軸力から杭体の慣性力の影響を取り除き、地盤の抵抗力に対応した軸力の値を得ることができる。

最後に地盤の動的な抵抗成分の影響を取り除く。地盤の動的な抵抗成分は、主として地盤のひずみ速度に依存して生じるものである。従って、ひずみ速度がゼロ、すなわち変位の変化率がゼロとなっているときには、地盤の動的な抵抗成分は働いていないと考えられる。変位の変化率がゼロとなるのは、図-9に示した丸印の点であり、この点を除荷点と呼ぶ。除荷点での軸力と変位を用いることで地盤の動的な抵抗成分の影響を取り除くことができる。

以上のようなデータ整理を、各計測深度毎、各重錘落下高さ毎に行い、除荷点での変位と軸力を求める。得られた軸力の深度方向分布を、図-11に示す。なお、本検討では、杭頭近くに設けた計測深度1の計測値はデータ整理の対

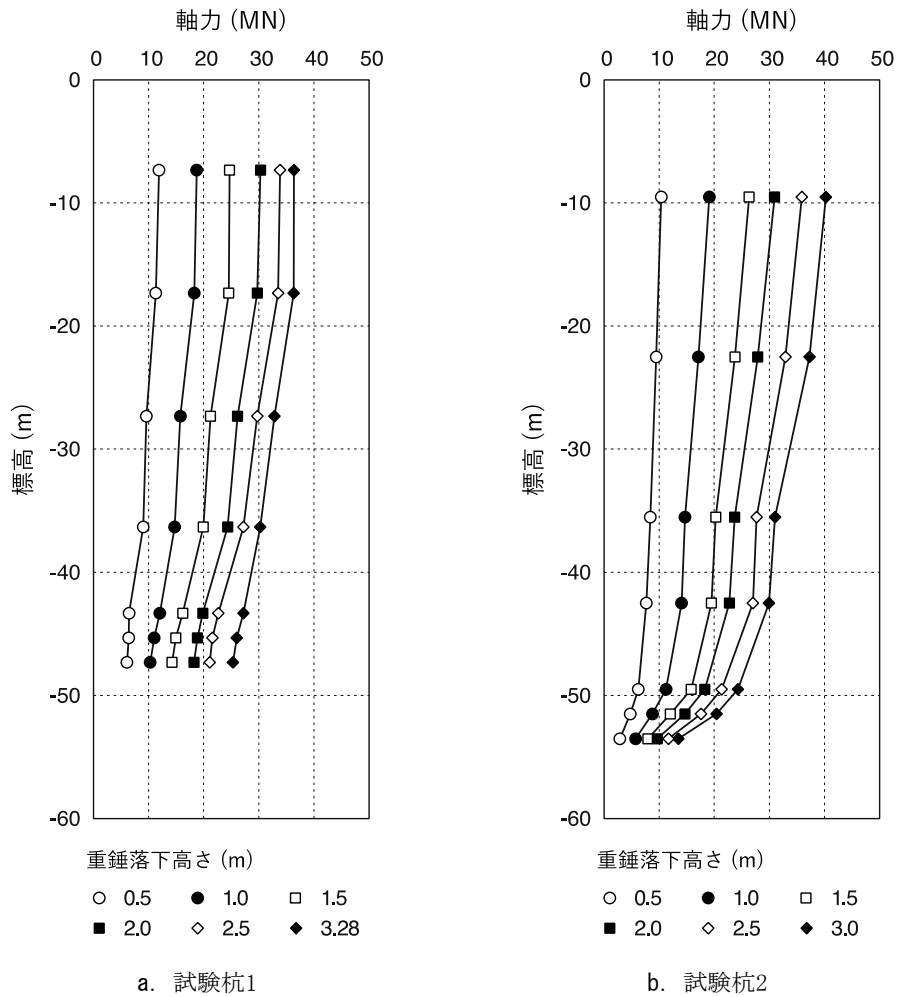


図-11 除荷点法により得られた軸力の深度方向分布

象から除外し、海底面付近に設けた計測深度2を杭頭として取り扱っている。これは、2.2で述べたとおり、JGS 1815に規定された相対載荷時間を確保できるのが計測深度2以深となっていることによるものである。

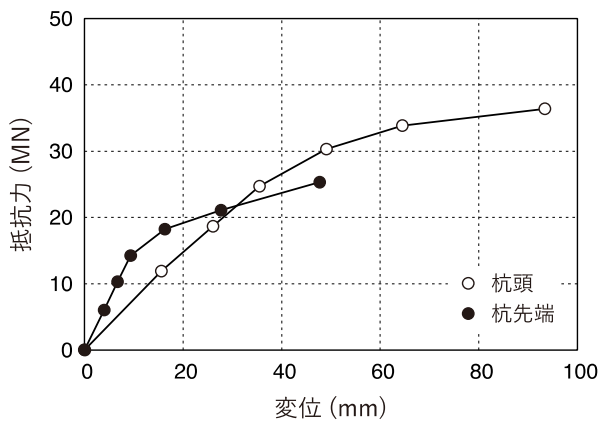
(2) 試験結果の概要

前述のとおり、本検討では海底面付近に設けた計測深度2のデータを杭頭でのデータとして取り扱う。また、杭先端に最も近い計測深度8（杭先端から $1D=2m$ 上方）のデータを杭先端のデータとして取り扱うことにする。各計測深度における軸力は、それ以深において杭が地盤から受けている抵抗力に対応するから、計測深度2の軸力は杭頭抵抗力、計測深度8の軸力は杭先端での抵抗力（先端抵抗力）と読み換えることができる。また、それぞれの軸力に対応する除荷点の変位が、杭頭変位、杭先端変位ということになる。このようにして求めた杭頭および杭先端の変位と抵抗力の関係を図-12に示す。なお、このような整理をする関係上、計測深度8以深で杭周面に働く周面抵抗

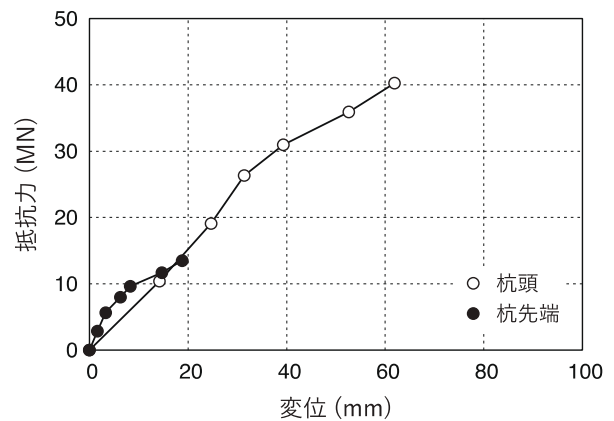
力は先端抵抗力の一部として計上される点に注意を要する。

図-12aに示した試験杭1の試験結果によると、変位と抵抗力の関係は、3回目の載荷時の杭頭変位35mm付近（杭先端変位9mm付近）を境に勾配が変化している。この付近で杭が降伏しているものと思われる。このときの杭頭抵抗力は24.7MN、先端抵抗力は14.2MNである。その後も杭の抵抗力は増加を続けており、最終の載荷時（重錘落下高さ3.28m）で杭頭抵抗力は36.4MN、先端抵抗力は25.3MNであった。最終の載荷時においても各抵抗力が増加傾向にあることや、杭頭変位が93.4mm、杭先端変位が47.7mmと杭径（2m）に対して十分に小さいことなどから、試験杭1は極限状態には達していないものと思われる。

一方、図-12bに示した試験杭2の試験結果では、抵抗力が最終の載荷時（重錘落下高さ3.0m）まで直線的に増加する傾向を示しており、試験杭2は降伏状態に達していないのではないかとと思われる。最終の載荷時での杭頭抵抗力



a. 試験杭1



b. 試験杭2

図-12 杭頭及び先端での抵抗力と変位の関係

は40.3MN、先端抵抗力は13.5MNであった。このとき杭頭変位は61.9mm、杭先端変位は18.8mmにとどまっております、試験杭1よりもさらに小さな値となっている。

杭の周面抵抗力は杭頭抵抗力と先端抵抗力の差として求められる。従って、最終の荷重時における周面抵抗力は、試験杭1で11.1MN、試験杭2で26.8MNと計算される。試験杭1と比べて支持層への根入れが長い試験杭2の周面抵抗力がかなり大きくなっており、支持層内での周面抵抗力度（杭の単位表面積当たりの周面抵抗力度）が大きいことが予想される。

周面抵抗力度の深度方向の分布は、図-11に示した軸力の深度方向の分布より求めることができる。ある計測深度と次の計測深度における軸力の差は、その区間で杭に働いている周面抵抗力度に等しい。そこで、各計測深度間の軸力の差を求め、その区間の杭の周面積（計測深度間の距離と杭周長の積）で除すことにより周面抵抗力度を得ることができる。得られた周面抵抗力度の深度方向の分布を図-13に示す（図-13aと図-13bで横軸のスケールが大きく異なることに注意されたい）。

図-13によると、海底面から標高-48m付近までの区間では、周面抵抗力度は50kN/m²から100kN/m²程度にとどまっている。一方、地盤のN値が50を超える標高-48m付近を境に、周面抵抗力度が非常に大きくなっていることが確認できる。これは、前述の試験杭1と試験杭2の周面抵抗力度の大きな差は支持層内での周面抵抗力度に起因しているという推論を裏付ける結果となっている。なお、図-13より、杭頭抵抗力が最大となる最終の荷重時に、必ずしも周面抵抗力度が最大となるわけではないことがわかる。これは、周面抵抗力度が杭と地盤との相対変位の影響を受けるためであると考えられる。

(3) 軸方向押し込み抵抗力（杭頭抵抗力）の特性値

図-12に示したとおり、急速荷重試験により確認された杭頭抵抗力の最大値は、試験杭1で36.4MN、試験杭2で40.3MNであった。いずれの試験杭も極限状態には到っておらず、試験杭2については降伏状態にすら達していないため、得られた値は実際に杭が持つ能力を過小評価している可能性が高い。つまり、いずれの杭についても、少なくとも急速荷重試験で得られた値以上の抵抗力を有していると解釈すべきである。設計上、ターミナル基礎のジャケット支持杭に必要とされる杭頭抵抗力は36MN程度とされているから、支持層への根入れ長が短い試験杭1でも十分な抵抗力を確保していると判断できる。

日本港湾協会（2018）によると、杭の荷重試験で極限状態での抵抗力を確認することができなかつた場合、降伏時の抵抗力の1.2倍を極限状態における抵抗力の参考値とする方法が示されている。これは静的な押し込み試験の経験に基づくもので、今回実施した急速荷重試験の結果への適用性は不明であるが、仮に図-12より試験杭1の降伏時の杭頭抵抗力を25MNから30MNの間と考えたと、極限状態に対する杭頭抵抗力の参考値は30MNから36MNとなる。この値は実際の試験結果を下回っており、今回の試験については日本港湾協会（2018）の考え方は安全側に過ぎる結果となる。

また、荷重試験で得られた抵抗力と変位の関係をワイブル分布曲線により近似する方法（本間ら、1991）も広く用いられている。試験杭1の試験結果を最小二乗法によりワイブル分布曲線で近似すると式(1)が得られる。

$$R_t = 37.3 \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{S_0}{33.5} \right)^{1.30} \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 R_t (MN) は杭頭抵抗力、 S_0 (mm) は杭頭の変位であ

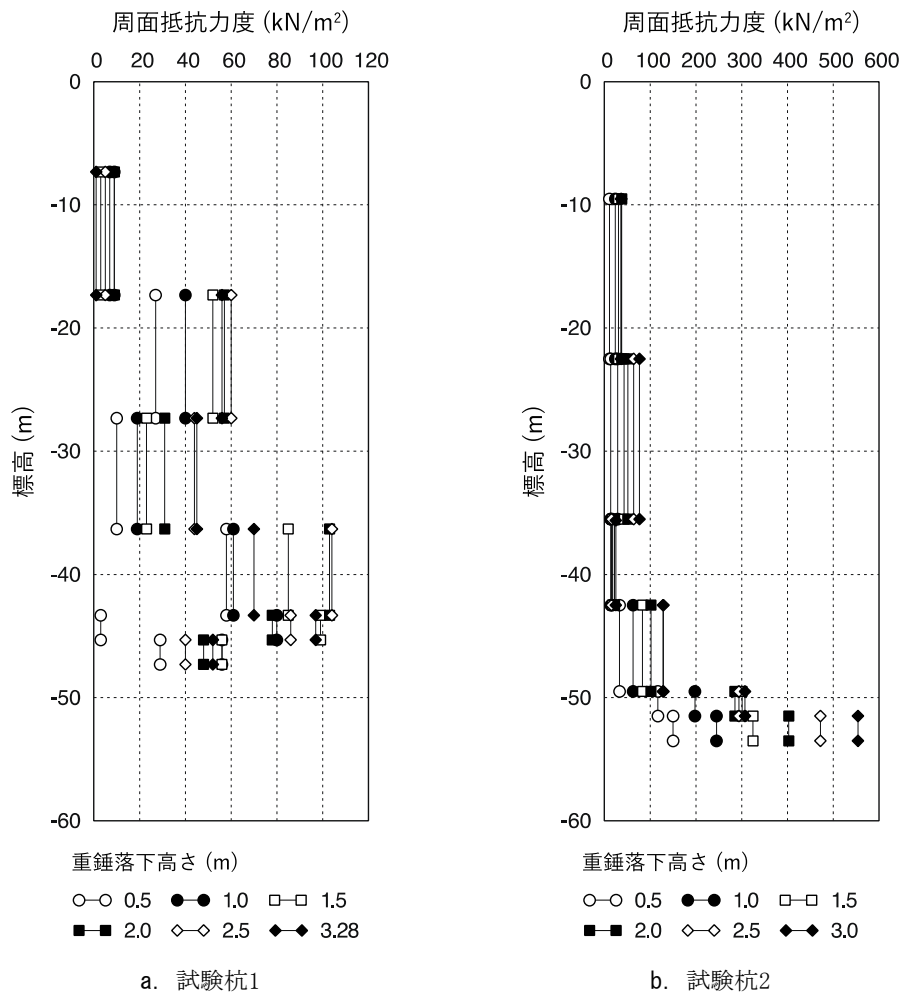


図-13 周面抵抗力度の深度方向分布

る。杭の軸方向押し込み抵抗力の特性値には、杭先端の沈下量（杭先端変位）が杭径の10%までの範囲で得られる杭頭抵抗力の最大値を用いるのが一般的である（日本港湾協会，2018）。杭頭変位と杭先端変位は必ずしも一致しない（杭体の圧縮等により杭頭変位の方が大きくなる傾向がある）が、参考のため、式(1)を用いて、杭頭変位が杭径の10%に相当する200mmのときの杭頭抵抗力を求めると37.3MNとなる。この値は試験で確認された杭頭抵抗力の最大値36.4MNより2.5%ほど大きな値である。

以上のように、いずれの方法によっても、試験杭1の極限状態に対応する杭頭抵抗力の推定値は、試験結果で確認された杭頭抵抗力の最大値をそれほど大きく上回るものではない。従って、以下の検討においては、試験杭1について、最終の載荷時（重錘落下高さ3.28m）のときに得られた杭頭抵抗力を杭の軸方向押し込み抵抗力の特性値として取り扱うこととする。同時にそのときの先端抵抗、周面抵抗などもそれぞれの特性値と考える。ま

た、試験杭2については、急速載荷試験中に降伏状態に陥っておらず、極限状態に対応する抵抗力を推定することは困難と考えられる。従って、以下の検討では試験杭2の試験結果は参考値として取り扱うこととする。

(4) 港湾基準に基づく先端抵抗力の推定値との比較

日本港湾協会（2018）では、杭の抵抗力の特性値は載荷試験により決定することが推奨されているが、参考のため設計に用いる杭の抵抗力の特性値の推定式が示されている。それによると、砂地盤に打撃施工された鋼管杭の先端抵抗 R_p (kN)は式(2)により推定することができる。

$$R_p = 300\eta N A_p \quad (2)$$

ここに、 η は閉塞率と呼ばれ、鋼管杭の先端の形状や地盤状況により変化する係数である。 N は地盤のN値で、杭先端付近の地盤のN値 N_1 と、杭先端から4D上方までの範囲のN値の平均値 \bar{N}_2 の平均値 $(N_1 + \bar{N}_2)/2$ を用いる。なお、 N_1 、 \bar{N}_2 はいずれも50を最大値とする。また、 A_p (m²)は杭先端の断面積で $\pi D^2/4$ により求められる。日本港湾協会（2018）

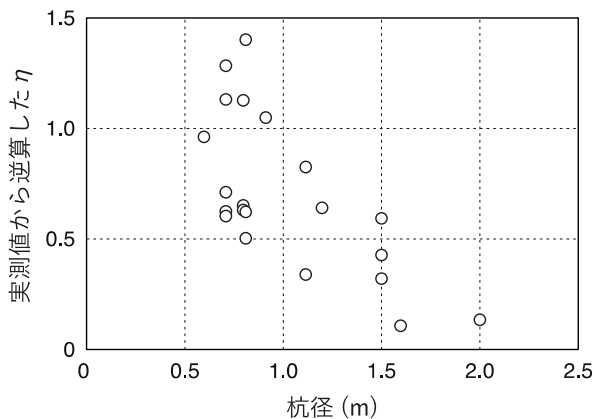


図-14 杭径と閉塞率 η の関係
(日本港湾協会 (2008) に加筆修正)

によると、閉塞率 η については杭径 D の影響が大きいことが指摘されており、図-14のような参考図が示されている。図-14は、先端リブ等を設けていない一般的な開端杭について、過去に行われた杭の載荷試験結果から逆算により求めた閉塞率と杭径の関係を示したものである。図-14では、杭径が1.5mを超える範囲のデータは非常に少ないものの、杭径2mの杭の閉塞率は0.2程度の非常に小さい値となることが予想される。

図-12に示したとおり、急速載荷試験により得られた先端抵抗力は、試験杭1で25.3MN、試験杭2では参考値ではあるものの13.5MNであった。一方、図-5に示したボーリングH28-Tで得られたN値から、式(2)で用いる N を求めると、試験杭1に対しては32.9、試験杭2では48.6となる。これを用いて閉塞率 η を逆算すると、試験杭1では0.82、試験杭2では0.29が得られる。試験杭1の閉塞率は図-14に示した過去の開端杭の試験結果を大幅に上回っており、また、十分な載荷ができなかった試験杭2でも過去の試験結果を若干上回る値が得られている。このようなことから、両試験杭に設けた井桁リブ(図-6参照)は、閉塞率の向上に一定の効果を上げているものと考えられる。

ただし、杭先端付近の地盤条件に注意が必要である。試験杭1は杭先端が砂礫に打ち込まれているが、わずか0.7m(0.35D)下に泥岩が存在する。また、試験杭2は杭先端が泥岩に打ち込まれている。泥岩では砂や砂礫と比較すると相対的に大きな先端抵抗力が得られる可能性があり、その結果、両試験杭で見掛け上大きな閉塞率が得られた可能性がある。また、図-14に示された過去のデータのうち、杭径が1mを超えるものについては杭先端の地盤種別が不明なものも多く、今回の試験結果と単純に比較できるものかどうかは不明確である(杭径1m以下のデータでは地盤種別が細砂、砂、礫混じり砂と報告されている)。

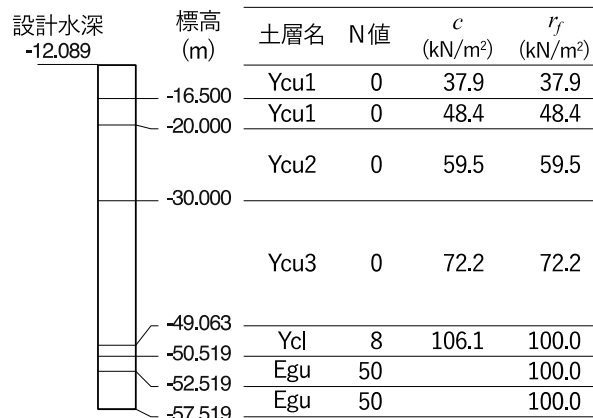


図-15 設計で想定された土層構成、周面抵抗力度

以上のような点を考慮すると、式(2)により逆算して求めた閉塞率には、井桁リブの効果に加え、地盤条件等の影響なども含まれていると考えるのが妥当である。従って、井桁リブは閉塞率の向上に対して定性的には一定の効果があったと思われるものの、その効果の定量的な評価は、今後、より慎重に検討する必要がある。

なお、日本港湾協会(2018)に示された先端抵抗力の推定方法は、安全上の余裕などを含めた設計体系の中で用いることを想定して提示されているものである。従って、この推定方法に基づく各種の推定値と載荷試験の結果を単純に比較することは厳密性に欠ける。ここで述べた内容は参考にとどめておくのがよいと考えられる。

(5) 港湾基準に基づく周面抵抗力度の推定値との比較

日本港湾協会(2018)によると、打撃施工された杭の周面抵抗力度は、砂質土層では $2N$ (kN/m²)、粘性土層では c (kN/m²)と推定される。いずれも100kN/m²を上限値とする。 N は砂質土のN値、 c は粘性土の非排水せん断強さ(実務では一軸圧縮強さの1/2として求める場合が多い)である。これに基づき、ターミナル基礎のジャケットの設計で想定されている土層構成と各土層の周面抵抗力度 r_f を図-15に示す。支持層は図中にEguと表記された江戸川層の上部砂礫層である。なお、図-15はジャケットの設計のために想定された土層構成であり、試験杭の打設位置付近での調査結果(図-4、図-5参照)とは若干異なっている。試験杭の打設位置では支持層は標高-46.1m以深と想定されており、図-15に示したものより浅い。また、試験位置付近は古神田川による埋没谷の存在が指摘されており、場所により土層の構成が変化する(東京都地質調査業協会、2004)。試験杭の打設位置は埋没谷側に存在しており、支持層は七号地層の礫層に相当するのではないかと考えられている。

図-15に示した周面抵抗力度の推定値と載荷試験で得られた値(図-13)を比較すると、海底面から支持層の直上までに堆積している粘性土については、値のばらつきはあるものの概ね同程度の値となっているようである。一方、主に試験杭2(図-13b)で確認されている支持層内の周面抵抗力度については、載荷試験結果では最大300kN/m²から500kN/m²に達しており、周面抵抗力度の推定値の上限100kN/m²を大幅に上回る値が得られている。

なお、先端抵抗力の場合と同様に、日本港湾協会(2018)に基づく周面抵抗力度の推定値と載荷試験結果を単純に比較することはあまり適切ではない。ここで述べた内容は参考にとどめておくのがよいと考えられる。

(6) セットアップ率の検討

杭施工後、一定期間を経過すると杭の抵抗力が増加することが知られている。これはセットアップと呼ばれており、杭の打撃時に生じる地盤内の間隙水圧の消散、施工により乱された粘性土の再圧密、といった地盤の乱れの回復により生じるものであると考えられている。セットアップに要する期間は、砂質土地盤で5日以上、粘性土地盤で14日以上とされており、杭の載荷試験の際には施工から試験までの養生日数がそれ以上となるように計画するのが一般的である(地盤工学会, 2002)。

試験杭1の養生期間は36日、試験杭2では20日となっているから、両杭ともセットアップが生じるのに最低限必要とされる養生期間は確保されていると考えられる。両試験杭の打止め時の衝撃載荷試験(表-1参照)と養生後の急速載荷試験で得られた杭頭抵抗力、先端抵抗力、周面抵抗力をまとめると表-2のとおりとなる。また、施工時と養生後の周面抵抗力度の深度方向分布の比較を図-16に示す。(2)で述べたとおり、周面抵抗力度は最終の載荷時(重錘の落下高さが最大の時)に最大になるとは限らないため、図-16aには養生後の急速載荷試験で得られた各深度における周面抵抗力度の最大値も参考のため表示している。試験杭2については、最終の載荷時の周面抵抗力度がほぼ最大値と等しい値であったことから、図-16bでは周面抵抗力度の最大値の表示は省略した。なお、施工時の衝撃載荷試験で得られた周面抵抗力度は波形マッチング解析により得られたものである。衝撃載荷試験では杭頭をハンマーで打撃するのみで、急速載荷試験のような段階的な載荷は行われないため、載荷重の変化による周面抵抗力度の変化を確認することはできない。

表-2によると、試験杭1については、杭頭、先端、周面いずれの抵抗力についても、養生後の抵抗力と施工時の抵抗力の比(セットアップ率)が4程度以上となっている。一方、試験杭2については、杭頭及び先端抵抗力のセット

表-2 施工時と養生後の各抵抗力の比較

	施工時 (MN)	養生後 (MN)	養生後/ 施工時
試験杭1			
杭頭抵抗力	8.8	36.4	4.14
先端抵抗力	6.4	25.3	3.95
周面抵抗力	2.4	11.1	4.63
試験杭2			
杭頭抵抗力	12.6	40.3	3.20
先端抵抗力	7.6	13.5	1.78
周面抵抗力	5.0	26.8	5.36

アップ率がやや小さく、特に先端抵抗力に関しては2を下回っている。

図-16a, 図-16bによると、標高-35m程度以浅の粘性土を中心とする土層(図-5参照)では施工時に周面抵抗力度がほとんど発揮されておらず、養生期間中に大きなセットアップが生じている。標高-45mから-50m付近の砂礫では、施工時にすでに50~100kN/m²程度の周面抵抗力度が発揮されており、さほど大きなセットアップは生じていない。また、図-16bによると、標高-50m以深の泥岩では、10を超える大きなセットアップ率が得られている。

ただし、試験杭2では、施工時、養生後とも十分な載荷ができていないため、表-2に示したセットアップ率は地盤本来のセットアップ特性を正しく評価できていない可能性がある点に注意が必要である。

菊池ら(2009)は、過去の載荷試験で得られたセットアップ率を各抵抗力や地盤種別毎に整理している。それによると、セットアップ率は試験ケース毎に大きくばらつくものの、杭頭抵抗力では2以上、先端抵抗力ではあまり大きなセットアップが見られず平均で1.7程度、周面抵抗力はセットアップ率が大きく沖積層で平均11.8、洪積層で平均5.5などと報告されている。これらの値と、表-2, 図-16に示した試験杭1の試験結果を比較すると、先端抵抗力のセットアップ率が際立って大きい。このような結果となった要因として、杭先端付近の地盤条件の影響が挙げられる。

図-5に示したとおり、試験杭1の杭先端は標高-45~-50m付近の砂礫に打ち込まれている。しかしながら、杭先端から0.7m(0.35D)下方には泥岩が存在している。施工時には杭先端付近の砂礫が大きく乱されていることから、杭先端からの作用は砂礫層を中心に支持されていると考えられる。これに対し、養生後は砂礫の乱れが回復し(セットアップ)、それにより杭先端からの作用の伝達範囲が広がる。その結果、杭先端からの作用が、砂礫の下

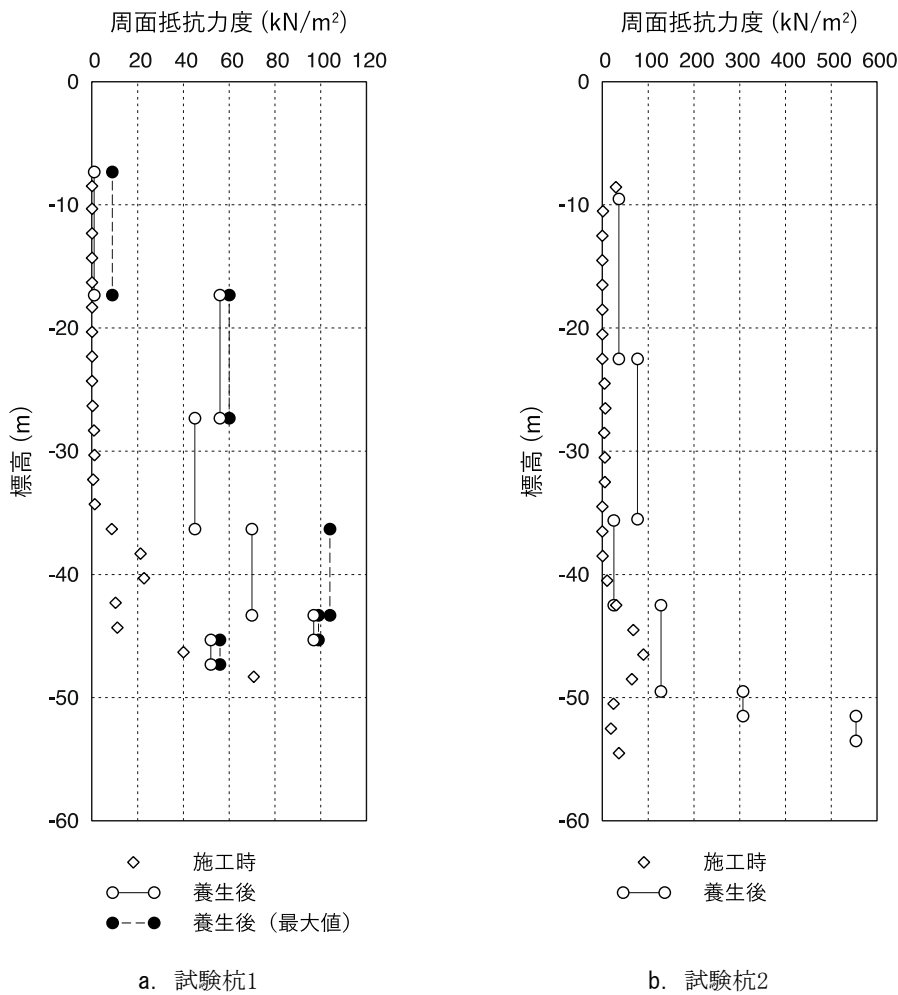


図-16 施工時と養生後の載荷試験で得られた周面抵抗力度の比較

部に存在する強固な泥岩にまで伝達されることとなり、養生後の先端抵抗力が大きくなった可能性がある。例えば、日本道路協会（2017）に示された先端抵抗力の推定方法において杭先端から3D下方までの地盤の特性を考慮することなどからも、試験杭1の先端抵抗性に泥岩の影響が現れることは十分に起こり得ると思われる。従って、試験杭1について得られた先端抵抗力のセットアップ率は、単に支持層である砂礫のセットアップ特性を示すものではなく、砂礫と泥岩という多層地盤の影響が含まれた見掛け上の値であると考えべきである。

3. 本設杭の衝撃載荷試験

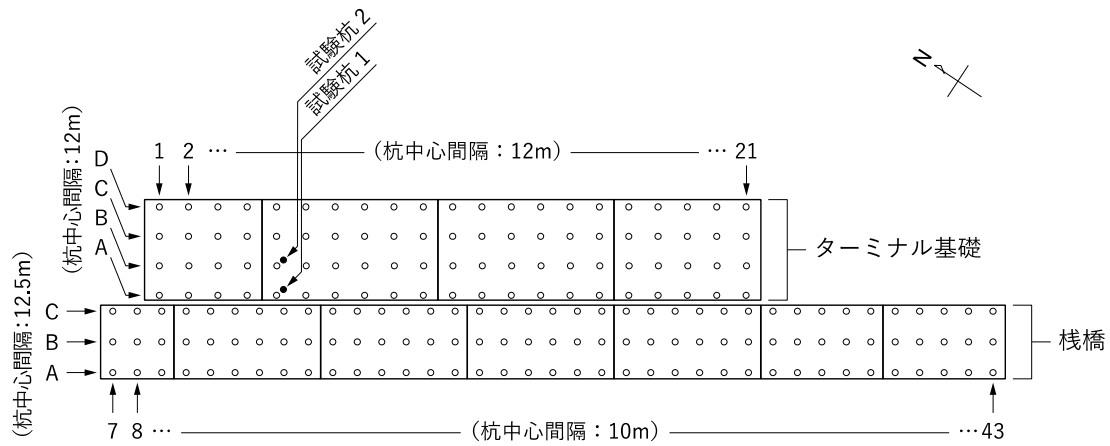
3.1 試験概要

(1) 試験を実施した杭

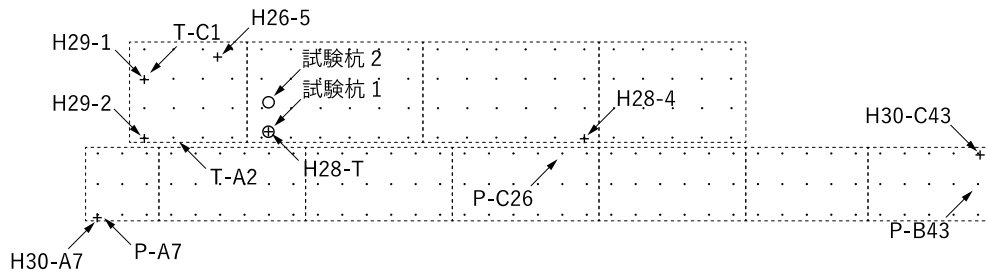
東京港新客船埠頭の整備では、ターミナル基礎及び棧橋のジャケットを支える本設杭の施工の際にもいくつか

の杭で衝撃載荷試験を実施し、杭の抵抗力の確認を行った。本設杭の平面的な配置を図-17aに、試験を実施した杭の位置とそれぞれの直近のボーリング調査の位置を図-17bに示す。ジャケットの寸法等は図-2をあわせて参照されたい。図-17には、参考のため、急速載荷試験を実施した試験杭の位置もあわせて示している。本設杭にはA～Dの記号と1～43の数字の組み合わせで杭番号がつけられている。本稿では、杭番号の前に、ターミナル基礎についてはT-、棧橋についてはP-を付け、各本設杭を識別することにする。試験を実施した本設杭の仕様を表-3に示す。

試験を行った5本の本設杭は、杭径は0.9mから1.5mとばらばらであるが、杭長は50.5mから52.5mで概ね同程度となっている。ターミナル基礎のジャケット支持杭であるT-C1とT-A2には、杭先端に文字あるいは十字状の先端リブが取り付けられているが、棧橋のジャケット支持杭P-C26、P-A7、P-B43は一般的な開端杭である。いずれの杭にも、杭先端外周面に先端補強バンドが取り付けられて



a. 本設杭の平面配置



- ・ 本設杭 ○ 試験杭 + ボーリング □ ジャケット据付予定位置

b. 衝撃載荷試験を実施した本設杭と直近の土質調査ボーリング地点

図-17 本設杭の衝撃載荷試験の実施位置

表-3 衝撃載荷試験を実施した本設杭の仕様

	杭径 (m)	全長 (m)	先端形状	板厚 (mm) *	養生日数 (日) †
T-C1	0.9	50.5	一文字	16(5.1), 23(16.9), 22(28.5)	4
T-A2	1.1	50.5	十字	16(6.6), 23(19.4), 17(24.5)	-
P-C26	1.5	52.0	開端	24(31.0), 17(2.0), 16(19.0)	-
P-A7	1.2	52.5	開端	14	9
P-B43	1.5	52.5	開端	19(30.0), 16(22.5)	4

* 杭頭から順に記載, 括弧内は区間長 (m)

† 杭頭 T-A2 と P-C26 は施工時の試験のみ実施

いる。T-C1とT-A2の杭先端の形状を図-18に示す。

いずれの杭も油圧ハンマー（IHC S-280）を用いた打撃工法により施工した。P-C26は、急速載荷試験を行った試験杭と同様に、支持層付近までパイプロハンマで打ち込んだ後、油圧ハンマーによる最終打撃を行っている。その他の4本の本設杭は、杭の建込みから打止めまで油圧ハンマーのみを用いて施工した。

(2) 地盤条件

試験を行った本設杭のそれぞれに最も近い位置で実施されたボーリング（図-17b参照）により得られた土層構成とN値を図-19～図-23に示す。各図には、対応する杭の打設深度をあわせて示している。これらの図により、深度や土層の構成に多少の違いはあるものの、全体としては類似した地盤条件となっていることがわかる。いずれの地

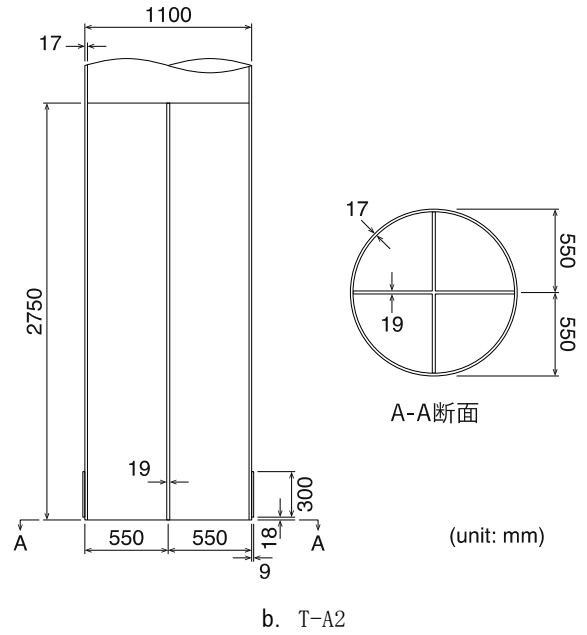
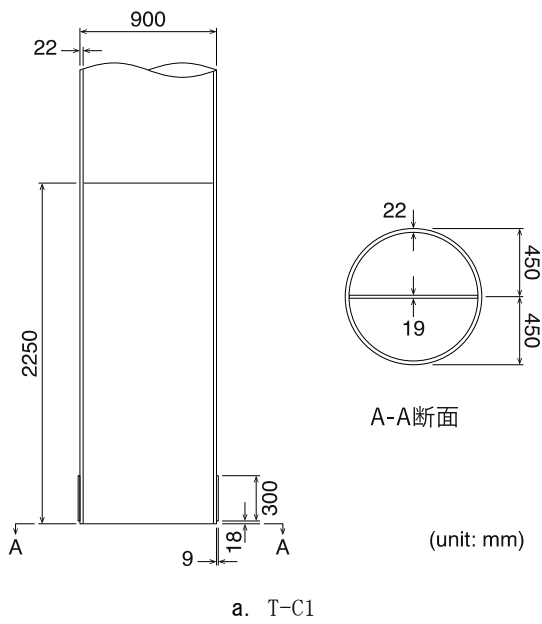
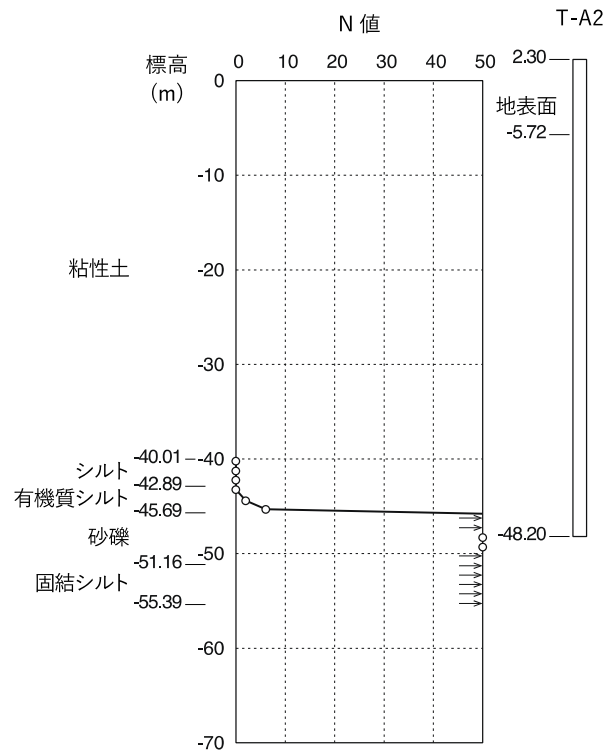
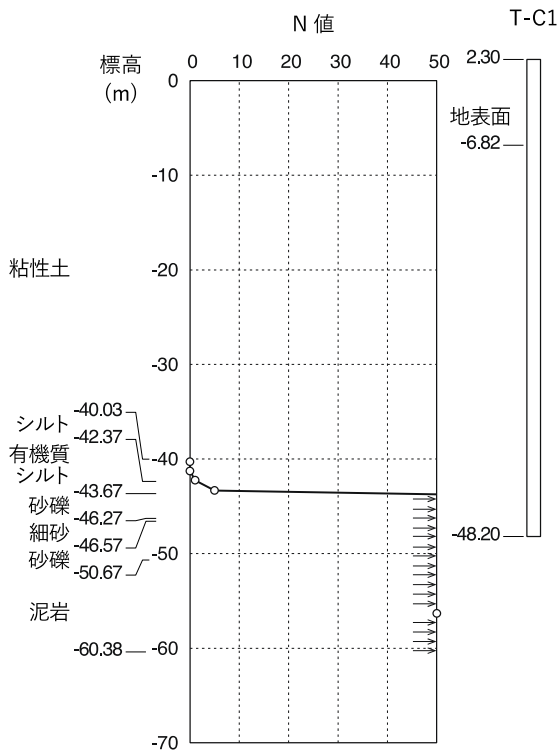


図-18 本設杭のT-C1, T-A2の先端形状



点でも海底面から標高-40~-45m付近まで粘性土層が続き、その下に細砂や砂礫の層が現れ、標高-50~-55m以深に泥岩、固結シルトの層が存在する。本設杭はいずれも砂礫まで根入れした状態で打止められており、急速荷重試験を行った試験杭1（図-5参照）と類似した条件であると考えられる。ただし、本設杭と試験杭1を比較すると、試験

杭1の杭先端が砂礫層の下の泥岩にかなり近い位置まで打ち込まれている点に注意が必要である。2.4(6)で述べたとおり、杭先端から泥岩までの離隔が杭の先端抵抗力に影響することは十分に考えられる。

(3) 衝撃荷重試験の方法

衝撃荷重試験はJGS 1816-2002（地盤工学会，2002）に

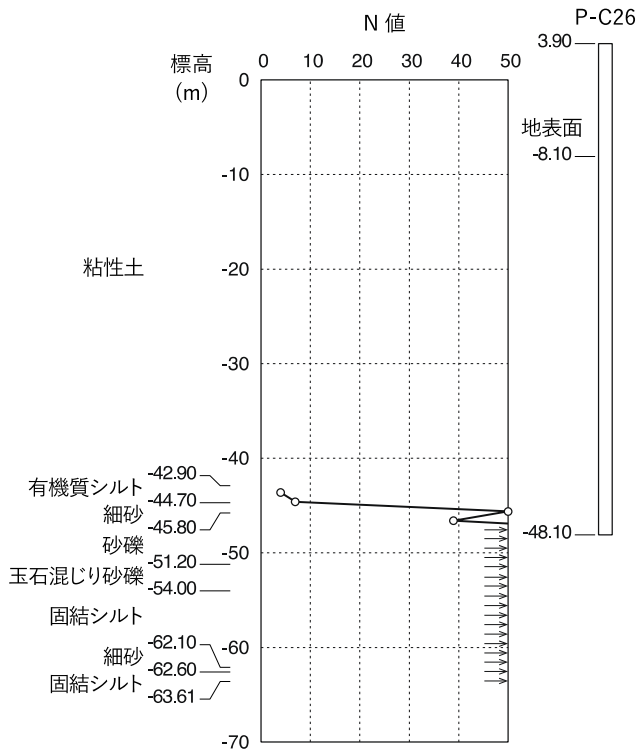


図-21 H28-4で得られた土層構成, N値

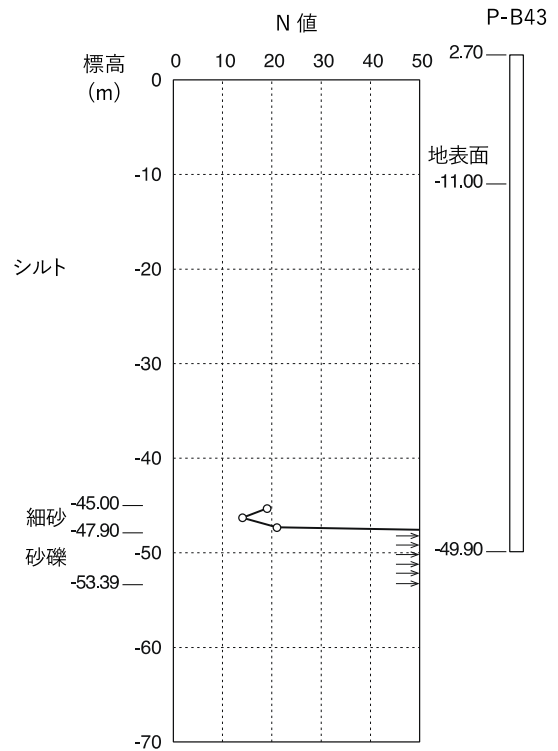


図-23 H29-C43で得られた土層構成, N値

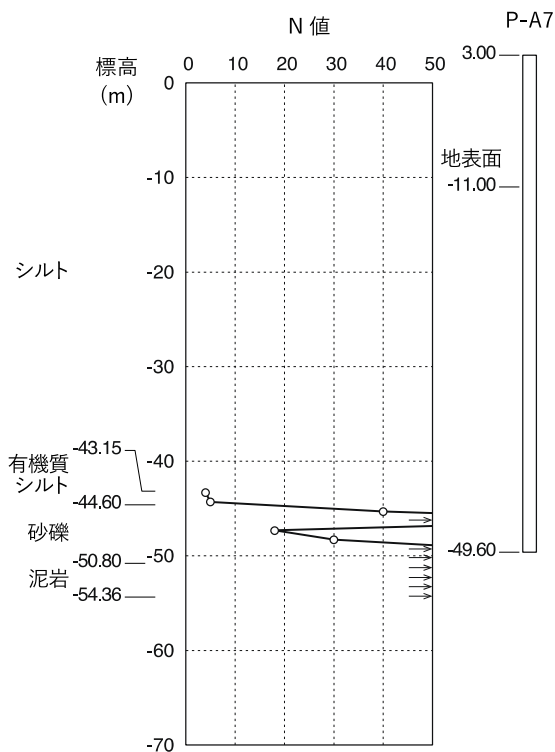


図-22 H29-A7で得られた土層構成, N値

従って実施した。試験の際には、杭頭から0.9~1.5m程度（概ね杭径程度）下がった位置の杭外周面に、加速度計とひずみ計を取り付けた。加速度計とひずみ計は、各1台を1組として、杭中心軸に対して対象となるように2組取り付け付けた。データ計測はPDI製のPDA（2.3参照）により実施した。

衝撃載荷試験の実施のタイミングは杭により異なっている。T-C1については、施工時と4日間養生後に試験を実施しているが、T-A2及びP-C26は施工時のみ試験を行っている。また、P-A7とP-B43については施工時には試験を実施しておらず、それぞれ9日間、4日間の養生後に衝撃載荷試験を実施した。試験後、PDI製の解析プログラムCAPWAPによる波形マッチング解析を実施し、先端抵抗力、周面抵抗力、杭頭抵抗力を算定した。

養生後の杭の抵抗力は、養生期間中にセットアップが生じることで大幅に増加する。そのため、養生後の衝撃載荷試験に際しては、施工時よりも高規格の油圧ハンマーを準備するのが理想的である。しかしながら、工費・工期の観点からやむを得ず施工時と同等の油圧ハンマーを用いる場合が多い。東京港新客船埠頭においても、養生後の衝撃載荷試験の際に施工時と同じ油圧ハンマーを用いた。この場合、油圧ハンマーの能力不足により、1回の打撃では十分に載荷する（杭先端まで十分に軸力を作用させる）

ことができないことが多い。そのため、以下のような考え
方により養生後の周面抵抗力と先端抵抗力を評価するこ
ととした。

養生後の衝撃載荷試験の際、打撃回数が少ないうちは
周面抵抗力が大きく発揮されるため、ハンマー打撃によ
る荷重が杭先端まで十分に伝達されない。このとき、杭先
端が地盤に拘束された状態が維持され、先端抵抗力はあ
まり動員されない。打撃を継続すると、周面抵抗力が低下
して残留状態に移行する（土質特性等に依存するためす
べての土層で低下するわけではない）。その結果、荷重が
杭先端まで伝達されるようになり、杭先端が地盤に押し
込まれ始めることで先端抵抗力が発揮される。そこで、養生
後の衝撃載荷試験では、データ計測を行いながら打撃を
継続し、先端抵抗力がある程度発揮される状態になるま
で試験を行う。

杭先端抵抗力の発生状況は、打撃により杭体に生じる
応力波の波形から確認することができる。杭頭を油圧ハン
マーで打撃することにより杭頭に応力波が生じ、圧縮波
として杭先端に向かって伝達される。一部は周面抵抗力
の影響により途中で反射されるが、一部は杭先端に到
達し反射波として杭頭に戻ってくる。応力波が杭先端で
反射する際、杭先端が地盤に貫入できない（地盤に拘束さ
れている）状態の場合、固定端条件での反射となるため、
反射波は圧縮波となる。杭先端が地盤に押し込まれる状
態の場合、杭先端は自由端となるため、反射波は引張波と
なる。つまり、反射波が圧縮波であれば杭先端は地盤に押
し込まれておらず先端抵抗力が十分に発揮されていない
状態、引張波であれば杭先端が地盤に押し込まれ先端抵
抗力が発揮されている状態であることがわかる。

このようなことから、養生後の衝撃載荷試験では、杭先
端からの反射波が圧縮波か引張波かを確認しながら打撃
を続け、可能な限り杭先端からの反射波が引張波となる
まで試験を継続する。試験後、波形マッチング解析の際に
打撃開始当初の計測データを用いることで周面抵抗力の
最大値を、試験終盤の計測データを用いることで先端抵
抗力の最大値を算定することができる。実際に杭頭に荷
重が加わったとき、このようにして求めた周面抵抗力の
最大値と先端抵抗力の最大値が同時に発揮されるかどう
かは不明である。しかしながら、実務における衝撃載荷
試験では、両最大値を加算した値をもってその杭の軸方向
抵抗力と整理するのが一般的であり、本検討においても
そのように解釈することとする。

3.2 試験結果

本設杭の衝撃載荷試験の結果を表-4に示す。T-A2では、

打止め時よりも10打撃前の打撃で最大の抵抗力が得られ
たので、参考値として表-4の括弧内に示している。また、
3.1(3)で述べたとおり、養生後の試験においては周面抵
抗力と先端抵抗力を別の打撃時のデータから算出してい
る。参考のため、表-4には、先端抵抗力を算出した打撃時
の周面抵抗力（残留状態の値）を括弧内に示している。表
にも注記しているとおり、P-A7では養生後の衝撃載荷試
験の際に杭先端での反射波が引張波となる状態まで打撃
することができず、先端抵抗力を過小評価している可能
性があることに注意を要する。なお、施工時の衝撃載荷試
験については、先端抵抗力と周面抵抗力は同時に（同一の
打撃時に）得られた値である。

5本の本設杭及び試験杭1はそれぞれ杭径が異なってい
るため、各抵抗力を直接比較することは難しい。そこで、
まず、先端抵抗力について、各杭の先端抵抗力度（杭先端
における単位面積当たりの抵抗力）と式(2)から逆算して
求めた閉塞率を表-5に示す。先端抵抗力度に着目すると、
施工時については5本の本設杭と試験杭1の間に大きな差
は見られない。養生後については、開端杭のP-A7とP-B43
で先端抵抗力度が小さく、続いて一文字リブを設けたT-
C1、井桁リブを設けた試験杭1の順に先端抵抗力度が大き
くなる。閉塞率に関しても概ね同様な傾向が見られる。

このような先端抵抗力度、閉塞率の変化傾向には、杭先
端に設けた先端リブの影響の他、杭先端の地盤条件が影
響していると思われる。3.1(2)で述べたとおり、衝撃載荷
試験を実施した5本の本設杭は、試験杭1と同様に砂礫を
支持層としている。しかしながら、2.4(4)で述べたとおり、
試験杭1では、養生後は杭先端からの作用が泥岩まで及ぶ
ことにより、先端抵抗力が大きくなった可能性がある。こ
れに対し、P-A7以外の本設杭では杭先端から泥岩までの
離隔が杭径の2倍から4倍程度と大きい（図-19～図-23参
照）。そのため、先端抵抗力に対する泥岩の寄与は小さく、
単純に砂礫のみに支持される状態となり、特に養生後
において試験杭1よりも小さな先端抵抗力度を示したの
ではないかと考えられる。

一方、P-A7は杭先端から泥岩までの距離が杭径と同程
度で、他の本設杭よりは泥岩近くまで打ち込まれている。
前述のとおり、P-A7ではハンマーの能力不足により先端
抵抗力は過小評価されているものと思われ、仮に十分な
荷重を作用させることができれば、さらに大きな抵
抗力が得られた可能性が高い。

次に、本設杭、試験杭1の載荷試験で得られた周面抵抗
力度を比較する。施工時の衝撃載荷試験で得られた周面
抵抗力度の深度方向の分布を図-24に、養生後の試験（試
験杭1は急速載荷試験）で得られた周面抵抗力度の深度方

表-4 本設杭の衝撃載荷試験の結果一覧

杭番号		T-C1	T-A2	P-C26	P-A7	P-B43	試験杭 1 [§]
杭径	(m)	0.9	1.1	1.5	1.2	1.5	2.0
先端形状		一文字	十字	開端	開端	開端	井桁
施工時 (打止め時)							
入力エネルギー	(kJm)	101	85	92	70	77	174
伝達エネルギー	(kJm)	92	77	76	-	-	162
貫入量	(mm)	5.7	5.5	4.0	7.4	19.0	4.1
リバウンド量	(mm)	9.4	7.3	5.8	11.9	3.0	7.6
全抵抗	(MN)	5.3	6.2 (7.2)*	10.3	-	-	17.7
周面抵抗力	(MN)	1.2	1.2 (1.5)*	2.4	-	-	2.4
先端抵抗力	(MN)	1.6	1.8 (2.1)*	2.8	-	-	6.4
杭頭抵抗力	(MN)	2.8	3.0 (3.6)*	5.3	-	-	8.8
養生後							
養生日数	(日)	4	-	-	9	4	36
周面抵抗力	(MN)	3.7 (1.8) [†]	-	-	4.9 (2.5) [†]	6.8 (2.2) [†]	11.1
先端抵抗力	(MN)	2.3	-	-	2.6 [‡]	1.9	25.3
杭頭抵抗力	(MN)	6.0	-	-	7.5	8.6	36.4

* 括弧内は打止め前に確認された最大値

[†] 括弧内は先端抵抗力最大時の周面抵抗力の値

[‡] 油圧ハンマーの能力不足により載荷重が不十分 (反射波が圧縮波の状態を維持)

[§] 養生後の抵抗力は急速載荷試験により得られた値

表-5 本設杭の衝撃載荷試験で得られた先端抵抗力度, 閉塞率

杭番号		T-C1	T-A2	P-C26	P-A7	P-B43	試験杭 1
杭径	(m)	0.9	1.1	1.5	1.2	1.5	2.0
先端形状		一文字	十字	開端	開端	開端	井桁
施工時							
先端抵抗力	(MN)	1.6	1.8 (2.1)*	2.8	-	-	6.4
先端抵抗力度	(MN/m ²)	2.5	1.9 (2.2)*	1.6	-	-	2.0
閉塞率		0.17	0.16 (0.19)*	0.14	-	-	0.21
養生後							
先端抵抗力	(MN)	2.3	-	-	2.6 [†]	1.9	25.3 [‡]
先端抵抗力度	(MN/m ²)	3.6	-	-	2.3 [†]	1.1	8.1 [‡]
閉塞率		0.24	-	-	0.18 [†]	0.09	0.82 [‡]

* 括弧内は打止め前に確認された最大値

[†] 油圧ハンマーの能力不足により載荷重が不十分 (反射波が圧縮波の状態を維持)

[‡] 急速載荷試験により得られた値

向の分布を図-25に示す。

施工時の周面抵抗力度を示した図-24によると、本設杭P-C26を除き、概ね同様な値、変化傾向が得られていることが確認できる。P-C26のみ標高-25m以深の周面抵抗力度が大きく、他の杭の試験結果と傾向が異なっている。この

ような結果となった原因ははっきりしないが、P-C26は標高-27mから-29mの間で大きな段落し(板厚の低減)を行っていることから、これが衝撃載荷試験時の応力波の計測や試験後に実施した波形マッチング解析に影響を与えた可能性が考えられる(波形マッチング解析は一次元解析

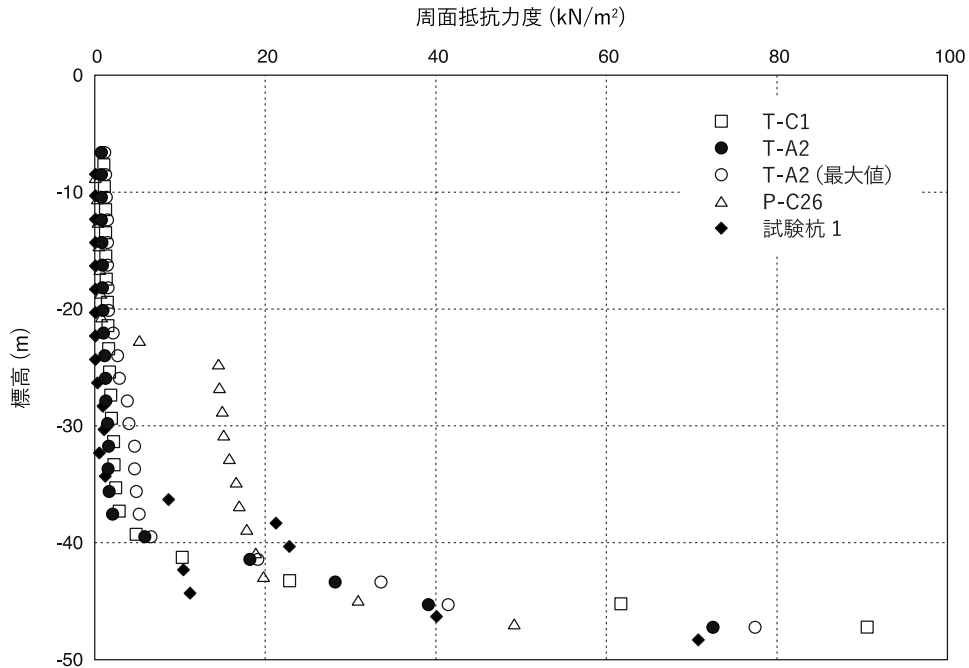


図-24 施工時の荷重試験で得られた周面抵抗力度の深度方向分布

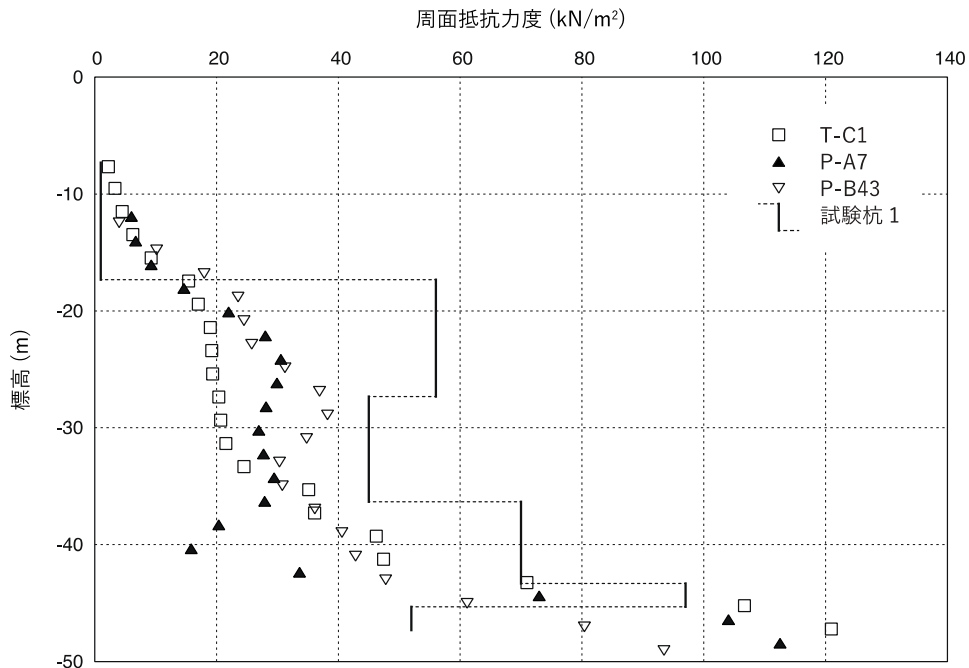


図-25 養生後の荷重試験で得られた周面抵抗力度の深度方向分布

であるため、板厚の変化は剛性の変化として考慮されるものの、杭の形状が変化することまでは考慮されない。

次に、養生後の周面抵抗力度を示した図-25によると、3本の本設杭の試験結果は概ね一致していることがわかる。P-A7のみ標高-40m付近でやや小さい値を示しているが、すでに述べたとおりP-A7ではハンマーの能力不足により十分な荷重ができていないため、最深部の周面抵抗

力度も過小評価となっている可能性がある。3本の本設杭の試験結果と試験杭1の試験結果を比較すると、本設杭の周面抵抗力度がやや小さい。しかしながら、試験杭と本設杭では養生日数が大きく異なっており、試験杭1が36日であるのに対して本設杭は4日又は9日と短い。藤田・上田(1970)には養生日数と降伏時、極限時の抵抗力度について過去の実績が取りまとめられている。藤田・上田(1970)

に示されたデータから定量的に評価することは難しいが、非常に粗い推測として、養生日数が4日から36日で30%程度、9日から36日で15%程度は杭の抵抗力が増加する可能性があると考えられる。このようなことを勘案すると、本設杭と試験杭1ではほぼ同程度の周面抵抗力が得られていると判断してよさそうである。

本設杭T-C1については、施工時と養生後の両方の載荷試験を実施しているので、セットアップ率を求めることが可能である。計算結果を表-6に示す。表-6には、比較のため試験杭1の結果を再掲している。T-C1では先端抵抗力のセットアップ率が試験杭1と比較して小さいが、これは繰返し述べているとおり、杭先端と泥岩層との離隔の大小によるものではないかと考えられる。また、T-C1の養生日数が短いことも影響しているものと思われる。

周面抵抗力のセットアップ率についても、T-C1の試験結果は試験杭1よりも小さい。菊池ら(2009)に示されているとおり、一般的にセットアップの効果は先端抵抗力よりも周面抵抗力に大きく現れることなどから、T-C1と試験杭1の周面抵抗力のセットアップ率の差は、養生日数の差による影響が大きいものと思われる。T-C1もさらに養生日数を経ることで周面抵抗力が増加し、セットアップ率が向上することが期待される。

4. 施工管理への応用に関する検討

4.1 ハイリー式の補正の考え方

我が国の港湾の施設において、鋼管杭を打込み工法により施工する場合、打止め施工管理のためにハイリー式を用いるのが一般的である。ハイリー式とは、ハンマーの打撃によって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、鋼杭の場合はいくつかの仮定に基づいて簡略化された式が用いられる。この簡略式によると、ハイリー式による杭の抵抗力(杭頭抵抗力)の推定値 R_{th} は式(3)により求められる。

$$R_{th} = \frac{e_f F}{s + \frac{K}{2}} \quad (3)$$

ここに、 e_f はハンマーの効率、 F はハンマーの打撃エネルギー(杭への入力エネルギー)、 S は杭の貫入量、 K はリバウンド量である。式(3)の分子はハンマー効率と入力エネルギーの積であるから、ハンマーから杭に伝達されたエネルギーに相当する。貫入量 S は1回の打撃により杭頭に生じる残留変位、リバウンド量 K はその打撃中に生じる杭頭の最大変位から残留変位を引いた値であり、いずれも打止め前の10打撃程度の間の平均的な値を用いる。

表-6 施工時と養生後の各抵抗力の比較

	施工時 (MN)	養生後 (MN)	養生後 / 施工時
T-C1			
杭頭抵抗力	2.8	6.0	2.14
先端抵抗力	1.6	2.3	1.44
周面抵抗力	1.2	3.7 (1.8)*	3.08 (1.50)*
試験杭1			
杭頭抵抗力	8.8	36.4 [†]	4.14
先端抵抗力	6.4	25.3 [†]	3.95
周面抵抗力	2.4	11.1 [†]	4.63

* 括弧内は先端抵抗力最大時の周面抵抗力の値

[†] 急速載荷試験により得られた値

ハイリー式は、施工時の杭打ちという動的な挙動の中で計測される貫入量やリバウンド量により養生後の杭の静的な抵抗力を推定しようとするもので、原理的に無理があり、算定結果のばらつきが大きい。そのため、日本港湾協会(2018)では、ハイリー式を杭の抵抗力の推定に用いるのではなく、単一の現場の施工管理として杭毎の相対的な抵抗力の変化を検知するための簡便な指標として用いることを推奨している。

菊池ら(2009)は、杭の載荷試験とハイリー式を組み合わせることで、従来よりも精度の高い施工管理を目指す方法を提案している。具体的には、式(4)に示すように、ハイリー式にいくつかの係数を導入し、貫入量、リバウンド量から養生後の杭頭抵抗力を推定できるように補正しようというものである。

$$R_{tp} = \frac{e_f F}{s + \frac{K}{2}} \times C_f \times S_r \times S_t = R_{th} \cdot C_f \cdot S_r \cdot S_t \quad (4)$$

ここに、 R_{tp} はハイリー式の補正式による杭頭抵抗力の推定値、 C_f 、 S_r 、 S_t は補正係数である。各補正係数は、施工時(打止め時)に衝撃載荷試験を行い、さらに養生後に再度の載荷試験(試験方法は問わない)を行うことで決定する。

C_f は、施工時の衝撃載荷試験で得られた全抵抗 R_T と、ハイリー式による杭頭抵抗力の推定値 R_{th} との比を表す補正係数で、式(5)により求められる。

$$C_f = \frac{R_T}{R_{th}} \quad (5)$$

S_r は、施工時の衝撃載荷試験で得られた杭頭抵抗力 R_{ti} と、全抵抗 R_T との比を表す補正係数で、式(6)により求められる。

$$S_r = \frac{R_{ti}}{R_T} \quad (6)$$

表-7 各杭について得られるハイリー式の補正係数

杭番号		T-C1	T-A2	P-C26	P-A7*	P-B43	試験杭 1†
杭径	(m)	0.9	1.1	1.5	1.2	1.5	2.0
先端形状		一文字	十字	開端	開端	開端	井桁
e_f		0.91	0.91	0.83	-	-	0.93
R_{th}	(MN)	8.8	8.4	11.0	-	-	20.5
C_f		0.60	0.74	0.94	-	-	0.86
S_r		0.53	0.48	0.51	-	-	0.50
S_t		2.1	-	-	-	-	4.1
$e_f \times C_f \times S_r \times S_t$		0.62	-	-	1.4	2.3	1.7

* 油圧ハンマーの能力不足により載荷重が不十分（反射波が圧縮波の状態を維持）

† 養生後の載荷試験は急速載荷試験

S_t はセットアップ率に対応する補正係数で、式(7)により求められる。

$$S_t = \frac{R_t}{R_{ti}} \quad (7)$$

ここに、 R_t は養生後の載荷試験により得られる杭頭抵抗力である。以上により、式(4)のように補正したハイリー式で計算される杭頭抵抗力 R_{tp} が養生後の載荷試験で得られた杭頭抵抗力 R_t に一致することになる。

式(4)の実務における使い方は概ね次のようなものである。まず、試験杭又は最初に施工する本設杭について、施工時（打止め時）に入力エネルギー F 、貫入量 S 、リバウンド量 K を計測する。あわせて衝撃載荷試験、波形マッチング解析を行い、杭への伝達エネルギー E_t 、全抵抗 R_T 、杭頭抵抗力 R_{ti} を求め、これらのデータから補正係数 C_f 、 S_r を決定する。このとき、 R_{th} の分子（式(3)参照）は、 $e_f F$ ではなく実際に計測された伝達エネルギー E_t を用いる。ハンマー効率 e_f は E_t/F として求めることができる。

次に、一定の養生期間の後、同じ杭に対して載荷試験を行う。養生後の載荷試験は静的な押し込み試験が望ましいが、工費・工期の制約等の理由から急速載荷試験や衝撃載荷試験とすることもある。施工時の載荷試験で得られた杭頭抵抗力 R_{ti} と養生後の試験で得られた杭頭抵抗力 R_t からセットアップ率 S_t を求める。このようにして決定した e_f 、 C_f 、 S_r 、 S_t を式(4)に代入する。

以降、同現場で施工する本設杭については、施工時（打止め時）の入力エネルギー F 、貫入量 S 、リバウンド量 K を計測すれば、式(4)から杭の養生後の杭頭抵抗力を推定できる。このようにして施工管理を行うことで、現場で支持力不足となる杭が生じていないかを確認しつつ施工を進めることが可能となる。

式(4)に示したハイリー式の補正式を用いて計算され

る養生後の杭の抵抗力は、式(3)のハイリー式の簡略式をそのまま用いるよりは、実際の杭の抵抗力に近い値を示すと考えられる。ただし、式(4)を用いる前提として、載荷試験を実施した杭と施工管理対象の本設杭の間で種々の条件が一致していることが重要である。杭径、杭長、先端形状などの杭諸元の他、地盤条件、施工に用いるハンマー、施工の方法（打止め付近での入力エネルギーの調整などのハンマー操作を含む）などの諸条件について、載荷試験を行った杭と本設杭の間に大きな差異が無いことを確認する必要がある。

なお、式(4)は単に式(3)の計算結果を定数倍しているだけであり、式(4)を用いたからといって推定精度が向上するわけではない点に注意が必要である。式(4)を用いてより確からしい杭の抵抗力を推定するには、載荷試験を行う杭の本数を増やすなどの方法が考えられる。

4.2 補正係数の検討

東京港新客船埠頭の整備に関連して実施した杭の載荷試験データに基づき、4.1で説明した各係数を計算すると表-7のようになる。載荷試験を施工時のみ実施したもの、養生後のみ実施したものがあため、計算が可能な係数のみを表示している。

菊池ら(2009)は過去の載荷試験で得られた各補正係数の値を整理し紹介している。それによると、 e_f は0.82程度（IHC製ハンマーの場合）、 C_f は0.5から1.0程度、 S_r は0.5程度とされている。また、 S_t （セットアップ率）は地盤条件等により大きく変化するが最低2程度は見込めると述べられている。表-7に示した各係数の値は概ねこの範囲に入っていると見える。

しかしながら、表-7の末尾に示した4つの係数の積（実質的にハイリー式の計算結果に乗じる値）を見ると、0.62

から2.3となっており、3倍以上の開きがある。これは、各杭の杭径や先端形状、先端付近の地盤条件（泥岩との離隔など）、施工条件（打止め時の入力エネルギー、貫入量、リバウンド量など）が異なっていることに起因していると考えられる。

5. 結論

本稿では、東京港新客船埠頭の整備のために実施された試験杭の急速載荷試験及び本設杭の衝撃載荷試験の試験方法や試験結果を整理するとともに、それらの結果を比較し、東京港新客船埠頭用地における杭の軸方向抵抗力の特性をとりまとめた。

試験杭の急速載荷試験結果より設計上必要とされる抵抗力を十分に確保できることが確認された。特に、先端抵抗力に関して、先端閉塞率やセットアップ率が大きな値を示していた。これは、杭先端に設けた井桁リブの効果の他に、杭先端部の地盤条件（支持層下部の泥岩層が先端抵抗力に寄与したこと）が影響したものと考えられる。また、試験杭の急速載荷試験結果と本設杭の衝撃載荷試験結果を比較すると、周面抵抗力は概ね同様な傾向を示しているが、先端抵抗力について閉塞率やセットアップ率に大きな差が生じていることが確認された。杭径、杭先端形状の違いや杭先端部の地盤条件の違い（本設杭では杭先端から泥岩層までの離隔が大きいこと）が影響したものと考えられる。

さらに、試験結果を本設杭の施工管理に活用することを目的として、載荷試験結果を使ってハイリー式を補正する方法について検討した。試験結果から得られた補正係数は過去の事例の範囲に入っているものの、その値は杭毎に大きく異なり3倍程度の開きがあることが確認された。これについても、杭の諸元や地盤条件、施工条件等の違いが影響しているものと思われる。従って、載荷試験結果から得た補正係数を本設杭の施工管理に使用する際は、条件の近い杭の試験結果から算定された値を用いることを基本とし、かつ、施工時の入力エネルギー、杭貫入量、リバウンド量等の値や、それらの深さ方向の変化状況なども比較することが重要であると考えられる。

(2020年8月5日受付)

謝辞

本稿は、東京都港湾局東京港建設事務所よりご提供頂いた載荷試験結果を基に検討を行ったものである。東京港建設事務所の関係各位には、提供された資料の記載内容の確認など、検討にあたり多大なるご協力を賜った。未

筆ながらここに記して謝意を表す。

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.
- 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. 171-192及びpp. 223-245.
- 東京都地質調査業協会（2004）：特集 東京湾，技術ノート，No. 37，pp. 3-6.
- 長山英樹・宮司剛志・亀井秀一・小林剛（2019）：東京港新客船ふ頭の大口径鋼管杭の載荷試験，基礎工，Vol. 47，No. 8，pp. 28-31.
- 日本港湾協会（2018）：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp. 693-699及びp. 1727.
- 日本道路協会（2017）：道路橋示方書・同解説，IV 下部構造編，pp. 244-249.
- 藤田圭一・上田勝基（1970）：クイ打込後の経過日数と支持力について，クイの鉛直載荷試験法の諸問題に関するシンポジウム発表論文集，pp. 49-52.
- 本間政幸・金道繁紀・高野公作・宇都一馬・冬木衛・佐藤正人・桜井学（1991）：杭の載荷試験管理の一手法，杭の鉛直載荷試験方法および支持力判定法に関するシンポジウム発表論文集，pp. 55-62.
- 森野亮吾・黒米郁・宮司剛志・山下晃三・水谷崇亮・山下久男（2018a）：東京港新客船ふ頭における大口径鋼管杭の載荷試験（その1），第53回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1291-1292.
- 森野亮吾・黒米郁・宮司剛志・山下晃三・水谷崇亮・小林剛（2018b）：東京港新客船ふ頭における大口径鋼管杭の載荷試験（その2），第53回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1293-1294.

記号表

- A_p ：杭先端の断面積
 c ：粘性土の非排水せん断強さ
 C_f ：ハイリー式の補正係数
 D ：杭径
 e_f ：ハンマー効率
 E_t ：伝達エネルギー
 F ：打撃エネルギー（入力エネルギー）
 K ：リバウンド量
 L ：杭長
 N ：地盤のN値
 N_1 ：杭先端付近の地盤のN値

\bar{N}_2 : 杭先端から4D上方までの範囲のN値の平均値
 r_f : 周面抵抗力度
 R_p : 先端抵抗力
 R_t : 杭頭抵抗力
 R_{th} : ハイリー式による杭頭抵抗力の推定値
 R_{ti} : 施工時の衝撃載荷試験で得られた杭頭抵抗力
 R_{tp} : ハイリー式の補正式による杭頭抵抗力の推定値
 R_T : 衝撃載荷試験で計測される全抵抗
 S : 貫入量
 S_0 : 杭頭変位
 S_r : ハイリー式の補正係数
 S_t : セットアップ率
 t : 板厚
 T_r : 相対載荷時間
 η : 閉塞率

港湾空港技術研究所資料 No.1374

2020.9

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 © (2020) 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。