

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1363**      November 2019

二軸同軸式アースオーガーで岩に根入れし  
セメントミルク注入を行った杭の軸方向抵抗特性

水谷 崇亮・児島 正明・村上 和之・右田 宏文  
丸山 晴広・橋本 洋之・石田 毅史

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. EAC工法 .....	4
2.1 EAC工法の概要 .....	4
2.2 EAC工法の施工手順 .....	4
3. A港における急速載荷試験 .....	5
3.1 試験条件 .....	5
3.2 試験結果 .....	7
4. B港における衝撃載荷試験 .....	8
4.1 試験条件 .....	8
4.2 試験結果 .....	10
5. C港における衝撃載荷試験 .....	10
5.1 試験条件 .....	10
5.2 試験結果 .....	12
6. 3港で実施した試験結果の比較 .....	12
6.1 先端抵抗力 .....	12
6.2 周面抵抗力度 .....	13
7. おわりに .....	13
謝辞 .....	14
参考文献 .....	14

# **Axial Resistance of Steel Pipe Piles Installed and Cemented to Bedrock by Piling Rig with Twin Coaxial Rotary Head**

**Takaaki MIZUTANI\***

**Masaaki KOJIMA\*\***

**Kazuyuki MURAKAMI\*\***

**Hirofumi MIGITA\*\*\***

**Haruhiro MARUYAMA\*\*\*\***

**Hiroyuki HASHIMOTO\*\*\*\***

**Takefumi ISHIDA\*\*\*\***

## **Synopsis**

When constructing a pile foundation under the condition that a thin soft layer is present on the support layer, the shaft resistance of the pile is insufficient because the embedded depth is not enough, and as a result, the pile is designed to be deeply put into the support layer and it affects the workability and economy. In particular, when the support layer is a rigid ground such as soft rock or rock, it is very difficult to install the pile deep into the support layer. In order to cope with such a situation, there are cases where a pile construction method is adopted in which a steel pipe pile is inserted deep into the support layer using a high drilling power piling rig with twin coaxial rotary head, and then cement slurry is injected to fix the pile to the support layer (hereinafter referred to as EAC method). This paper introduces the outline of EAC method and the results of loading tests of piles constructed by EAC method.

In loading tests of piles constructed by the EAC method conducted in the Kyushu region, greater axial resistance was exhibited in any of the tests than previously assumed. In the loading tests, it was not possible to load until the stage of confirming the ultimate resistance, so the base resistance of the piles was slightly smaller compared to the estimation formula of other pile construction methods. In contrast, it was confirmed that the shaft resistance per unit area of the range where the piles were cemented was slightly larger than the estimation formula and the measurement results of that of piles constructed by other methods. Although it is difficult to suggest an estimation formula for the axial resistance of a pile constructed by the EAC method only with the test results this time, the details of the construction method and load test results shown in this paper will be helpful for the construction of similar piles in the future.

**Key Words:** Pile, Axial resistance, Piling rig with twin coaxial rotary head, Cement grouting,  
Pile load test

---

\* Head, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department, Port and Airport Research Institute  
\*\* Nagasaki Port and Airport Office, Kyushu Regional Development Bureau  
\*\*\* Hakata Port and Airport Office, Kyushu Regional Development Bureau  
\*\*\*\* Shimonoseki Research and Engineering Office for Port and Airport, Kyushu Regional Development Bureau  
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

# 二軸同軸式アースオーガーで岩に根入れし セメントミルク注入を行った鋼管杭の軸方向抵抗特性

水谷 崇亮\*・児島 正明\*\*・村上 和之\*\*・右田 宏文\*\*\*  
丸山 晴広\*\*\*\*・橋本 洋之\*\*\*\*・石田 毅史\*\*\*\*

## 要 旨

支持層の上に中途半端な厚さの軟弱層が存在する条件下で杭基礎を構築する場合、支持層までの深さが十分でないため杭の周面抵抗力が不足し、その結果、杭を支持層に深く根入れする設計となって施工性・経済性に影響する。特に、支持層が軟岩や岩などの強固な地盤である場合、杭を支持層に深く根入れすることは非常に大きな施工上の困難を伴う。このような状況への対応として、掘削力の高い二軸同軸式アースオーガーを用いて鋼管杭を支持層深くまで根入れし、その後にセメントミルク注入を行うことで杭を支持層に定着させて高い周面抵抗力を確保する工法（以下、EAC工法という）が採用される場合がある。本稿では、EAC工法の概要及びEAC工法で施工された杭の載荷試験の結果を紹介する。

近年、九州地方で実施されたEAC工法により施工した杭の載荷試験では、いずれの試験でも事前の想定以上に大きな軸方向抵抗力が発揮された。載荷試験では極限抵抗を確認する段階まで載荷することはできなかったため、杭の先端抵抗力は他工法の推定式と比較するとやや小さいものとなったが、セメントミルク注入を行った範囲の周面抵抗力度については、他工法で施工した杭の周面抵抗力度の推定式や実測結果よりもやや大きな値を示していることが確認できた。

今回の試験結果のみではEAC工法で施工した杭の軸方向抵抗力の推定式を作成することは困難であるが、本稿で示した施工法及び載荷試験結果の詳細は、今後同種の杭の施工法を採用する際におおいに参考になるものと考えている。

**キーワード**：杭，軸方向抵抗力，二軸同軸式アースオーガー，セメントミルク注入，杭の載荷試験

---

\* 地盤研究領域基礎工研究グループ長  
\*\* 九州地方整備局長崎港湾・空港整備事務所  
\*\*\* 九州地方整備局博多港湾・空港整備事務所  
\*\*\*\* 九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 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

港湾の施設の構造形式を選定する際、支持層が浅ければ重力式構造物等の直接基礎構造が有利になるケースが多い。一方、支持層が深い場合には、栈橋等の杭基礎構造を選択するのが一般的である。しかしながら、支持層の上に中途半端な厚さの軟弱層が存在する場合、構造形式の選定が非常に困難となる。このような場合、直接基礎とするには軟弱層が厚すぎて大規模な地盤改良を要することとなり、施工性・経済性が悪化する。一方、杭基礎とするには、支持層までの深さが十分でないため杭の周面抵抗力が不足し、その結果、杭を支持層に深く根入れする設計となって施工性・経済性に影響する。特に、支持層が軟岩や岩などの強固な地盤である場合、杭を支持層に深く根入れすることは非常に大きな施工上の困難を伴う。このような状況への対応として、掘削力の高い二軸同軸式アースオーガーを用いて鋼管杭を支持層深くまで根入れし、その後にセメントミルク注入を行うことで杭を支持層に定着させて高い周面抵抗力を確保する工法（以下、EAC工法という）が採用される場合がある。現時点では、EAC工法に適用可能な杭の軸方向抵抗力の推定式が確立されていないことから、EAC工法を採用する場合には載荷試験等により軸方向抵抗力を確認した後に施工を進める必要がある。

2016年から2018年にかけて、九州地方の2つの港湾（A港及びB港）で、EAC工法により比較的似通った構成の地盤に鋼管杭を施工し、急速載荷試験及び衝撃載荷試験を実施する機会に恵まれた。また、同じく九州地方のC港において、EAC工法と類似した工法による杭の施工及びその衝撃載荷試験が実施された。本稿では、EAC工法の概要を紹介するとともに各載荷試験の結果を詳述し、EAC工法で施工された杭の軸方向抵抗の特性についてとりまとめて報告する。なお、本稿で紹介するA港においてEAC工法で施工した杭の急速載荷試験については、その概要がすでに公表されている（永島田ら、2017）ので、本稿とあわせて参照されたい。

## 2. EAC工法

### 2.1 EAC工法の概要

本稿で対象としているEAC工法とは、二軸同軸式アースオーガーを用いて鋼管杭を地盤に貫入させた後、セメントミルクを注入することで杭を地盤に定着させる工法である。二軸同軸式アースオーガーは高い掘削力を有しており、支持層が強固な地盤であっても杭をある程度の深

さまで根入れすることが可能となる。また、セメントミルクを注入して杭を支持層に定着させることで、軟岩など自立性を有する支持層中においても高い周面抵抗力を期待することができる。

二軸同軸式アースオーガーとは、回転中心軸を共有する2つの回転機構を備えた施工機（基礎杭用の地盤削孔機）である。EAC工法では、二軸同軸式アースオーガーの2つの回転機構のうち、内側の回転機構にアースオーガーを、外側の回転機構に鋼管杭を接続する。アースオーガー先端にはセメントミルクの注入等に用いる孔が設けられている。また、鋼管杭の先端部には掘削ビットが、鋼管杭先端付近の内周面にはずれ止めが取り付けられている。杭の先端形状の例を写真-1に示す。

### 2.2 EAC工法の施工手順

EAC工法の施工手順の概略を図-1に示す。まず、アースオーガーと鋼管杭をそれぞれ接続した内・外2つの回転機構を同時に回転させることにより、地盤を掘削しながら杭を貫入していく（図-1 STEP 1）。このとき、内・外の回転機構が相互に反対の方向に回転することで、施工機に作用するトルクが打ち消される。さらに、掘削時の状況に応じて、アースオーガー先端の孔よりエアや水を噴出し、掘削・排土を補助することもできる。一般的な中掘り杭工法等に用いる施工機では杭内に建て込んだアースオーガーのみで地盤を掘削するのに対し、二軸同軸式アースオーガーでは杭内のアースオーガーに加え杭先端でも地盤を掘削することから、より高い掘削能力を発揮することが可能である。



写真-1 杭の先端形状の例

杭を所定の深度まで貫入させた後、セメントミルクの注入作業に移る。セメントミルクの水セメント比は65%程度、設計基準強度は20N/mm<sup>2</sup>程度である。まずアースオーガを逆回転させつつアースオーガー先端よりセメントミルクを注入しながら、杭ともども一定深度まで（数メートル）引き上げる（図-1 STEP 2）。その後、再度所定の杭先端深度まで掘削・杭貫入を行う（図-1 STEP 3）。この引上げ・再貫入の工程を行うことにより、セメントミルクと杭先端付近の地盤をしっかりと攪拌することができる。最後に、鋼管杭を施工機から切り離し、セメントミルクを注入しつつアースオーガーのみを引き上げる（図-1 STEP 4）。セメントミルクを所定の高さまで打ち上げたところで注入を止め、アースオーガーを引き抜いて施工完了となる（図-1 STEP 5）。

なお、実施工では、最初の（セメントミルク注入前の）杭貫入深度を設計深度より数センチメートル高くしておき、引上げ・再貫入後に設計深度に達する（最初の杭貫入深度より深い位置まで再貫入させる）よう施工管理を行った。これは、引上げ・再貫入時の掘削抵抗値（オーガの駆動電流値）の変化を観察し、杭先端が確実に支持層に到達していることを確認するための工夫である。また、セメントミルクの打ち上げ高さは、設計上必要な周面抵抗力が得られるようセメントミルクの注入範囲と必要量を事前に机上計算で求め、施工時には注入量を確認することにより管理する例が多いようである。

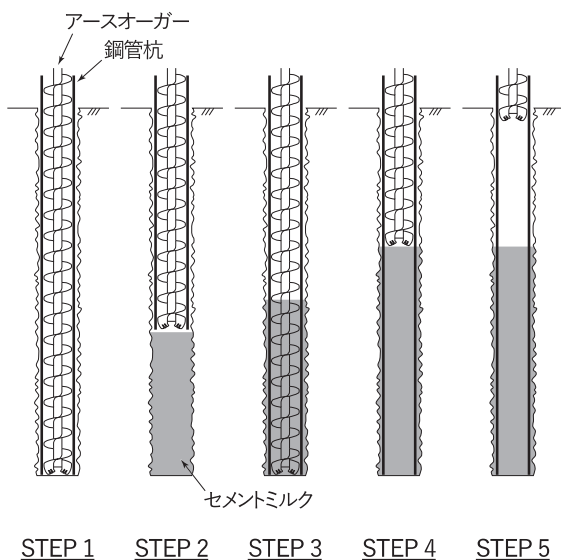


図-1 EAC工法の施工手順の概略

### 3. A港における急速載荷試験

#### 3.1 試験条件

A港ではジャケット式の栈橋の支持杭の施工にEAC工法を採用することとなり、急速載荷試験による軸方向抵抗力の確認を実施した。試験杭の施工位置近傍における土質調査により得られた土質柱状図を図-2に示す。土質調査の後、施工に先立ち周辺地盤の浚渫工事が行われており、試験杭施工時の地盤面（海底面）は標高-10.5mとなっている。地盤面から層厚2m程度の粘土、砂質粘土が存在し、その下に層厚1.5m程度の礫質砂、強風化礫岩の層をはさんで、標高-14.15m付近より風化岩の層が現れるという地盤構成である。なお、周辺で実施された他の土質調査結果等を考慮した結果、設計上の支持層の上端深度は標高-15.22mに設定されている。

試験杭の仕様を表-1に、杭先端部の形状（ビット及びずれ止めの配置）を図-3に示す。試験杭は、急速載荷試験の際に杭体に発生することが予想される応力に対して十分な耐力を持つように設計されている。

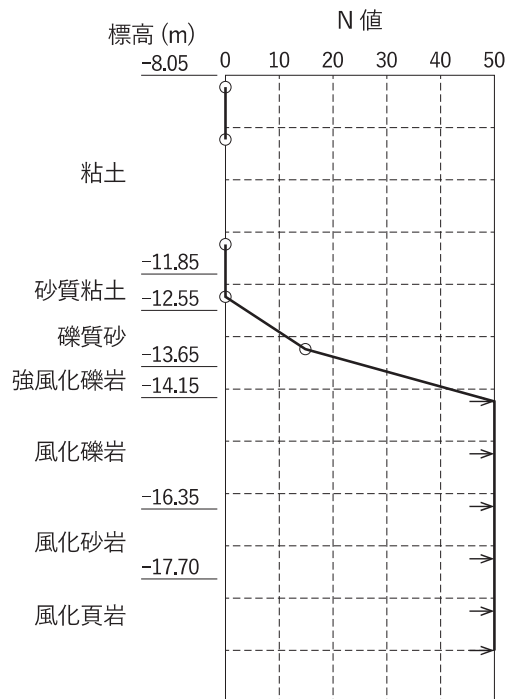


図-2 A港試験地近傍における土質調査結果

表-1 試験杭の諸元

杭径	杭長	継杭板厚, 杭長	規格
1100 mm	25.9 m	上杭：14mm, 10.3m 中杭：21mm, 11.6m 下杭：15mm, 4.0m	SKK490

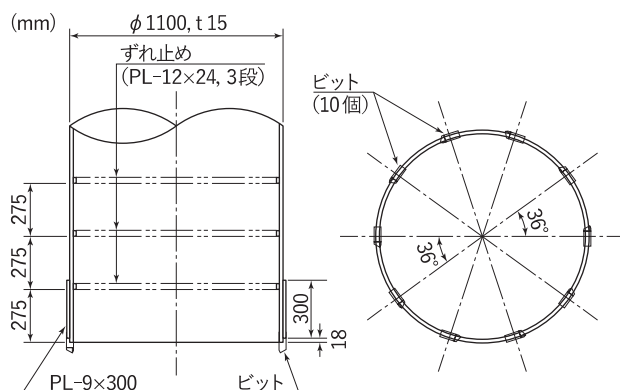


図-3 杭先端部の形状（ビット及びずれ止めの配置）

試験杭の施工手順は2章で述べたとおりである。施工記録によると、セメントミルク注入作業に移る前（図-1 STEP 1）の杭先端深度は標高-21.62m、セメントミルク注入作業における杭の引上げ量（図-1 STEP 2）は4.02m、再貫入後の杭先端深度（図-1 STEP 3）は標高-21.69mであった。注入作業にあたっては、杭先端から標高-15.22mまでの範囲を充填するのに必要なセメントミルクの量をあらかじめ算定し注入した。セメントミルクは海水練りを行っており、練り上がりのセメントミルクの比重は1.72、水セメント比は63.29%と報告されている。また、注入に用いたセメントミルクで別途作製した供試体の圧縮強度は、養生7日で17.9N/mm<sup>2</sup>、養生28日で30.1N/mm<sup>2</sup>（いずれも供試体3本の平均値）であった。

急速荷重試験は試験杭施工の1ヶ月後（養生日数30日）に、地盤工学会基準JGS1815-2002（地盤工学会，2002）に準拠して実施した。荷重する最大の荷重は12000kNを目安とした。これは、栈橋の設計において杭に作用すると想定されている軸力に安全係数を考慮した値である。試験は重錘落下方式で実施した。試験に用いるクッション材は、32tonの重錘を最大3.0mから落下させたときに相対荷重時間11.6で14000kNの荷重を荷重できるように計画した。試験は、重錘の落下高さを0.6m、1.2m、1.8m、2.1mと変化させ、計4回実施した。試験杭には図-4に示す位置に加速度計とひずみ計を設置して計測を行った。計測断面は杭頭部、中間の礫質砂層の上端部（断面2）及び下端部（断面3）、杭先端部（断面4）の合計4深度である。こ

のうち、杭頭部についてはひずみ計と加速度計を各2個、円周上の相対する2箇所に取り付けている。断面2～4については、ひずみ計は杭頭と同様に2個、加速度は片側の1個のみ取り付けた。写真-2に急速荷重試験の実施状況を示す。

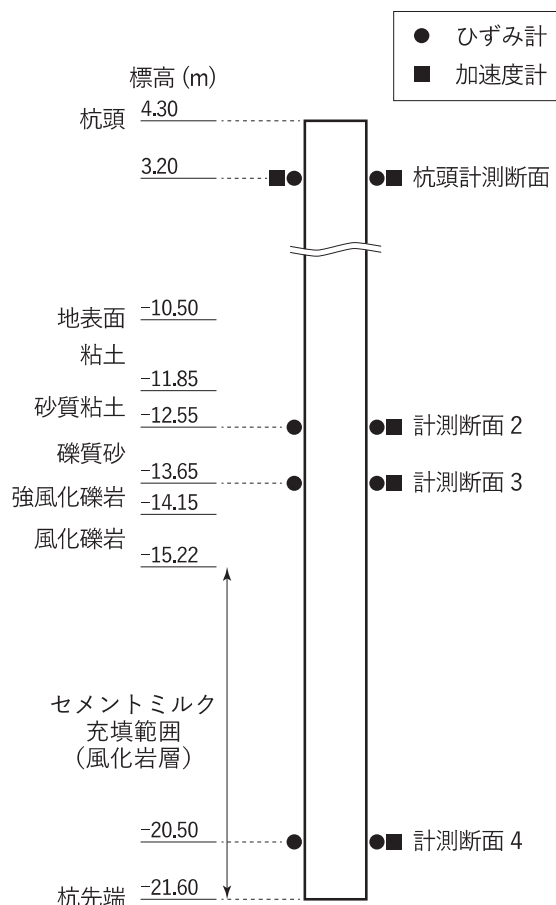


図-4 センサー取付け深度（鋼管杭内周面側に取付け）

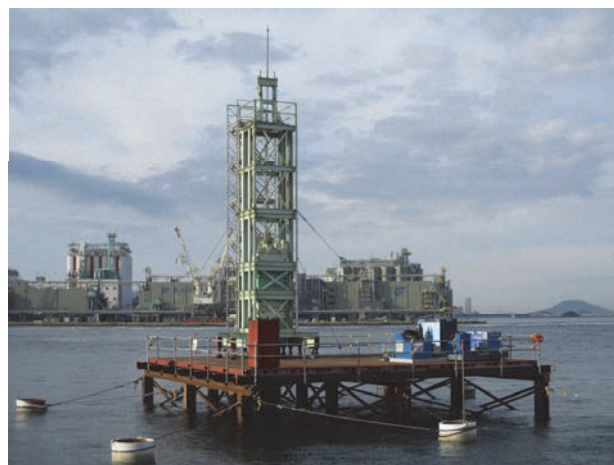


写真-2 急速荷重試験の実施状況

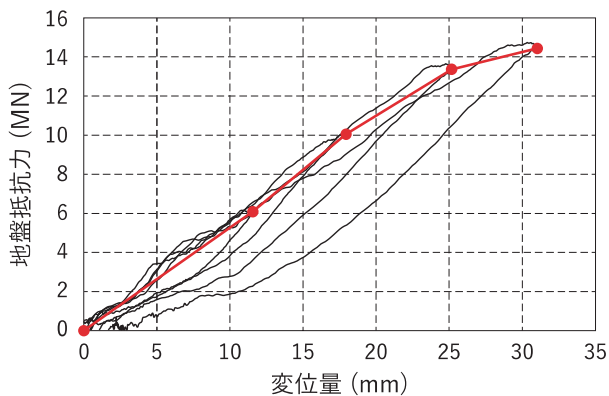


図-5 杭頭における地盤抵抗力と杭の変位の関係

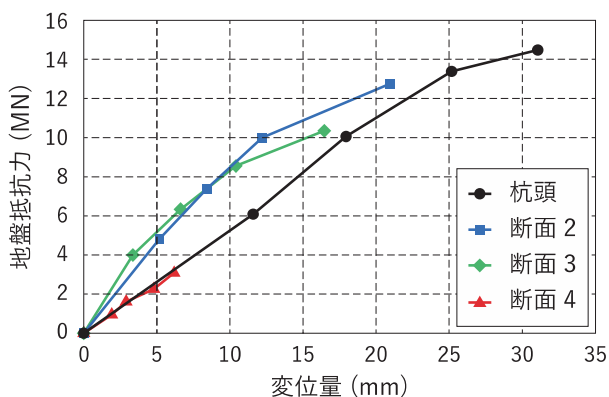


図-6 各計測断面における地盤抵抗力と変位の関係

### 3.2 試験結果

計測データの例として、図-5に杭頭部における地盤抵抗力と杭の変位の関係を示す。図-5には各载荷段階の除荷点を赤丸で示している。地盤抵抗力、除荷点の求め方は地盤工学会基準・同解説に記載のとおりである。図-5に示した除荷点より、杭頭部における最大の地盤抵抗力は、落下高さ2.1mのときに14467kNと求められた。この値は载荷試験の目標とした最大荷重12000kNを大きく超えるもので、施工された杭が十分な軸方向抵抗力を有することを確認できた。なお、試験の前後に杭頭で計測された杭頭高さは変化しておらず、試験による杭の残留変位はゼロであった。

他の計測断面（図-4参照）で計測したデータに対しても同様に除荷点を求め、地盤抵抗力と変位の関係を整理すると図-6のようになる。図-6からも分かりますとおり、杭先端部の標高-20.5mの計測断面（断面4）では、最大変位が6.1mm、地盤抵抗力が3071kNにとどまっている。先述のとおり、杭に残留変位が生じていないことから、今回の

载荷試験では試験杭の抵抗力に対して十分な荷重を载荷することができておらず、そのために杭先端部での地盤抵抗力（杭の先端抵抗力に相当）の計測値が小さくなったものと考えられる。载荷試験の際にさらに大きな荷重を作用させることができていれば、より大きな先端抵抗力が得られた可能性がある。

図-6に示した各計測断面における地盤抵抗力（＝その深度において杭に作用している軸力）を深さ方向に整理したものを図-7に示す。杭の自由長部分（気中・海中部）では周面抵抗力は作用しないと考えられることから、杭頭から現地盤面（標高-10.5m）までは鉛直な直線（深さ方向に対する地盤抵抗力の変化がゼロ）とし、現地盤面以深で傾きを持つようにデータを結んでいる。図-7の地盤抵抗力の直線の傾き（深さに対する軸力の変化率）は、その区間における周面抵抗力の大きさに対応していると考えられる。図-7の直線の傾きに基づいて計算した各区間の周面抵抗力度（杭の単位表面積あたりの周面抵抗力）を図-8に示す。

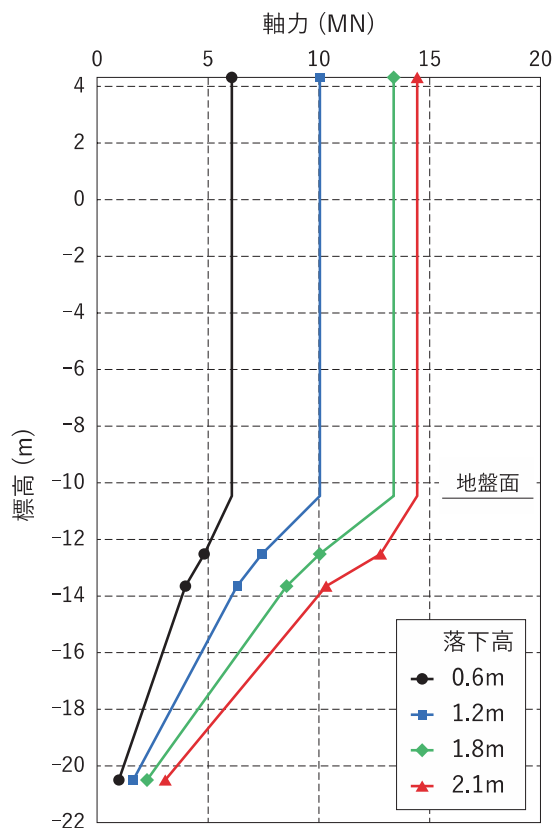


図-7 地盤抵抗力の深さ方向分布



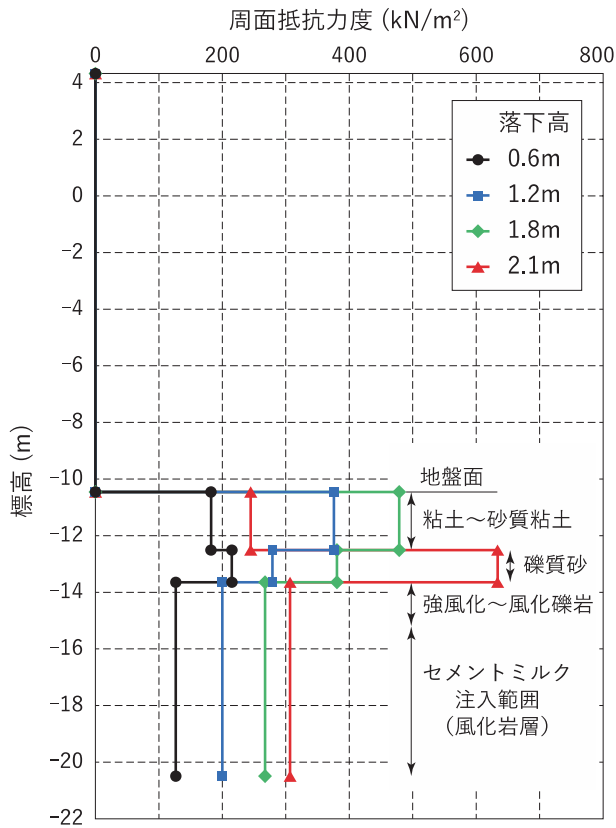


図-8 周面抵抗力度の深さ方向分布

現地盤面付近の粘性土層では、重錘の落下高さが1.8mのときに周面抵抗力度が最大となり約470kN/m<sup>2</sup>を記録している。その後、落下高さ2.1mのときには周面抵抗力度が約240kN/m<sup>2</sup>となり、ほぼ半減した。一方、標高-12.5m以深では、落下高さ2.1mのときに最大値を記録しており、礫質土層部分(断面2～断面3)で約630kN/m<sup>2</sup>、風化岩及びセメントミルク注入範囲(断面3～断面4)で約300kN/m<sup>2</sup>である。これらの深度では、周面抵抗力度は重錘の落下高さとともに増加を続けていることから、載荷試験の際により大きな荷重を載荷することができていれば、さらに大きな周面抵抗力度が発揮された可能性がある。

#### 4. B港における衝撃載荷試験

##### 4.1 試験条件

B港ではジャケット式の栈橋の支持杭にEAC工法を採用することとなった。当該栈橋の設計に着手する際にはA港での急速載荷試験の結果を参照することができたが、地盤条件や杭諸元等が完全に一致するものではないので、実施工に際して確認試験として衝撃載荷試験を実施する

ことになった。試験杭の施工位置近傍における土質調査により得られた土質柱状図を図-9に示す。図-9からわかるとおり、表層には層厚約12mの粘土が堆積しており、その下に層厚1.5m程度の砂礫層をはさんで、標高-20.75m付近から風化岩が現れるという地層構成である。ただし、施設の計画水深が-12mとなっているため、施工に先立ち表層の粘土層が4～5m浚渫される。従って、施設の設計上、考慮できる粘土層厚は7m程度ということになる。

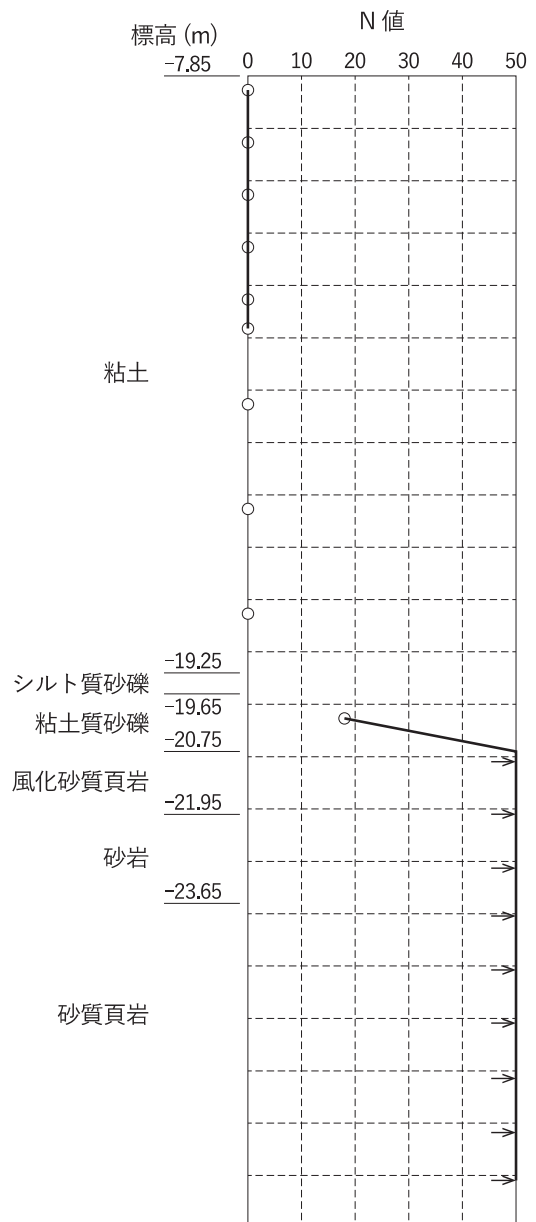


図-9 B港試験地近傍における土質調査結果

試験杭の施工位置は土質調査地点よりも既設の岸壁に近い地点で、地盤高は標高-10.29mとなっている他、風化砂質頁岩層の上面付近（標高-20.75m付近）まで雑石（無規格）に置換されている。試験杭の施工にあたっては、まずこの雑石を二軸同軸式アースオーガー（外側：ケーシング、内側：アースオーガー）を用いて先行削孔（削孔径1500mm）し、ケーシング下端が-20.75mに達したところでアースオーガーだけを引き抜くことでケーシング内に残る破碎した雑石を除去した。その後、ケーシング内にクラッシャラン（C-40）を落とし込んでケーシングを引抜くことで、雑石層を置換している。

試験杭の仕様を表-2に、杭先端部の形状（ビット及びずれ止めの配置）を図-10に示す。試験杭の仕様は、衝撃载荷試験の際に杭体に発生する応力に対して十分な耐力を有するように選定されている。

試験杭の施工手順は2章で述べたとおりである。施工記録によると、セメントミルク注入作業に移る前（図-1 STEP 1）の杭先端深度は標高-28.45m、セメントミルク注入作業における杭の引上げ量（図-1 STEP 2）は7.70m、再貫入後の杭の杭先端深度（図-1 STEP 3）は標高-28.517mであった。注入作業にあたっては、杭先端から標高-20.75mまでの範囲を充填するのに必要なセメントミルクの量をあらかじめ算定し注入した。セメントミルクは海水練りを行っており、練り上がりのセメントミルクの比重は1.70、水セメント比は65.15%と報告されている。また、セメントミルクで作製した供試体の圧縮強度は、養生7日で20.9N/mm<sup>2</sup>、養生28日で25.7N/mm<sup>2</sup>（いずれも供試体3本の平均値）であった。

衝撃载荷試験は試験杭施工の1ヶ月後（養生日数31日）に、地盤工学会基準JGS1816-2002（地盤工学会，2002）に準拠して実施した。目標とする最大荷重（静的成分）は7500kNを目安とした。これは、栈橋の設計において杭に作用すると想定される軸力に安全係数を考慮した値である。打撃装置としては、IHC社製の油圧ハンマーS-200を用いた。試験では、打撃中の杭体の軸ひずみと加速度を杭頭部で計測した。センサーはひずみ計と加速度を一組とし、杭頭の端部から1m下がった位置で軸対称となる2点にそれぞれ一組ずつ、杭の外周面に取付けた。試験終了後、PDI社の解析プログラムCAPWAPにより波形マッチング解析を行い、周面抵抗力と先端抵抗力を分離して求めた。解析時の地盤抵抗モデルとしてはSmithのモデルを採用した。これらの解析方法は、実務において衝撃载荷試験を実施した際に一般的に採用されるものであると考えられる。センサーの取付け状況を写真-3に、衝撃载荷試験の実施状況を写真-4に示す。

表-2 試験杭の諸元

杭径	杭長	板厚	規格
1000 mm	32.0 m	16 mm	SKK490

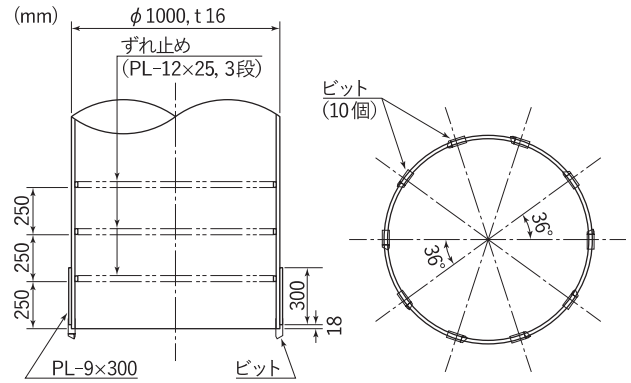


図-10 杭先端部の形状（ビット及びずれ止めの配置）

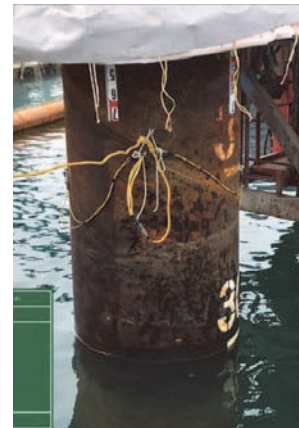


写真-3 センサーの取付け状況



写真-4 衝撃载荷試験の実施状況

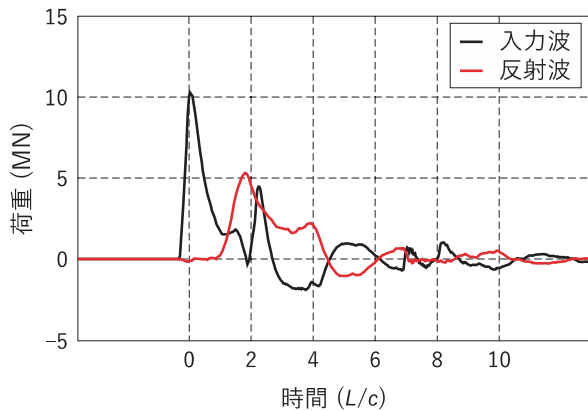


図-11 計測された入力波，反射波の時刻歴

## 4.2 試験結果

図-11に衝撃載荷試験で計測された入力波と反射波の時刻歴を示す。図-11より計測された反射波は時間 $2L/c$  ( $L$ は杭長， $c$ は応力波の伝播速度であり， $2L/c$ は杭頭の打撃により生じた応力波が杭先端で反射し杭頭に戻ってくるまでに要する時間に相当する)において正の値(圧縮力)となっていることがわかる。これは杭先端において応力波が固定端反射したことを意味しており，打撃に用いたハンマーの能力不足により杭先端が地盤に押し込みきれていない状態であることを表している。つまり，今回の衝撃載荷試験において，杭の先端抵抗力は十分には発揮されておらず，試験で求められた値は過小な値となっていると判断される。波形マッチング解析の結果得られた先端抵抗力は1256kN，周面抵抗力は6938kNであった。先端抵抗力と周面抵抗力を合計すると8193kNとなり，載荷試験の目標とした最大荷重7500kNを大きく上回る軸方向抵抗力が確認できた。

一方，杭頭で計測した残留変位(予備打ち等を含めた17回の杭打撃前後の杭頭標高差)は141mmであった。先述のとおり，今回の衝撃載荷試験ではハンマーの能力不足により，杭先端が地盤に押し込まれるのに十分な荷重を加えることができていない。従って，本来であれば，載荷試験による杭の残留変位はほとんど生じないはずである。それにもかかわらず，今回の衝撃載荷試験で141mmという比較的大きな残留変位が観測された理由は現時点では不明であるが，原因の1つとして以下のような挙動が考えられる。

衝撃載荷試験ではハンマー打撃により載荷重を作用させるため，試験中には静的な荷重に加えて動的な荷重(衝撃荷重)が作用する。波形マッチング解析の結果による

と，今回の試験では動的な荷重として6500kNが作用しており，先述の8193kN(静的な荷重に対応して得られる杭の軸方向抵抗力)と合算すると実際には14600kN程度の打撃力が杭に作用していたことになる。また，試験では，予備打ちを含め17回のハンマー打撃が行われている(一般に油圧ハンマーの起動時にいきなり大きなエネルギーで杭を打撃することは困難であり，試験前後に複数回の打撃が行われる)。この間に杭頭に加えられた打撃力により，杭先端部の掘削孔底にわずかに残ったスライム等を含むセメントモルタルの弱層に杭が貫入したり，杭先端部に取り付けたビット(杭先端からの突出長は60mm程度)が原地盤(岩盤層)に食い込んだり，あるいはビット本体や取付け部が破損するなどして，杭が打ち下げられた可能性がある。また，打撃回数が増えると，杭と周辺地盤の付着が切れはじめ，それまで周面抵抗力で支えられていた荷重が急に杭先端まで伝達されるようになる。試験結果によると本試験杭は非常に大きな周面抵抗力を有していたため，打撃回数が増え杭周面の付着が切れることにより，杭先端に急激に大きな衝撃荷重が作用し，杭の打ち下がりをも助長した可能性も考えられる。

なお，このような挙動は杭に衝撃力を作用させる衝撃載荷試験の特性により生じたものである。載荷試験の結果としては十分な軸方向抵抗力(静的成分)が確認されていることから，供用時の杭の支持力特性に問題が生じることはないと判断される。

波形マッチング解析により得られた周面抵抗力度の深度方向分布を図-12に示す。セメントミルクの注入範囲(標高-21m以深)で170kN/m<sup>2</sup>を超える非常に大きな周面抵抗力度が得られていることが確認できる。一方，雑石をC-40に置換した範囲では深さ方向に周面抵抗力度が大きくなる傾向を示している。また，周面抵抗力度の値の幅は20~170kN/m<sup>2</sup>程度と，同一層内の周面抵抗力度としては非常に幅広い値を示す結果となった。置換の際に締め固めを行うなどの特殊な施工を行っていないため，置換した後のC-40は比較的緩くまた不均質に堆積していることなどが影響した可能性がある。

## 5. C港における衝撃載荷試験

### 5.1 試験条件

C港では係留ドルフィンの支持杭にEAC工法に類似した工法を採用することになり，施工段階での確認試験として衝撃載荷試験が実施された。試験杭の施工位置近傍における土質調査により得られた土質柱状図を図-13に示す。地表面には1m程度の砂質土，礫質土が堆積しており，

その下に層厚4m程度の強風化岩層をはさんで、標高-11.70m付近より弱風化凝灰角礫岩が現れるという地盤構成である。なお、土質調査後に当該地の浚渫工が実施されており、試験杭打設時点の地盤面（海底面）は標高-12.5mであった。

試験杭の仕様を表-3に示す。試験杭は衝撃载荷試験の際に杭体に生じる応力に対して十分な耐力を有するように設計されている。

C港で用いられた工法は、EAC工法と同様に二軸同軸式アースオーガーを用いるものではあるが、その手順は少し異なっている。当初、EAC工法のように、先端にビットを取り付けた杭とアースオーガーをセットして地盤を掘削しながら杭の貫入を進めていたが、杭先端深度が標高-16m付近に達したところで掘削・貫入が困難となった。この深度以深の弱風化凝灰角礫岩が想定よりも堅く、掘削能力が不足したものと考えられる。そこで、杭とアースオーガーを一旦引き上げ、杭に変えてケーシングパイプを装着して掘削を再開した。使用したケーシングパイプは、杭と同径で板厚が25mmの鋼管で、一般的なオールケーシング工法の際に用いるのと同様のものである。ケーシングパイプとアースオーガーにより標高-20mまで掘削を行った後、ケーシングパイプを杭に交換して最終の杭先端深度である標高-22.4mまで掘削・杭貫入を行った。

次に、水中ポンプにより、排出される泥水の比重が1.08以下となるまで鋼管杭内の水替えを行った。これはケーシングパイプを用いた掘削により生じた細粒分等が、杭下端部にスライム状に堆積して杭の軸方向抵抗性能を悪化させることを防ぐ目的で行ったものである。スライム処理を行った後、杭先端を2~3m程度上昇させ（正確な高さ管理は行っていない）、その状態でセメントミルクの注入を行った。当初は、杭を支持層となる弱風化凝灰角礫岩層の上端付近まで引き抜いてセメントミルク注入を行う（EAC工法に近い手順）ことを計画していたが、施工時の状況から孔壁の崩壊等が懸念されたため、杭先端を数メートル上げるにとどめたものである。セメントミルク注入時には、標高-12.5m（ほぼ海底面）から杭先端までの範囲を充填するのに必要なセメントミルクの量をあらかじめ算出し、その必要量を注入するという施工管理を行った。

また、EAC工法では杭先端付近の内周面にずれ止めを設けることとしているが、C港で用いた杭にはずれ止めは設けられていない。一方、杭先端部のビット及び先端補強バンドはA港、B港と同様な配置で取り付けられている。

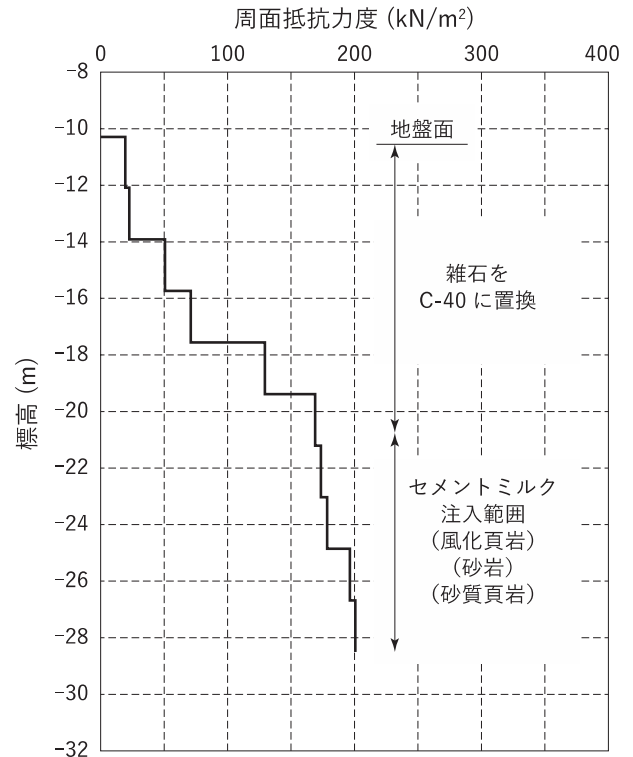


図-12 周面抵抗力度の深度方向分布

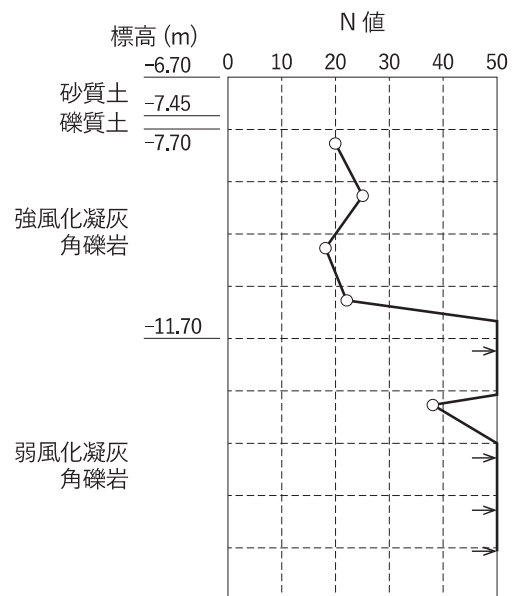


図-13 C港試験地近傍の土質調査結果

表-3 試験杭の諸元

杭径	杭長	継杭板厚, 杭長	規格
1200 mm	27 m	上杭: 19 mm, 24 m 下杭: 14 mm, 3 m	SKK490

衝撃载荷試験は試験杭施工の19日後に、地盤工学会基準JGS1816-2002（地盤工学会，2002）に準拠して実施した。目標とする最大荷重（静的成分）は7875kNを目安とした。これは、ドルフィン設計において杭に作用すると想定される軸力に安全係数を考慮した値である。打撃装置としては、IHC社製の油圧ハンマーS-280を用いた。

試験では、打撃中の杭体の軸ひずみと加速度を杭頭部で計測した。センサーは、ひずみ計と加速度を一組とし、杭頭の端部から1.8m下がった位置で軸対称となる2点の杭外周面にそれぞれ一組ずつ取り付け付けた。試験終了後、B港の場合と同様な方法による波形マッチング解析を行い、周面抵抗力と先端抵抗力を分離して求めた。

## 5.2 試験結果

図-14に計測された入力波と反射波の時刻歴を示す。図より反射波は時間 $2L/c$ において正の値（圧縮力）となっていることがわかる。B港における衝撃载荷試験と同様に、打撃に用いたハンマーの能力不足により杭先端まで十分に押し込みきれておらず、先端抵抗は十分には発揮されていない（試験で求められた値は過小な値となっている）と判断される。波形マッチング解析の結果得られた先端抵抗力は1279kN、周面抵抗力は1162kN、合計すると12902kNとなり、目標とした最大荷重7875kNを大きく上回る結果となった。また、試験時に生じた杭の貫入量は5mmであった。

波形マッチング解析により得られた周面抵抗力の深度方向分布を図-15に示す。C港の試験杭の場合、地中部の全長にわたりセメントミルクを注入していることもあり、全深度において $100\text{kN/m}^2$ を超える大きな周面抵抗力が得られていることがわかる。さらに、周面抵抗力が深度方向に増加する傾向が見受けられる。この原因としては、原地盤の凝灰角礫岩層の風化の度合いが深度方向に異なる可能性があることや、杭をあまり持ち上げずにセメントミルクを充填したために充填状況が深度方向に異なる可能性があることなどが挙げられる。

## 6. 3港で実施した試験結果の比較

### 6.1 先端抵抗力

3港で得られた先端抵抗力は、A港（杭径1100mm）で3071kN、B港（杭径1000mm）で1256kN、C港（杭径1200mm）で1279kNであった。すでに述べたとおり、いずれも杭先端を十分に押し込みきれていない（载荷試験時の载荷重の不足）状態で計測された値であるため、実際にはさらに大きな先端抵抗力が発揮されるものと考えられるが、

参考のため、他の工法における先端抵抗力と比較すると以下のようなものである。

完成時の杭先端部の状況がEAC工法に似ている工法として、CJV工法（上菌ら，2002）や大径杭型のRSプラス工法（水谷ら，2014）、場所打ち杭工法（日本道路協会，2017）などが挙げられる。いずれの工法においても、杭の先端抵抗力の推定式が $aN_p$ （ $a$ ：定数、 $N$ ：杭先端付近の地盤のN値、 $A_p$ ：杭先端の断面積）の形で表されているので、3港の試験結果もこれに合わせて整理し比較すると表-4のようになる。

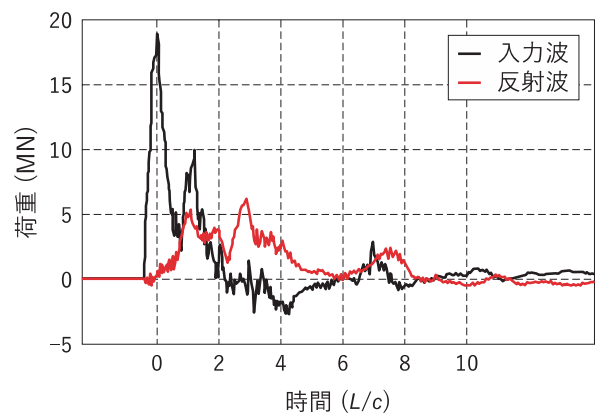


図-14 計測された入力波、反射波の時刻歴

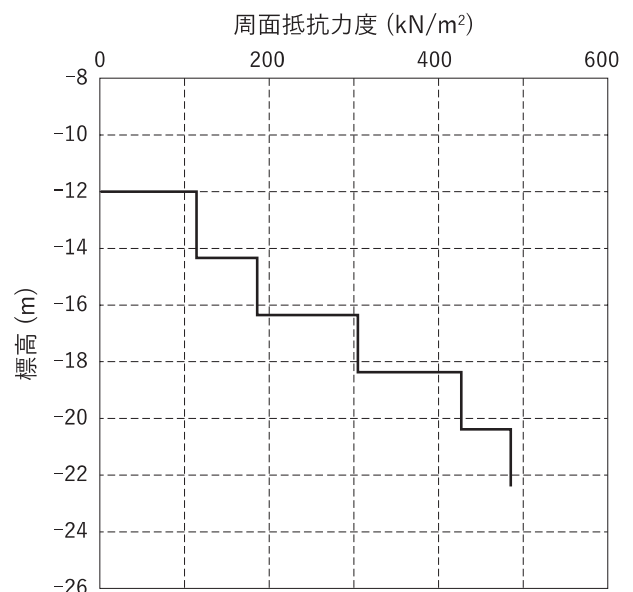


図-15 周面抵抗力の深度方向分布

再三述べているとおり、3港で得られた先端抵抗力が過小評価されていることは明らかであり、またそもそも異なる施工法で対象としている原地盤の種別も異なるため、表-4中の値の直接比較には意味が無いが、3港で得られた先端抵抗力は他工法の値よりも小さいことが確認できる。しかしながら、3港の中で最も大きな値を示したA港の先端抵抗力を参考とすると、少なくとも他工法で杭を施工した場合の半分程度の先端抵抗力は確実に得られていると推定される。

なお、各工法の詳細や推定式の適用範囲等の諸条件については、参考文献等で十分に確認願いたい。表-4に示した値はあくまでも参考のためのもので、同条件で厳密に比較することを目的としたものではない。

表-4 先端抵抗力の比較

港/工法	先端抵抗力 (kN)	原地盤
A港 (実測値)	64 $N_p$	風化砂質頁岩
B港 (実測値)	32 $N_p$	砂質頁岩
C港 (実測値)	22 $N_p$	弱風化凝灰角礫岩
CJV工法 (推定式)	100 $N_p$	砂質土
RSプラス工法 (推定式)	150 $N_p$	砂質土
場所打ち杭工法 (推定式)	110 $N_p$ 160 $N_p$	砂・粘土 砂礫

$N$ : 原地盤のN値

表-5 周面抵抗力度の比較

港/工法	周面抵抗力度 (kN/m <sup>2</sup> )	原地盤
A港 (実測値)	309	風化砂質頁岩
B港 (実測値)	173~200	砂質頁岩
C港 (実測値)	113~484	弱風化凝灰角礫岩
CJV工法 (上菌ら) (実測値)	92~137 67	砂質土 粘土
CJV工法 (南ら) (実測値)	199.9	細砂
RSプラス工法 (推定式)	$5N \leq 200$ $10N \text{ or } c \leq 150$	砂質土 粘性土
場所打ち杭工法 (推定式)	$5N \leq 120$ $5N \text{ or } c \leq 100$	砂質土 粘性土

$N$ : 原地盤のN値,  $c$ : 原地盤の非排水せん断強度

## 6.2 周面抵抗力度

3港で得られたセメントミルク注入範囲の周面抵抗力度は、A港では309kN/m<sup>2</sup>、B港では173~200kN/m<sup>2</sup>、C港では113~484kN/m<sup>2</sup>であった。先端抵抗力の場合と同様に、他工法と比較すると表-5のとおりである。CJV工法については推定式が示されていないため、参考として上菌ら(2002)及び南ら(2015)で報告されている実測値を記載した。

原地盤や施工方法等の条件が異なるため、表-5中の各値を直接比較することによりあまり意味はないが、3港で得られたセメントミルク注入範囲の周面抵抗力度は他工法の事例と比較してやや大きな値となっていることが確認できる。

なお、各工法の詳細や実測値の計測状況、推定式の適用範囲等の諸条件については、参考文献等で十分に確認願いたい。表-5に示した値はあくまでも参考のためのもので、同条件で厳密に比較することを目的としたものではない。

## 7. おわりに

二軸同軸式アースオーガーを用いて鋼管杭を地盤に貫入させた後、セメントミルクを注入することで杭を地盤に定着させるEAC工法について、工法の概要と九州地方の2つの港湾で載荷試験を行った結果を紹介した。また、同じく九州地方で類似した工法により施工された杭の載荷試験結果を紹介した。あわせて、これらの試験結果と他工法における先端抵抗力、周面抵抗力度の推定式等と比較した。

紹介した3港の試験では、いずれの試験でも事前の想定以上に大きな軸方向抵抗力が発揮されることが確認された。しかしながら、事前の期待以上の軸方向抵抗力であったがために、載荷試験では極限抵抗力を確認する段階まで載荷することができなかった。そのため、3港で得られた杭の先端抵抗力は他工法の推定式と比較するとやや小さいものとなっている。一方、周面抵抗力度については、3港で得られた値が他工法の推定式や実測結果よりもやや大きな値を示していることが確認できた。

先述のとおり、今回の載荷試験では極限抵抗力を確認するところまで載荷できなかったため、これらの載荷試験結果をもってEAC工法で施工した杭の軸方向抵抗力の推定式を提案することは困難である。しかしながら、本稿で示した試験結果は、EAC工法の採用を検討する際の参考値とすることができると考えられる。

今後は、推定式の作成を目指して、極限抵抗力まで確

認できるような載荷試験を複数本実施することが望ましい。しかしながら、短期間のうちにそのような載荷試験を実施することは、現実的には難しい面もあるので、当面は本資料で報告したような各現場における載荷試験結果を集積し、EAC工法で施工した杭の軸方向抵抗力の参考値の精度を高めながら、設計を行う際の参考情報として活用していくことが重要である。そのような観点からも、本稿で示した施工法及び載荷試験の詳細は有用なものであると考えている。

(2019年8月9日受付)

## 謝辞

載荷試験の実施に御協力・御尽力頂いた関係各位、施工者、試験業者の皆様に感謝致します。

## 参考文献

- 上 藺晃・竹澤一彦・滝口要之助・高橋邦夫・山下久男・西村真二 (2002) : ジェットバ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 (VI-54), pp.15-29.
- 公益社団法人地盤工学会 (2002) : 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 第一回改訂版.
- 公益社団法人日本道路協会 (2017) : 道路橋示方書・同解説, IV 下部構造編.
- 永島田剛・楠山哲弘・平田正浩・日高和幸・保利修・村上和之・山口允人・水谷崇亮・小笠浩史・山下久男 (2017) : 博多港 (中央ふ頭地区) 岸壁 (-10m) 改良工事における二軸同軸アースオーガーセメントミルク注入工法杭の支持力性能について. 第52回地盤工学研究発表会発表講演集, 論文番号0636.
- 水谷崇亮・森川嘉之・菊池喜昭・森安俊介・武野正和・山下久男・中元靖英 (2014) : ウォータージェットとセメントミルクジェットを併用したバイプロハンマ工法の大径鋼管杭への適用. 港湾空港技術研究所報告, Vol.53, No.3, pp.3-40.
- 南靖彦・杉村佳寿・田邊貢一郎・伴孝宏・山田邦明・伊藤克浩・橘涼慈・石田道昭・水谷崇亮・山下久男 (2015) : 金沢港 (大野地区) 岸壁 (-13m) 下部築造工事における急速載荷試験での栈橋構造岸壁の支持力性能確認について. 第50回地盤工学研究発表会発表講演集, 論文番号0703.

港湾空港技術研究所資料 No.1363

2019. 11

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/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2019) 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。





古紙配合率70%再生紙を使用しています