

# 洪積粘性土層を支持層とする 大口徑鋼管杭の急速載荷試験

金子 祐一

関東地方整備局 京浜港湾事務所 沿岸防災対策室 (〒231-0001 神奈川県横浜市中区新港1-6-1)

横浜港本牧ふ頭地区では、横浜港国際海上コンテナターミナル再編整備事業の一環として、大型化するコンテナ船の入港や増加するコンテナ貨物の取り扱いに対応すべく、岸壁や荷さばき地の改良を行っている。岸壁の改良においては、洪積粘性土層（N値30~40程度の硬質シルト層）を支持層とする大口徑鋼管杭（ $\phi 1200\text{mm}$ ， $\phi 1300\text{mm}$ ）を150本打設する。大口徑鋼管杭の支持メカニズムは不明点も多いため、施工にあたり、杭の支持力特性の確認を目的として鉛直載荷試験（急速載荷試験，衝撃載荷試験）を実施した。本論文では、支持力確認のために用いた急速載荷試験により得られた結果について考察する。

キーワード 洪積粘性土層，大口徑鋼管杭，急速載荷試験，岸壁，コンテナターミナル

## 1. はじめに

国土交通省では、国際基幹航路の我が国港湾への寄港を維持・増大するため、大型化が進むコンテナ船の入港や増加するコンテナ貨物の取り扱いに対応したハード整備等を行う「国際コンテナ戦略港湾政策」を推進している。この政策に基づき、横浜港では2019年から図-1に示すとおり、新規ふ頭の整備や既存岸壁等の改良を含めた「横浜港国際海上コンテナターミナル再編整備事業」を進めている。

本牧ふ頭地区 D突堤の岸壁（以下、本岸壁）については、レベル2地震動の作用後、短期間のうちに船舶の利用および幹線貨物の荷役を行うことができる耐震強化岸壁として、図-2に示す断面図の通り、既存の改良岸壁に対して薬液注入工法等を用いた地盤改良と増杭打設を併用した耐震改良を実施している。



図-1 横浜港国際海上コンテナターミナル再編整備事業

## 2. 急速載荷試験の目的

### (1) 鋼管杭の打設工法

本岸壁の耐震改良として採用した方法の一つである増杭打設は、既設の岸壁直背後に新たに大型ガントリークレーンの基礎工として、大口徑鋼管杭（ $\phi 1200\text{mm}$ ， $\phi 1300\text{mm}$ ）を打設する方法である。また、本岸壁は過去に改良された岸壁であることから、既設岸壁構造のH形鋼杭等の地中障害物が残存していることが想定されていた。

そのため、地中障害物が残存する地盤において確実に施工する工法として実績の多い「先行削孔砂置換併用打撃工法（写真-1）」（以下、打撃工法）と「回転切削圧入工法（写真-2）」（以下、圧入工法）の採用を検討していた。

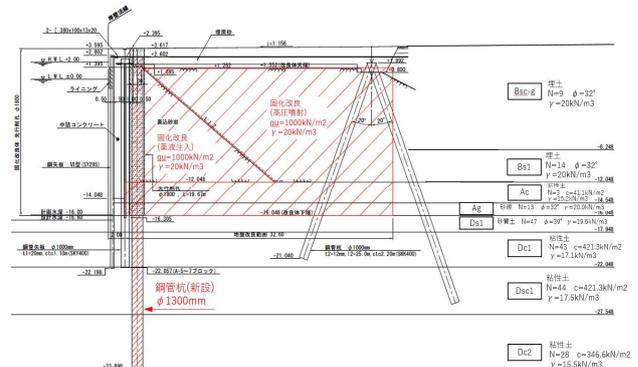


図-2 改良断面図（II区）



写真-1 先行削孔砂置換併用打撃工法の施工状況



写真-2 回転切削圧入工法の施工状況



図-3 試験位置

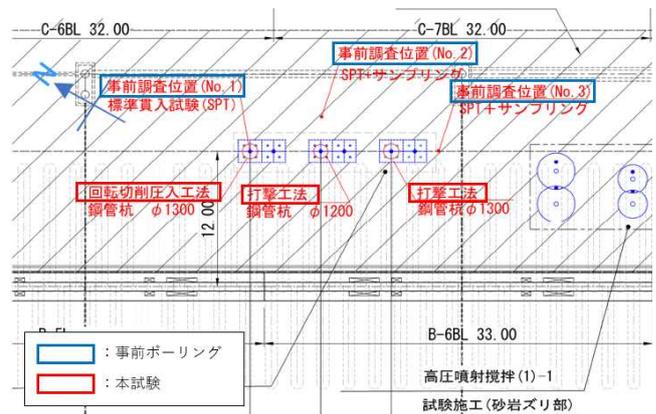


図-4 本試験と事前ボーリング調査の位置関係

## (2) 急速載荷試験の適用

本岸壁の耐震改良においては、杭径がφ1200mm、φ1300mmの大口径の鋼管杭を用いることとした。また、杭先端の支持層はD.L.-35.0m前後の深さに位置する洪積粘性土層(Dc2層)を想定しており、設計上の必要支持力は先端支持力と周面摩擦力の両方を期待している。

洪積粘性土層を支持層とする大口径鋼管杭の打設については、現状、載荷試験事例も少なく、支持力特性の確認において不明な点が多かった。そのため、地盤の支持力特性の確認方法として、現地での試験杭打設および鉛直載荷試験を実施することとした。鉛直載荷試験では、施工管理式を導く目的の衝撃載荷試験と、先端抵抗力、周面抵抗力を確認する目的の急速載荷試験(以下、本試験)を実施した。

## 3. 急速載荷試験の試験条件

### (1) 試験杭の仕様

本試験では、本設の鋼管杭と同様に杭径がφ1200mm、φ1300mmの大口径鋼管杭を用いて行い、工法毎の内訳は打撃工法が2本、圧入工法が1本の計3本とした。

### (2) 載荷試験位置と地盤条件

本試験位置を図-3に示す。また、土層の把握を目的として事前に実施したボーリング調査と本試験の位置関係を図-4に示す。

### (3) 試験内容

表-1に示す試験杭の組み合わせに対して、養生後(14日以上)の軸方向押し込み抵抗力が、十分に発揮されるかを確認する。軸方向押し込み抵抗力は、杭の先端抵抗および周面抵抗を見込んでおり、これらを確認するため、表-2に示す内容および測定項目に基づき、本試験を実施する。

表-1 載荷試験杭の仕様一覧

番号	No.1	No.2	No.3
杭径φ	1300mm	1200mm	1300mm
板厚	25.0mm	18.0mm	25.0mm
杭長	40.5m	42.5m	40.5m
材質	SKK400	SKK490	SKK400
工法	圧入	打撃	打撃

試験杭には、杭先端への荷重伝達および先端変位を把握するため、図-5に示す杭頭、土中、杭先端付近の9断面にひずみ計および加速度計を取り付けた。また、ボーリング調査結果と試験杭の根入れの関係から分かる通り、試験杭の杭先端付近は洪積粘性土層（Dc2層）に位置していることが読み取れる。

表-2 試験内容及び測定項目

項目	試験内容
試験基準	試験の方法は、地盤工学会「杭の鉛直荷試験方法・同解説 杭の急速荷試験方法（JGS1815-2002）」に基づいて実施する。
目標試験荷重	確認支持力 13,500kN×1.2（動的成分）=16,200kN
荷重装置	68t 重錘落下システム、ハイブリッドナミッククッション
荷重管理	ひずみ計による荷重管理
変位管理	OIMS カメラで変位を計測する。（OIMS カメラは試験杭から10m 以上はなれた位置に設置する。） 加速度計（2回積分から変位を求める）
杭体ひずみ測定	ひずみ計を2方向×9断面設置する。
杭体加速度測定	加速度計を1方向×8断面、2方向×1断面設置する。
解析方法	除荷点法

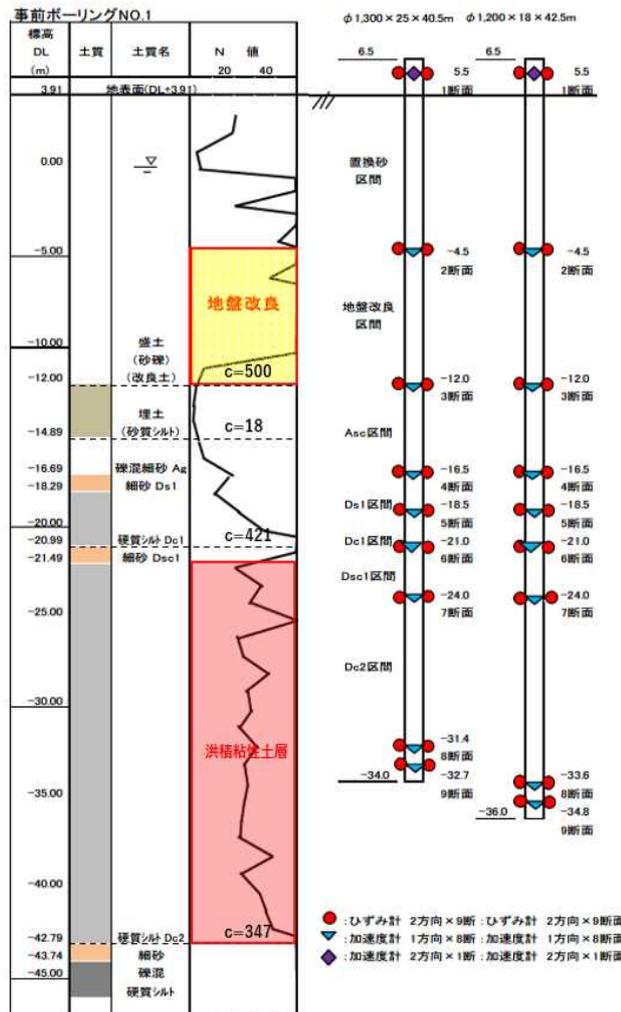


図-5 ボーリング調査結果とひずみ計、加速度計設置図および試験杭の根入れの関係

本試験に用いる68t重錘落下装置を写真-3に示す。重錘の落下サイクルは試験杭No.1が落下高0.15m~1.20m（落下高は0.15m, 0.30m, 以降は0.30m毎）までの計5回、試験杭No.2, No.3はともに、落下高0.25m~3.00m（落下高は0.25m, 0.50m, 以降は0.50m毎）まで計7回実施する。

(4) 軸方向押し込み抵抗力の推定値

軸方向押し込み抵抗力の推定値は事前ボーリング結果および「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に基づき設定した。用いた推定式を表-3、推定値の算出結果を表-4に示す。どの試験杭においても周面抵抗が卓越する推定となった。



写真-3 68t重錘落下装置

表-3 杭の軸方向押し込み力の特徴値の推定式まとめ

施工法	地盤の種類	杭先端抵抗力の特徴値	最大周面抵抗力の特徴値
		qd (kN/m <sup>2</sup> )	f (kN/m <sup>2</sup> )
打撃工法	粘性土	6Cp	C (≤100)
	砂・砂礫	300N	2N
圧入工法	粘性土	—	Cまたは6N (≤50)
	砂・砂礫	4500, ただし、N≥40の場合	5N (≤50)

表-4 抵抗力の推定値

試験杭	No.1	No.2	No.3
周面抵抗	6,748 kN	8,293 kN	8,097 kN
先端抵抗	5,973 kN	4,239 kN	4,836 kN
合計	12,721 kN	12,532 kN	12,933 kN

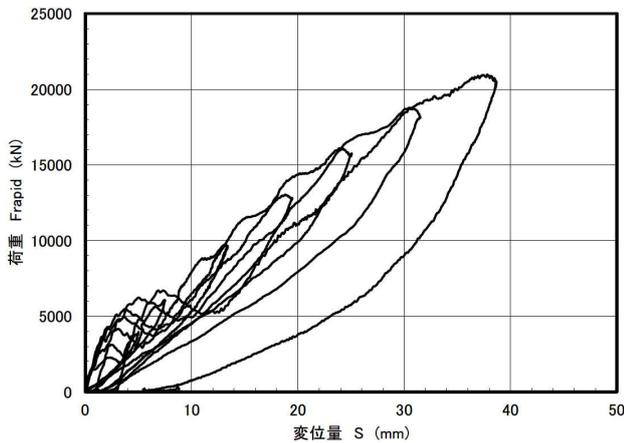


図-6 荷重-変位量曲線（試験杭No.3, 杭頭）

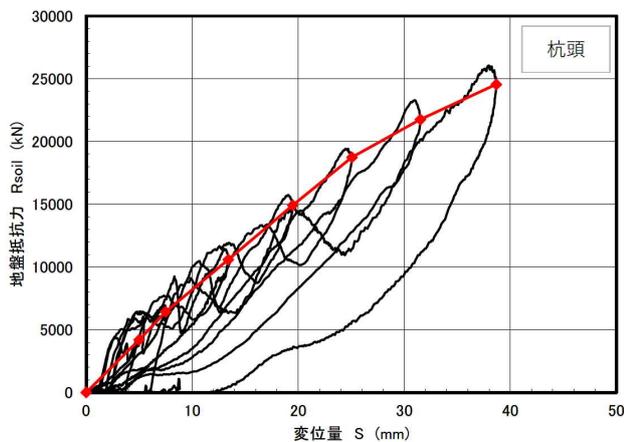


図-7 地盤抵抗力-変位量関係図（試験杭No.3, 杭頭）

#### 4. 試験結果・解析結果

##### (1) 試験結果

試験杭の取り付けたひずみ計および加速度計から得られた計測値を基に作成した、断面毎の各落下サイクルの荷重-変位量曲線の一例を図-6に示す。

##### (2) 除荷点法解析

除荷点法解析は、杭の最大変位時（除荷点）の荷重を静的抵抗力と見なすものである。除荷点法解析により算出した各断面間の軸力差を基に、各試験杭の周面抵抗力と杭先端抵抗力を算出した。

##### (3) 解析結果

除荷点法解析により算出した断面毎の除荷点抵抗力の一例を図-7に示す。

除荷点法抵抗力を基に周面抵抗力と先端抵抗力を算出し、支持力の特性値について、設計値と試験結果の関係を表-5～7に示す。なお、試験杭No.2, No.3において、先端抵抗力は軸方向押し込み抵抗力が降伏状態となる第一限界抵抗力まで達していないため、以上と表記している。

表-5 試験杭No.1の抵抗力の特性値

	杭頭抵抗力 (kN)	先端抵抗力 (kN)	先端抵抗力度 qd	周面抵抗力 (kN)
設計値	12,721	5,973	4,500	6,748
試験結果	3,472 (27%)	2,448 (41%)	1,844 $\approx 5C_p$	1,024 (15%)

De2層  $C_p=347\text{kN/m}^2$

表-6 試験杭No.2の抵抗力の特性値

	杭頭抵抗力 (kN)	先端抵抗力 (kN)	先端閉塞率 $\alpha$	周面抵抗力 (kN)
設計値	12,532	4,239 (N=25)	0.5	8,293
試験結果	24,207 (193%)	1,913 以上 (N=25) (45%以上)	0.23 以上	22,294 (269%)

表-7 試験杭No.3の抵抗力の特性値

	杭頭抵抗力 (kN)	先端抵抗力 (kN)	先端閉塞率 $\alpha$	周面抵抗力 (kN)
設計値	12,933	4,836 (N=27)	0.45	8,097
試験結果	24,551 (190%)	3,757 以上 (N=27) (78%以上)	0.35 以上	20,794 (257%)

試験杭No.1において、杭先端抵抗力は、準用した推定式から算出した設計値に対して41%の2,448kN、周面抵抗力は設計値に対して15%の1,024kNと、どちらも設計値を下回る結果であった。

試験杭No.2の杭先端抵抗力は1,913kNと設計値に対して45%の値であった。この値は、第一限界抵抗力まで達していない値であり、この値以上の先端抵抗力を発揮するものと推測される。一方、試験杭No.2の周面抵抗力は22,294kNと設計値に対して269%の値であった。

試験杭No.3も試験杭No.2と同様に杭先端抵抗力は設計値に対して78%の値、周面抵抗力は設計値に対して257%の値であった。

上記より、洪積粘性土層を支持層とする大口径鋼管杭について、本現場の施工条件下においては、杭の軸方向抵抗力は周面抵抗力が抵抗力の大部分を占めていることが明らかとなった。また、試験結果から圧入工法単独では必要な抵抗力を得られないことが判明した。

#### 5. まとめ

現在、現場においては、150本の大口径鋼管杭の打設を日々進めているところ。本試験の結果から得られた地盤の抵抗特性を参考に、追加の衝撃載荷試験を行い、施工管理に用いる支持力管理式の補正を行う等、有意義な試験結果を得ることができた。港湾分野においては、大口径かつ杭長の長い鋼管杭の適用が多く、載荷試験による確認が一般的となっている。本試験の成果が各地の施工現場の課題を解決する一助になると考える。

#### 参考文献

1) 公社日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説