

棧橋式岸壁における 鋼管杭載荷試験の成果について ～載荷試験結果を踏まえた 設計照査によりコスト縮減を実現～

小野木 佑徳

国土交通省 中部地方整備局 四日市港湾事務所 保全課 (〒510-0064 三重県四日市市新正 3-7-27)

四日市港霞ヶ浦地区において整備を進めている新たなコンテナターミナル(棧橋式岸壁)について、岸壁の鋼管杭打設に先立ち、地盤支持力の確認と施工管理式の確立を目的に、「衝撃載荷試験」と「急速載荷試験」を行った。試験により得られた地盤支持力を基に設計照査を行った結果、杭長が短縮可能と判断され、コスト縮減を図ることができた。

本論文では、載荷試験の成果と設計照査によるコスト縮減効果を併せて紹介する。

キーワード 棧橋式岸壁、衝撃載荷試験、急速載荷試験、コスト縮減

1. はじめに

四日市港北部に位置する霞ヶ浦地区は、コンテナ貨物や完成自動車、エネルギー関連貨物を取扱う背後圏産業を支える物流拠点である。臨港道路「四日市・いなばポートライン」や新名神高速道路が整備され、背後圏が拡大するとともに、入港船舶の大型化に対する大水深岸壁やコンテナ取扱量の増加を見込んだふ頭再編に加え、災害時においても物流機能を維持し、経済活動の停滞を防ぐための耐震強化岸壁が求められている。このため、令和3年度より、既存のW80岸壁に隣接する場所で、新たに延長330mの耐震強化岸壁W81岸壁(水深-14m)を整備する「四日市港霞ヶ浦地区国際物流ターミナル整備事業」に着手した。

W81岸壁は、海上に鋼管杭を打ち込む直杭式横

棧橋構造である。鋼管杭は断面方向に5本、岸壁法線方向に5mピッチの配列で、各杭は支持層まで根入れする。特に図-1に示す海側①杭と陸側⑤杭はガントリークレーン荷重が直接作用するため、大きな地盤支持力(以下、支持力)が必要となり、当初設計においては支持層への根入れを深くすることで必要な支持力を得る設計としていた。

一方で、港湾の施設の技術上の基準¹⁾では、鋼管杭にかかる支持力は設計時に用いる推定式に加えて、現地の載荷試験結果に基づいて決定することが合理的とあるほか、大口径鋼管杭の先端抵抗力の推定において杭径が閉塞率に与える影響が大きいとされている。以上より、鋼管杭打設施工に先立ち、図-1に示す④杭1本を対象に打設時の「衝撃載荷試験」と地盤養生後の「急速載荷試験」を実施し、現地の支持力を確認した。

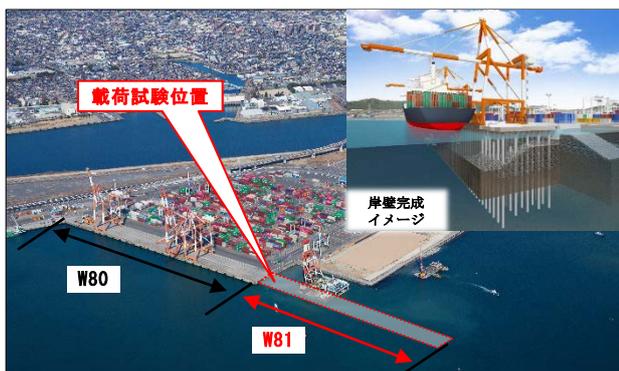


写真-1 四日市港霞ヶ浦北ふ頭地区 W81

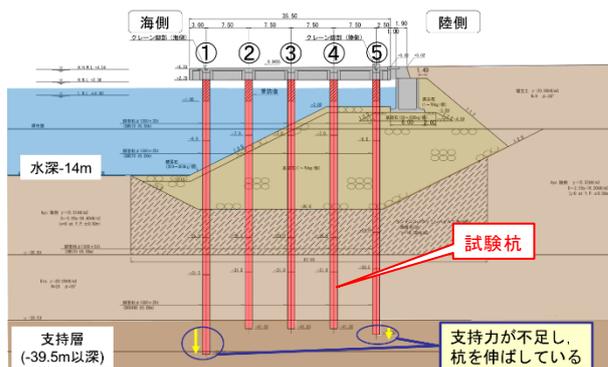


図-1 W81標準断面図(当初設計)

本論文では、2通りの载荷試験を採用した背景とその成果に併せ、設計照査において、杭長短縮が可能と判断されたことによるコスト削減効果について紹介する。

2. 载荷試験の目的

(1) 支持力の確認と杭長短縮の可否検討

W81の詳細設計において、必要最大支持力は各種の推定式に基づき、図-1に示す海側①杭で12,112.245kNと算定されている。設計値以上の支持力を満たすか確認するため、杭周面の摩擦抵抗が回復している地盤養生後の载荷試験を実施する。確認する支持力は設計値を上回る12,500kNとした。

また、杭の根入れ長は支持層から1D(杭径：1,300mm)以上の地点まで必要であるが、前述の通り、海側①杭と陸側⑤杭はそれよりも増長させているため、コストが割増となっている。そこで、载荷試験により十分な支持力を確認できた場合は、杭長の短縮可否を検討し、コストの削減を図る。

(2) 杭打設時における支持力管理式の確立

従来、鋼管杭打設における支持力管理には式(1a)にあるハイリー式が適用されてきた。

$$R_d = e \times \frac{E_h}{S + \frac{K}{2}} \quad (1a)$$

ここで、 R_d は動的支持力(杭打設時の支持力には動的な抵抗力と静的な抵抗力が含まれている)、 e はハンマ効率、 E_h は打撃エネルギー、 S は杭の平均貫入量、 K は杭の平均リバウンド量である。いずれも打止め直前数回の打撃に対する平均値を用いる。この式において、 $e=0.5$ とすると、杭打設時の動的な挙動で計測した値から、地盤養生後の杭周面の摩擦抵抗が回復した状態の支持力を評価できる。しかし、この式は現地の地盤条件が考慮されていないことから、導出される結果にばらつきが大きく、支持力推定式としては精度が不十分である。この式に対し、杭打設時と養生後の载荷試験結果で得られた値による現地条件を考慮した補正を行うことで、より精度の良い支持力管理式を算定できることが提案されている。その式を(1b)に示す。

$$R_s = e \times \frac{E_h}{S + \frac{K}{2}} \times C_f \times S_r \times S_t \quad (1b)$$

ここで、 R_s は極限支持力(支持力)、 C_f は全抵抗補正係数、 S_r は静的抵抗比、 S_t はセットアップ率で

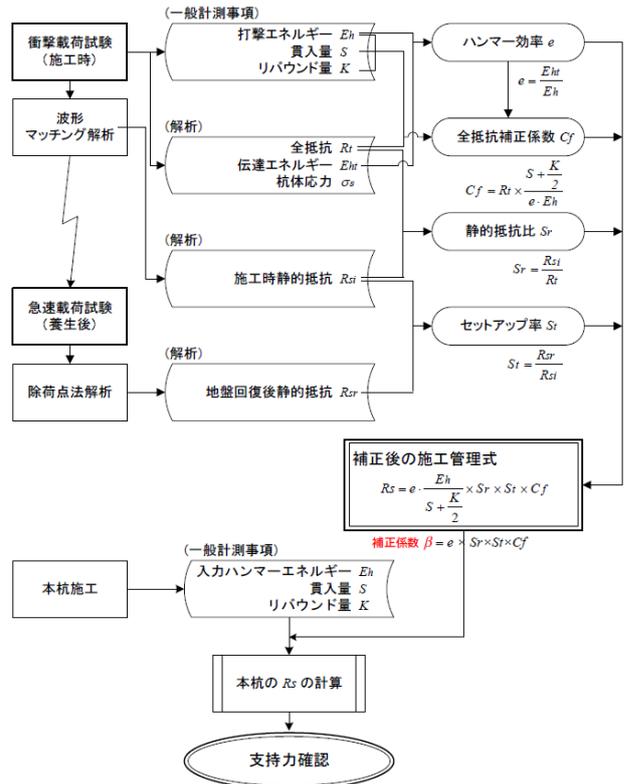


図-2 本工事における施工管理式(ハイリー式)の補正フロー図

ある。 C_f 、 S_r は杭打設時の衝撃载荷試験により得られる値で、杭打設時の動的抵抗を静的抵抗に換算する係数である。 S_t は杭打設時と養生後の静的抵抗の比を示している。本事例では、杭打設時の衝撃载荷試験と養生後の急速载荷試験結果を比較し、補正係数 $\beta = e \times C_f \times S_r \times S_t$ を算定することで、式を補正する。その補正フロー図を図-2に示す。

3. 試験杭工事(载荷試験)の概要

(1) 工事の概要

载荷試験は「令和4年度 四日市港霞ヶ浦北ふ頭地区岸壁(-14m)試験杭工事」内で実施した。図-3

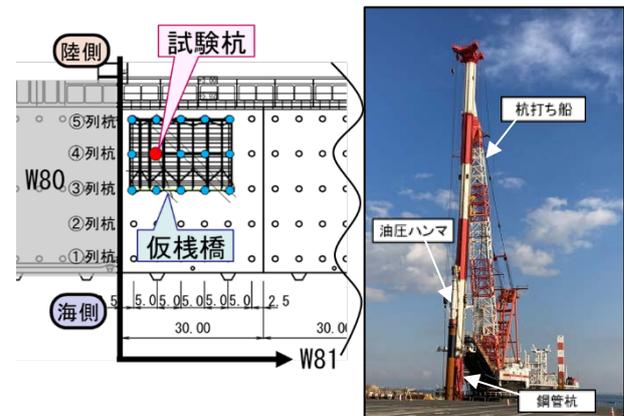


図-3 試験杭工事の平面図と杭打設の様子

に示すように W81 の施工範囲内、W80 側から 2 本目の④杭を試験杭とし、併せてその周辺 14 本の杭を打設することで急速載荷試験を行うための仮設棧橋とした。海側や陸側杭よりも杭長の短い中間杭を試験杭とすることで、中間杭の根入れ深度において海側杭の必要支持力以上の支持力が確認できた場合に、すべての杭の長さを中間杭と同じ長さにすることが可能となる。載荷試験は、打設時に衝撃載荷試験を実施し、その後、杭周面と地盤の摩擦抵抗を回復させるための養生期間を 57 日間設け、急速載荷試験を実施した。

(2) 2 通りの載荷試験方法の選定背景

図-4 に載荷試験の一般的なフロー図を示す。最初に、施工管理式の確立のため、杭打設時の支持力特性を衝撃載荷試験により測定する。その後、地盤養生後の支持力確認のために載荷試験を実施する。養生後の載荷試験は精度が高い押込み試験や急速載荷試験を選定することが望ましいが、試験準備にかかる費用面から衝撃載荷試験が選定される事例が多い。

一方、W81 の鋼管杭は表-1 に示す IHC-S280 ハンマで打設可能であり、ハンマに適応する杭打船が四日市港に在港しているところ、衝撃載荷試験により計画載荷重(確認支持力)12,500kN を確保するためには、より大きな規格の IHC-S500 ハンマが別途必要となる。四日市港では、IHC-S500 で打設可能な杭打船が在港していないため、杭打船の回航費が生じる事態となった。衝撃載荷試験に必要な杭打船の回航費と急速載荷試験時の準備費用を比較した結果、より安価な急速載荷試験を選定した。

(3) 衝撃載荷試験

衝撃載荷試験は、図-5 に示すように杭打設用ハ

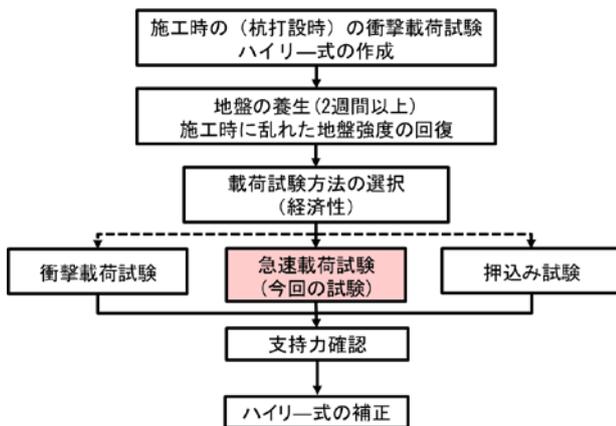


図-4 載荷試験の一般的なフロー図

表-1 打設に用いたハンマの仕様

名称	最大I材料 [*] - (kN-m)	ハンマ効率	伝達I材料 [*] - (kN-m)	質量 (t)
IHC-S280	280.0	0.8	224.0	13.6

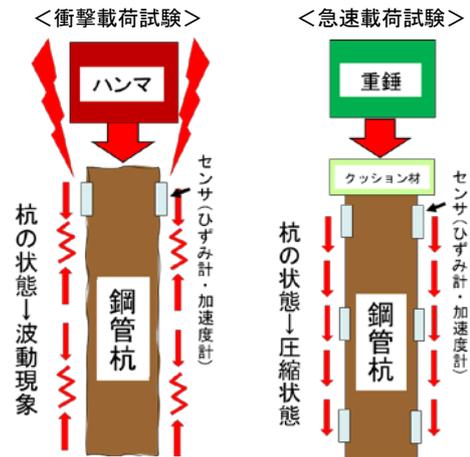


図-5 載荷試験の概要図

ンマの打撃エネルギーにより載荷を行う試験である。試験杭に取り付けたセンサ(加速度計・ひずみ計)により計測された加速度とひずみを基に、打撃載荷の衝撃から生じる杭の波動現象を考慮した波形マッチング解析を用いて、支持力を算定する。本試験時は、表-1 に示す実施工用のハンマを用いて、杭打設最後付近の Y.P. -32.4m~打ち止め深度 Y.P. -41.0m の 8.6m 間で試験をした。センサは、載荷時の衝撃を考慮し、杭頭から 1.5D 以上離れた 2.0m の位置に 2 個 1 組で軸対称に取り付けた。

(4) 急速載荷試験

急速載荷試験は、写真-2 にある緑色の 68t 重錘を用い、図-5 に示すように試験杭と重錘の間にクッション材を挟み載荷を行う試験である。衝撃載荷試験との違いは杭に作用する相対載荷時間(以下、Tr)である。Tr とは、荷重の載荷時間と波動現象により杭体に発生した応力波が杭体を往復するのに必要な時間の比で、急速載荷試験はクッション材を用いて $Tr=5.0$ 以上とすることにより、打撃載荷時の杭体に生ずる波動現象を無視できる。杭体が圧縮状態となり、応力とひずみの分布が規則的であることから、一般的な応力-ひずみの関係式により支持力を算定できるため、複雑な解析を要する衝撃載荷試験よりも精度が良い試験である。



写真-2 急速載荷試験の実施状況

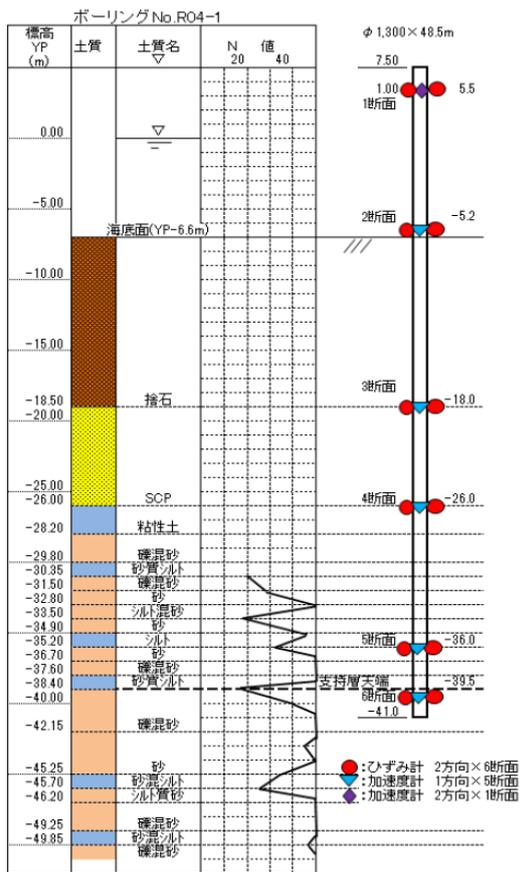


図-6 载荷試験地点の地盤条件と
急速载荷試験の計測機設置位置

今回の試験では、重錘を 0.4m の高さから 0.4m ピッチで最大 2m の落下高さまで上げて試験をした。

計測器の取付図を図-6 に示す。地盤支持力は、「地盤支持力 = 杭先端抵抗力 + 杭周面抵抗力」で算定される。杭周面抵抗力の算定には、杭先端への荷重伝達及び先端変位を把握する必要があるため、図-6 に示すように杭頭、土中、杭先端付近の 6 断面にひずみ計及び加速度計を取り付けた。計測値から式(2)に示す除荷点法解析を用いて、支持力を算定する。

$$R_s = F - M \times a \quad (2)$$

ここで、 R_s は支持力、 F は各断面の荷重、 M は杭の質量、 a は各断面の加速度である。この式は、測定される荷重に対し、試験時に生じる動的な慣性力を引くことにより支持力を算定する式である。地盤工学会基準²⁾には、除荷点法により算定される確認支持力は、計画载荷重に対し、最大 20% 程度小さくなるとある。そのため、計画载荷重はその分を割増、設計時に算定した W81 における必要最大支持力 12,500kN の 1.2 倍となる 15,000kN とした。

4. 試験杭工事における工夫

(1)隣接岸壁 W80 端部に設置された基礎石への対策

本工事の鋼管杭打設域は W80 の端部止め域で基礎石が設置されており、油圧式ハンマ打設の障害となっていた。そこで、杭打設位置でオールケーシングによる先行掘削を行い、ケーシング内の基礎石を撤去し、その後、置換材として砂を投入することで、杭の打設を可能とした。

(2)急速载荷試験時のコスト削減策

急速载荷試験には重錘落下装置などを設置する作業ヤードが必要であり、海上の鋼管杭で試験を行う場合、仮設栈橋用の仮杭を打設するのが一般的である。本工事では前述のとおり試験杭周辺の本設杭 14 本を併せて打設し仮栈橋とすることで、仮設費用を削減した。

(3)急速载荷試験時の隣接する供用中岸壁への対策

急速载荷試験器具の組立に際し、100t 吊のクレーンを必要としたが、隣接する W80 は供用中であることから、陸上でクレーンを配置することが不可能であった。そこで、100t 吊クレーン付台船を用いて海上より組立を実施した。

5. 载荷試験結果

(1)载荷試験の条件

試験杭④の仕様を表-2 に示す。また、試験杭打設位置より陸側に 2.5m 離れた位置の地盤調査結果を図-6 に示す。試験値との比較には、この地盤条件から算定した推定値を利用した。

(2)急速载荷試験結果

各重錘落下高さの計測段面最大荷重と最大変位量および累計残留変位量をまとめたものを表-3 に示す。また、除荷点法解析により求めた支持力も()内に示してある。この表における支持力の評価断面は海底面(2断面)として試験を実施した。

この表が示すように、最大落下高 2m での評価断面の支持力は 16,642kN であり、設計時の必要支持力 12,500kN の 1.4 倍の大きな耐力が発現し、海側杭よりも杭長の短い④杭で海側杭の支持力を十分

表-2 試験杭④の仕様

板厚(mm)	規格	断面(cm ²)	耐力(MN)	単管長(m) ※杭頭から	杭長(m)
32	SM570	1274.7	57.4	14.5	48.5
25	SM570	1001.4	45.1	15.0	
32	SM570	1274.7	57.4	6.0	
25	SKK490	1001.4	31.5	13.0	

に満足することを確認できた。

図-7 には支持力と変位量の関係を示す。この図が示すように、算定された最大支持力 16,642kN における残留変位量は、杭径(1300 mm)の 10%未満のため、第二限界抵抗力(地盤の極限支持力)まで達していないものと推測される。つまり、実際の最大支持力は 16,642kN 以上であると分かる。

(3) 設計時と試験時の地盤支持力の比較

a) 杭周面抵抗力

試験時、杭周面抵抗力(以下、 r_f とする)は、表-3 が示す各層(各断面)の支持力差を杭の対象区間における地盤接触面積で除すことにより求められる。計測された r_f と図-6 の地盤条件で求めた設計値を比較したものを表-4 に示す。設計値は、 $r_f = 2N(N \text{ 値})$ で算定されており、この表が示すように、試験値は地盤上層部の捨石層で設計値の約 14 倍、SCP 層は約 6 倍、砂層(Dis)は約 0.5 倍、砂礫層(Disg)は約 1.7 倍の周面抵抗力であった。

このように、SCP 層の周面抵抗力が設計値より大きな抵抗力を発現したことが、十分な支持力を得られた要因であると言える。これは、SCP による砂杭が $N=15$ 以上に締め固まっていることが影響したものと考えられる。

杭長短縮後の設計照査では、抵抗力の推定式に対し、得られた 試験値/設計値 をかけて補正を行

表-3 最大荷重(地盤支持力)・変位量一覧表

計測結果		重錘落下高(m)				
		0.4	0.8	1.2	1.6	2
最大荷重(kN)	杭頭	5,640	9,002	11,928	14,203	15,942
	2断面	5,640(6,158)	9,002(9,544)	11,935(13,579)	14,203(15,116)	15,936(16,642)
	3断面	5,469(5,284)	8,657(8,270)	11,984(10,283)	12,351(12,120)	15,942(14,023)
	4断面	3,325(3,314)	5,729(5,727)	8,257(6,952)	10,488(8,451)	11,898(9,446)
	5断面	2,492(2,457)	4,698(4,692)	7,018(5,832)	8,947(7,465)	10,360(8,586)
	6断面	1,813(1,717)	2,492(2,417)	4,842(4,745)	6,163(5,995)	7,385(6,763)
最大変位量(mm)	杭頭	9.2	17.4	23.9	32.1	39.7
	2断面	5.8	17.4	23.4	32.1	38.4
	6断面	0.2	1.3	3.4	10.1	16.9
累計残留変位量(mm)		0	0	3	6	13

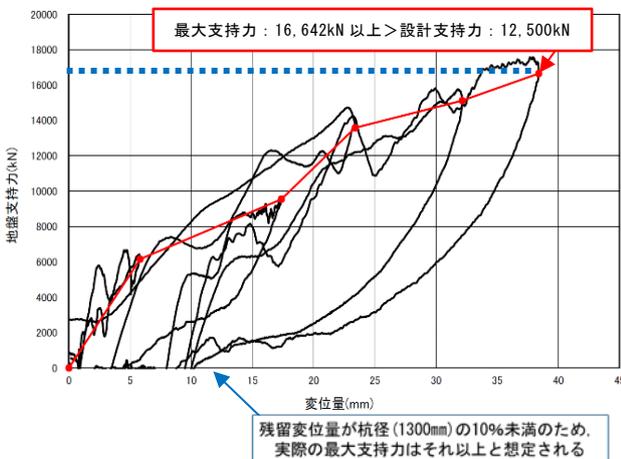


図-7 算定された地盤支持力と変位量の関係

表-4 周面抵抗力の設計値と試験値の比較

計測断面	層厚(m)	土質定数			試験値(kN/m ²)	試験値/設計値
		土層名	N値	設計値		
2~3	12.8	捨石	2	4	57	14.3
3~4	8.0	SCP	15	30	177	5.9
4~5	10.0	Dis	34.8	69.6	36	0.5
5~6	3.5	Disg	47	94	159	1.7

表-5 先端抵抗力の設計値と試験値の比較

	先端抵抗力(kN)	先端N値	閉塞率
設計値	5,910	50	0.33
試験値	5,789以上	50	0.32以上

い、周面抵抗力を算定する。ただし、本試験時の捨石層は置換材による砂の影響を含むため、捨石層での補正は行わず、当初の設計値を採用する。

b) 杭先端抵抗力

試験結果の杭先端抵抗力(以下、 R_p)は、表-3 が示す杭先端部の支持力算定値から $R_p = 6,763\text{kN}$ と読み取れる。しかし、杭先端での計測器の位置は、実際先端部よりも 1.5m 上部に位置しているため、この値から 1.5m 分の周面摩擦力を差し引く必要がある。差し引いた試験時の R_p と設計値を比較したものを表-5 に示す。④杭の設計時先端抵抗力は $R_p = 300 \times \alpha \times N_1 \times A_p \approx 5,910\text{kN}$ と算定され、試験値は設計値の 0.9 倍の値であった。ここで、 α は閉塞率、 N_1 は杭先端 N 値と杭先端から 4D 上方までの平均 N 値とを平均した値、 A_p は杭先端での断面積である。なお、試験値から逆算した閉塞率は 0.32 となった。

今回の試験では、第二限界抵抗力まで载荷出来ていないことから明確な閉塞率は把握できなかったが、安全側を考慮し、杭短縮後の設計照査では試験で確認した閉塞率 $\alpha = 0.32$ を採用する。

(4) 試験結果による施工管理式(ハイリー式)の確立

図-2 のフローに従い、杭打設時の衝撃载荷試験

表-6 ハイリー式の補正係数算定結果

項目	記号	結果	単位
貫入量	S	0.0095	m
リバウンド量	K	0.0040	m
ハンマーエネルギー	Eh	152	kNm
伝達エネルギー	Eht	121	kNm
施工時全抵抗	Rt	13,049	kN
施工時静的抵抗	Rsi	6,289	kN
ハンマー効率	e	0.796	
全抵抗補正係数	Cf	1.240	
静的抵抗比	Sr	0.482	
養生後静的抵抗	Rsr	16,642	kN
セットアップ率	St	2.646	
補正係数 $e \times Cf \times Sr \times St$	β	1.259	

により得られた結果と養生後の急速載荷試験により得られた結果から、ハイリー式を補正するための値を算定したものを表-6 に示す。表より、W81の鋼管杭打設におけるハイリー式の補正係数は $\beta = 1.259$ と分かる。従来の式では、 $\beta = 0.5$ 相当で支持力を推定していたため、必要以上に支持力が過小評価されていたが、試験により得られた補正係数 β を適用し、杭打設時のS、Kを計測することで、精度の良い杭の支持力管理を行うことが可能となった。

6. コスト縮減の検討

(1) 杭長短縮後の設計照査

図-7 より載荷試験で得られた支持力が設計値よりも十分に大きいことが判明したため、海側杭と陸側杭の長さを中間杭の根入れ長である Y.P.-41.0m とした場合(図-8)で設計照査を行う。杭長見直し後の設計照査では、前章で述べた通り急速載荷試験値の結果を適用し、照査を行った。

当初設計と同様の地盤条件を用いた海側杭と陸側杭の支持力照査結果を表-7 に示す。陸側杭では、耐震強化岸壁における必要安全率 2.5 を満足する支持力を確認できた。海側杭では、3地点において安全率 2.2 という結果であるが、港湾の基準¹⁾では、杭の載荷試験を実施した場合、安全率 2.5 以上という安全上の余裕の見方を変更できることが提案されている。今回の載荷試験にて確認した支持力は、第二限界抵抗力まで達していない値で、実際の最大支持力はそれ以上と想定される点と港湾空港技術研究所の意見も踏まえ、この3地点も安全側とみなすこととした。

その他、耐震強化岸壁における必要な設計照査として、平常時における断面安定性(杭の応力)照査やL2地震時における残留変位量と限界曲率比の照査を実施し、当初設計と同様に安全性の基準を満足することを確認できた。

(2) コスト縮減効果

前節より、海側杭で4.5m、陸側杭で1.0m短縮可能と判断された。鋼管杭のm当たりの単価は273,913円/m(2023年8月時点)である。また、杭の残打設本数は海側杭66本、陸側杭61本であることから、直工費におけるコスト縮減額は、 $\{273,913(\text{円/m}) \times 4.5(\text{m}) \times 66(\text{本})\} + \{273,913(\text{円/m}) \times 1.0(\text{m}) \times 61(\text{本})\} \approx 98,000$ 千円である。これに経費率(1.9倍)を考慮すると、今後の打設工事において、約1.9億円(経費込み)のコスト縮減が可能と見込める。

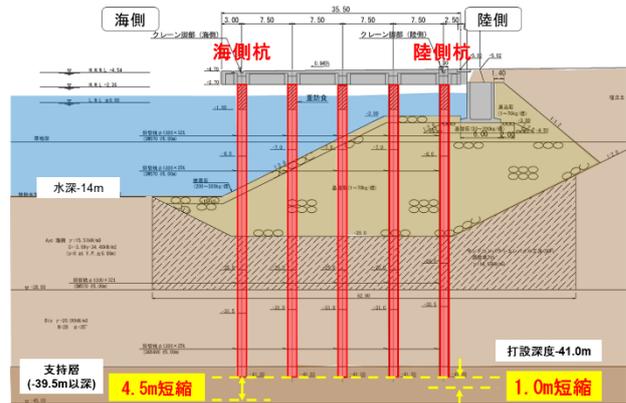


図-8 W81 標準断面図(杭短縮後)

表-7 杭長短縮後の支持力照査

<陸側杭>				<海側杭>			
ボーリング No.	支持力	必要支持力	安全率	ボーリング No.	支持力	必要支持力	安全率
No. 3-23	12,429	3,971	3.13	No. 3-23	12,342	4,878	2.53
H30-1	15,122		3.81	H30-1	15,035		3.08
H30-2	10,854		2.73	H30-2	10,768		2.20
H30-3	11,195		2.82	H30-3	11,109		2.27
H30-4	11,284		2.84	H30-4	11,197		2.29
H30-5	12,374		3.12	H30-5	12,288		2.52
H30-6	13,123		3.30	H30-6	13,036		2.67
H30-7	14,339	3.61	H30-7	14,252	2.92		

7. まとめ

今回、W81岸壁における支持力確認と施工管理式の確立を目的として、杭打設時の衝撃載荷試験と養生後の急速載荷試験を実施した。試験では、設計で想定した必要支持力を十分に満たす支持力を確認することができ、その後の設計照査により杭長が短縮可能と判断されたことから、コスト縮減に繋がった。また、従来の施工管理式を補正した式を導き、今後の工事で精度の良い支持力管理が可能となった。

本事例は、基準に則り載荷試験を実施することで、工事の生産性向上に繋がり、載荷試験の重要性を示すことができた。この結果が、今後の大口径鋼管杭の支持力特性検討に繋がれば幸いである。

謝辞:最後に、本試験にご協力を頂きました港湾空港技術研究所 地盤研究領域 基礎工研究グループ 水谷崇亮グループ長を始め、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1)公益社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(2018)
- 2)公益社団法人 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説-第一回改訂版-(2002)