

徳山下松港における原位置載荷試験を活用した杭の設計

Pile Design Based on In-Situ Loading Test Results in Tokuyama Kudamatsu Port

北浦直子 Naoko KITAURA (中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所)
 水谷崇亮 Takaaki MIZUTANI ((国研)海上・港湾・航空技術研究所)
 坂本貴光 Takamitsu SAKAMOTO (日本海洋コンサルタント(株))
 土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学防災・減災研究センター)

徳山下松港は国際バルク戦略港湾に選定され、大型船舶が入港可能となるよう港湾施設の機能強化を図るため、同港下松地区に耐震強化施設として水深19mの係留施設の整備が計画されている。構造形式は大水深かつ大荷重への適用性が高いジャケット式栈橋が採用されている。栈橋部は荷役機械が載るため、杭の必要支持力が約25,000kNと大きく、杭径は1,500mmになる。大径杭の支持力に関する試験データは少なく、従来のN値による静力学的抵抗力算定式での推定の妥当性が担保されないため、現地の支持力確認が必要となる。本稿では大水深の現地で載荷試験を実施した結果を報告する。

キーワード：大深度杭，大口径杭，杭の支持力，杭の載荷試験（IGC：E-04，H-07）

1. はじめに

徳山下松港にて計画されている水深19mの係留施設は、幹線貨物輸送対応の耐震強化施設であり、大型貨物船の接岸やアンローダ（写真-1に示すような荷役機械）の利用があるため、厳しい条件の下で設計が進められている。基本設計において構造形式の比較検討を行い、選定されたジャケット式栈橋の構造を図-1に示す。この構造では、杭1本当りに求められる軸方向抵抗力が約25,000kNと大きく、杭径1,500mm、杭長約90m（根入れ長約57m）となっている。土質調査の結果、地盤が互層状態で、支持層への根入れ長を慎重に検討する必要がある。また、大口径杭の抵抗力は既知のデータが少なく、施工や地盤条件の影響を受けて設計で想定した値を得られない恐れもあった。そのため、地盤の抵抗力を事前に把握して設計へフィードバックすることを試みた。なお、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾に基づき、杭の軸方向抵抗力は載荷試験により確認した。

ジャケット式栈橋²⁾とは、鋼管で組み立てた立体トラス構造の栈橋で、海底地盤面に固定した杭と溶接やグラウト等により一体化させた構造のため、耐震性が高く、大水深・軟弱地盤に有利といった利点がある。



写真-1 アンローダ (周南バルクターミナル³⁾)

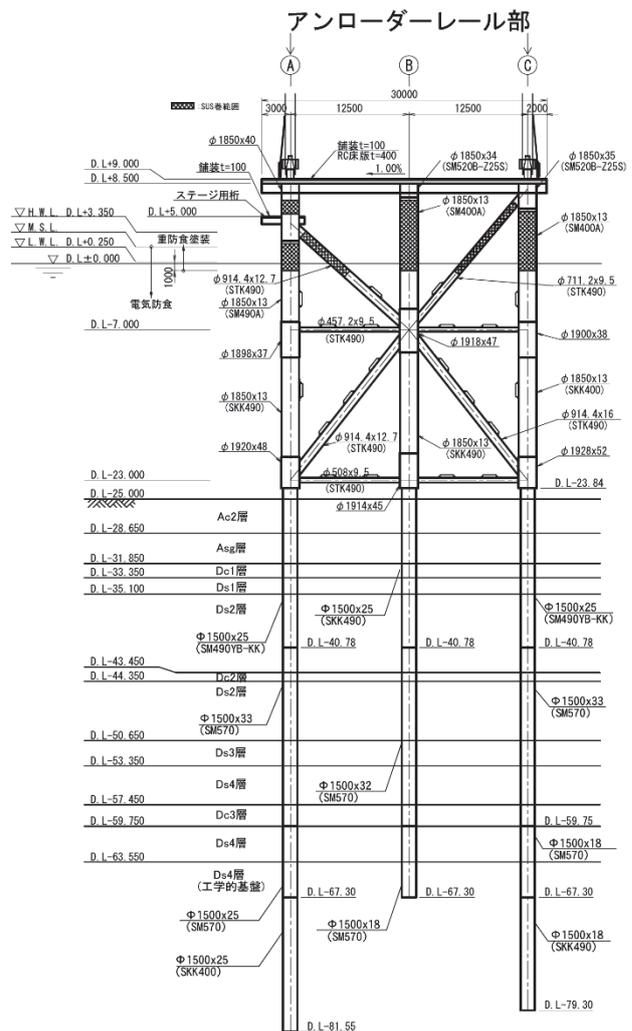


図-1 ジャケット式基礎栈橋構造図

2. 衝撃載荷試験及び急速載荷試験

2.1 試験の目的

当施設では構造部材である栈橋杭（鋼管杭）がアンロード基礎を兼用していることから、図-1 に示す A 列杭、C 列杭には大きな押し込み力が作用する（最大 25,000kN 程度）。また、波が直接作用するため波力による大きな引抜き力も作用する。このため栈橋杭（鋼管杭）には大きな軸方向押し込み抵抗力・引抜き抵抗力が必要となり、構造解析により大口径杭（φ1,500mm）が選定された。

大口径杭を施工する方法として、油圧ハンマによる打撃工法があるが、大口径杭の支持力に関する試験データが少ないため、当施設の原位置において杭の載荷試験を実施することにより当該地盤において期待できる支持力を把握して、設計へフィードバックする必要がある。そこで、支持層への根入れ長が異なる 2 本の試験杭を準備して、杭の施工時に衝撃載荷試験を、養生後に急速載荷試験を行うこととした。

なお、衝撃載荷試験は後で述べる施工管理式の作成に用いるデータを得るために実施するものである。施工時に実施するため、供用時に実際に杭が発揮できる支持力（養生後の支持力）を確認することができない。一方、養生後の急速載荷試験は、供用時に杭が実際に発揮する支持力を確認することを目的としている。本稿では、杭の支持力は急速載荷試験の結果に基づいて検討する。

2.2 地盤条件

図-2 に杭の載荷試験を実施した地点のボーリング柱状図を示す。表層に層厚 5m 程度の粘性土層が堆積しており、それ以下は粘性土層、砂層、礫層が互層状態で続いている。当施設の設計では D.L.-65.9m から現れる Ds7 を支持層とし、杭先端をこの層に根入れする計画となっている。Ds7 は N 値 50 以上、層厚 10m の砂層である。Ds7 の直下には N 値 15~20 程度の洪積粘性土層 Dc4 が存在するため、杭の支持層への根入れ長を大きく取り過ぎると、杭先端が薄層支持の状態となり、かえって杭の先端抵抗が低下する恐れもある。そこで、支持層への根入れ長を変化させた 2 本の試験杭を準備して杭の載荷試験を行うこととした。なお、周辺で実施したボーリング調査結果によると、Ds7 の層厚は地点により多少変化し、最小で層厚 9.0m 程度と報告されている。

試験杭は、この Ds7 層に所定の長さ根入れさせる計画であるが、場所によって標高に差が出ている。そのため、図-1 の標準的な構造図の支持層深度と図-2 の試験場所の支持層深度に差が生じている。

2.3 試験杭の諸元

先述のとおり試験杭は支持層への根入れ長が異なる 2 本を準備した（以下、杭①、杭②）。

杭①は図-2 に示すとおり、支持層 Ds7 に 2.5D 根入れさせ、杭下端は D.L.-69.65m である。杭②は 4D 根入れさせ、杭下端 D.L.-71.90m である。なお、杭②の杭下端から Ds7 下端まで 5.0m（3.3D）確保されている。

試験は図-1 の B 列杭の位置で計画し、試験杭も B 列杭の仕様（SKK400、杭径 1,500mm、肉厚 16mm）を基本とした。文献⁶⁾によると所定の深度まで杭を破損することなく施工するには、杭材の公称降伏応力値の 80~90% 程度の打撃応力が目安とされている。今回の試験では杭の軸方向抵抗力が 25,000kN 以上であることを確認する必要があるため、1.2 倍の打撃力（約 30,000kN）が作用するものと推測される。この打撃力による鋼管杭（SKK400 φ1,500×16）の発生応力は保証降伏点強度（235 N/mm²）を超えるので、試験杭では板厚 21mm、規格 SKK490（保証降伏点強度 315 N/mm²）に変更している。

杭①、杭②の諸元を表-1 に示す。

杭①は打設後 30 日、杭②は打設後 18 日の養生期間を置いた後、急速載荷試験を実施した。現場の都合により杭①と杭②で養生日数が異なるが、いずれも地盤工学会基準の解説に示された養生日数の目安（砂質土 5 日以上、粘性土 14 日以上）を超えている。

なお、杭①と杭②では根入れ長等の条件が異なるため、今回の試験結果では養生日数が異なることによる影響は検討できなかった。

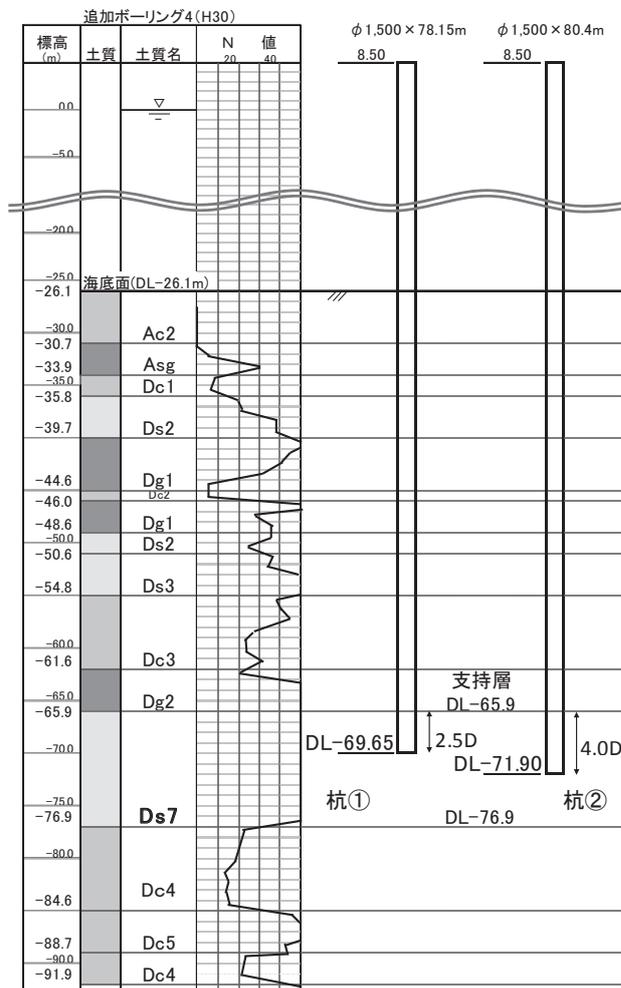


図-2 地盤条件

表-1 試験杭の諸元

	杭径 (mm)	板厚 (mm)	杭長 (m)	根入れ 長	標高D.L.(m) Ds7天端~杭下端
杭①	1,500	21	78.15	2.5D	-65.9 ~ -69.65
杭②	1,500	21	80.40	4.0D	-65.9 ~ -71.90

D: 杭径=1,500mm

2.4 衝撃載荷試験

2.4.1 試験方法

試験杭施工時の支持層の確認および本杭の支持力管理式の修正のため衝撃載荷試験を地盤工学会「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 4)杭の衝撃載荷試験方法 (JGS1816-2002)」に基づいて実施した。油圧ハンマーは国内最大級のIHC-S500を用いた。



写真-2 試験杭打設箇所の様子 (ハンマーは IHC-S500)

2.4.2 計測システム

計測には、試験杭に取り付けるセンサ (加速度計・ひずみ計)、計測ケーブル、PDA から構成される計測システムを用いた。このセンサは、杭頭から 1.5D (D=1,500mm) 以上離れた位置に 2 個 1 組で軸対象に取り付けた。

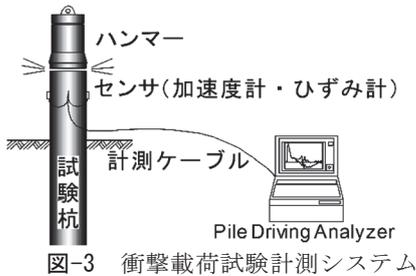


図-3 衝撃載荷試験計測システム

2.5 急速載荷試験

2.5.1 試験方法

地盤工学会「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 5)杭の急速載荷試験方法 (JGS1815-2002)」に基づいて実施した。載荷装置は 140t の重錘を用いた軟クッション重錘落下方式とした。

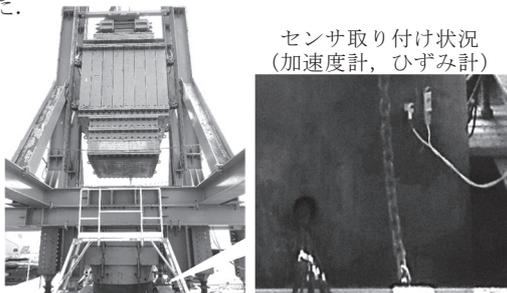


写真-3 急速載荷試験 (140t 重錘落下装置)

2.5.2 載荷重

設計上、最大で 25,000kN 程度の軸力が杭頭に作用することが想定されるため、載荷試験の計画最大荷重は 25,000 kN とした。重錘落下サイクルを表-2 に示す。

表-2 重錘落下サイクル

落下高 (m)	試験回数					落下高 (m)	試験回数			
	1	2	3	4	5		1	2	3	4
2.5					○					
2				○		2.2				○
1.5			○			1.5			○	
1		○				1		○		
0.5	○					0.5	○			
0						0				

2.5.3 計器設置

本試験は杭頭、杭先端での軸方向押込み抵抗力および各土層における周面抵抗力を確認する事が目的である。そこで、杭先端への荷重伝達および先端変位を把握するため、図-4 に示す杭頭、土中、杭先端付近にひずみ計および加速度計を取り付けた。

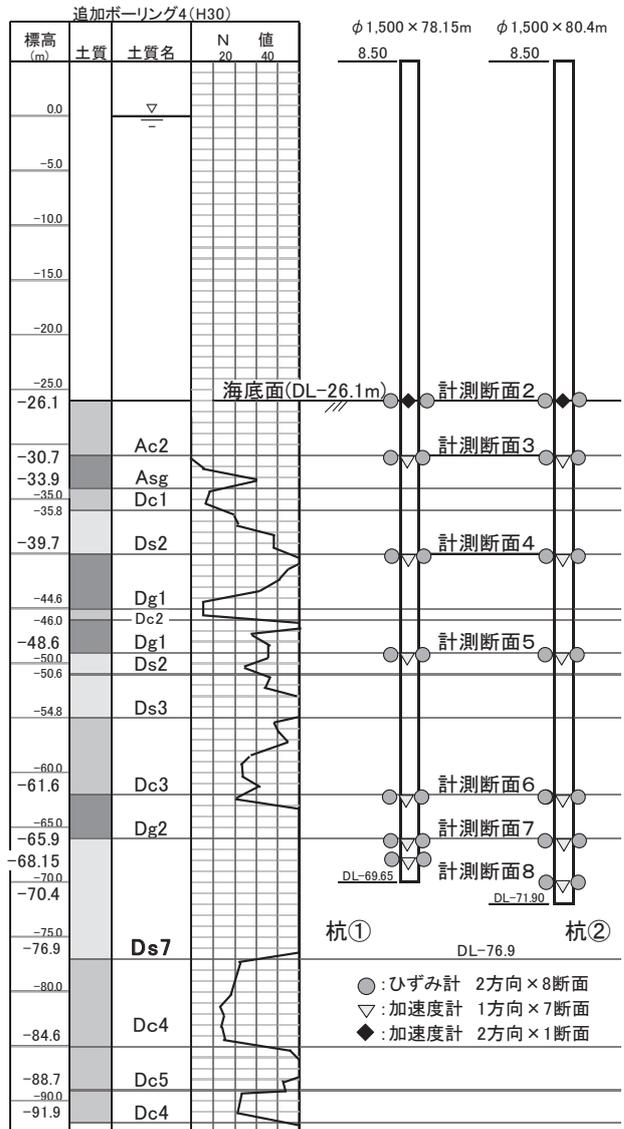


図-4 ひずみ計、加速度計設置位置図

3. 試験結果

3.1 衝撃載荷試験

施工時の衝撃載荷試験について、深度ごとのハンマエネルギー、杭体応力、全抵抗の計測結果を図-5、図-6に示す。また、波形マッチング解析結果を表-3に示す。杭①はD.L.-48mまで、杭②はD.L.-51mまでバイブロハンマ(640II MR)で打設後、油圧ハンマで打設した。

この図より支持層Ds7天端(D.L.-65.9m)手前のDg2層(D.L.-64m)付近から全抵抗が増加していることが分かる。

なお、図-6のD.L.-62m付近で全抵抗やハンマエネルギーに低下が見られるが、貫入量に異常が見られなかったことから薄層の軟弱地盤の存在は可能性が低く、打撃ハンマの不調が主な原因であったと考えられる。

文献⁹⁾に示されるように、施工時の打ち止め時の衝撃載荷試験結果より静的抵抗を解析し、養生後の急速載荷試験の静的抵抗と比較することで、この地盤のセットアップ率(養生後静的抵抗/施工時静的抵抗)を把握したり、施工管理用の式を作成することが出来る。その具体的な手順については5章で述べる。

表-3 波形マッチング解析結果(パラメータ)

試験杭	No.1	No.2
ハンマーエネルギー	260kNm	198kNm
伝達エネルギー	212kNm	238kNm
全抵抗	21,915kN	20,723kN
周面抵抗力	9,553kN	8,674kN
先端抵抗力	1,100kN	953kN
静的抵抗合計	10,653kN	9,627kN
支持層への根入	2.5D	4.0D

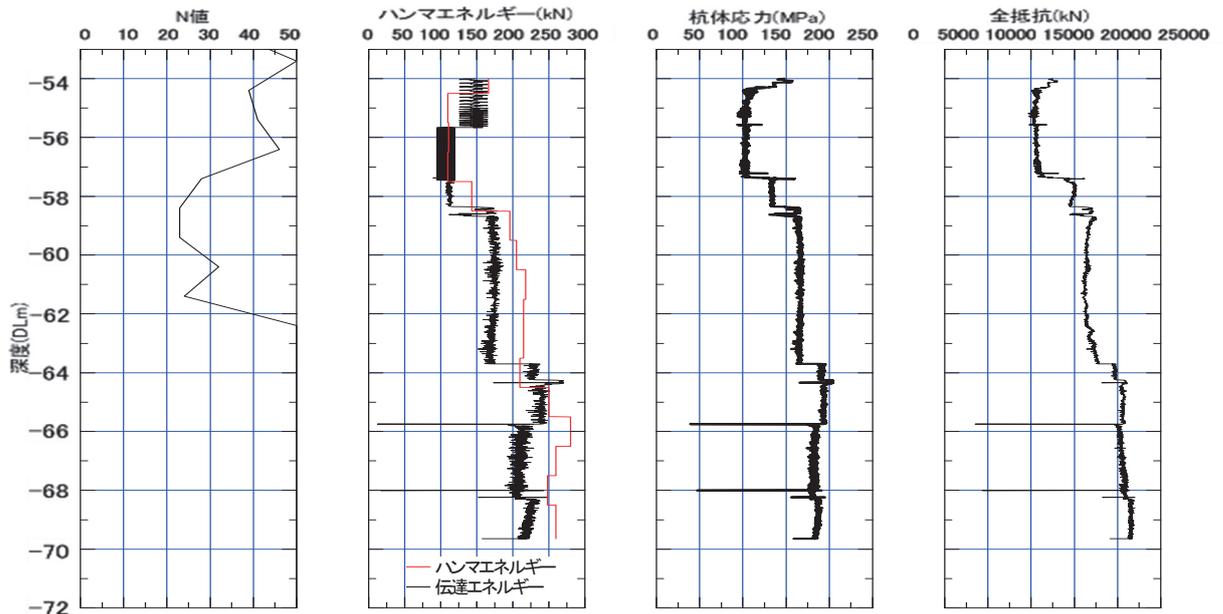


図-5 衝撃載荷試験計測結果(杭①)

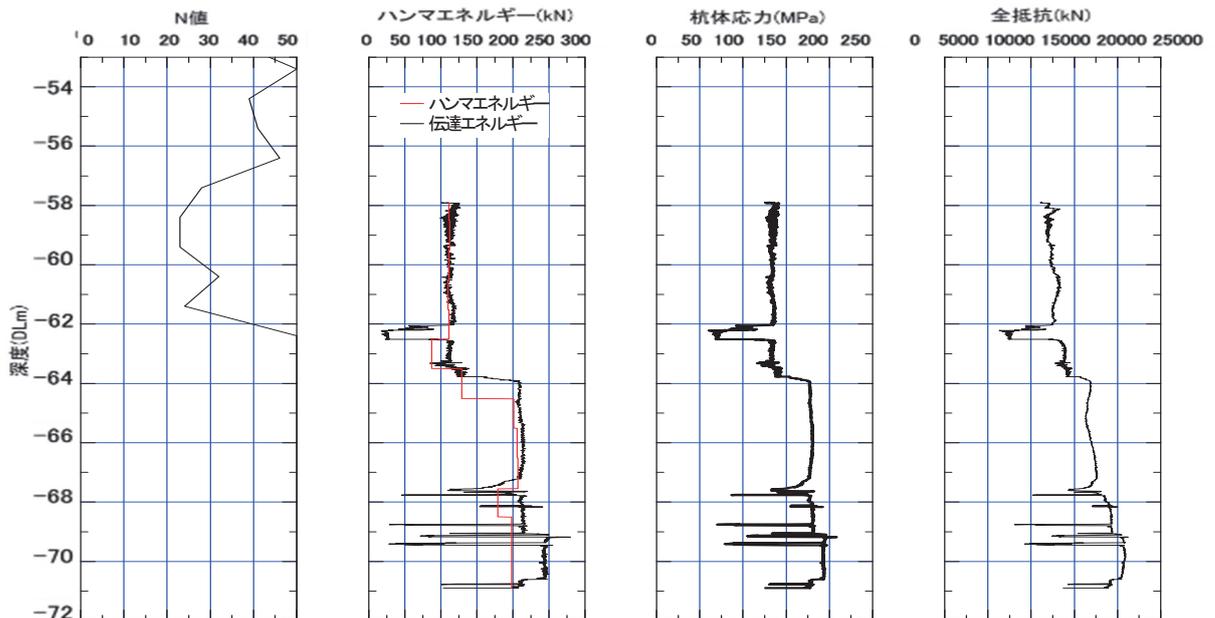


図-6 衝撃載荷試験計測結果(杭②)

3.2 急速載荷試験

海底面（図-4 の計測断面 2）において計測された荷重と変位量の関係を図-7、図-8 に示す。海底面と杭先端付近（図-4 の計測断面 8）の計測最大荷重・変位，除荷点法による解析結果を表-4、表-5 に示す。

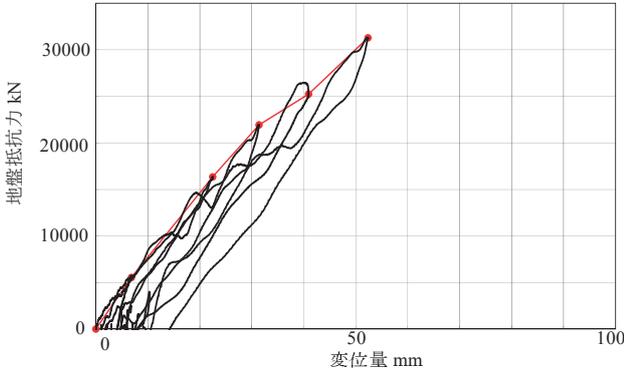


図-7 2断面地盤抵抗力-変位量関係図(杭①)

表-4 計測最大荷重・変位および除荷点法による解析結果(杭①)

		重錘落下高(m)				
		0.2	1.0	1.5	2.0	2.5
最大荷重 kN	杭頭	5,571	15,023	19,932	24,164	28,145
	計測断面2 (海底面)	5,571 (5,543)	15,021 (16,349)	19,643 (21,926)	24,163 (25,237)	28,141 (31,277)
	計測断面8 (杭下端)	502 (464)	1,592 (1,496)	2,247 (2,226)	2,947 (2,753)	3,824 (3,791)
変位累 計最大 (mm)	杭頭	14.6	45.7	60.9	74.8	87.4
	2断面	6.8	22.5	31.4	40.9	52.4
	8断面	0.4	1.8	3.9	7.1	13.3

※最大荷重の()内は除荷点法による地盤抵抗力kN

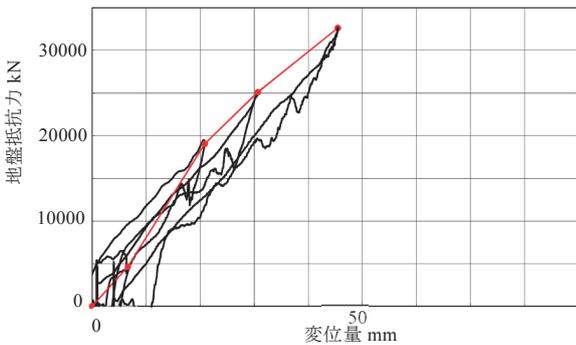


図-8 2断面地盤抵抗力-変位量関係図(杭②)

表-5 計測最大荷重・変位および除荷点法による解析結果(杭②)

		重錘落下高(m)			
		0.2	1.0	1.5	2.2
最大荷重 kN	杭頭	5,969	17,305	22,471	28,765
	計測断面2 (海底面)	5,968 (4,615)	17,111 (19,060)	22,465 (25,103)	28,763 (32,621)
	計測断面8 (杭下端)	536 (526)	2,400 (2,366)	3,649 (3,619)	5,527 (5,490)
変位累 計最大 (mm)	杭頭	15.5	45.8	60.6	79.8
	2断面	6.6	20.8	30.7	45.5
	8断面	0.4	2.9	4.6	12.0

※最大荷重の()内は除荷点法による地盤抵抗力kN

3.3 支持力の確認

2.1 で述べたとおり，杭の支持力は養生後に行った急速載荷試験の結果に基づいて検討する。

図-7、図-8 に示した除荷点法による地盤抵抗力と変位の関係（図中の赤線）を見ると，抵抗力が 30,000kN を超えても勾配の変化は見られず，両杭とも第一限界抵抗力まで載荷されていないものと推測される。

地盤抵抗力は，表-4、表-5 に示すように杭①の最大重錘落下高 2.5m の 2 断面（海底面）で 31,277kN，杭②の最大重錘落下高 2.2m の 2 断面で 32,621kN であり，目標値とした 25,000kN 以上の抵抗力を確認した。なお，この値は第一限界抵抗力まで達していない値であるので，試験杭は実際にはこれ以上の抵抗力を有しているといえる。

第 1 限界抵抗力とは杭頭における荷重と変位量の関係を両対数目盛りで表したときに現れる折れ点の荷重で，杭の降伏に対応するものである。

3.4 先端閉塞効果

文献 1) において，閉塞率は施工，地盤条件の影響をうけるので，載荷試験を行い，閉塞率を把握することが必要とされている。今回，急速載荷試験にて得られた杭の先端抵抗力を用いて，先端閉塞率 η を逆算で求めた結果を表-6 に示す。

設計では，図-9 を参考に杭の閉塞率を 0.25 と仮定して杭の抵抗力を推定しているが，試験結果から求めた閉塞率は，これよりも小さい値となった。この要因として，杭①，杭②が第一限界抵抗力まで載荷されていない杭なので，杭先端まで十分荷重が伝達されていないことが挙げられる。そのため，試験結果から逆算で得られた閉塞率が小さな値となったものと考えられる。

なお，設計では杭の先端抵抗力は港湾の施設の技術上の基準・同解説 1) に基づき式(1)によって推定されている。

$$R_{p0k} = R_{pk} \cdot \eta = 300N A_p \eta \quad (1)$$

R_{p0k} : 開端杭の先端抵抗力特性値 (kN)

R_{pk} : 杭の先端抵抗力特性値 (kN)

η : 閉塞率

A_p : 杭先端の断面積 (㎡) $A_p = \pi D^2/4$ (D : 杭径)

N : 杭の先端抵抗力特性値 (kN)

$$N = \frac{N_1 + \overline{N_2}}{2} \quad N_1: \text{杭先端位置の地盤の } N \text{ 値} \quad N_1 \leq 50$$

$\overline{N_2}$: 杭先端から $4B$ 上方までの範囲の地盤の平均の N 値 $N_2 \leq 50$

(B : 杭の直径または幅 m)

表-6 先端閉塞率（設計では 0.25）

	単位	杭①	杭②	
最大載荷荷重	kN	31,277	32,621	計測断面2(海底面)の地盤抵抗力(表-4,表-5)
周面抵抗力	kN	27,486	27,131	最大載荷荷重より先端伝達荷重を差し引いた値
先端伝達荷重	kN	3,791	5,490	計測断面8(杭下端)の地盤抵抗力(表-4,表-5)
先端抵抗力度	kN/㎡	2,145	3,107	杭下端の抵抗力を杭の断面積で除した値
N値で除した値		42.9	62.1	先端抵抗力度をN値で除した値(N=50)
閉塞率 η		0.14	0.21	N値で除した値を300で除した値

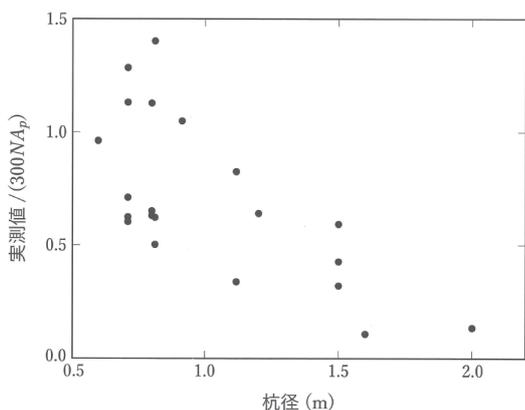


図-9 開端杭の閉塞効果(杭径の影響)(参考文献¹⁾)

3.5 周面抵抗力度の比較

急速載荷試験にて得られた各断面の最大荷重から除荷点法によって求めた地盤抵抗力を、地層内の杭面積で除して求めた周面抵抗力度を表-7に示す。表に示す周面抵抗力度は全落下サイクルの中から最大値を示している。

表-7に示した設計値は、設計の際に港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾に基づいて推定した値を示している。また、設計値の平均値は層厚を考慮して加重平均を行った値である。

港湾の施設の技術上の基準・同解説における周面抵抗力度 r_f の推定式は式(2)、(3)のとおりである。

$$\text{砂質土層の場合} \quad \bar{r}_f = 2\bar{N} \quad (2)$$

\bar{N} : 土層内での平均の N 値

$$\text{粘性土層の場合} \quad \bar{r}_f = \bar{c}_a \quad (3)$$

\bar{c}_a : 土層内での杭と地盤の平均付着力 (kN/m^2)

杭と地盤の平均付着力 c_a は $\phi = 0$ 法による非排水せん断強度 c (実務では一軸圧縮強さ qu の $1/2$ とする場合が多い) と等しいと考えるのが一般的である (上限値は 100kN/m^2 とする)。

表-7 から分かるとおり、試験で確認された周面抵抗力度は全ての層で設計値を上回る結果であった。このように大きな周面抵抗力度を発揮する杭であったことから、計画最大荷重まで載荷しても杭先端に十分な荷重が伝達されなかったと推察される。

表-7 に示すとおり、設計時の周面抵抗力度に対し、載荷試験による周面抵抗力度の実測値は、平均的に見て砂地盤で $2.8N$ (kN/m^2) 程度、粘性土地盤で $1.4c$ (kN/m^2) 程度の値が確保されており、設計時に用いた値の $1.4 \sim 4.0$ 倍となっている。特に Ac2 層については、土質調査の際に一軸圧縮強さから推定した非排水せん断強度 c が非常に小さい値であったことから、設計値が過小となり、実測値との差が大きくなったと考えられる。

表-7 周面抵抗力度の比較

※層厚を考慮した加重平均

No.	土質	名称	深度(m)	層厚(m)	周面抵抗力度(kN/m^2)				
					設計値		測定値		
					平均 [*]	杭①	杭②	平均(比)	
1	粘性土	Ac2層	-30.70	4.6	4.73	4.73	60	143	102 (21.6)
2	砂質土	Asg層	-33.90	3.2	14.00				
3	粘性土	Dc1層	-35.80	1.9	61.58	40.5	98	72	85 (2.1)
4	砂質土	Ds1層	-39.70	3.9	52.00				
5	粘性土	Dc2層	-44.60	4.9	62.00				
6	砂質土	Ds2層	-46.00	1.4	46.59	59.6	144	159	152 (2.6)
7	砂質土	Ds3層	-48.60	2.6	62.00				
8	砂質土	Ds4層	-54.80	6.2	62.00				
9	粘性土	Dc3層	-56.80	2.0	94.00	63.0	199	136	168 (2.7)
10	粘性土	Dc3層	-61.60	4.8	51.50				
11	砂質土	Dg2層	-65.90	4.3	54.00	54.00	178	251	215 (4.0)
12	砂質土	Ds7層	-68.15	2.3	100.00	100.00	195	87	141 (1.4)
			-70.40	4.5	100.00				

4. 杭の設計への反映

今回、支持層への根入れ長を変化させた2本の試験杭(杭①: $2.5D$, 杭②: $4.0D$)にて杭の急速載荷試験を行った結果、2本の試験杭は3.3支持力の確認で触れたとおり、目標値とした $25,000\text{kN}$ 以上であることを確認できた。載荷試験を行う一番のメリットは、実際に現地の支持力を確認することで確実な施工が可能となることである。

また、3.5周面抵抗力度の比較で触れたとおり、周面抵抗力度は設計値より大きな値を得ており、この値を用いて求めた杭①の周面抵抗力度は $28,332\text{kN}$ となる。

基本設計の結果によると、杭頭に作用する軸力は杭の位置により異なるものの、最大でも $25,000\text{kN}$ と推定されており、今回の急速載荷試験結果はこれを上回っている。このことから、実施工に向けた細部設計では全ての杭の支持層への根入れ長を杭①と同じ $2.5D$ とすることとした。根入れ長を短くすることで杭の打設能力が上がるため、材料コストに加え、施工コストも縮減できる可能性がある。この方針で、図-1に示すA列、C列の杭長を見直すと、図-10に示すとおり、A列の杭は 14.25m 、C列の杭は 12.0m 短くすることができる。よって、材料費(直工費)だけでも概算で1億円以上のコスト削減が見込めることが分かった。なお、現在、詳細設計を実施中であり、検討内容は変わる可能性がある。

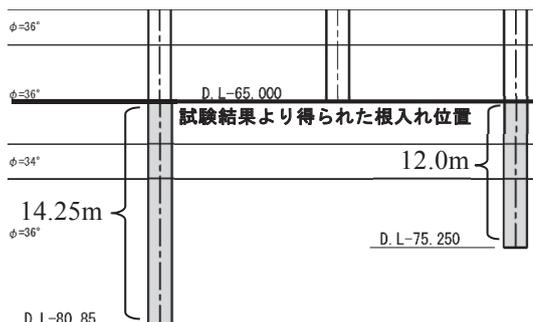


図-10 試験結果による杭長の見直し

5. 杭の施工への反映

5.1 Hiley 式を用いた杭の打止め管理の概要

港湾施設に用いる杭を打撃工法で施工する際は、Hiley 式を用いた打止め管理を行うのが一般的である。Hiley 式とは、ハンマの打撃によって杭に与えられるエネルギーと、杭が地盤に貫入する際になす仕事が等しいと考えることにより導かれる式で、鋼管杭を用いる場合はいくつかの仮定に基づいて簡略化された式(4)が用いられる¹⁾。

$$R_d = \frac{e_f \cdot F}{S + \frac{K}{2}} \quad (4)$$

R_d : 杭の動的抵抗力 (kN)
 S : 杭の貫入量 (m)
 K : リバウンド量 (m)
 F : 打撃エネルギー (kN・m)
 e_f : ハンマ効率 (一般に 0.5 とする)

施工時に計測した杭の貫入量 S とリバウンド量 K を用いて式(4)により杭の動的抵抗力 R_d を算定し、 R_d が目標とした杭の支持力よりも大きいことをもって杭の打止め完了とする施工管理が行われる。

5.2 Hiley 式の補正の考え方

ハイリー式は計算結果のばらつきが大きく、計算で得られる動的抵抗力と載荷試験で得られる杭の支持力との対応関係はあまりよくないことが知られている⁷⁾。そこで、施工時に衝撃載荷試験を行い、また、養生後に杭の支持力を確認するための載荷試験（試験法は任意だが一般的には静的な押し込み試験や急速載荷試験）を行うことで、ハイリー式で計算される動的抵抗力 R_d と載荷試験で得られる杭の支持力が一致するように補正する方法が提案されている⁶⁾。補正の概念図を図 11 に、補正式を式(5)に示す。

$$R_s = \frac{eF}{S + \frac{K}{2}} \times C_f \times S_r \times S_t \quad (5)$$

R_s : 養生後の静的支持力 (静的抵抗) (kN)
 e : ハンマ効率 (施工時の衝撃載荷試験による実測値)
 C_f : 全抵抗補正係数
 S_r : 静的抵抗比
 S_t : セットアップ率

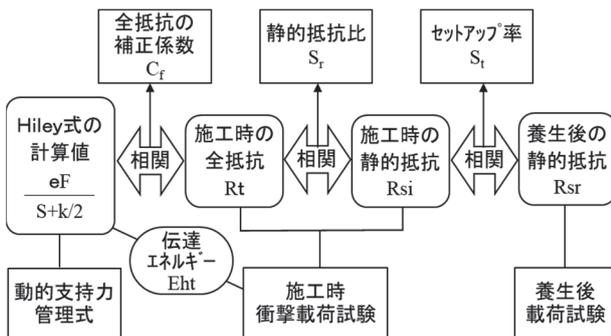


図-11 修正動的支持力管理式の作成フロー⁶⁾

式(5)に示した補正式の第 1 項がハイリー式 (式(4)) に対応するものである。ただし、ハイリー式ではハンマ効率として 0.5 という一般値を用いる (式(4)参照) のに対し、補正式では施工時の打撃エネルギー F と衝撃載荷試験で計測された伝達エネルギー E_{ht} の比を用いる。

まず、補正式の第 1 項と施工時の衝撃載荷試験で計測された全抵抗 R_t の比から全抵抗補正係数 C_f を求める。続いて、施工時の衝撃載荷試験で得られた全抵抗 R_t と静的抵抗 R_{si} の比から静的抵抗比 S_r を、 R_{si} と養生後の載荷試験により得られた杭の支持力 (静的抵抗) R_{sr} の比からセットアップ率 S_t を求める。これにより、杭の施工時に計測される貫入量 S 、リバウンド量 K 、打撃エネルギー F の 3 つのパラメータから、その杭の養生後の (つまり供用時に杭が実際に発揮すると考えられる) 支持力 R_s を式(5)により推定することが可能となる。

このように、事前に施工現場で試験杭に対して施工時の衝撃載荷試験及び養生後の載荷試験を実施して補正式 (式(5)) を作成しておき、実施工の際には各杭の施工時の S 、 K 、 F から式(5)によりその杭の R_s を推定して、その値が目標とした支持力を上回っていることをもって打止めとするのが、補正式を用いた杭の施工管理の方法である。

5.3 載荷試験結果に基づく補正式の作成

杭①の施工記録 (貫入量 S 、リバウンド量 K 、打撃エネルギー F)、施工時の衝撃載荷試験結果 (伝達エネルギー E_{ht} 、全抵抗 R_t 、静的抵抗 R_{si})、養生後の急速載荷試験結果 (養生後の静的抵抗 R_{sr}) と、それらを基に計算されたハンマ効率 e 、全抵抗補正係数 C_f 、静的抵抗比 S_r 、セットアップ率 S_t を表-8 に示す。

表-8 には、文献⁶⁾において過去の国内での試験結果から得られた標準的な値として示されている値を参考のため示している。

表-8 管理式に用いる補正係数

試験杭	杭①	文献 ⁶⁾ の値
貫入量 S	0.005 m	
リバウンド量 K	0.0148 m	
打撃エネルギー F	260 kNm	
伝達エネルギー E_{ht}	212 kNm	
施工時全抵抗 R_t	21,915 kN	
Hiley 式	20,968 kN	
施工時静的抵抗 R_{si}	10,653 kN	
ハンマ効率 e	0.815	平均 0.81
全抵抗補正係数 C_f	1.282	0.75 程度
静的抵抗比 S_r	0.486	概ね 0.50
養生後静的抵抗 R_{sr}	31,277 kN	
セットアップ率 S_t	2.936	最低 2 倍程度
$e \times C_f \times S_r \times S_t$	1.49	

表-8によると今回の試験で得られた e , S_r , S_t は文献⁶⁾に示された標準的な値に概ね合致している。一方, C_r については, 文献⁶⁾で示された値よりも大きな値となっている。しかしながら, 文献⁶⁾に示された過去の試験結果の C_r の値は 0.3~1.3 の間で大きくばらついており, 今回の算定結果はその範囲には含まれている。

本施工においては, 表-8に基づいて得られる式(6)を用いて杭の打止め管理を行う予定である。

$$R_s = 1.49 \times \frac{F}{S + \frac{K}{2}} \quad (6)$$

なお, 表-8には杭①の試験結果に基づく値のみを示しているが, これは4章で述べたとおり今回の荷重試験結果を受けて本設で用いる杭の支持層への根入れ長を杭①と同じ 2.5D としたためである。杭②は支持層への根入れ長が異なるため, 本設杭の施工管理には反映しないこととした。

6. まとめ

今回, 大水深かつ大荷重の係留施設へジャケット式栈橋を採用した。栈橋部は荷役機械が載るため, 杭1本あたりの必要支持力が約 25,000kN と大きく, 杭径は 1,500mm で設計されている。しかし, 大径杭の支持力に関する試験データは少なく, 従来の N 値による静力学的抵抗力算定式での推定の妥当性が担保されないことから, 現地にて試験杭の急速荷重試験を行った。

また, 地盤は, 粘性土層, 砂層, 礫層が互層に続き, 支持層への根入れ長を慎重に検討する必要がある。D.L.-65.9m から現れる N 値 50 以上, 層厚 10m の砂層である Ds7 を支持層としたものの, 直下に N 値 15~20 程度の洪積粘性土層 Dc4 が存在し, 杭の支持層への根入れ長を大きく取り過ぎると杭の先端抵抗が低下する懸念もあった。そこで, 支持層への根入れ長を変化させた 2 本の試験杭にて杭の荷重試験を行った(根入れ長は, 杭①2.5D, 杭②4.0D)。なお, 試験杭は当初設計において杭長が最も短い B 列の杭を用いた (図-1)。

さらに, 大口径杭の閉塞率は既知のデータが少なく, 施工や地盤条件の影響を受けて設計で想定した値を得られない恐れがあり, 信頼性の高い閉塞率を得る必要もあった。

急速荷重試験を行った結果, 支持層への根入れ長が短い (2.5D) 杭①において, 必要とする地盤抵抗力が確保できることを確認できた。また, 周面抵抗力度はすべての層で設計値を上回る結果が得られ, 大きな周面抵抗力を発揮する杭であることが分かった。

周面抵抗力が大きかったため杭先端に荷重が伝達されず, 杭の先端が負担する支持力が設計値より小さかったため開端杭の閉塞率は 0.14 と計算された。杭は限界荷重

まで荷重されていないので, 今回の結果は「閉塞率が 0.14 以上」であることを意味する点に注意を要する。

なお, 杭に大きな周面摩擦力が期待できるため, 杭先端に閉塞率を向上させる対策(十字リブの設置等)を講じることは不要であると判断される。

試験結果を基に A 列, C 列の杭長を見直すと, 図-10に示すとおり, A 列の杭は 14.25m, C 列の杭は 12.0m 短くすることができ, 材料費(直工費)で 1 億円以上のコスト削減が見込めることが分かった。

衝撃荷重試験ならびに急速荷重試験を実施したことで杭に大きな周面抵抗力を期待できること, 支持層への根入れ長を短くできることが確認でき, 事業費のコスト削減につながったことは大きな成果といえる。また, 試験によって得られた結果が信頼できるものと判断できたのは, 文献⁶⁾に整理された既往の試験データとの比較が可能であったことが大きい。

進展する船舶大型化に伴う港湾施設の大水深化によって, 大荷重へ対応するために支持力の大きい大口径杭の需要は増えるものと考えられる。しかし, 大口径の杭については既往の知見が少ない。今回得られた結果が, 杭の支持力推定精度の向上に貢献できることを期待する。

謝辞

本稿の作成にあたり, 試験杭の荷重試験を実施した五洋・井森特定建設工事共同企業体ならびに株式会社地盤試験所, 中国地方整備局宇部港湾・空港整備事務所の各位には多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.694-697, p.1744, 2018.
- 2) 沿岸開発技術研究センター: ジャケット工法技術マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー, No.7, 2000.
- 3) 周南バルクターミナル 施設紹介, <http://www.shunanbulk.jp/facility.html>(参照 2019.5).
- 4) 地盤工学会: 杭の鉛直荷重試験方法・同解説, pp.223-224, 2002.
- 5) 地盤工学会: 杭の鉛直荷重試験方法・同解説, pp.171-222, 2002.
- 6) 菊池喜昭, 水谷崇亮, 森川嘉之: 荷重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, September 2009.
- 7) 沢口正俊: 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, 1983.

(2019 年 6 月 17 日 受付)