

高松港朝日地区岸壁（-7.5m）における 鋼杭試験施工について

高松港湾・空港整備事務所 保全課 井坂 涼楓
高松港湾・空港整備事務所 保全課 竹田 晃
高松港湾・空港整備事務所 保全課 小松 陽祐

高松港朝日地区の岸壁（-7.5m）は、全国的にも施工事例の少ない棚式構造を採用している。岸壁の船尾部から工事に着手し、基礎工の鋼杭を打設したところ、杭の支持力不足が生じた。リカバリー手法を検討するなど対応に苦慮した経緯から、今後施工する標準部においても同様の支持力不足を回避するため、4種類の鋼杭先端形状（ストレート杭、十字リブ杭、井桁リブ杭、テーパ杭）に対して試験施工（衝撃載荷試験）を実施した。本稿では、試験施工の結果に基づいて、施工性・支持力特性・経済性等から標準部の施工に適用する鋼杭形状の選定結果等について報告する。

キーワード 鋼杭，支持力，衝撃載荷試験

1. はじめに

高松港朝日地区には、高松港と神戸港との間に1日4便のフェリー航路が開設されており、小豆島を經由し、本州と四国を結ぶ人流・物流の拠点になっている。当該フェリー航路では、貨物需要の増大やトラックドライバー不足により、近年陸上から海上輸送に切り替える荷主が増えている。このような状況等を踏まえたフェリー大型化等の計画に対応し、複合一貫輸送ターミナル整備事業として岸壁の整備を進めている（図-1）。

岸壁の構造（棚式）は、上部工に棚を設置し、これを鋼管杭で支えることにより、鋼矢板に作用する土圧を低減させる構造となっている（図-3）。これは、重力式や栈橋式と異なり、全国的にも施工事例が少ない岸壁構造である。

現地施工では、岸壁の船尾部から工事に着手し、基礎工の鋼杭を打設したところ、杭の支持力不足が生じたため、リカバリー手法を検討¹⁾し、地盤改良体を構築するなど対応に苦慮した経緯がある。今後、標準部の施工においても同様の支持力不足が考えられるため、施工性向上・コスト削減の観点から鋼杭形状の工夫による支持力確保を目指し、4種類の鋼杭先端形状（ストレート杭、十字リブ杭、井桁リブ杭、テーパ杭）にて鋼杭試験施工（衝撃載荷試験）を実施した。

本稿では、鋼杭試験施工の結果に基づいて、施工性・支持力特性・経済性等から総合的に評価し、今後の標準部に適用する鋼杭先端形状を選定した結果等を報告する。



図-1 位置図

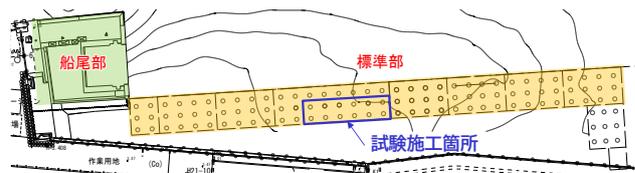


図-2 試験施工箇所

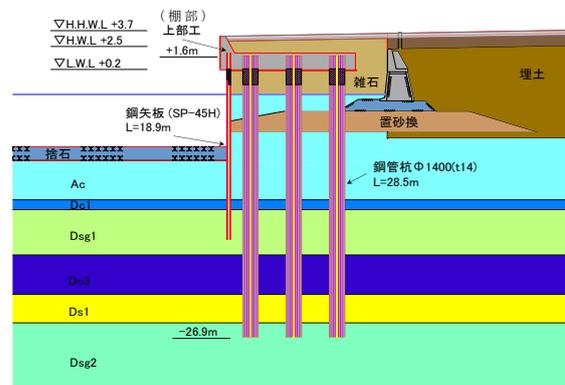


図-3 棚式構造（標準部）

2. 鋼杭試験施工の概要

(1) 4種類の鋼杭先端形状等

4種類の鋼杭先端形状（ストレート杭，十字リブ杭，井桁リブ杭，テーパ杭）を各3本（合計12本）準備し，バイブロ・ハンマにて支持層（Dsg2層）上面まで打設後，油圧ハンマに切り替えて1D（D:杭径1,400mm）根入れさせる．現地支持力の測定（衝撃載荷試験）は，油圧ハンマにて打設する前に，センサー（ひずみ計，加速度計）を鋼管杭に取り付けて行う．

また，油圧ハンマにて打設する際，施工時（支持層上面から根入れ900mm）と養生後（施工時から根入れ500mm）の2回に分けて現地支持力の測定（衝撃載荷試験）を行う．なお，施工時に杭周囲の地盤を乱すことになるため，地盤の回復期間（施工時から2週間以上）を設けて杭の衝撃載荷試験することを養生後と称す．

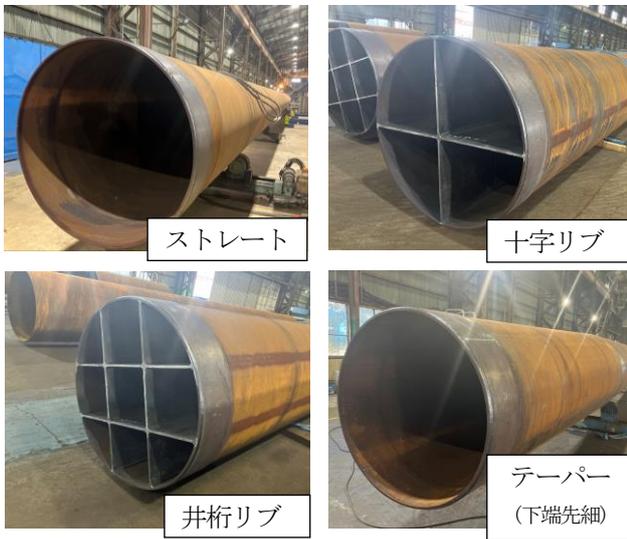


図-4 4種類の鋼杭形状

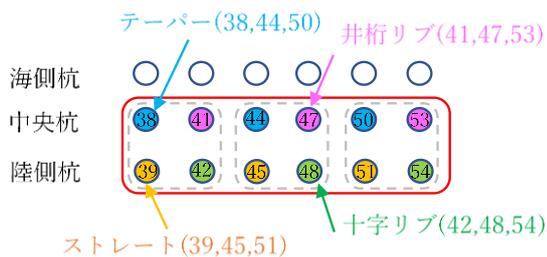


図-5 試験施工の鋼杭配置

(2) ハイリー式の補正

従来，杭の支持力管理は，杭打ちという動的な挙動の過程で計測された杭の貫入量，リバウンド量に基づいて静的な支持力を求めている．近年では，杭の衝撃載荷試験の結果を用いてハイリー式を補正し，従来よりも精度の高い施工管理（現地支持力測定）を行う方法（式1）が提案されている²⁾．

本試験施工で得られた補正值を用いて，標準部の施工

管理（現地支持力の測定）に活用することも目的とする．

・静的抵抗力（支持力） R_p

$$R_{tp} = \frac{eE_0}{S + \frac{K}{2}} \times C_f \times S_r \times S_t \quad \dots \text{式1}$$

ここに， E_0 は杭に投入した打撃エネルギー， S は杭の貫入量， K はリバウンド量である．また， e ， C_f ， S_r ， S_t は補正係数である．

3. 鋼杭試験施工状況の概要

(1) 施工時（R6.1.13～R6.1.24）

試験施工開始直後，テーパ杭をバイブロ・ハンマ（240kW，起振力1,824kN）にて打設中，電流抵抗が大きくなり中間層（Dsg1層）で高止まりが発生した（テーパ杭1本は，施工管理値を超過）．テーパ杭の特徴は，地盤を貫入する際にテーパ部の杭側面で受ける応力を増加させ，地盤とテーパ杭に発生する周面抵抗力の増加を期待したものである．今回，打設中に地盤の乱れが生じるものの，周面抵抗力を増加させる押し抜け効果が卓越し，高止まりが生じたものと推測される（後述）．

テーパ杭以外（ストレート杭，十字リブ杭，井桁リブ杭）は，バイブロ・ハンマにて支持層上面まで打設後，油圧ハンマ（11.5t，打撃エネルギー203kN・m）にて所定の深度まで打ち下げを行った（支持層上面から根入れ900mm）．



図-6 施工時の状況

（左：打設後，右：衝撃載荷試験）

(2) 養生後（R6.2.14～R6.2.15）

地盤の回復期間（2週間以上）を設けて，テーパ杭以外（ストレート杭，十字リブ杭，井桁リブ杭）を油圧ハンマ（13.6t，打撃エネルギー280kN・m）にて所定の深度まで打ち下げを行った（施工時から根入れ500mm）．なお，養生後の油圧ハンマは，井桁リブ等の先端閉塞率の高まりを考慮し，施工時に使用したハンマに比べて，打撃エネルギー約1.3倍のものを使用した．

一方，高止まりしたテーパ杭1本に対して，養生後に油圧ハンマにて打設したところ徐々に杭頭が下がり始め（5mm～10mm/回），施工時の打ち止め高さまで打設することができた．



図-7 養生後の状況
(左：打設後，右：衝撃載荷試験)

(3) 高止まり杭の対応 (R6. 3. 23~R6. 3. 24)

油圧ハンマ (13.6t, 打撃エネルギー280kN・m) にてテーパー杭の打設が可能であることが確認できたため、施工管理値 (水平方向±10cm) を超過したテーパー杭1本の引き抜き方法を検討し、再打設を行った。なお、高止まりが生じた中間層 (Dsg1層) を打ち抜くため、高規格のバイブロ・ハンマ (708kW, 起振力2,579kN) を準備し、引き抜き・打設した後、油圧ハンマ (13.6t, 打撃エネルギー280kN・m) に切り替えて所定の深度まで打設した。また、施工時の打ち止め高さまで打設していた杭についても油圧ハンマにて所定の深度まで打設することができた。



図-8 高止まり杭の解消

4. 衝撃載荷試験結果と鋼杭形状の選定

(1) 現地支持力と必要支持力

衝撃載荷試験結果と必要支持力の比較を表-1に示す。養生後の現地支持力が必要支持力を上回る場合に適用可能と判定した。

結果、ストレート杭は、海側杭に適用することはできないが、中央杭・陸側杭の必要支持力を上回っていた。また、十字リブ杭と井桁リブ杭は、全ての杭 (海側杭・中央杭・陸側杭) に対して必要支持力を上回っていた。

表-1 衝撃載荷試験結果

衝撃載荷試験結果	杭種別	ストレート鋼杭			十字リブ付鋼杭			井桁リブ付鋼杭		
		杭No.	39	45	51	42	48	54	41	47
養生後	周面抵抗 [kN]	2,904	2,832	3,009	2,919	2,993	3,108	3,043	3,069	3,117
	先端抵抗 [kN]	2,116	1,856	2,196	2,659	2,832	2,947	3,369	3,436	3,226
	合計 [kN]	5,020	4,688	5,205	5,578	5,825	6,055	6,412	6,505	6,343
各試験の適用性 (養生後)	設計必要支持力	5,484	5,484	5,484	5,484	5,484	5,484	5,484	5,484	5,484
	判定	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	設計必要支持力	4,318	4,318	4,318	4,318	4,318	4,318	4,318	4,318	4,318
	判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
陸側杭	設計必要支持力	3,522	3,522	3,522	3,522	3,522	3,522	3,522	3,522	3,522
	判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

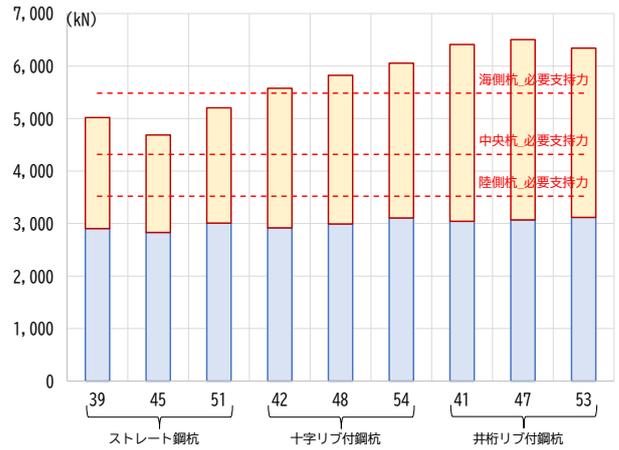


図-9 杭種毎の現地支持力と必要支持力

杭種毎の支持力増加率 (養生後/施工時) の比較を表-2に示す。養生後の増加率は、先端支持力に比べて周面抵抗力の増加率が高い。養生後の周面抵抗力は、施工時の2.2~2.7倍となっており、杭種の違いによる差はない。養生後の先端支持力は、施工時の1.2~1.5倍となっており、増加率は、ストレート杭が最も大きく、十字リブ杭、井桁リブ杭の順で小さい。周面抵抗力の増加率が高かったのは、施工時にバイブロ・ハンマにより杭周面を乱された地盤の回復傾向が大きかったことが要因と考えられる。

表-2 養生後の増加率 (養生後/施工時)

載荷試験結果	杭種別	ストレート杭			十字リブ杭			井桁リブ杭		
		杭No.	39	45	51	42	48	54	41	47
施工時	周面抵抗 [kN]	1,296	1,037	1,214	1,240	1,243	1,242	1,214	1,203	1,202
	先端抵抗 [kN]	1,546	1,421	1,455	2,005	2,007	2,050	2,741	2,828	2,642
	合計 [kN]	2,842	2,458	2,669	3,245	3,250	3,292	3,955	4,031	3,844
養生後	周面抵抗 [kN]	2,904	2,832	3,009	2,919	2,993	3,108	3,043	3,069	3,117
	先端抵抗 [kN]	2,116	1,856	2,196	2,659	2,832	2,947	3,369	3,436	3,226
	合計 [kN]	5,020	4,688	5,205	5,578	5,825	6,055	6,412	6,505	6,343
施工時と養生後の増加率	周面抵抗	2.24	2.73	2.48	2.35	2.41	2.50	2.51	2.55	2.59
	先端抵抗	1.37	1.31	1.51	1.33	1.41	1.44	1.23	1.21	1.22
	合計	1.77	1.91	1.95	1.72	1.79	1.84	1.62	1.61	1.65

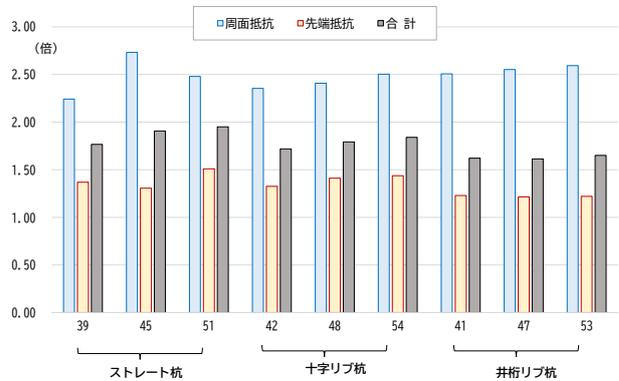


図-10 養生後の増加率 (養生後/施工時)

(2) テーパー杭の現地支持力と高止まり要因

テーパー杭の (施工時) 衝撃載荷試験結果を表-3に示す。

す。周面抵抗力に着目するとテーパー杭は、他の杭の3倍以上の値となっていた。その値は、合計支持力で比較すると、養生後のストレート杭（4,688～5,205kN/本）と同程度であった。

このことから、高止まりの要因は、周面抵抗力の増加が最も影響したものと考えられる。

表-3 テーパー杭の試験結果

衝撃荷重試験結果	杭種別		ストレート杭			十字リブ杭			井桁リブ付杭			テーパー杭
	杭No.		39	45	51	42	48	54	41	47	53	44
	周面抵抗[kN]	1,296	1,037	1,214	1,240	1,243	1,242	1,214	1,203	1,202		4,019
施工時 先端抵抗[kN]	1,546	1,421	1,455	2,005	2,007	2,050	2,741	2,828	2,642		1,228	
合計[kN]	2,842	2,458	2,669	3,245	3,250	3,292	3,955	4,031	3,844		5,247	

(3) 鋼杭先端形状の選定

衝撃荷重試験結果を踏まえて、施工性・支持力特性・経済性等から総合的に評価し、適用する鋼杭先端形状を選定した(表-4)。

地震時及び牽引時に最も支持力が期待される海側杭は、十字リブ杭とし、中央杭及び陸側杭はストレート杭とした。なお、井桁リブ付杭は、必要支持力が十分確保されるものの、経済性より適用は困難とした。テーパー杭は、施工時の高止まりリスクが高いため、高松港朝日地区での適用は困難とした。

表-4 鋼杭形状の選定

杭種	①ストレート杭	②十字リブ杭	③井桁リブ付杭	④テーパー杭
概要	一般に用いられる開端の鋼杭	ストレート鋼杭の先端杭内に延長2D程度の十字リブを設置した鋼杭	ストレート鋼杭の先端杭内に延長2D程度の井桁リブを設置した鋼杭	「テーパー部」と「ストレート部」をもつ、開端の鋼杭
施工性	一般的なハンマ(パイロハンマ240k、油圧ハンマ10-12.5t)で打設可能。(○)	機材は同左。(○)	同左。(○)	パイロハンマ打設中に中間層(0.5g)で高止まりが発生。高松港朝日地区では、今後も施工時の高止まりのリスクが高い。(×)
必要支持力の確保	載荷試験値(kN/本)	必要支持力(kN/本)	載荷試験値(kN/本)	必要支持力(kN/本)
	海側杭	4,688 < 5,484 NG	5,578 > 5,484 OK	6,343 > 5,484 OK
	中央杭	4,688 > 4,318 OK	5,578 > 4,318 OK	6,343 > 4,318 OK
陸側杭	4,688 > 3,522 OK	5,578 > 3,522 OK	6,343 > 3,522 OK	
経済性	最も安価である。(○)	ストレート鋼杭に比べ、材料費が15～20%程度(約80万/本)の増となる。(○)	ストレート鋼杭に比べ、材料費が30～35%程度(約150万/本)の増となる。(△)	ストレート鋼杭に比べ、材料費が30～35%程度(約150万/本)の増となる。(△)
総合評価	経済性が最も優位であり、必要支持力が確保される以下の範囲に適用する。(○) 〔中央杭・陸側杭〕	①案に比べて経済性が劣るものの、必要支持力が確保される以下の範囲に適用する。(○) 〔海側杭〕	②案に比べて経済性が劣る。(△)	施工性より適用不可。(×)

(4) ハイリー式の補正

施工時の貫入量・リバウンド量・ハンマーエネルギーを用いてハイリー式の補正係数を算定した(表-5)。杭種毎に補正係数を算定したことで、今後の標準部の施工管理において、精度の高い現地支持力の測定が可能となった。

表-5 ハイリー式の補正係数

	ストレート	十字リブ杭	井桁リブ杭	テーパー杭
貫入量	S[m]	0.0065	0.0039	0.0031
リバウンド量	K[m]	0.0075	0.0083	0.0089
打撃エネルギー	Eh[kNm]	102	102	102
伝達エネルギー	Eht[kNm]	52	51	58
施工時全抵抗	Rt[kN]	5,863	6,602	7,553
施工時静的抵抗	Rsi[kN]	2,656	3,262	3,943
養生後静的抵抗	Rsr[kN]	4,971	5,819	6,420
ハンマ効率	e	0.513	0.503	0.572
全抵抗補正係数	Cf	1.156	1.036	0.987
静的抵抗比	Sr	0.453	0.494	0.522
セットアップ率	St	1.874	1.783	1.628
補正係数 e×Cf×Sr×St		0.503	0.459	0.480

5. まとめ

高松港朝日地区岸壁(-7.5m)の標準部の支持力不足対策として、施工性向上・コスト削減の観点から鋼杭形状の工夫(ストレート杭、十字リブ杭、井桁リブ杭、テーパー杭)により試験施工(衝撃荷重試験)を実施した。試験施工の結果に基づいて、施工性・支持力特性・経済性等から総合的に評価し、海側杭は十字リブ杭、中央杭・陸側杭はストレート杭とした。一方、試験施工中に生じたテーパー杭の高止まりについては、他の杭に比べて周面抵抗力が3倍以上となり、想定以上の押し抜け効果が影響したものと考えられる。このため、高松港朝日地区での適用は困難としたが、中間層が軟弱で比較的支持層が浅い地盤においては、強力な現地支持力が得られ、経済性に優位であると考えられる。

今後の標準部の施工においては、従来よりも精度の高い施工管理を行う方法に則り、杭の衝撃荷重試験の結果を用いてハイリー式を補正し、施工管理(現地支持力測定)の活用に取り組んでいく。また、海上工事における杭打設時のリバウンド計測は、鋼杭の間近で船外機船上での作業となる。そのため、今後整備する岸壁の標準部において、施工性及び安全性向上を目的に、現地支持力測定への工夫にも取り組んでいく。

鋼杭打設後の支持力不足の対策は、従来、支持力が確保できる深度まで打ち下げる案や地盤改良案など、現場で試行錯誤することが多かったが、本試験施工により、継続工事の効率的な施工に繋がるとともに、他港への応用も期待できるものとする。

謝辞：港湾空港技術研究所基礎工研究グループの水谷グループ長(現所属：国土技術政策総合研究所)には、鋼杭試験(衝撃荷重試験)及び鋼杭形状の選定について、多くのご助言を頂いたことに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 島袋聖也・伊藤春樹・竹田晃：高松港朝日地区岸壁(-7.5m)における杭の支持力不足対策の検討について、令和5年度四国地方整備局管内技術・業務研究発表会、一般部門
- 2) 水谷崇亮：水島港における杭の衝撃荷重試験に基づくハイリー式の補正とその適用範囲の検討、土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 72, No. 2, I_396-I_401, 2016.