

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

高松港湾・空港整備事務所 保全課 島袋 聖也
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 工務課 伊藤 春樹

高松港朝日地区の岸壁（-7.5m）は、全国的にも施工事例が極めて少ない棚式構造になっており、その基礎工の鋼管杭を打設したところ、杭の支持力不足が生じた。そこで、現地の地盤特性を考慮した地盤改良の改良体を構築するための新たな設計手法を検討し、現地試験結果を踏まえて、改良体を杭先端及び内部に構築する対策を講じた。また、新造船就航スケジュールを厳守した岸壁の整備が必要であったため、BIM/CIMモデル等を活用し、現場施工の効率化と安全性向上を図った。本稿では、当該施設における鋼管杭の支持力不足対策及びインフラDXの取り組みについて報告する。

キーワード 防災、地盤改良、インフラDX

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）。

整備範囲は、供用中フェリーの係留岸壁と近接するため、大型作業船の配置が困難である。また、車輛乗降用の可動橋が取り付く船尾部上部工は、潮位等の影響を受けやすい高さで整備することになる。このような状況に対応できる構造形式として、棚式構造を採用した。構造的な特徴は、棚（上部コンクリート）の荷重を鋼管杭で支えつつ、鋼矢板で囲まれた棚下に裏込材を投入し、鋼管杭と鋼矢板に作用する土圧を低減させるハイブリッド的な構造になっている（図-2）。これは、重力式や栈橋式と違って、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、船尾部から着手を開始し、基礎工の鋼管杭を打設したところ、杭の支持力不足が生じた。そこで、現地の地盤特性を考慮した地盤改良の改良体を構築する新たな設計手法を検討した。また、新造船就航スケジュールを厳守した岸壁の整備が必要であったため、BIM/CIMモデル等を活用し、現場施工の効率化と安全性向上を目的としたインフラDXの取り組みを実施した。

本稿では、当該施設における杭の支持力不足対策及びインフラDXに関する取り組みについて報告する。

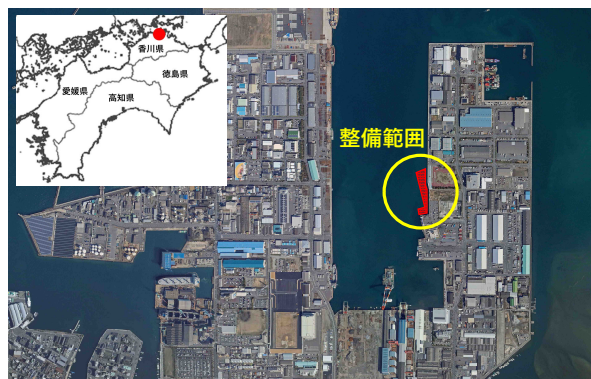


図-1 位置図

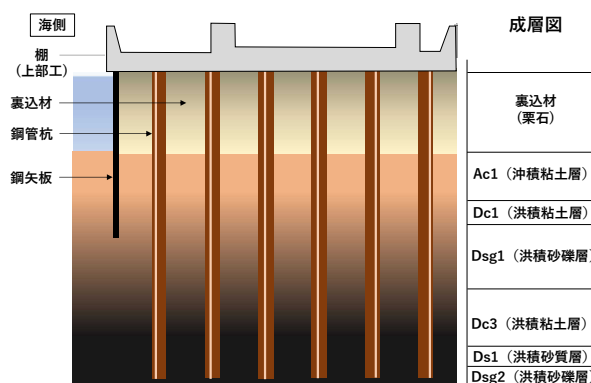


図-2 棚式構造と成層図

2. 鋼管杭支持力算定と結果

(1) 支持力算定

現地施工は、岸壁の船尾部にあたる36本の鋼管杭を打設する計画であった。

現地の支持力は、ハイリー式の動的支持力式を補正して算定した。具体的には、2本（36本の内）の試験杭（No. 16, No. 34）で衝撃載荷試験を実施し、先端支持力が小さい方の試験結果を踏まえた動的支持力式（式（1））より各杭の動的支持力を算定した。

$$R_d = 0.844 \times \frac{F}{\left(S + \frac{k}{2}\right)} \dots \text{式 (1)}$$

ここに、 R_d は杭の動的支持力、 F は打撃エネルギー、 S は杭の貫入量、 K はリバウンド量である。

(2) 支持力結果

各杭の支持力（動的支持力）を算定した結果、36本の内、27本で支持力不足が生じた（図-3）。

法線上（No. 1-No. 31-No. 36）に位置する杭は、4割から6割程度以下であった。最も小さいNo. 13杭の割合は、設計必要支持力の4割以下であった。

法線上の杭は、フェリー係留時や地震時に作用する力を最も負担するため、構造上、特に重要となる。

護岸部法線						船尾部法線					
杭番号	設計必要支持力	動的支持力	動的支持力/設計必要支持力	杭番号	設計必要支持力	動的支持力	動的支持力/設計必要支持力	杭番号	設計必要支持力	動的支持力	動的支持力/設計必要支持力
①	9828kN/本	5307kN/本	0.54	⑬	9828kN/本	3569kN/本	0.36	⑮	7162kN/本	4595kN/本	0.64
②	6353kN/本	4208kN/本	0.66	⑭	9828kN/本	3971kN/本	0.40	⑯	7162kN/本	4458kN/本	0.62
③	5910kN/本	7129kN/本	1.21	⑰	5910kN/本	3907kN/本	0.66	⑰	7162kN/本	3602kN/本	0.50
④	5486kN/本	7942kN/本	1.45	⑱	5486kN/本	6079kN/本	1.11	⑲	7162kN/本	5476kN/本	0.76
⑤	5080kN/本	7099kN/本	1.40	⑳	5080kN/本	7739kN/本	1.52	㉑	7162kN/本	5784kN/本	0.81
⑥	4675kN/本	8429kN/本	1.80	㉒	4675kN/本	7281kN/本	1.56	㉓	7162kN/本	5314kN/本	0.74
				㉔	5341kN/本	5034kN/本	0.94	㉔	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉕	7062kN/本	7062kN/本	1.00	㉕	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉖	5341kN/本	5034kN/本	0.94	㉖	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉗	7162kN/本	5476kN/本	0.76	㉗	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉘	5486kN/本	7942kN/本	1.45	㉘	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉙	5080kN/本	7099kN/本	1.40	㉙	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉚	4675kN/本	8429kN/本	1.80	㉚	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉛	5910kN/本	7129kN/本	1.21	㉛	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉜	5486kN/本	7942kN/本	1.45	㉜	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉝	5080kN/本	7099kN/本	1.40	㉝	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉞	4675kN/本	8429kN/本	1.80	㉞	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㉟	5910kN/本	7129kN/本	1.21	㉟	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊱	5486kN/本	7942kN/本	1.45	㊱	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊲	5080kN/本	7099kN/本	1.40	㊲	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊳	4675kN/本	8429kN/本	1.80	㊳	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊴	5910kN/本	7129kN/本	1.21	㊴	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊵	5486kN/本	7942kN/本	1.45	㊵	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊶	5080kN/本	7099kN/本	1.40	㊶	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊷	4675kN/本	8429kN/本	1.80	㊷	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊸	5910kN/本	7129kN/本	1.21	㊸	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊹	5486kN/本	7942kN/本	1.45	㊹	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊺	5080kN/本	7099kN/本	1.40	㊺	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊻	4675kN/本	8429kN/本	1.80	㊻	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊼	5910kN/本	7129kN/本	1.21	㊼	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊽	5486kN/本	7942kN/本	1.45	㊽	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊾	5080kN/本	7099kN/本	1.40	㊾	9007kN/本	5555kN/本	0.62
				㊿	4675kN/本	8429kN/本	1.80	㊿	9007kN/本	5555kN/本	0.62

図-3 支持力算定

(3) 支持力不足の考察

設計では、土質調査結果を踏まえて砂礫層（Dsg2層）を支持層（平均N値=41.4）と想定していた。鋼管杭φ1,300mmであるが、外径約100mmほどの標準貫入試験とでは、礫当たりによる影響の違いがあり、標準貫入試験でのN値を過大評価した可能性が考えられる。

設計時と載荷試験結果による先端支持力と周面摩擦力

を表-1、表-2に示す。載荷試験結果では、設計時先端支持力の40~50%程度であった。先端支持力を大幅に低下させた要因は、先端地盤N値と開端杭の閉塞率（No. 34杭の設計時閉塞率は0.52）が実際と異なっていた可能性が考えられる。

表-1 載荷試験結果による先端支持力

	No. 16杭（載荷試験杭）	No. 34杭（載荷試験杭）
設計時の先端支持力	6,398kN/本	6,625kN/本
載荷試験時の先端支持力	3,044kN/本	2,486kN/本
載荷試験値/設計値	0.48	0.38

表-2 載荷試験結果による周面摩擦力（A：養生後）

	No. 16杭	No. 34杭
A：載荷試験杭の載荷試験結果の周面摩擦力	3,035 kN/本	3,063 kN/本
B：載荷試験杭の設計周面摩擦力	4,417 kN/本	4,403 kN/本
A/B	0.687	0.696

3. 鋼管杭支持力不足対策

(1) 対策案の比較検討

鋼管杭打設後の支持力不足の対策としては、支持力が確保できる深度まで打ち下げること検討したが、先の試験結果より、大きな効果が得られる可能性は低いと判断し、地盤改良による3案を比較検討した（図-4）。

案①：杭先端部拡幅による先端抵抗の増加

案②：杭内部の改良により先端閉塞率を上げることによる先端抵抗の増加

案③：杭周辺地盤の改良による周面摩擦力の増加

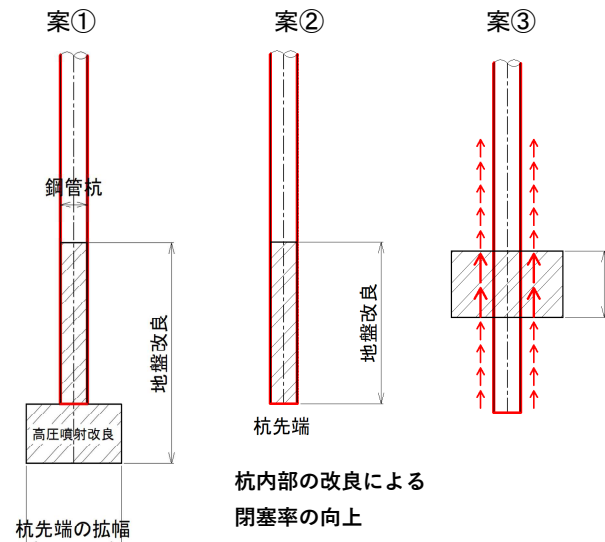


図-4 対策案のイメージ図

(2) 比較検討結果

検討の結果、案②は断面が不成立になり、案①は、案③より改良する体積が小さく経済的であった。

また、現地で確認された周面摩擦力は、設計値の約

70%であるのに対して、現地を確認された先端支持力は設計値の約50%と小さい。そのため、杭先端の改良を行い、先端支持力の増加を図ることが妥当であると判断し、案①で検討を進めることにした。

(3) 設計手法の確立

杭先端面積を拡幅し、先端抵抗の増加を図るための高圧噴射攪拌工法はあるものの、先端支持力や周面摩擦力が極めて小さい現地の地盤特性を考慮した改良体を構築するためには、新たな設計手法の確立が必要であった。

これにあたっては、港湾空港技術研究所の助言等を踏まえて検討し、図-5に示す設計手順を定めた。

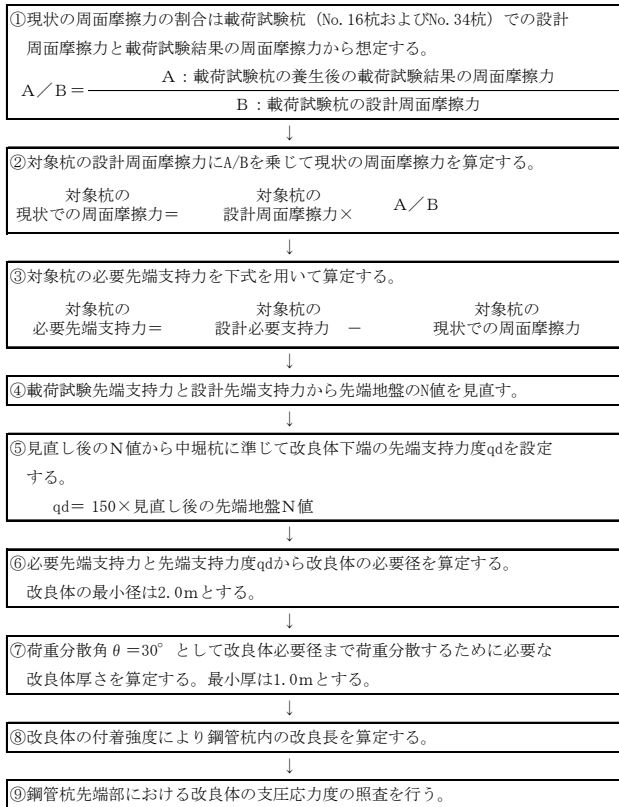


図-5 設計手順

(4) 改良体の設計

設計は、支持力不足の割合が最も大きいNo. 13を対象にした。(以下の○数値は、図-5の設計手順を示す)

1) ①②周面摩擦力の算定

現状の周面摩擦力は、試験結果(表-2)の割合を乗じて、設計で求める周面摩擦力を低減した(表-3)。

2) ③必要先端支持力の算定

必要先端支持力は、設計時の必要支持力から現状の周面摩擦力を差し引いて算定した(表-4)。

3) ④見直し後の先端N値の算定

2. (3)支持力不足の考察を踏まえてN値を見直した。また、見直し後のDsg2層(支持層)のN値36.0(見直し

前, N値=41.4)より、先端地盤N値を算定した(表-5)。

- ・N値に着目し、礫当たり点を除外
- ・Dsg2層のN値を平均値ではなく、最頻値(最も計測個数が多い値)を採用

表-3 周面摩擦力の算定結果

	No. 13杭
C : 対象杭の設計周面摩擦力	4,417 kN/本
A/B	0.696
D : 対象杭の現状での周面摩擦力(=C×A/B)	3,074 kN/本

表-4 必要先端支持力の算定

	No. 13杭
E : 対象杭の設計必要支持力	9,852 kN/本
D : 対象杭の現状での周面摩擦力	3,074 kN/本
E-D : 対象杭の必要先端支持力	6,778 kN/本

表-5 見直し後の先端地盤N値の算定結果

	No. 13杭	
杭先端地盤の上層のN値	N1	36.0
杭先端から上方4φまでの範囲の地盤の平均N値	N2	19.4
杭先端地盤のN値	$N = (N1 + N2) / 2$	27.7

4) ⑤⑥⑦改良体の先端支持力強度qdと形状の算定

改良体下端の先端支持力度qdは、道路橋示方書の中堀杭工法に基づき、 $qd = 150 \text{ N} (= 150 \times 27.7) = 4,155 \text{ kN/m}^2$ とした。なお、必要な改良体先端面積は、必要先端支持力(6,778kN/本)を改良体の先端支持力度qdで除して算定し、最小改良径を2.0mとした。改良体厚さは、必要径まで荷重分散(分散角 $\theta = 30^\circ$)させた時の必要な厚さを算定し、最小厚は1.0mとした。

5) ⑧⑨鋼管杭内の改良長の算定

改良体の付着強度により、鋼管杭内の改良長を算定した。なお、改良体設計基準強度 $q_u = 3,100 \text{ kN/m}^2$ は、必要先端支持力(6,778kN/本)を鋼管杭断面積(1.33m²)で除し、安全率(1.2)を考慮して算定した(表-6)。

表-6 鋼管杭内の改良長の算定結果

	No. 13杭
①改良体設計基準強度 (kN/m ²)	3,100
②付着強度 ①/18 (kN/m ²)	172
③安全率の補正係数	1.2
④必要先端支持力 (kN)	6,778
⑤鋼管杭径 (m)	1.30
⑥鋼管杭板厚 (mm)	15
⑦鋼管杭内周長 (m)	3.99
⑧必要改良長 (m)	12

(5) 改良体の現地施工

設計手法に基づき、杭先端及び内部に改良体を構築した。現地改良体の強度は、設計基準強度を確保し、要求性能を満たす対策を講じることができた。

4. 現場施工の効率化と安全性向上

新造船就航スケジュールを厳守した岸壁の整備が必要であったため、BIM/CIMモデル等を活用し、現場施工の効率化と安全性向上に取り組んだ一例を紹介する。



写真-1 地盤改良施工状況 (左上図：BIM/CIMモデル)

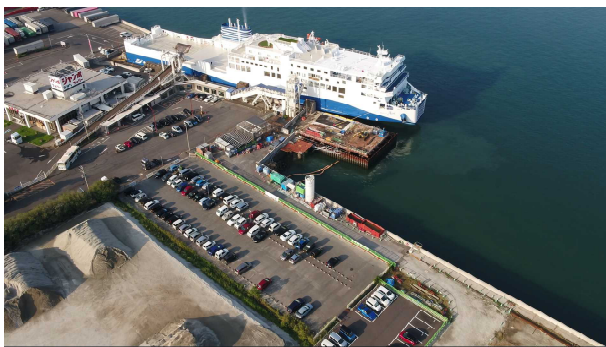


写真-2 新造船係留状況

(1) 現場施工の効率化の取り組み

1) プレキャスト部材の導入

上部工施工は、当初、型枠を組み、場所打ちコンクリートによる施工を計画していたが、船舶の航跡波や潮位変動の影響による海上の作業効率低下が課題であった。

作業効率を高めるため、プレキャスト部材の導入とBIM/CIMを活用して施工手順(3D+時間軸)を検討し、海象の影響を最小限とした施工を行った。また、海上作業(型枠工等)の省人化により安全性も向上した(図-6)。

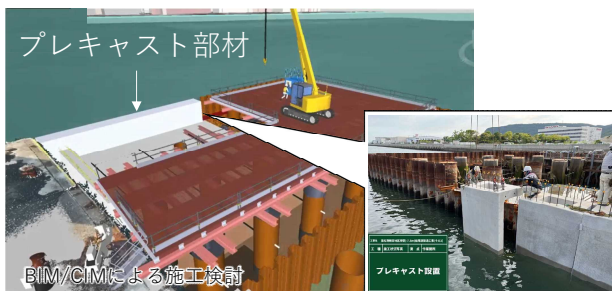


図-6 プレキャスト部材の導入

2) 3Dレーザースキャナの導入

海上の鋼管杭の出来形計測は、従来、船外機船を鋼管杭に横付けし、杭芯にミラーを設置後、トータルステーションにて計測するのが一般的だが、潮位変動が大きいことなどから、作業効率の低下が課題であった。

3Dレーザースキャナによる出来形計測を導入し、複数回の移動と計測により取得した点群データの結合を自動化し、計測作業と事後データ整理の作業時間を削減できた。

(2) 安全性向上の取り組み

1) MR[Mixed reality] (拡張現実) による遠隔臨場

現地施工状況確認は、カメラ映像を通じた遠隔臨場も併用して実施していたが、水中の仮設構造物等が安全に設置できているのか、現場・受注者(支店)・発注者双方で確認する遠隔臨場の可視化が課題であった。

MR技術を加えて、現場の仮想現実をスマートフォンにて投影し、3D化した不可視部分の仮設架台基礎や配筋等と現実空間を重ねた拡張現実空間にて遠隔臨場を実施することで、可視化の効率と安全性が向上した(図-7)。



図-7 MR[Mixed reality] (拡張現実) による遠隔臨場

5. まとめ

本稿では、鋼管杭の支持力不足の対策について、先端支持力や周面摩擦力が極めて小さい高松港朝日地区の地盤特性を考慮した改良体を構築する新たな設計手法等を示した。鋼管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、新たな設計手法の確立により、継続工事の効率的な施工に繋がるとともに、他港への応用が期待できるものと考えている。

また、令和6年4月以降、建設業における時間外労働の上限規制が適用されるため、施工の効率化と安全性向上のためのインフラDXを活用した取り組みは、働き方改革を推進する上で、先駆的な取り組みであると考えている。

今後整備する岸壁の標準部においても同様の支持力不足が懸念されることから、コスト削減・施工性向上を目的に、鋼管杭先端形状の工夫による試験施工にも取り組んでいく。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には、鋼管杭の先端支持力不足対策について、多くのご助言を頂いたことに感謝申し上げます。