

防波堤の粘り強い構造として 鋼管杭を用いた対策断面の検討

高松港湾空港技術調査事務所 後藤 友亮
高松港湾空港技術調査事務所 伊藤 春樹
高松港湾空港技術調査事務所 西岡 周平

既設または新設の重力式防波堤の補強および粘り強い化に資する工法として、鋼管杭を用いた補強工法（以下、鋼管杭式防波堤補強工法）がある。水理模型実験、気中載荷模型実験を含む当該工法の検討は行われているが、設計手法は確立されておらず、現地適用には至っていない。そこで、四国管内防波堤への適用を想定して当該工法を用いた対策断面を検討し、その結果として設計の手引き（案）、現地適用への課題を取りまとめた。

キーワード 防波堤、粘り強い構造、鋼管杭、防災、津波

1. はじめに

南海トラフを震源とする地震、津波が危惧され、その対策は管内の港湾においても喫緊の課題である。高知港における三重防護による地震・津波対策として、発生頻度の高い津波（設計津波）に対しては、津波防護ラインより陸側への津波の浸入を防ぐ「防災」、最大クラスの津波（設計津波を超える規模の津波）に対しては、浸水面積や浸水深の低減、津波到達時間を遅延させ避難時間を稼ぐ「減災」のための対策を図ることとしている。また、最大クラスの津波に対して、堤体構造の安定に重大な影響を及ぼすのを可能な限り遅らせることができる粘り強さを求めている（滑動安全率等 1.0 以上確保）。

重力式防波堤に「粘り強い構造」を持たせる方法の一つとして、腹付工を用いた補強¹⁾があるが、大断面にな

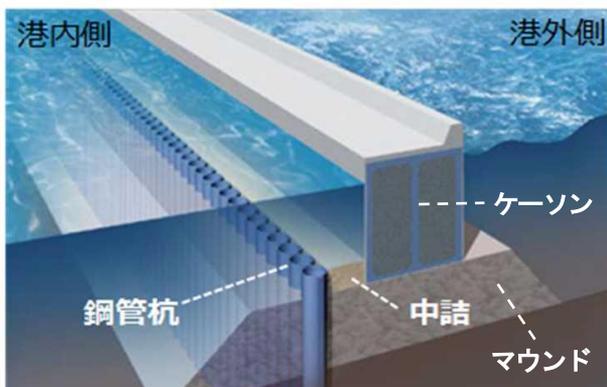


図-1 鋼管杭式防波堤補強工法の概念図
(参考文献¹⁾による図を一部編集)

りやすいため、航路や泊地付近への適用は困難な場合がある。代替方法として、港内側マウンドに鋼管杭を連続的に打設し、ケーソンと杭の間に中詰を施すことにより補強する鋼管杭式防波堤補強工法がある（図-1、図-2）。この機構は、ケーソンに作用した水平荷重が中詰・マウンド・原地盤により杭へ伝達され、杭の剛性と杭背後の地盤の受働抵抗の働きにより防波堤全体の安定性を向上させるものである。既往研究において気中載荷模型実験や水理模型実験による津波に対する検討は多数行われているが（eg. 参考文献²⁾³⁾）、地震に対する検討は不十分と考えられ、その検討を含む現地適用に至るまでの設計手法は確立されていない。

そこで、鋼管杭式防波堤補強工法の現地適用に向けての一助とすることを目的とし、高知港三里地区防波堤（東第一）堤幹部および高知港海岸湾口津波防波堤（堤

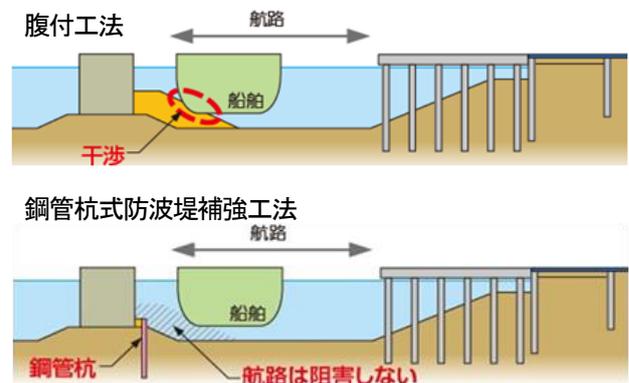


図-2 工法の比較¹⁾

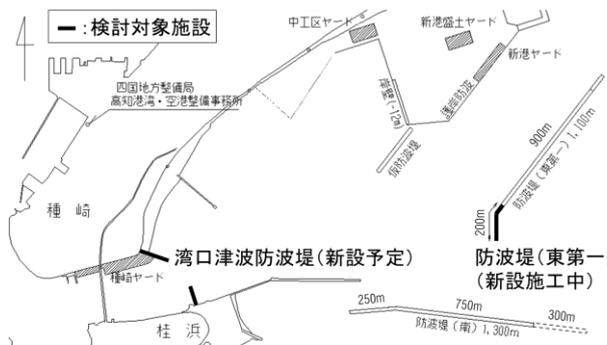


図-3 検討対象施設位置

頭部を含む)を対象として(図-3)、設計手法の具体化、対策断面の検討を行った。

2. 設計手法の検討

(1) 検討条件

参考文献¹⁾に当該工法の簡易的な設計手法による事例が示されている。鋼管杭への作用力として、半無限体に集中荷重が作用したときの解析解(水平荷重; Cerutiの解、鉛直荷重; Boussinesqの解)の重ね合わせにより深度方向の分布荷重を求めることとしている(図-4)。鋼管杭の根入れ長は、港外側から側方応力と主働土圧と杭頭作用力、港内側から受働土圧を作用させ、杭下端中心の杭転倒安全率を照査し、杭転倒安全率が1.2以上を確保するように設定する。鋼管杭断面は、港外側から側方応力と主働土圧と杭頭作用力、港内側から地盤反力バネ(港研方式)を適用し、FRAME解析により、鋼管杭に発生する曲げモーメントが降伏曲げモーメント以下になる杭径、板厚を設定する(図-5)。

本検討では簡易的な設計手法を基にし、三里地区防波堤(東第一)堤幹部を対象に検討ケースを表-1のとおり設け、各種条件を変化させたパラメータスタディを行い、併せて地盤-構造物系の有限要素法による動的有効応力解析プログラムFLIP ROSEを用いて、発生頻度の高い津波に先行する地震(東南海・南海地震)時の堤体の変形を確認した。

(2) パラメータスタディ

検討結果を表-2、一例としてケース1-4の断面を図-6に示す。根入れ深さ、洗掘深さは東南海・南海地震による沈下後(沈下量5.27m)の工事用基準面DLを基準とした深さであり、応力比は降伏曲げモーメントに対する最大曲げモーメントの比である。なお、比較を容易とするため、ケース2-1以下はφ800をベースとして、応力比の変化を把握することとした。

a) マウンドのN値(N値=1、5、10)

マウンドのN値を変化させた検討としては、2-1~2-3の3ケースであり、φ800 t9 (SKK400)を基本的な鋼管

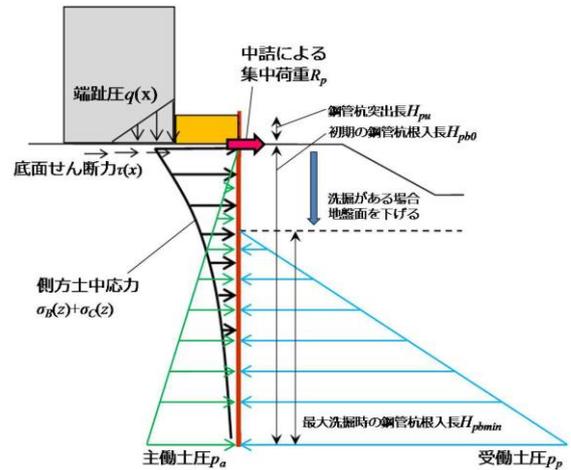


図-4 鋼管杭転倒の照査に関するケーソン-鋼管杭間の荷重の考え方¹⁾

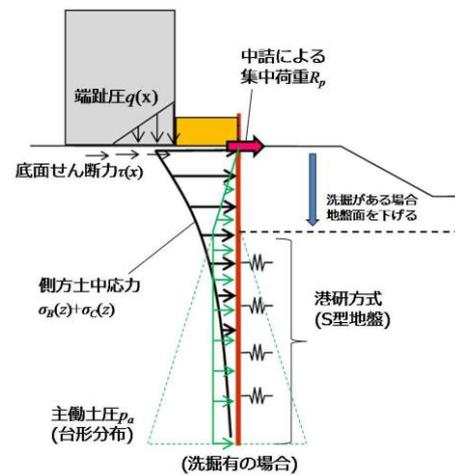


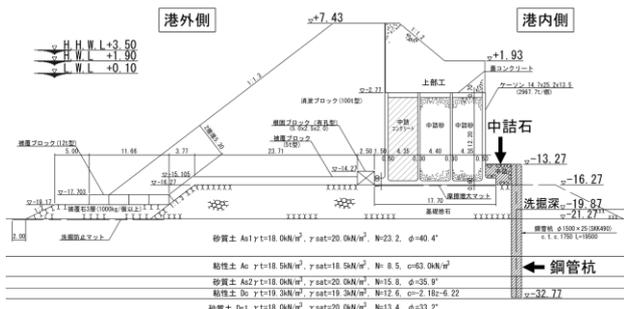
図-5 曲げ応力の照査に関するケーソン-鋼管杭間の荷重の考え方¹⁾

表-1 検討ケース

ケース名	マウンドN値	横方向地盤反力係数	洗掘深(m)	検討対象項目
1-1	10	S型/多層	0	洗掘深
1-2			1.2	
1-3			2.4	
1-4			3.6	
2-1	10	S型/多層	0	マウンドN値
2-2	5			
2-3	1			
3-1	1	S型/単層	0	横方向地盤反力
3-2	10	C型/単層		

表-2 鋼管杭諸元

ケース名	鋼管杭諸元	根入れ深さ(D.L. ±:m)	洗掘深さ(D.L. ±:m)	応力比(%)
1-1	φ1000t11	-24.27	-	94.8
1-2	φ1500t15	-26.77	-17.47	91.0
1-3	φ1500t19	-29.77	-18.67	98.7
1-4	φ1500t25	-32.77	-19.87	99.6
2-1	φ800t9	-24.27	-	58.7
2-2			-	79.3
2-3			-	95.6
3-1	φ800t11	-24.27	-	58.9
3-2			-	7.6



水位は工用基準面D.L.を基準とする

図-6 防波堤（東第一）断面（ケース1-4、沈下後）

杭諸元として、応力比がどの程度となるか確認した。マウンドのN値を10から5に変えることで、応力比は58.7%から79.3%と大きくなり、N値を1とした場合、φ800 t11 (SKK490) とする必要があった。マウンドN値は鋼管杭諸元の設定に大きく影響することが明らかになった。

b) 横方向地盤反力係数の設定

横方向地盤反力係数については、S型多層（各土層のN値が深度に正比例）、S型単層（単一の土層とみなしN値が深度に正比例）、C型単層（単一の土層とみなしN値が深度に限らず一様）の3種類を設定し、鋼管杭諸元を一定のφ800 t11 (SKK400) とした。S型/多層・単層を比較すると、ケース2-3、3-1の応力比は95.6%、58.9%であり、単層とすることで約6割となり、さらにC型として扱うことで応力比7.6%まで低減した。しかし、地盤条件やマウンド厚も影響することから、画一的な設定は難しい。

c) 洗掘深（洗掘深0m、1.2m、2.4m、3.6m）

洗掘深の違いについては1-1~1-4の4ケースが対象となる。洗掘が全くない場合と3.6m洗掘時では、鋼管杭はφ1000 t11からφ1500 t25と大きく異なり、洗掘深が鋼管杭の設計に大きく影響することが明らかになった。

(3) 地震応答解析

地震応答解析結果を表3に示す。当該工法により対策したケース1-4と対策なしの結果を比較すると、当該工法を用いることにより堤体の変位量が約2m、傾斜角が約6°小さくなった。当該工法を用いることにより堤体変形を低減できることが明らかになった。沈下後天端高も津波高より高く、津波が越流しないことを確認した。

表-3 地震応答解析結果（ケース1-4と対策なし）

対象地震動	東南海・南海	
	有	無
当該工法による対策の有無	有	無
水平変位 (m)	-0.96	-2.75
鉛直変位 (m)	-2.45	-4.61
傾斜角 (°)	-4.86	-10.80
沈下後天端高 (D.L.;m)	8.40	6.25
津波高 (D.L.;m)	7.40	

3. 湾口津波防波堤への適用検討

2章のパラメータスタディの結果を基に、簡易的な設計手法により、湾口津波防波堤を対象として表4のとおりに現地条件に合わせたパラメータを設定し、鋼管杭を設計した。また、粘り強さの発揮基準は堤体全体の安定性を鋼管杭で確保するものとし、鋼管杭の転倒安全率1.0以上、鋼管杭の発生モーメントが全塑性モーメント以下であることとした。

図7に示す設計した対策断面に対して、発生頻度の高い津波に先行する地震（東南海・南海地震）時、および最大クラスの津波に先行する地震（南海トラフ巨大地震）時の堤体の変形や鋼管杭での応力の発生状況を確認するため、地震応答解析を行った。

表5に解析結果、図8に地震後の残留変形図を示す。発生頻度の高い津波に先行する地震（東南海・南海地震）に対して、津波が越流しないために必要な天端高（D.L.+8.80m）を確保していることを確認した。またマウンド、基礎地盤が沈み、堤体が前面に傾き、中詰石が大きく沈下するという変形を示した。ただし、地震時の挙動について、解析結果が実現現象を表現できているかどうかを実験等により確認する必要がある。

表-4 パラメータ設定

設定項目	設定値・条件	摘要
マウンドN値	0	安全側の条件
海底地盤N値	20、30	現地地盤条件を参照し2ケース比較
横方向地盤反力係数	C型/多層	現地地盤条件を参照
洗掘深 (m)	0	計算値：1m未満
広域地盤沈降量	考慮する	-

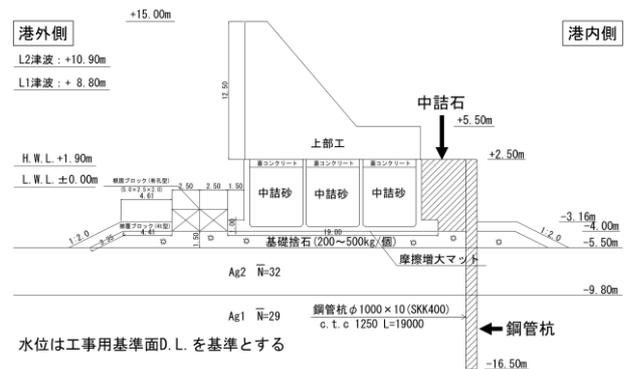


図-7 湾口津波防波堤の対策断面

表-5 地震応答解析結果

対象地震動	東南海・南海	南海トラフ
	洗掘深 (m)	0
杭長 (m)	19.0	
根入れ深さ (D.L.;m)	-16.5	
鋼管杭寸法	φ1000×t10	
杭間距離	250mm	
水平変位 (m)	-1.34	-1.71
鉛直変位 (m)	-3.86	-3.61
傾斜角 (°)	4.0	4.0
沈下後天端高 (D.L.;m)	8.80	9.50
津波高 (D.L.;m)	8.80	10.90

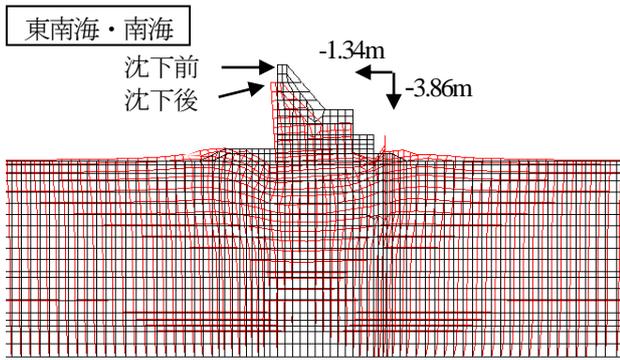


図-8 残留変形図

4. 堤頭部への適用検討

湾口津波防波堤を対象に、堤頭部への当該工法適用に向けて検討した。平面図（図-9）、断面図（図-10）を作成して堤頭部の形状を確認した。適用への課題として以下の点が挙げられる。

- ・マウンドと中詰石の天端高が異なるため、航路側にすりつけが必要となり、波浪来襲時に波高の増大が懸念される。
- ・航路側、港内側の鋼管杭を先行して施工するため、ケーソンの設置を港外側から行う必要がある。
- ・鋼管杭の天端が水面下となるため、ブイ等による船舶航行への配慮が必要となる。

図-9、10 のとおり、航路隣接部に当該工法を用いる場

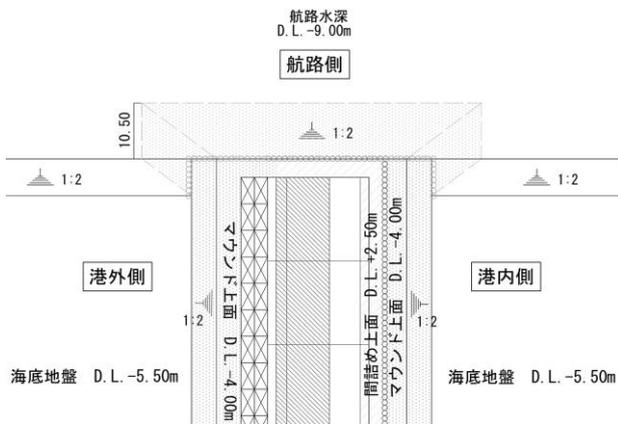


図-9 堤頭部平面図

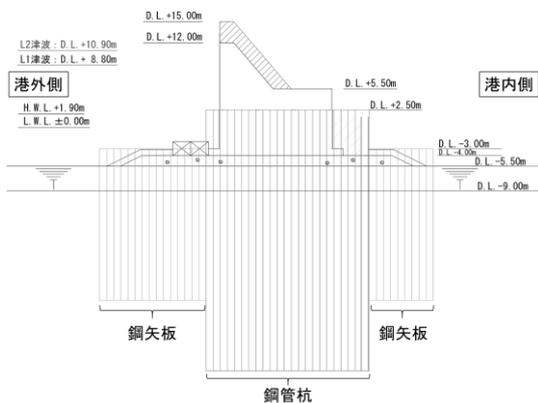


図-10 堤頭部断面図

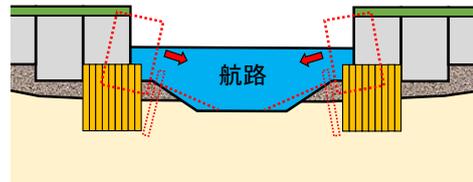


図-11 航路側への変形イメージ

合、防波堤背後だけでなく側面にも鋼管杭を打設する必要がある。発生頻度の高い津波に先行する地震動に対して、地震応答解析により図-11のような航路側への変形を照査した結果、鋼管杭は航路側へ2m程度移動し、中詰石天端が大きく沈下した。中詰石の沈下が予想される場合、余盛り等の対策を予め講じる必要がある。

5. まとめ

高知港を対象として鋼管杭式防波堤補強工法の適用性について検討を行った。湾口津波防波堤において、地震、津波に対して性能を満たすこと、最大クラスの津波に対して「粘り強い構造」を持たせられることを確認した。堤頭部において、地震時に鋼管杭が航路側へ変形する可能性があることを確認した。本検討成果を以下に記す。

- ・簡易的な設計手法におけるパラメータ設定値は鋼管杭諸元に大きく影響することを明らかにした。
- ・当該工法を適用することで、地震時の防波堤本体の変形量（水平、鉛直等）を大幅に低減できることを明らかにした。
- ・本検討結果を設計の手引き（案）として整理した。

6. 今後の課題

今後の課題を以下に記す。

- ・設計手法については、既往研究成果等をさらに収集・整理し、検証を進めていく必要がある。
- ・地震時の挙動については、地震応答解析結果との整合等を実験等により確認する必要がある。
- ・岩盤への当該工法の適用については、設計手法の違いにより必要根入長が大きく異なる可能性があり、本検討における設計手法の適用限界を含め整理する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン、平成25年9月（平成27年12月一部改訂）
- 2) 及川森、菊池喜昭、河邊翔平、水野竜太、森安俊介、田中隆太、妙中真治：鋼壁を用いた防波堤補強工法に関する気中載荷実験、地盤工学会特別シンポジウム発表論文集、pp.703-709、2014
- 3) 有川太郎、及川森、森安俊介、岡田克寛、田中隆太、水谷崇亮、菊池喜昭、八尋明彦、下迫健一郎：港湾空港技術研究所資料、No.1298、2015