

鋼管杭を用いた防波堤の粘り強い対策の適用性に関するケーススタディー

王丸 冬二*・谷島 義孝**・山部 道***・伊藤 春樹****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 関西支部

*** 株式会社 日本港湾コンサルタント 水理部

**** 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所

東日本大震災以降、南海トラフ巨大地震津波への対策として、太平洋に面した港湾の防波堤では、粘り強さを付加する検討が進められている。また、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」が一部改訂され、民間企業等の技術の一つとして「鋼管杭式防波堤補強工法」が記載されている。新たな対策工法が開発されているものの、具体的な現地への適用についてはさらなる検討が必要である。本稿では鋼管杭式防波堤補強工法を対象に、具体的な防波堤断面を検討した結果を報告するものである。

キーワード：耐津波設計，鋼管杭，粘り強い構造，地震応答解析

1. はじめに

従来、粘り強い対策として防波堤背後に腹付工設置を計画することがあるが、航路や泊地に近接しているために腹付工の施工が困難な場合があり、新たな粘り強い対策が求められている。平成 27 年 12 月、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」¹⁾ (以下、ガイドライン) が一部改訂され、民間企業等が開発した技術として、「鋼管杭式防波堤補強工法」が記載されている。この工法は、防波堤の港内側マウンドに連続的に鋼管杭を打設し、ケーソンと鋼管杭の間に僅かな中詰を施すことにより、防波堤を補強する工法である。ガイドラインの中では、津波作用時における鋼管杭仕様の検討法や洗掘が発生した際の安定性照査については記述されているが、地震や地震作用後の津波来襲に対する検討手法は示されておらず、安定性の評価は設計者に委ねられている。

今回のケーススタディーでは、「鋼管杭式防波堤補強工法」を様々な現場条件を想定し、対応可能な鋼管杭の規格を検討した。また、地震作用時の変形照査を実施し、粘り強い構造となっているかを確認した。

2. 検討内容と方法

2.1 検討断面

検討対象は以下の条件から基本断面(図-1, 2)を選定し、腹付工を設置した対策断面をベースに鋼管杭補強工法を検討した。

- ・防波堤構造として腹付対策が検討されている。
- ・津波水位が高く、高波浪も作用するなど設計条件が厳しく、対策効果が期待できる。
- ・防波堤の基礎地盤に軟弱な砂地盤があるため、液状

化により補強杭の挙動が変化する可能性がある。

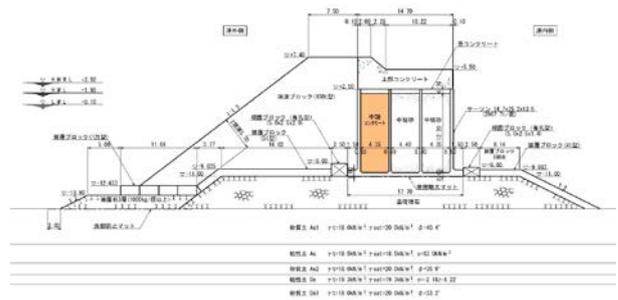


図-1 現況断面図

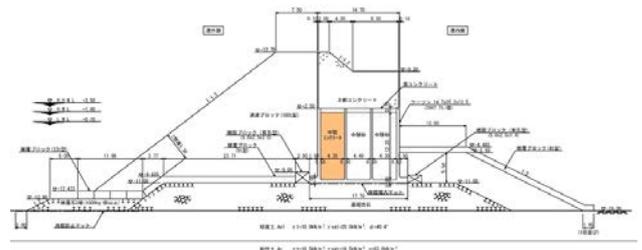


図-2 対策断面図(腹付工)

2.2 検討条件

断面の設定にあたっては、以下の前提とする。

- ・防波堤の断面形状は、上部工嵩上げ後(D.L.+12.7m)とする。
 - ・防波堤は発生頻度の高い津波に先行する地震による沈下を考慮する。
 - ・防波堤の港内側天端高はD.L.+7.2mとする。
 - ・復旧期間中の設計波を50年確率波とする。
- 検討対象の防波堤は、長大で被災後の復旧に数十年を

要すると想定されるので、通常、復旧期間中の設計波に10年確率波を使用するところを50年確率波を使用する。

3. 鋼管杭式防波堤補強工法

3.1 鋼管杭式防波堤補強工法の概要

鋼管杭式防波堤補強工法は、防波堤の港内側マウンドに連続的に鋼管杭を打設し、ケーソンと鋼管杭の間に僅かな中詰を施すことにより、防波堤を補強する工法である(図-3)。

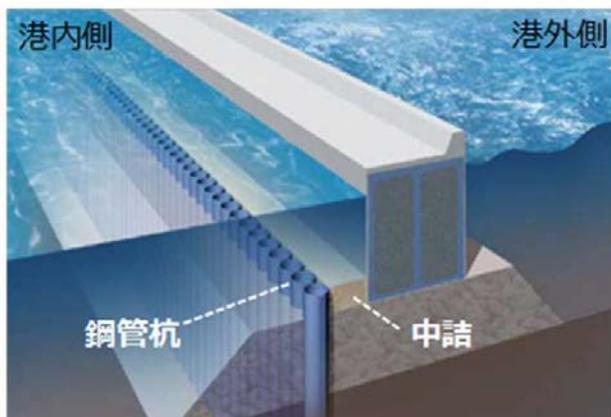


図-3 鋼管杭式防波堤補強工法の概要 (防波堤の耐津波設計ガイドライン)

表-1 設計条件

項目	設計条件
鋼管杭	最大径はφ1500 (SKK490)
杭とケーソンの間隔	3m (気中載荷模型実験結果 ²⁾ を参考)
突出長	3.0m (1/6Hc (Hc:壁面高))
杭間距離	0.25m (中詰石がこぼれ出ない程度)
中詰石の規格	基礎捨石と同程度 (200 ~ 500 kg/個)
地盤	S型地盤と仮定
防波堤天端高	港外側: D.L.+12.7m (沈下後 D.L.+7.42m) 港内側: D.L.+7.2m
地盤沈下量	5.27m (発生頻度高い津波に先行する地震動)

鋼管杭への作用力は、半無限体に集中荷重が作用したときの解析解(水平荷重; Cerruti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。

鋼管杭の根入れ長は、港外側から側方応力(上記の方法による)+主働土圧+杭頭作用力、港内側からは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以上を確保できるよう根入れ長を設定する(図-4)。

杭断面の設定は、港外側から側方応力の合力+主働土圧+杭頭作用力、港内側からは地盤反力バネ(港研方式)を適用し、FRAME解析により、杭に発生する曲げモーメントが降伏モーメントより小さくなる(最大曲げモーメント/降伏曲げモーメント=応力比<1)になる杭径、板厚を設定する(図-5)。

モーメント/降伏曲げモーメント=応力比<1)になる杭径、板厚を設定する(図-5)。

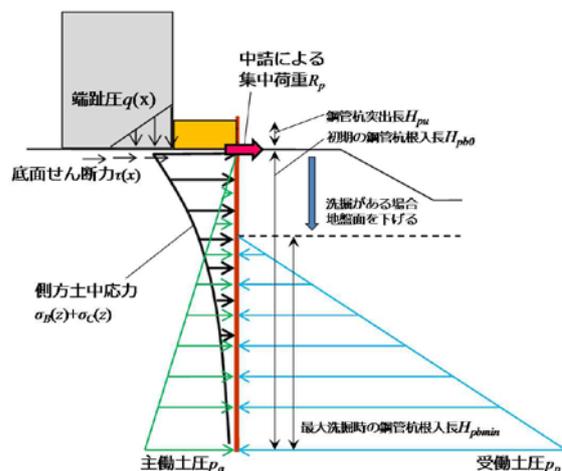


図-4 転倒の照査に関するケーソン-鋼管杭間の荷重の考え方(防波堤の耐津波設計ガイドライン)

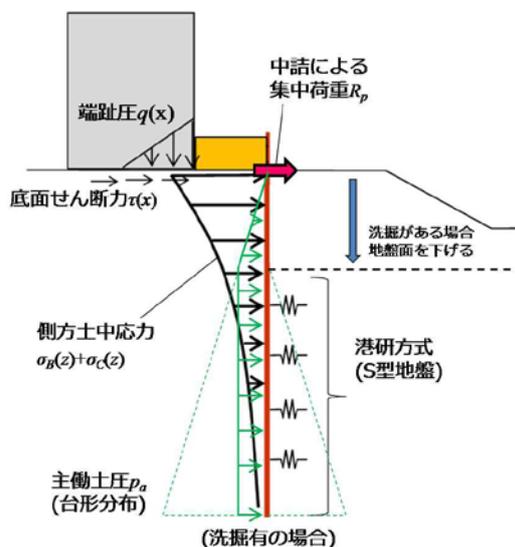


図-5 曲げ応力の照査に関するケーソン-鋼管杭間の荷重の考え方(防波堤の耐津波設計ガイドライン)

3.2 検討条件

鋼管杭式防波堤補強工法での横方向地盤反力について、ガイドラインでは港研方式におけるS型地盤の係数を用いている。しかし、実際の地盤は複雑であり、表層のマウンドについても適切に設定する必要があることから、別の設定方法を検討する。鋼管杭自体は一定の間隔で打設されるものであり、設計条件としては直杭式横栈橋の杭に類似していると考えられることから、栈橋構造における横方向地盤反力係数の設定の考え方を参考にした。

港湾の施設の技術上の基準・同解説P. 1112(直杭式横栈橋)にチャンの方法を用いる場合は、 $K_h=1.5 N (N/cm^3)$ の式を用いて良いとなっている。ただし、捨石の横方向地盤反力係数については、この式で求められる値より低いとする現地観測結果もあるとされている。菊池らの実験³⁾によれば、「一般には捨石地盤をN値10~20として

地盤反力係数を推定しがちであるが、今回の試験結果では捨石層の横方向地盤反力係数はそのような想定によるものよりかなり小さな値を示した。」とあり、マウンドの係数を確定的に決めることは難しい。

以上のことを踏まえ、以下の①～④の項目についてパラメータスタディを実施することとし、特に①、②について横方向地盤反力係数を設定して、鋼管杭断面への影響を検討した。

- ① マウンド
- ② 複合地盤
- ③ 鋼管杭間隔
- ④ 洗掘深

表-2 断面検討ケース

ケース名	マウンドN値	横方向地盤反力係数	洗掘深(m)	部分係数の設定(構造解析係数)	目的
1-1	10	S型/多層系	0	部分係数あり(L68)	洗掘深の影響
1-2			1.2		
1-3			2.4		
1-4			3.6		
3-1	10	S型/多層系	3.6	部分係数なし(L100)	部分係数、洗掘深
3-2	10		0		マウンドN値の影響
3-3	5				
3-4	1		0		横方向地盤反力の影響
4-1	1	S型/単層			
4-2	10	C型/単層	0		

部分係数については新構造のため明確な指標はない。そこで参考値として、矢板式係船岸における「L1 地震時の変動状態の構造解析係数」 $1.12(=\sigma_y/\sigma a')$ と「永続状態(作業時)」 $\sigma a=\sigma a'/1.5$ から、「永続状態(作業時)の構造解析係数」を $\sigma_y/\sigma a=\sigma_y/(\sigma a'/1.5)=1.5 \times 1.12=1.68$ と設定した。

3.3 検討結果

(1) マウンド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、「3-2」～「3-4」の3ケースであり、 $\phi 800$ t9 (SKK400) を基本的な鋼管杭諸元として、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% → 79.3%と大きくなり、N値=1とした場合、 $\phi 800$ 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分かった。

(2) 横方向地盤反力係数の設定

横方向地盤反力係数の設定については、S型多層系、S型単層、C型単層の3種類があり、鋼管杭諸元を一定の $\phi 800$ t11 (SKK400) とし、応力比がどの程度となるかを確認している。但し、本検討での多層系とはマウンドとAs1層との2層であり、多層系とする評価が難しい。

多層と単層の違いとして「3-4」「4-1」の応力比も95.6%、58.9%と単層とすることで約6割となり、C型として扱うことで更に応力比7.6%まで低減した。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。

(3) 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 $\phi 1000$ t11 → $\phi 1500$ 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分かる。

また、部分係数の有無について、「1-4」、「3-1」で比較したところ、構造解析係数が1.68 → 1.00となることで、鋼管杭は $\phi 1500$ t25 → $\phi 1000$ t19 と大きく変化した。現時点では明確な構造解析係数が決まっていないため、部分係数の設定には注意が必要である。

表-3 鋼管杭諸元

ケース名	鋼管杭諸元	根入れ深さ※1 (D.L.±:m)	洗掘深さ (D.L.±:m)	応力比※2 (%)
1-1	$\phi 1000$ t11 (SKK490, L=11.0m)	24.27	-	94.8
1-2	$\phi 1500$ t15 (SKK490, L=13.5m)	26.77	17.47	91.0
1-3	$\phi 1500$ t19 (SKK490, L=16.5m)	29.77	18.67	98.7
1-4	$\phi 1500$ t25 (SKK490, L=19.5m)	32.77	19.87	99.6
3-1	$\phi 1000$ t19 (SKK490, L=19.5m)	32.77	19.87	96.2
3-2	$\phi 800$ t9 (SKK400, L=11.0m)	24.27	-	58.7
3-3	$\phi 800$ t9 (SKK400, L=11.0m)	24.27	-	79.3
3-4	$\phi 800$ t11 (SKK490, L=11.0m)	24.27	-	95.6
4-1	$\phi 800$ t11 (SKK490, L=11.0m)	24.27	-	58.9
4-2	$\phi 800$ t11 (SKK490, L=11.0m)	24.27	-	7.6

※1：根入れ深さ、洗掘深さは沈下想定後(沈下量5.27m)のD.L.を基準とした深さ
 ※2：応力比は最大曲げモーメント/降伏曲げモーメント

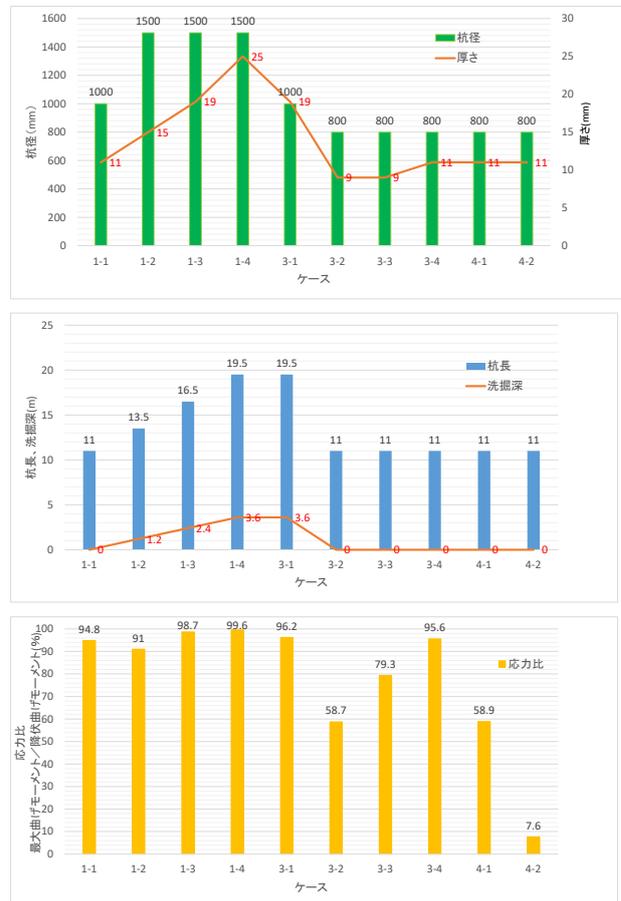


図-6 安定計算から算定した鋼管杭諸元と応力比

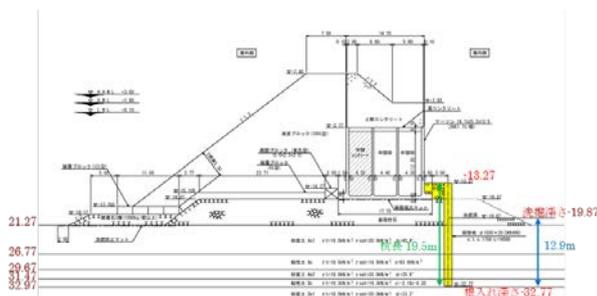


図-7 鋼管杭式防波堤補強工法の諸元「1-4」

4. 地震応答解析

鋼管杭式防波堤補強工法を実施した場合の、地震時の防波堤の変形や鋼管杭への応力の発生状況をここでは、FLIP により地震応答解析を実施した。以下に検討ケースを示す。

本検討ではすべてのケースで、既往検討において地殻変動量を含めた沈下量が大きくなる「東南海地震」（発生頻度の高い津波に先行する地震動）を対象とした。

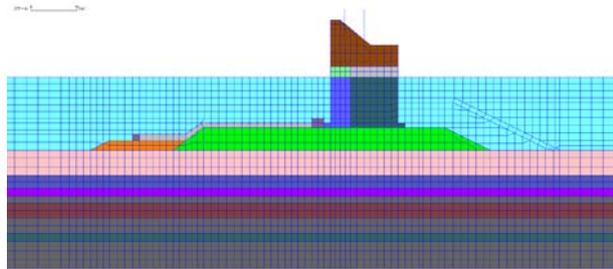


図-8 地震応答解析検討モデル

表-4 解析条件

解析ケース	1-4	1-3	1-1
洗掘深(m)	3.6	2.4	0
杭長(m)	19.5	16.5	11.0
根入れ深さ(D.L.;m)	-27.5	-24.5	-19.0
鋼管杭寸法	φ1500×t25	φ1500×t19	φ1000×t11
杭間距離	250mm	250mm	250mm
液状化	考慮	考慮	考慮

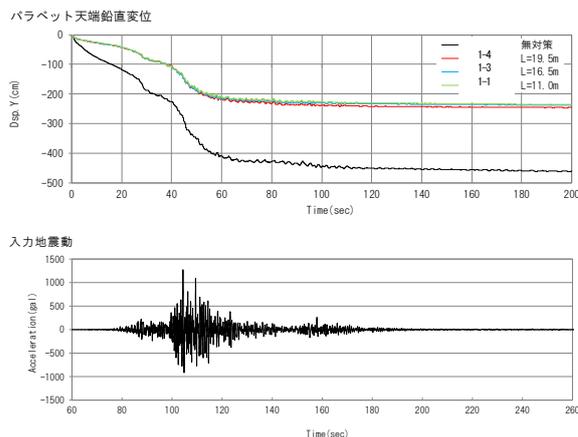


図-9 入力地震動と天端高鉛直変位（沈下量）

鋼管杭式防波堤補強工法を実施した場合のFLIP 解析結果を表-5 に示す。無対策の場合と比較すると鋼管杭を打設することで防波堤直下部分の地盤変形量が抑制され、堤体の沈下量、傾斜角ともに大きく改善することが分かる。また、いずれのケースも沈下後天端高では必要天端高 D.L.+7.4m を満足しており、鋼管杭に降伏を超える曲げも発生していない。

表-5 地震応答解析結果

解析ケース	無対策	1-4	1-3	1-1
水平変位 (m)	-2.75	-0.96	-0.87	-0.96
鉛直変位 (m)	-4.61	-2.45	-2.37	-2.35
傾斜角 (°)	-10.80	-4.86	-4.29	-4.51
沈下後天端高(D.L.;m)	+6.25	+8.40	+8.48	+8.50
最大曲げモーメント(kNm)	—	4868.7	1883.0	395.3
降伏曲げモーメント(kNm)	—	13235.8	10181.2	2632.9
判定	—	O. K.	O. K.	O. K.

5. まとめ

今回の検討ケースにおいては以下のことが確認された。

- ①鋼管杭式防波堤補強工法の適用に当たっては、マウンド部分の横方向地盤反力係数の設定や地盤条件を適切に設定することで適切な鋼管杭諸元を設定することが重要である。
- ②地震応答解析の検討では、消波ブロック被覆堤に鋼管杭式防波堤補強工法を行うことで、防波堤の沈下を抑制する傾向が確認できた。

鋼管杭式防波堤補強工法の適用に向けての今後の課題としては、杭間隔の考慮や既設マウンドへの鋼管杭の打設工法などがあり、これらを解決することでより経済的な断面設計が可能になると考えられる。さらに、地震動による防波堤の沈下と防波堤天端の嵩上げに加えて、鋼管杭の諸元も含めて繰り返し検討による経済的な断面設定するスキームとなることが設計実務上の課題と考えられる。

謝辞

本稿は、国土交通省四国地方整備局発注の「平成 28 年度 管内技術課題検討業務」での成果の一部をまとめたものである。本業務の検討にあたり管内技術課題検討会（港湾空港技術研究所 水谷崇亮氏，鈴木高二朗氏，大矢陽介氏）から貴重なご助言をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

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 27 年 12 月一部改訂)，pp16-26, 2015.
<http://www.mlit.go.jp/common/001114049.pdf>
- 2) 及川ら：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，地盤工学特別シンポジウム，2014.
- 3) 菊池ら：捨石地盤の横方向地盤反力係数，土木学会第 53 回年次学術講演会，1998.