


1/17

鋼杭により補強された混成防波堤構造に関する水平抵抗特性

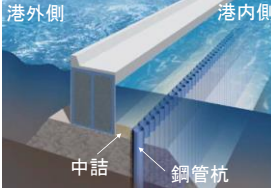
東京理科大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 毛利惇士



2/17

鋼管杭式防波堤補強工法

港外側 港内側



1) ケーソンの背後に鋼管杭を連続的に打設
2) ケーソンと杭の間に中詰を配置


日本製鉄資料に加盟

- 鋼管杭を打設することで、**地盤の受働抵抗**を利用し、防波堤の安定性向上を期待。
- これまでに、本構造における抵抗メカニズムや地盤挙動について検討がなされている。

▶ 杭の設計法確立へ向けた検討

水理模型実験(既往の研究①) 3/17

← 越流方向



有川ら¹⁾は、本構造における水理模型実験を実施し、津波越流時のケーソンの安定性について検討を行った。

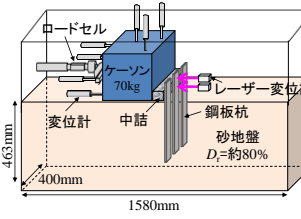
◆ 主要な結論

- ✓ 津波越流時においてもケーソンの抵抗力は増加する。
- ✓ 鋼杭とケーソンの間の洗堀が抑制されることでケーソンの安定性が向上する。
- ✓ 本構造における主要な破壊モード ⇒ 杭転倒モードとケーソン転倒モード

1) 有川太郎・及川森・森安俊介・岡田克寛・水谷崇亮・菊池嘉昭・八尋明彦・下迫健一郎(2015): 鋼杭による防波堤補強工法の越流時における安定性に関する研究。港湾空港技術研究所資料, No.1298, pp.1-44.

模型気中載荷実験(既往の研究②) 4/17

勝呂・菊池ら^{2,3)}は、模型気中載荷実験を実施し、**鋼杭や中詰の仕様の違い**が補強効果に及ぼす影響について検討を行った。



- ▶ **模型地盤**
 硅砂5号(乾燥砂)
 土粒子密度 $\rho_s=2.65(\text{g/cm}^3)$
 平均粒径 $D_{50}=0.591(\text{mm})$
- ▶ **鋼杭**
 SS400 [$E=2.05 \times 10^4(\text{N/mm}^2)$]
 鋼板杭 ⇒ 幅 $D=30(\text{mm})$
 鋼矢板 ⇒ 幅 $D=380(\text{mm})$

- ✓ 杭の厚さ t で曲げ剛性を調整。
- ✓ 変位制御のもと、1mm/min で静的載荷。

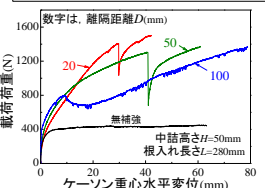
実験パラメータ: 離隔距離, 杭の曲げ剛性, 根入れ長さ

2) 勝呂基弘・菊池嘉昭・兵動大一・喜古真次・長澤宗一郎・森安俊介・及川森(2015): 鋼杭による防波堤補強工法に関する模型気中載荷実験。土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.71, No.2, p.1, 617-1, 622.
3) Yoshiaki Kikuchi・Taichi Hyodo・Shunsuke Moriyasu, Shinji Taenaka(2017): Effect of flexural rigidity of piles on the horizontal resistance of a reinforced gravity-type breakwater with steel piles. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017, pp.1833-1836.

模型気中載荷実験(既往の研究②) 5/17

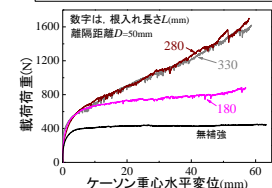
▶ **離隔距離の違い** (杭幅 $D=380\text{mm} \times 1$ 杭)

杭の曲げ剛性や根入れ長さが同一



▶ **根入れ長さの違い** (杭幅 $D=30\text{mm} \times 12$ 本 (杭中心間隔33mm))

離隔距離や杭の曲げ剛性が同一

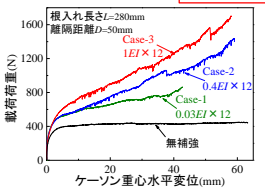
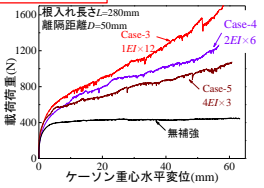


- ✓ 離隔距離が異なると抵抗力の増加挙動が異なる。
- ✓ ある程度の根入れが確保されていれば、ケーソンの抵抗力は変化しない。
- ✓ $L=180\text{mm}$ の場合、杭が転倒モードであることを確認。

模型気中載荷実験(既往の研究②) 6/17

▶ **杭全体の曲げ剛性の違い** (杭の本数が12本で同一)

杭全体の曲げ剛性がほぼ同一

- ✓ 杭全体の曲げ剛性が大きい方が、ケーソンの抵抗力が大きい。
- ✓ 杭1本当たりの曲げ剛性が大きい Case-4とCase-5で、杭が転倒モードであることを確認。

数値解析(既往の研究③) 7/17

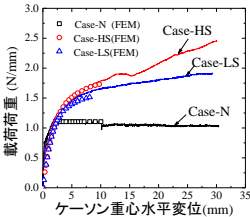
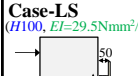
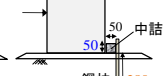
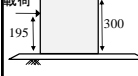
森安ら⁴⁾は、模型気中載荷実験(勝呂・菊池ら)を対象とした数値解析から、本構造の抵抗機構について検討を行った。

◆検証ケース

Case-N (無補強)

Case-HS

(HS0, $EI=560\text{Nmm}^2/\text{mm}$, L280)



✓ 中詰形状や杭の曲げ剛性、根入れ長さが異なる場合においても、数値解析によって模型実験の荷重変位関係をよく再現できている。

4) 森安 俊介・菊池 喜昭・田中 隆太・砂中 真治(2015):鋼杭による防波堤補強工法の抵抗機構に関する数値解析,土木学会論文集B3, Vol. 71, No. 2, p.1 611-1 616.

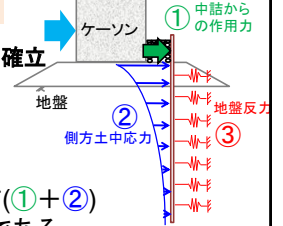
研究内容 8/17

鋼杭と中詰による補強によって、ケーソンの水平抵抗力は向上することが明らかとなった。

中詰や鋼杭の仕様が異なるとケーソンの抵抗特性も異なる。

日本構造における杭の設計法の確立

- 杭が転倒モードに至ると補強効果は低下する。
- 杭が折れてはいけない。



杭に作用する外力分布(①+②)を推定することが重要である。

模型気中載荷実験 概要 9/17

➤ 模型地盤

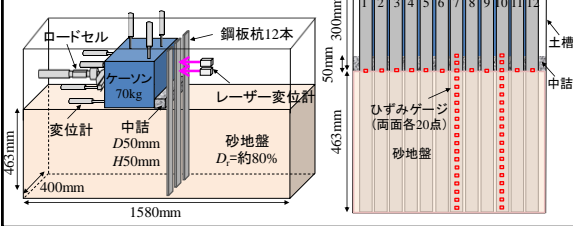
- 珪砂5号(乾燥砂)
- 土粒子密度 $\rho_s=2.65(\text{g}/\text{cm}^3)$
- 平均粒径 $D_{50}=0.591(\text{mm})$

➤ 鋼杭

- 杭厚 $t=2.3(\text{mm})$, 根入れ長さ $L=463(\text{mm})$
- 幅 $D=30(\text{mm})$
- 曲げ剛性 $EI=6.23 \times 10^{-3} (\text{kNm}^2)$

✓ 杭は12本, 杭中心間隔33mm.

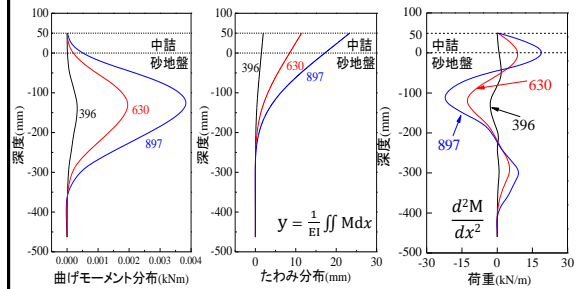
✓ 変位制御により1mm/minで静的載荷.



実験結果 10/17

➤ 中央の杭(杭番号7)における実験結果

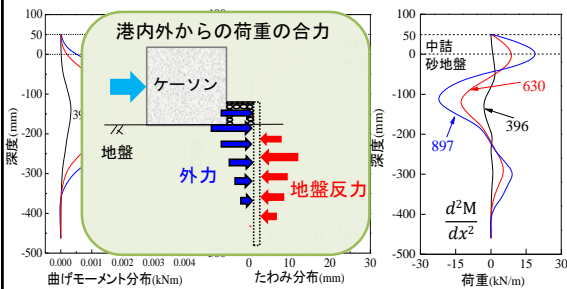
図中の数字は、ケーソンへの載荷荷重(N)



実験結果 10/17

➤ 中央の杭(杭番号7)における実験結果

図中の数字は、ケーソンへの載荷荷重(N)



外力分布 = 荷重分布 - 地盤反力分布

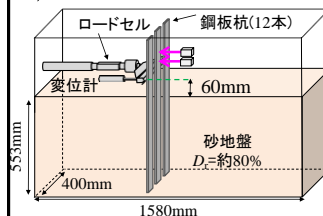
地盤反力メカニズムの検討 11/17

港研方式S型モデル ($p = k_s \cdot x \cdot y^{0.5}$)

✓ 地盤反力係数 k_s は、荷重レベルに依らず一定値をとり、地盤剛性と杭幅で決まる。

杭の軸直角方向抵抗性は、地盤反力係数 k_s の設定が重要になる

➡ 杭頭水平載荷実験を実施。



- ◆ 地盤作製方法, 杭の条件は, 防波堤の模型実験と同様.
- ◆ 載荷高さ60mm, 変位制御のもと, 1mm/minで静的載荷.

地盤反力メカニズムの検討 11/17

港研方式S型モデル ($p = k_s \cdot x \cdot y^{0.5}$)

地盤反力係数 k_s は、荷重レベルに依らず一定値をとり、地盤剛性と杭幅で決まる。

杭の軸直角方向抵抗性は、地盤反力係数 k_s の設定が重要!

→ 杭頭水平載荷実験を実施。

ロードセル、鋼板杭(12本)、変位計、60mm、砂地盤、 D_s ≈ 約80%、400mm、1580mm、ひずみゲージ(両面各20点)、553mm、載荷位置、地表面

地盤反力メカニズムの検討 12/17

中央の杭(杭番号7)における実験結果

杭頭荷重(N) vs 地表面変位(mm)

杭頭荷重(N) vs 各深度におけるたわみ(mm)

実験値、港研方式S型 $k_s = 2500(\text{kN/m}^{3.5})$

$k_s = k_{s0} = 2500(\text{kN/m}^{3.5})$

$k_s = 0.7 * k_{s0}$

各深度におけるたわみ(mm)

地表面変位と杭頭荷重の関係から導かれる全体系の地盤反力係数は $k_s = 2500(\text{kN/m}^{3.5})$ である。

各深度における $p/x-y$ 関係をみると、深度方向に k_s は一定値をとらない。

地盤反力メカニズムの検討 13/17

杭頭荷重24N作用時

最大曲げモーメント発生深度 $l_{m,max}$ 以深で乖離がみられる。

◆ k_s の深度方向の修正

正規化した深度, $x/l_{m,max}$

正規化した地盤反力, k_s ($\text{kN/m}^{3.5}$)

地盤反力分布の算出 14/17

中央の杭(杭番号7)における実験結果

防波堤の模型実験により得られたたわみ y

杭の水平載荷実験から得られた地盤反力係数 k_s

港研方式S型モデル ($p = k_s \cdot x \cdot y^{0.5}$)

中詰砂地盤

396N, 630N, 897N

2500

396N, 630N, 897N

地盤反力(kN/m)

外力分布の推定 15/17

中央の杭(杭番号7)における実験結果

荷重(kN/m)

地盤反力(kN/m)

推定外力(kN/m)

自重

底面摩擦

底面摩擦と鉛直応力に起因

ケーソンと中詰の摩擦力によりケーソンから地盤に作用する鉛直重量が減少したことを表現している可能性。

外力分布の推定 16/17

推定した外力分布の妥当性を検討

- ◆ ②外力の合力は、中央の杭に作用する外力の合力を1.2倍した値。
- ◆ ①載荷荷重、②外力の合力は、港内外の土槽壁面摩擦を考慮した値。

①載荷荷重(N)	②外力の合力(N)	②/①×100(%)
392	410	105 (136)
614	693	113 (139)
867	907	105 (129)

※括弧内の数字は、 k_s を一定とした場合の結果

✓ 載荷荷重と外力の合力の比は、最大で15%程度であったことから、比較的精度良く外力を推定できていると考えられる。

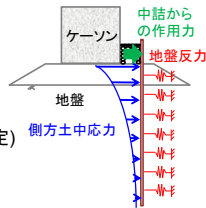
✓ k_s を深度方向に一定と考えた場合(通常の港研方式)には、外力の合力が載荷荷重を大きく上回る結果となった。

まとめ

17/17

➤ 杭に作用する外力分布の推定

- ✓ 港外側から杭に作用する外力分布を比較的精度良く推定できたと考えられる。



- ✓ 異なる条件での検討
⇒ 外力分布の一般化に取り組む(今後の予定)

◆ 地盤反力メカニズムについての検討

- ✓ 港研方式S型モデルの地盤反力係数 k_s は、杭の最大曲げモーメント発生深度 $l_{m,max}$ で深で変化することがわかった。
- ✓ 杭の変形モードに対応した地盤反力の評価方法を詳細に検討する。(今後の予定)