第27回土木鋼構造研究シンポジウム20240215

重力式防波堤構造の 杭による補強工法の開発







2011年東北太平洋沖地震での防波堤の被災 - 釜石港-



国土交通省東北地方整備局 釜石港湾事務所

- ・防護計画:湾口防波堤と防潮壁
- •明治三陸地震津波対応





施工 昭和53年~平成20年

設計値(防波堤は通常の波浪で 決まっていた) $T_{1/3}$ =13.0s,

 $H_{1/3}=7.4$ m, *H*_{max}=13.3m,

明治三陸地震津波と昭和三陸地震津波 津波波高 CDL+5.6m, 開口部最大流速 8.2m/s 今回の津波 津波波高は CDL+10.8m, 堤内外の最大水位差は8.2m,

開口部最大流速10.5m/s



釜石湾口防波堤被災



地震動による影響は軽微(ほとんどない)

津波の第1波によって防波堤の一部が傾斜,滑落し,第2波目以降で被害が拡大した 開口部付近では最大10.5m/sの流速となり,開口部潜堤は被害が拡大した.







港内側

防波堤のケーソンは基本的に、波浪時や津波来襲時の滑動抵抗によって安定性を確保

滑動抵抗の安全率Fs =	自重に基づくケーソン底面と捨て石間の摩擦力F
	<u> 波力による水平力P</u>

震災後の水理実験の結果から、背後のマウンドが洗堀を受けるとマウンドの支持力が一気に低下

カの釣り合いを失うと一気に崩壊⇒<mark>粘り強さ</mark>がない

当初想定された防波堤の補強工法 > 裏込めによる受動抵抗を期待 > マウンドの洗堀対策



https://doi.org/10.2208/jscejge.67.474

裏込めの効果



端趾部分を固める効果



(mm)

水谷他(2011 JGS神戸)

重力式防波堤構造の「粘り強い」化

<u>重力式防波堤を杭で補強</u>:杭…背後地盤の受働抵抗を利用する



従来技術 根固鋼矢板工法



(港湾空港技術研究所資料 No. 1145)

- ・ 岸壁の耐震性を矢板(杭)で向上させる提案
- 杭の横抵抗の特徴
 - 変位して初めて抵抗を発揮する
 - ・構造物の完全崩壊は免れるが、変位は生じる.
 - 地すべり抑止杭: 杭という名の重力式構造物
- 効果
 - 滑動抵抗増加?
 - •支持力增加?

杭や矢板の横抵抗



- ・杭や矢板
 - たわみ性部材
 ⇒変位が大きくなるにつれて
 少しずつ抵抗が大きくなる
 - ・荷重が大きくなるとだんだん 深いところから曲がるように なる.
 ⇒荷重が大きくなるほど地盤
 - の深いところまで受働抵抗を 期待できるようになる

鋼管杭を用いた防波堤の補強の提案

大前提:防波堤は多少動いてもかまわない



▶ 杭の受働抵抗を利用 → 防波堤の安定性向上(ケーソンが変位することで抵抗が増加)
 ▶ ケーソン直下の洗掘防止 → 基礎地盤の支持力破壊の防止
 ▶ 省スペース化 → 航路・泊地への影響が少ない.







水理実験の様子

(港湾空港技術研究所)



杭で補強したケース 水位差30cm

実験概要 水平載荷試験(1/60スケール)

実スケールとの対比:ケーソンW18mH18mD22.8m相当 鋼管矢板φ1000 t12 L22.8m相当
地盤、マウンド: 乾燥硅砂5号を使用(Dr=約80%, D50=0.6mm)
ケーソン防波堤: 単位体積重量が22kN/m³になるよう調整
杭: 鋼板で模擬→相似則(井合 1988)を考慮して板厚を設定
El=560N・mm²/m



実験概要水平載荷試験(1/60スケール) 沖側

陸側



実験でのパラメータ



▶ 杭を使うことの効果
 ▶ ケーソンと杭との離隔
 ▶ 裏込めの高さ
 ▶ 背後の洗掘深さ
 ▶ 杭の剛性
 ▶ 杭の根入れ長さ
 ▶ 杭の間隔

実験でのパラメータ



▶ 杭を使うことの効果
 ▶ ケーソンと杭との離隔
 ▶ 裏込めの高さ
 ▶ 背後の洗掘深さ
 ▶ 杭の剛性
 ▶ 杭の根入れ長さ
 ▶ 杭の間隔

研究内容 実験シリーズと検討項目



実験結果ケーソンの抵抗性









矢板と裏込め腹付け工法離隔距離:5cm勾配(1.5:1)裏込め高さ:5cm天端:3cm×高さ15cm断面積:25cm²断面積:236cm²質量:1.5kg質量:21kg

矢板による補強 (3)



ケーソン・地盤の挙動(腹付け工法) 実験終了直前



ケーソン(と裏込め)は、ほぼ水平に滑動する

滑動すべりによる地盤内の変形がわずかに見られる

ケーソン・地盤の挙動(鋼杭補強工法) 実験終了直前



矢板、裏込めを用いることで、地盤内の変形が浅い滑動破壊 から支持力破壊に変化する

実験でのパラメータ



▶ 杭を使うことの効果
 ▶ ケーソンと杭との離隔
 ▶ 裏込めの高さ
 ▶ 背後の洗掘深さ
 ▶ 杭の剛性
 ▶ 杭の根入れ長さ
 ▶ 杭の間隔

離隔距離の影響



離隔距離が近いほどケーソンの抵抗が増加する 離隔距離によって、荷重変位曲線の増加傾向が異なる

地盤内の変形メカニズムが変化する

まとめ

- ・矢板と裏込めにより防波堤の抵抗性は増加した
- ・矢板、裏込めを用いることで、地盤内の破壊メカニズムが滑動破壊から支持力破壊に変化する。
 - →ケーソンと矢板の離隔距離によって異なる。
 - 例)離隔距離が近いほど、地盤内の浅い地点で破壊が起きる。 遠いほど、地盤内の深い地点で破壊が起きる。

- ・矢板の施工箇所が遠すぎると、矢板へ水平力がうまく作用しない
 - 近すぎると、大きな断面力を必要とする(不経済)
 - →適度な離隔距離をとり矢板を施工する必要がある

実験でのパラメータ



▶ 杭を使うことの効果
 ▶ ケーソンと杭との離隔
 ▶ 裏込めの高さ
 ▶ 背後の洗掘深さ
 ▶ 杭の剛性
 ▶ 杭の根入れ長さ
 ▶ 杭の間隔









荷重-水平変位関係

· 深度ーたわみ関係

280mmと330mmがほぼ同等。 180mmと230mmは倒れこむ挙動。

<u>・深度一曲げモーメント関係</u> 根入れが短いほうがモーメントの最大値が小さい。



- ・根入れ長さが短いと倒れこみ、モーメントの最大値は小さくなる。
- ・根入れ長さ330mmは過貫入。

実験でのパラメータ



▶ 杭を使うことの効果
 ▶ ケーソンと杭との離隔
 ▶ 裏込めの高さ
 ▶ 背後の洗掘深さ
 ▶ 杭の剛性
 ▶ 杭の根入れ長さ
 ▶ 杭の間隔





・パターン①・②・③の比較 ⇒ 杭間隔のみを変更 ・パターン①・④・⑤の比較 ⇒ 単位長さ当たりの剛性を変えずに 杭間隔を変更

どの程度の抵抗力が変化するか





- 板杭や裏込めによってケーソンの抵抗力は増加した
- ・単位長さ当たりの剛性が等しくとも杭間隔が広いと抵抗力は弱まる

_ 荷重-変位関係

- ・荷重一変位関係が同じような挙動を示していても杭の挙動は
 異なる
- ・防波堤の抵抗力を上げるには、密に杭を根入れさせること重 要

・杭間隔が広くなると曲げモーメントの最大値が大きくなる

_たわみ

- ・杭間隔を広げるとたわみは大きくなる
- ・剛性が高くなると根入れ長さが足りず倒れこむような挙動に なる

部材を用いて補強した場合には、部材が最後に破壊するようにする

▶ <u>杭が最後まで健全</u> → 杭が折れない, 転倒しないための設計

⇒ 杭に生じる曲げモーメントの大きさやその発生位置の把握



ケーソンの変形によって生じる港外側外力の検討が必須.



部材を用いて補強した場合には、部材が最後に破壊するようにする

▶ 杭が最後まで健全 → 杭が折れない,転倒しないための設計

⇒ 杭に生じる曲げモーメントの<mark>大きさやその発生位置</mark>の把握



ケーソンの変形によって生じる港外側外力の検討が必須.

<u>検討方針</u>

- 模型実験から得られた結果を基に杭に作用する荷重を求め、
 港外側外力を推定・簡略化
- ・ 推定した外カ分布から杭の挙動を算出し、実験値との比較
 →外カ分布の適切性について評価
- 外力分布の形状について検討

実験概要



ケーソン質量と地盤の密度を変えてケーソンの変位モードを変えて実験した.

Case	ケーソン 質量(kg)	Dr(%)	備考
C115_10	115	10	めり込みやすい
C115_80		80	
C24_10	24	10	
C24_80		80	めり込みにくい
P_10	無し	10	
P_80		80	ケーラン無し



ケーソンの動き



- ・ケーソンが重いほうが水平抵抗は大きい
- ・地盤が密な方が水平抵抗が大きい



- ・地盤が緩い場合には、後趾点は水平変位の 小さい時からめり込む
- ・地盤が密な場合には、水平変位が小さい時にはめり込まない

地盤内の挙動(PIVによる合成変位解析)



港外側からの外力の考え方

2階微分値(実験値)





杭に作用する外カ分布の推定





C115_10 ケーソンへの作用荷重 600Nの時

杭に作用する外カ分布の推定方法





曲げモーメント分布より推定した荷重分布か ら港研方式によって求めた地盤反力を差し引 き,それを港外側から杭に作用する外力とし, 三角形分布に置き換える.

- 三角形の面積はケーソンに作用する載荷荷 重の値.
- 三角形の上下端は中詰土高さと杭のたわみの第一0点深度l_{v1}とした.
- 三角形分布の最大値の発生位置は実験結果 から得られた港外側からの荷重の最大値を とる深さとした.



これらの外力が作用した時の杭の挙動を算出, 計算値と実験値の比較.

外カ分布の妥当性

• C115_80



▶ 曲げモーメントの最大値やその発生深度は概ね一致した.

▶ たわみ分布も同様に、荷重レベルによらず実験値とよく整合した.

- 三角形分布に置き換えることで杭の挙動を簡潔に表現することができた.

まとめ

ケーソンの質量,地盤の相対密度の違いや荷重レベルの違い による港外側から杭に作用する外力分布について検討した.

〇港外側外カ分布の<u>形状</u>

- ▶ 三角形の分布形状はケーソンの質量や地盤の相対密度の違いで異なる. → ケーソンの変位挙動の違いによる影響.
- ・ 地盤の支持力が小さい場合、ケーソンが沈み込む挙動を示す.
 → より深い部分で外力が作用するが、最終的には地表面位置.
- ・ 地盤の支持力が大きい場合、ケーソンが滑動する挙動を示す.
 → 中詰土付近で外力が集中的に作用.

推定した港外側外カ分布により、ケーソンや地盤の条件の 違いによる杭の挙動の変化を簡潔に表現することができた.

重力式防波堤構造の杭による補強のまとめとして

- 杭の横抵抗を期待する工法
 - 砂質地盤のような横抵抗が期待できる地盤で有利
- ・杭の配置
 - ケーソンからの離隔距離
 - 杭の間隔
 - ・根入れ長さ
 - 洗堀深さの考慮
- ・杭の断面
 - 杭が折れないように
- •施工
 - どう杭を打設するか
 - いつ杭を打設するか



