鋼杭補強防波堤の補強効果に及ぼす杭の曲げ剛性の影響に関する模型気中載荷試験

勝呂 基弘¹・菊池 喜昭²・兵動 太一³・山崎 佑太朗⁴・
玉置 才哉子⁴・森安 俊介⁵・及川 森⁶

¹ 学生会員 東京理科大学大学院 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: 7614615@ed.tus.ac.jp

² フェロー会員 東京理科大学 教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: kikuchi_y@rs.tus.ac.jp

³ 正会員 東京理科大学 助教 理工学部 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁴ 東京理科大学 理工学部 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁵ 正会員 新日鐵住金株式会社 鋼構造研究部(〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

⁶ 正会員 新日鐵住金株式会社 建材開発技術部(〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1)

2011 年の東日本大震災において防波堤が津波によって被災した。そこで、ケーソン式防波堤を鋼管杭と裏込め材で補強した構造形式が提案されている。この構造形式に用いる鋼杭の曲げ剛性の合理的設計に資するべく、実物の 1/60 のスケールで、模型気中載荷実験を行った。本研究では、鋼杭の曲げ剛性の違いによるケーソンの補強の効果の変化を検討した。その結果、ケーソンの抵抗力の発揮には、ケーソン奥行方向の鋼杭の全体剛性が影響することがわかった。また、鋼杭の曲げ剛性が異なることによってケーソンから杭に作用する荷重分布にも違いがみられることがわかった。

Key Words : tsunami, breakwater, reinforcement, steel pile, resistant behavior of ground

1. はじめに

2011 年東日本大震災を受けて、津波による沿岸部の被害は甚大であった。特に港湾域を静穏に保つための防波堤が多く被災しており、設計の考え方の見直しが求められている。更に近い将来、高い確率で東南海・南海トラフ地震の発生も予想されており、既設ケーソン式防波堤の耐津波抵抗性を高めるための補強も含めた、大津波に対する港湾構造物のハード対策が求められている。そこで、津波に対しても「粘り強く抵抗する」防波堤を構築することにより、巨大津波発生時に一人でも多くの人を守るようにすることが必要である。

菊池ら¹⁾は、図-1に示すように、ケーソン背面から少し離して、鋼管杭を打設し、それらの間に裏込めを設けることにより耐津波抵抗性を高める補強工法を提案した。既往の気中載荷実験¹⁾や水理実験²⁾より、本補強工法を施すことによって、従来のケーソン式防波堤がより粘り強い抵抗性を示すようになることが示されている。また、ケーソンと鋼杭には適切な離隔距離が必要なこと、鋼杭の根入れ長さは杭下端が固定されているほどには必要ないが、根入れ長さが短かすぎると抵抗性が低下すること、

ケーソン背面地盤が洗掘されるとケーソンの抵抗性を低下するものの補強効果は維持されることがわかっている³⁾。また、水理実験の結果²⁾から、本補強工法を用いると、越流した場合でもケーソン直下に至る洗掘を抑えることでケーソンの耐津波抵抗性を増すことができることが分かっている。ただし、越流が問題となるケースでは、杭の背後は洗掘が生じるため、洗掘によって杭の背後地盤が低下することを前提に杭の根入れ等の設計をすることが必要である。

以上のような課題の前段として、本研究では、本補強工法に用いる杭の断面の決定のための基礎資料を得るべ

図-1 補強工法断面図

く、鋼杭の曲げ剛性の違いがケーソンの補強効果に及ぼす影響について着目した、ケーソン模型の気中水平載荷実験を行った。本実験の模型は実物のほぼ1/60スケールを想定したものである。

2. 実験概要

本工法の適用性を検討するために、本研究では実物の1/60スケールを想定して模型気中水平載荷実験を実施した。図-2に実験のイメージを示す。

本実験は表-1に示す井合⁴⁾の相似則に従い1/60スケールで設計した。土槽にはL1580mm×H800mm×B400mmの鋼製土槽を用いた。地盤には気乾状態の珪砂5号を用い、空中落下法にて相対密度80%の地盤を作製した。中詰材には地盤と同じ珪砂5号を使用した。ケーソン模型はL300mm×H380mm×B300mmの矩形鋼製箱に砂と鉄球を詰め、重量が752N(単位体積重量22.0kN/m³)となるようにした。このため、模型地盤への平均接地圧は8.4kN/m²となっている。鋼杭は実大スケールの鋼管杭φ1000mm×t12mmを連続的に配置した場合に相当する鋼板杭(L30mm×H430mm×t3.2mm, EI=5.6×10⁵N・mm²/m)を基本に、数種類の板厚の鋼板杭を模型杭として使用した。根入れ長さは既往の研究成果³⁾に基づき、t=3.2mmの杭の場合の最適根入れ深度である280mmとした。なお、根入れ深度は、ケーソンの初期据え付け面を基準としている。

図-2 実験概要

表-1 相似比⁴⁾

物理量(λ=60)	模型/実大
密度	1
地盤ひずみ	1/λ ^{1/2}
長さ	1/λ
有効応力	1/λ
地盤変位	1/λ ^{3/2}
曲げモーメント	1/λ ³
曲げ剛性	1/λ ^{7/2}

表-2 実験ケースの一覧

鋼板杭厚 t(mm)	杭1本あたりの 曲げ剛性 (N・m ²)	使用した杭の本数		
		12本	6本	3本
1.0	0.512	1-12	-	-
2.3	6.24	2-12	2-6	2-3
3.2	16.8	3-12	3-6	3-3
4.0	32.8	-	4-6	-
5.1	68.0	-	-	5-3

鋼板杭に生じる曲げひずみを計測するためひずみゲージを10深度(両面)に貼付した(具体的な貼付箇所は後述する)。鋼板杭とケーソンの離隔は既往の研究成果³⁾に基づき、最適離隔距離である50mmとした。鋼板杭とケーソンの間には、平均粒径5mmの玉石を50mmの高さに積み上げ、裏込めとした。なお、今回の実験ではマウンドはモデル化していない。これは、本研究の主題が、ケーソンから地盤や中詰を介して杭にどのように力が伝わるかを主眼とした実験としたためであり、マウンドが存在することによる支持力破壊の影響を見ることを主眼とした実験ではないからである。

なお、本実験シリーズでは鋼杭としては鋼管杭ではなく、板杭を用いた。板杭を用いることで、杭幅を変えずに杭の剛性を細かく変化させることができるためである。また、板杭を用いると、鋼管杭などに比べて、杭が降伏しにくくなる。従って、本研究では杭は比較的大きくたわんでいるが、鋼杭は弾性範囲で実験に供されている。

ケーソン模型には載荷バーを介してジャッキで水平力を作用させた。載荷バーとケーソン模型との接触面にはテフロンシートを貼ることで、また、地盤と土槽との接触面はグリースとメンブレンを用いることで摩擦を低減した。また、ケーソン底面には150号のサンドペーパーを貼付し、底面の摩擦抵抗を調整した。

実験では、津波荷重を想定し、ケーソンの底面から150mmの高さのところを、ジャッキを用いて静的に変位速度1.0mm/minで強制変位させた。本来、津波や波浪による荷重は分布荷重であるが、ここでは、集中荷重で載荷した。このとき、集中荷重の作用高さは波力合力の作用高さで代表させた。このことにより、ケーソン下面での荷重とモーメントの関係は分布荷重と同じ条件となっている。水平荷重を受けた場合、主としてケーソン下面から地盤に力が伝わるため、ケーソン下面で等価な荷重条件とすることが実験実施上必要である。実験ではジャッキ荷重、ジャッキ変位、ケーソン変位、鋼杭ひずみ、杭頭部のたわみを計測した。また、土槽側面から写真撮影を行い、地盤の変形挙動を観察した。

ここでの載荷実験では、鋼杭の板厚と使用する本数を変えることにより、用いる杭の全体の曲げ剛性を変化さ

せ、本補強工法に及ぼす鋼杭の曲げ剛性の影響について検討した。表-2に実験ケースの一覧を示す。なお、表中のハイフンで結ばれた数字が実験ケース名を表している。なお、杭を12本、6本、3本用いたそれぞれのケースでの杭中心間隔は、それぞれ33mm, 60mm, 120mmとした。

3. 実験結果

(1) 杭の曲げ剛性の違いによるケーソンの抵抗性の変化

図-3に、杭本数は12本のまま、杭の曲げ剛性を変えたケースについてケーソンに作用する荷重とケーソンの中心変位の関係を示す。図-3より、杭の剛性が小さくなるとケーソンの抵抗が小さくなった。ただし、Case3-12とCase1-12では杭の曲げ剛性が33倍違うことを考慮すると、杭の曲げ剛性の違いによるケーソンの抵抗性の変化はわずかなものであることが分かる。

図-4は同じ曲げ剛性(板厚3.2mm)を持つ杭の本数を変えて実験した結果を示す。杭本数が少なくなるとケーソンの抵抗性が小さくなった。ただし、ケーソンの中心水平変位が約40mmに達するまでは、12本用いた場合と6本用いた場合とで抵抗性にほとんど差がなかった。

一般に、鋼杭頭部に水平荷重を作用させると、杭剛性

図-3 鋼杭の曲げ剛性の違いによるケーソンの抵抗性の違い

図-4 鋼杭間隔の違いによるケーソンの抵抗性の違い

が高いほうが抵抗性が高くなるが、図-3と図-4を見る限り、杭の曲げ剛性の違いに比べてケーソンの抵抗性にはあまり大きな違いがなかった。そこで、さらに、杭間隔を広げたケースについて、杭1本あたりの曲げ剛性が異なる時のケーソンの抵抗性の変化についてみてみた。図-5は杭を3本使用した時の曲げ剛性の異なる実験の結果を比較したものである。この結果では、曲げ剛性の違いの影響はほとんど見られない。同様に、鋼杭を6本用いた場合についても比較したが、杭の曲げ剛性の影響がケーソンの抵抗性に及ぼす影響はあまり見られなかった。特に、曲げ剛性が高い、Case4-6とCase5-3が、それらより曲げ剛性が低いものを用いた場合よりもケーソンの抵抗性が低い傾向にあった。

さらに、全体の杭の曲げ剛性が変わらない条件で杭本数が異なる実験の結果を図-6に示す。この結果を見ると、全体の杭の曲げ剛性が等しい場合でも、杭の本数が異なることによって、ケーソンの抵抗性が変化した。つまり、この結果によると杭本数が少なくなるほどケーソンの抵抗性が低下する結果となった。

そこで、Case3-12, Case4-6, Case5-3のケースについて、ケーソンに作用する荷重が比較的大きな950Nの時のケ

図-5 鋼杭を3本用いた場合の杭の曲げ剛性の違いによるケーソンの抵抗性の違い

図-6 単位奥行長さあたりの鋼杭曲げ剛性が等しい時のケーソンの抵抗性

ケーソンの挙動を確認したのが、図-7である。

図-3～図-6では、ケーソンの中心変位をもとにケーソンの抵抗性を確認していたが、図-7では、ケーソンがある程度大きく変位したケーソン中心変位が30mmの時のそれぞれの実験条件におけるケーソンの挙動を比較した。この結果を見ると、杭本数が少ないほうが、回転も大きいことが分かる。このことは、ケーソンの下端の杭側端部の水平変位の違いはケーソン中心水平変位の違いよりは小さくなっていることを意味している。

なお、ケーソンの中心水平変位が30mmと等しい時のケーソンの変位挙動を見ると、杭間隔の違いによる影響はほとんど見られなかった。ただし、この時の杭の地表面変位を見ると、杭本数によって多少の違いがあった。

以上の結果は、Case4-6とCase5-3ではややケーソンの抵抗性が低いことを意味している。そこで、杭の挙動にどのような違いがあるか検討した。ケーソンに作用した水平荷重が950Nのところで、図-6に示したケースで杭に生じている曲げモーメント分布を比較したのが図-8a)である。図-8に示す○印の点のうち杭上端と下端を除いたものが曲げモーメントを測定した深度である。この図にあるように、杭の本数が減るにつれて1本の杭が受け

図-7 ケーソン作用荷重が950Nの時のケーソンの変位

a) 曲げモーメント分布

b) たわみ分布

図-8 ケーソン作用荷重が950Nの時の鋼杭の挙動

図-9 全体曲げ剛性の違いがケーソンの抵抗性に及ぼす影響

持つ荷重に違いが生じるため、杭本数が少ないほど大きな最大曲げモーメントが生じることになる。この測定結果を杭頭での変位とたわみ角を境界条件として二階積分して、杭のたわみ分布を調べると図-8b)のようになった。ここで○と△は図-2に示したレーザー変位計の測定による変位の実測値である。このように、これらのケースの中では、Case4-6とCase5-3の場合に、根入れ不足が生じ杭が倒れこむような状態となっていた。すなわち、Case4-6とCase5-3では、杭の剛性が高いことと、杭1本あたりに作用する荷重が大きくなることが理由で、杭の根入れが不足して相対的に、ケーソンの変位が大きくなる傾向となったものと考えられる。

そこで、図-9に、表-2に示したすべての実験に基づき、ケーソンの中心水平変位が30mmの時の杭の全体曲げ剛性と鋼杭を用いることによるケーソンの抵抗力の増加分との関係を示した。なお、鋼杭によるケーソンの抵抗力の増分は、鋼杭を用いた場合のケーソンに作用した荷重から、同じケーソン中心水平変位の時の無補強の場合のケーソンの抵抗力を差し引いて求めたものである。杭の挙動を見ると図-9に示した全体曲げ剛性が約500Nm²/mで杭本数が6本と3本の場合を除き、杭の根入れが明らかに短いという条件のものはなかった。

図-9の結果からは、杭の曲げ剛性が比較的小さい場合には、杭本数によらず、杭の全体曲げ剛性でケーソンの抵抗性が決まる傾向にあるが、杭の曲げ剛性が高い場合に、杭本数が少なくなるとケーソンの抵抗性が相対的に小さくなる傾向があることが分かる。また、この時、これらの杭では杭下端の固定状態が低く、杭が倒れこむような挙動をしていた。このことからすると、杭の根入れ不足が生じない限り、本補強工法における補強効果は杭本数にはあまりよらず、全体曲げ剛性の影響を強く受けるのではないかと考えられる。また、その一方で、曲げ剛性の違いによるケーソンの抵抗性の違いが比較的小さいことも特徴的である。

今後は、鋼杭1本あたりの剛性が大きい場合、「十分な

根入れ長」とはどういうことなのかということを議論していく必要がある。

(2) 杭の曲げ剛性の違いによる杭に作用する荷重の変化

これまでに見てきた結果は、杭の剛性の違いによるケーソンの抵抗性の違いが比較的小さいということであった。また、杭の杭頭部分に水平力を作用させた場合には、杭頭に単位曲げ剛性当たり同じ荷重が作用した場合の地表面変位は杭の曲げ剛性が高いほうが大きくなる傾向にある。その意味で、杭頭付近に杭の曲げ剛性が異なっても杭頭付近に同じ条件で荷重が作用しているとすれば、図-9のように全体曲げ剛性が等しければ抵抗性が同じであるということにはならないことになる。これらのことは、実際には、杭の曲げ剛性が異なれば、杭1本が受け持つ荷重の分布が異なっていることを意味するものと思われる。

この違いについて検討するため、杭の剛性が異なる場合に、ケーソン側から杭に作用する荷重分布がどのようになっているかについて検討する。ここでは、Case 1-12, 2-12, 3-12の結果を比較して検討する。

図-10にこれらのケースの曲げモーメント分布とそれを二階積分したたわみ分布とを示す。さらに、図-10a)に示した曲げモーメントを二階微分することにより、杭が受けている地盤反力分布を求め、図-11に示した。この結果によると、杭は、中詰め部分から地表面付近にかけてケーソン側から強く押されていることが分かる。また、杭のたわみモードの違いを反映してか、杭の曲げ剛性が異なることにより、地盤反力分布に違いが出ている。

図-11に示した地盤反力分布は、杭に作用する曲げモーメント分布から求めたものであるため、杭の両側から作用している地盤反力の差分を示している。ケーソン側から杭に作用している荷重を推定するためには、杭のたわみによる地盤反力を差し引く必要がある。ここでは、杭がたわんだことによる地盤反力は港研方式のS型地盤モデル⁵⁾を用いて推定した。S型地盤モデルは $p =$

$k_s \cdot x \cdot y^{0.5}$ であらわされる。ただし、 k_s : 地盤反力係数($\text{kN/m}^{3.5}$)、 x : 深度(m)、 y : 深さ x における鋼杭のたわみ(m)、 p : 深さ x における単位幅あたりの地盤反力(kN/m^2)である。

なお、この地盤の地盤反力係数 k_s は、実際に模型地盤において単杭の載荷試験を実施し、杭頭荷重と杭頭変位の関係から推定した。なお、 $k_s=2370\text{kN/m}^{3.5}$ であるとした。図-12に杭のたわみに基づく地盤反力分布を示す。

図-11に示した地盤反力から図-12に示した地盤反力を引くことにより、ケーソン側から杭に作用している荷重分布を推定したのが、図-13である。二階微分の限界と港研方式の限界から図-13では深度150mmより下は精度が十分にはないと考えられるが、この図を見ると、杭には主として裏込めを介して荷重が杭に作用していること、地中の比較的浅い個所では、杭には荷重があまり作用しない傾向にあることがわかる。このような傾向は森安ら⁶⁾の数値解析結果からも見られた傾向である。また、杭の曲げ剛性が異なることによって作用する荷重分布にも違いがみられる。それは、杭の曲げ剛性が高いほど地盤面より上方で荷重が伝達し、杭の曲げ剛性が小さくなるとより深い部分で荷重が伝達するようになるという違いである。これは杭のたわみのモードの影響を受けたものであると考えられる。

図-11 地盤反力分布(曲げモーメントの二階積分)

図-10 ケーソン作用荷重 800N 時の鋼杭の挙動

図-12 たわみ分布から港研方式により推定されるケーソン反対側に作用する地盤反力分布

図-13 ケーソン側から杭に作用していると推定される荷重の分布

以上のように、図-13の結果からもわかる通り、杭の曲げ剛性が小さいほうがより低い位置にケーソン側からの荷重が作用する傾向にあるため、杭の曲げ剛性が比較的小さい場合でもケーソンの抵抗性が向上しやすい傾向にあると考えられる。

4. 結論

本稿では、津波対策を前提とした防波堤の鋼杭による補強工法における、鋼杭の曲げ剛性の違いが本工法の補強効果に及ぼす影響を、模型気中水平載荷試験を行うことにより検証した。その結果を以下にまとめる。

ケーソンの抵抗性は、鋼杭の本数によらず、ケーソン背後に根入れした鋼杭全体曲げ剛性で決まることがわかった。ただし、杭の全体曲げ剛性の違いによるケーソンの抵抗性の変化は比較的小さいことがわかった。

ケーソンから杭に作用する荷重を評価したところ、図-13に示すように鋼杭は、地表面近くではケーソン側か

ら大きな荷重を受け、それより深い部分ではケーソン側から小さな荷重を受けていることが分かった。また、裏込めから地表面にかけてのケーソン側から杭に作用する荷重分布は杭の剛性が異なることによって変化することが分かった。このように、杭の曲げ剛性が低いほうが地表面付近の杭に作用する荷重が小さくなることが理由で、杭の曲げ剛性の違いによるケーソンの抵抗性の変化が小さくなったものと考えられる。

謝辞：本研究の実行にあたり、妙中真治様(新日鐵住金株式会社)に多大なご協力をいただきました。ここに記して、深謝いたします。

参考文献

- 1) Yoshiaki Kikuchi, Shohei Kawabe, Shinji Taenaka, Shunsuke Moriyasu : Horizontal loading experiments on reinforced gravity type breakwater with steel walls, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 2, No. 35 pp. 1267-1272, 2015.
- 2) 有川太郎, 及川森, 森安俊介, 岡田克寛, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 八尋明彦, 下迫健一郎: 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, 2015.
- 3) 勝呂基弘, 菊池喜昭, 兵動太一, 喜古真次, 長澤宗一郎, 森安俊介, 及川森: 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 B4(海洋開発) Vol.71(2015)No.2 p.I_617-I_622, 2015.
- 4) 井合進: 1g 場での地盤 - 構造物 - 流体系の模型振動実験の相似則, 港湾技術研究所報告, Vol.27, No.3, pp.3-24, 1988.
- 5) 久保浩一: 杭の横抵抗の新しい計算法, 港湾技術研究所報告 第2巻3号 Vol.2 No.3, 1964
- 6) 森安 俊介, 菊池 喜昭, 田中 隆太, 妙中 真治: 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. I_611-I_616, 2015.

(2016.2.4 受付)

EFFECT OF FLEXURAL RIGIDITY OF PILES ON HORIZONTAL RESISTANCE OF REINFORCED GRAVITY TYPE BREAKWATER WITH STEEL PIPE PILES

Motohiro SUGURO, Yoshiaki KIKUCHI, Taichi HYODO, Yutaro YAMAZAKI, Sayako TAMAKI, Shunsuke MORIYASU and Shin OIKAWA

In The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, coastal area breakwaters of the Pacific Ocean were suffered extensive damage by tsunami attacks. A method for reinforcing an existing caisson type breakwater against tsunami attacks with a steel pipe piles behind the breakwater and filling rubbles between breakwater and piles were proposed. Horizontal loading experiments on model breakwaters were conducted on dry sand condition to develop a design verification method on steel piles used in this reinforcing method. Flexural rigidity of a pile and number of piles used in an experiment were changed. Resistance increment of the caisson was mostly affected by total flexural rigidity of piles in a unit length along breakwater length. The paper also discussed force acting on piles from the caisson side. Clarifying the distribution and intensity of the force acting on the pile can make an effective design verification method of piles to be used in this reinforcement.