

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04352

研究課題名(和文) 受働杭の地盤反力発現メカニズムの検討

研究課題名(英文) Research on the mechanism of subgrade reaction of a reaction pile

研究代表者

菊池 喜昭 (Kikuchi, Yoshiaki)

東京理科大学・理工学部土木工学科・教授

研究者番号：40371760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：重力式混成堤の港内側に鋼管杭を打設しその間に中詰を施すと防波堤の波力に対する抵抗を補強する効果があることが知られている。本研究では杭に作用する外力と地盤反力の関係を明確にすることを目的とした。本研究では背面の地盤高を低くして同時に2か所の深さで異なった荷重比で杭に載荷し、杭のたわみモードを変化させる実験をした。その結果、各深度のたわみと地盤反力の関係は荷重比の違いによって大きく変化し、地盤反力係数の深度分布が杭のたわみモードの変化に対して連続的に変化することを明らかにした。また、側面からの地盤の変形挙動を観察し、杭の変形モードの変化によって、地盤の変形モードも大きく変わることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、防波堤が津波で被災したことから、鋼杭で防波堤を補強することについて検討したものである。防波堤の補強メカニズムは、地盤の横抵抗を杭を介して防波堤の抵抗増に加味しようとしたものである。この場合、たわみ性の杭に分布荷重が作用するという条件となり、通常の杭の設計の考え方を盛り込むことができない恐れがあった。研究の結果、杭の変形モードの違いにより、地盤の抵抗に大きく違いが生じることがわかった。従来、分布荷重を受ける杭の横抵抗の問題はほとんど研究がなされていなかったが、この研究成果により、鋼杭補強防波堤の設計の考え方が明らかにできるようになる。

研究成果の概要(英文)：Reinforced gravity type breakwater with steel pipe piles have proposed to increase ability of tsunami resistance of breakwater. For clarifying the resistance mechanism of piles, this research aimed to establish the relationship between force distribution to the piles and subgrade reaction.

In the series of experiments, the ground level of the backward of the pile was made lower and loads were applied to the pile to upper and lower levels. By this treatment, The authors intended to change the deformation mode of the piles. As a result, relationship between the deflection and subgrade reaction were found to be changed by the ratio of upper and lower load levels. The shape of the vertical distribution of coefficient of subgrade reaction was continuously changed according to the loading ratios.

研究分野：地盤工学

キーワード：杭の横抵抗 地盤反力 受働抵抗

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では、津波による越流が生じ、防波堤のケーソンに作用する水平力の増加、防波堤マウンドの洗掘などが主原因となり被災が生じた。そこで、ケーソン式防波堤の水平抵抗性能を向上させることを目的として、ケーソン背面に鋼杭を打設し、杭前面地盤の受働的な抵抗でケーソンの抵抗特性を向上させる構造を提案した。その結果、ケーソンの水平抵抗が著しく増大した。しかし、この際杭をどのように設計すべきかということが大きな課題となった。一般に、背後の地盤から荷重を受けることによって変位・変形する杭のことを受働杭というが、受働杭の抵抗メカニズムについては、幾多の研究があるものの、十分とは言えない状況にある。本研究では、模型実験によって杭の受働抵抗メカニズムを検討し、受働杭の挙動を説明できる地盤の構成モデルを提案し、あわせて実務に適用できる簡易モデルを構築する。

### 2. 研究の目的

(1)たわみ性の杭が受動的に荷重を受けた際に杭が周辺地盤から受ける地盤反力メカニズムを明らかにすることを目的とする。現象はかなり複雑となることが考えられるので杭の変形モードを類型化し、現象のメカニズムを明らかにする。さらには、受働杭の実用的な設計方法を検討する。すでに述べたように、剛な杭にどのような荷重が作用するかという観点での研究は多々行われているが、たわみ性の杭を考えた場合の検討は十分ではない。特に、そのような場合の地盤反力メカニズムについての検討は十分にはなされていない。

(2)そこで、本研究では以下について検討する。

杭に作用する荷重条件を様々に変え、載荷実験を行い、杭のたわみモードとそれによる地盤反力の発現挙動の違いを議論する。また、受働杭の抵抗特性をたわみモードとの関係から説明できるようにする。

具体的な事例として、鋼杭補強防波堤のような用いられ方をする杭の挙動を説明できるように簡易モデルを構築する。

### 3. 研究の方法

(1)主として模型実験を行った。模型実験では、2種類の実験を行っている。一つは通常の土槽実験であり、幅 158cm 奥行き 40cm の土槽に約 55cm の層厚の乾燥砂地盤(珪砂 5号)を作製し、そこで杭の載荷実験を行うものである。もう一つは、幅 115cm 奥行き 15cm のフレームを用いて、そこに 15cm の長さのアルミニウム棒を用いた積層体での実験である。アルミニウム棒は 1, 1.5, 3mm の直径のものを重量比で 1:1:1 で混合したものである。

(2)乾燥砂地盤を用いた防波堤の補強実験、杭の全背面の高さを変える実験を実施した。これらのシリーズの実験ではそれぞれ、土槽の全奥行きを使って実験する必要があり、また、杭を載荷すると、杭前面側の広い範囲の土が移動するため、土槽壁面の摩擦の影響が除去しきれない。そのため、杭は短冊状のものを連ねる形で実験をした。

(3)アルミニウム棒積層体実験は、杭の全背面の地盤高さを変えた実験のみ実施した。アルミニウム棒積層体では、土槽壁面が無いいため、壁面摩擦の問題がなくなるだけでなく、側面から地盤の動きを観察できる。そこでこの実験では、PIV 解析も行った。ここでは、主として、杭の背面(杭が押されて動く側)の層厚を 47cm とし、杭の前面側の層厚を 27cm とした。載荷は背面側の地表面の高さと、そこから 15cm 下がった深さの二か所で載荷する方式を主とした。

### 4. 研究成果

(1)杭の水平載荷実験を実施し、載荷位置が異なることによる杭の水平抵抗特性の変化について検討した。地盤高さの高い背面側の地盤面を基準とし、水平荷重の作用位置が背面側の地表面と同じ場合( $h=0\text{mm}$ )、港研方式 S 型( $p=k_sxy^{0.5}$ )のモデルを適用することで載荷過程の杭の挙動を推定することができた。一方、載荷高さが背面側の地表面よりも 150mm 低い場合( $h=-150\text{mm}$ )には、港研方式に基づく計算結果と実験結果に違いがみられた。両ケースの実験結果に基づいて、港研方式で用いられる地盤反力係数  $k_s$  の深度分布を比較したところ、その変化挙動に大きな違いがみられた。この結果を図-1 に示す。

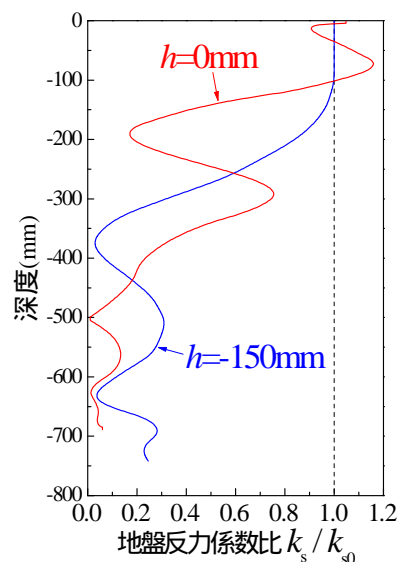


図-1 地盤反力係数比  $k_s/k_{s0}$  の深度分布の比較

(2)幅 400mm の土槽に対し、図-2 に示す杭配置の実験を行い、杭の挙動として土槽中央に位置する杭に着目をしたところ、図-3 に示すように水平载荷における中央の杭が全体の载荷重に対して負担した水平力は全ての杭の反力が等分布に作用するものより小さく、土槽壁面摩擦力の影響がみられた。このように、幅 400mm の比較的小型の土槽を用いた 1g 場での杭の水平载荷実験では、土槽壁面摩擦力の影響は無視し得ない。また、土槽幅と地盤高さの関係から、土槽壁面摩擦力により中央に位置する杭についての鉛直土圧分布が異なる可能性があるが、この点については別途調べる必要があり、今後の課題である。実験時に杭の挙動を調べる際には、土槽壁面摩擦力の影響あるいはそれに伴う杭の挙動のばらつきの影響がどの程度含まれているかを把握することが重要となる。そのため、杭の曲げモーメント分布の測定は検討対象とする杭 1 本のみでなく、複数の杭について行うことが必須である。

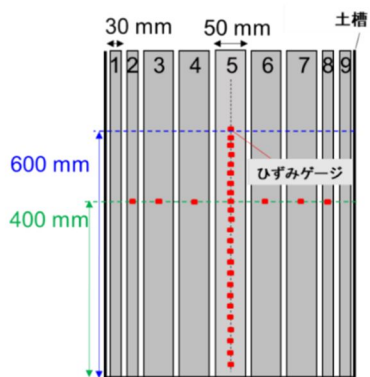


図-2 杭の設置状態

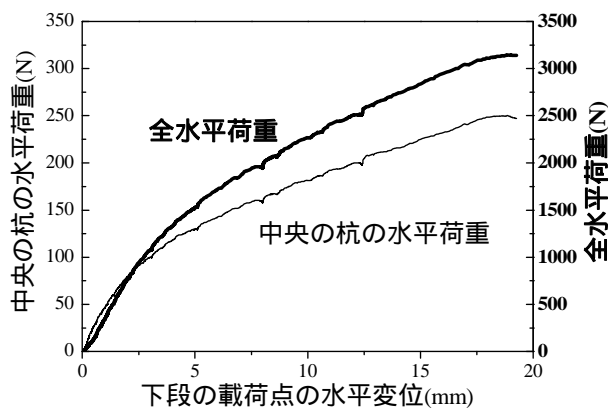


図-3 の载荷点高さにおける荷重変位関係

(3) アルミニウム積層体による二次元地盤を用いた壁体の 2 段载荷実験により変形モードを変化させたときの地盤反力特性の検討をした。上段( $x=0\text{mm}$ )と下段( $x=-150\text{mm}$ )の载荷荷重レベルの割合を図-4 のように変えて実験をしたところ、図-5 に示すように壁体の変形モードの違いが確認できた。そして、図-6 に示すような  $p$ - $y$  関係による地盤反力係数の比較より、地盤反力は载荷荷重比 1:1 では浅い深度で大きくなり、1:10 では深い深度で大きくなった。従って変形モードによって深度方向に異なる挙動になることがわかった。さらに画像処理により地盤のひずみを算出し、地盤の変形状態の検討を行ったところ、壁体の変形モードが異なると地盤のひずみの大きさや広がり方も異なることがわかった。

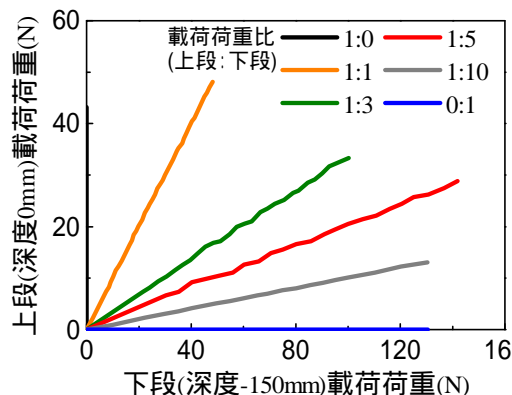


図-4 荷重関係

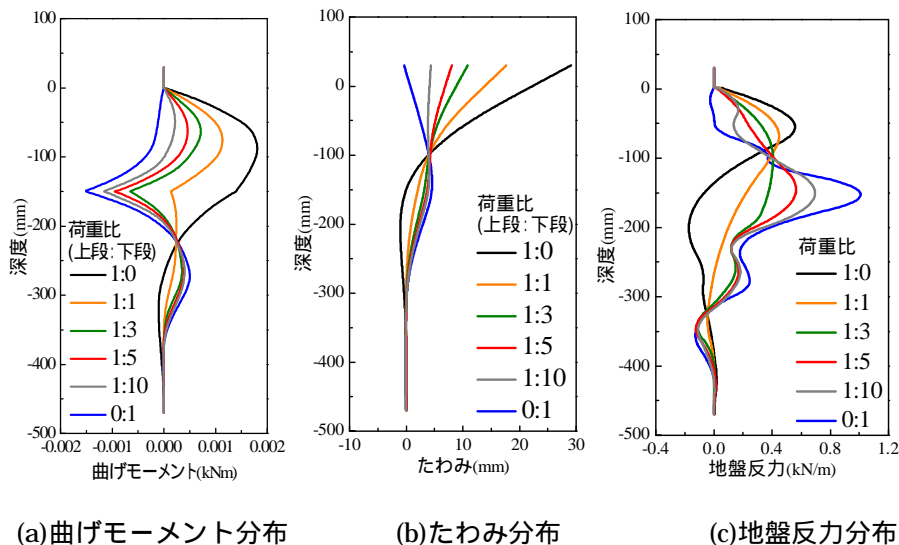


図-5 深度-100mm の変位が 4.1mm 時の壁体の挙動

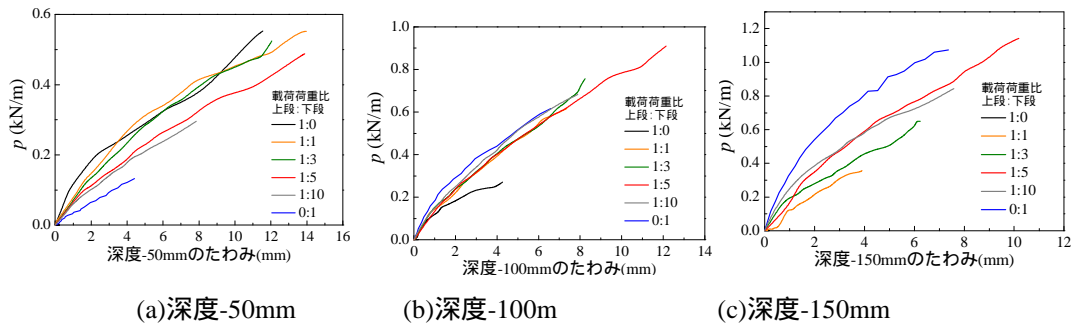


図-6  $p$ - $y$  関係の比較(深度-50mm,-100mm,-150mm)

(4) 地盤の相対密度が高く、模型ケーソンの沈下がほとんど生じない条件の模型防波堤載荷実験(図-7)で、鋼杭補強防波堤に用いられる杭に作用する外力分布の推定を行った結果、ケーソンへの載荷荷重が小さい段階では地中部から伝達される外力が主になり、載荷荷重が大きくなると裏込め付近から受ける外力が主になることがわかった。また、推定した外力分布の合力と載荷荷重の比較を行ったところ、地盤反力係数  $k_s$  を修正することで最大で13%程度の誤差で推定できることがわかった。

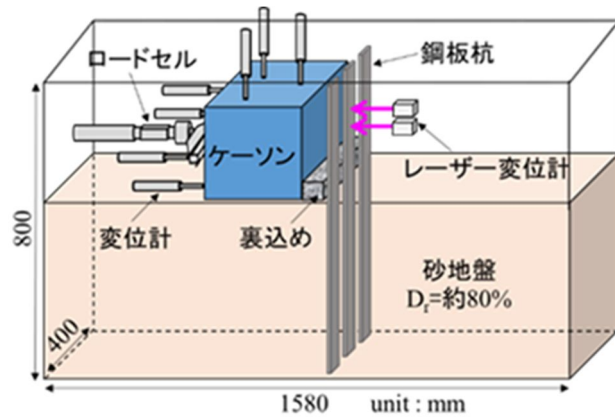


図-7 模型空中載荷実験

(5) そこで、実務で想定される程度に弱い地盤条件を考え、相対密度の低い条件で図-7と同様の実験を行い、結果を比較した。すると、ケーソンが沈み込むことで杭に地中部からも大きな外力が作用するような杭の変形モードとなることが分かった。このように、地盤の相対密度が異なることで、ケーソン側から杭に作用する外力が変化し、杭の変形挙動に違いを生じることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 毛利 惇士, 山口 天宗, 篠沢 俊明, 菊池 喜昭, 野田 翔兵, 妙中 真治, 森安 俊介, 及川 森	4. 巻 75
2. 論文標題 鋼杭補強式混成堤に用いられる杭の挙動に及ぼす中詰土の形状と基礎地盤の剛性の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 I_432, I_437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.75.I_432	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 崎元 和樹, 毛利 惇士, 菅沼 亮輔, 迫田 由華, 菊池 喜昭, 野田 翔兵, 及川 森	4. 巻 76
2. 論文標題 鋼杭補強防波堤に用いる杭の挙動に及ぼす根入れ長さの影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 I_192-I_197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.76.2.I_192	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 毛利惇士, 菊池喜昭, 野田翔兵, 崎元和樹, 一瀬健太郎, 森安 俊介	4. 巻 77
2. 論文標題 水平力を受けるたわみ性壁体の変形モードの違いによる地盤反力特性の変化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山口天宗・毛利惇士・篠沢俊明・菊池喜昭・野田翔兵・妙中真治・森安俊介・及川森
2. 発表標題 鋼杭補強式混成堤に用いられる杭の挙動に及ぼす中詰土の形状の影響
3. 学会等名 地盤工学会第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛利惇士・山口天宗・篠沢俊明・菊池喜昭・野田翔兵・妙中真治・森安俊介・及川森
2. 発表標題 載荷位置の違いによる杭の水平抵抗特性の変化
3. 学会等名 地盤工学会第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛利 惇士, 崎元 和樹, 菅沼 亮介, 迫田 由華, 菊池 喜昭, 野田 翔兵, 森安 俊介, 及川 森
2. 発表標題 杭の水平載荷実験における土槽壁面摩擦力が杭の挙動に与える影響
3. 学会等名 地盤工学会第17回関東支部発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛利 惇士, 崎元 和樹, 迫田 由華, 菊池 喜昭, 野田 翔兵, 菅沼 亮輔, 森安 俊介, 鈴木 誠
2. 発表標題 杭の挙動に及ぼす水平方向力載荷位置の影響
3. 学会等名 地盤工学会第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 迫田 由華, 毛利 惇士, 崎元 和樹, 菊池 喜昭, 野田 翔兵, 菅沼 亮輔, 妙中 真治
2. 発表標題 杭の変形モードの違いによる地盤反力係数分布の変化
3. 学会等名 地盤工学会第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 崎元和樹, 菊池喜昭, 野田翔兵, 毛利惇士, 迫田由華, 菅沼亮輔, 及川 森
2. 発表標題 鋼杭補強防波堤に用いる杭の挙動に及ぼす根入れ長さの影響に関する模型気中水平載荷実験
3. 学会等名 地盤工学会第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口天宗・毛利惇士・篠沢俊明・菊池喜昭・野田翔兵・妙中真治・森安俊介・及川森
2. 発表標題 鋼杭補強式混成堤に用いられる杭の挙動に及ぼす中詰土の形状の影響
3. 学会等名 地盤工学会第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛利惇士・山口天宗・篠沢俊明・菊池喜昭・野田翔兵・妙中真治・森安俊介・及川森
2. 発表標題 載荷位置の違いによる杭の水平抵抗特性の変化
3. 学会等名 地盤工学会第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛利惇士, 一瀬健太郎, 菊池 喜昭, 野田 翔兵, 森安 俊介
2. 発表標題 水平力を受けるたわみ性壁体に作用する地盤反力の挙動
3. 学会等名 地盤工学会第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 一瀬健太郎, 毛利惇士, 菊池 喜昭, 野田 翔兵, 妙中真治
2. 発表標題 二次元地盤におけるたわみ性壁体の変形モードの違いによる地盤反力分布の変化
3. 学会等名 地盤工学会第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 崎元和樹, 毛利惇士, ジョメイ, 一瀬健太郎, 菊池喜昭, 野田翔兵, 及川 森
2. 発表標題 鋼杭補強防波堤模型のケーソン直下基礎地盤の挙動のPIV による解析
3. 学会等名 地盤工学会第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Mohri, Yoshiaki Kikuchi, Shohei Noda, Takamune Yamaguchi
2. 発表標題 Influence of Horizontal Loading Position on Lateral Resistance Characteristics of Pile
3. 学会等名 Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Mohri, Kazuki Sakimoto, Takamune Yamaguchi, Yoshiaki Kikuchi, Shohei Noda, Shinji
2. 発表標題 Resistance Characteristics of Piles under Distributed Lateral Loading in the Perpendicular Pile Axis Direction
3. 学会等名 International Conference on Transportation Geotechnics (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Atsushi Mohri, Yoshiaki Kikuchi, Shohei Noda, Kazuki Sakimoto, Yuka Sakimoto, Mitsutaka Okada,
2. 発表標題 Influence of horizontal loading height on subgrade reaction behavior acting on a pile
3. 学会等名 The Second International Conference on Press-in Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	兵動 太一 (Hyodo Taichi)  (80749078)	富山県立大学・工学部・講師  (23201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------