

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15087

研究課題名（和文）鋼管矢板基礎における継手の力学挙動が基礎全体の水平抵抗特性に及ぼす影響

研究課題名（英文）Effect of Mechanical Behavior of Joints in Steel Pipe Sheet Pile Foundations on Horizontal Resistance of the Entire Foundation

研究代表者

澤村 康生（Sawamura, Yasuo）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20738223

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：鋼管矢板基礎は、継手を有する鋼管矢板を閉鎖形状に打設し、継手管内にモルタルを充填することで基礎全体を結合する日本独自の基礎形式である。本基礎形式では、鋼管同士をつなぐ継手の評価が基礎全体の水平抵抗に大きく影響を及ぼすと考えられるが、既往の研究では鉛直せん断特性のみに着目されてきた。そこで本研究では、継手部の3次元特性を模型実験で明らかにしたうえで、基礎全体を対象とした水平載荷実験を実施してその挙動を調べた。さらに、数値解析において接手部の特性を適切に考慮することで、十分な精度で実験を再現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状における鋼管矢板基礎の設計は、簡易な2次元解析を用いて行われる場合がほとんどであり、継手部の挙動が基礎全体の水平抵抗に与える影響を適切に表現しているとは言い難い。一方、工費削減を目的として、従来の継手に比べ高剛性・高耐力を有する継手や、深部の継手を省略した構造などが提案されており、これらを評価しうる設計手法が求められる。本研究で実施した模型実験とその再現解析により、実務で使用する3次元解析手法の精度検証が可能となり、鋼管矢板基礎の設計・施工の合理化に大きく資する結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：Steel pipe sheet pile foundations are a unique foundation type in Japan in which steel pipe sheet piles with joints are cast in a closed geometry and the joint tubes are filled with mortar to connect the entire foundation. In this type of foundation, the evaluation of the joints between steel pipes is considered to have a great influence on the horizontal resistance of the entire foundation. In this study, three-dimensional characteristics of the joints were clarified by model tests, and horizontal loading tests were conducted on the entire foundation to investigate the horizontal resistance. Furthermore, it is shown that the numerical analysis can reproduce the experimental results with sufficient accuracy by appropriately taking into account the characteristics of the joints.

研究分野：地盤工学

キーワード：鋼管矢板基礎 水平抵抗 継手 遠心模型実験

### 1. 研究開始当初の背景

鋼管矢板基礎(図1)は、継手を有する鋼管矢板を閉鎖形状に打設し、継手管内にモルタルを充填することで基礎全体を結合する基礎形式であり、鋼管同士をつなぐ継手の評価が基礎全体の剛性に大きく影響を及ぼす。これは、鋼管矢板基礎に水平荷重が作用した場合には継手部で鉛直方向のせん断変形(ずれ)が生じ、基礎全体の性能に大きく寄与するためである。このため、鋼管矢板基礎では継手の高耐力化が至上命題であり、これまで様々な形式の継手が開発され、継手の性能について実験が行われてきた。

しかし既往の研究では、要素試験における継手の鉛直せん断特性のみに着目しており、実際に個々の継手の挙動が基礎全体の水平抵抗に与える影響について明確になっていない。さらに、継手における圧縮・引張り、水平せん断、ねじりなど、鉛直せん断以外の挙動は考慮されていない(図2)。この原因のひとつは、継手の形状が複雑でモデル化が困難であるため、鋼管矢板基礎全体を対象とした実験が行われていないためである。鋼管矢板基礎に水平荷重が作用した場合、継手がどのように挙動して基礎全体の水平抵抗に寄与するのか、また、鋼管矢板基礎の継手性能により、基礎全体の水平抵抗がどのように変化するのか、明らかにする必要がある。

さらに現状の設計法に目を向けると、実務においては簡易な2次元の骨組み解析を用いて照査が行われているが、この設計法が正しいとする根拠が乏しく、解析結果の妥当性を確認するためのベンチマークとなる実験が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、鋼管矢板基礎の水平抵抗に及ぼす継手の影響を遠心模型実験により把握し、それを適切に表現可能なシミュレーターを開発することである。一般的に鋼管矢板基礎は、基礎外径が大きく根入れ長が深いほど経済的である。ただし、基礎外径が大きくなると継手部に作用する圧縮・引張り力も増加し、これらの影響を無視できなくなる。さらに、基礎外径の増大により隅角部や基礎中央において水平せん断や曲げ、ねじれの力が増加すると予想されるが、これらに対して要求される性能は明らかになっていない。そこで本研究では、小型の鋼管矢板基礎模型を作製し、1G場で継手の各種要素試験を実施した上で、遠心場で鋼管矢板基礎全体の水平載荷試験を実施する。さらに、遠心実験の再現解析を通じて、同構造の設計に用いるシミュレーターを開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 継手の各種力学挙動が鋼管矢板基礎全体の水平抵抗に与える影響の把握

図2に示した通り、継手部の挙動を正確に把握することを目的に、継手部の圧縮試験、引張試験、鉛直せん断試験、水平せん断試験を実施した。図3にはその一例として圧縮試験の概略図を示す。実験模型は遠心模型実験での使用を想定して実物の1/50程度を目標に作製した。また、各種力学試験は一軸圧縮試験機を用いて実施した。

過去に申請者らが行った同構造物に対する研究<sup>1)</sup>では、鋼管矢板基礎特有の複雑な継手形状は模擬していたものの、継手の各種剛性については実物よりも大きくなるという課題があった。そこで、継手の幾何学的な特徴は残しつつ、充填剤であるモルタルの脆性的な破壊挙動を再現するよう留意した。具体的には、継手を円形ではなく矩形のアルミ製治具を用いてモデル化して本管部との接着を高め、継手部の充填剤として石膏を用いることとした。

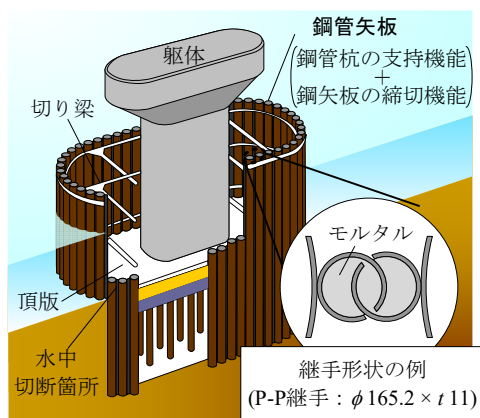


図1 鋼管矢板基礎の構造 (P-P継手)

(鋼管杭・鋼矢板技術協会 HP を基に作成)

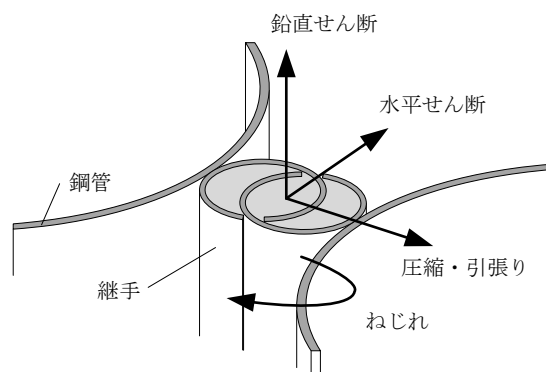


図2 考慮すべき継手の挙動

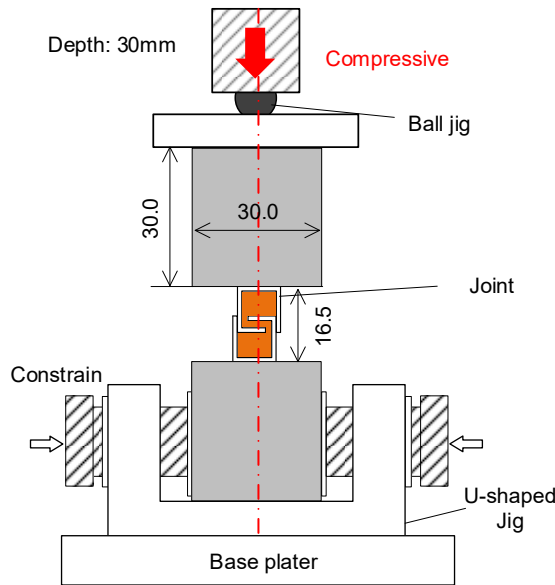


図3 継手部の圧縮試験の概略図

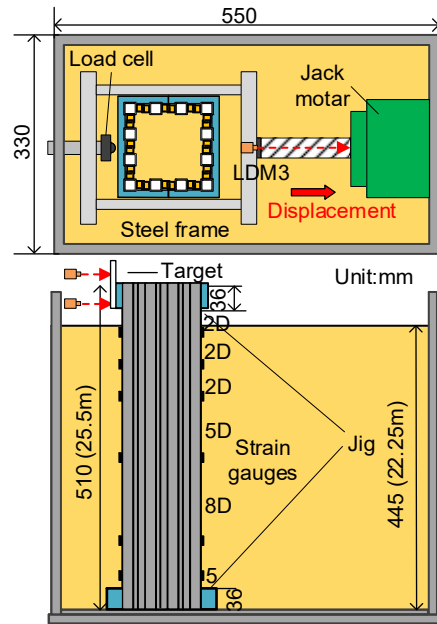


図4 遠心模型実験の概略図 (4×4)

## (2) 遠心力場における鋼管矢板基礎の水平試験

鋼管矢板基礎の水平抵抗力および変形挙動を確認することを目的に、遠心力 50g 場において水平載荷試験を実施した。実験は、京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用いて実施した。図4に4×4の鋼管矢板基礎を模擬した実験の概略図を示す。実験対象は、地盤深さ 22.25 m に構築された杭長 25 m の鋼管矢板基礎とした。模型地盤は乾燥豊浦珪砂を用いて相対密度 90% の密な地盤を目標に突き固めにより作製し、鋼管矢板模型の両端部は剛結条件とした。また、図4に示した4×4の実験以外にも、本管1本、本管2本を直列(1×2)および並列(2×1)に並べたケースも実施した。さらに、再現解析の精度向上を目的に、同様の実験模型を用いて1g場での気中載荷試験も併せて実施した。

## (3) 3次元弾塑性有限要素法による再現解析

3次元弾塑性有限要素解析手法 DBLEAVES<sup>2)</sup>を用いて遠心模型実験の再現解析を実施した。鋼管および継手部は梁要素とソリッド要素のハイブリットモデル<sup>3)</sup>で表現してその体積効果を考慮し、継手部は各種力学特性をバネ要素を用いてモデル化した。

## (4) 地盤と構造物の接触面における解析モデルの高度化

有限要素法を用いて構造物の数値解析を実施する際、地盤と構造物の接触面におけるモデル化が重要な課題となる。そこで、解析精度の向上を目的に、構造物の表面粗さが地盤材料との境界面における摩擦特性に与える影響を調べた。具体的には、表面粗さの異なる4種の模型(モルタル2種類、ステンレス2種類)を用いて、密詰め豊浦砂との境界面に対する定圧一面せん断試験を実施した。豊浦砂は締固めにより相対密度 85% になるよう作製した。鉛直応力は 39.2, 78.4, 156.8 kPa の3通りとし、それぞれの条件に対して単調載荷試験と繰返し載荷試験を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 継手の各種力学挙動が鋼管矢板基礎全体の水平抵抗に与える影響の把握

継手の要素試験結果の一例として、図5、6には、圧縮試験と引張試験における荷重-変位関係をそれぞれ示す。圧縮試験では、軸変位 1 mm 付近から勾配がほぼ一定となっていることが確認できる。これは、充填剤の石膏にひび割れが発生し、接合部が降伏したことが原因であると考えられる。この時の破棄モードは実構造を対象とした実験<sup>4)</sup>と同様であった。軸変位が 2.5 mm を超えると再び圧縮荷重が増加しているが、これは大変形を与えたことによる継手部材自体の変形に起因するものである。つぎに図6の引張試験結果をみると、荷重初期はほぼ直線で引張荷重が増加するが、軸変位が 0.7 mm 付近で曲線の傾きが急激に変化していることが確認できる。この時、継手内部で石膏の剥離が観察された。軸変位 0.7 mm 以降は勾配が緩やかに増加しているが、これは継手部材のアルミニウムが変形したためである。この破壊モードおよび破壊の進展過程についても、実構造を対象に実施された要素試験結果<sup>4)</sup>と同様であるといえる。

### (2) 遠心力場における鋼管矢板基礎の水平試験

図7、8には、遠心模型実験における荷重-変位関係を示す。ここで、変位については本管の直

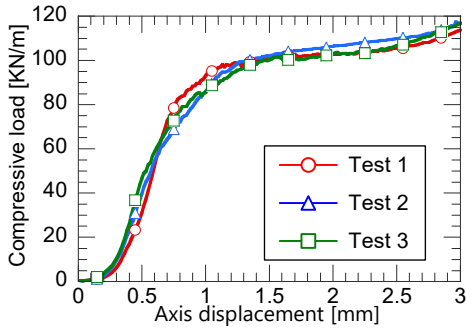


図 5 継手部の圧縮試験の結果

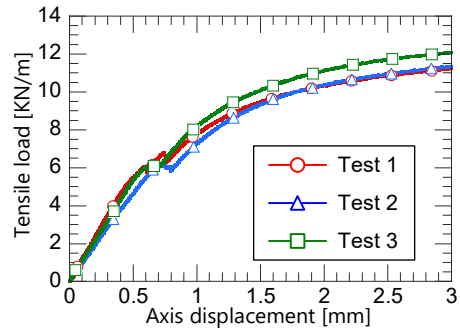


図 6 継手部の引張試験の結果

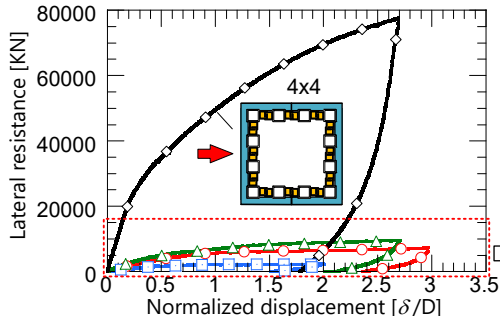


図 7 遠心模型実験の荷重-変位関係

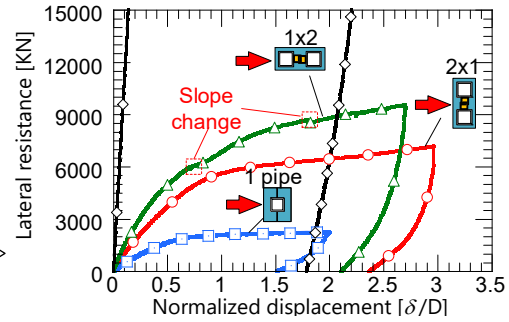


図 8 遠心模型実験の荷重-変位関係 (拡大図)

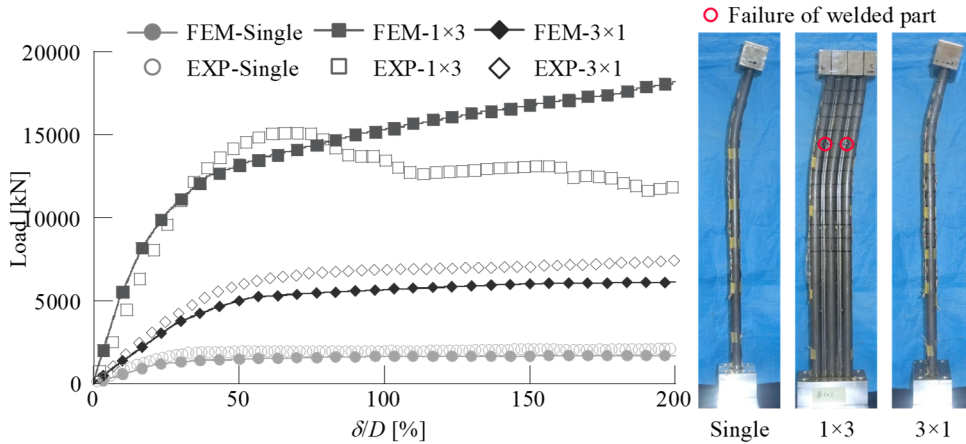


図 9 3次元有限要素法による再現解析結果

径で正規化して表している。初めに図 8 に示した拡大図を見ると、本管 1 本の場合が最も剛性と強度が低いことが確認できる。直列と並列の結果を比較すると、本管の数と継手部の個数は同じであるが、直列の方が剛性・強度共に大きくなっていることがわかる。さらに、並列では  $\delta/D = 1$  付近から勾配がゆるやかになるのに対して、直列では勾配変化点からの剛性の低下率が小さく、さらに途中で 2 回明瞭に勾配が変化している点がある。これは、並列では主に本管の曲げ変形により荷重に抵抗するのに対して、直列では変位の増大に伴って継手部で変形が生じたためであると考えられる。4×4 の試験結果については、載荷初期から高い剛性を示し、途中で勾配が不連続になる点は確認されなかった。

### (3) 3次元弾塑性有限要素法による再現解析

図 9 に既往の遠心模型実験<sup>1)</sup>に対して実施した再現解析結果を示す。同図には、遠心模型実験とその再現解析における荷重-変位曲線と、各モデルの破壊状態を示している。図より、1×3 基礎を除き、再現解析は実験の荷重-変位曲線はよく再現していることが確認できる。1×3 基礎では、実験において、水平荷重がピークに達した後低下する挙動を示している。実験では、地表面付近において継手の溶接が破壊していることを確認しており、これが再現解析との乖離の原因であると考えられる。しかしながら、継手部の要素試験結果を適切に解析モデルに組み込むことで、鋼管矢板基礎特有な複雑な変形挙動を再現できることを確認した。



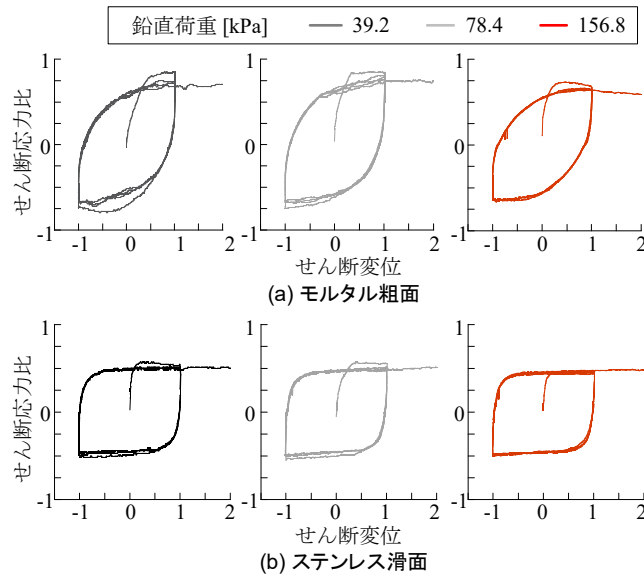


図 10 繰返し載荷におけるせん断応力比とせん断変位の関係

#### (4) 地盤と構造物の接触面における解析モデルの高度化

図 10 に繰返し載荷におけるせん断応力比とせん断変位の関係を示す。ここでは、代表的な結果としてモルタル（粗面）とステンレス（滑面）を示す。同図より、せん断応力比を用いて正規化することで、せん断応力とせん断変位の関係は鉛直応力に依らずほぼ同じ曲線となることが確認できる。またいずれのモデルにおいても、1 周目で明確なピークを示したのち、2 周目以降は同様の履歴曲線を描くことがわかる。さらに、単調載荷試験と繰返し載荷試験から得られた残留状態の摩擦角は概ね一致しており、繰返し載荷時の履歴曲線は単調載荷試験における残留状態から推定できることを確認した。

#### <参考文献>

- 1) 草場翔馬, 宮崎祐輔, 澤村康生, 木村 亮, 西海能史, 小坂 崇, 服部匡洋, 前川和彦: 継手形状を模擬した鋼管矢板基礎の継手部に対する力学試験および基礎の一要素に対する水平載荷試験, 第 54 回地盤工学研究発表会, pp.1169-1170, 2019.
- 2) Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F., Yashima, A.: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, 47(3), 547-558, 2007.
- 3) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T., Hoshikawa, T.: Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, *Soils and Foundations*, 40(5), 1-17, 2000.
- 4) 稲積真哉, 磯部公一, 木村亮, 三津田祐基: 鋼管矢板基礎における継手部力学特性の解明と 3 次元骨組構造解析手法の提案, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.2, pp.532-543, 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miyazaki Yusuke, Sawamura Yasuo, Kusaba Shoma, Kimura Makoto, Nishihara Tomohiko, Kosaka Takashi, Hattori Masahiro, Maekawa Kazuhiko	4. 巻 126
2. 論文標題 Numerical Analysis of Mechanical Characteristics of Joint Structure of Steel Pipe Sheet Pile Foundation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Challenges and Innovations in Geomechanics. IACMAG 2021. Lecture Notes in Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 59 ~ 67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-64518-2_8	査読の有無 有
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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮崎祐輔, 澤村康生, 草場翔馬, 西原知彦, 小坂 崇, 服部匡洋, 前川和彦, 木村 亮
2. 発表標題 有限要素法を用いた鋼管矢板基礎の水平挙動に関する数値解析手法の提案
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Peng, J., Miyazaki, Y., Sawamura, Y., Kimura, M., Kosaka, T., Nishihara, T. and Hattori, M.:
2. 発表標題 Mechanical tests on joint part using plaster as filling material for steel pipe sheet pile model
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Peng, J., Miyazaki, Y., Sawamura, Y., Kosaka, T., Nishihara, T., Shinohara, M. and Hattori, M.
2. 発表標題 1G lateral loading test on steel pipe sheet pile model with quasi-brittle joint structure
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬 駿, 澤村康生, 木村 亮
2. 発表標題 構造物の表面粗さが地盤材料との接触面における摩擦特性に与える影響
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮崎紀光, 澤村康生
2. 発表標題 面圧センサーと小型圧力計を併用した土圧計測システムに関する検討
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Peng, J., Miyazaki, Y., Sawamura, Y., Kosaka, T., Nishihara, T., Shinohara, M. and Hattori, M.
2. 発表標題 JOINT VERTICAL SHEAR RESISTANCE OF STEEL PIPE SHEET PILE CONSIDERING CONFINING PRESSURE
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬 駿, 澤村康生, 木村 亮
2. 発表標題 構造物の表面粗さが密詰め乾燥砂との繰返し載荷時の摩擦特性に与える影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------