

奨励研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	継手構造の合理化を目的とした鋼管矢板基礎の水平力学挙動に関する研究
研究者名※	彭 俊雄
所属組織※	京都大学大学院 工学研究科 都市基盤システム工学
研究種別	奨励研究
研究分野	その他
助成金額	80 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2022 年度奨励研究助成実施報告書

所属機関名 京都大学工学研究科

申請者氏名 彭 俊雄

研究課題	継手構造の合理化を目的とした鋼管矢板基礎の水平力学挙動に関する研究
<p>鋼管矢板基礎の打設には高い精度が求められている。さらに、実際の打設過程において継手の所定の深度まで完全にモルタルを充填することが難しい。そこで発想を転換し、基礎の要求性能を満たす範囲においてどの深度まで継手を省略可能か明らかにすれば、継手の嵌合と充填を高い精度で実現できると考えられる。これを実現するために、継手の省略だけでなく、そもそも継手は力学的にどのように基礎全体の水平抵抗特性に影響を及ぼすのかを解明する必要がある。そこで本研究は継手が部分的に省略された鋼管矢板模型を対象とする遠心载荷実験を実施した。本実験の結果から、相対密度 90%の豊浦砂地盤において、継手長さが鋼管の 2/3 の場合でも、省略しない場合と比べて、水平荷重変位関係が大きく変化しないことがわかった。この関係は地盤との相対剛性により決まると考えられるため、更なる検討が求められる。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>本研究では、継手構造が部分的に省略された鋼管矢板を用いて、基礎の構成要素を対象とする遠心模型実験を実施し、継手部の影響を考慮した鋼管矢板基礎の水平抵抗特性を解明し、継手部の幾何的省略が基礎全体に及ぼす影響を解明する。遠心力载荷実験では、縮小した地盤模型に、所定の遠心加速度を作用させることで実物と同じ自重応力状態を再現することができる。継手省略構造が鋼管矢板基礎の水平抵抗に与える影響は、特に省略長さ、载荷方向、鋼管矢板の本数に依存すると考えられる。そこで、直列 (1×2)、並列 (2×1) 及び継手の 1/3、2/3 省略形式を用いて载荷試験を行う (計 6 ケース)。これらの実験ケースにおいて、本管に作用するひずみ、杭頭変位、杭頭回転角、水平荷重、継手部の変形量を計測し、比較することで、それぞれの影響を定量的に評価する。継手部の変形量については、継手部にマーカーを施し、画像解析することで、载荷前後における継手部の変形量を算出する。</p>	

2. 研究の経過	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>著者はこれまで、実物大鋼管矢板基礎に幾何学的小よび力学的に相似した継手部を有する鋼管矢板基礎模型を開発した。本研究では引き続きこの模型を使用した。本模型では、本管部と継手部がネジで接続されている。そのため、本研究では従来のネジに代わって埋め込み型ボルトひずみゲージ (EBSG) を使用した。EBSG とは、ひずみゲージを、ボルトの中心に穿孔された穴に埋め込むことによりボルトのひずみ計測が可能なひずみゲージである。</p>	

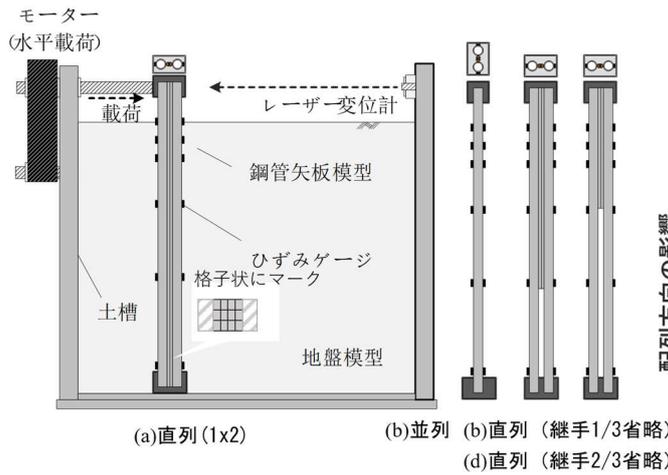


表1. 水平荷重試験における実験ケース
継手長さの影響

	本管と一致	本管の2/3	本管の1/3
直列	1x2	1x2_L _{2/3}	1x2_L _{1/3}
並列	2x1	2x1_L _{2/3}	2x1_L _{1/3}

図1 水平荷重試験における実験概略図及びケース

遠心模型試験（図1）は、豊浦砂で作られた地盤模型を使用して、50Gの遠心加速度下で実施された。ケース_2x1 およびケース_1x2の本管部構成では、2本の本管部が石膏で満たされた2つの継手で接続されている。ケース_2x1の配置方向は荷重に対して垂直であり、ケース_1x2の配置方向は荷重に対して平行である。各ケースにおける詳細（継手の長さ、ひずみゲージの位置、およびEBSGの位置を含む）は、図2に示されている。

実験方法：

図1に示すように、鋼管矢板基礎の両端はネジを使用して鋼製ブロックで確実に固定した。上部の鋼製ブロックは基礎フーチングの役割を果たし、下部の鋼製ブロックは鋼管矢板模型を土槽に固定し、片持ち梁の境界条件を想定した。荷重容量50kNの小型油圧モーターは、鋼管矢板模型の頭部に水平荷重をかけるために土槽の上部に取り付けられた。荷重は、M10ネジでモーターに接続されたロードセル（Model: CLA-20KNA, Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.）で測定された。レーザー変位計（Model: IL-065, Keyence Co., Ltd.）

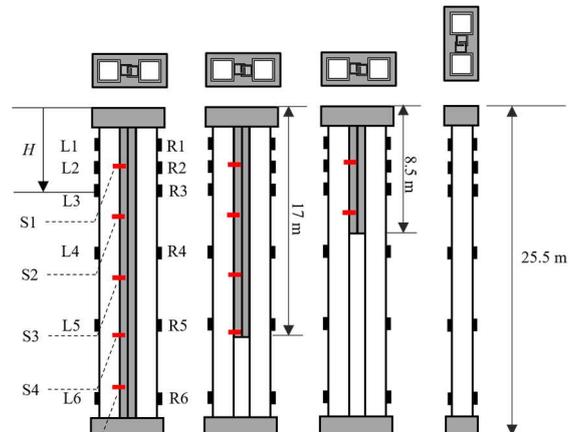


図2 EBSG, ひずみゲージおよび継手省略の詳細

は、鋼管矢板基礎の頭部の水平変位を測定するために使用された。一方で、図2に示すように、12個のひずみゲージ（Model: FLAB-03-23-3LHT-F, Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.）が各ケースの本管部に取り付けられた。ケース_2x1では、6個のひずみゲージが本管の両側（左側と右側）に取り付けられた。ケース_1x2では、6個のひずみゲージが左側の本管の左側に、6個のひずみゲージが右側の本管の右側に取り付けられた。ひずみゲージは、本管部の曲げひずみの分布を測定した。遠心模型実験では、まず遠心加速装置によって重力を14分間で50Gまで増加させた。その後、モーターによって鋼管矢板基礎の頭部に水平荷重を作用させる。水平荷重は、2mm/minの速度で行われた。終局状態を把握するため、杭頭における最終変位は本管直径の200%とした。杭頭の水平変位が所定値に達すると、除荷を開始した。

3.1 継手省略が鋼管矢板模型の荷重-変位曲線に与える影響

3.1.1 荷重-変位曲線

図3 (a) および (b) に示すように、鋼管矢板模型の杭頭部における荷重-変位曲線が確認される。X軸は正規杭頭変位 (δ は杭頭変位, D は本管の直径), 1×2 (直列) および 2×1 (並列) において、継手の長さが全長の $2/3$ まで省略された場合、水平荷重強度は低下しないことが明らかである。しかし、継手の長さが全長の $1/3$ まで省略されると、鋼管矢板基礎の強度は著しく低下することが確認できた。言い換えれば、省略された継手の長さに基づいて、基礎全体の水平耐力低下に対する閾値が存在すると考えられる。継手の長さがある閾値の範囲内にある場合、杭の耐荷能力は低下しないが、継手の省略長さが閾値を超えると、杭の耐荷能力は著しく低下する。ただし、この現象に対するさらなる説明するためには、より深い議論が必要である。

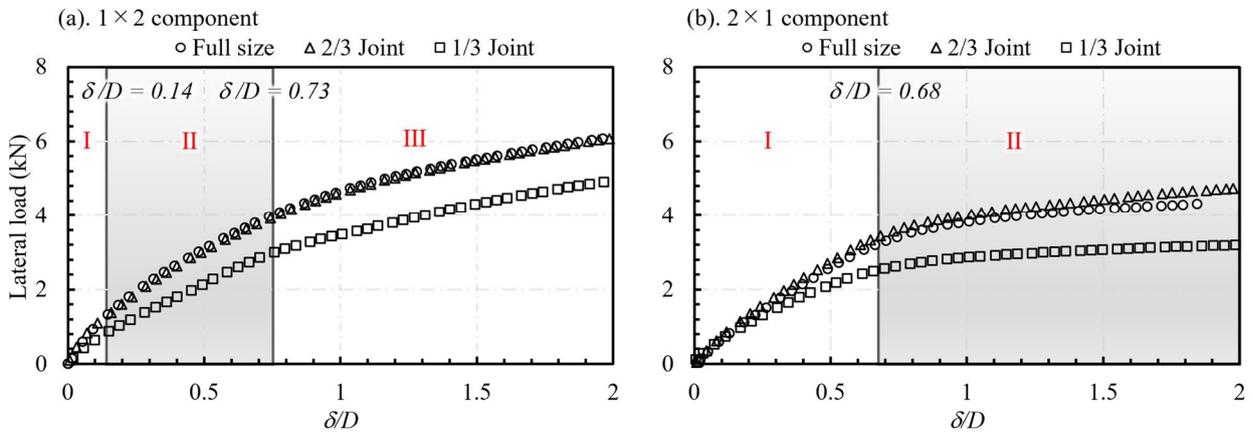


図3 鋼管矢板基礎の荷重変位関係

一方、 1×2 (直列) の場合、荷重変位曲線の剛性は δ/D が 0.14 および 0.73 のときに低下するのに対し、 2×1 (並列) の剛性は δ/D が 0.68 のときにのみ低下する。荷重変位曲線の剛性変動は、図3にまとめられている。 1×2 および 2×1 の両方の配置において、継手省略無しの場合と $2/3$ 継手の場合の初期剛性は近いことがわかる。 δ/D の増加に伴い、これら6つのケースの剛性は配置方向ごとに最終的に非常に近い値になる。

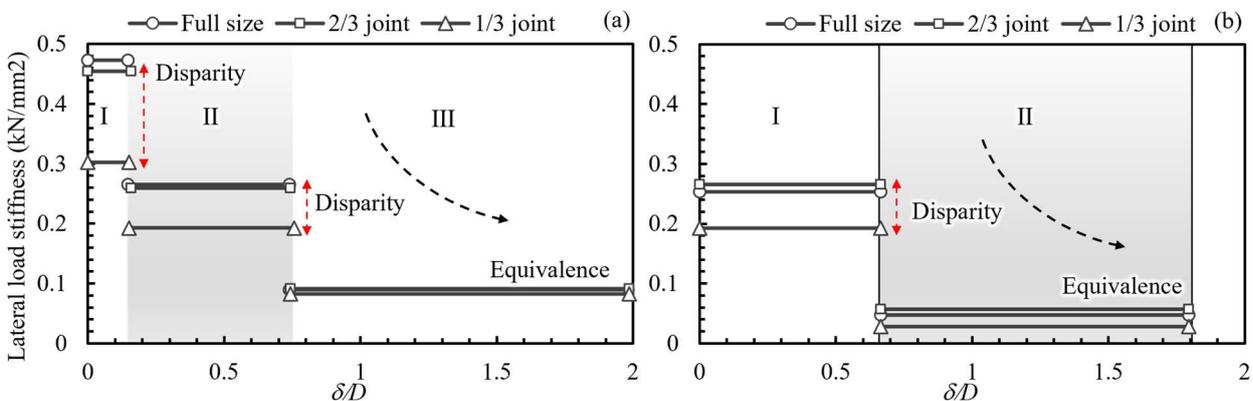


図4 鋼管矢板模型の剛性変位関係 (a)直列 (b)並列

3.2.2 杭頭回転角

鋼管矢板模型の杭頭部における回転角は、図5 (a) および (b) に示されている。X軸は杭頭の水平荷重、Y軸は杭頭の回転角を表している。1×2 および 2×1 の両方の配置において、1/3 継手ケースの回転角は他のケースよりも大きいことがわかる。特に2×1 配置では、水平荷重が約 2.5 kN に達すると回転角の勾配が急激に増加する。一方、2×1 配置の回転角すべてのケースにおいて1×2 配置よりも大きいことも明らかにした。

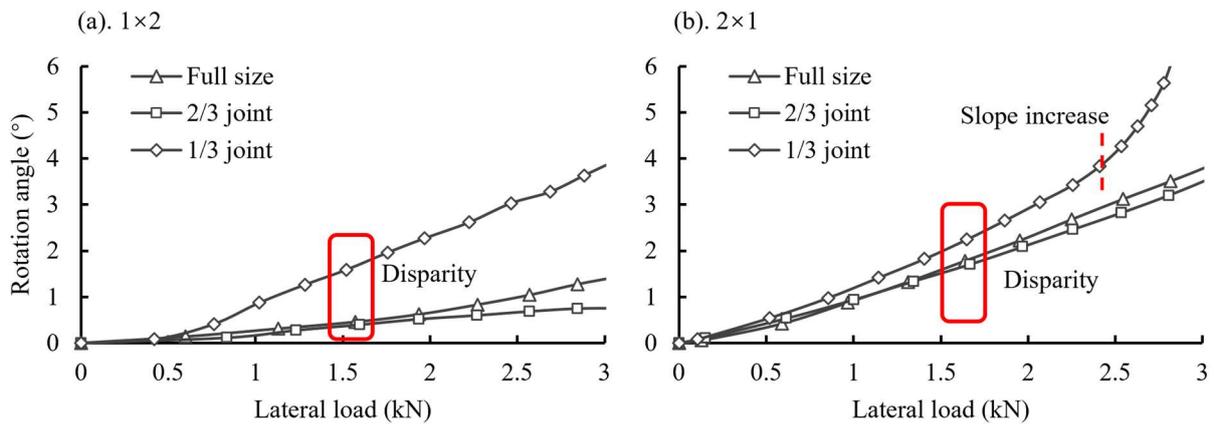


図5 杭頭部における回転角

3.1.2 継手省略の影響

上述の試験結果に基づき、基礎全体の水平耐力は最大曲げ変形が発生する断面の曲げ剛性によって決定されると考えられる。また、最大曲げ変形は継手の省略ではなく、地盤反力および配置方向によって決定される。図6 (a) および (b) に示されるように、X軸は除荷後の模型から得られた左にある鋼管および右にある鋼管のたわみを表し、Y軸は底部からの高さを表している。図6より、継手が2/3まで省略されていても、継手が鉛直方向に沿った曲げ変形が最大になる点をカバーしているため、杭の水平耐力は低下しない。一方、1/3継手の場合、継手の長さが曲げ変形が最大になる点よりも高いため、水平耐力は著しく低下する。

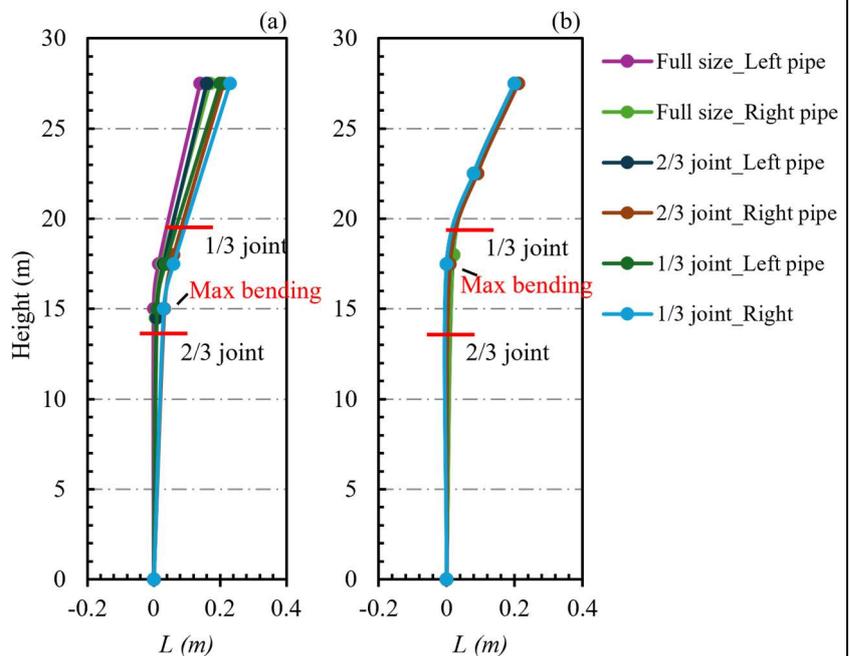


図6 除荷後において基礎鉛直方向におけるたわみ

最大になる点をカバーしているため、杭の水平耐力は低下しない。一方、1/3 継手の場合、継手の長さが曲げ変形が最大になる点よりも高いため、水平耐力は著しく低下する。

3.2 継手部の破壊

3.2.1 EBSG で測定されたひずみ

図 8 に示すように、1×2 配置における継手部の格子状柵の相対変位を観察することで、継手部の鉛直せん断破壊が観察された。これら 3 つのケースにおいて、継手の省略によってせん断範囲がほぼ変化しないことが確認できた。継手部の鉛直せん断が鋼管矢板基礎の荷重-変位曲線に与える影響を理解するために、本研究ではまず、図 7 に示すように、1×2 配置における EBSG 軸力のデータを分析した。ボルトの軸力は測定されたひずみおよびその校正係数によって計算され、ボルト軸力の分布は杭頭の異なる δ/D によって表され、色バーで示されている。

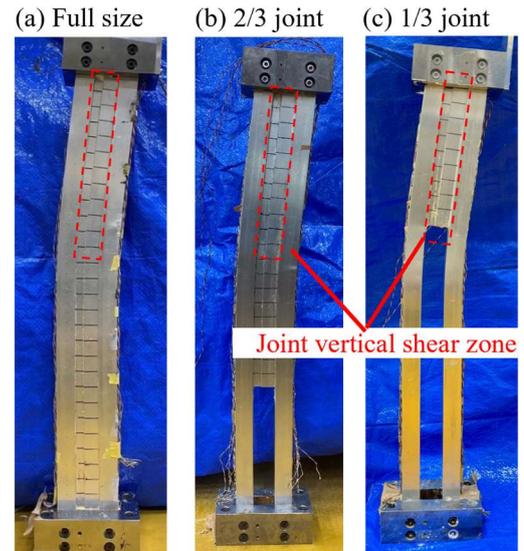


図 8 除荷後において模型の様子

ボルト軸力は本管と継手の接続力を表す。杭頭に水平方向の荷重がかかると、本管と継手は曲率が異なるため鉛直方向に分離しようとする。しかし、ボルトはこのような分離を抑制する。したがって、 δ/D が増加するにつれて、ボルトには大きな鉛直せん断力がかかることになる。しかし、設計基準に従えば、継手の鉛直せん断破壊が発生すると、本管と継手の曲率は減少し、結果として EBSG の鉛直せん断力も減少する。したがって、ボルト軸力の高さ方向の分布を分析することで、継手部の鉛直せん断破壊領域を特定することが可能となる。図 7 に基づくと、杭の上部のボルト軸力は比較的小さく、鉛直

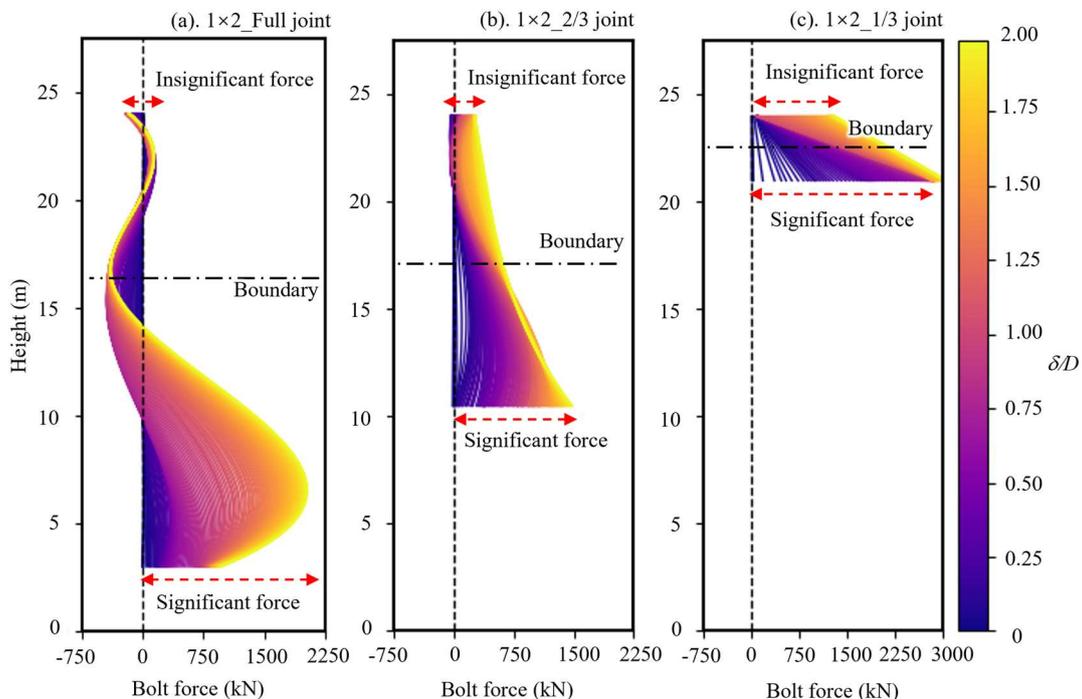


図 7 直列基礎模型における EBSG のボルト軸力分布

せん断破壊領域が杭の上部に位置していることを示している。この結果は図 8 と一致しているとみられる。

さらに、本研究では、継手部の鉛直せん断領域をより深く評価するために、関数 R を導入して式 (1) を定義した。 R は、特定の δ/D に対して、ボルトひずみが平均値より小さい場合、 R はゼロとなり、それ以外の場合はゼロより大きくなる。したがって、 R が小さいほど、継手の鉛直せん断破壊が発生するリスクが高いことを示す。 R の分布をヒートマップにすることにより (図 9)、継手部の鉛直せん断破壊領域を大まかに特定することができる。

$$R = \frac{(S_i - a) + |(S_i - a)|}{2} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (1)$$

ここで、 R は継手鉛直せん断破壊を示す関数、 S_i はある δ/D における EBSG で測定されたボルト軸力、 a はある δ/D における S_i の平均値を示す。

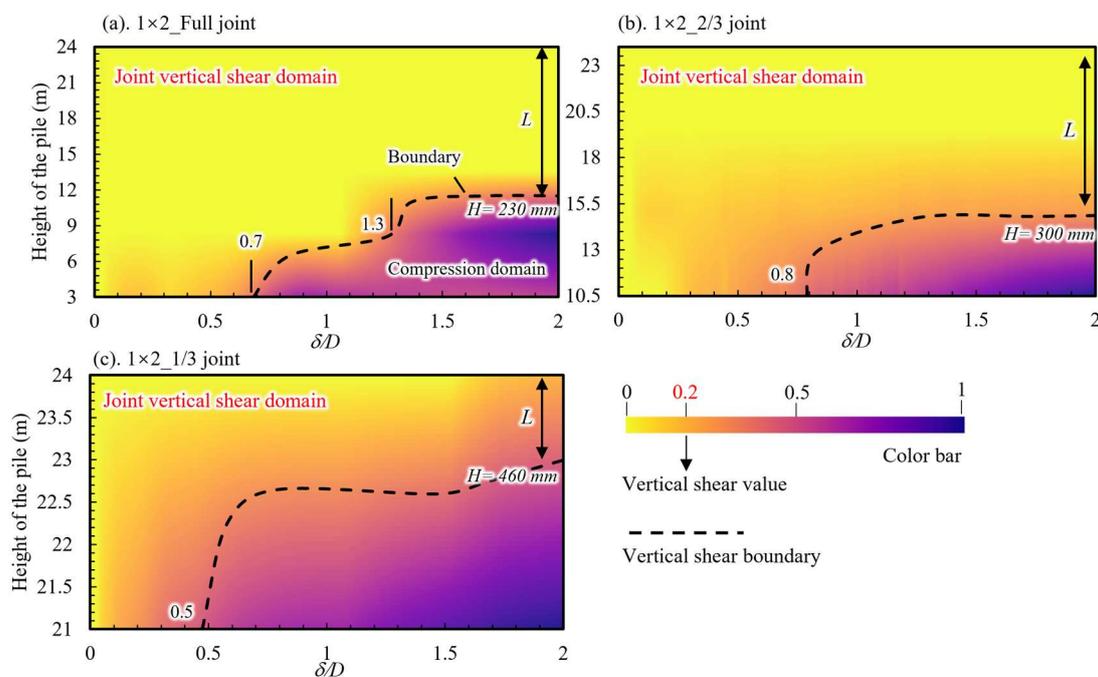


図 9 関数 R に基づいた継手鉛直せん断破壊範囲を示すヒートマップ

本研究は $R=0.2$ を選んで等高線をプロットし、継手の鉛直せん断破壊の境界を定義した (図 9)。境界の上では、 R が小さいために継手の鉛直せん断破壊が発生する。 $R=0.2$ を決定することは、継手の鉛直せん断破壊領域を調査するための近似的な方法であることに注意が必要である。より小さな R を選ぶと、安全レベルが高くなるということを意味する。図 9 (a) を例に説明すると、3 m から 24 m (S1-S5 の測定範囲) において継手鉛直せん断破壊が初期に発生したことがわかる。 δ/D が 0.7 に達すると、継手の鉛直せん断領域が狭くなった。これは、 δ/D の増加に伴い、継手に作用する地盤反力が増加するためと考えられる。地盤反力が増加すると、継手に作用する拘束圧も増加し、その結果、継手の鉛直せん断強度が増加する。したがって、継手の鉛直せん断破壊領域が狭くなる。この方

法は、S1-S5 のボルト軸力を比較することで継手の鉛直せん断破壊を決定するため、EBSG の数が増えるほど精度が向上することに留意する必要がある。

3.3 本管部の曲げひずみ

本管の曲げひずみは、水平方向の荷重と地盤反力の両方によって発生する曲げ変形を示す。本研究では、各ケースの全ひずみ値の合計である β を定義する。このような計算手法に基づくと、大きな β は、鋼管矢板基礎が水平方向に変形するために必要なエネルギーが少ないことを意味する。図 10 により、1×2（直列）の場合、 β は継手の長さに影響される。省略された継手の長さが増加するにつれて、 β も増加する。しかし、2×1（並列）の場合では、非線形な変化が発生した。

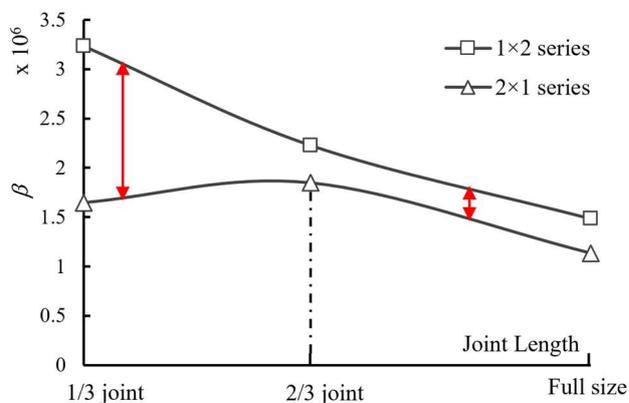


図 10 基礎模型のひずみ合計値 β

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

以上の議論に基づき、本研究では以下の将来の課題を明確にする必要があると考えている。

1. EBSG で測定されたボルト軸力のさらなる分析

本報告では、EBSG のボルトひずみに関して簡単な評価方法を示した。関数 R を用いて、本研究では継手の鉛直せん断領域をおおよそ決定した。しかし、EBSG を用いて鉛直せん断領域をより正確に評価する方法の提案が可能であると考えられる。これを達成するために、より高度な評価方法を導入することができる。例えば、EBSG のデータセットで鉛直せん断領域を分析するデータ駆動型の機械学習手法を用いることで、継手の鉛直せん断領域を直接計算できる定量的な関係を示す可能性がある。

2. 継手省略の影響に対する数値解析

本研究では、相対密度 90% の豊浦砂地盤において、継手長さが鋼管の $2/3$ の場合でも、省略しない場合と比べて、水平荷重変位関係が大きく変化しないことがわかった。相対剛性の影響を議論するために、数値解析により軟弱な地盤条件の検討を追加して議論する必要がある。

3. 多様な荷重条件下での評価

本研究では、水平荷重という特定の荷重条件下での継手省略の影響を評価したが、実際の施工現場では鉛直荷重など多様な荷重条件が存在する。異なる荷重条件下での継手省略の影響を評価し、より現実的なシナリオに基づく評価を行うことが重要である。