

(68) シートパイル基礎接合部の 孔あき鋼板ジベルの抵抗特性に関する研究

妙中 真治¹・西岡 英俊²・喜多 直之³・京田 英宏⁴
戸田 和秀¹・佐名川 太亮²・松浦 光佑³・阿部 淳一⁴

¹正会員 新日鐵住金 技術開発本部 鉄鋼研究所 (〒293-8511千葉県富津市新富20-1)
E-mail: taenaka.2m2.shinji@jp.nssmc.com

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: nishioka.hidetoshi.58@rtri.or.jp

³正会員 大林組 生産技術本部 設計第一部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)
E-mail: kita.naoyuki@obayashi.co.jp

⁴正会員 北武コンサルタント 技術部 (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7丁目4番7号)
E-mail: h-kyoda@hokubu-c.co.jp

孔あき鋼板ジベルは、ずれ剛性が高く、せん断耐力も大きいことから、近年、合成桁のみならず種々の合成構造物のずれ止めとして用いられつつある。一方で、その抵抗特性はコンクリートの拘束条件に応じて変化することも指摘されており、適用する実構造物における条件を考慮する必要がある。

シートパイル基礎は、仮土留め用シートパイルを基礎杭として本設利用する複合基礎であり、このフーチングとシートパイルの接合部に孔あき鋼板ジベルが用いられるが、地盤反力の影響によって合成桁のずれ止めとは異なる複雑な荷重条件となる。本報告では、この接合部に作用する荷重条件として、せん断力と圧縮力が同時に作用する条件を模擬した要素試験により、その抵抗特性を評価するとともに、その破壊過程や耐力等を解析的に検討した結果を報告する。

Key Words : sheet pile foundation, perfobond strip, shear capacity, combined loads

1. はじめに

(1) シートパイル基礎の概要

シートパイル基礎は、従来は直接基礎のフーチング施工のための地盤の掘削に際して従来は仮設部材として扱われていた仮土留め用鋼矢板(シートパイル)を、**図-1**に示すようにフーチングの鉄筋コンクリートと一体化して本設利用する鋼矢板併用型直接基礎である¹⁾。

シートパイル基礎は、シートパイルを単純に基礎杭として扱うのではなく、フーチング底面の地盤抵抗とシートパイルの地盤抵抗を組み合わせた「複合基礎」として設計される^{2,3)}。単独の直接基礎よりも支持力および耐震性能に優れることや、仮土留め用シートパイルを本設利用することでフーチングの外型枠の施工スペースが不要となることから、通常の直接基礎よりも基礎寸法が小さくできる等の特徴がある。そのため、例えば用地の制約が大きい都市部など、狭隘な条件での施工が必要とさ

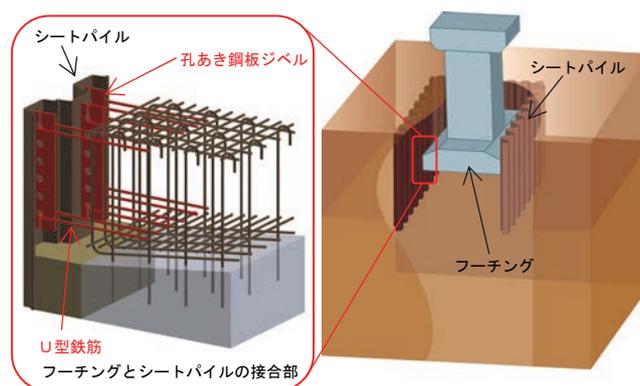


図-1 シートパイル基礎と接合部の概要

れる橋梁・高架橋基礎の新設あるいは耐震補強において大きなメリットがあり、近年施工実績が増加している²⁾。

(2) シートパイルとフーチングの接合構造

シートパイル基礎におけるシートパイルとフーチングの接合部の具体的な構造としては、大きく2つの方式が

提案・実施されている³⁾。一つは、シートパイルの内面側に多数の異形鉄筋を水平方向にスタッド溶接する「鉄筋スタッド方式」である。この方式は、鋼管矢板井筒基礎での多数の設計・施工実績を有しているが、多数のスタッド鉄筋が固定された状態で配置されるためフーチング幅が小さいシートパイル基礎では配筋作業の施工性が悪化するため近年ではほとんど用いられていない。

もう一つは、**図-1**に示すように孔あき鋼板ジベルを縦方向にシートパイル内面側に溶接し、その穴の一部（一般には上端と下端）にU型の鉄筋を引掛ける「孔あき鋼板ジベル方式」である。この方式では、溶接されていないU型鉄筋を動かしながらフーチングの配筋作業を行うことができることから、小規模のフーチングでも施工性が高いという特徴があり、今後の主流になると考えている。よって、以下ではこの「孔あき鋼板ジベル方式」を用いることを前提として論述する。

(3) 接合部で想定される荷重条件と設計思想

異なる地盤抵抗を組み合わせた「複合基礎」としてシートパイル基礎を設計するためには、シートパイルがフーチングの鉄筋コンクリートとの接合部を、設計耐用期間中に想定される全ての作用に対して剛に一体化されるように設計しなければならない。なお、孔あき鋼板ジベルは、合成桁をはじめとする合成構造物のずれ止めとして多用されるようになってきているが、その抵抗特性はコンクリートの拘束条件に応じて変化することも指摘されている⁹⁾。シートパイル基礎の接合部には、多数の実績を有する合成桁のずれ止めとは異なる荷重条件となり、結果としてコンクリートの拘束条件にも大きな違いが生じる可能性がある。よって、その設計においては、このような荷重条件の違いを適切に考慮する必要がある。

シートパイル基礎の接合部に作用する断面力は、シートパイル頭部の断面力から算定することができる。以下では、過去に実施したシートパイル基礎の実大の橋脚模型（フーチング幅3.6m、シートパイル根入れ長3.6m、模型自重837kN）の水平載荷試験（試験最大荷重800kN、フーチング底面から水平力載荷位置までの高さ6.5m）⁷⁾でのシートパイル頭部の断面力計測結果を例示しながら、シートパイル基礎の接合部の荷重条件について概説する。

a) 死荷重および活荷重作用時（常時）

シートパイル基礎に作用する常時の死荷重および活荷重等の鉛直荷重は、フーチング底面の鉛直地盤反力とシートパイルの圧縮軸力とに分担して負担される。例えば、実大橋脚模型では、模型完成時のフーチング底面とシートパイル軸力との負担割合は4：6程度であり、シートパイルの圧縮軸力はフーチング1辺あたり122kN（4辺合計、全36枚で488kN）であった。一方、これらの鉛直荷重によ

ってシートパイル頭部に曲げモーメントおよびせん断力はほとんど発生しなかった。

このような常時におけるシートパイル基礎の接合部の荷重条件としては、シートパイル頭部には圧縮軸力のみが発生し、接合部にはこれとつり合うための断面力が発生する。これは孔あき鋼板の長手方向に沿ったずれを生じさせる方向の荷重であり、力学的には合成桁のずれ止めとして用いられる場合と類似した荷重条件と考えることができる。なお、本章では、この荷重を「接合部のせん断力」、この荷重に対する抵抗力を「接合部のせん断耐力」と表記し、シートパイルの断面力としてのせん断力と明確に区別する。

b) 地震時慣性力の作用時（地震時）

地震時（あるいは暴風等の異常時）には、地震時慣性力（あるいは風荷重や制動荷重等）による水平力とそれに重心高さを乗じた転倒モーメントが基礎全体に作用する。このうち転倒モーメントに対しては、シートパイル頭部軸力による偶力モーメントが大半を負担する。すなわち、載荷方向に対して前面にあるシートパイルが圧縮側の最大軸力となり、背面にあるシートパイルが引張側の最大軸力となる。例えば、実大橋脚模型の水平載荷試験では、載荷前のフーチング1辺あたりの圧縮軸力122kNから、前面側シートパイルは圧縮軸力1080kN、背面側シートパイルは正負逆転して引張軸力495kNまで、大きく増減した。なお、シートパイルの曲げモーメントについては、地中部では比較的大きな値が生じたものの、杭頭部では非常に小さい値となった。

また、地震時慣性力によって基礎全体に作用する水平力に対しては、フーチング底面でのせん断地盤反力はほとんど期待できず、主にシートパイル頭部のせん断力が負担し、その中でも特に前面側シートパイルに負担が集中する。例えば、実大橋脚模型の水平載荷試験では、前面シートパイルだけでフーチング1辺あたり675kNと、最大水平力800kNの8割以上を負担している。一方、背面側シートパイルは最大180kN程度である。

このような地震時におけるシートパイル基礎の接合部の荷重条件のイメージを、実大橋脚模型の水平載荷試験では前面および背面のシートパイル頭部の最大断面力とともに**図-2**に示す。なお、**図-2**中に示した各断面力はフーチング1辺分（すなわちシートパイル9枚分）の値となっている。前面側では「接合部のせん断力」が増加するだけでなく、シートパイルをフーチング側に押し付ける方向の荷重（以下、本章では「接合部の圧縮力」という）も同時に作用している。また、背面側では「接合部のせん断力」の方向が逆転した上で荷重自体が増加するとともに、シートパイルをフーチングから引き剥がす方向の荷重（以下、本章では「接合部の引張力」という）が作用

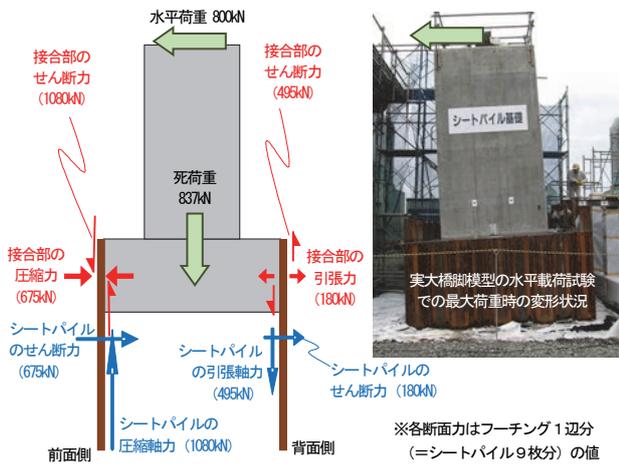


図-2 シートパイル基礎の接合部の荷重条件

する。この「接合部の圧縮力」あるいは「接合部の引張力」の大きさは、「接合部のせん断力」の3～6割程度と比較的大きな値となっている。すなわち、シートパイル基礎の接合部の孔あき鋼板ジベルの「接合部のせん断耐力」を評価する際には、「接合部の圧縮力」あるいは「接合部の引張力」による影響を考慮する必要があると考えられる。

c) シートパイル接合部の設計思想

孔あき鋼板ジベル方式の接合部の設計では、上述のような特殊な荷重条件となることを踏まえ、十分に安全側となるよう余裕を持った設計を行っている。例えば接合部の具体的な取り扱いとしては、実際には接合部全体で複雑な抵抗メカニズムを示すと考えられるものの、U型鉄筋部分と孔あき鋼板ジベル部分とで抵抗メカニズムを分離して考え、まず「接合部の引張力」に対しては、U型鉄筋のみで必要な抵抗力を確保することとしている。なお、このU型鉄筋の引張耐力は、別途実施した実験⁹⁾に基づいて設定している。その上で、「接合部のせん断力」に対しては、U型鉄筋を取り付けていない孔(この範囲を「せん断負担区間」と呼ぶ)のみで必要な「接合部のせん断耐力」を確保できるように孔の寸法や数を決定することとしている。

このような安全側の設計思想には、合理化の余地が残されている可能性がある。特に「接合部のせん断力」が最も大きくなる前面側シートパイルの接合部の孔あき鋼板ジベルの長さが、実質的にフーチング厚さの決定要因となる場合については、その合理化が大幅なコストダウンに寄与できる可能性がある。

(4) 本研究の目的

こういったシートパイル基礎の接合部における技術課題を踏まえ、本研究では、前面側シートパイルの接合部のうちのU型鉄筋を取り付けない範囲の孔あき鋼板ジ

ベル(せん断負担区間)に着目して、「接合部の圧縮力」が「接合部のせん断耐力」に及ぼす影響について基本的な特性を把握することを目的とした。

前述のとおり、シートパイル基礎の接合構造で想定されるような大きな水平圧縮荷重を作用させる試験をしているため、ごく小さな摩擦抵抗が残存しても、圧縮荷重の増大に従い、無視できない抵抗を発現する可能性がある。そのため要素試験では、荷重条件を模擬するとともに、孔あき鋼板ジベルのみならず、フラットプレート(孔なし鋼板)を対象とした試験を実施し、機械的な抵抗成分とそれ以外の抵抗成分の分離を試みた。また、その結果を踏まえて実施した解析的な検討も行った。本論文では、これらの検討内容と、その結果により得られた知見について報告する。なお、次章以降では、接合部に限定した記載となることから、「接合部のせん断力」や「接合部の圧縮力」について「接合部の」との表記は省略する。

2. 要素試験によるせん断耐力評価

(1) 実験概要

a) 試験体

試験体は、中央に載荷治具となるH鋼を配置し、H鋼のフランジ面外側に各1枚の孔あき鋼板ジベル(以下、PBLと呼ぶ)を溶接接合した後、両側のコンクリートブロック(以下、ブロック体と呼ぶ)に埋め込んだものである(図-3)。またブロック体には、溶接金網($\phi 3.2\text{mm}$, 網目 $50 \times 50\text{mm}$, かぶり 70mm)を配置して補強した。用いた試験体で、基本的な形状、サイズは全て同一とした。

本試験の主目的であるPBLは、既往の実験結果を参照し、保坂らの体系的な実験⁹⁾におけるタイプ3試験体(板厚 12mm , 孔径 35mm , 孔数3, 孔ピッチ 80mm)と同じ仕様とした。シートパイル基礎の接合構造で用いる標準仕様は、板厚 20mm , 孔径 70mm を想定しているため、本試験体は実物の約1/2サイズとなる。この縮小率に整合させるため、コンクリートの粗骨材(碎石)は一般的なサイズの約1/2となる 13mm を最大寸法とした。使用したコンクリートは目標設計強度 24N/mm^2 であり、実測強度は $23.8\text{N/mm}^2 \sim 25.6\text{N/mm}^2$ であった。

なお本研究では、PBL以外の抵抗を除去するため、鋼板下側には切り欠き部を設け、鋼板端部の支圧抵抗が発現しないようにした。なお、摩擦抵抗は鋼材表面状態に影響することを考慮し、過大評価を避けるためブロック体に接する鋼材表面にはグリースを塗布した。

b) 試験装置

本研究で対象とする接合構造は、図-1 に示すシート

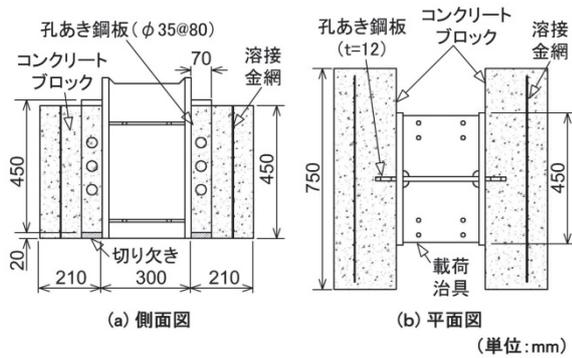


図-3 試験体形状

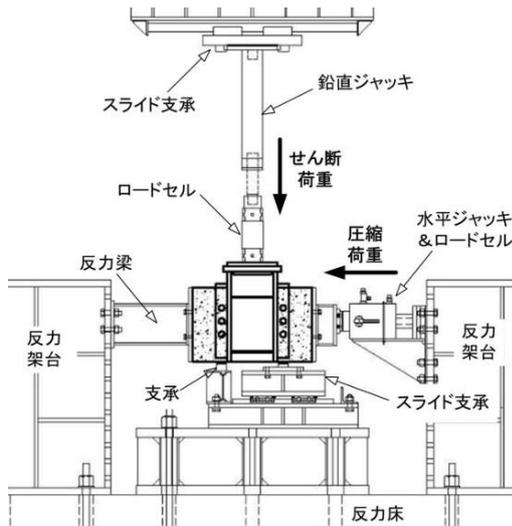


図-4 試験体の設置状況

表-1 試験ケース一覧

試験体	対象	荷重パターン
PBL-1	孔あき鋼板 ジベル	圧縮荷重ゼロモデル(6.0kN一定荷重)
PBL-2		圧縮荷重のせん断荷重比を一定(約0.17倍)
PBL-3		圧縮荷重のせん断荷重比を一定(約0.5倍)
FP	フラット プレート	圧縮荷重一定条件にてせん断荷重を荷重 ただし圧縮荷重4段階で複数回の試験を実施

パイルとフーチングの結合部を想定しており、接合構造には鋼矢板からのせん断力のみならずフーチングからの水平力が作用する。そのため試験装置は、試験体に鉛直からのせん断荷重に加えて、相応する水平方向からの圧縮荷重を作用することができるように設計した(図-4)。試験装置の設計においては、スタッドジベルを対象に行われた平ら¹⁰⁾の研究を参考としている。

さらに、本試験では可能な限りブロック体の拘束条件を低減するための工夫を設けている。ブロック体の支承はピン条件を模擬し、半円柱支持板を用いた。ブロック下面に支承からの集中反力を軽減する鋼板を設置した。また本試験装置では、圧縮ジャッキ側の支承や鉛直ジャッキ上部にもリニアガイドを設置した。

c) 試験ケース

表-1 に本研究で実施した全4ケースの一覧を示す。

PBLシリーズの試験体3体は全く同一であり、荷重パ

ターンをパラメータとしている。PBL-1試験体は、圧縮荷重をほぼゼロを仮定したが、試験装置は拘束条件を可能な限り低減することを目的にブロック体をピン支承で支持しているため試験体の安定の観点から非常に小さい一定の圧縮荷重(約6kN)を試験中継続して作用させた。

PBL-2試験体とPBL-3試験体は、せん断荷重と圧縮荷重を一定の割合で増加させていくケースであり、設計条件の違いを考慮して二つの荷重比が異なるケースとした。なお、以下の試験結果におけるせん断荷重は、鉛直ジャッキ荷重の1/2としたPBL一枚の抵抗力(kN/枚)とする。

また、孔あき鋼板ジベルにおける荷重伝達機構¹¹⁾のうち、機械的な抵抗機構を除外した摩擦抵抗を評価するため、PBLをフラットプレート(孔なし鋼板)に代えた試験(FPシリーズ)も実施した。FPシリーズにおける荷重パターンについては、試験結果とともに後述する。

(2) 実験結果

a) フラットプレートの結果(FPシリーズ)

本試験の荷重パターンは、単一の試験体に繰り返し荷重を荷重させることとし、その結果を独立に評価することとした。中島ら¹⁰⁾の研究によれば、理想的な付着力を有するクーロン摩擦的な挙動を示すことが確認されている。本研究では、この知見を用いて、まず付着抵抗と摩擦抵抗の合計を計測し、その後、十分な変位を与えて付着抵抗が消失した状態において、摩擦抵抗のみを計測することとした。表-2 には、実際に実施した試験プロセスと、その際の圧縮荷重、最大せん断抵抗および各段階での累積変位量を示す。

図-5 は、表-2 に示す試験プロセスのうち初期段階(No.1~No.8)の代表的なせん断荷重と相対変位の関係を示す。ほぼ相対変位を生じず、最大せん断抵抗に到達し、その後、急激に変位が生じて抵抗が低下する傾向がみられた。各せん断抵抗の最大値は、作用させた圧縮荷重に応じて変化しており、支圧力の影響を強く受けいていると言える。一方、図-6 は、十分な累積変位(ここでは約8mm以上)を与えた後の結果である。圧縮力に応じてせん断抵抗が増大する傾向は同様であるが、せん断抵抗と相対変位の関係は、明らかに図-5 とは異なる。図-6 では最大せん断抵抗に到達するまでに徐々に相対変位を生じており、また最大せん断抵抗に到達以降の荷重低下はほとんどなく、非常に安定した挙動を示した。

以上の結果を、最大せん断荷重と圧縮荷重の関係として整理したものを図-7 に示す。なお試験プロセスのNo.7とNo.8は荷重変位関係から、付着抵抗が消失しつつある遷移領域と判断されたため、プロットから除外した。まず後半の試験プロセスから得られるデータ(図中の○印)は、非常に良好な線形関係を示しており、その切片

表2 FPシリーズにおける载荷履歴

試験プロセス	圧縮荷重 (kN)	最大せん断荷重 (kN/枚)	载荷開始時の累積変位 (mm)
1	136.3	65.2	0.00
2		80.0	0.24
3		78.8	1.42
4		95.1	2.67
5	225.1	106.1	3.59
6		93.1	5.22
7		36.0	6.38
8	80.9	28.2	7.33
9	29.0	12.3	8.21
10	81.0	25.2	9.13
11	137.3	37.2	10.22
12	226.2	58.7	11.42

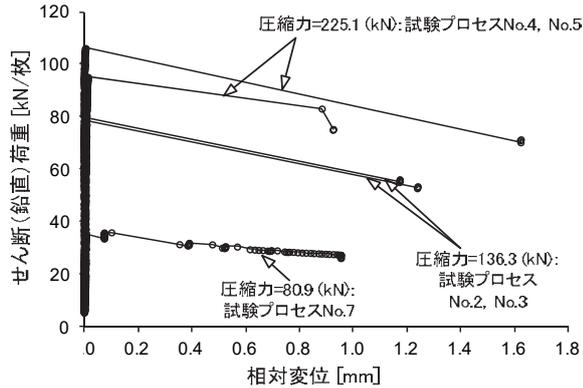


図5 せん断荷重-ずれ変位 (FPシリーズ, 初期ピーク時)

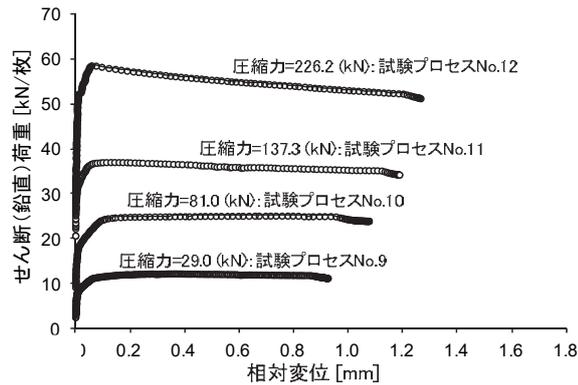


図6 せん断荷重-ずれ変位 (FPシリーズ, 摩擦抵抗分)

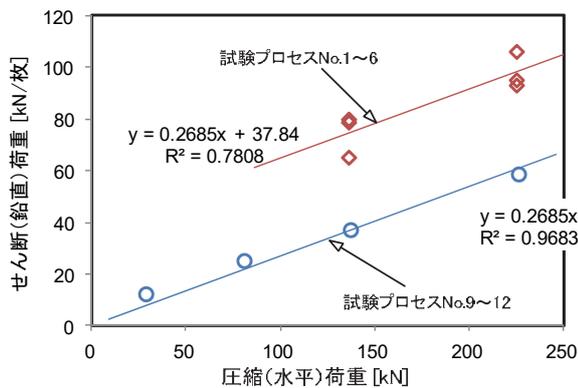


図7 せん断荷重と圧縮荷重の関係 (FPシリーズ)

はほぼゼロとなることが確認される。このことから、理想的な摩擦抵抗が発現していると考えられ、近似線から摩擦抵抗の評価が可能となる。また前半の試験プロセスから得られるデータ(図中の◇印)も多少ばらつきはある

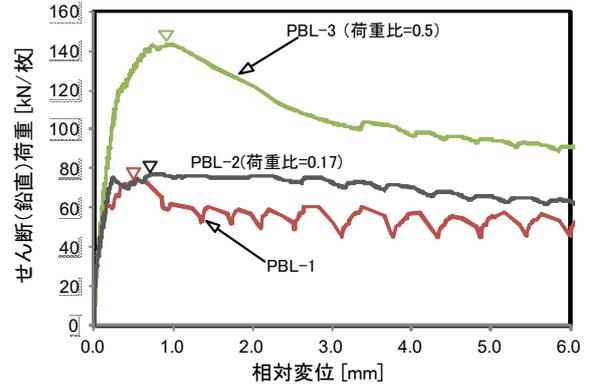


図8 せん断荷重-ずれ変位関係 (PBLシリーズ)

ものの線形関係を示している。同様に、この近似線の切片から付着抵抗の評価が可能である。このようにして得られた図-7は、理想的な付着力を有するクーロン摩擦抵抗の破壊線を描いており、中島ら¹¹⁾と同様の試験結果となっている。この結果より、求めた付着抵抗は75kN程度となる。また摩擦抵抗は近似線勾配より約0.27と推定される。既往研究¹¹⁾では、摩擦係数は0.43~0.45程度とされているため、グリース塗布は、摩擦抵抗を約半分まで低下させる効果に留まっていると言える。

b) 孔あき鋼板ジベルの結果 (PBLシリーズ)

PBLシリーズの試験にて得られたせん断荷重とずれ変位を図-8に示す。図の縦軸は、PBL一枚あたりのせん断荷重であり、横軸は両側のPBLの相対ずれ変位の平均値である。図中の▽印は、せん断荷重が最大となる点である。図-8よりPBL-1試験体からPBL-3試験体へと作用させた水平方向の圧縮荷重が大きくなるにつれ、せん断抵抗が増加する傾向が確認できた。しかし作用させた圧縮荷重の大きいPBL-3試験体では、最大せん断力に到達すると同時に耐力低下が確認された。一方、圧縮荷重が比較的小さいPBL-2試験体では、最大せん断力以降の荷重低下は緩やかとなった。なお、圧縮荷重をほぼゼロ近くで一定としたPBL-1試験体では、最大せん断力到達時に、片側のPBLのみの変位が卓越する破壊形式となり、先行して破壊した片側のPBLの変位のみが累積し、試験体が安定を失う結果となった。そのため最大せん断耐力以降の荷重-ずれ変位関係が相対的に不安定なものとなった。最大せん断耐力到達時の相対変位を比較すると、緩やかな傾向であるが圧縮荷重が高いほど最大せん断耐力への到達が遅れる傾向を示した。作用させる圧縮荷重の方向が異なるものの、同様の傾向は既往の実験¹²⁾でも確認されており、拘束効果の影響も示唆される。

(3) 実験結果の考察

a) 観察された破壊形態

図-9左に、試験終了後にブロック体上面で観察されたひび割れの状況を示す。PBLシリーズの全試験体に共

通して荷重治具への溶接部逆端部から、外側に向かってひび割れが観察され、その他の部分にはひび割れは観察されなかった。一方で、FP試験体ではブロック体上面も含めてひび割れは全く確認されなかった。

図-9右に、試験後のPBLの様子を示す。鋼板表面に沿うように破壊面が形成されており、2面せん断破壊が観察された。また孔内のコンクリートの圧壊などは確認されなかった。ブロック体上面のひび割れは、このせん断破壊面の凹凸の乗り上げ現象によるものと考えられる。

b) 各抵抗成分を分解した評価と考察

前節に示したFP試験体の結果より、鋼板面での抵抗は無視できないことが分かる。但し、図-5から付着抵抗は相対変位が生じると急激に低下すること、また図-6からPBLの最大荷重は0.5mm~1.0mmと比較的大きなずれ変位で発現していることから、鋼板面での抵抗は主に摩擦抵抗で構成されていると考えられる。図-10では、図-8に示す最大せん断耐力から摩擦抵抗を除いた抵抗成分を求めた結果を示す。ここで摩擦係数 μ は図-7の近似線の勾配より $\mu = 0.27$ とした。

図より作用させる圧縮荷重の増加に伴い、摩擦抵抗を除外した最大せん断耐力成分(図中△印)は依然、増加傾向を示しており、摩擦抵抗以外にも作用させる圧縮荷重に起因するせん断抵抗成分が存在することが分かる。このような現象は、図-11に示すように鋼板表面の摩擦抵抗と孔部による機械的せん断抵抗に加えて、PBLに対して並行な方向に作用する圧縮力に伴って生じるブロック体のPBLとは垂直な方向への変形と、それを抑制するブロック内に配置した鉄筋および鋼板とブロック体間の摩擦抵抗力により、PBLと垂直な方向に作用した拘束力によると考えられる抵抗増分と推察される。

ここでは、本試験条件におけるPBLのせん断耐力は、上記の三つの抵抗成分である摩擦抵抗: S_f 、孔部によるせん断抵抗: S_c 、拘束力によるせん断抵抗増分: S_r の総和と仮定する。

$$\sum S = S_f + S_c + S_r$$

$$= \mu \cdot N + \alpha \cdot A_c \cdot (f'_c)^{2/3} + \beta \cdot N \cdot A_c \cdot (f'_c)^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 A_c は孔面積、 f'_c はコンクリート強度、 α 、 β は係数である。 N はPBLに作用させた圧縮力である。

式(1)の左辺の第二項および第三項に示される孔部のせん断抵抗力 S_c と圧縮力に起因するせん断抵抗力の増分 S_r の影響を表わす係数 α 、 β は未知数のため、図-10に示す△印のデータを用いて回帰分析により求めた($\alpha = 2.8063$ 、 $\beta = 0.0078$)。本実験におけるせん断耐力算定式が得られたことから、三つの抵抗成分を算出した結果を表-3に示す。中島ら¹³⁾が提案している孔あき鋼板ジベル

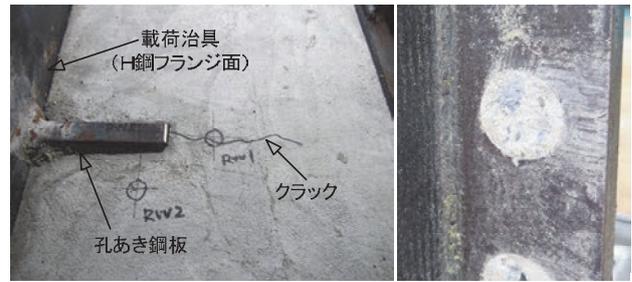


図-9 試験後の破壊状況
(左：ブロック体上面；右：孔あき鋼板ジベル)

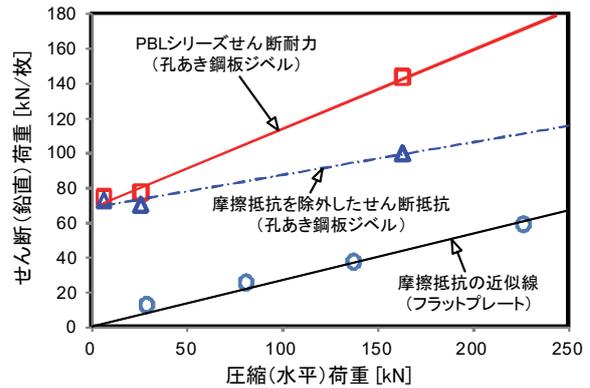


図-10 せん断荷重と摩擦抵抗の関係

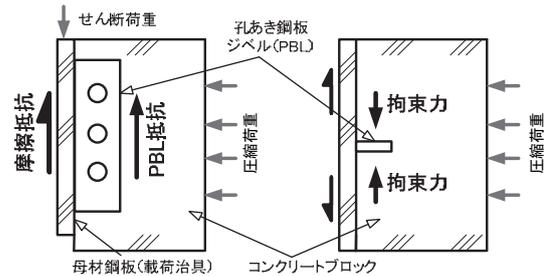


図-11 抵抗成分の概略イメージ

表-3 実験結果および各抵抗成分の推定値 (kN/枚)

	実験結果		推定値				中島式 (参考)
	圧縮力	せん断耐力	せん断耐力 ΣS	摩擦抵抗 S_f	孔部抵抗 S_c	拘束増分 S_r	
PBL-1	6.5	74.2	70.0 (104%)	1.7 (3%)	67.0 (100%)	1.2 (2%)	74.7 (111%)
PBL-2	25.9	77.1	82.2 (117%)	7.0 (10%)	70.2 (100%)	5.1 (7%)	78.1 (111%)
PBL-3	162.9	143.2	142.7 (209%)	43.7 (64%)	68.1 (100%)	30.9 (45%)	75.9 (111%)

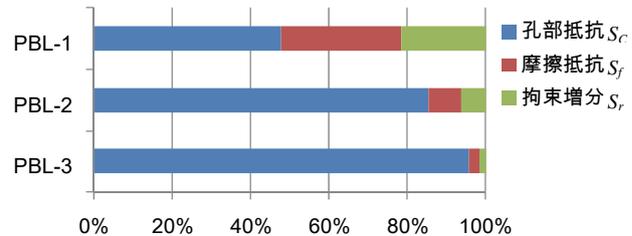


図-12 各抵抗成分の比率

の抵抗値も参考に示した。下段は、主に孔あき鋼板の抵抗の主成分と考えられてきた孔部抵抗を基準(100%)とした比率を示している。また、図-12に、各抵抗成分の

比率を整理した。

これらの結果より、今回の結果より推定される孔部抵抗成分は、中島ら¹³⁾の評価方法と大きく乖離するものではないことが確認される。さらに圧縮力に依存する抵抗成分(孔部抵抗以外)はPBL-1では無視できるほどに小さいが、圧縮力の増大とともに増加傾向であることが確認でき、PBL-3では全体のせん断耐力の約半分が摩擦抵抗および拘束力による増分抵抗であることが分かる。

3. 解析的検討

(1) 検討目的

実験的検討によれば、PBLの抵抗力は、孔部抵抗、摩擦抵抗、および拘束抵抗の影響を受け、圧縮力が大きくなるほど、摩擦抵抗、拘束抵抗の影響が大きくなるとの知見が得られた。そこで、これらのPBLの抵抗メカニズムを確認するため、試験体をモデル化した3次元非線形解析を実施した。

(2) 解析モデルとパラメータ

解析モデルは、試験体を鋼板位置で分割した1/2モデルとした。境界条件は鋼板要素側面を対称境界とし、支承下端でY軸方向を固定、載荷版端部でX軸周りの回転を拘束した。コンクリートブロックはソリッド要素でモデル化し、材料構成側は前川ら¹⁴⁾のモデルを用い、無筋要素とした。材料特性は試験体と同一とした。コンクリートブロックと、鋼板および孔あき鋼板ジベルとの接合はジョイント要素を設け、接触面のすべりに関してはクーロン摩擦を考慮し、摩擦係数はフラットプレートの実験結果より0.27とした。またジベル孔のせん断破壊を模擬するためのばねモデルを与えた。ばねモデルは複合構造標準示方書より、孔あき鋼板ジベル接合部のせん断力-ずれ変位関係を算定し、これを多直線で近似した。なお、ジベル孔のせん断耐力は、中島ら¹³⁾の方法より算定した。またせん断耐力以降に対しては、せん断耐力の

2/3を保持するものと仮定しモデル化した。

解析ケースは表-1と同じ3ケースとする。PBL-1はコンクリートブロックに圧縮荷重を作用させ、せん断力を変位増分により作用させた。PBL-2、PBL-3は作用圧縮力と作用せん断力を比例増分させる必要があるため、荷重増分させた。またポストピーク後の挙動の確認のため、PBL-2とPBL-3に対してはさらに、実験における最大荷重時相当の圧縮荷重を初期に作用させ、せん断力を変位増分により作用させた結果も示した。

(3) 解析結果

解析により得られた孔あき鋼板ジベルのせん断力-鉛直変位関係を図-14に示す。図中の破線が変位制御における解析結果であり、△で示したのが荷重制御における解析結果である。荷重制御と変位制御では剛性および最大耐力が同程度であるため、以降、変位制御の解析結果について考察を行うものとする。

せん断力-鉛直変位関係は、PBL-1は最大耐力および最大耐力以降の挙動も、実験結果を精度良く再現できていると考えられるが、PBL-2では、最大耐力後の挙動が異なり、解析は実験に比べ大きく軟化している。PBL-3では、剛性、最大耐力ともに実験値を大きく下回り、最大耐力は、実験結果の0.6倍程度となった。なお、各解析ではいずれも、最大耐力はジベル孔のせん断耐力に達した時となった。

本解析では、圧縮力によらず一定としたジベル孔のせん断抵抗と、圧縮力により生じる鋼板とコンクリートとの摩擦抵抗によるものと仮定している。したがって、解析では、ジベル孔がせん断耐力に達した後に軟化が生じることになる。

PBL-1のように圧縮力が小さい場合には、解析では軟化領域の挙動と概ね一致するが、PBL-2のように圧縮力が大きくなると、実験と異なり、解析では軟化が大きく生じている。

これによれば、解析による摩擦抵抗の推定精度の問題はあるものの、ジベル孔のせん断-ずれ変位関係に圧縮

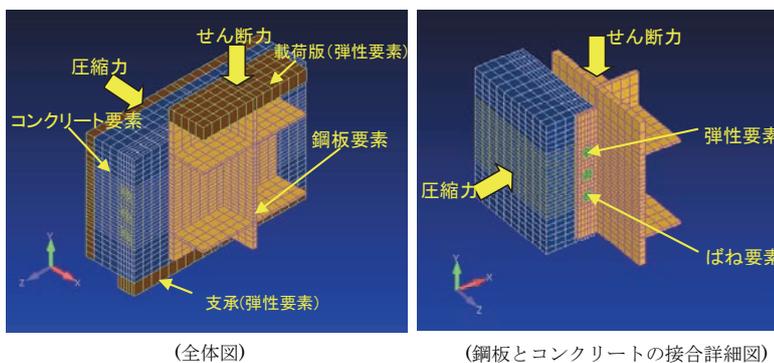


図-13 解析モデル図

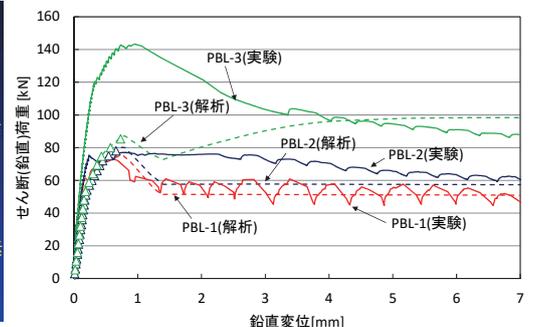


図-14 せん断力-鉛直変位関係

力が影響し、圧縮力によりジベル孔のせん断抵抗が増加することを示唆しているものと考えられる。このことは、前述した実験結果による考察で示したように、圧縮力の増加によりジベルの拘束の影響が大きくなることと整合するものと考えられる。なお、PBL-3のような高い圧縮応力下においては、ジベル孔内部の抵抗は無圧縮状態よりも剛性、耐力ともに大きく増加し、ポストピーク後の軟化特性にも影響を与えると考えられる。このような圧縮応力下におけるジベル孔内部の現象は、古内らの検討で報告されている¹⁵⁾。今後、これらの現象を解析に組み込むことにより、精度の高い解析が行えることになると考えられる。

4. おわりに

本研究では、シートパイル基礎のシートパイルとフーチングの接合部のせん断抵抗力について、要素実験およびFEM解析により検討し、以下の知見を得た。

- 1) シートパイル基礎の前面側シートパイルとフーチングとの接合部で想定される圧縮力とせん断力が組み合わされた荷重条件では、圧縮力に伴って接合部のせん断耐力が上昇する。
- 2) 圧縮力に伴う接合部のせん断耐力の上昇効果としては、シートパイルとコンクリートの摩擦抵抗が同時に発揮される効果のみならず、孔あき鋼板ジベルのジベル孔とコンクリートのせん断抵抗自体が拘束効果によって上昇する効果が期待できる。

これらの知見は、これまでのシートパイル基礎の前面側シートパイルとフーチング接合部のせん断耐力の設計が安全側であったことを示すものである。今後は、拘束効果の影響を定量的に評価することのほか、U型鉄筋設置範囲も含めた接合部全体の挙動についても検討していくことで、接合部の設計の合理化に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 神田政幸, 村田修, 西岡英俊, Pongsakom Punrattanasin, 日下部治: シートパイルとフーチングを組み合わせたシートパイル基礎の提案, 土と基礎, Vol.51, No.11, 2003.11.
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 17.3 シートパイル基礎, 2012.
- 3) 鉄道総合技術研究所, 大林組, 新日鐵住金: 鉄道構造物に適用するシートパイル基礎の設計・施工マニュアル (案) (第3版), 2014.3.
- 4) 鉄道総合技術研究所, 大林組, 新日鐵住金: 鋼矢板を用いた既設鉄道構造物基礎の耐震補強工法 (シートパイル補強工法) 設計・施工マニュアル (案) (第3版), 2016.11.
- 5) 西岡英俊, 前田友章, 濱田吉貞, 山本忠久: 鉄道橋における鋼矢板併用型直接基礎—シートパイル基礎—, 基礎工, 2009.10.
- 6) 複合構造レポート10 複合構造ずれ止めの抵抗機構の解明への挑戦, 土木学会, pp.81-82, 2014.8.
- 7) 西岡英俊, 神田政幸, 平尾淳一, 東野光男, 前田友章, 藤田欽司, 近藤政弘: シートパイル基礎の実大規模水平載荷試験, 土木学会論文集C, Vol.65, No.2, pp.363-382, 2009.4.
- 8) 喜多直之, 田中浩一, 平尾淳一, 神田政幸, 西岡英俊: シートパイルとフーチングの接合構造に関する実験と設計法, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.491-492, 2005.9.
- 9) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴: 孔あき鋼板ジベルのせん断強度評価式と設計法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1265-1272, 2002.
- 10) 平陽兵, 渡辺忠朋, 齊藤成彦, 溝江慶久, 島弘, 中島章典: 制御されたせん断力と軸方向圧縮力を受ける頭付きスタッドのせん断耐力とせん断カーブ変位関係, 土木学会論文集A, Vol.70, No.5, pp.69-II_80, 2014.
- 11) 中島章典, 猪股勇希, 齋川幾美, 大江浩一: 付着, 機械的作用を有する鋼・コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討, 土木学会論文集A, No.63, No.4, pp.758-767, 2007.
- 12) 西海健二, 沖本眞之: 拘束力を考慮した有孔鋼板のずれ止め特性に関する研究, 土木学会論文集, No.633/I-49, pp.193-203, 1999.
- 13) 中島章典, 橋本昌利, NGUYEN MINH HAI, 鈴木康夫: 貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構とせん断耐力評価, 土木学会論文集A, Vol.70, No.5, pp.20-II_30, 2014.
- 14) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 15) 阿部侑磨, 古内 仁: 孔あき鋼板ジベルの拘束応力とせん断耐力の関係について, 土木学会北海道支部論文報告集, 73, E-14, 2017.

A study on shear resistance of perfbond strip between sheet pile and concrete footing

Shinji TAENAKA, Hidetoshi NISHIOKA, Naoyuki KITA and Hidehiro KYODA
Kazuhide TODA, Taisuke SANAGAWA, Kousuke MATSUURA, Jyunichi ABE

Perfbond strip (PBL) has been applied to several kinds of composite structures. It is known that the performance strongly depends on structural details and load conditions, and the difficulties hereby remains to evaluate capacity and behaviour of PBL. This research focuses on the PBL used for Sheet Pile Foundation, a composite foundation utilizing a temporary retaining wall (sheet piles) as foundation piles connected by PBL. In this paper, its shear resistance is investigated through a elemental test, simulating combined forces as actual joints of the foundation is subject to. Furthermore, FEM studies are also reported to verify the test results.