

報告 充填モルタルを用いた鋼製筒状部材と小口径杭頭部の結合構造

稲富 芳寿^{*1}・吉武 勇^{*2}・杉本 健^{*3}・三浦 房紀^{*4}

要旨：本研究では、鋼製筒状部材内に埋設したマイクロパイルの実大サイズの押込み実験を通じて、プレキャストコンクリートとマイクロパイルの簡素化した結合構造を構築することを主な目的としている。さらに、この簡素化した結合構造について、マイクロパイル打設の上下方向の施工誤差に対する許容値を実験的に求めている。本研究の成果より、ビード溶接による簡素化したせん断リングを用いた結合構造においても、埋設深さ $1.0D_p$ 以上にせん断リングがある場合、十分な定着耐力が確保できることがわかった。

キーワード：杭頭結合、マイクロパイル、施工誤差、鋼製筒状部材、充填モルタル

1. はじめに

小口径杭(マイクロパイル)工法は、既設構造物に近接して十分な施工スペースが確保できない場所や橋梁の桁下など、空頭が制限される場所での作業に適した杭基礎工法である。この工法は、直径 200mm 程度の短尺鋼管(1~3m)を主部材として使用し、小型・軽量の機械で施工することができるため、低空頭・小スペースでの施工が可能である¹⁾。

マイクロパイル工法は、このような特徴を活かして、主に既設橋梁基礎の耐震補強工事における増杭に用いられている。また近年では、道路拡幅の擁壁やボックスカルバートなどの新設工事においても、交通規制が困難な場所や既設構造物・地下埋設物・架空線などに近接する場所において、低空頭・小スペースの施工が要求される

ことから、マイクロパイルがしばしば用いられている²⁾。

新設構造物の基礎としてマイクロパイルを用いる場合、躯体構造をプレキャスト化することが、施工の機械化・省力化による工期短縮や建設コスト縮減につながるものと考えられる。そこで筆者らは、プレキャスト RC 部材とマイクロパイルの杭頭を直接結合する一方策として、鋼製筒状部材(鋼製スリーブ)と充填モルタルを用いた杭頭結合構造の適用について検討してきた³⁾。

この結合構造は、図-1に示すようにあらかじめ鋼製スリーブを埋設したプレキャスト RC 部材とマイクロパイルの杭頭をモルタル充填結合する方法であり、マイクロパイルの施工誤差をある程度許容しながら、比較的容易に両者の一体化を図ることができる特徴を有する。

これまでの研究では、杭頭結合部に作用する軸力(引

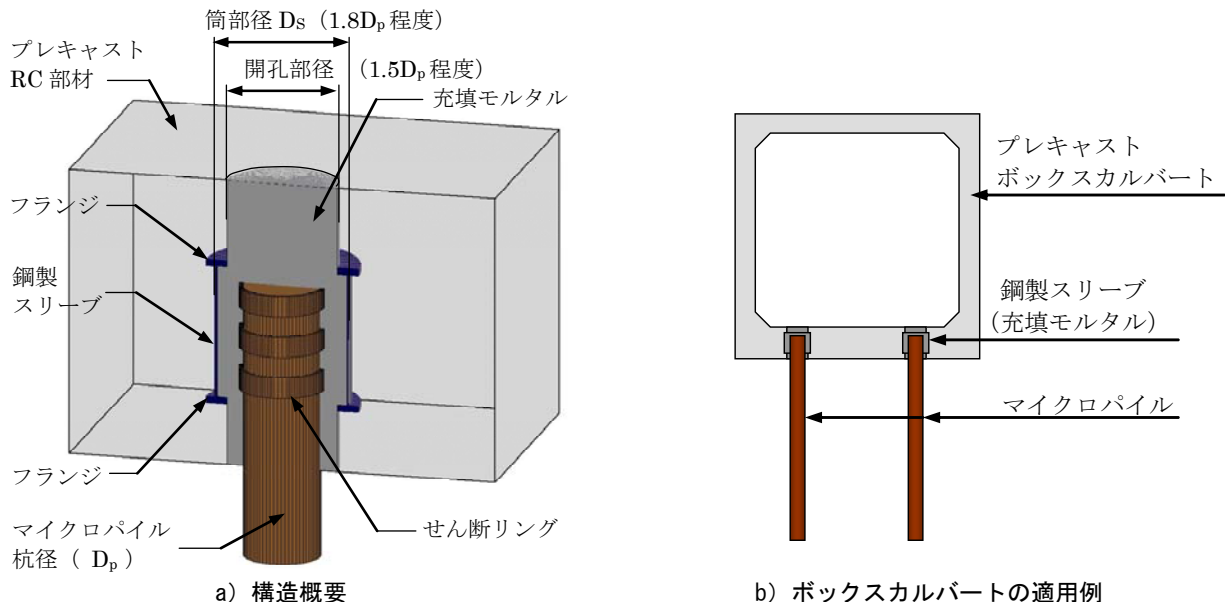


図-1 充填モルタルと鋼製スリーブを用いた杭頭結合構造

*1 極東工業(株) 技術企画課 主任 (正会員)
 *2 山口大学大学院 理工学研究科 准教授 博(工) (正会員)
 *3 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻
 *4 山口大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

抜き力) および正負交番曲げ荷重に対する耐荷性能を確保するために、鋼製スリーブ内に杭径の 1.0 倍以上を埋設する必要があるという知見を得ている。

ここで既往の研究³⁾あるいは実施工に用いたマイクロパイル杭頭へのせん断リングの設置方法は、図-2に示すようなねじ式であったことから、せん断リングの設置位置を調整することで、マイクロパイルの施工誤差(高さ方向)を許容することができた。しかしながら、杭頭およびせん断リングに対するねじ加工は、コスト高となるため、より簡易な加工によるせん断リングの設置方法が課題であった。

そこで本研究では、先述のマイクロパイルとプレキャスト RC 部材の結合構造に対し、高さ方向の施工誤差をある程度許容しながら所用の耐荷性能を満足できる簡易なせん断リングの開発を目的とした。本研究では、この簡易なせん断リングのひとつとして、図-3に示すようなビード溶接により設置したせん断リングの適用性について検討した。なお、本杭頭結合構造の適用対象とする L 型擁壁やボックスカルバートは、一般的に常時押込み力が卓越する構造であるため、本研究では押込み荷重による載荷実験を実施した。本稿は、この簡易なせん断リングを有するマイクロパイル杭頭の押込み載荷実験を通じて得られた知見を報告するものである。

2. 実験概要

2.1 鋼製スリーブ

(1) 構造・機能

本研究で対象とした杭頭結合構造に用いる鋼製スリーブは、鋼管部材の両端にフランジを溶接したものである。プレキャスト RC 部材に埋設した鋼製スリーブ内にマイクロパイル杭頭を設置し、その空隙部にモルタルを充填することで、比較的容易に両者を一体化することができるものである。

この鋼製スリーブは、図-4に示すように充填モルタルの変形・移動を拘束することで、マイクロパイル杭頭と鋼製スリーブの定着性を向上することができる。さらに、図-5に示すように鋼製スリーブの端部に設けたフランジがプレキャスト RC 部材に対する押抜き・引抜きせん断抵抗面を形成し、鋼製スリーブとプレキャスト RC 部材の定着性を高めることが可能である。

(2) 材料および形状寸法

鋼製スリーブの材料は、材料調達および加工・製作の容易性のため、構造用鋼管と円形鋼板の組合せとしており、鋼管の両端部にフランジを溶接した比較的単純な構造となっている。鋼製スリーブの筒部に用いる鋼管の径 D_s は、図-1 a)に示すようにマイクロパイルの径 D_p に対して 1.8 倍程度の構造用鋼管を使用している。また、

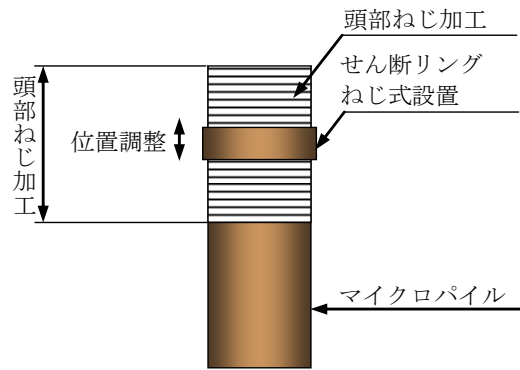


図-2 ねじ式せん断リング

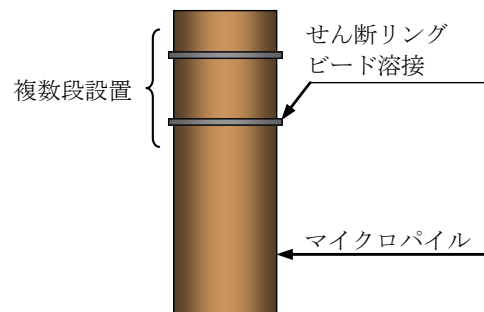


図-3 ビード溶接式せん断リング

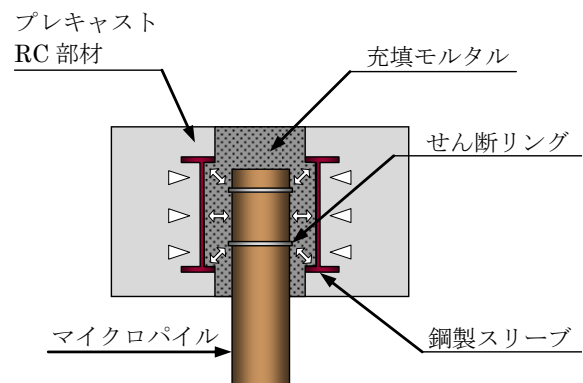


図-4 内部拘束効果の概念図

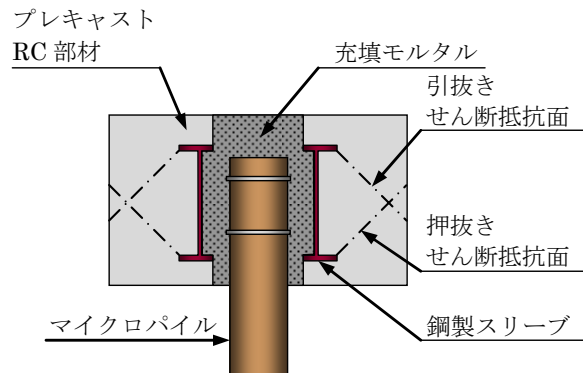


図-5 外部定着効果の概念図

鋼管の端部に取付けるフランジの開孔部径は、マイクロパイルの施工誤差の管理値¹⁾である $0.25D_p$ を包含するため、径 D_p に対して 1.5 倍程度としている。

2.2 充填モルタル

本研究で対象とする杭頭結合構造は、充填モルタルを介して、マイクロパイル杭頭と鋼製スリーブを埋設したプレキャスト RC 部材を一体化するものである。充填モルタルは、図-6に示すように、マイクロパイル杭頭と開孔部を有するプレキャスト RC 部材を組合せた状態で、鋼製スリーブの空隙部に自由充填する。そのため、充填モルタルの材料には a) 充填作業の容易性・流動性, b) ノンブリージング, c) 無収縮性, d) 品質確保の容易性といった性能が要求される。

そこで、本研究で用いた充填モルタルの材料は、セメント系固化材と細骨材をあらかじめ混合した材料に現場において水と練り混ぜるプレミックスタイプとした。本実験で用いたプレミックスタイプは、しばしばマイクロパイル施工の現場で用いられるものであり、その配合条件を表-1に示す。

2.3 実験供試体

(1) 実験供試体

本研究は、マイクロパイルに対して、ビード溶接による簡易なせん断リングの適用性の検討を目的としている。既往の研究³⁾によると、鋼製スリーブの内部拘束効果が充分機能した場合の破壊モードは、プレキャスト RC 部材の押抜きせん断破壊や杭鋼管の降伏であった。そこで、結合構造の破壊挙動や強度を調べるため、本実験に用いる供試体は、図-7に示すように鋼製スリーブと杭鋼管の結合部を取出した要素試験体とした。

マイクロパイルとして用いた鋼管は、外径 $D_p = 114.3\text{mm}$ 、板厚 $t = 6\text{mm}$ (STK400 材) のものであり、この埋込み側の外周にビード溶接 ($h = 2.5\text{mm}$, $b = 5\text{mm}$) によるせん断リングを設置した。一方、鋼製スリーブには、外径 $D_s = 216.3\text{mm}$ ($1.89D_p$)、板厚 5.8mm 、高さ 126mm (STK400 材) の鋼管を使用し、その両端に 180mm ($1.57D_p$) の板厚 12mm (SM490 材) の鋼板を溶接した。杭鋼管を鋼製スリーブ内に図-7のように設置した状態で、前述の無収縮タイプのモルタルを充填して一体化を行った。

(2) 検討パラメータ

本実験では、マイクロパイルの高さ方向に対する施工

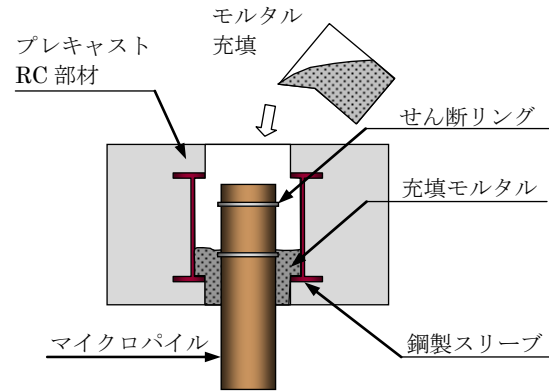


図-6 モルタル充填要領

表-1 充填モルタルの配合条件

プレミックスタイプ		水
特殊セメント	細骨材	
937.5 kg/m ³	937.5 kg/m ³	338 kg/m ³

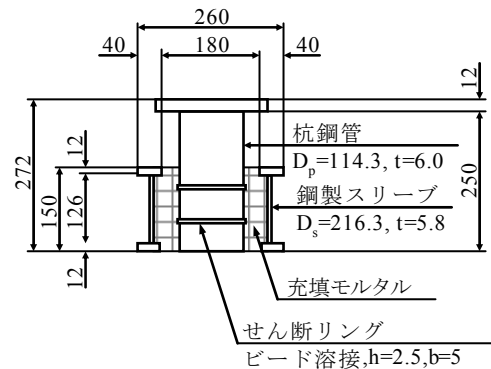


図-7 供試体 (単位:mm)

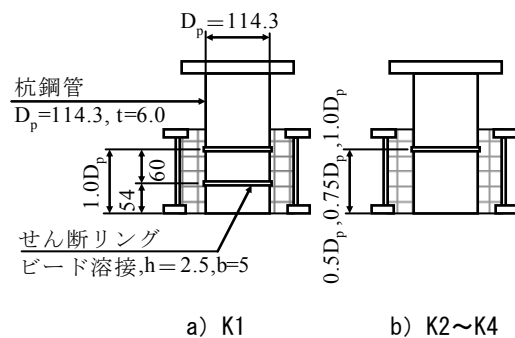


図-8 せん断リング配置 (単位:mm)

表-2 供試体一覧

番号	供試体記号	パラメータ	せん断リング数	リング設置高 (mm)	平均リング径 (mm)	充填モルタルの力学性状
1	K1	K1-1	2	上:112,下:53	上:120.0,下:119.8	圧縮強度: 59.4N/mm ² 割裂引張強度: 4.1N/mm ² ヤング係数: 26.1kN/mm ²
2		K1-2	2	上:112,下:53	上:119.8,下:119.4	
3	K2	K2-1	1	112	119.9	
4		K2-2	1	113	119.7	
5	K3	K3-1	1	83	119.7	
6		K3-2	1	84	119.8	
7	K4	K4-1	1	56	119.2	
8		K4-2	1	55	118.4	

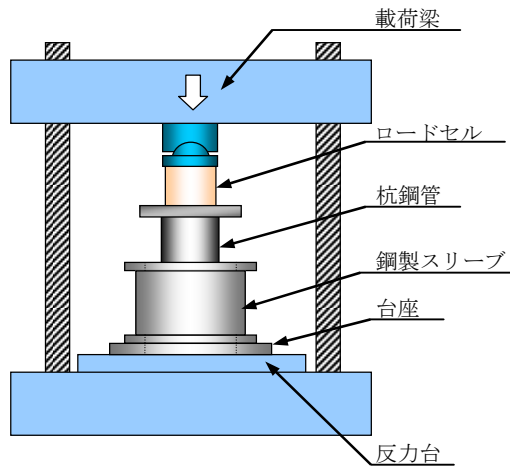


図-9 荷重方法

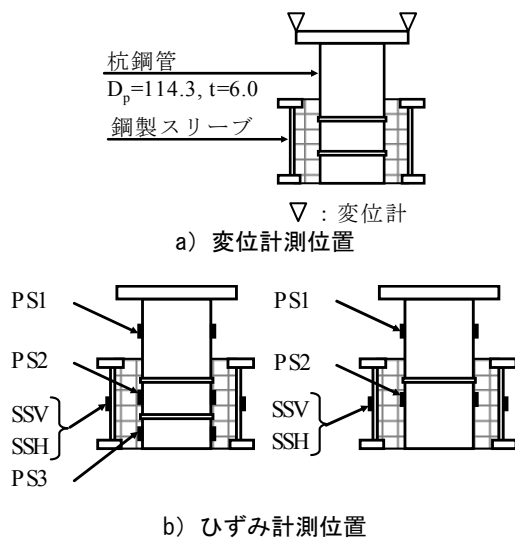


図-10 計測位置 (単位:mm)

誤差が、杭頭結合部の耐荷性能におよぼす影響を検討するため、せん断リングの段数、設置高さを検討パラメータとした。せん断リングの配置図を図-8に示すとともに、供試体一覧を表-2にまとめて示す。供試体K1は、せん断リング数を2段とし、設置高さを114mm ($1.0D_p$) および54mmとした。一方、供試体K2~K4は、せん断リング数を1段とし、設置高さを杭径 D_p に対して $1.0D_p$ 、 $0.75D_p$ 、 $0.5D_p$ の3水準とした。

2.4 実験方法

(1) 荷重方法

本研究における荷重方法を図-9に示す。本実験では、圧縮荷重装置(最大荷重1000kN)を用いて、杭鋼管頭部に圧縮力を導入することにより、杭頭結合部に押し込み荷重を導入した。また、供試体と荷重台との間に外径320mm、板厚22mmの台座を設置し、この台座に鋼製スリーブのフランジ開孔部径と同じ180mmの開孔を設けることにより、充填モルタルの抜け出し変位を拘束しない状態で



写真-1 供試体底面の破壊状況例

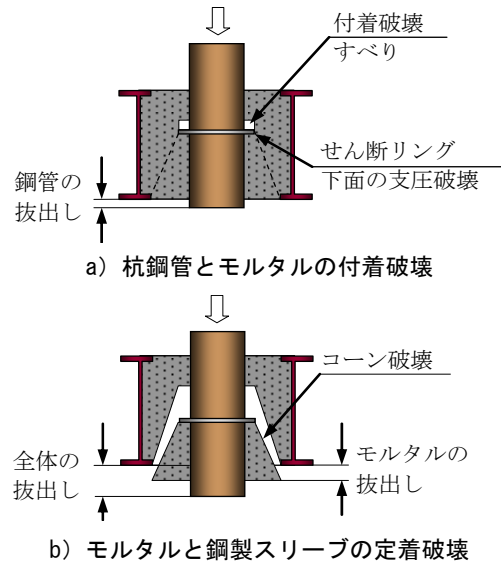


図-11 破壊模式図

荷重を行った。

(2) 計測方法

変位計ならびにひずみゲージの設置箇所を図-10に示す。鋼製スリーブの下端は、反力台および台座で変形が拘束されていることから、図-10 a)に示すように杭鋼管頭部の変位を測定し、鋼製スリーブからの抜け出し変位を測定した。また、せん断リングを介した荷重の伝達状況を確認するため、図-10 b)に示すように杭鋼管の充填モルタル内部に配置されたリブの下側にひずみゲージを貼付け、軸方向ひずみ(PS)を計測した。さらに、杭鋼管から充填モルタルを介した鋼製スリーブへの応力伝達を確認する目的から、鋼製スリーブの中央部に二軸ひずみゲージを貼付け、軸方向(SSV)および周方向のひずみ(SSH)を計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊形状

破壊状況の例を写真-1に示す。K1では、写真-1 a) 左に示すように、モルタル-鋼製スリーブ間で段差が生じ、K2~K4では、写真-1 a) 右に示すように、杭鋼管-モルタル間およびモルタル-鋼製スリーブ間で段差が生じていた。

これらは図-11のように、1) 杭鋼管とモルタルの界面における付着破壊、2)モルタルと鋼製スリーブの定着破壊の双方が生じたことを示している。なお、K1については、写真-1 b) 左に示すように上側のせん断リング(1.0D_p)を起点に鋼製スリーブ内でコーン破壊が生じていたことから、破壊機構はいずれも同様と考えられる。

3.2 最大荷重

各供試体の最大荷重および最大荷重時の変位を表-3に示す。各供試体2体の最大荷重の平均値を比較すると、せん断リング1段を高さ1.0D_pに設置したK2が535.2kNであったのに対して、せん断リングを2段設置したK1は658.2kN(123%)であった。一方、せん断リング1段を高さ0.75D_p、0.5D_pに設置したK3およびK4は、それぞれ331.4kN(62%)、209.6kN(39%)であり、最大荷重がせん断リングの設置高さに対してほぼ線形的に減少することが確認できた。

3.3 荷重-変位

各供試体の荷重-変位関係を図-12に示す。なお、本実験では、杭鋼管頭部の変位量を計測したものである。

せん断リングを1段設置したK2~K4に比べ、せん断リングを2段設置したK1は、最大荷重に至るまでの荷重-変位曲線の勾配が若干高い結果となった。これは、せん断リングを2段設置することで、せん断ずれに抗した結果といえる。またせん断リングの設置高さが0.5D_pと最も低いK4では、最大荷重に達した後、変位の急増と併せて荷重低下が著しい。

K1~K3の結果に示すように、最大荷重に達した後に、徐々に荷重低下しながら変位が増大したことから、ビード溶接のような簡易なせん断リングであっても、十分な靱性能が得られることがわかった。

3.4 荷重-ひずみ

杭鋼管の押込みに伴い生じる鋼製スリーブによるコンファインド効果を調べるため、周方向ひずみを求めた。図-13に荷重-周方向ひずみを示す。この図に示すように、せん断リングの埋設深さが大きくなるほど、周方向ひずみは大きくなり、K1およびK2-1においては1000×10⁻⁶を超過するものであった。これは、筒部全高を有効と考えると約150kNの拘束力(フープストレス)に相当するものである。なお、K2において周方向ひずみの差異が著しいものの、せん断リングの埋設深さ(1.0D_p)が同

表-3 最大荷重一覧

供試体記号	最大荷重(kN)	平均最大荷重(kN)	最大荷重時変位(mm)
K1-1	625.4	658.2 (123%)*	4.86
K1-2	691.0		4.34
K2-1	612.2	535.2 (100%)*	9.98
K2-2	458.2		2.63
K3-1	316.6	331.4 (62%)*	0.90
K3-2	346.2		2.27
K4-1	196.4	209.6 (39%)*	0.61
K4-2	222.8		0.43

*最大荷重の比(対K2)

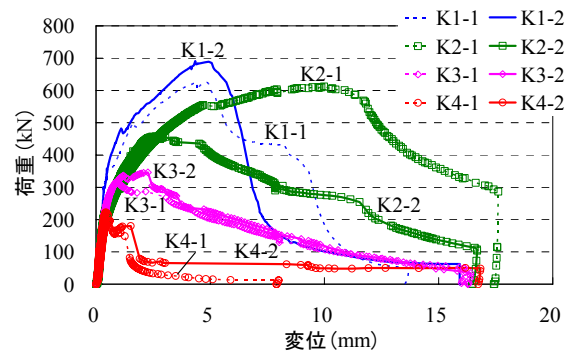


図-12 荷重-変位

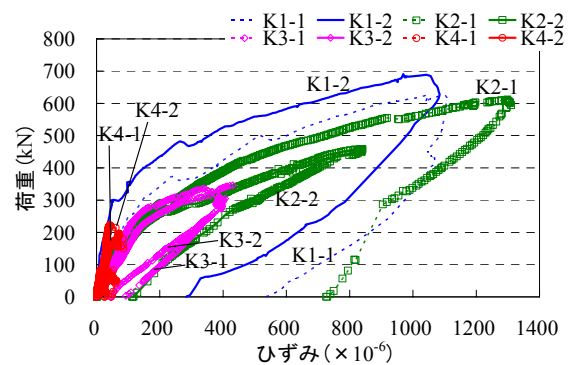


図-13 鋼製スリーブの周方向ひずみ (SSH)

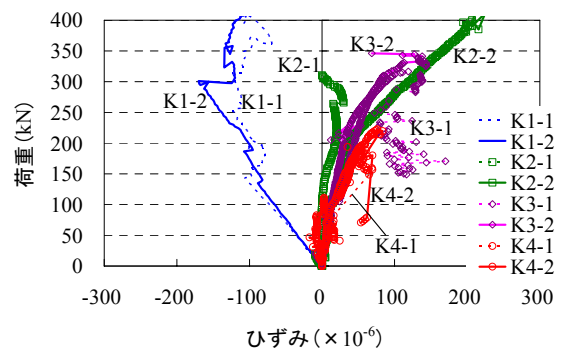


図-14 杭鋼管ひずみ (PS2)

じK1とK2には明確な傾向の差異はみられなかった。

図-14には、せん断リング直下の杭鋼管ひずみ変化を示す。せん断リングを2段設置したK1を除いて、K2~K4においては、最大100×10⁻⁶程度の引張ひずみが生じた。これは、先述の鋼製スリーブによるコンファインド効果によるものと推察される。また下段のせん断リング

の影響より、K1には圧縮ひずみが生じているが、最大でも 100×10^{-6} 程度であったことから、杭鋼管周辺の充填モルタルに応力伝達が行われ、両者が一体となって荷重に抗していることが窺えた。

4. 杭頭結合部の許容荷重

本章では、先述の実験結果を踏まえて、鋼製スリーブを埋設したフーチングなどのプレキャスト RC 部材の許容荷重について考察する。

許容荷重の算定モデルとして、部材高 250mm のプレキャスト RC 部材の中央に鋼製スリーブを埋設したものを想定した(図-15)。プレキャスト RC 部材の許容荷重は、鋼製スリーブの外面に生じるコンクリートの許容押抜きせん断応力度を用いて算定するものとし、道路橋示方書⁴⁾の式(1)を基に求めた。なお、許容荷重算定におけるコンクリートの強度は、プレキャスト RC 部材で一般的に用いられる $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ および $f'_{ck}=35\text{N/mm}^2$ とした。表-4 に許容荷重の算定結果を示す。

$$\tau_p = \frac{P}{b_p \cdot d} \quad (1)$$

ここに、 τ_p ：押抜きせん断応力 (N/mm^2)、 P ：荷重 (N)、 d ：下フランジ上面から RC 部材外縁までの距離で算出した押抜きせん断有効高 (mm)、 b_p ：下フランジ外縁から押抜きせん断有効高 d の 1/2 離れた位置で算出した円周長 (mm) を表す。

表-3 に示す最大荷重と表-4 中の許容荷重の比較を行う。実大サイズを用いた本実験において、K1 の最大荷重はプレキャスト RC 部材の許容荷重に対して約 2.3 倍に及び、K2、K3 ではそれぞれ約 1.8 倍、約 1.1 倍となり、プレキャスト RC 部材の押し抜きせん断破壊が杭鋼管の定着破壊より先行することが予想される。逆に K4 においては、同比が約 0.72 倍であり、杭鋼管の定着破壊が先行するため、せん断リングの埋設深さは少なくとも $0.75D_p$ 以上は必要とされることがわかる。なお、本実験成果より、実設計においては安全側をみてせん断リングの埋設深さが $1.0D_p$ 以上は必要と考えている。

5. まとめ

本研究では、実大サイズの押込み実験を通じて、プレキャストコンクリートとマイクロパイルの簡素化した結合構造の構築を試みた。そして簡素化した結合構造について、マイクロパイル打設の上下方向の施工誤差の影響を調べ、施工上の管理指標を実験的に求めた。本研究で得られた結論を以下に要約する。

(1) 実験による最大荷重がプレキャスト RC 部材の許容

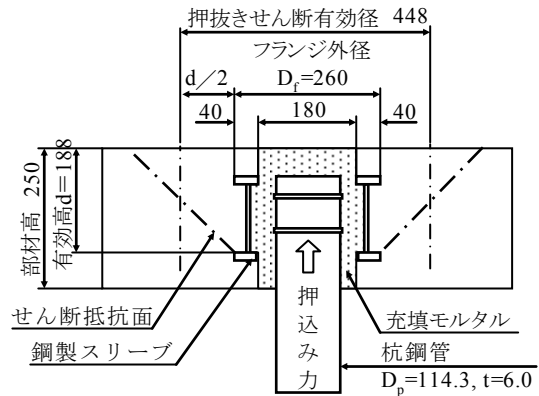


図-15 押抜きせん断模式図 (単位:mm)

表-4 許容荷重算定結果

設計基準強度	許容押抜きせん断応力度 (N/mm^2)	許容荷重 (kN)
30N/mm^2	1.0	264
35N/mm^2	1.1	291

荷重を上回ったことから、ビード溶接による簡素化したせん断リングを用いた結合構造の押込み力に対する耐荷性能が確認された。

- (2) 簡素化したせん断リングにより十分な定着性が確保され、杭鋼管とモルタルの界面における付着破壊、およびモルタルと鋼製スリーブの定着破壊の双方が生じた。
- (3) 簡素化したせん断リングにおいても、最大荷重以降、徐々に荷重低下しながら変位が増大したことから、高い靱性能が得られることがわかった。

マイクロパイル打設の上下方向の施工誤差が生じた場合においても、せん断リングの埋設深さ $1.0D_p$ 以上を確保できるように、今後はせん断リングの段数・間隔の検討、水平方向の誤差による影響の検討および施工管理規格値の設定が必要と考えている。また、適用する構造物の作用荷重によっては引抜き力および正負交番荷重に対する耐荷性能を確認する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 土木研究所：既設基礎の耐震補強に関する共同研究 (その3)、No.282、6分冊の2、pp.1-3、2002.9.
- 2) 池水富美矢：高耐力マイクロパイル工法の新しい活用事例、土木施工、Vol.47、No.2、pp.73-79、2006.2.
- 3) 稲富芳寿、直野和人、山根隆志、吉武 勇、三浦房紀、中川浩二：小口径杭とプレキャスト RC 部材の結合構造に関する実大実験、土木学会論文集 F、Vol.64、No.1、pp.15-23、2008.1.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編、pp.169-170、2002.3.