

論文 円形鋼管にコンクリートを充填したパイルキャップの杭頭接合部のせん断耐力に関する実験的研究

福原 武史*1・三橋 幸作*2・高山 秀俊*3・南谷 知輝*4

要旨：型枠を兼用した円形鋼管の内側にコンクリートを充填したパイルキャップに杭頭を埋め込む杭頭接合部に関して、主に杭のせん断応力を伝達する接合部を模擬した要素せん断実験および杭の曲げ及びせん断応力を伝達する接合部を模擬した部材曲げせん断実験を実施し、構造性能を確認した。要素および部材実験の試験体の最終破壊状況はいずれも鋼管において水平加力方向の鋼板の面外方向への降伏に至った。また、鋼管板の面外降伏の耐力評価方法を提案して接合部耐力の計算値と実験値と比較したところ、その比（実験値／計算値）は要素実験では1.59～1.85であった。また、部材実験に対しては1.05と妥当に評価された。

キーワード：合成混合構造, 鋼管, 杭頭接合部, 既製杭

1. はじめに

パイルキャップに型枠を兼用した円形鋼管を用い、その内側のコンクリート部に杭頭を埋め込む(図-1)のみで杭とパイルキャップ間で応力伝達できれば、現場での施工効率化(型枠および配筋作業の最小化)につながる。さらに、パイルキャップのコンクリート部外周が鋼管で覆われるため、構造性能の向上が期待できる。既報りではこのようなパイルキャップの軸支持性能に関して実験及び評価方法を検討した。本論では特にパイルキャップ-杭間の水平方向のせん断力伝達性能に着目し、2章では杭の埋め込みが浅く主に杭頭のせん断力を伝達する接合部を模擬した要素実験を実施して構造性能を確認するとともに、その耐力評価方法を検討する。また、3章では杭の埋め込みが深く杭頭の曲げ及びせん断力を伝達する接合部を模擬した部材実験を実施して構造性能を確認し、接合部耐力の評価方法を検討する。

定し、上部はパイルキャップの型枠兼用した円形鋼管、下部は既成杭の杭頭を模擬し、50mm 杭頭を飲み込ませたディテールとした。なお、パイルキャップと杭頭の接触面の縁を切るために20mmのスタイロフォームを間に挟んだ。また、杭を模擬した内側の鋼管は先行して降伏しないように厚肉とし、鋼管内部には上部に打設したものと同配合のコンクリートを先行して中詰めして製作した。試験体は計4体で、実験変数はへりあき(下部と上部の鋼管またはコンクリートの外周の間の距離)、鋼管の有無およびパイルキャップのコンクリート強度とした。

表-1 試験体一覧

試験体	鋼管上部	杭鋼管(下部)	$\sigma_B(N/mm^2)$
S-1(基準)	$\phi 300 \times t4.5$	$\phi 200 \times t6$	26.3
S-2(あき小)	$\phi 240 \times t4.5$	$\phi 200 \times t6$	26.9
S-3(鋼管無し)	-	$\phi 200 \times t6$	26.6
S-4(高強度)	$\phi 300 \times t4.5$	$\phi 200 \times t6$	58.6

σ_B :コンクリート圧縮強度(鋼管外側の内部に利用)

2. せん断力伝達性能に関する要素試験

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧を、図-2 に試験体の断面および形状を示す。試験体は実大の約 1/4.5 を想

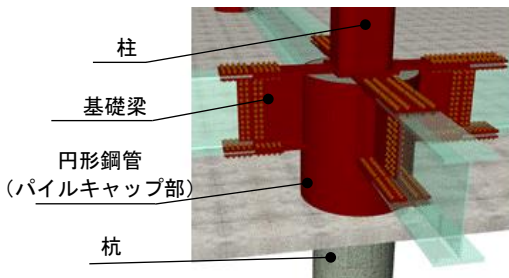


図-1 円形鋼管を用いたパイルキャップ

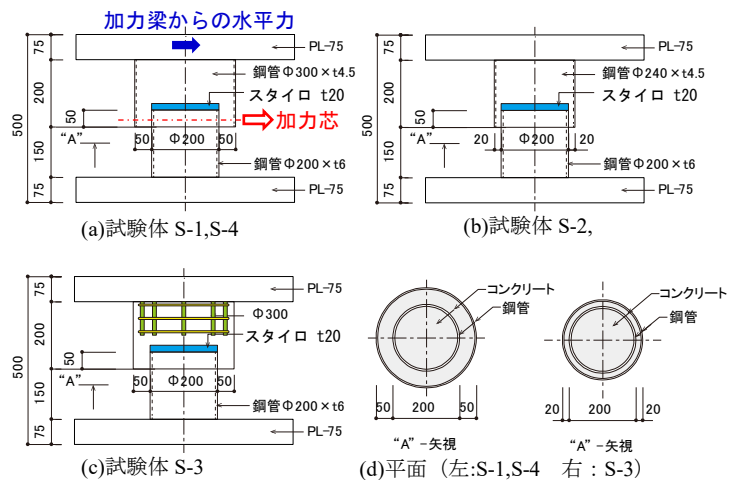


図-2 試験体形状

*1 竹中工務店 技術研究所 工博 (正会員)

*2 竹中工務店 東京本店 設計部

*3 竹中工務店 大阪本店 設計部

*4 竹中工務店 技術研究所 (正会員)

なお、パイルキャップの断面は杭径の 2~2.5 倍以上が一般的であるが、本実験では鋼管による補強効果を期待し、従来よりも小さく設定している。

2.2 使用材料

パイルキャップを模擬した上部側に使用したコンクリートの圧縮強度は表-1 中に示す。コンクリートは S-4 のみ高強度とした。また、使用した鋼材の機械的性質は表-2 に示す。

表-2 鋼材の機械的性質

部位	種類	降伏点強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)
円形鋼管上部	t-4.5	333	486
円形鋼管下部	t-6	391	540

2.3 加力方法

加力は建研式加力装置を用い、試験体高さ中央に水平力を加えることで実施した(図-3 参照)。なお、鉛直軸力を加えず、カウンターウェイトで加力装置の軸力をキャンセルすることで、パイルキャップと杭の応力伝達は杭の側面の支圧力のみ加わるようにした。

2.4 実験結果

図-4 には実験結果を、写真-1 には試験体の破壊状況を示す。鋼管を用いていない試験体(S-3)は、加力直後から写真に示すコンクリートに斜め方向のひび割れが生じ、そのひび割れが進展して破壊に至った。一方、鋼管を有する試験体(S-1,S-2,S-4)は鋼管の無い試験体(S-3)の 17.6~17.9 倍の耐力を發揮し、20mm 以上の大変形時(写真は 20mm 時)においても鋼管が変形することで、杭頭支圧面の逆側には隙間が生ずるものの耐力低下はほぼ生じなかった。また、へりあきの大きさやコンクリート強度による耐力の差は顕著でない結果であった。

2.5 耐力評価方法及び実験結果との比較

鋼管を用いた試験体(S-1,S-2,S-4)は、いずれもパイルキャップ側(上部)の鋼管が内部のコンクリートからの支圧力を受けている位置で顕著に変形していたことから、パイルキャップ側の鋼管において水平加力方向の鋼板の面外方向への降伏により耐力が決定したと考えられる。

円形鋼管の鋼管板の面外降伏耐力は鋼構造のノンダイアフラム接合部を対象に、降伏線を仮定した文献2)で提案されており、さらに鋼管端部付近が面外降伏する場合の耐力は文献3)にて提案されている。本実験は後者のモードに近く、同文献の提案式においてフランジ引張応力がかかる断面を内側の杭の支圧面から 45 度方向に広がったコンクリートの支圧面積に置き換えると、パイルキャップ接合部のせん断耐力は鋼管板の面外降伏耐力 P_{su} により式(1)で表わされる(図-5 参照)。

$$P_{su} = \frac{t_s \cdot \sigma_y}{\sqrt{1+2\cos^2\theta}} \cdot (X_p + 2 \cdot h_p) + \frac{2 \cdot D_s \cdot \theta \cdot m_p}{X_p} \quad (1)$$

ここで、

X_p : 降伏線高さで、

$$X_p = \sqrt{(2 \cdot D_s \cdot \theta \cdot m_p \cdot \sqrt{1+2\cos^2\theta}) / (t_s \cdot \sigma_y)}$$

m_p : 単位長さあたりの板材の全塑性曲げモーメントで、 $m_p = t_s^2 \cdot \sigma_y / 4$

t_s, D_s, σ_y : それぞれパイルキャップ鋼管の板厚、直径および引張降伏強度

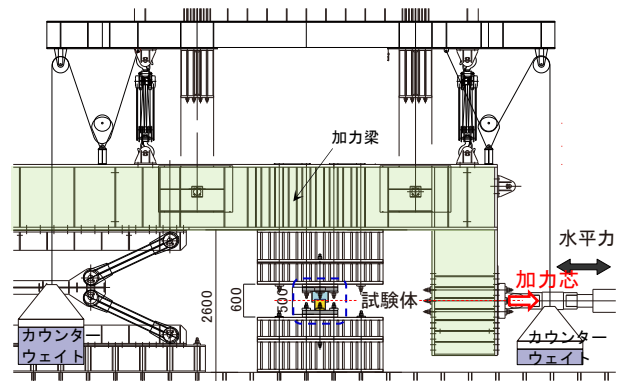


図-3 加力装置概要

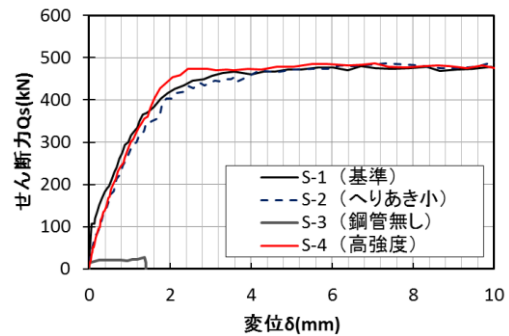
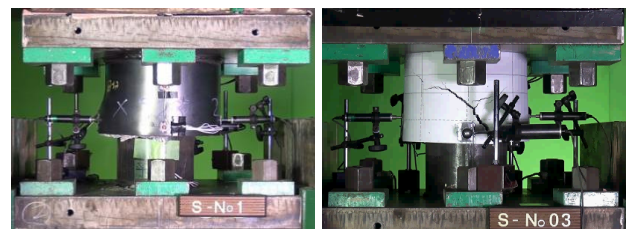


図-4 せん断力-水平変位関係



(a)試験体 S-1(鋼管あり) (b)試験体 S-3(鋼管なし)

写真-1 試験体最終状況

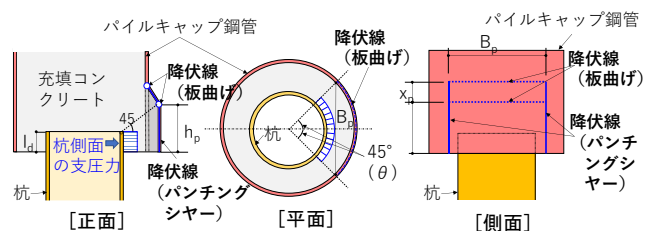


図-5 支圧範囲と鋼管の降伏線の仮定

7.5, 10, 15, $20 \times 10^{-3} \text{rad}$ で各 2 回正負繰り返し加力を行ったのち, $R=30, 40 \times 10^{-3} \text{rad}$ で各 1 回の正負繰り返し加力を実施した。なお, 本加力では軸力は加えていない。

3.3 実験結果

図-8 に荷重-変形関係を, 写真-2 には $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時における試験体状況を示す。試験体は $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時のサイクルで杭外周およびパイルキャップ鋼管内周のコンクリートとの間に全周に肌すきが観察された。また, 杭中心から加力方向に向かったひび割れが発生し, その後杭芯を中心にした放射状のひび割れが主に加力方向側において増加した。ただし, $R=40 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時においてもコンクリートの明確な圧壊には至らなかった。また, $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時から繰り返し載加により徐々にパイルキャップのコンクリート面が鋼管から浮き上がる挙動が確認された。パイルキャップ鋼管の加力方向への鋼板の面外変形も $R=15 \sim 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時から目視で確認され始めた。写真-3 には最終破壊モードを確認するため $R=100 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで正側に単調加力した際の鋼管の変形を示している。この大変形まで水平荷重の低下はほぼ無かったものの, 鋼管は 2 章の実験結果と同様に顕著に水平加力方向への鋼板の面外変形が確認されており, 耐力はこの面外降伏によるものであったと考えられる。また, パイルキャップ内部のコンクリートの浮き上がりも顕著であるが, このモードに起因するような急激な耐力低下は無く, コンクリートと鋼管の摩擦抵抗のメカニズムで応力伝達がなされていたと推測される。

3.4 埋め込み部の杭のせん断ひずみ状況

図-9 には杭鋼管のウェブ面 (図-6 の正面図における裏側) に貼り付けた 3 軸ゲージの測定ひずみより算定した x-y 方向 (加力方向および材軸方向) のせん断ひずみの分布を示す。なお, 計測高さ 0 以下の位置が杭埋め込み部である。また, 杭部の S-1 から計測位置 0 までのせん断力は一定として示している。図より, 杭埋め込み部 (S-2~4) のせん断ひずみは杭部 (S-1) と方向が反転していること, $R=5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降では杭埋め込み部中央でせん断ひずみが最大となっていることが確認できる。このことから, 杭埋め込み部の杭側においては杭せん断力 Q_p とは逆方向の水平抵抗力 P_1 が作用するとともに, 杭埋め込み部の中央から杭逆側においては杭と逆方向の水平抵抗力 P_1 に対してせん断力及び回転モーメントが釣り合うための P_2 が P_1 とは逆方向に作用していること作用 (後述の図-11(a)参照) で抵抗していたと考えられる。

図-10 には, 杭埋め込み部中央 (S-3) のせん断ひずみを, 杭部のせん断ひずみ (S-1) で除した, 杭埋め込み部のせん断ひずみの割り増し比率を示している。なお, せん断ひずみの方向が逆であるため, それぞれの絶対値より算定している。図より, 杭埋め込み部中央では杭部

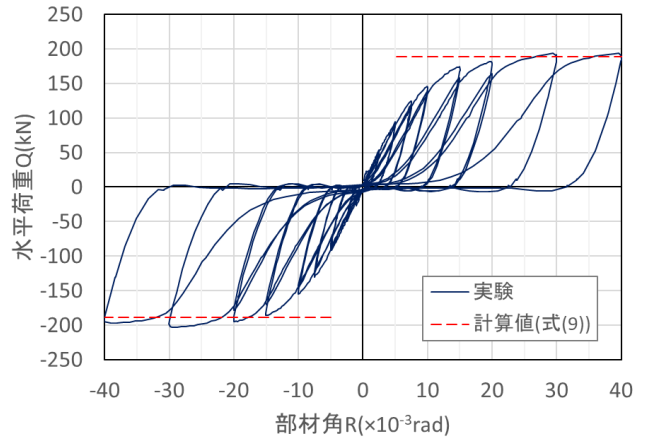


図-8 荷重-変形関係

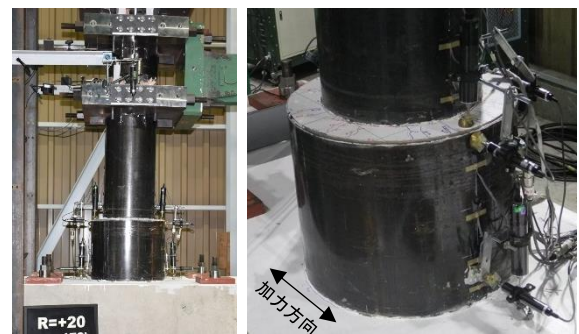


写真-2 試験体状況 ($R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$)



写真-3 試験体最終破壊状況 ($R=100 \times 10^{-3} \text{rad}$)

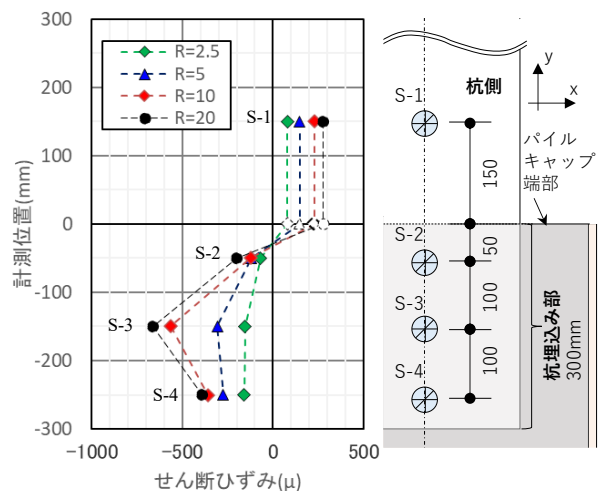


図-9 杭鋼管正面側のせん断ひずみ(x-y 方向)分布

に対して約 2 倍～2.5 倍のせん断ひずみが計測されており、杭部に加わるせん断応力が杭埋め込み部内において割り増されていることが確認できる。このため、杭埋め込み部の杭体の設計においては、このせん断力の割り増しに留意する必要があると考えられる。

3.5 埋め込み接合部耐力の評価方法の検討

前節で示した実験結果および杭のせん断ひずみ分布より、本章の実験の埋め込み接合部の応力伝達機構は図-11(a)に示すように、杭の加力点に加わる Q_p に対して、杭埋め込み部において Q_p と逆方向の水平抵抗力 P_1 およびこれらと釣り合う Q_p と同方向の水平力 P_2 によるてこ作用が主であると考えられる。この時、 P_1 および P_2 は埋め込み部の杭の回転により生ずるパイルキャップ内の杭側面のコンクリートの支圧による反力であり、これは埋め込み柱脚の応力伝達機構⁴⁾と同様の考え方である。

ここで、加力点（部材反曲点）から P_1 および P_2 の応力が作用する重心位置をそれぞれ l_1 および l_2 とすると、加力点位置における杭のモーメントのつり合いおよび杭のせん断力のつり合いはそれぞれ式(2)および式(3)で表される。

$$P_1 \cdot l_1 - P_2 \cdot l_2 = 0 \quad (2)$$

$$Q_p = P_1 - P_2 \quad (3)$$

ここで、文献4)の埋め込み柱脚の降伏耐力の算定に用いられる支圧応力度分布と同様の応力度分布(図-11(b))を杭側面に仮定すると、 l_1 および l_2 は三角形の支圧応力分布の重心位置に相当し、杭側の支圧応力分布 (P_1 に相当)の高さを x_1 と表現すれば、 l_1 および l_2 はそれぞれ式(4)で、 P_1 および P_2 はそれぞれ式(5)で表される。

$$l_1 = l_p + \frac{1}{3} \cdot x_1, \quad l_2 = l_p + l_d - \frac{1}{3}(l_d - x_1) \quad (4)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot B_c \cdot x_1, \quad P_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(l_d - x_1)}{x_1} \cdot \sigma_c \cdot B_c \cdot (l_d - x_1) \quad (5)$$

ここで、

σ_c : 杭側面のコンクリートへの支圧応力度の最大値

B_c : 支圧幅

式(4)および式(5)を式(2)に代入すれば、 x_1 は式(6)で得られる。また、式(2)および式(3)より Q_p について解くと式(7)で表すことができ、式(4)で得られた x_1 から l_1 および l_2 を算定すれば、てこ作用による接合部耐力時の杭せん断力 Q_p は杭埋め込み部の杭部側の支圧力 P_1 の関係式として求められる。

$$x_1 = \frac{(3l_p + 2l_d) \cdot l_d}{3 \cdot (2l_p + l_d)} \quad (6)$$

$$Q_p = P_1 \cdot (1 - l_1 / l_2) \quad (7)$$

また、式(2)の関係式を用いると、式(7)は Q_p と P_2 の関

係式として表すことができる。 Q_p と P_2 の比率 (P_2/Q_p) は図-10 に示すせん断ひずみの比率に対応すると考えられるが、この算定値は4.57(後述の表-6中にてこ作用のみで算定した P_2/Q_{pcal} に相当)となり、図-10 の比率(約 2 倍～2.5 倍)よりも大きい結果となる。これは、実際には前記のてこ機構のほかの応力伝達機構も寄与して

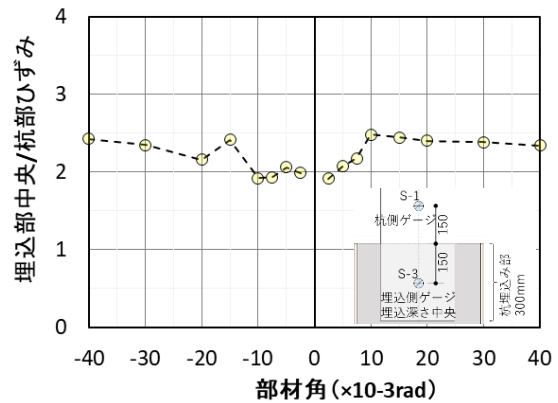


図-10 せん断ひずみの比（埋込部中央/杭部）

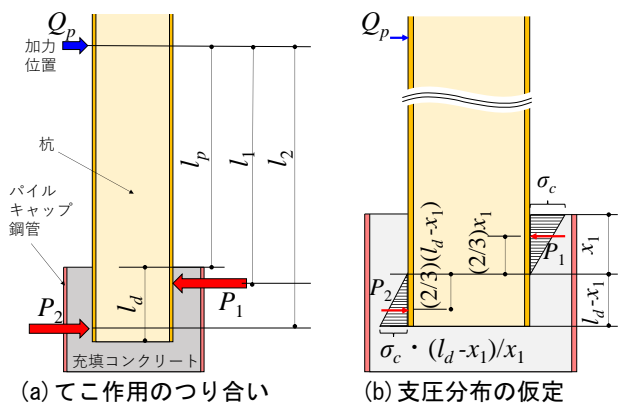


図-11 支圧力のつり合いおよび支圧分布の仮定

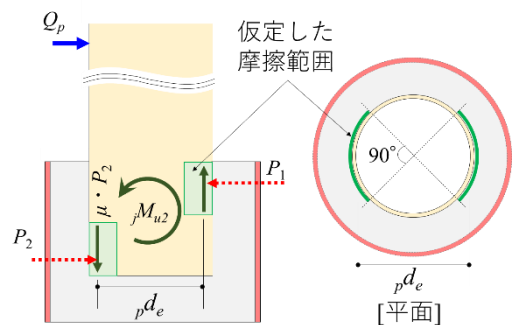


図-12 杭側面の摩擦によるモーメント jM_{u2}

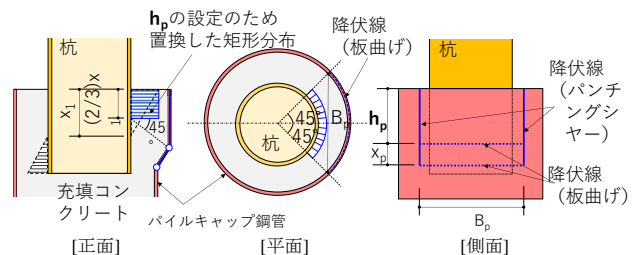


図-13 パイルキャップ鋼管の支圧抵抗力の算定の仮定

いることを示唆している。このため、図-11 に示す支圧応力により生ずると考えられる杭側面の摩擦力を、図-12 に示すように仮定して耐力に加味することを検討する。摩擦による応力伝達は支圧応力 P_1 および P_2 によりその直交方向に生ずるが、支圧応力が小さくなる P_2 側の滑りが先行すると考えると、摩擦によるモーメントの負担 ${}_jM_{u2}$ は式(8)で算定できる。ここで、モーメントのつり合いを示す式(2)において左辺から ${}_jM_{u2}$ を引き、これを P_2 について解いて式(3)に代入すれば、てこ作用に杭側面の摩擦を加味した接合部耐力時の杭せん断力 Q_p' が式(9)より得られる。

$${}_jM_{u2} = {}_j\mu \cdot P_2 \cdot d_e \quad (8)$$

$$Q_p' = P_1 - \frac{P_1 \cdot l_1' - {}_jM_{u2}}{l_2'} \quad (9)$$

ここで、

${}_j\mu$: 摩擦係数で文献5)の解説を参考に 0.6 と設定
 ${}_pd_e$: 杭側面左右の摩擦力の重心間距離で、4 分円の円弧に支圧力が作用すると仮定した重心距離

$$\text{で、} \quad {}_pd_e = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot D_p$$

また、摩擦を考慮した場合の支圧応力分布の重心位置 l_1' および l_2' は摩擦を考慮した場合の杭側の支圧応力分布の高さ x_1' より算定できる。 x_1' は前述と同様の三角形の支圧応力分布を仮定することで、式(10)で得られる。

$$x_1' = l_d - \frac{l_p + l_d}{2} \sqrt{1 + \frac{{}_j\mu \cdot {}_pd_e \cdot (l_p + l_d)}{(l_p + l_d)^2} - 1} \cdot l_d \quad (10)$$

以上より、支圧応力 P_1 を与えれば、支圧によるてこ作用の応力伝達による接合部耐力時の杭せん断力 Q_p および、杭側面の摩擦抵抗も加味した接合部耐力時の杭せん断力 Q_p' はそれぞれ式(7)および式(10)で算定できる。

ここで、 P_1 は杭側面の支圧応力であるが、本実験の終局状況ではパイルキャップ鋼管において水平加力方向の鋼板の面外変形が顕著に確認されており、この降伏耐力で P_1 が決定していたと考えられる。このため、 P_1 は式(1)の P_{su} を用いて評価する。ただし、2章と想定する支圧応力分布が異なるため、式(1)の杭の埋め込み深さ l_d を、図-12 に示す三角形の支圧応力分布の重心位置が同位置となるように矩形置換した高さ $l_d' = (2/3)x_1'$ に置き換えることで算定する。

以上より算定した結果を表-5 に、その計算過程の値を表-6 に示す。表より、実験結果と計算結果の比は、てこ作用のみ考慮すると 1.70、摩擦の効果を加味すると 1.05 であり、摩擦力を考慮することで実験結果は精度良く評価された。また、 Q_p と P_2 の比も摩擦を考慮することで図-10 のひずみの比率とよく一致する結果であった。

表-5 実験結果及び計算結果

	計算値 Q_{pcal} (kN)	実験値 Q_{pexp} (kN)	$\frac{Q_{pexp}}{Q_{pcal}}$
Q_p (てこ作用)	117	199	1.70
Q_p' (摩擦考慮)	189	//	1.05

表-6 計算過程のパラメータ算定値

	P_1 (kN)	P_2 (kN)	x_1 (kN)	${}_jM_{u2}$ (kN-m)	$\frac{P_2}{Q_{pcal}}$
てこ作用	675	486	157	-	4.75
摩擦考慮	675	486	162	83.6	2.57

4. まとめ

円形鋼管に杭頭を埋め込んだパイルキャップの接合部に関して要素実験及び部材実験を実施し、以下の結論を得た。

- 1) 鋼管を用いた要素試験体および部材実験試験体はいずれも実験最終状況は水平加力方向への鋼管板の面外降伏に至った
- 2) 鋼管板の面外降伏の耐力評価方法を提案し、要素実験（杭の埋め込みが浅い）の接合部耐力を評価したところ、実験結果と計算結果の比は要素実験では 1.59~1.85 であった。
- 3) 要素試験で用いた鋼管の面外降伏の耐力評価方法を支圧耐力に用いて部材実験の接合部耐力を評価したところ、実験結果と計算結果の比は摩擦の効果を考慮することで 1.05 と精度良く評価された。

軸力は偏心曲げ応力として累加できると考えられるが、本論の実験では軸力を加えておらず、この検証は今後の課題とする。

参考文献

- 1) 福原武史, 高山秀俊, 前川元伸, 三橋幸作: 円形鋼管にコンクリートを充填したパイルキャップの杭頭接合部の軸方向耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.41, No.2, pp.1099-1104, 2019
- 2) 付功義, 森田耕次: コンクリート充填円形鋼管柱—鉄骨梁フランジ接合部の局所引張耐力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 504 号, pp119-125, 1998.2
- 3) 福原 武史, 宮内 靖昌, 石川 裕次, 鈴木 直幹: 遠心成形中空 PCaPRC 柱~S 梁接合部の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 16 巻, 第 34 号, pp991-996, 2010.10
- 4) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2001, pp240-242
- 5) 日本建築学会: プレストレスコンクリート設計施工基準・解説, 1998, pp267-270