

# 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軸方向耐力に関する実験的研究

福原 武史\*1・高山 秀俊\*2・前川 元伸\*3・三橋 幸作\*3

**要旨**：パイルキャップにコンクリートの型枠を兼ねた円形鋼管を用いることで、従来の RC 造よりも配筋・型枠作業の最小化による施工効率化と、円形鋼管の拘束効果による軸支持性能の向上を同時に実現することが期待できる。本論では、このようなパイルキャップの杭頭接合部の基本的な構造性能を把握するため、杭頭にかかる圧縮力を想定した支圧試験および引張力を想定した引張試験を実施し、鋼管による軸方向耐力の向上を確認した。加えて、鋼管の効果を反映できる評価方法を提案し、その妥当性を確認した。

**キーワード**：円形鋼管、パイルキャップ、軸圧縮耐力、軸引張耐力

## 1. はじめに

既製杭と上部構造（柱・梁）の間の応力を伝達するパイルキャップは一般的に四角形の RC 造で構成される。このようなパイルキャップは現場でかご筋を組んで型枠を設置しコンクリートを打設するが、上部架構や杭との取り合いから施工が複雑化することが多く、施工効率化の余地が残されている。パイルキャップの PCa 化の試みもあるが、その重量がネックになり利用は限られる。ここで、図-1 に例示するようにパイルキャップに型枠を兼ねた鋼管を用いることが出来ると、現場での型枠および配筋作業が最小化されることで施工効率化につながるとともに、円形鋼管を用いることで構造性能の向上を同時に実現することが期待できる。しかしながら、このようなパイルキャップの構造性能を確認した研究は少ない<sup>1)2)</sup>。本論では特に軸支持性能への効果に着目し、2 章では杭頭接合部の支圧（圧縮）試験にて軸圧縮耐力を、3 章では引張試験にて軸引張耐力をそれぞれ確認し、鋼管の効果を考慮した評価方法を検討する。

## 2. 支圧試験

上部架構と杭間のフーチングの圧縮軸力伝達機構を模擬した支圧試験を実施し、その性能を確認した。

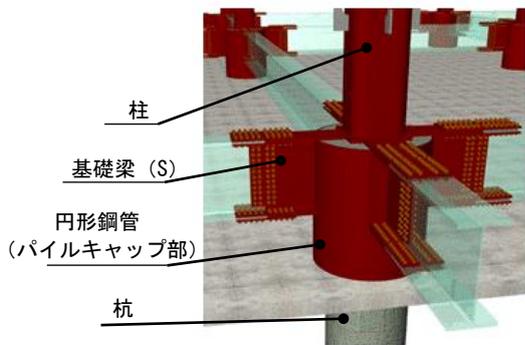


図-1 円形鋼管を用いたパイルキャップ

## 2.1 実験計画

### (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 1/3 を想定した計 5 体で、鋼管の有無、コンクリート強度、パイルキャップ高さおよびもち網筋の有無を実験変数とした。試験体は C-1 を円形鋼管タイプの標準形状とし、試験体 C-3 はコンクリートを高強度に、C-4 はパイルキャップのせいを小さくしたものでいずれも補強鉄筋を用いていない。試験体 C-5 は C-4 にもち網筋で補強したものである。また、鋼管の効果を確認するため、試験体 C-2 は一般的なパイルキャップの配筋を意識した鉄筋のみの補強とした。

表-1 試験体一覧

試験体	鋼管	補強筋	$c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$h_p$ (mm)
C-1(基準)	φ 300×t4.5	-	25.6	200
C-2(鋼管無し)	-	軸横(D6)	25.6	200
C-3(高強度)	φ 300×t4.5	-	58.6	200
C-4(せい小)	φ 300×t4.5	-	25.6	60
C-5(もち網筋)	φ 300×t4.5	もち網(D6)	25.6	60

$c\sigma_B$ ：コンクリート圧縮強度試験結果、 $h_p$ ：パイルキャップせい

### (2) 使用材料

使用したコンクリートの圧縮強度の試験結果は表-1 中に示す。コンクリートは C-3 のみ高強度とし、その他はいずれも同配合である。また、使用した鋼材の機械的性質は表-2 に示す通りである。

表 2 鋼材の機械的性質

部位	種類	降伏点強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
円形鋼管	t4.5	333	486
各補強筋	D6	428	549

### (3) 加力装置及び加力方法

加力は試験体上部には柱を模擬した 170mm 角の鋼製

\*1 竹中工務店 技術研究所 博士（工学）（正会員）

\*2 竹中工務店 大阪本店 設計部

\*3 竹中工務店 東京本店 設計部

インゴットを、試験体下部には既製杭（コンクリートの中詰め無し）の杭頭を模擬したリングプレート（外形200mm,内径140mm）をはさみ、3000kN試験機により圧縮力を単調载荷した（図-3参照）。

## 2.2 実験結果

図-4 は実験結果を、写真-1 は試験体の破壊状況を示す。鋼管を用いていない試験体(C-2)は、写真に示すような放射状のひび割れが発生して最大耐力に達し、パイルキャップ側面の縦方向のひび割れの発生と同時に急激に耐力が低下した。一方、鋼管を用いた試験体(C-1,C-3~5)は柱四隅から鋼管へ向けて放射状のひび割れが生じた後に徐々に剛性が低下して最大耐力に達した。また、鋼管を用いた試験体(C-1)は鋼管の無い試験体(C-2)と比べて最大耐力は 2.4 倍と顕著な向上が見られた。パイルキャ

ップせいが小さい試験体は(C-4)は耐力が低下すること、もち網筋を用いた試験体(C-5)では耐力が改善することが確認されたが、いずれも鋼管の有無ほど顕著な差は確認されなかった。

図-5 には鋼管(C-1)と補強筋(C-2)の円周方向の引張ひずみ状況を示す。図より、支圧力で円周方向に広がる

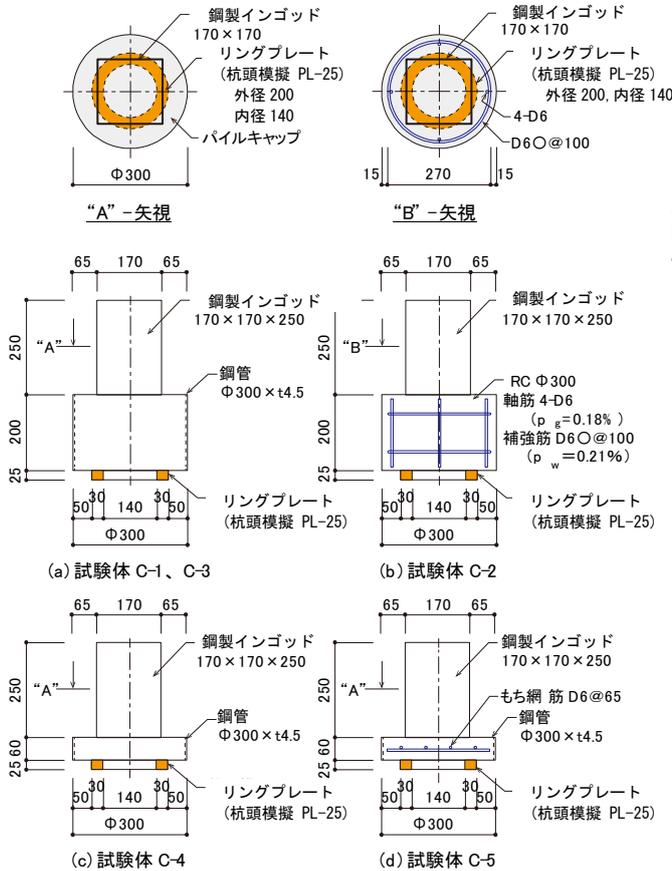


図-2 試験体

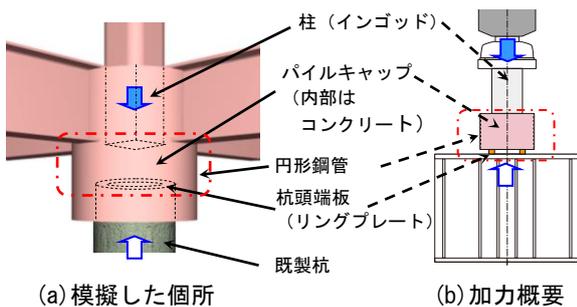
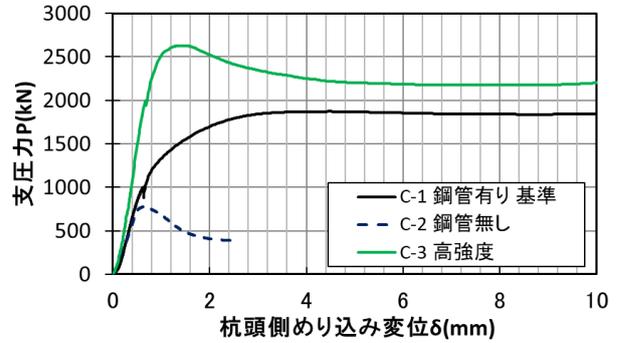
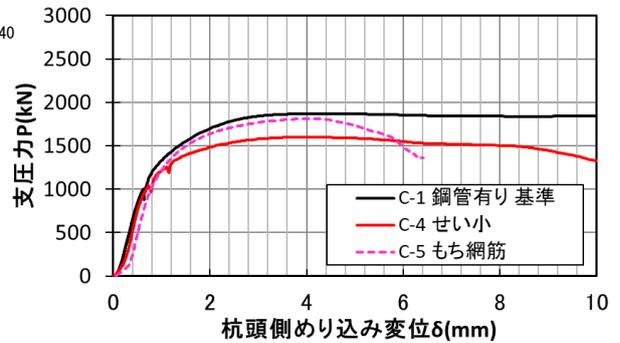


図-3 加力方法



(a)試験体 C-1~C-3



(b) 試験体 C-4~C-5 (C-1 は参考)

図-4 支圧力-杭頭側り込み変位関係



(a)C-1(鋼管有り)

(b)C-2(鋼管無し)

写真-1 試験体破壊状況

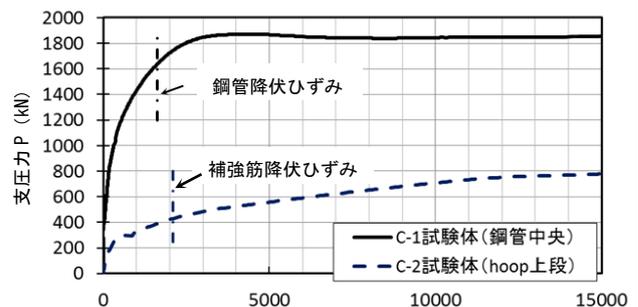


図-5 鋼管及び補強筋の円周方向ひずみ

とするパイルキャップを鋼材が拘束することによる耐力上昇（コンファインド効果）が確認できるので、特に水平方向の鋼材量が多い円形鋼管において、コンファインド効果を考慮することで合理的な支圧耐力の評価が可能と考えられる。

### 2.3 耐力評価

#### (1) 評価方法の検討

一般的に支圧耐力  $P_u$  は、RC 規準<sup>3)</sup>の解説等に示される、局所応力による支圧応力度の割増（支圧係数） $\alpha_c$  を考慮した式(1)で算定できると考えられる。

$$P_u = \alpha_c \cdot c_{\sigma B} \cdot A_l \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_c$ ：支圧係数で  $\sqrt{A_c/A_l}$ 、 $c_{\sigma B}$ ：コンクリート圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）、 $A_c$ ：支圧面積（mm<sup>2</sup>）で鋼製インゴッド柱断面積、 $A_l$ ：支承面積で杭頭を模擬したリングプレート断面積

さらに、鋼管による支圧耐力の上昇が実験結果から明確に確認されている。このため、ここでは鋼管の拘束による側圧を受けることでコンクリートはコンファインド効果による強度上昇を考慮できると推測し、国土交通省の総合技術開発プロジェクトで整理された NewRC 報告書<sup>4)</sup>に示される式(2)を式(1)のコンクリート圧縮強度に用いた検討を試みる。なお、この式は横拘束筋から円形鋼管まで連続的に評価することができる。

$$c_{\sigma cB} = \sigma_p + 2.09 \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot D_c}\right)^2 \cdot \rho_h \cdot \sigma_{hy} \quad (2)$$

ここで、 $c_{\sigma cB}$ ：コンファインド効果を考慮したコンクリート圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）、 $\sigma_p$ ：円形断面の拘束効果を考慮したコンクリート強度で  $\sigma_p = 0.8 \cdot c_{\sigma B}$ 、 $s$ ：横補強筋の間隔で、鋼管の場合は 0（mm）、 $D_c$ ：鋼管あるいは横補強筋の径（mm）、 $\rho_h$ ：横補強筋あるいは鋼管の体積比、 $\sigma_{hy}$ ：横拘束筋あるいは鋼管の降伏強度（N/mm<sup>2</sup>）

#### (2) 既往の実験を含む実験結果との比較

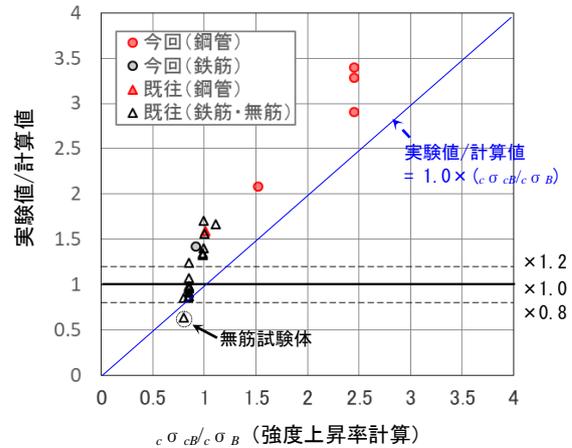
図-6(a)には縦軸に実験結果と式(1)による計算結果の比を、図-6 (b)には式(2)によりコンファインド効果を考慮してしたコンクリート圧縮強度  $c_{\sigma cB}$  を式(1)の  $c_{\sigma B}$  に置き換えた計算結果の比を示す。図の横軸にはコンクリートのコンファインド効果（強度上昇率）を意味する  $c_{\sigma cB}/c_{\sigma B}$  を示している。また、図中には参考に既往の鋼管杭に関する支圧実験の結果<sup>1),2)</sup>も併せた計 22 体の結果を示す。既往実験は、鋼管杭頭に支圧用のリングプレートを取り付けたディテールが想定されたものであるが、応力状態は本実験と同様である。鋼管、横補強鉄筋が用いられている試験体のコンファインド効果の考慮は、いずれも式(2)を用いた。なお、同文献にはコンクリートが中詰めされて支圧プレートの無い試験体 2 体が含まれるが、中詰めコンクリート部分を含めて支圧面積として算定した。また、杭の偏心を模擬した試験体も 2 体含まれ

るが、本計算では特にこの影響は考慮せず算定した。

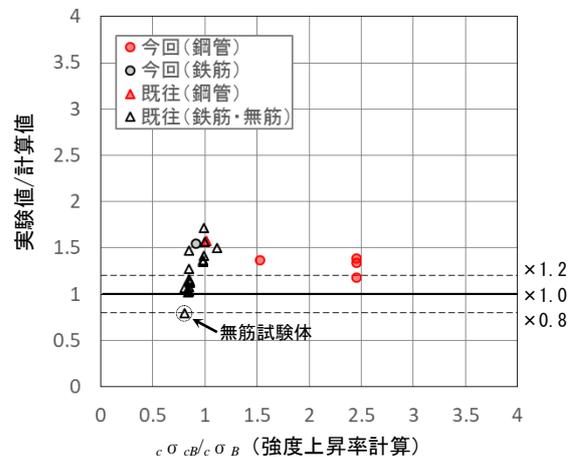
図-6 (a)より、式(1)で計算すると、実験値/計算値は 0.64 ~ 3.40 とその評価精度は大きくばらつく。また、コンファインド効果が大きく見込まれる（ $c_{\sigma cB}/c_{\sigma B}$  が大きい）試験体ほど実験結果を極端に過小評価しており、実験値/計算値はコンファインド効果（ $c_{\sigma cB}/c_{\sigma B}$ ）に対して比例的な傾向が確認できる。図-6 (b)には、実験値と式(2)でコンファインド効果を考慮した計算値の比較を示すが、実験値/計算値は 0.79 ~ 1.72 と評価精度が向上していることがわかる。また、無筋試験体の 1 体を除けばいずれも計算値は実験値を過大評価しない結果であった。

### 3. 引張試験

一般的に杭頭と上部架構の間の引張力は、杭頭鉄筋等とフーチングのかご筋を介して伝達される。本章では、図-7 に示すように型枠兼用の鋼管内側に鉄筋をフレア溶接したシアキーを設けてかご筋の代替とし、杭は鋼製（S または SC 杭）として杭外周も同様のシアキーを取り付けることで、鉄筋を介さずシアキー間のコンクリートのせん断応力伝達を用いて引張応力を鋼管に負担させる（鋼管から上部架構への応力伝達は別途必要である）方法を対象に引張試験を実施した。



(a) 式(1)の検討



(b) 式(2)の検討

図-6 実験結果と計算結果の比較

### 3.1 実験計画

#### (1) 試験体

表-3 に試験体一覧を、図-8 に試験体の断面および形状を示す。試験体は実大の約 1/3 を想定した計 6 体で、外側の鋼管はパイルキャップの型枠を兼用した円形鋼管を、内側の鋼管は杭頭を模擬している。引張力は、外側の鋼管の内周と内側の鋼管の外周にフレア溶接した D6 鉄筋のシアキーを介して、鋼管の間に後打ちしたコンクリートのせん断力で伝達する機構とした。このようなシアキーのせん断耐力に関する評価式は既に提案されている<sup>5)</sup>が、シアキー間のあきの距離に着目した研究は少ない<sup>6)</sup>ため、試験体 T-1, T-2 および T-3 についてはこれを実験変数とした。また、試験体 T-4 はコンクリートを高強度に、試験体 T-5 はシアキー間に鉄筋補強を、試験体 T-6 は鋼管を用いずパイルキャップを PCaRC 造とした。

#### (2) 使用材料

使用したコンクリートの圧縮強度の試験結果は表-3 中に示す。コンクリートは T-4 のみ高強度とし、その他はいずれも同配合である。また、使用した鋼材の機械的性質は表-4 に示すとおりである。

#### (3) 加力装置及び加力方法

試験体は下部を反力床、上部を加力用の鉄骨梁に固定し、鉄骨梁をジャッキで引き上げて加力した(図-9 参照)。

### 3.2 実験結果

図-10 に実験結果を、写真-2 に試験体の破壊状況を示す。鋼管を用いた試験体 T1~T5 の破壊状況は、いずれも鋼管と杭間のコンクリートのせん断破壊およびシアキー根元部のせん断破壊の複合的な破壊モードであった。一方、鋼管を用いていない試験体 T-6 は、PCa 部を含むコーン破壊とシアキー間のせん断破壊の複合的なモードが発生し、最大耐力は T-1 の 0.26 倍であった。耐力および変形性能は、シアキー間のあきが大きいものほど耐力・変形性能ともに低くなること、あきが大きい場合に補強

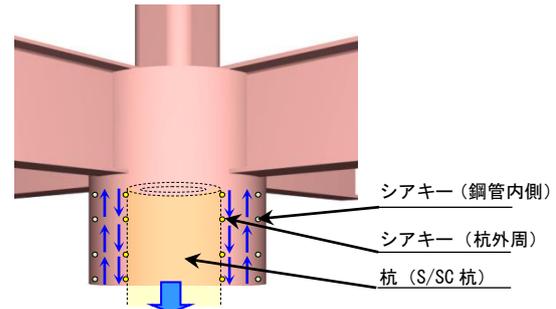


図-7 引張伝達機構

表-3 試験体一覧

試験体	鋼管外側	鋼管内側 (杭模擬)	$c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	備考
T-1	φ 450×t9	φ 300×t9	27.8	基準
T-2	φ 400×t9	φ 300×t9	28.4	あき小
T-3	φ 500×t9	φ 300×t9	28.4	あき大
T-4	φ 450×t9	φ 300×t9	58.6	高強度
T-5	φ 500×t9	φ 300×t9	28.3	補強筋
T-6	無し	φ 300×t9	26.3	PCaRC

$c\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度試験結果

表-4 鋼材の機械的性質

部位	種類	降伏点強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
円形鋼管	t9	373	548
補強筋, シアキー	D6	438	553

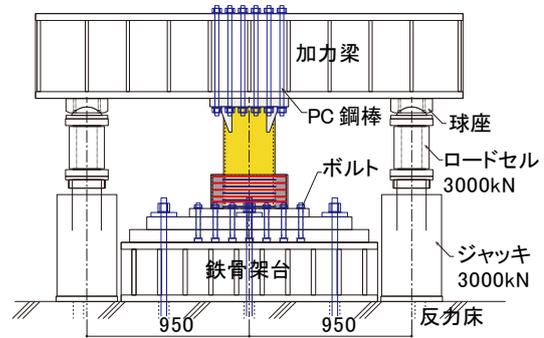


図-9 加力装置

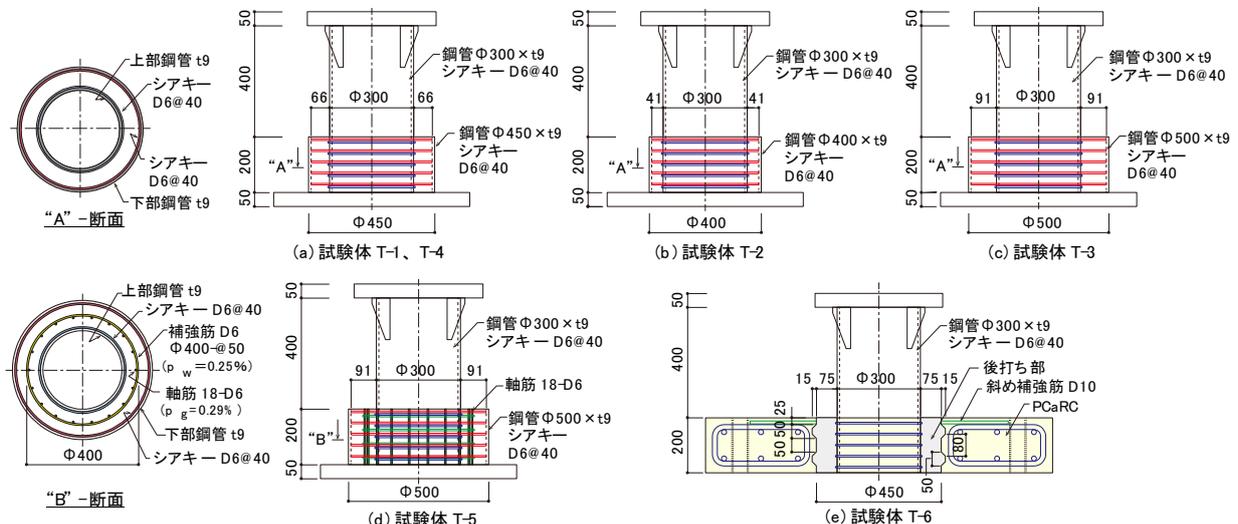


図-8 試験体

筋を付加する(T-5)ことで変形性能が改善すること、高強度コンクリートを用いると(T-4)耐力は向上するが最大耐力発揮後に脆性的な破壊になることが確認された。

図-11には下部鋼管の水平方向ひずみと引張力の関係を示す。図より、引張力に応じて鋼管の水平方向ひずみが増加していることが確認できる。これはシアキー部を直交方向に鋼管が拘束していることを示唆しており、鋼管がコンクリートのせん断強度へ寄与していると考えられることができる。

### 3.3 耐力評価

#### (1) 評価方法の検討

引張耐力の応力伝達機構は、図-12に示す4つの破壊モードが想定される。ここでは、引張耐力  $Q_u$  を式(3)に示す各モードの耐力の最小値として評価する。

$$Q_u = \min(Q_{u1}, Q_{u2}, Q_{u3}, Q_{u4}) \quad (3)$$

以下に各モードに対する耐力評価方法を示す。

(a) 円形鋼管と杭間のせん断耐力  $Q_{u1}$  は、上下端のシアキー間の距離と鋼管内周と杭外周長さの平均を乗じたせん断面積に鋼管内側のコンクリートせん断強度  $\tau_{cu1}$  を乗じて式(4)で算定する。

$$Q_{u1} = (n_r - 1) \cdot \pi \cdot \frac{(D_s - 2 \cdot t_s) + D_p}{2} \cdot s_r \cdot \tau_{cu1} \quad (4)$$

(b) シアキー根元部のせん断耐力  $Q_{u2}$  は、シアキー個数とシアキー間内法長さに杭外周長さ乗じた合計せん断面積にシアキー根元部のコンクリートせん断強度の  $\tau_{cu2}$  を乗じて式(5)で算定する。

$$Q_{u2} = (n_r - 1) \cdot \pi \cdot D_p \cdot (s_r - d_r) \cdot \tau_{cu2} \quad (5)$$

シアキー部のコンクリートのせん断強度  $\tau_{cu1}$  および  $\tau_{cu2}$  は、文献7)に示されるパンチング耐力のせん断強度の評価式を参考に式(6)および式(7)で算定する。この式は、せん断スパン0に相当する PUSH-OFF 実験に基づいた強度を元に、せん断スパン比 0.2~1.0 の範囲の部材実験データによる強度低下の傾向を  $K_{min}$  として定式化されたものであり、(a)では鋼管と杭間の距離の半分を上下端のシアキー間の距離で除したものの、(b)ではシアキー高さ(鉄筋公称径)の半分をシアキー間内法長さで除したものをせん断スパン比と読み替えることで局所せん断強度を適切

に評価できる。加えて、同文献の評価式は  $Z_{ia}$  の崩壊包絡線を元にせん断耐力の直交方向の軸力が考慮されており、シアキー部のせん断直交方向が鋼管で抑え込まれることによる耐力上昇が反映できると考えた。なお、詳細は参考文献中の付4章を参照されたい。

$$\tau_{cu1} = K_{min1} \cdot \sigma \quad (6)$$

$$\tau_{cu2} = K_{min2} \cdot \sigma \quad (7)$$

$$K_{min1} = 0.34 / \left\{ 0.52 + \frac{(D_s - 2 \cdot t_s - D_p) / 2}{2 \cdot (n_r - 1) \cdot s_r} \right\} \quad (8)$$

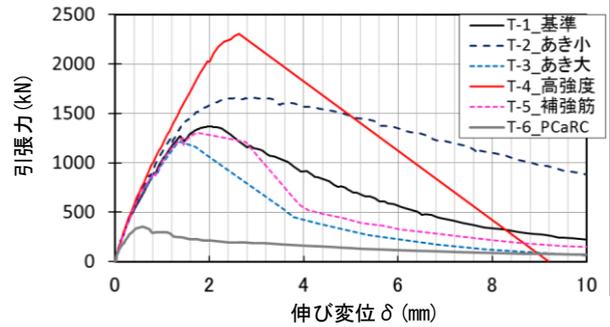
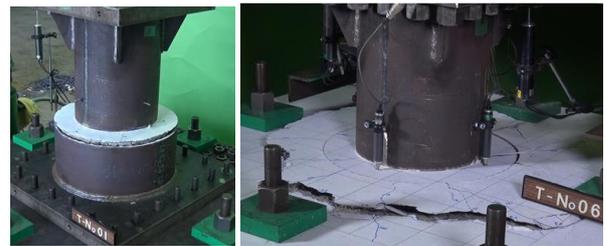


図-10 実験結果



(a)T-1 鋼管あり (b)T-6 鋼管なし  
写真-2 破壊状況

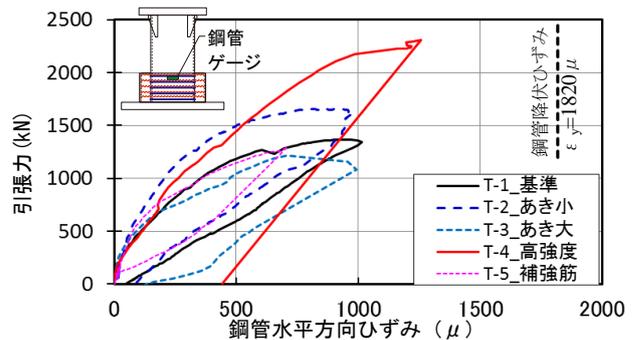


図-11 下部鋼管の水平方向ひずみ

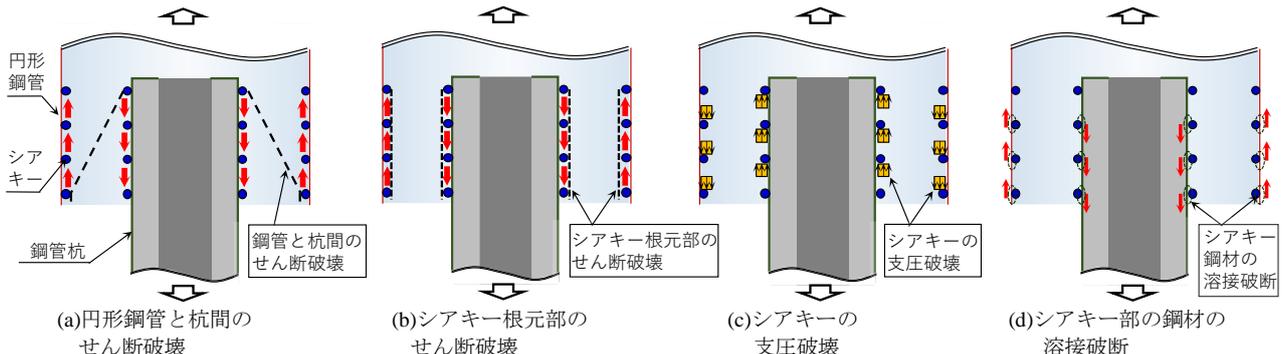


図-12 破壊モード

$$K_{\min 2} = 0.34 / \left\{ 0.52 + \frac{d_r / 2}{(s_r - d_r)} \right\} \quad (9)$$

$$\tau_0 = \begin{cases} 0.98 + 0.1 \cdot c \cdot \sigma_B + 0.85 \cdot \sigma_{hy} \\ (0 \leq \sigma_h < 0.33 \cdot c \cdot \sigma_B - 2.75) \\ 0.22 \cdot c \cdot \sigma_B + 0.49 \cdot \sigma_{hy} \\ (0.33 \cdot c \cdot \sigma_B - 2.75 \leq \sigma_{hy} < 0.66 \cdot c \cdot \sigma_B) \\ 0.66 \cdot c \cdot \sigma_B \\ (0.66 \cdot c \cdot \sigma_B \leq \sigma_{hy}) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 $n_r$ ：シアキーの段数、 $D_s$ 、 $t_s$ ：それぞれ鋼管の直径および板厚 (mm)、 $D_p$ ：杭の直径 (mm)、 $s_r$ ：シアキーのピッチ (mm)、 $d_r$ ：シアキー鉄筋の公称径 (mm)、 $c \cdot \sigma_B$ ：鋼管内のコンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{ry}$ ：鋼管の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)

(c) シアキーの支圧耐力  $Q_{u3}$  は支圧面積の合計に支圧強度を乗じて式(11)で算定する。

$$Q_{u3} = (n_r - 1) \cdot \pi \cdot D_p \cdot d_s \cdot \alpha_p \cdot c \cdot \sigma_B \quad (11)$$

ここで、 $\alpha_p$ ：シアキー支圧係数で 2.0

(d) シアキー部鋼材の溶接耐力  $Q_{u4}$  は溶接面積の合計に鋼材のせん断強度を乗じて式(12)で算定する。

$$Q_{u4} = (n_r - 1) \cdot \pi \cdot D_p \cdot a \cdot \frac{\sigma_{ry}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

ここで、 $a$ ：シアキー溶接部のど厚で  $a = 0.7 s$ 、サイズ  $S$  は 0.5  $d_r$

なお、(b)、(c)、(d)は実際には鋼管側も同様の検討が必要であるが、杭側の円周の方が小さいため省略した。

## (2) 実験結果との比較

表-5には実験結果と計算結果を、図-13にはその比較を示す。なお、表中の T-6 試験体はコンクリートのせん断強度を  $0.5\sqrt{c \cdot \sigma_B}$  として式(13)および式(14)で算定した。

$$Q_{u1}' = n_c \cdot \pi \cdot \frac{D_c + D_p}{2} \cdot s_c \cdot 0.5\sqrt{c \cdot \sigma_B} \quad (13)$$

$$Q_{u2}' = n_c \cdot \pi \cdot D_c \cdot s_c \cdot 0.5\sqrt{c \cdot \sigma_B} \quad (14)$$

ここで、 $n_c$ ：シアコッターの個数、 $D_c$ ：コンクリート後打ち部径 (mm)、 $s_c$ ：シアコッター根元部の長さ (mm)

表より、本計算結果による破壊モードはいずれも(a)円形鋼管と杭間のせん断耐力  $Q_{u1}$  または(b)シアキー根元部のせん断耐力  $Q_{u2}$  で決定することになる。また、その耐力の差は小さく、実験結果の破壊状況とよく一致する。また、実験結果は計算結果に対して 1.38~1.65 倍の余裕を有することが確認できる。また、図より実験結果と計算結果のばらつきは小さく、本評価式は適切に耐力を評価できているといえる。なお、実験結果を全体的に過小評価するのは、式(8)および式(9)において下限式を用いていることが一因である。

## 4. まとめ

円形鋼管を用いたパイルキャップの軸方向耐力に関す

表-5 実験結果及び計算結果

	$Q_{u1}$ (kN)	$Q_{u2}$ (kN)	$Q_{u3}$ (kN)	$Q_{u4}$ (kN)	$Q_u$ (kN)	$Q_{uexp}$ (kN)	$Q_{uexp}/Q_u$
T-1	990	<b>963</b>	1258	1709	963	1368	1.42
T-2	1165	<b>1039</b>	1285	1709	1039	1656	1.59
T-3	<b>880</b>	920	1285	1709	880	1214	1.38
T-4	1526	<b>1401</b>	2651	1709	1401	2307	1.65
T-5	<b>879</b>	919	1280	1709	879	1300	1.48
T-6	<b>242</b>	363	2231	1709	242	356	1.47

$Q_{u1}$ ：式(4)による。No6 は式(13)による。、 $Q_{u2}$ ：式(5)による。No6 は式(14)による。、 $Q_{u3}$ ：式(11)による。、 $Q_{u4}$ ：式(12)による。、 $Q_u$ ：計算結果で式(1)による。、 $Q_{uexp}$ ：実験結果

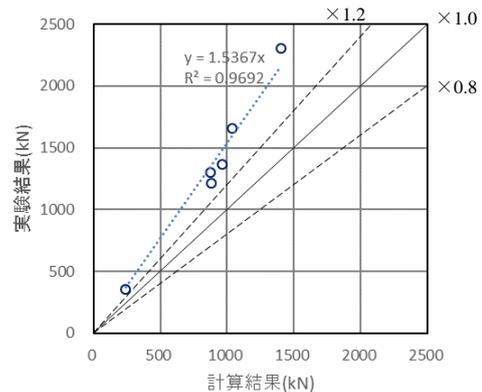


図-13 実験結果と計算結果の比較

る圧縮及び引張要素試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 支圧 (圧縮) 耐力は、円形鋼管により 2.4 倍の向上が本実験で確認された。また、鋼管の効果を考慮することで、既往含む計 22 体の実験結果に対し実験値/計算値は 0.79 ~ 1.72 (無筋 1 体を除くと 1.02 ~ 1.72) の範囲で評価できることを確認した。
- (2) 引張力耐力は、円形鋼管により約 5 倍の向上が実験で確認された。また、鋼管の効果を考慮することで、計 6 体(うち鋼管なし 1 体)の実験結果に対し実験値/計算値は 1.38~1.65 の範囲で評価できた。

## 参考文献

- 1) 奥出久人, 片山丈二, 澤井祥晃, 土屋富男, 宇佐美徹：鋼管杭に用いるフーチングの圧縮耐力に対する鉄筋の効果 その 1~2, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.275-278, 2008.9
- 2) 奥出久人, 片山丈二, 澤井祥晃, 土屋富男, 宇佐美徹：鋼管杭に用いるフーチングの圧縮耐力に対する鉄筋の効果 その 3~4, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.337-340, 2009.8
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010.2
- 4) 国土開発技術研究センター：平成 4 年度 NewRC 研究開発概要報告書, 平成 5 年 3 月
- 5) 社団法人プレハブ建築協会：プレキャスト建築技術集成第 1 編プレキャスト建築総論, 平成 15 年 1 月
- 6) 小野寺知子, 槇谷榮次, 水上明, 謝爽：シアキーを有する PCa 構造接合部におけるせん断伝達に関する研究：その 1~2, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.759-762, 1998.7
- 7) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針同解説, pp.383-395, 2017.9