

# 二重円形鋼管を用いたパイルキャップによる鉄骨造基礎の開発

(その1) 要素試験および曲げせん断試験

## DEVELOPMENT OF STEEL FOUNDATIONS WITH PILE CAP USING DOUBLE STEEL TUBES

Part1 Element experiments and bending shear experiment

福田 健\*1, 寺本 武史\*2, 竹中 啓之\*3, 三好 雅人\*2

Takeshi FUKUDA, Takeshi TERAMOTO, Hiroyuki TAKENAKA and Masato MIYOSHI

The authors are developing a steel-frame foundation using double circular steel pipes in order to improve work efficiency and save labor at foundation construction sites. With these issues in mind, the authors performed two tests: an elemental test to confirm the basic structural performance of pile caps made of circular steel tubes (a bearing test and a shear test), and a bending shear test to simulate a form similar to that of seismic stresses. This paper reports the results of these tests.

1. It was confirmed that the use of circular steel pipes improves the structural performance of the pile caps compared to conventional reinforced concrete pile caps. The bearing capacity and failure mechanism vary significantly according to the positional relationship between the pile body and the pile cap (indicating the effect of construction errors).
2. It was confirmed that the structural performance of the pile-head joints corresponds to the existing evaluation method. The pile, when eccentric, may not be able to demonstrate the expected bearing capacity which can be assumed from the thickness of the inner steel pipe.

**Keywords :** *Pile Foundation, Pile Cap, Steel Tube, Seismic Design, Structural Experiment*

杭基礎, パイルキャップ, 円形鋼管, 耐震設計, 構造実験

### 1. はじめに

筆者らは杭基礎構造物における基礎部材<sup>1)</sup>(本報では基礎梁およびパイルキャップを示す)の合理化を目的とした工法開発を目指している。基礎部材は鉄筋コンクリート造(以下、RC造と呼ぶ)として現場にて構築されることが一般的であるが、近年の労働者不足や工期不足を踏まえると、現場での作業プロセスをできるだけ削減する必要がある。本工法では基礎部材をできるだけ鉄骨造(以下、S造と呼ぶ)とすることで上記の課題解決を目指している。

図1に工法概要を示す。本工法はS造の基礎梁、二重円形鋼管のフーチング(内部鋼管・外部鋼管)で構成される。基礎梁および円形鋼管は工場製作とし、現場にてコンクリートの充填を行う。杭体は既製杭、杭頭接合部は既往の半剛接合工法を想定している。

基礎部材をS造とした場合、あらかじめ工場で作成された基礎パーツでどのように、杭打設時の施工誤差(杭芯および杭頭レベルのずれ)に対応するかが課題となる。

そこで、本工法では施工誤差を吸収可能な形状の外部鋼管を基礎下端に設けることで、杭頭部と上部構造との間で応力が確実に伝達できる基礎の仕様を考えている。

RC造パイルキャップの構造性能(支圧耐力やへりあき部のせん断耐力)に関して、これまでに多くの報告<sup>例えは2)</sup>があるが、円形鋼管を用いた構造性能は三橋らの報告<sup>3)</sup>があるものの、その知見は少ない。近年中地震および大地震における基礎部材の耐震性能が重要視されており、地震時に発生する変動軸力および杭部せん断力等に対して構造性能を確認する必要がある。

以降では二重円形鋼管を用いたパイルキャップの構造性能を確認するために実施した試験結果(表1)を報告する。

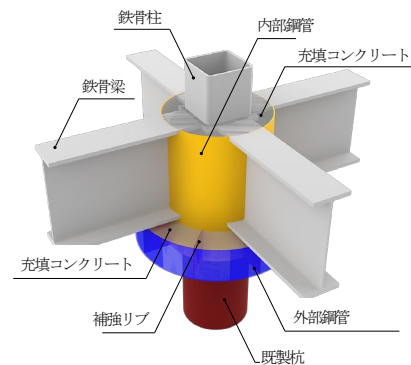


図1 工法概要

表1 試験概要

試験	確認項目(試験概要)
支圧試験	杭頭部の支圧耐力 (万能試験機を用いた単方向圧縮試験)
せん断試験	杭部せん断力の伝達性能 (せん断加力装置を用いたせん断試験)
曲げせん断試験	実状に近い応力下における本工法の構造性能 (曲げせん断試験)

\*1 戸田建設株式会社 技術研究所 修士(工学)

\*2 戸田建設株式会社 構造設計部

\*3 戸田建設株式会社 技術研究所 博士(工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Structural Design Division, TODA CORPORATION

Research and Development Center, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

表2 試験体一覧(支圧試験)

試験体 No.	内部鋼管厚(mm)	外部鋼管厚(mm)	偏心距離(mm)	天端レベル(mm) <sup>※1</sup>	鋼管の接合方法
1	4.5	4.5	0	0	リブ 8 枚 (t=2.3mm)
2	4.5		+60	+40	
3	3.2		+60	+40	
4	4.5		+80	-60	
5 <sup>※2</sup>	なし	なし	0	0	なし

※1 杭天端レベルは試験体 No.1 を基準に記載、※2 No.5 のみ従来の RC 造

表3 試験材料諸元(支圧試験)

円形鋼管および補強リブ	
鋼種	SS400
降伏応力 $\sigma_y$	319 N/mm <sup>2</sup>
引張強度	477 N/mm <sup>2</sup>
コンクリート	
圧縮強度 $\sigma_B$	35.2 N/mm <sup>2</sup>
引張強度 $\sigma_t$	2.7 N/mm <sup>2</sup>

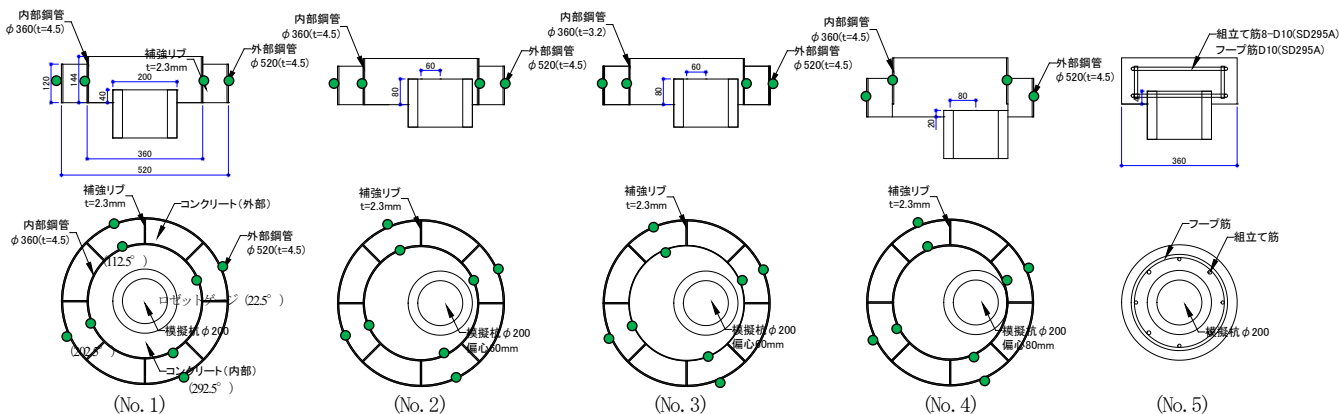


図2 試験体形状(支圧試験)

●: ロゼットゲージ

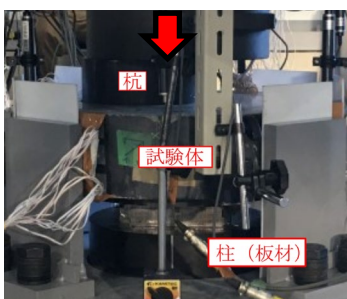


写真1 荷重状況

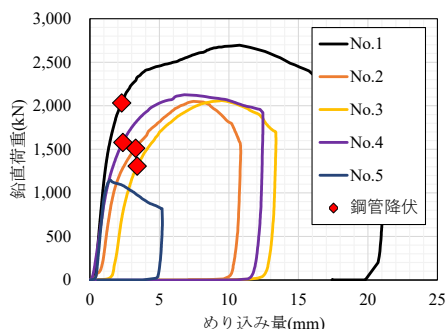


図3 鉛直荷重とめり込み量の関係

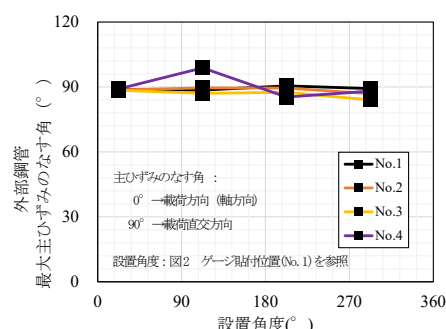


図4 最大主ひずみのなす角

## 2. 支圧試験

### 2.1 試験概要

万能試験機を用いた支圧試験を実施しその構造性能を確認した。表2に試験体一覧、図2に試験体形状を示す。試験体は実大の1/2.5縮尺を想定した計5体で、杭の施工誤差(偏心距離:パイルキャップ中心からの平面的なずれ、天端レベル:No.1を基準とした高さ方向のずれ)および円形鋼管の厚みを主変数とした。比較のためRC造(No.5)の試験も実施した。内部鋼管は鋼管耐力を見込んで外径360mmとし、RC造のパイルキャップ(既製杭では通常2.5D D:杭径)に比べ鋼管耐力を見込んで小さく計画した。試験中の杭の圧壊を防ぐために、中空円筒形の鋼製模擬杭を用いた。材料の諸元を表3に示す。試験で用いた材料は表1に示した試験すべてで共通であり、充填コンクリートは普通コンクリート( $F_c=30\text{N/mm}^2$ 程度)、円形鋼管はSS400材を用いている。荷重は柱部を模擬した鋼材(160mm角、厚み40mm)を試験体中心に設置し、万能試験機を用いて天地逆の状態ですべて単調荷重とした(写真1)。試験体には変位計およびひずみゲージ(ロゼット3軸)を設置し、荷重時の挙動を確認している。

### 2.2 試験結果

図3に鉛直荷重とめり込み量の関係を示す。ここで、めり込み量はパイルキャップ端部と杭体の鉛直変位量の差分を示している。RC造のNo.5は荷重初期(2mm程度)で最大荷重に達するのに対し、円形鋼管を用いたNo.1~No.4は3~5mm時点で円形鋼管が降伏するが、その後も荷重が緩やかに上昇し10mm程度で最大荷重に達する。図4に各試験体の最大荷重時における円形鋼管の最大主ひずみのなす角度、図5に最大主ひずみ分布を示す。最大主ひずみの大きさおよびその角度はロゼット解析により求めた。各試験体で外部鋼管の主ひずみのなす角度はおおよそ90°、すなわち円形鋼管の円周方向に引張ひずみが生じており、円形鋼管がコンクリートのコンプラインドに寄与していることがわかる。最大主ひずみはNo.1は外部鋼管・内部鋼管ともに $6,000\mu\epsilon \sim 10,000\mu\epsilon$ で推移しているが、杭が偏心しているNo.2~No.4では杭に近いひずみゲージ(設置角度0°~90°)の最大主ひずみが他に比べて大きく、杭の偏心距離による影響

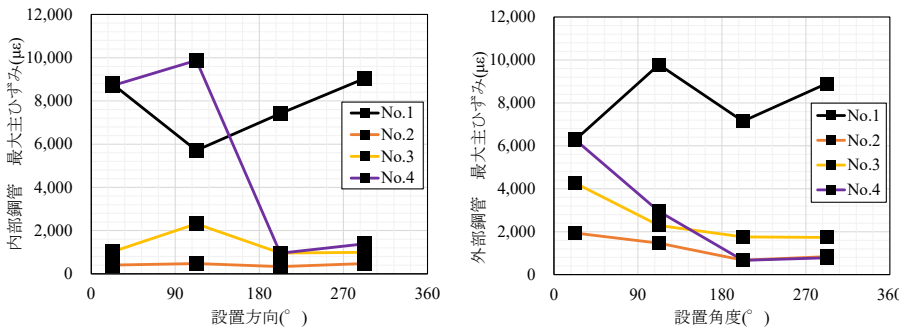


図5 最大主ひずみ分布

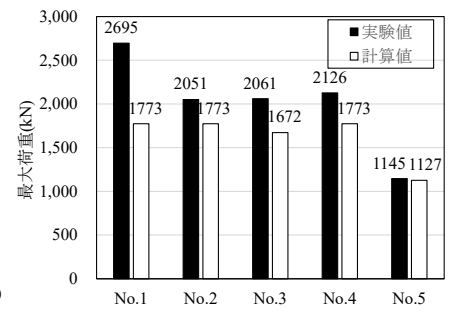


図6 最大荷重

表4 試験体一覧(せん断試験)

試験体 No.	内部鋼管厚 (mm)	外部鋼管厚 (mm)	偏心距離 (mm)	天端レベル(mm) (埋込み長さ※)	鋼管の接合方法
1	4.5	4.5	0	0 (40)	リブ 8 枚(t=2.3mm)
2			+80	-60 (20)	リブ 8 枚(t=2.3mm)
3			+80	-60 (20)	なし
4			+80	-60 (20)	スタッド
5			+60	-20 (60)	リブ 8 枚(t=2.3mm)

※1 パイルキャップ内のコンクリートへの埋込み長さを示す

表5 試験材料諸元(せん断試験)

円形鋼管および補強リブ	
鋼種	SS400
降伏応力 $\sigma_y$	296 N/mm <sup>2</sup>
引張強度	457 N/mm <sup>2</sup>
コンクリート	
圧縮強度 $\sigma_B$	32.0 N/mm <sup>2</sup>
引張強度 $\sigma_t$	2.5 N/mm <sup>2</sup>

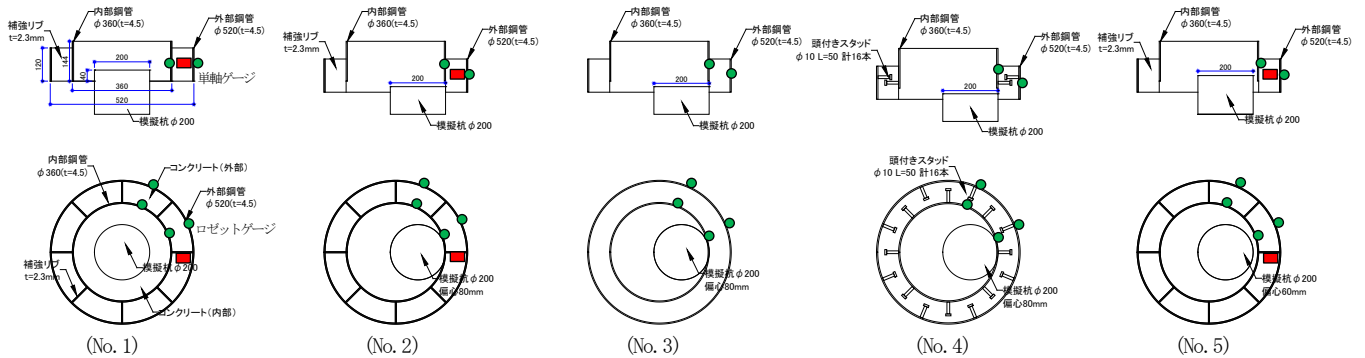


図7 試験体形状 (せん断試験) ●: ロゼットゲージ ■: 単軸ゲージ

が顕著に見られる。

最大荷重一覧を図6に示す。図中に No.1~No.4 はコンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説の運用及び計算例等<sup>4)</sup>、No.5 は RC 標準<sup>5)</sup>を参考に算定した計算値を併せて示している。施工誤差のないNo.1に対し、施工誤差が発生したNo.2~No.4の最大荷重はNo.1の70~80%程度となる。また、RC造であるNo.5はNo.1の42%となり、円形鋼管を用いることで支圧耐力の向上を確認できた。

なお、計算値でのコンファインド効果は内部鋼管のみを考慮しており、外部鋼管および充填コンクリートは考慮していない。実験値に対する計算値の割合はNo.1は66%、No.2~No.4は80%程度となり試験値と同様もしくは安全側の結果となった。No.5は98.6%となり試験値と整合する結果となった。

### 3. せん断試験

#### 3.1 試験概要

杭体と上部構造間のせん断力はパイルキャップ内の杭天端の摩擦抵抗と杭側面の支圧抵抗により伝達されている<sup>9)</sup>。

これらの耐力を確認する場合、架構実験のような実状に近い応力状態での試験が望ましい。ただし、本工法は杭頭半剛接合の適用を想定していることから、せん断耐力の確認よりも先に杭頭接合面が曲げ耐力に達してしまうことが懸念された。そこで、以降に示す単純せん断試験を実施し、本工法の基本的なせん断力の伝達機構を確認した。

表4に試験体一覧、図7に試験体形状を示す。試験体は支圧試験と同様、実大の1/2.5縮尺とした計5体で、杭の施工誤差および鋼管の接合方法を主要数とした。No.4は補強リブの代わりにスタッド(φ10, L=50mm)を用いている。材料の諸元を表5に示す。

加力は写真2に示すせん断加力装置を用いた単調載荷とし、試験体高さ中央に水平力を加えることにより実施した。軸力は加えていないため杭天端の摩擦抵抗の発生は微小であると考え、主に杭側面に支圧応力が発生するように計画した。また、杭体の破壊を防ぐために中実円形断面のインゴットである模擬杭を用いた。なお、試験体にはひずみゲージ(図7中に記載)を貼付し、載荷時の挙動を確認した。

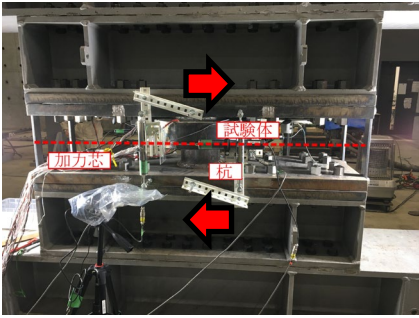


写真2 荷重状況

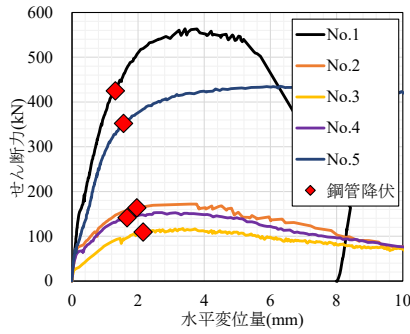


図8 せん断力と水平変位量の関係

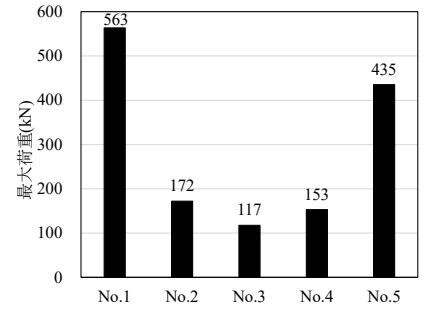


図9 最大荷重

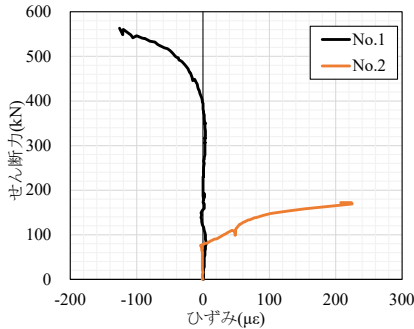
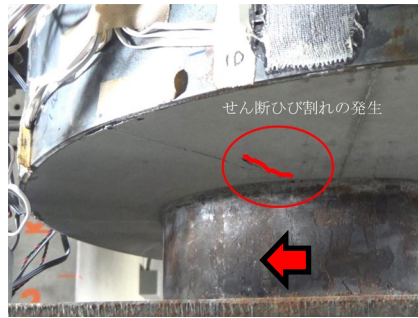
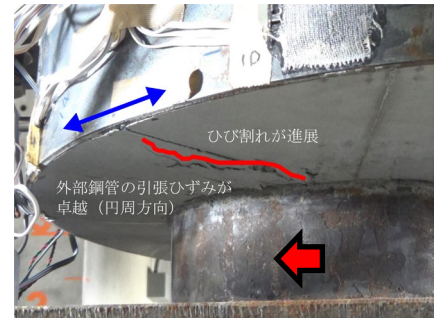


図10 せん断力とひずみ(補強リブ)の関係



(水平変位2mm時)



(最大荷重時)

写真3 試験体破壊状況 (No.2)

### 3.2 試験結果

図8にせん断力と水平変位量の関係を示す。水平変位量は試験体上下間の相対変位を示している。図中には、各試験体の円形鋼管が降伏した点をプロットしている。

No.1は最大荷重が563kNと最も高いものの、杭側面のコンクリートの圧壊により最大荷重が決まっており、最大荷重後は耐力が急激に低下する。他の試験体は主に円形鋼管 (No.2, No.3, No.4 は外部鋼管, No.5 は内部鋼管) が円周方向に降伏ひずみに達した直後に最大荷重を迎え、最大荷重後は緩やかに耐力が減少する傾向が見られた。

写真3に荷重時の試験体破壊状況 (例としてNo.2) を示す。水平変位2mm時に杭側面より加力方向からおよそ45°方向にひび割れと見られる損傷が発生した。その後荷重の増加に伴いひび割れが進展し、ひび割れ延長線上を起点とした外部鋼管の円周方向の引張ひずみが卓越し、最大荷重に達した。

図9に最大荷重一覧を示す。最大荷重は杭先端レベルにより異なる。内部鋼管よりも杭先端レベルが低い場合 (No.2~No.4), No.1の20~30%程度となる。なお、最大荷重が最も小さかったのはNo.3の補強リブがない試験体であり、補強リブ (No.2) とスタッド (No.4) が有効に作用しているものと考えられる。接続方法 (補強リブとスタッド) による明確な違いは見られなかった。

図10にNo.1およびNo.2を例として補強リブに貼付した単軸ゲージ (水平方向に貼付) のひずみの推移を示す。せん断力の増加に伴いNo.1は圧縮ひずみが生じるのに対し、内部鋼管と外部鋼管の設置深度が異なるNo.2は引張ひずみが発生している。このことから、No.2は杭部より発生するせん断力を主に外部鋼管が負担しており、補強リブによりせん断力を内部鋼管に引き戻す力が作用しているものと考えられる。

得られた試験結果より、杭側面のコンクリートが圧壊したNo.1を

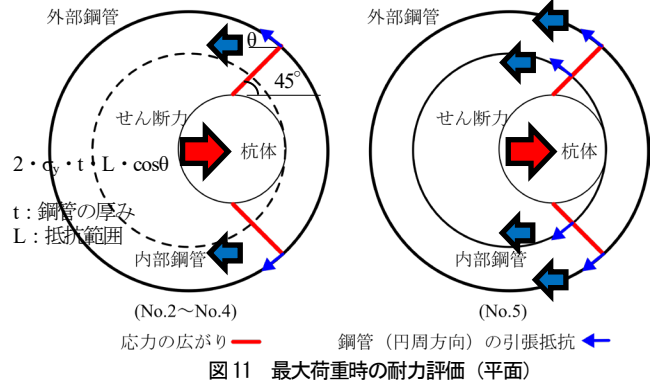


図11 最大荷重時の耐力評価 (平面)

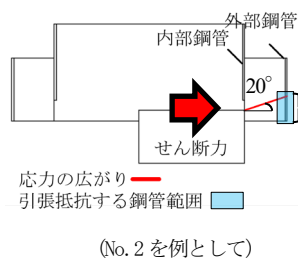


図12 最大荷重時の耐力評価 (断面)

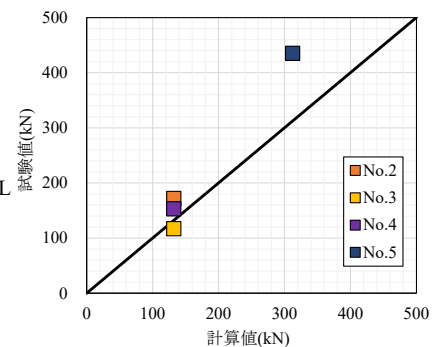


図13 試験値と計算値の比較

除き、杭側面より加力方向から45°方向に応力が広がり、その延長線上の円形鋼管が円周方向に引張抵抗すると想定し、降伏応力  $\sigma_y$  に達した際の加力方向の力のつり合いから、計算値を算定した (図11および図12)。

試験値と計算値の比較を図13に示す。計算値が試験値と同等もしくは7~8割程度になる結果となった。

表 6 試験体一覧(曲げせん断試験)

試験体 No.	内部鋼管厚(mm)	外部鋼管厚(mm)	偏心距離(mm)	天端レベル(mm)	鋼管の接合方法	載荷点までの距離(mm)
1	9.0	9.0	0	0	リブ 8 枚(t=2.3mm)	1,366
2	9.0		0	-100	リブ 8 枚(t=2.3mm)	1,366
3	4.0		+125	-100	リブ 8 枚(t=2.3mm)	1,366
4	4.0		+125	-100	スタッド	660
5	9.0		+125	-100	リブ 8 枚(t=2.3mm)	1,366

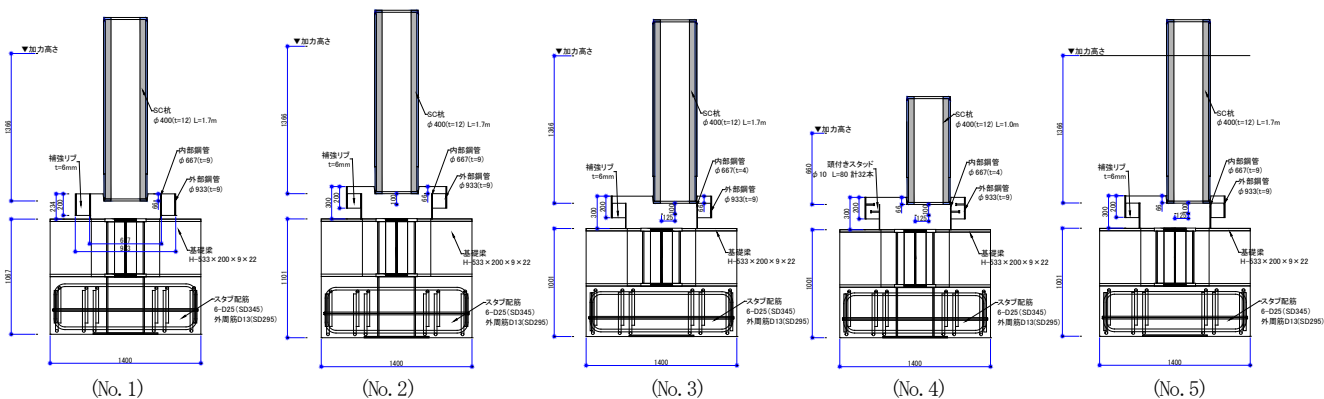


図 14 試験体形状 (曲げせん断試験)

表 7 試験材料諸元(曲げせん断試験)

鋼材部位名	鋼管 (t=4.0mm)	鋼管 (t=9.0mm)	補強リブ (t=6mm)	基礎梁 (t=22mm)
降伏応力 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	387	380	413	372
引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	554	506	537	563
コンクリート				
圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	36.0			
ヤング係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	31,355			
引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.51			

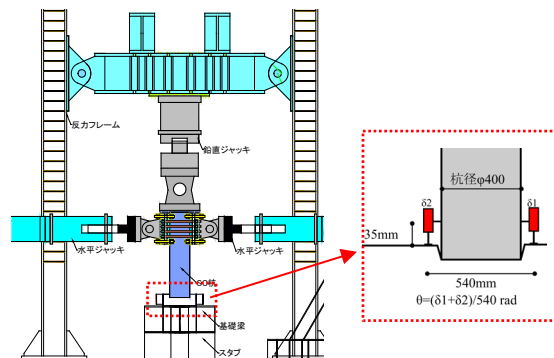


図 15 荷装置

## 4. 曲げせん断試験

### 4.1 試験概要

杭体およびパイルキャップを模擬した片持ち試験体による曲げせん断試験を実施し、地震時のパイルキャップの応力状況に近い形での構造性能について報告する。

表 6 に試験体一覧、図 14 に試験体形状を示す。試験体は実大の 1/1.5 縮尺を想定した計 5 体であり、杭体、パイルキャップおよびスタブで構成され、杭頭接合部は既往の杭頭半剛接合とした。内部鋼管厚、杭の施工誤差、鋼管の接合方法を主なパラメータとしている。杭体は SC 杭 (STK490 材、φ400mm、鋼管厚 t=12mm、 $F_c=105\text{N/mm}^2$  中詰めはなし) を用いており、杭体での曲げおよびせん断破壊が発生しないよう計画した。材料諸元を表 7 に示す。

図 15 に荷装置の概要を示す。試験体は実建物の場合と上下反転させた状態でスタブを反力床に固定し、鉛直ジャッキにより所定の一定軸力を作用させた後に、2 台の水平ジャッキを用いて加力し

た。加力サイクルは 1 ステップ 2 サイクル (図 16) を基本とし、杭頭接合面の回転角を制御することで、正負交番繰り返し荷重を行った。杭頭接合面の回転角  $\theta$  は 2 点の鉛直変位の差分を測定スパンで除して求め、後述する杭頭接合面の曲げモーメント  $M$  は水平荷重に加力点から杭頭接合面までの距離を乗じ、これに軸力による付加曲げモーメントを加算した。

杭天端から水平加力点までの距離は設計事例を参考に  $h=1,366\text{mm}$  (No.1,2,3,5) とし、No.4 のみ  $h=660\text{mm}$  と短くして他の試験体と比べ、杭頭接合面の曲げ耐力に対しパイルキャップにより大きなせん断力が作用するよう計画した。全試験体で作用軸力は  $2,000\text{kN}$  (一定軸力  $N/A_p=29.1\text{N/mm}^2$  ここで、 $N$ : 軸力、 $A_p$ : 杭断面積) とし、損傷限界状態時の杭体軸力を想定した。

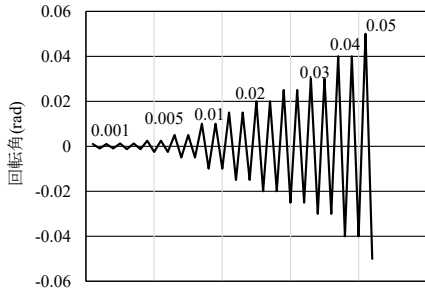


図 16 加力サイクル

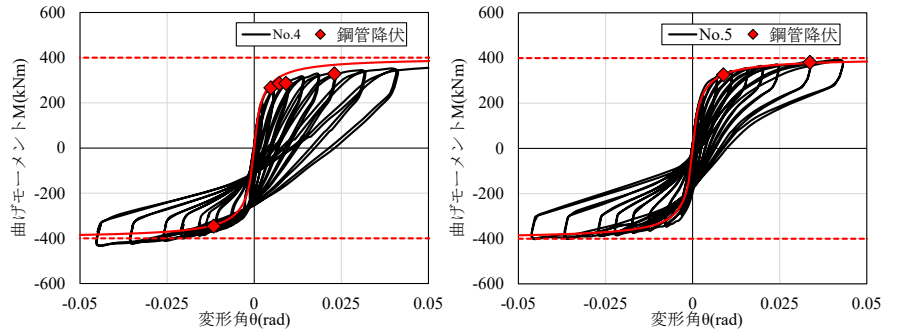
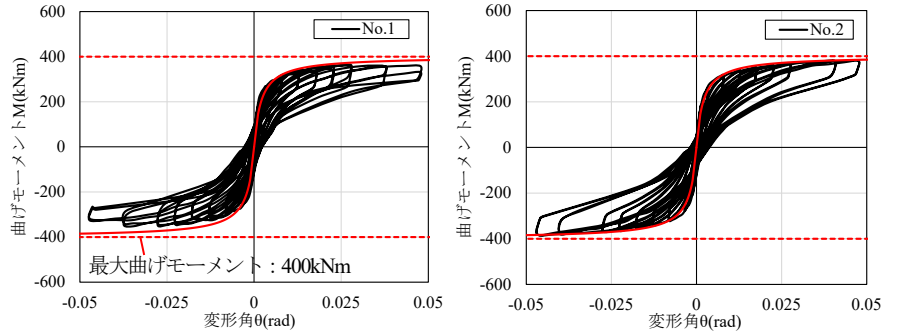


図 17 接合面曲げモーメントMと変形角θの関係



写真 4 試験体損傷状況 (No.3)

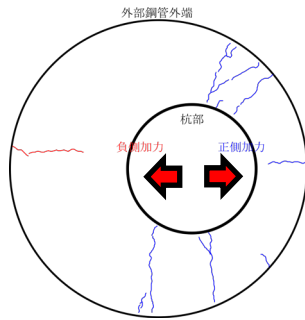


図 18 ひび割れ状況 (パイルキャップ下端)

## 4.2 試験結果

図 17 に杭頭接合面の曲げモーメント  $M$  と回転角  $\theta$  の関係を示す。なお、図中には杭頭接合面の最大曲げモーメント  $M_{max}$  ( $0.5ND : D$  : 杭径) と回転性能 ( $M-\theta$  関係) (7)および(8), 内部鋼管が降伏ひずみに達した点を併せて記載した。载荷の進行に伴い曲げモーメントが増大し,  $M_{max}=400\text{kNm}$  に漸近するかたちで頭打ちとなり, 想定した回転性能  $M-\theta$  関係を確認できた。ただし, 内部鋼管厚が  $4.0\text{mm}$  と薄く, 偏心している試験体 No.3 および No.4 においては正载荷時に写真 4 に示す基礎梁と内部鋼管の取合い部の圧縮降伏が進行し, これにより最大曲げモーメントが決まっていると考えられる。No.5 は同じく载荷途中に内部鋼管が圧縮降伏しているが, 内部鋼管厚が  $9.0\text{mm}$  と No.4 に比べ厚いため, 想定された曲げ耐力 ( $M_{max}=400\text{kNm}$ ) を発揮していることを確認できた。

载荷終了後のパイルキャップ上端面のひび割れ状況 (例として加力高さの短い No.4) を図 18 に示す。せん断試験で確認された斜め方向へのひび割れが確認できたが, 円形鋼管では円周方向に引張降伏は発生せず, 明確なパイルキャップのせん断破壊は確認できなかった。なお, 試験を通じて杭体の破損は生じていない。

## 5. まとめ

二重円形鋼管を用いたパイルキャップの要素試験 (支圧試験・せん断試験) および曲げせん断試験を実施し, 以下の知見が得られた。

- RC 造のパイルキャップに比べ, 円形鋼管を用いることにより, 支圧耐力の向上が示唆された。また, 内部鋼管のコンファインドを考慮した計算値が試験値に比べ同等もしくは安全側の結果となることを確認した。
- 杭の設置位置によりせん断耐力および破壊モードが異なり, 円形鋼管の円周方向の抵抗が本工法のパイルキャップのせん断耐力に大きく寄与していることが示唆された。
- 杭頭接合面の曲げ耐力およびその変形性能は既往の評価方法と対応していることを確認できたが, 杭が偏心した場合, 内部鋼管の耐力がクリティカルとなる可能性がある。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：基礎部材の強度と変形性能, 2022.3
- 2) 浅井 他:大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系杭基礎構造システムの構造性能評価に関する研究 (その 24 縮小支圧要素試験結果および既往の評価式との比較), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp593-594, 2018.9
- 3) 三橋 他:円形鋼管を用いたパイルキャップの構造特性 (その 1 : 支圧試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp1471-1472, 2016.8
- 4) 新都市ハウジング協会:コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説の運用及び計算例等, pp2-16, 2017.12
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp365-366, 2018
- 6) 日本建築学会:鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針 (案)・同解説, pp262-263, 2017.3
- 7) 青島 他:改良型簡易接合法を採用した既製コンクリート杭杭頭部の力学性状, 日本建築学会構造系論文集 第 607 号, pp125-132, 2006.9
- 8) 青島 他:改良型簡易接合法を採用した既製コンクリート杭杭頭部の高軸力下における構造性能, 日本建築学会構造系論文集 第 653 号, pp1271-1278, 2010.3