

二重鋼管とコンクリートで構成されたパイルキャップ 〔KSCP工法〕の開発

鈴木真理恵 * 中里太亮 * 小川敦 ** 前川利雄 ***

昨今、上部構造が鉄骨造（S造）の場合に基礎梁を鉄筋コンクリート造（RC造）ではなくS造で構築し、工期の短縮を図る計画が増加している。筆者らは、基礎梁をS造とした場合に、杭基礎のパイルキャップを二重鋼管とコンクリートで構成された鋼コンクリート造（SC造）とすることにより、現場での型枠、鉄筋工事を省略して、施工の合理化と生産性の向上とともに、パイルキャップのスリム化が図れる本工法を考案した。本報では、この二重鋼管とコンクリートで構成されたパイルキャップの構造性能について引張実験、支圧実験、曲げ実験、せん断実験を行い、安全性の検証を行った結果を報告する。

キーワード：パイルキャップ、鋼管、コンクリート

1. はじめに

1.1 開発経緯

昨今、上部構造が鉄骨造（以後、S造）の場合に基礎梁を鉄筋コンクリート造（以後、RC造）ではなくS造で構築し、工期の短縮を図る計画が増加している。しかし、基礎梁をS造としても杭との接合部である基礎フーチング（パイルキャップ）はRC造であり、鉄筋工事および型枠工事を必要とする。また、パイルキャップ部分は杭頭補強筋、基礎梁配筋、基礎配筋が重なるため配筋が複雑になり、干渉を避けるための事前検討や施工で時間を要しており、基礎梁をS造とすることで得られる現場作業の省力化のメリットが十分に活かされていない。

そこで筆者らは、基礎梁をS造とした場合に、杭基礎のパイルキャップを鋼コンクリート造（以後、SC造）とすることにより、現場での型枠、鉄筋工事を省略して、施工の合理化と生産性の向上とともに、パイルキャップのスリム化が図れる本工法を考案した（Fig.1参照）。

本工法は鉄骨基礎梁と一体化する内鋼管と杭頭

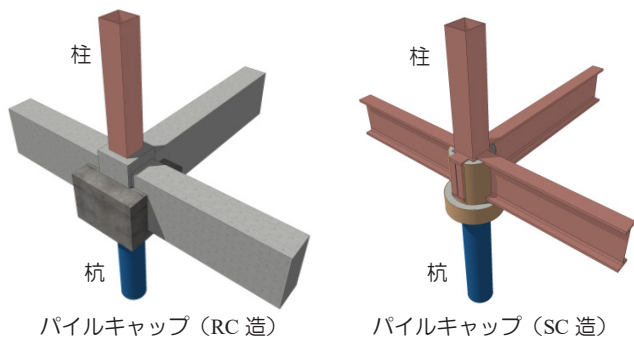


Fig.1 イメージ図

内鋼管の外側に設置する外鋼管の2つの鋼管が特徴となっており、これら鋼管内をコンクリートで充填する。本報では、この二重鋼管とコンクリートで構成されたパイルキャップの構造性能について引張実験、支圧実験、曲げ実験、せん断実験を行い、安全性の検証を行った結果を報告する。

1.2 工法の概要

Fig.2に詳細図を示す。内鋼管は鉄骨基礎梁と溶接することにより、RC柱S梁混合構造の柱梁仕口部と同様にパイルキャップの鋼コンクリートに生じる応力を鉄骨基礎梁に伝達する役割を果たす¹⁾。

また、内鋼管は工場加工により、基礎梁、柱およびふさぎ板と一体化して現場に搬入することができる。

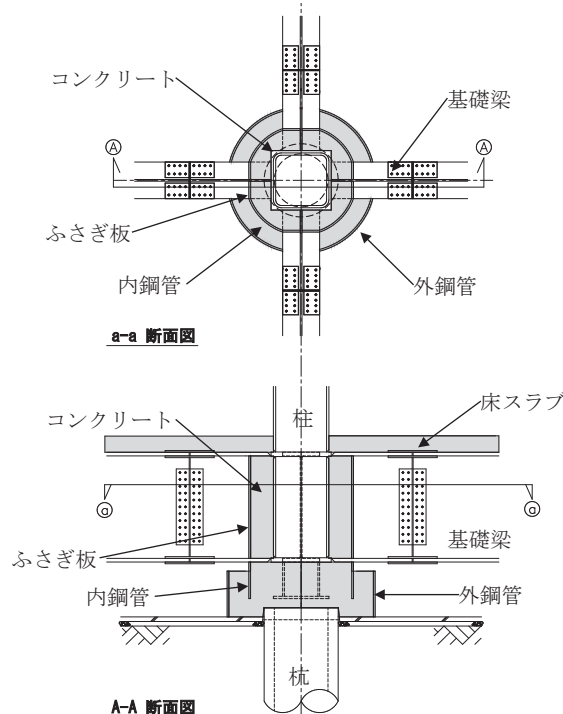


Fig.2 詳細図

* 建築事業本部 建築技術統括部 建築構造技術部
 ** 技術本部 技術研究所 基盤技術研究室
 *** 技術本部 技術研究所 防災技術研究室

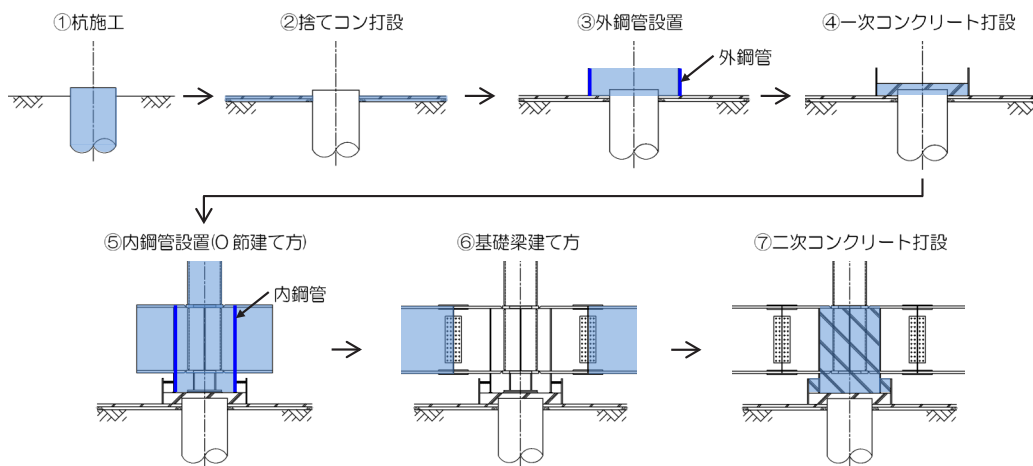


Fig. 3 施工手順図

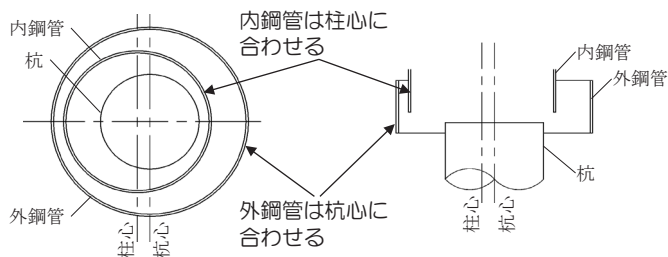


Fig. 4 施工時偏心の処理

Fig. 3 に施工手順を示す。杭施工および地業後、現場で杭心に合わせて外鋼管を設置し、内鋼管下端まで一次コンクリートを打設する。その後、柱と一体化している内鋼管を通り心（設計上の柱心）に合わせて設置すると同時に0節（基礎鉄骨）の建て方施工を行うことができる。場合によっては引続き上層の建方を進めてもよい。二次コンクリートの打設は、任意の時期に行うことができる。

一次コンクリートは内鋼管設置時のレベル調整を兼ねており、0節の建て方を容易にする。また、外鋼管は施工した杭の杭心に、内鋼管は柱心に合わせて設置し、外鋼管と内鋼管を偏心させることで、杭の施工時偏心に追従することができる (Fig. 4 参照)。

2. 引張実験

2. 1 引張実験の概要

引張実験では、常時荷重時の軸力に比べて地震時の引抜力が大きい場合に上部構造と杭とをつなぐパイルキャップに生じる引張力を杭頭から内鋼管内部に定着させた杭頭補強鉄筋（以後、定着筋）により、伝達できることを確認した。

2. 1. 1 試験体と荷重方式

引張試験体は基礎梁の一部とパイルキャップおよび杭を含む部分を取り出した縮尺1/2の試験体である。

鋼管内に定着筋以外の鉄筋は配筋しない。

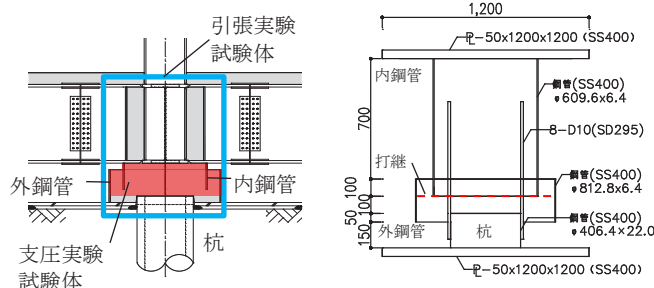


Fig. 5 実験対象としたパイルキャップの範囲

Fig. 6 引張実験の試験体形状 (T-1)

Fig. 5 に実験対象としたパイルキャップの範囲、Fig. 6 に引張実験の試験体形状 (T-1) を示す。

試験体のコンクリートは実際の施工と同様に内鋼管下端（杭側）までコンクリート打設し硬化後に残りのコンクリートを打設した。

加力はFig. 7に示すように、アクチュエータにより試験体に引張軸力を荷重した。試験体に水平力は作用させず、一方方向の単調荷重を行った。

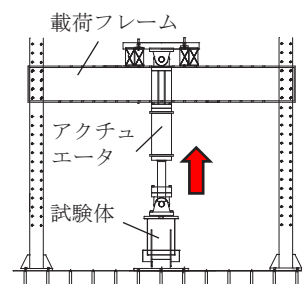


Fig. 7 引張実験の荷重装置

2. 1. 2 材料試験結果

引張実験の試験体に用いたコンクリート、鋼管、鉄筋の材料試験結果を Table 1, 2, 3 に示す。

Table 1 コンクリートの材料試験結果 (引張実験)

試験体名	打設部位	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
T-1	内鋼管下端より上	27.4	2.32 × 10 ⁴
	内鋼管下端より下	23.3	2.20 × 10 ⁴

Table 2 鋼管の材料試験結果 (引張実験)

試験体名	部位	材質	厚さ (mm)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	備考
T-1	内鋼管	SS400	6.4	297	478	38.0	ミルシート
	外鋼管			363	513	29.6	ミルシート

Table 3 鉄筋の材料試験結果 (引張実験)

試験体名	部位	材質	呼び名	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	伸び (%)	備考
T-1	定着筋	SD295	D10	358	487	1.79×10 ⁵	17.6	—

2. 2 引張実験の結果

2. 2. 1 荷重—変位関係

Fig. 8に鉛直荷重(引張)—鉛直変位関係を示す。各鉛直変位は同一断面で測定した4点の平均値を用いた。

載荷点(上部プレート)では荷重の増加とともに変位が進み、最大荷重後は内鋼管周囲とコンクリートとの附着抵抗が切れて抜け出したことにより、若干の荷重低下を伴って変位が増加した。内鋼管の抜け出しは、目視および内鋼管と外鋼管天端レベルのコンクリートの相対変位の増加により確認した。

なお、最大荷重は定着筋の総断面積に材料試験結果における降伏応力を乗じた値を上回っており、定着筋の引張耐力相当の引張力の伝達ができていることを確認した。

2. 2. 2 内鋼管と定着筋のひずみ

Fig. 9に内鋼管と定着筋の鉛直方向のひずみ分布を示す。内鋼管のひずみは断面7から断面2にかけて値が小さくなり、定着筋は断面6から断面1にかけて値が大きくなっており、コンクリートを介して内鋼管から定着筋に引張力が伝達されていることが分かる。定着筋の降伏はみられなかった。

定着筋のひずみは断面5と断面6でほぼ変わらないため、打継面からおよそ30~35d(dは鉄筋径の呼び名)で

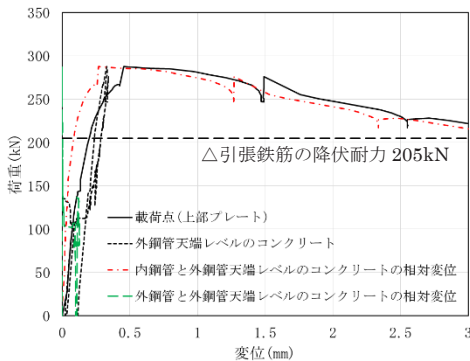


Fig. 8 鉛直荷重(引張)—鉛直変位関係

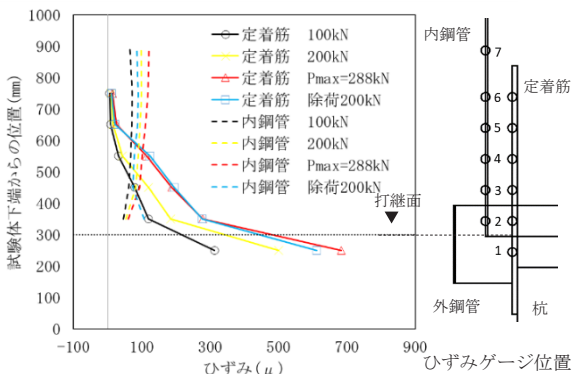


Fig. 9 内鋼管と定着筋の鉛直方向のひずみ分布

ひずみは収束していると考えられ、一般的なRC造のパイロキャップと同等の結果であるといえる。

3. 支圧実験

3. 1 支圧実験の概要

一般に、鋼管の拘束によるコンファインド効果によりコンクリートの支圧耐力が上昇することが知られている。

支圧実験では、二重鋼管により拘束された本工法のディテールにおけるコンクリートの支圧耐力を確認し、コンファインド効果について検証した。

3. 1. 1 試験体と載荷方式

支圧試験体は、Fig. 5に示す通り杭頭上端から基礎梁下端までを取り出した縮尺1/5の試験体である。

試験体のコンクリートは、外鋼管および内鋼管を所定の位置にセットした後、外鋼管内および内鋼管内に一度で打設した。

Fig. 10に支圧実験の載荷装置について示す。支圧実験は、万能試験機により柱を模擬した□120の鋼製載荷具を試験体の内鋼管中央に押し込み、最大荷重および荷重—変位関係を確認した。

試験体下部には杭を模擬したリング状あるいは円形状の治具をセットし、一方の単調載荷を行った。

Fig. 11に内鋼管に設置したひずみゲージと変位の計測位置を示す。

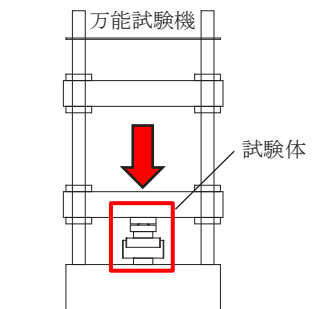


Fig. 10 支圧実験の載荷装置

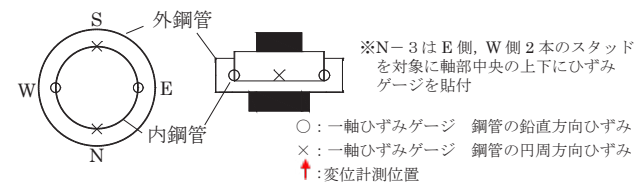


Fig. 11 ひずみゲージと変位計測位置

3. 1. 2 試験体パラメータ

支圧試験体について Table 4 および Fig. 12 に示す。試験体は鋼管とコンクリートのみで構成され定着筋等の鉄筋は使用しない。N-1 試験体を基準試験体とし、N-2 は杭側の治具を円形状にしたもの、N-3 は内鋼管にスタッドを

打設したもの、N-4 はコンクリートを高強度としたもの、N-5 は偏心荷重させたものとした。N-5 の偏心量は実スケールで 150mm に相当する 30mm とした。

Table 4 支圧実験の試験体一覧

試験体名	外鋼管 (mm)	内鋼管 (mm)	コンクリート設計基準強度 F_c (N/mm ²)	内鋼管スタッド	杭側治具形状	備考
N-1	径 340 鋼管厚 2.3	径 240 鋼管厚 2.3	24	無	リング状 (中空)	基準試験体
N-2			24	無	円形状 (中実)	杭側治具を円形状に変更
N-3			24	有	リング状 (中空)	内鋼管にスタッド打設
N-4		長さ 78	60	無	リング状 (中空)	高強度コンクリート
N-5		24	無	24	無	リング状 (中空)

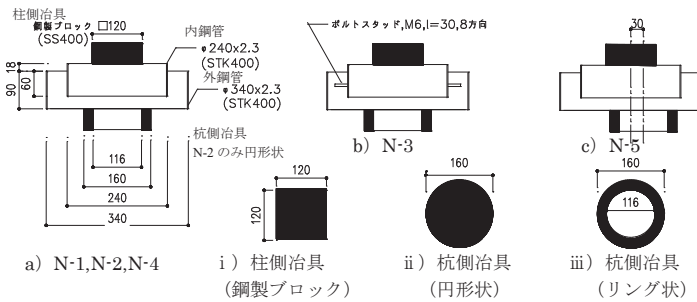


Fig. 12 支圧実験の試験体

3. 1. 3 材料試験結果

Table 5 にコンクリートの材料試験結果, Table 6 に鋼管の材料試験結果を示す。

Table 5 コンクリートの材料試験結果 (支圧実験)

試験体名	打設部位	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
N-1, N-2, N-3, N-5	全体	25.0	2.26×10^4
N-4		69.3	3.31×10^4

Table 6 鋼管の材料試験結果 (支圧実験)

試験体名	部位	材質	厚さ (mm)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	伸び (%)	備考
N-1 ~ N-5	内鋼管	SS400	2.3	328	455	—	36.0	ミルシート (板巻き加工前)
	外鋼管			413	499	1.86×10^5	—	鋼管から試験片を切り出して引張試験を実施

3. 2 支圧実験の結果

3. 2. 1 荷重—変位関係

Fig. 13 に各試験体の鉛直荷重—鉛直変位関係を示す。載荷板の変位を鉛直変位としている。図中には内鋼管の円周方向ひずみが降伏ひずみに達した点を△で示した。降伏ひずみは鋼管から切り出した試験片 3 片の応力ひずみ関係より求めた値の平均値 ($2,417 \mu$) とした。

いずれの試験体においても荷重の増加とともに変形が進み変位が約 1mm を超えたところで剛性が低下している。

N-1, N-3, N-4, N-5 試験体は、最大荷重の前後で内鋼管の円周方向ひずみは降伏ひずみを超えるが最大荷重後に急激な耐力低下は見られなかった。内鋼管の鉛直方向ひずみは最大荷重の前後でも降伏することはなく、N-1 におい

て鉛直変位が 25mm を超えた後、降伏ひずみを超えた。

N-1, N-3, N-5 の荷重—変形関係は同様の傾向を示した。

N-2 は他の試験体に比べて最大荷重が著しく大きい結果となった。載荷装置の上限荷重で実験を終了したが、荷重はまだ上昇傾向にあった。また、内鋼管の鉛直方向ひずみは 1,000kN 程度で降伏ひずみに達した。

N-4 は他のケースに比べて最大荷重が大きいが一軸圧縮強度の比 ($69.3/25.0$) ほどの荷重の差はなかった。

Fig. 14 に外鋼管側面の水平変位分布を示す。N-3 はほぼ対称の変位分布をしており、杭側で外鋼管が広がるような形状をしている。N-4 は、N-3 と同様な形状であるが変位の絶対値は小さかった。N-5 は試験体全体が偏心している側に傾いていることが分かる。

Fig. 15 に N-3 の鉛直荷重とスタッドのひずみの関係を示す。スタッド軸部上下のひずみゲージのうち上側 (柱側) は圧縮ひずみ、下側 (杭側) は引張ひずみが生じていたが、ひずみの絶対値は最大荷重時で 170μ 程度と

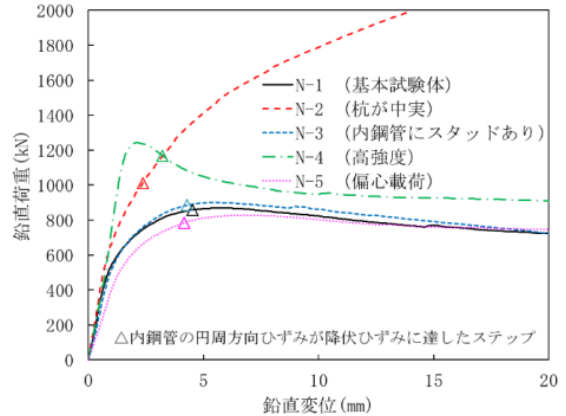


Fig. 13 鉛直荷重—鉛直変位関係 (支圧実験)

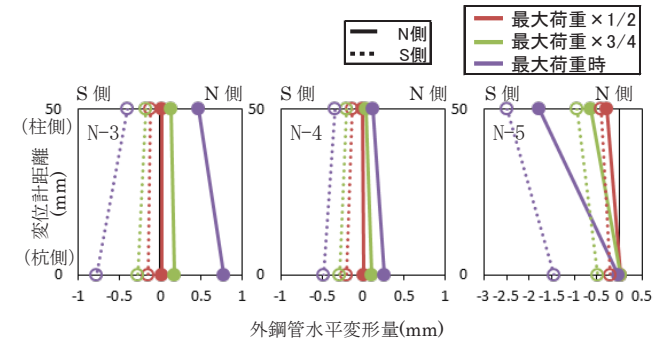


Fig. 14 外鋼管側面の水平変位分布

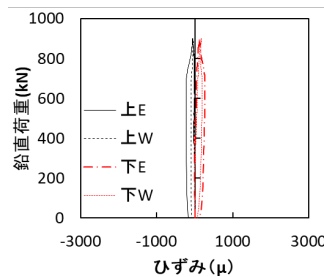


Fig. 15 鉛直荷重—スタッドのひずみ関係 (N-3)

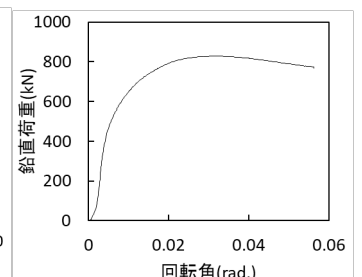


Fig. 16 鉛直荷重—回転角の関係 (N-5)

小さかった。N-1 と比較して荷重—変形関係にも大きな差がなかったことから、スタッドによる支圧耐力の上昇効果は小さいといえる。

Fig. 16 に N-5 の鉛直荷重と回転角の関係を示す。回転角は試験体の外鋼管内のコンクリート下端の 2 点について計測した鉛直変位差を計測点距離で除したものである。荷重の増加とともに回転角は増加して最大荷重時には 1/33 程度になった。偏心荷重により試験体には回転角が生じたが、N-1 と N-5 の荷重—鉛直変形関係に大きな差がないことから、今回想定した偏心量では支圧耐力への影響は小さいことが確認できた。

3. 2. 2 最大荷重

Table 7 に各試験体の最大荷重の実験値と計算値を示す。表中の鉛直支圧耐力 P_{cv} は RC 規準²⁾ の支圧応力度の評価式を基に下式で算定した。

$$P_{cv} = F_B \cdot \min(A_p, A_c) \quad \text{式 (1)}$$

$$F_B = \sqrt{\max(A_p, A_c) / \min(A_p, A_c)} \cdot c\sigma_B \quad \text{式 (2)}$$

ここで、

- P_{cv} : パイルキャップの鉛直支圧耐力 (kN) ,
- F_B : パイルキャップコンクリートの支圧強度 (N/mm²) ,
- A_p : 杭頭の断面積 (mm²) ,
- A_c : S 柱のダイアフラムの面積および RC 柱の断面積 (mm²) ,
- $c\sigma_B$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

実験最大荷重はいずれの試験体も P_{cv} を上回っており二重鋼管によるコンクリートの拘束効果が確認できる。コンクリートを高強度とした N-4 試験体は、計算値に対して 1.53 倍、その他の試験体は 2.83~4.67 倍程度の値だった。

Table 7 各試験体の最大荷重

試験体名	実験パラメータ	柱の断面積 A_c (mm ²)	杭の断面積 A_p (mm ²)	\sqrt{A}	コンクリートの圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	鉛直支圧耐力の計算値 P_{cv} (kN)	実験最大荷重 P_{maxexp} (kN)	P_{maxexp} / P_{cv}
N-1	基本試験体	14400	9538	1.23	25.0	293	870	2.97
N-2	杭が中実	14400	20106	1.18	25.0	425	1988	4.67
N-3	内鋼管にスタッド	14400	9538	1.23	25.0	293	901	3.08
N-4	高強度コンクリート	14400	9538	1.23	69.3	812	1243	1.53
N-5	偏心載荷	14400	9538	1.23	25.0	293	828	2.83

3. 2. 3 内鋼管のひずみ

Fig. 17 に鉛直荷重と内鋼管のひずみの関係を示す。ひずみの値は 2 点の計測値の平均値である。

鉛直方向のひずみは荷重の増加とともに圧縮ひずみが増加した。鉛直方向のひずみは円周方向のひずみよりも小さく、最大荷重時のひずみは N-2 以外の試験体では最大でも -380 μ 程度であった。

内鋼管の円周方向ひずみが降伏ひずみを超えた前後で最大荷重に達し

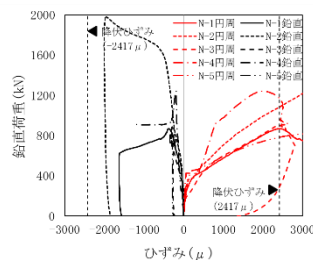


Fig. 17 鉛直荷重—内鋼管のひずみ関係

ていることから鋼管によるコンファインド効果が最大荷重に寄与していると考えられる。

4. 曲げ実験

4. 1 曲げ実験の概要

曲げ実験では、杭とパイルキャップの接合部でコンクリートが損傷することにより最大荷重が決まることを想定して実験を行った。得られた最大荷重について、既往の RC 造パイルキャップの実験結果を参照し、同等の結果が得られていることを確認した。

4. 1. 1 試験体と載荷方式

試験体は、基礎梁下端から杭を含む部分を取り出した実物大の試験体である。試験体は、作製時および載荷時ともに上下を反転した。杭はパイルキャップへの埋込みのみで定着しており、定着筋は用いていない。埋込み長さは 100mm とした。

Fig. 18 に載荷装置を示す。反力壁に接続したアクチュエータを加力点とし、片持ち梁形式の載荷方法とした。油圧ジャッキで杭に所定の軸力を導入し、アクチュエータにより押し引きの正負交番載荷を行った。水平荷重は部材角で制御し、 $R = \pm 1/800, \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/133, \pm 1/100, \pm 1/67, \pm 1/50$ rad. として各々 2 サイクルの履歴荷重を与え、その後、最大荷重まで押し切った。

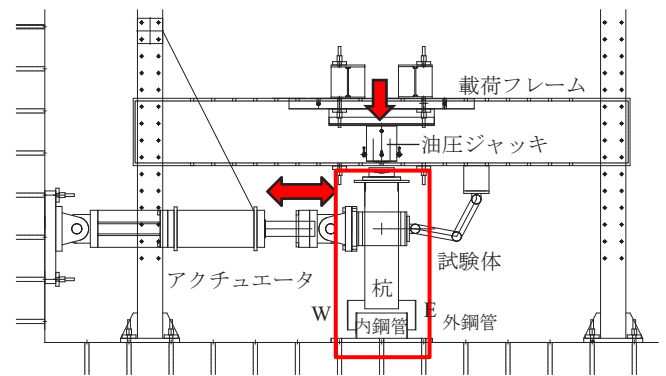


Fig. 18 曲げ実験載荷装置

4. 1. 2 試験体パラメータ

試験体について Fig. 19, Table 8 に示す。実験は軸力載荷後、軸力を保持したまま水平荷重を載荷する。軸力として、長期軸力相当を 1 ケース、地震時の変動軸力を想定した 2 ケースを実施した。

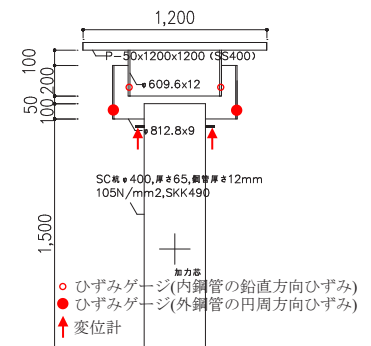


Fig. 19 曲げ試験体

Table 8 曲げ試験体一覧

試験体名	パイルキャップ外鋼管		パイルキャップ内鋼管			コンクリート一軸圧縮強度 (N/mm ²)	軸力 (kN)	備考
	径 (mm)	鋼管厚 (mm)	径 (mm)	鋼管厚 (mm)	長さ (mm)			
M-1	812.8	9	609.6	12	350	25	350	短期相当 軸力小
M-2							1250	長期相当軸力
M-3							2500	短期相当 軸力大

4. 1. 3 材料試験結果

試験体に用いたコンクリートの材料試験結果を Table 9 に、鋼管の材料試験結果を Table 10 に示す。

Table 9 コンクリートの材料試験結果

試験体名	打設部位	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
M-1	下部(柱側)	26.1	2.42×10 ⁴
	下部(杭側)	26.4	2.41×10 ⁴
M-2	下部(柱側)	25.8	2.47×10 ⁴
	下部(杭側)	26.8	2.43×10 ⁴
M-3	下部(柱側)	26.3	2.63×10 ⁴
	下部(杭側)	27.2	2.72×10 ⁴

Table 10 鋼管の材料試験結果

試験体名	部位	材質	厚さ (mm)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	備考
M-1~M-3	内鋼管	STK400	12.7	312	480	42.0	ミルシート (板巻き加工前)
	外鋼管	STK400	9.0	396	455	—	鋼管から試験片を切り出して引張試験を実施

4. 2 曲げ実験の結果

4. 2. 1 曲げモーメント—回転角関係

Fig. 20 に M-1, M-2, M-3 試験体の曲げモーメント—回転角関係を示す。回転角は、Fig. 19 に示すパイルキャップ下端から 40mm の位置に、杭の加力方向側と反対側の変位計による鉛直変位の差を測定点距離で除したものである。曲げモーメントは水平荷重に加力点から杭頭部までの距離を乗じたものに加えて P-δ 効果として軸力に杭頭部までの相対変位を乗じた値を加算した。

Fig. 20 からいずれの試験体も曲げモーメントの増加とともに回転角は増加し、軸力が大きい試験体ほど剛性が高かった。また回転角は 1/36~1/24 程度で最大荷重に達した。なお、回転角は 1/28 程度まで耐力低下は見られなかった。回転角は、1/60 程度まで加力サイクルの 1 回目、2 回目ともに安定した履歴ループを描くことを確認した。

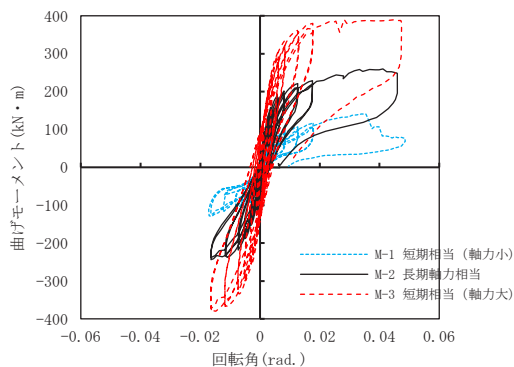


Fig. 20 曲げモーメント—回転角関係

4. 2. 2 最大曲げモーメント

Table 11 に各試験体の最大曲げモーメントの実験値と計算値を示す。表中には計算値として M_e と M_{max} を示した。

Table 11 実験結果と計算値の比較

試験体名	杭径 D (m)	軸力 N (N)	軸応力 σ_n (N/mm ²)	コンクリート強度 σ_B (N/mm ²)	換算軸力比 σ_n / σ_B	式(3)の M_e (kN・m)	式(4)の M_{max} (kN・m)	実験最大曲げモーメント M_{exp} (kN・m)
M-1	0.4	350	5	26.4	0.19	70	69	140
M-2	0.4	1250	18	26.8	0.67	250	226	260
M-3	0.4	2500	37	27.2	1.36	500	396	390

M_e は試験体を剛体と仮定した時の浮き上がりモーメントで次式^{3),4)}により求まる。

$$M_e = N \cdot D / 2 \quad \text{式 (3)}$$

M_e : 偏心曲げモーメント (kN・m),

N : 軸力 (kN), D : 杭径 (m).

また、既往の文献³⁾において、パイルキャップに耐力低下を伴う損傷が生じないことを条件として、RC 造のパイルキャップに杭が埋込みのみで定着された場合の最大偏心曲げモーメント M_{max} の評価式として M_e に低減係数を乗じた次式が提案されている。

$$M_{max} = \alpha \times M_e \quad \text{式 (4)}$$

α : 実験による低減係数, $\alpha = -0.16 \sigma_n / \sigma_B + 1.01$

ただし, $\alpha \leq 1.0$,

σ_n : 軸応力 (N/mm²), σ_B : コンクリート強度 (N/mm²)

Table 11 より実験における最大曲げモーメントは M-1, M-2 で M_e を超えている。M-3 は、 M_e を下回る結果となった。これは軸力が大きいことによる杭直下 (Fig. 18 に示す下) のパイルキャップコンクリートの損傷の影響が考えられる。ただし M_{max} と同程度の値であり、杭が埋込みのみで定着された構造実験でパイルキャップを RC 造とした既往の実験と同等の結果が得られていることが確認できる。

Photo. 1 に軸力が大きい M-3 の最終破壊状況を示す。外鋼管の上面および下面に放射上にひび割れが発生したが載荷終了まで耐力低下を伴うような過大な損傷は確認できなかった。M-1, M-2 も同様の傾向であった。

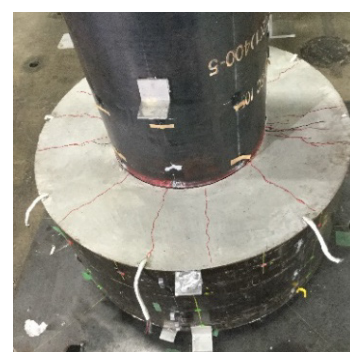


Photo. 1 最終破壊状況 (M-3)

5. せん断実験

5. 1 せん断実験の概要

せん断実験は、外鋼管の水平方向パンチングせん断破壊を想定して実験を行った。破壊性状を確認するとともに、想定破壊面での最大耐力の計算値が実験結果を安全側に評価できることを確認した。

5. 1. 1 試験体と荷重方式

試験体は基礎梁下端から杭を含む部分を取り出した1/3縮尺の試験体である。(Fig. 21) 杭は鋼管内にモルタルを充填し、パイルキャップ部に対して十分な耐力と剛性を確保した。杭頭のパイルキャップへの埋込み長さは130mmとし、杭の上面はパイルキャップのコンクリートとの間に生じる摩擦の影響を除くため、テフロン板を設置した。

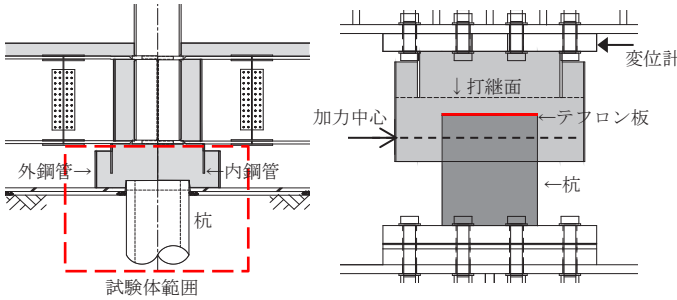


Fig. 21 試験体概要図

Fig. 22 にせん断実験の荷重装置を示す。反力壁に接続したアクチュエータを加力点とし、治具により試験体の上端下端が固定条件となるよう荷重を行った。杭の埋込み部中央が加力中心になるよう水平力を荷重する。試験体に軸力は作用させず、一方向の単調荷重とした。なお、水平変位は、上部の鋼製プレートに取り付けた2点の変位計の平均値とした。

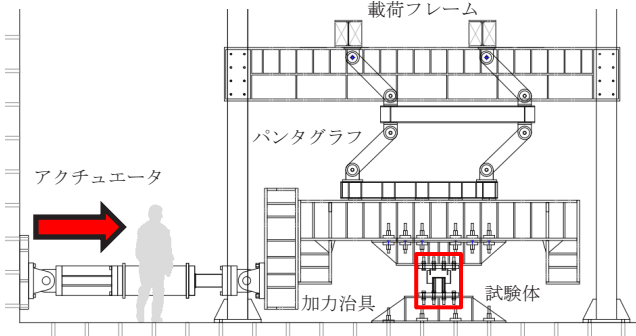


Fig. 22 せん断実験の荷重装置

5. 1. 2 試験体パラメータ

試験体一覧を Table 12, Fig. 23 に示す。Q-1 試験体を基準試験体とし、内鋼管の埋込み長さ (Q-2)、内鋼管とコンクリートの一体化のためのスタッドの有無 (Q-3) および打継面 (Q-4) の状態をパラメータとした。実際の施工を想定し、試験体の内鋼管下端位置に打継面を設けている。打継面の状態は、下部コンクリート層打設後に木ごてでならし、硬化後、散水上部のコンクリートを打設した「通常施工」、および明確な縁切りを意図した「塩ビシート」の2種類とした。

Table 12 試験体一覧

試験体	外鋼管	内鋼管		スタッド	打継面	備考
	径×鋼管厚 (mm)	径×鋼管厚 (mm)	長さ (mm)			
Q-1	φ560×t3.2	φ406.4×t6.4	130	無	通常施工	基本試験体
Q-2			180	無	通常施工	内鋼管長さの影響
Q-3			130	有	通常施工	内鋼管スタッドの影響
Q-4			130	無	塩ビシート	打継面の状態の影響

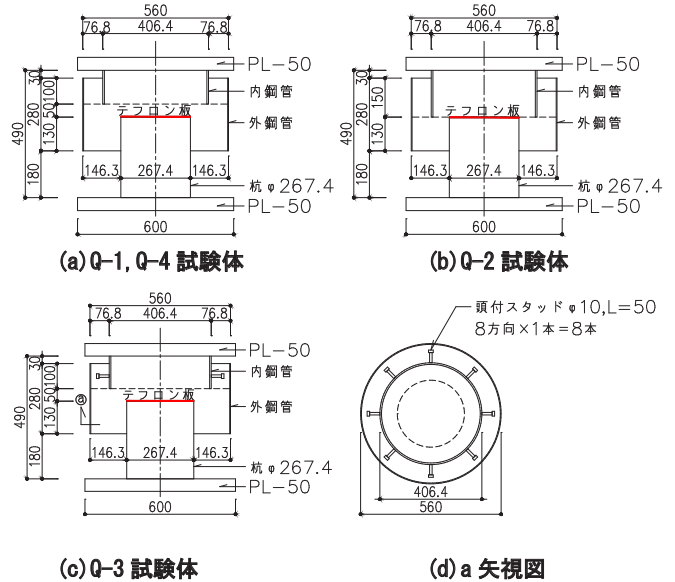


Fig. 23 せん断実験試験体 (一覧)

5. 1. 3 材料試験結果

試験体に用いたコンクリートの材料試験結果を Table 13, 鋼材 (外鋼管) の材料試験結果を Table 14 に示す。

Table 13 コンクリートの材料試験結果

試験体/部位	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	
Q-1, Q-2	上部	23.8	2.16×10 ⁴
	下部	23.2	2.10×10 ⁴
Q-3, Q-4	上部	23.2	2.15×10 ⁴
	下部	22.6	2.05×10 ⁴

Table 14 鋼材 (外鋼管) の材料試験結果

試験体	材質	厚さ (mm)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)
Q-1~Q-4	SS400	3.2	396	458	1998

5. 2 せん断実験の結果

5. 2. 1 荷重—変位関係

Fig. 24 に各試験体の水平荷重—水平変形関係を示す。図中の×印は外鋼管が最初にひずみ降伏した点である。いずれの試験体も最大荷重までほぼ線形に推移した。外鋼管のひずみが降伏ひずみを超えた後、最大荷重に達し、その後、Q-1, Q-3 は荷重が低下したのに対し、Q-2 は荷重の低下が緩やかであった。また、Q-4 は他の試験体に比べて最大荷重が小さいが、その後は荷重を維持しながら靱性に富んだ性能を発揮した。Q-1 と Q-3 の結果は傾向が似

ており、内鋼管とコンクリートの一体化を目的に配置したスタッドは結果への影響が小さかった。

5. 2. 2 最大荷重と耐力評価式

外鋼管の水平方向パンチングせん断耐力 Q_u を鋼管の周長の 1/4 を破壊面と想定し、次式により評価する。

$$Q_u = \tau_s \times A_{ss} = \tau_s \times t_o \times D_p \cdot \pi / 4 \quad \text{式(5)}$$

ここで、 A_{ss} :外鋼管のせん断抵抗に有効である断面積(mm²),

D_p :外鋼管径(mm), t_o :外鋼管厚(mm)

Fig. 25 に式 (5) で想定した破壊面を示す。

また、式(5)を用いて試験体の Q_u を算出した結果を Fig. 24 に示す。本試験体の場合、 $Q_u=321\text{kN}$ となり、最大荷重を安全側に評価できることを確認した。

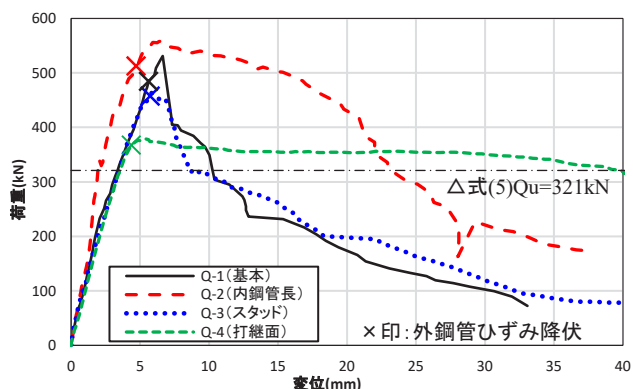


Fig. 24 水平荷重—水平変位関係

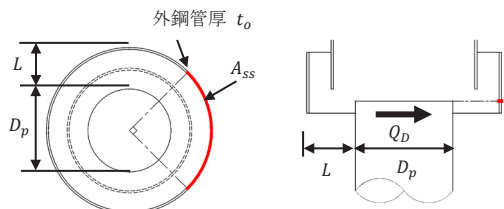


Fig. 25 水平方向パンチングせん断耐力の想定破壊面

6. まとめ

二重鋼管とコンクリートで構成されたパイルキャップについて各種実験を実施して、以下の結果を得た。

- ・杭に定着筋を設置することで RC 造のパイルキャップと同様に引張力の伝達ができることを確認した。
- ・支圧実験より、実験結果は RC 規準における支圧応力の評価式による計算値を上回っており、鋼管によるコンクリートのコンファインド効果による支圧耐力の上昇を確認した。
- ・曲げ実験より、最大曲げモーメントは既往の RC 造パイルキャップの曲げ耐力評価式と同等の結果が得られていることを確認した。
- ・鋼管のパンチングせん断破壊を想定した式(5)により最大荷重を安全側に評価できることを確認した。

なお、本工法はこれらの実験結果に基づいて、適用範囲と耐力評価式を定め、平成 30 年 11 月に建築確認検査機関の建築物構造評価における技術評価を取得した。これにより一般の建築確認により建物に採用することが可能となっている。今後、物流倉庫などの大規模建築物において、鉄骨基礎梁とともに本工法を採用することにより、生産性の向上と品質の確保につなげていきたい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造の設計と施工，2001. 1.
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp. 342-343，2010. 2.
- 3) 青島一樹，堀井良浩，小林治男，安達俊夫：改良型簡易接合法を採用した既製コンクリート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 75 巻 第 653 号，pp. 1271-1278，Jul.，2000.
- 4) 濱田純次，谷川友浩，土屋富男，宇佐美徹：簡易な杭頭接合法の回転剛性評価法に関する考察，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻 第 688 号，pp. 1095-1104，Jun.，2013.

Development of Pile Cap Composed of Double Steel Pipe and Concrete

Marie SUZUKI, Taisuke NAKAZATO, Atsushi OGAWA and Toshio MAEGAWA

Abstract

The footing beam is usually reinforced concrete construction regardless of its upper structure. Recently, when the upper structure is steel construction, the construction period has been shortened by making the footing beam steel construction. Therefore, we devised a construction method in which the pile cap of the pile foundation is composed of double steel pipe and concrete when the footing beam is made of steel frame, thereby omitting the formwork and reinforcement construction in the field, achieving the streamlining of the construction and the improvement of productivity, and slimming of the pile cap. In this paper, we test the structural performance of this pile cap and verify the safety.

Key words: Pile cap, Steel pipe, Concrete