

論文 現場溶接を必要としないRCパイルキャップと鋼管杭との接合工法の開発

瀬利 聡^{*1}・田中 照久^{*2}・李 文聰^{*3}・江崎 文也^{*4}

要旨: 近年、鋼管杭の採用事例が増えてきているが、杭基礎の被害事例があることや杭頭接合部の溶接の施工性が悪いこと、過去の研究事例が少ないことが課題として挙げられる。研究の目的は、従来の杭頭接合法に代わる新工法として、現場溶接を必要としない3つの接合方式を提案した。本報では、押込み杭を対象とした杭試験体に水平力を載荷する実験を行い、従来工法と比較検討した。実験結果によれば新工法は従来工法と比べ耐力およびエネルギー吸収能力の大きい履歴性状を示した。その主な要因が新工法の鋼管周辺の横補強筋の配筋によることがわかった。

キーワード: 鋼管杭, 杭頭接合部, RCパイルキャップ, 弾塑性性状

1. はじめ

近年、コンクリート杭が多く採用される中、鋼管杭の採用事例が増えてきている¹⁾。その理由の1つに、鋼管杭は剛性が大きく粘りがあるため、大きな水平抵抗力が期待できることから、地震荷重のような横方向からの荷重にも強靱な耐震性能を発揮できることがあげられる。

一方、杭基礎に支持された建物の被害事例が多く見られる。杭基礎の被害は、基礎と杭を繋ぐ杭頭接合部(RCパイルキャップ)の損傷した建物が多い。兵庫県南部地震では、鋼管杭や既製コンクリート杭などに杭頭部のせん断破壊が生じている²⁾。そのため、杭頭接合部の改善が求められる。また、地震時に上部構造の耐震壁がロッキングして大きな引抜き力や押込み力が生じる恐れもあるため、引抜きおよび押込みにも抵抗する必要がある。RCパイルキャップは地震時の水平力が作用した杭に生じる曲げモーメント、せん断力を伝達する耐震構造上重要な部位である。鋼管杭の杭頭接合の方式は鉄筋籠方式、カプラー方式、ひげ筋方式、二重鉄筋方式がある。鉄筋籠方式は接合部の耐力が不足することが多いことが挙げられ、カプラー方式は経済的に劣ることが挙げられる。そのため、接合方式の使用割合は鋼管杭に主筋をフレア溶接するひげ筋方式と二重鉄筋方式の両者が大半を占める¹⁾。しかし、両者は配筋が高密度となることや現場での溶接環境が悪いこと、コストや工期に影響を与えることなどの問題点が挙げられる。これらより杭頭接合方法の耐震性能と施工簡易化を満足したものが要求される。また、過去の実験的研究が少なく、現状としてはRCパイルキャップ内での弾塑性性状の究明されていないこと、適切な配筋方法の検討されていないこと¹⁾があげられる。

本研究の目的は、従来の杭頭接合部に代わる新工法の

開発である。文献3),4)で提案した工法では、鋼管からRCパイルキャップ内の主筋への応力伝達が十分に行われていなかった。また、RCパイルキャップには早期にひび割れが生じ、最大荷重時に大きくせん断ひび割れが生じた。そのため、これらを改善する必要がある。本報では新たに新工法として3種類を提案するが、現場でフレア溶接を行わず、簡易に鋼管杭と主筋を接合するところにその特徴がある。また、RCパイルキャップのせん断ひび割れを防ぐための配筋方法を提案し、杭試験体に水平力を載荷する実験を行い、従来工法と比較検討した。

2. 杭頭接合部の新工法の提案

杭頭接合部の内籠配筋の詳細を図-1に示す。杭頭接合部の内籠は鋼管杭とRCパイルキャップを接合する役目を果たす。内籠の構成として、主筋は先端をUの字に曲げ、鋼管杭より径が一回り大きい円形鋼管に溶接し定着させる。鋼管杭に溶接した主筋の下部のかぶり基準が60mm

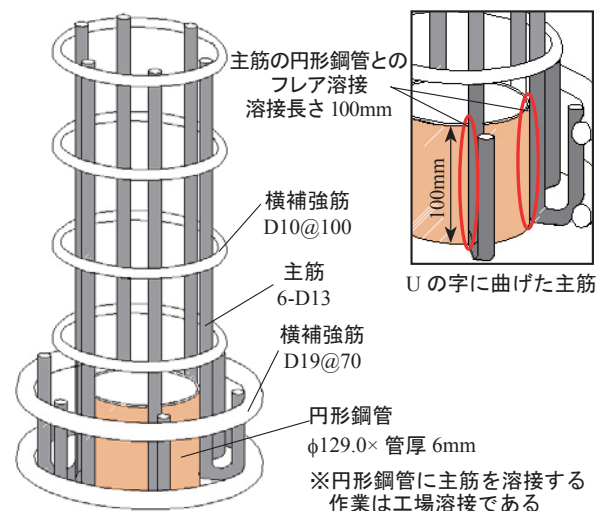


図-1 内籠配筋の詳細

*1 福岡大学 大学院工学研究科 (正会員)
 *2 福岡大学 工学部建築学科助手 (正会員)
 *3 福岡大学 工学部建築学科助教 博士(工) (正会員)
 *4 元福岡大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

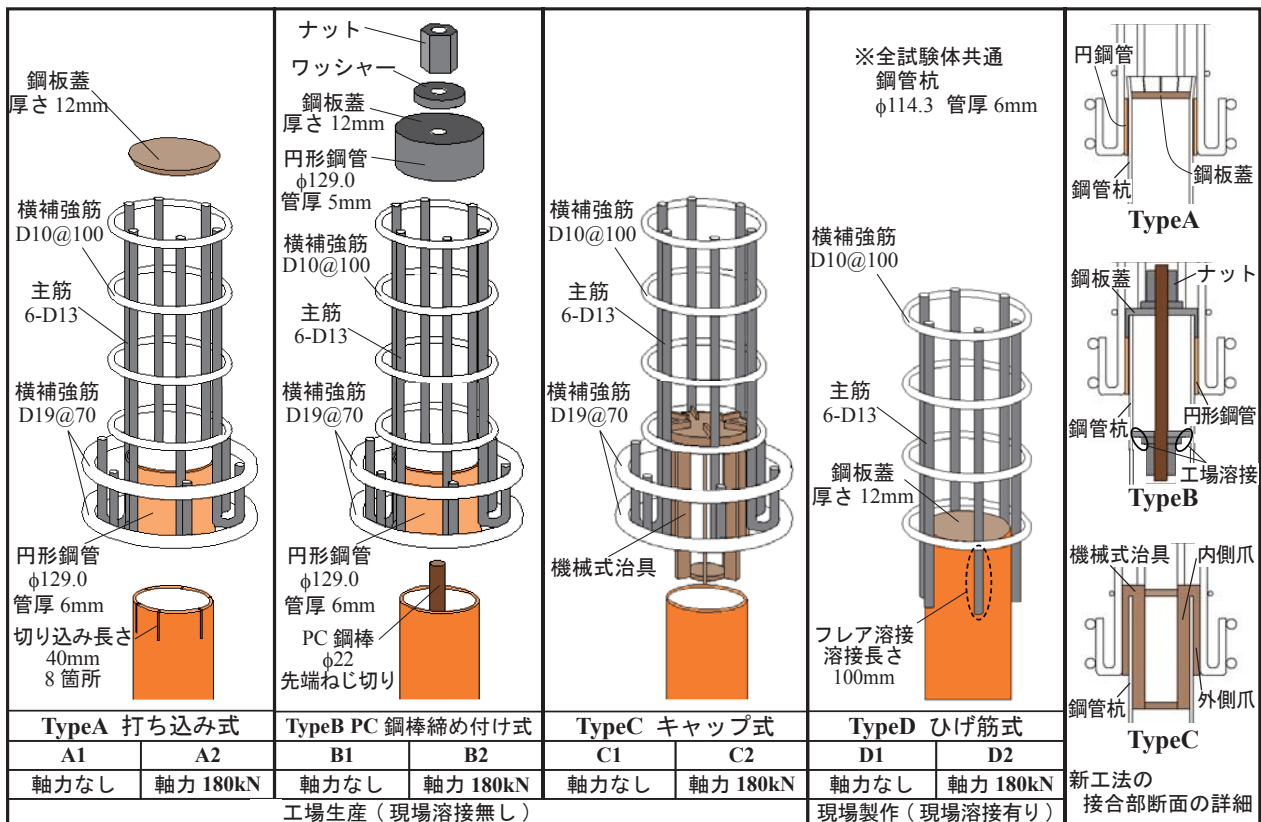


図-2 杭頭接合工法の詳細

表-1 鋼材の機械的性質

鋼材	使用箇所	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ⁵ (N/mm ²)	降伏比 (%)
D10(SD295)	帯筋 内籠, 外籠	343	503	1.43	68.2
D13(SD295)	主筋 内籠	339	508	1.55	66.7
D16(SD295)	主筋 外籠	348	498	1.51	69.9
D19(SD295)	帯筋 内籠	366	540	1.76	67.8
PL-6(SS400)	TypeCの機械式治具	300	384	2.01	78.1
φ114.3-6(STK400)	円鋼管杭	411	482	2.19	85.3

表-2 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
31.9	4.19

～70mmであり、溶接長さが100mm程度となるため、埋込み長さが最低でも160mm～170mmとなる⁵⁾。そのため、新工法は主筋の下部のかぶりを60mm、従来工法のかぶりは100mmとし、全ての試験体で鋼管杭のRCパイルキャップへの埋込み長さを200mmとした。なお、D19の横補強筋は、杭頭にて作用により生じる反力を処理するために配置した。鋼管杭は外径114.3mm、管厚6mmとする。

3つの鋼管杭との接合工法を提案する。杭頭接合工法の詳細を図-2に示す。また、新工法の接合部断面の詳細も示す。全試験体において押込み力は、RCパイルキャップのコンクリートと鋼管杭上部の蓋面との支圧力により応力伝達を行う。TypeAは鋼管杭の杭頭の8箇所に入り込みを入れて鋼板の蓋をハンマーで打ち込む工法である。この接合法は、蓋を打込むことによって切り込みを入れた部分が外に開き、内籠と鋼管杭を接合する。TypeBは鋼管杭にPC鋼棒を通し、コンクリートを打設する前に上部ナットを締め付け、鋼板蓋と円形鋼管が接触することによって、鋼管杭と内籠を接合

する。TypeCは内籠に鋼管杭を拘束する機械式治具がついており、鋼管杭を外側と内側の爪のような治具により、挟み込むように拘束することで内籠と接合する。これらの提案する工法は工場で作成するため、現場では溶接作業を必要とせず、簡易的に施工できる。TypeDは従来工法であり、現場にて鋼管杭に主筋をフレア溶接する。

各試験体の鋼材の機械的性質、コンクリートの材料特性をそれぞれ表-1および表-2に示す。

3. 実験概要

試験体の形状および寸法を図-3に示す。内籠鉄筋および外籠鉄筋(RCパイルキャップとRC基礎梁を繋ぐ鉄筋)の配筋詳細を図-4に示す。試験体は天地を逆にして鋼管杭、RCパイルキャップ、RC基礎梁によって構成される。試験体は新工法3タイプ各2体、従来工法1タイプ2体の計8体である。载荷は軸力の有無のもとで水平力を载荷する2パターンとする。軸力の設定は、ある建物

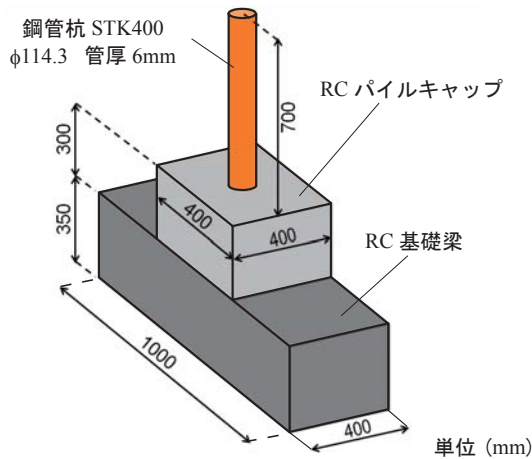


図-3 試験体の形状および寸法

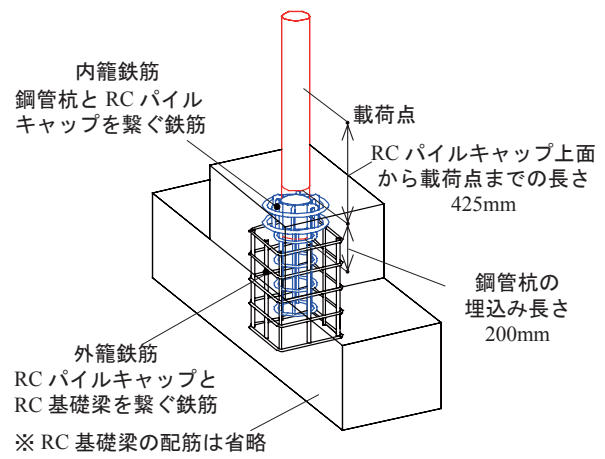


図-4 杭頭接合部の配筋詳細

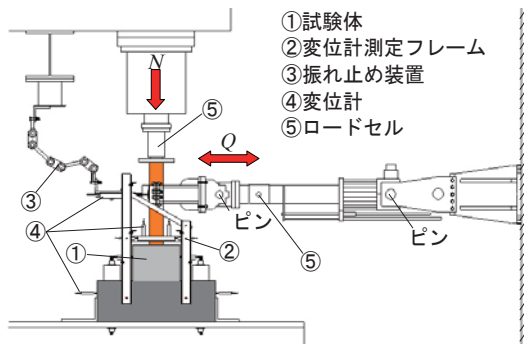


図-5 荷重装置および測定方法

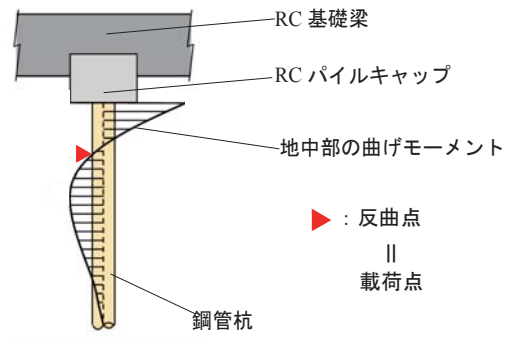


図-6 荷重点の設定

と地盤を想定し、その建物の短期荷重時において杭に作用する圧縮軸力値 180kN とする。本実験では、引抜き力を考慮しておらず、押し込み杭を対象とした実験を計画している。引抜き杭については今後の検討課題とする。

実験の荷重装置および測定方法を図-5 に示す。実験は正負交番繰り返し水平力荷重とした。荷重方法は部材角 R によって制御した。部材角 R は荷重位置の水平変位 δ を RC パイルキャップの上面までの距離 h で除した δ/h である。荷重プログラムは $R=\pm 0.25\%$ で 1 サイクル、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 4.0\%$ で 2 サイクルずつとした。図-6 に示すように、荷重点は地中部の曲げモーメントの反曲点位置を想定し、せん断スパン比 (M/QD) を 3.72 とした。ひずみゲージは内籠および外籠の主筋およびせん断補強筋に貼付した。鋼管杭には杭頭付近に 6 箇所ゲージを貼付した。コンクリートのひび割れ状況は、制御変位で目視によるスケッチおよびカメラ撮影により記録した。

4. 履歴性状

実験より得られた各試験体の履歴性状（水平荷重 Q と部材角 R の関係）を図-7 に示す。

4.1 軸力なしの場合の挙動

全ての試験体は逆 S 字型の履歴性状を示しているが、新工法 A1 ~ C1 は従来工法 D1 の耐力と同等以上であることが分かる。新工法は部材角 1.0% を超えると徐々に

剛性が低下するが、その後も荷重は保持され、明確な荷重ピークは見られなかった。一方、従来工法 D1 は部材角 1.2% で明確な最大荷重が見られ、その後 3 割程度の荷重の低下が見られた。

4.2 短期軸力 (180kN) 荷重時の挙動

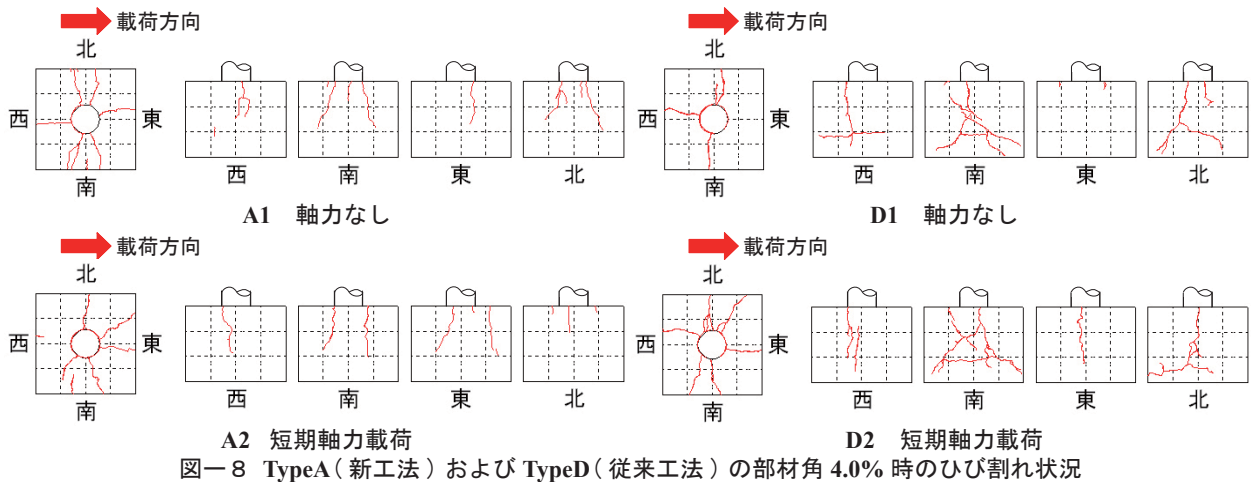
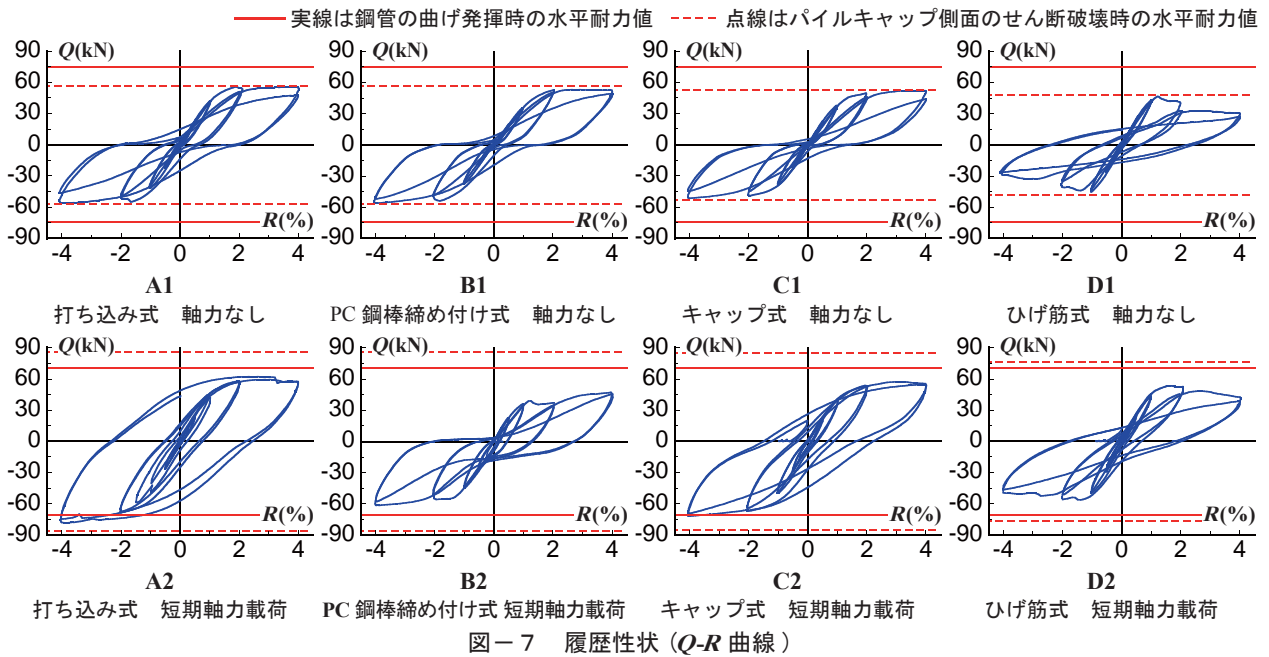
新工法 A2, C2 は紡錘形の履歴性状となり、エネルギー吸収能力が大きく、繰り返しによる耐力低下も少ない。一方、B2 はスリップ型の履歴性状となり、荷重した圧縮軸力によって鋼管の中に通した PC 鋼棒の緊張力が小さくなり十分に接合部を固定できなくなったため、A2, C2 と異なる結果となった。従来工法 D2 は紡錘形の履歴性状を示しているが、部材角 1.6% で最大荷重となり、その後は 2 割程度の荷重の低下が見られた。

5. RC パイルキャップ部のひび割れ状況

部材角 4.0% における RC パイルキャップのひび割れ状況を図-8 に示す。本論では試験体数が多いため、新工法の中で最も耐震性に優れた TypeA と従来工法 TypeD の比較を示す。

5.1 軸力なしの場合のひび割れ状況

軸力なしの場合、A1, D1 の部材角 2.0% 時は共に RC パイルキャップ上面と側部にせん断ひび割れが生じ、部材角 4.0% 時にはせん断ひび割れ進展した。しかし、D1 は鋼管杭周辺に横補強筋を配筋していないため、A1 と比べて RC パイルキャップの側部のせん断ひび割れが大きく生じた。A1 の最大ひび割れ幅が 2mm であるのに



対し、D1 は 6mm であり、鋼管杭の埋込み長さ 200mm 付近の南北面に水平方向にひび割れが生じた。

5. 2 短期軸力 (180kN) 載荷時のひび割れ状況

短期軸力 (180kN) を載荷した場合、A2 の部材角 2.0% 時は軸力の載荷による鋼管杭の杭頭回転拘束の影響により、RC パイルキャップ上面にひび割れは見られなかった。部材角 4.0% 時は RC パイルキャップ上面と側面にせん断ひび割れが生じた。これらは鋼管杭周辺の横補強筋が抵抗したことで、早期にせん断ひび割れが生じなかったと考えられる。D2 は軸力なしの場合と同様に、部材角 2.0% 時 (最大耐力発揮後) のひび割れ状況は、RC パイルキャップ上面と側面に大きくせん断ひび割れが生じた。部材角 4.0% になるとさらに大きくせん断ひび割れが進展し、鋼管杭の埋込み長さ 200mm 付近の南北面に水平方向にひび割れが生じた。

6. 最大耐力の検討

実験値および鋼管杭の終局曲げ耐力発揮時の水平耐力と RC パイルキャップ側部のせん断破壊時の水平耐力の

計算値を表-3 示す。鋼管杭の終局曲げ耐力発揮時の水平耐力計算は文献 6) を参考に式 (1) ~ (4) より算出した。RC パイルキャップ側部のせん断破壊時の水平耐力計算は明確な設計式がないため、文献 7) を参考に式 (5) ~ (9) より算出した。鋼管杭の終局曲げ耐力発揮時の水平耐力計算値については、杭頭で杭断面の全塑性曲げモーメントを発揮した時の水平力を求めた。RC パイルキャップ側面のせん断破壊時の水平耐力計算値については、図-9 の水平力伝達機構をもとにて反力 Q_s と杭の先端断面における曲げ耐力 M_B に釣り合うように載荷点の水平力 Q を求めた。

表-3 の計算結果より軸力なしの場合、全ての試験体で RC パイルキャップ側面のせん断破壊時の計算水平耐力が鋼管杭の終局曲げ耐力より小さく、実験結果に対応している。短期軸力 (180kN) を載荷した場合、A2 と C2 は鋼管杭の終局曲げ耐力時の水平耐力計算値によって決まっており、実験値と対応している。B2 と D2 の計算値は実験値と対応しておらず、今後検討する必要がある。

鋼管杭の終局曲げ耐力発揮時の水平耐力

$$M/M_p = \cos \left\{ \pi/2 \times N/N_y \right\} \quad (1)$$

$$N_y = 2\pi \times r \times t \times_s \sigma_y \quad (2)$$

$$M_p = 4 \times r^2 \times t \times_s \sigma_y \quad (3)$$

$$Q = M/L_1 \quad (4)$$

Q: 載荷点の水平力 (N)

N_y: 降伏軸方向力 (N)

M_p: 全塑性モーメント (Nmm)

M: 杭頭曲げモーメント (Nmm)

N: 軸方向力 (N)

sσ_y: 鋼管杭の降伏強度 (N/mm²)

r: 鋼管杭の半径 (mm)

t: 鋼管杭の厚さ (mm)

L₁: 載荷点から RC パイルキャップ上面までの長さ (mm)

RC パイルキャップ側面のせん断破壊時の水平耐力

$$Q_s = b_e j_t p_w \sigma_{wy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b_e D_1 v \sigma_B / 2 \quad (5)$$

$$\tan \theta = \left\{ \sqrt{\left(L/D_1 \right)^2 + 1} - L/D_1 \right\} \quad (6)$$

$$\beta = \left\{ (1 + \cot^2 \phi) p_w \sigma_{wy} \right\} / (v \sigma_B) \quad (7)$$

Q_s: パイルキャップのてこ反力位置におけるせん断力 (N)

σ_B: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

σ_{wy}: せん断補強筋の降伏強度 (N/mm²)

β: コンクリート圧縮力のトラス機構の負担比率

φ: トラス機構におけるコンクリート圧縮束の部材軸に対する角度 (cot φ=1.0)

θ: アーチ機構の材軸に対する角度 (rad)

b_e: (B² - π/4 × φ₀²)/B (mm)

B: RC パイルキャップの部材幅 (mm)

φ₀: 鋼管杭径 (mm)

j_t: 主筋間距離 (mm)

D₁: コンクリート束形成領域 (mm)

L: 載荷点から杭の先端までの長さ (mm)

p_w: せん断補強筋比

v: コンクリート圧縮強度の有効係数

$$M_B = 0.8 a_r \sigma_y D_2 + 0.5 N D_2 (1 - N/bD_2 \sigma_B) \quad (8)$$

M_B: 杭先端断面における曲げ耐力 (Nmm)

σ_B: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

σ_y: 主筋の降伏強度 (N/mm²)

a_r: 引張主筋の断面積 (mm²)

b₂, D₂: 仮想円形断面の幅とせい (mm)

N: 短期軸方向力 (N)

$$Q = (Q_s \times 2/3 L_2 + M_B) / (L_1 + L_2) \quad (9)$$

Q: 載荷点の水平力 (N)

L₁: 載荷点から RC パイルキャップ上面までの長さ (mm)

L₂: 埋込み長さ (mm)

杭頭の固定度の算定

$$\theta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\ell} \quad (10)$$

$$\alpha_r = \frac{1}{1 + EI / (2h^2) \cdot \theta / Q} \quad (11)$$

θ: 回転角 (rad)

δ₁, δ₂: 水平力載荷によって生じる鉛直変位 (mm)

ℓ: 鉛直変位測定位置の間隔 (mm)

α_r: 固定度

E: 鋼管杭のヤング係数 (N/mm²)

I: 鋼管杭の断面二次モーメント (mm⁴)

h: 載荷点から RC パイルキャップ上面までの長さ (mm)

Q: 載荷点の水平力 (N)

表-3 耐力計算値と実験値 単位 (kN)

試験体	TypeA		TypeB		TypeC		TypeD		
	0kN	180kN	0kN	180kN	0kN	180kN	0kN	180kN	
計算値	鋼管杭の曲げ耐力発揮時の水平耐力	75.8	72.1	75.8	72.1	75.8	72.0	75.8	72.1
	パイルキャップ側面のせん断破壊時の水平耐力	56.5	86.2	56.5	86.2	52.9	84.7	48.3	76.3
実験値	55.8	78.2	56.1	61.4	52.1	71.9	46.7	56.2	
実験値/計算値 (最小値)	0.99	1.08	0.99	0.85	0.98	1.00	0.97	0.74	

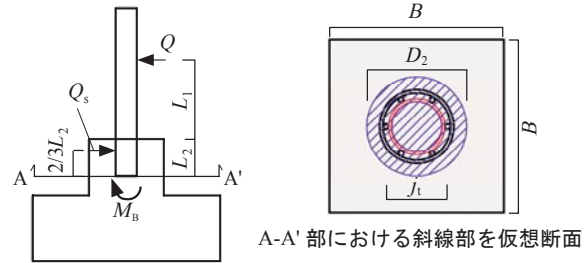


図-9 水平力伝達機構および仮想断面

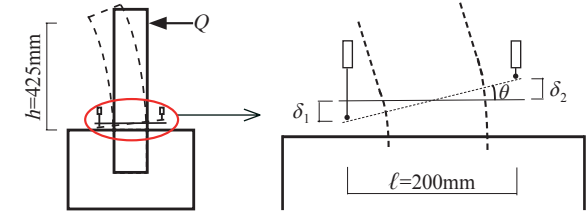


図-10 杭頭回転角

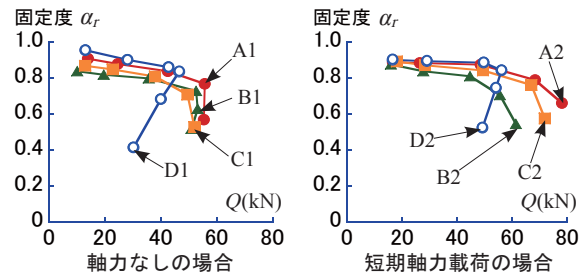


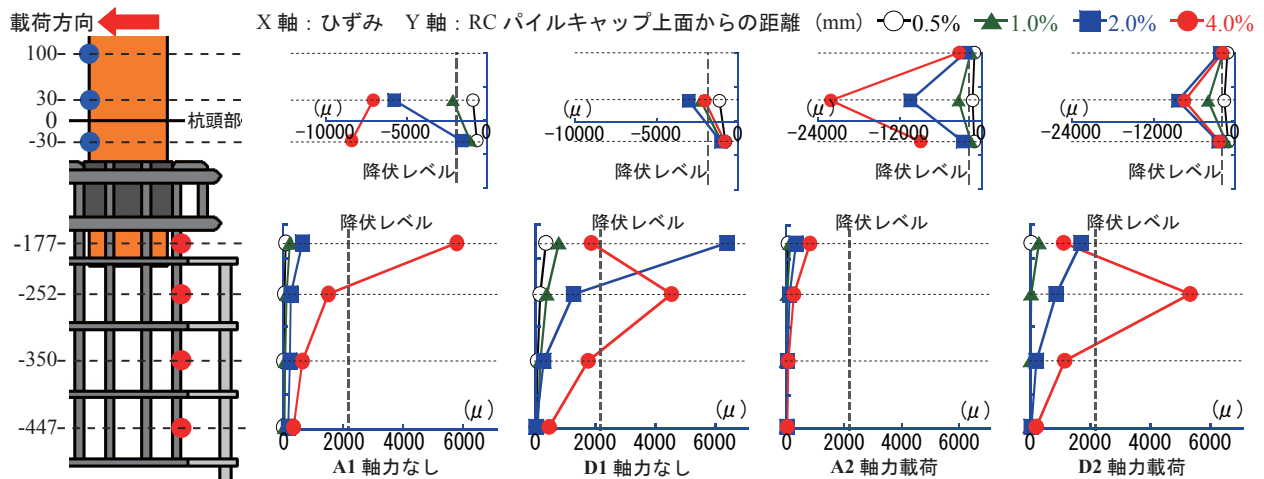
図-11 水平荷重 Q と固定度 α_r の関係

7. 固定度の検討

固定度とは、杭頭接合部の杭頭の回転拘束度のことである。固定度は式 (10) および式 (11) を用いて算定した⁸⁾。式 (10) では、杭頭に設置した鉛直変位計と載荷点までの距離より杭頭回転角を求めた (図-10 参照)。式 (11) では、式 (10) で求めた杭頭回転角と水平荷重より固定度を求めた。算定式より各部材角の水平荷重 Q と固定度 α_r の関係を図-11 に示す。

軸力なしの場合、各試験体の固定度は初期段階からそれぞれ違う履歴を示している。D1 の固定度は、水平荷重 45kN 程度まで新工法よりも大きいですが、最大荷重を発揮後に RC パイルキャップにせん断ひび割れが生じたため急激に低下した。新工法の固定度は最大荷重付近で荷重を保ったまま低下している。

短期軸力載荷の場合、A2 の固定度は水平荷重 50kN 程度まで D2 と同等の固定度を発揮している。B2 は、軸力載荷で PC 鋼棒の緊張力がなくなり、十分に接合部を固定できなくなり、固定度が低下した。D2 は軸力なしの



図一 1 2 曲げ圧縮側鋼管および曲げ引張側鉄筋のひずみ分布

場合と同様に最大荷重後に急激に固定度が低下した。

新工法は鋼管杭埋込み部の横補強筋のコンクリートを拘束する効果により、急激な固定度の低下が生じなかった。

8. 鋼管杭と接合鉄筋のひずみ分布

新工法で最も耐力を発揮した TypeA と従来工法の TypeD の曲げ圧縮側の鋼管杭と曲げ引張側の主筋のひずみ分布を図一 1 2 に示す。

軸力なしの場合、部材角 1.0% まで A1 の曲げ圧縮側の鋼管杭のひずみと曲げ引張側の主筋ひずみは D1 と同程度のひずみが生じた。部材角 2.0% になると A1 の鋼管杭のひずみは杭頭上部で大きく、D1 の主筋のひずみは鋼管杭の埋込み部分で降伏レベルに達しており、A1 と D1 のひずみに違いがみられた。部材角 4.0% になると、A1 の鋼管杭のひずみは杭頭部付近でさらに大きくなり、主筋のひずみは鋼管杭の埋込み部分で降伏レベルに達した。一方、D1 の鋼管杭のひずみは小さくなり、主筋のひずみは鋼管杭の埋込み部分より下部の位置でさらに大きくなっていることが分かる。

短期軸力を載荷した場合、部材角 1.0% まで A2 の曲げ圧縮側の鋼管杭ひずみと曲げ引張側の主筋ひずみは D2 と同程度のひずみが生じた。部材角 4.0% になると、A2 の主筋ひずみはほとんど生じておらず、杭頭上部の鋼管杭ひずみは非常に大きいことが分かる。一方、D2 の鋼管のひずみは部材角 2.0% とほとんど変わらないが、主筋のひずみは鋼管杭の埋込み部分より下部の位置で降伏レベルに達し、A2 と D2 のひずみに顕著な違いがみられた。

これらより、新工法と従来工法では、部材角 2.0% 以降に鋼管杭、RC パイルキャップ内の応力伝達の違いが顕著に現れた。A1 は部材角 2.0% まで鋼管杭埋込み周辺部の横補強筋によるコンクリートの拘束効果によって鋼管杭埋込み周辺部にて鋼管杭と RC パイルキャップのコンクリート間で応力伝達が行われた点に特徴がある。A2 では部材角 4.0% 時も主筋のひずみが小さいことから、主筋を用いなくても鋼管杭埋込み周辺部で応力伝達ができると考える。

9. まとめ

杭頭接合部の実験結果より、現場溶接を必要としない新工法の TypeA は従来工法と比べ耐力を発揮し、エネルギー吸収能力も優れている。本工法で RC パイルキャップへの応力伝達が十分に行えることがわかった。主要因は、新工法のディテールと内籠の鋼管杭周辺の横補強筋の配筋が大きいものと考えられる。

謝辞

試験体準備にあたっては株式会社テクノ九州の藤川繁次氏、片岡高岑氏にご協力頂いた。福岡大学の堺純一教授にご助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 耐震杭協会 技術委員会:耐震場所打ち杭の杭頭接合、基礎工、pp.14~pp.19 2008.12
- 2) 杉村義広:杭基礎の耐震問題に関連して、東北大学出版会 2007.02
- 3) 瀬利聡,江崎文也,李文聰,田中照久:簡易工法により RC パイルキャップに接合された鋼管杭頭接合部の水平抵抗性能に関する実験的研究,日本建築学会研究報告九州支部 第 49 号 pp.237~pp.240 2010.03
- 4) 梅崎正吉,江崎文也,李文聰,田中照久:水平力を受ける杭と RC パイルキャップの接合部の力学的性状に及ぼす軸方向力の影響に関する実験的研究,日本建築学会研究報告九州支部 第 49 号 pp.233~pp.236 2010.03
- 5) 鋼管杭・鋼矢板技術協会:鋼管杭 - その設計と施工 - 2009.04
- 6) 日本建築構造技術者協会:杭基礎の耐震設計を考える 1997.11
- 7) 高見信嗣,黒正清治,和田章,林静雄,堀井昌博,木原碩美,斉藤安生:高強度 PC 杭の耐力及び変形性能向上に関する研究その 12 パイルキャップ破壊耐力の推定,日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) pp.1549~pp.1550 1990.10
- 8) 酒井吉郎,有泉浩蔵,山内一秀,石川文洋:鋼管杭とフーチングの接合方法に関する研究その 4 固定度および抵抗機構,日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) pp.1111~pp.1112 1987.10