

論文 円形鋼管を用いた杭頭接合部を有するパイルキャップのせん断強度の検討

松浦 恒久^{*1}・松本 大亮^{*2}・西 正晃^{*3}

要旨：既製杭と上部構造との接合方法の合理化を目的として、円形鋼管を用いた杭頭接合構法を提案した。提案構法は従来の構法に比べてパイルキャップの断面積が小さくなっているため、パイルキャップを含めた杭―基礎梁接合部のせん断強度を検討する目的で、杭頭接合部および上部架構を模擬した部分架構試験体による載荷実験を行った。パイルキャップを含めた接合部のせん断強度は、パイルキャップの高さの影響を受けることが見られた。そこで、靱性設計指針の柱梁接合部のせん断強度式を基に、パイルキャップの高さの影響を考慮した式を提案した。提案式は計算値と実験値が良好に一致することを示した。

キーワード：パイルキャップ, せん断強度, 杭頭接合部, 既製杭, 円形鋼管

1. はじめに

杭基礎は杭頭部を囲むように設けられるパイルキャップ、基礎梁および柱で構成される。一般的にパイルキャップおよび基礎梁は RC 造であり、杭頭部には複数の鉄筋が配筋されている。既製杭と上部構造との杭頭接合部の施工の合理化を目的として、円形鋼管を用いた杭頭接合構法がこれまでに提案されている^{1)~3)}。筆者らが提案した杭頭接合構法は、図-1 に示すように外殻鋼管付き高強度コンクリートパイル（以下、SC 杭）の杭頭部に円形鋼管（以下、接合鋼管）および接合筋を配置し、杭中空部および接合鋼管と杭との隙間にコンクリートを充填することにより杭頭接合部を構築する構法である。

筆者らはこれまでに杭頭接合部の構造性能を確認する目的で杭頭部の曲げせん断を実施し、曲げ強度算定式および回転ばねモデルを提案した⁴⁾。本構法では従来の一般的な RC 造よりもパイルキャップおよび杭頭接合部の断面が小さくなっているため、当該部分の構造性能を確認する目的で上部架構を含めた部分架構実験を実施した。本論文ではパイルキャップの破壊状況および構造性能について報告する。

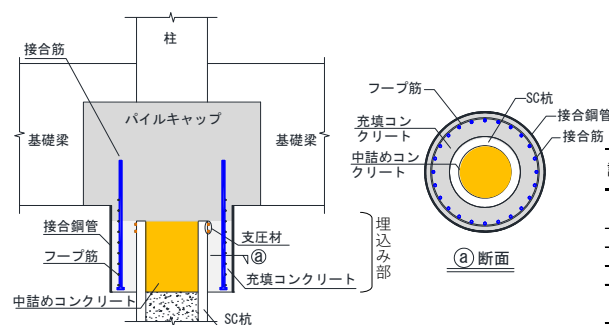


図-1 構法概要

2. 実験計画

2.1 試験体概要

表-1 に試験体一覧を示し、試験体形状および配筋詳細を図-2 に示す。試験体は、縮尺が約 1/2.8 の縮小試験体で、十字形試験体 4 体、ト字形試験体 2 体の計 6 体とした。いずれの試験体も杭は直径 $\phi 355.6$ の SC 杭で、コンクリート強度は Fc105 とした。また、接合鋼管は直径 $\phi 600$ 、板厚 6mm の SM490 材を使用した。基礎梁およびパイルキャップは PCa 部材とし、パイルキャップのせい D_{pc} は杭直径 D_p の 1.97 倍と従来の一般的な RC 造の 2.5 倍よりも小さくした。

主な実験要因は柱、基礎梁の主筋および接合筋の鉄筋量とした。十字形試験体 F-1 は柱の曲げ降伏が、試験体 F-2 は基礎梁の曲げ降伏が先行するように計画し、試験体 F-3 および F-4 はパイルキャップのせん断破壊を想定した。なお、F-4 はせん断耐力におけるパイルキャップの高さの影響を確認するために、F-3 より高さを低くしている。ト字形試験体 F-5 は基礎梁の曲げ降伏が先行するように計画した。F-7 はパイルキャップのせん断破壊が先行するように計画し、基礎梁および接合筋の主筋量を増やし、F-5 よりパイルキャップの高さを低くした。

表-2 にコンクリートの圧縮強度を示す。使用したコンクリートの設計基準強度は柱が Fc36、梁およびパイル

表-1 試験体一覧

試験体	破壊形式	柱断面 (BxDc)	柱配筋	基礎梁断面 (BxBb)	梁配筋	パイルキャップ 高さHpc せいDpc	接合筋	柱軸 力比
F-1	柱曲げ降伏	370 × 370	14-D16 (SD390)	300 × 700	20-D16 (SD390)	0.79Db	32-D13 (SD390)	0.15
F-2	梁曲げ降伏		16-D19 (USD685)				32-D16 (SD490)	
F-3 F-4	接合部破壊	350 × 350		300 × 650	20-D19 (SD390)	0.77Db 0.55Db	32-D13 (SD390)	
F-5	梁降伏	370 × 370	14-D16 (SD490)	300 × 700	20-D16 (SD390)	0.79Db	32-D13 (SD390)	0.1
F-7	接合部破壊	350 × 350	20-D16 (USD685)	300 × 650	20-D19 (SD490)	0.55Db	32-D13 (SD490)	0.2

*1 (株) 安藤・間 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 安藤・間 技術研究所 修士 (工学)

*3 (株) 安藤・間 建築技術部

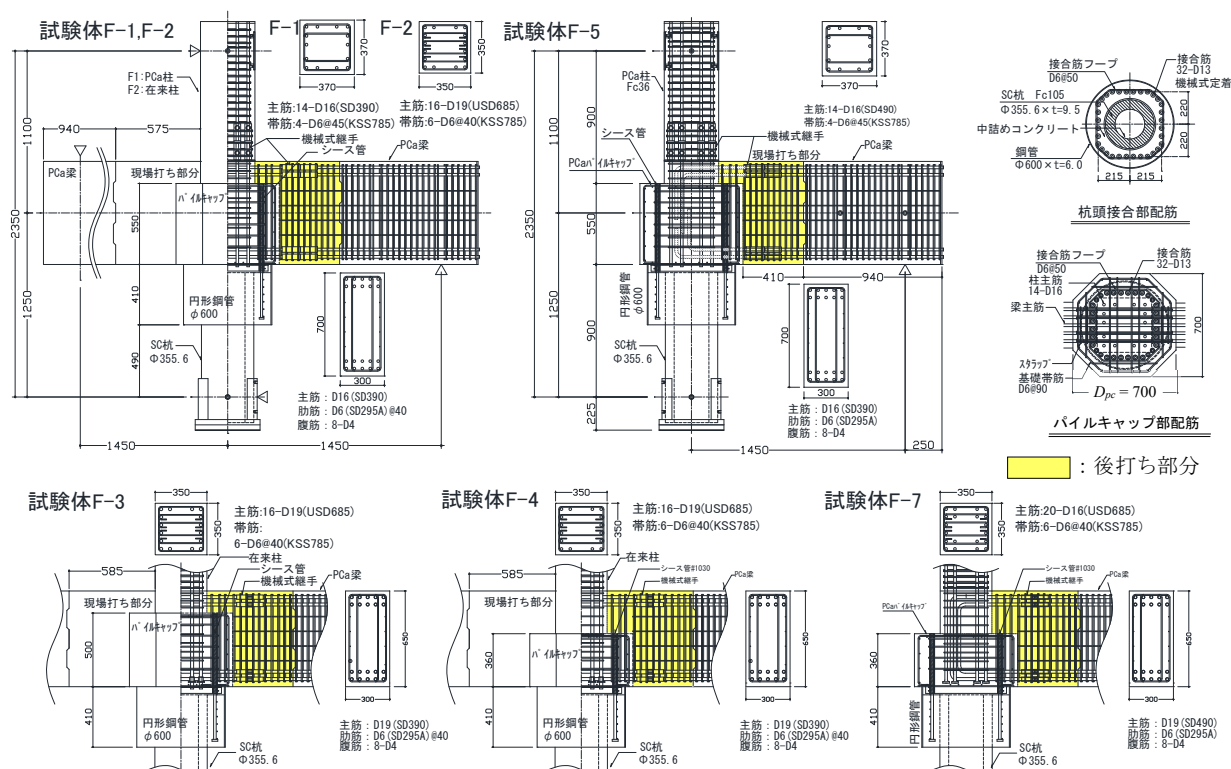


図-2 試験体形状

キャップが Fc27 とした。表-3 に実験で使用した鋼材および鉄筋の材料試験結果を示す。柱主筋は SD390 および USD685, 梁主筋は SD390, 接合筋は SD390 および SD490, 接合鋼管は SM490 とした。

試験体の製作手順は、実際の施工手順に準じて実施した。まず、杭の上部に接合鋼管を設置し、接合筋の配筋を行った。次に、杭体内部の中詰めコンクリートおよび杭と接合鋼管の間の充填コンクリートを杭の端部まで一度に打設した。別途、製作しておいた接合筋が貫通するシース管を内蔵した PCa 部材のパイルキャップを接合鋼管上に載置し、PCa パイルキャップ下部、シース管内にグラウトを充填した。最後に、パイルキャップにプレキャストの基礎梁および柱部材を取り付けた。

加力は図-3 に示すように柱および杭に一定の軸力を作用させた状態で、梁端部に正負交番増繰り繰り返し加力とした。ト字形試験体については、杭と基礎梁が閉じる方向を正側加力とした。計測は、梁端部のジャッキ荷重、杭の反力、各部材の変位および各鉄筋の主要位置でのひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係と破壊性状

写真-1 にひび割れ状況を、図-4 にジャッキ荷重を柱のせん断力に換算した荷重変形関係を示す。図中に併記する柱・梁の曲げ耐力は、柱については梁フェースを、梁の上端は柱フェース、下端はパイルキャップフェースを危険断面として曲げ耐力を算定した。

表-2 コンクリートの材料試験結果

部位	項目	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-7
パイルキャップ	圧縮強度 (N/mm ²)	38.7	39.0	40.6	41.1	41.9	40.7
	ヤング係数 (kN/mm ²)	31.6	31.5	31.8	31.7	31.09	29.8
杭頭部、梁	圧縮強度 (N/mm ²)	43.5	38.4	41.9	39.8	46.0	30.3
	ヤング係数 (kN/mm ²)	32.2	30.9	30.6	31.1	31.9	26.9
梁継手	圧縮強度 (N/mm ²)	33.9	37.1	37.1	37.9	29.2	28.0
	ヤング係数 (kN/mm ²)	29.2	29.3	29.2	29.4	26.2	25.6
P.C. 充填モルタル	圧縮強度 (N/mm ²)	94.1	104.1	105.7	108.0	99.2	99.7
柱間充填モルタル	圧縮強度 (N/mm ²)	87.4	—	—	—	92.0	—

表-3 鋼材の材料試験結果

呼び名	使用部位	規格	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
D16	柱主筋	SD390	185	479	651	18.6
D19		USD685	186	712	901	11.0
S6	帯筋	KSS785	191	1008※	1214	—
D16	梁主筋	SD390	188	456	644	20.2
D19		SD390	187	439	605	20.3
D6	あばら筋	SD295	189	373※	538	20.6
D16	接合筋	SD490	184	522	679	15.8
D13		SD390	177	466	648	16.4
D6	接合筋フープ	SD295	185	345	529	23.5
D6	ハカマ筋	SD295	188	420	542	21.0
t=6	杭頭鋼管	SM490	213	448※	577	27.8
t=9.5	SC杭	STK490	183	447※	538	30.5

※: 0.2% オフセット耐力

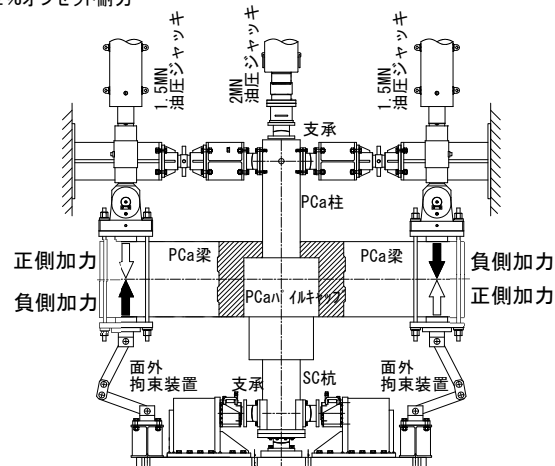


図-3 加力装置概要

試験体 F-1 は層間変形角 $R=7.5\sim15\times10^{-3}\text{rad}$ において柱主筋の引張降伏、パイルキャップ正面にせん断ひび割れ、梁上下主筋の 1 段筋の降伏が発生した。加力を進めると、柱脚の損傷が激しくなるが、パイルキャップに発生したせん断ひび割れは拡幅することなく、パイルキャップの損傷は実験終了時においても軽微であった。最大耐力は $R=20\sim30\times10^{-3}\text{rad}$ で示し、その後エネルギー吸収の大きい紡錘型のループを描きながら緩やかな耐力低下を示した。破壊形式は柱の曲げ破壊である。

試験体 F-2 は $R=7.5\sim15\times10^{-3}\text{rad}$ においてパイルキャップ正面にせん断ひび割れが生じ、接合筋フープおよび梁主筋の 1 段、2 段筋が降伏した。左側梁上端主筋の 1 段筋については遅れて $R=27\times10^{-3}\text{rad}$ で降伏が確認できたが、2 段筋は降伏ひずみに近い値にとどまっていた。最大耐力は $R=15\sim30\times10^{-3}\text{rad}$ で示し、その後パイルキャ

ップのせん断ひび割れが拡幅し、パイルキャップ内の柱帯筋および接合筋フープの降伏が確認されたが、著しい耐力の低下は生じなかった。破壊形式は、負側加力時において引張力が生じる梁主筋のすべてが降伏していることより梁の曲げ降伏とした。

試験体 F-3 は $R=10\sim20\times10^{-3}\text{rad}$ においてパイルキャップのせん断ひび割れの拡幅、柱脚の圧壊が始まり、パイルキャップ上部の柱柱部分の柱基礎梁接合部(以下、接合部)のかぶりコンクリートの剥離・剥落が確認された。パイルキャップ内部の接合筋フープの降伏が始まり、上部ほどひずみが大きくなっている。梁下端主筋の降伏は確認されたが、上端主筋は最終加力においても降伏ひずみには達しなかった。 $R=20\times10^{-3}\text{rad}$ で最大耐力を示し、その後、接合部のかぶりコンクリートの剥落、パイルキャップのせん断ひび割れの拡幅により、穏やかな耐力の

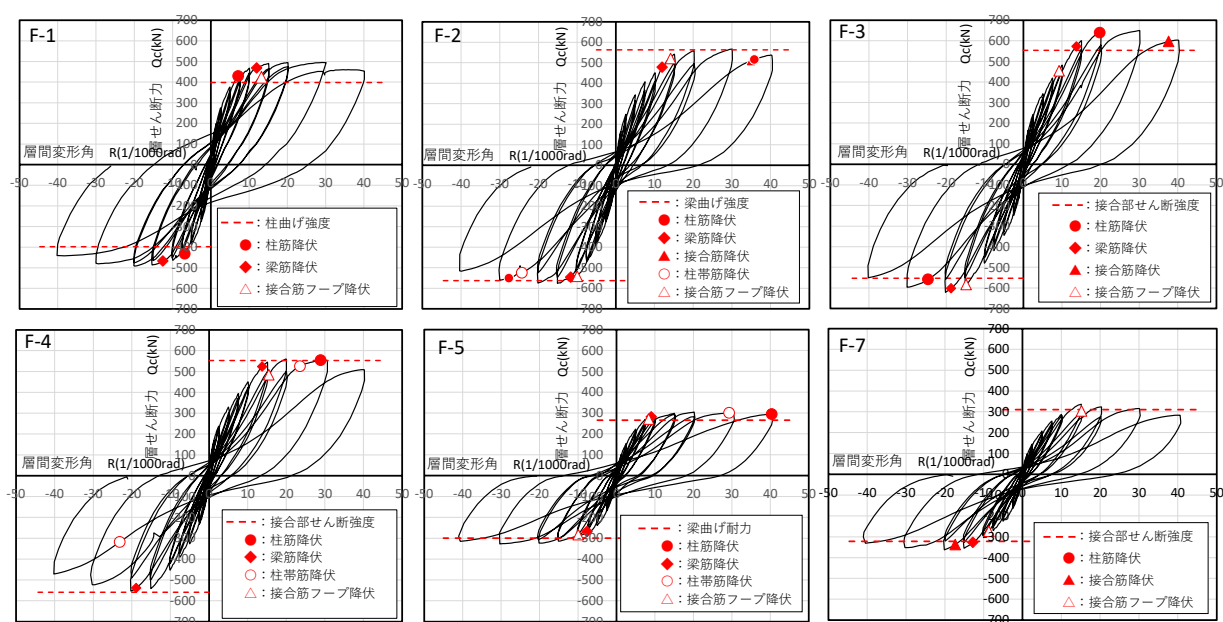


図-4 荷重変形関係

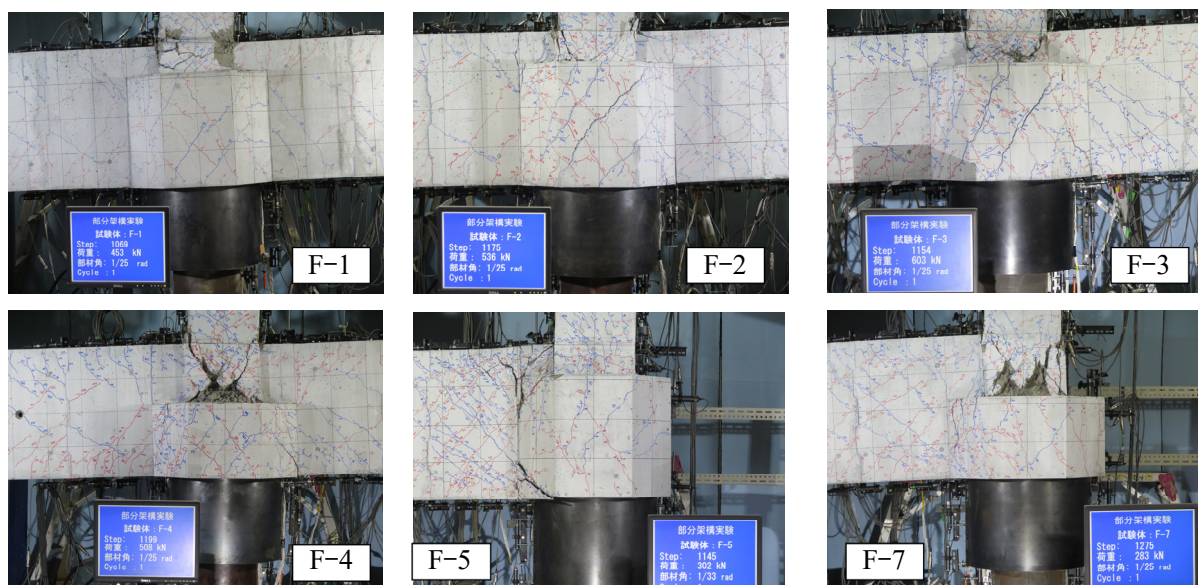


写真-1 ひび割れ状況

低下が生じた。破壊形式はパイルキャップを含む接合部のせん断破壊であった。

試験体 F-4 は $R=10\sim20\times10^{-3}\text{rad}$ においてパイルキャップ正面にせん断ひび割れが確認された。接合部のせん断ひび割れが進展し、かぶりコンクリートの剥離が始まる。梁下端主筋の降伏が確認されたが、上端主筋は最終加力においても降伏ひずみには至らなかった。 $R=20\times10^{-3}\text{rad}$ で最大耐力を示し、パイルキャップ内部の接合筋のフープ筋に降伏が始まった。その後、柱梁接合部のかぶりコンクリートの剥落が進展し、 $R=30\times10^{-3}\text{rad}$ で接合部位置での柱帯筋が降伏し、耐力の低下が生じた。破壊形式は柱梁接合部のせん断破壊であった。なお、F-3 に比べて最大耐力は約 70% と低くなっているが、パイルキャップ部の損傷は F-3 に比べて軽微であった。一方で、柱梁接合部の損傷は F-3 に比べて著しい。

試験体 F-5 は層間変形角 $R=5\sim15\times10^{-3}\text{rad}$ において、柱梁接合部にせん断ひび割れが発生し、梁主筋が降伏し、パイルキャップ正面にせん断ひび割れが観察された。加力を進めても、パイルキャップに発生したせん断ひび割れは拡幅することはないが、梁上端の損傷が進展するとともに、梁とパイルキャップの接合面で滑り量が増加し、パイルキャップ上部の接合筋のフープ筋が降伏した。

最大耐力は層間変形角 $R=-20\sim30\times10^{-3}\text{rad}$ で示したが、実験終了時においても耐力の顕著な低下は生じなかった。パイルキャップの梁との接合面で、コンクリートの剥落を伴う損傷が生じたが、せん断ひび割れの拡幅などは観察されなかったため、パイルキャップ自体の耐力への影響は限定的である。したがって、破壊形式は梁の曲げ破壊と判断した。

試験体 F-7 は層間変形角 $R=5\sim10\times10^{-3}\text{rad}$ において、柱梁接合部にせん断ひび割れが発生し、梁主筋が降伏し、パイルキャップ正面にせん断ひび割れが観察された。梁主筋の降伏は下端筋で生じたが、上端筋は実験終了時においても降伏ひずみには達しなかった。 $R=15\sim20\times10^{-3}\text{rad}$ サイクルで接合部のかぶりコンクリートの剥離、剥落、柱脚の圧壊が始まる。正側加力時には接合部分の帯筋は

ほぼ降伏ひずみに達したが、負側加力時には接合部位置でのひずみは小さく、パイルキャップ下部の帯筋ひずみは 3000μ 程度であった。加力方向により柱帯筋のひずみ分布が異なっている。加力が進むにつれて、接合部の損傷、パイルキャップ側面のひび割れの拡幅が著しくなる。

最大耐力は $R=15, -20\times10^{-3}\text{rad}$ で示し、正側は負側に比べて耐力低下の度合いが大きい。が、 $R=40\times10^{-3}\text{rad}$ においても最大荷重の約 85% の荷重は保持していた。破壊形式は柱梁接合部のせん断破壊であった。

3.2 ひずみ分布

(1) 柱帯筋のひずみ分布

図 5 に十字形試験体では正側加力時の柱帯筋のひずみ値を、ト字形試験体では正負加力時の柱帯筋のひずみ値の高さ方向の分布を示す。図中には破線で降伏ひずみを示し、各ひずみ値は各部材角で 2 サイクル載荷のうち、初期のサイクルのときのひずみ値を示す。帯筋には 785N/mm^2 級の高強度せん断補強筋を使用しているため、降伏ひずみは 5500μ となっている。

十字形試験体についてみると、パイルキャップ中央部から接合部のひずみが大きくなっている。ト字形試験体では加力方向によりひずみ分布が異なっており、軸力が増加する正側加力では上部が、軸力が減少する負側加力では下部でひずみ値が大きくなっている。これは引張となる鉄筋の折曲げ部の位置が加力方向により入れ替わるため、コンクリートストラットの圧縮力を受ける折り曲げ部近くでひずみ値が大きくなっている。基礎梁区間の柱帯筋についても、柱梁接合部およびパイルキャップのせん断抵抗要素として寄与していると言える。

(2) 接合筋のフープ筋ひずみ分布

図 6 に接合筋のフープ筋のひずみ分布を示す。十字形試験体では正側加力時のフープ筋のひずみ値を、ト字形試験体では正負加力の時の帯筋のひずみ値の高さ方向の分布を示す。図中には破線で降伏ひずみを示し、各ひずみ値は各部材角で 2 サイクル載荷のうち、初期のサイクルのときのひずみ値を示す。全ての試験体でパイルキャップ部に位置するフープ筋は、 $R=15\times10^{-3}\text{rad}$ あたりで降

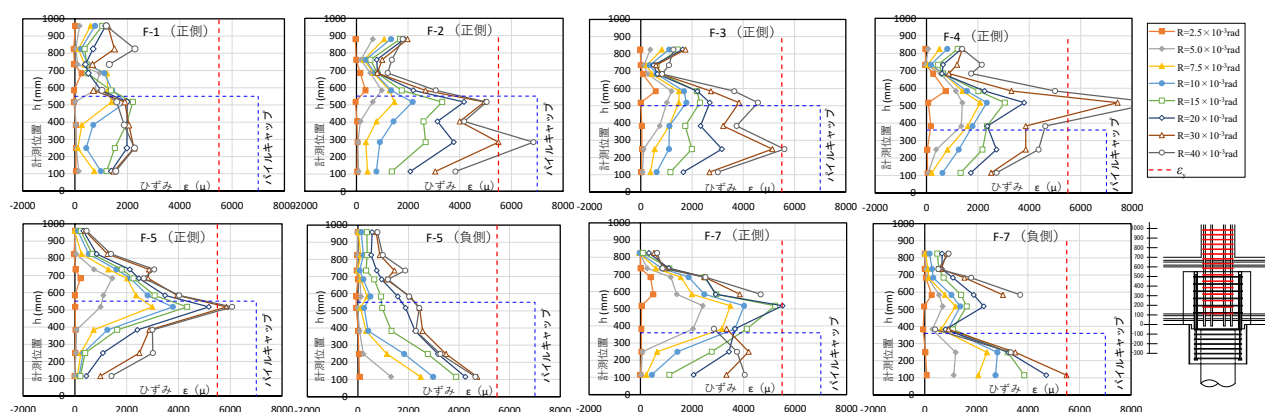
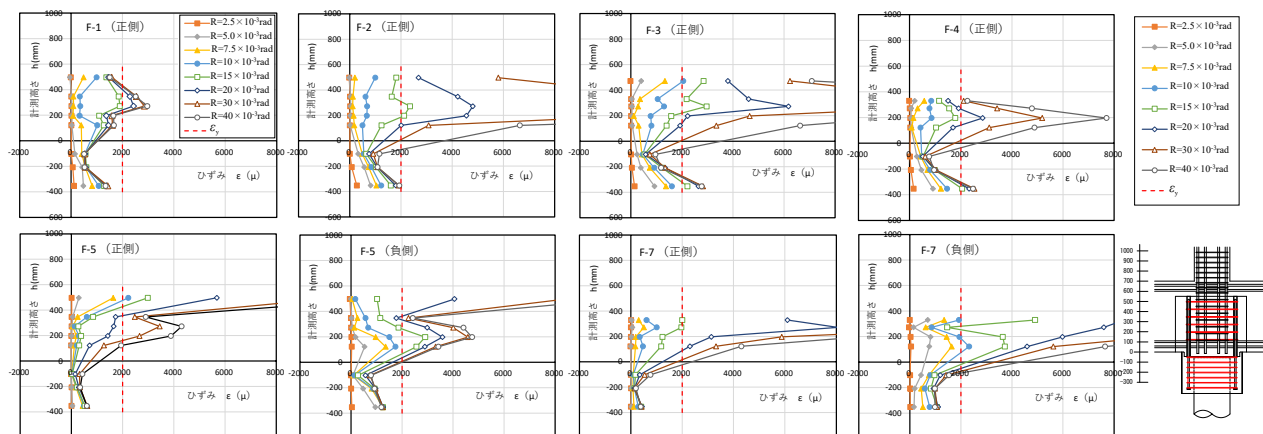


図 5 柱帯筋のひずみ分布



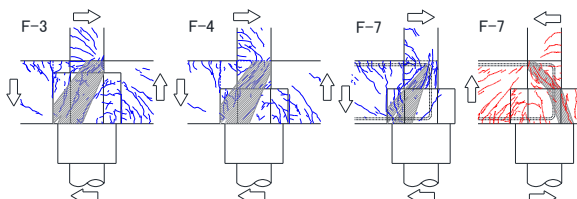
図－6 接合筋のフープ筋ひずみ分布

伏ひずみに達している。接合鋼管内のひずみ値は、杭に作用するせん断力の大きい十字形試験体では降伏しているが、作用せん断力が十字形に比べて小さいト字形試験体では降伏ひずみに達していない。十字形試験体はパイルキャップの上部ほど値が大きい傾向を示している。ト字形試験体では加力方向によりひずみ分布が異なっている。塑性化に伴う残留ひずみの影響により、パイルキャップ上部のひずみが大きくなる傾向がみられる。しかし、残留ひずみの少ない $R=15 \times 10^{-6} \text{rad}$ までに着目すると軸力が増加する正側加力では上部が、軸力が減少する負側加力では下部から 200mm 程度の位置でひずみ値が大きくなっている。これは引張となる鉄筋の折曲げ部の位置が加力方向により入れ替わるため、コンクリートストラットの圧縮力を受ける折り曲げ部近くでひずみ値が大きくなっている。接合筋のフープ筋についてもパイルキャップのせん断抵抗要素として寄与していると言える。

4. パイルキャップのせん断強度

4.1 せん断強度算定式

鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説（以下、靱性指針）では、接合部の主たるせん断抵抗機構をコンクリートストラット作用によるものと考えており、本構法では接合部下部に柱断面より大きなパイルキャップが存在するため、この部分でもコンクリートストラットが形成されるものと推測できる⁵⁾。文献6)では、パイルキャップを含む基礎梁一杭一柱の部分架構実験の非線形 FEM の結果から応力伝達機構の模式図が示されている。解析に使用された試験体のパイルキャップ内の配筋は本構法と同様であるため、本構法にお



図－7 圧縮ストラットの模式図

いても同様な応力伝達機構が形成されるものと考えられる。

図－7に本構法に置き換えたコンクリートストラットを、接合部がせん断破壊した試験体のひび割れ状況と重ね合わせた図を示す。ひび割れ図は最大耐力時の $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時を表す。接合部、パイルキャップに発生したせん断ひび割れは想定したコンクリートストラットの角度と等しくなっており、仮定した応力伝達機構は実験結果と一致していると考えられる。

せん断破壊した試験体 F-3, F-4, F-7 について前述の写真－1に示す各試験体の損傷状況を確認すると、パイルキャップの損傷よりもパイルキャップ上部の接合部の損傷の方が激しく、パイルキャップはおおむね軽微な損傷に収まっている。このような破壊状況を鑑み、次式の既往の柱梁接合部のせん断強度式を基にパイルキャップの高さを考慮した次式で評価を行う⁵⁾。

$$V_{ju} = \alpha_j \cdot \kappa \cdot \varphi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j \quad (1)$$

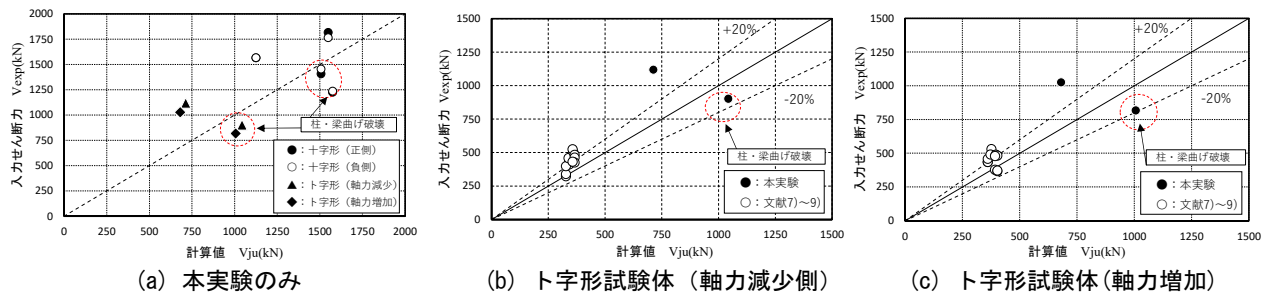
$$\alpha_j = H_{pc} / 0.77D_b \leq 1.0 \quad (2)$$

$$F_j = 0.8 \times \sigma_B^{0.7} \quad (3)$$

$$D_j = D_c' + D_{ai} \quad (4)$$

$$b_j = b_b + b_{a1} + b_{a2} \quad (5)$$

ここに、 α_j ：基礎梁せいの $0.77D_b$ を基準としたパイルキャップの高さの影響を考慮した低減係数、 H_{pc} はパイルキャップ高さ(mm)、 κ ：接合部の形状による係数、 φ ：直交梁の有無による補正係数、 D_b は基礎梁せい(mm)、 D_c' は柱せいまたは 90 度折り曲げ筋水平投影長さ(mm)、 D_{a1} は柱面からパイルキャップ端部までの距離(mm)、 D_{a2} は柱面から接合鋼管端部までの距離(mm)、 b_b は梁幅、 b_{a1} は $b_{ai} / 2$ または $D_c / 4$ の小さい方とする。 b_{ai} は梁両側面からこれに平行する柱側面までの長さ、 D_c は柱せいである。接合部の有効せいは圧縮ストラットの水平投影長さを用いているため、接合部のせん断強度の算定に用いる有効せい D_j はパイルキャップのせいを考慮して、柱せい D_c' に柱面からパイルキャップ端部までの距離 D_{a1} を加えた値とした。接合部有効断面積を求める際の有効幅 b_j につ



図－8 実験値と計算値の比較

表－4 実験値と計算値の比較

試験体	加力方向	破壊形式	軸力応力度 (N/mm ²)	入力せん断力 Vexp(kN)	計算値 Vju(kN)	$\frac{V_{exp}}{V_{ju}}$
十字形	F-1 正側	柱降伏	2.11	1225	1575	0.78
	F-1 負側			-1235		0.78
	F-2 正側	梁降伏	1.66	1408	1508	0.93
	F-2 負側			-1455		0.97
	F-3 正側	接合部 せん断破壊	1.82	1816	1549	1.17
	F-3 負側			-1765		1.14
	F-4 正側			1566		1.39
	F-4 負側			-1568		1.39
ト字形	F-5 正側	梁降伏	2.64	818	1007	0.81
	F-7 軸力増加	接合部せん断破壊	3.03	1026	681	1.51
	F-5 負側	梁降伏	0.22	-903	1044	0.86
	F-7 軸力減少	接合部せん断破壊	0.38	-1120	714	1.57

いては、パイルキャップ部分と接合部で大きく異なるが、大きく損傷した部位が接合部であるため靱性指針を準拠し、梁の左右の側面に協力幅を設定し、これに梁幅を加えた値とした。

4.2 実験値との比較

表－4、図－8に実験値と計算値の比較を示す。図中には文献7)～9)の結果も併記する。なお、入力せん断力 V_{exp} は、ジャッキ荷重を用いて梁の危険断面位置における応力を算出し、得られた応力から柱の層せん断力を減算することで求めた⁵⁾。

式(1)による既往の実験を含めたト字形試験体の計算値の余裕度(実験値/計算値)の平均は柱－基礎梁が閉じる方向(軸力増加)で1.29、柱－基礎梁が開く方向(軸力減少)で1.29となった。十字形試験体を含めた全試験体の計算値と実験値の比較では、余裕度は1.04～1.57の精度で評価できている。なお、余裕度の計算に用いる実験値は、最大耐力後の反対側の加力において明確な耐力低下が生じた試験体は、最大耐力を記録した側の値を用いた。本実験のみのパイルキャップを含む接合部がせん断破壊した十字形を含む試験体の平均値は1.36と安全側の評価となった。

5. まとめ

既製杭と上部構造との接合方法の合理化を目的として円形鋼管を用いた接合構法を提案した。開発にあたり杭頭接合構法の構造性能および耐力評価方法を検討するために中柱および外柱部分を模擬した部分架構実験を実施した。

実験結果および検討結果から、以下の知見を得た。

- 1) 基礎梁区間の柱帯筋および接合筋のフープ筋のひずみ分布から柱梁接合部およびパイルキャップのせん

断抵抗要素として寄与していると言える。

- 2) パイルキャップの高さが高い試験体の方が大きな耐力を示した。今回の実験の範囲ではパイルキャップの高さがパイルキャップのせん断強度に影響を与えることが明らかになった。このため、パイルキャップを含めた接合部のせん断強度算定において、パイルキャップの高さの影響を評価する低減係数を提案し、せん断強度を精度よく評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 磯田和彦ほか：ダイヤフラムを有する杭頭接合構造の開発その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，構造，pp.441-442，2005
- 2) 福原武史，三橋幸作，高山秀俊，南谷知輝：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.721-726，2022
- 3) 伊坂隆則ほか：円形鋼管を用いた杭頭接合部の構造性能（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.477-478，2023
- 4) 松浦恒久，松本大亮，西正晃：円形鋼管を用いた杭頭接合部の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.2，pp.427-432，2024
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- 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，2017
- 7) 松本玄徳ほか：軸力を受けるト形部分架構におけるパイルキャップの耐震性能，日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.445-446，2010.9
- 8) 大和久貴義ほか：ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に関する実験研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.697-698，2013.9
- 9) 小原拓，岸田慎司ほか：ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に関する実験研究（その4），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.645-646，2014.9