

論文 CFT を埋込接合した杭頭半剛接合部の終局耐力に関する実験的研究

福原 武史*1・南谷 知輝*2・井戸 裕 勇樹*1・鈴木 啓祐*3

要旨：場所打ちコンクリート杭と基礎に杭より断面の小さいCFTを埋め込んで接合するとともに、杭と基礎の間にCFT部を設けることで杭頭固定度の低減を図る杭頭半剛接合工法に関し、特にCFT部材を杭に埋め込んだ接合部の耐力の把握を目的とし、軸力の有無及び杭種（場所打ちコンクリート杭および鋼管コンクリート杭）を実験変数に3体の構造実験を実施し構造性能を把握した。次いで、埋込柱脚の応力伝達機構を参考にしたCFTフランジ面の支圧抵抗に加えて、CFT端部の支圧抵抗、CFTフランジ面の摩擦抵抗およびCFT鋼管周囲の付着を考慮した終局耐力の評価法を提案し、精度よく評価できることを確認した。

キーワード：CFT, 場所打ち鉄筋コンクリート杭, 場所打ち鋼管コンクリート杭, 杭頭半剛接合, 混合構造

1. はじめに

杭頭半剛接合工法は杭全断面に対する杭頭の剛性（固定度）を低くすることで杭頭応力の軽減等が期待できる技術で、これまで種々の工法^{例え}が開発されている。本報の対象は、場所打ちコンクリート杭と基礎に杭より断面の小さいCFTを埋め込んで接合するとともに、杭と基礎の間にCFT部を設けることで杭頭固定度の低減を図る工法である（図-1）。これにより、杭頭部の応力の低減や傾斜地盤での短い杭への応力集中の緩和による合理的な設計が可能となる。また、CFT部が先行して降伏するように設計することで、高い変形性能を活かした冗長性のある設計にもつながる。また、逆打ち工法では構真柱を本設として兼用することが可能である。

著者らは既往の研究において、CFTの曲げ降伏先行²⁾、杭体の曲げ・せん断降伏³⁾および高圧縮軸力、引張軸力の変動軸力下における本工法の構造性能⁴⁾を実験により明らかとしてきた。しかしながら、実用的な形状を模擬した鋼管断面や長期荷重支持用に配置したスタッドの影響でいずれも杭側のCFT埋込部の接合部破壊は確認できなかった。このため、本報ではCFT埋込部の接合部耐力の把握を目的として実施した構造実験を実施した。

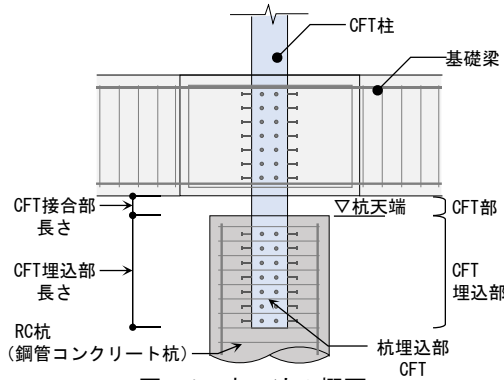


図-1 本工法の概要

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体形状を図-2に示す。試験体は杭頭部を上下反転した形状で、実大の約1/4スケールを想定し、フーチングを模したスタブと場所打ち鉄筋コンクリート杭（以下、RC杭）又は場所打ち鋼管コンクリート杭（以下、鋼管コンクリート杭）にCFT部材を埋め込んで接合し、杭とスタブの間にはCFT部を設けた。なお、CFT部材埋込部長さは埋込部の接合部破壊が生じやすいように、埋め込み長さは埋込み柱脚などに比べて短く設定した。試験体3-A-1および3-A-2は形状・配筋が同一のRC杭とし、軸力の有無を実験変数とした。試験体5-A-1は実験変数を杭種とし鋼管コンクリート杭とした。いずれの試験体も杭径は550mmで共通である。RC杭の配筋は主筋24-D13、帯筋はCFT埋込部でD4@40としたが、直上のRC部はせん断破壊防止のためD6@60とした。SC杭の鋼管はRC杭の鋼材量（鉄筋量）と同程度の板厚2.3mmとした。CFT部材は250mm角で共通としたが、

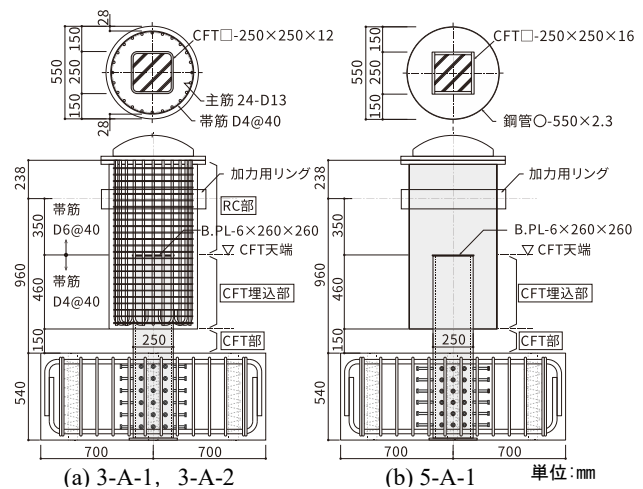


図-2 試験体概要

*1 竹中工務店 技術研究所 博士（工学）（正会員）

*2 竹中工務店 名古屋支店設計部

*3 竹中工務店 東京本店設計部

試験体 5-A-1 は CFT の降伏を避けるため板厚を 16mm かつ高強度材を用いた。また、CFT 埋込部にてこ作用による接合部破壊を生じやすくするため、さらに接合部の応力伝達機構の複雑化を避けるため本実験では CFT には図-1 中に示される頭付きスタッドを設けていない。

表-1 にはコンクリートの材料試験結果を、表-2 には鉄筋、表-3 には鋼板の機械的性質を示す。

2.2 加力・計測計画

加力装置図および加力サイクルを図-3 に示す。水平力は加力用リングを介して試験体の正面および裏面の両側に取付けた 2 本のジャッキにより正負交番載加とした。鉛直荷重は試験体 3-A-1 および 5-A-1 では 480kN(杭の断面に対してそれぞれ軸力比は 0.067 および 0.065)で一定とし、試験体の直上の回転支承に接続した鉛直ジャッキにより作用させた。試験体 3-A-2 は軸力 0 とした。以降の検討で示す変形角 R は水平力作用位置での水平変位をスタブ上面からの高さ (960mm) で除して算定した。

3. 実験結果

3.1 水平荷重-変形角関係

図-4 には実験で得られた水平荷重-変形角関係を、表-4 には各試験体の最大耐力 $expQ_{max}$ および各部材耐力の計算値を示す。また、各部材耐力の算定の詳細も表中に示した。なお、危険断面位置は CFT 天端高さ (図-2 参照) と仮定した。図-4 中には最小の計算値となった部材 $pileQ_{su}$ を破線で示している。いずれも実験の耐力は部材の計算耐力以下であり、実験結果は CFT 埋込部の

表-4 最大耐力および各部材の計算耐力

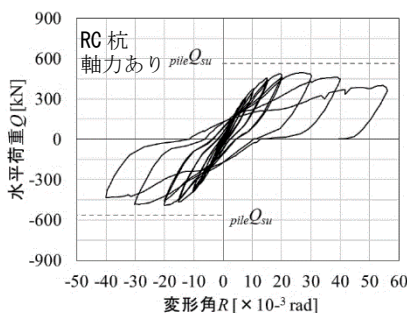
試験体	$expQ_{max}$ [kN]	$pileQ_{mu}$ [kN]	$pileQ_{su}$ [kN]	$CFTQ_{mu}$ [kN]
3-A-1	495 / -491	1,096	565	648
3-A-2	317 / -305	938	532	628
5-A-1	503 / -494	906	812	1,138

$expQ_{max}$: 最大耐力 (実験値)

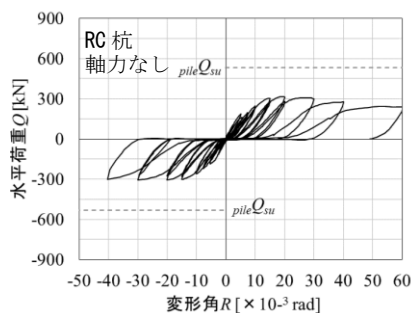
$pileQ_{mu}$: 杭の曲げ耐力時せん断力で曲げ耐力は文献 5) に倣い平面保持を仮定した断面解析 (e 関数法を使用) で算定

$pileQ_{su}$: 杭のせん断終局耐力で文献 5) より算定 (RC 杭は等価長方形断面に置換, 鋼管コンクリート杭は鋼管とコンクリート部がせん断力を負担すると算定)

$CFTQ_{mu}$: CFT 部材の曲げ耐力⁹⁾時せん断力



(a) 3-A-1



(b) 3-A-2

図-4 水平荷重-変形角関係

外側の RC 部や CFT 部の破壊ではなく CFT 埋込部での接合部破壊に至ったと考えられる。

RC 杭では、軸力を作用させた試験体 3-A-1 の最大耐

表-1 材料試験結果 (コンクリート)

試験体	打設箇所	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
3-A-1	杭	30.1	26600	2.20
	CFT・スタブ	82.6	35800	3.59
3-A-2	杭	30.8	25700	2.38
	CFT・スタブ	84.1	36300	3.57
5-A-1	杭	27.4	26600	2.16
	CFT	84.7	40800	3.35
	スタブ	29.9	27700	2.19

表-2 材料試験結果 (鉄筋)

試験体	径	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
3-A-1	D4 (帯筋)	182000	366 ^{**}	524
	D6 (帯筋)	178000	394 ^{**}	577
3-A-2	D13 (主筋)	181000	518 ^{**}	725

※0.2%オフセット耐力

表-3 材料試験結果 (鋼板)

試験体	板厚	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
3-A-1	t6 (CFT B.PL)	413	549
	t12 (CFT 鋼管)	523 ^{**}	591
5-A-1	t6 (CFT B.PL)	413	579
	t16 (CFT 鋼管)	784 ^{**}	830
	t2.3 (杭鋼管)	247 ^{**}	354

※0.2%オフセット耐力

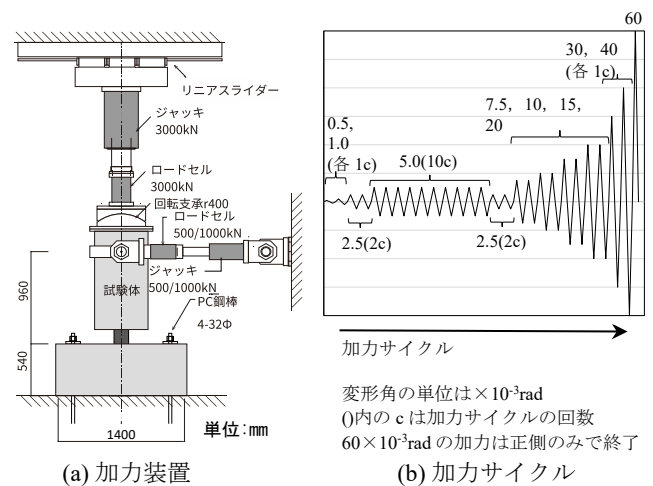
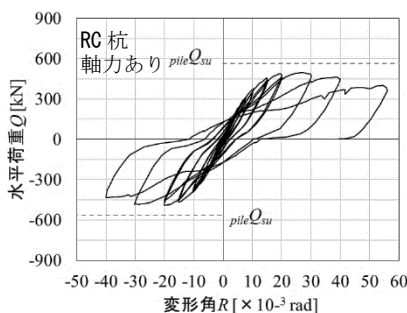
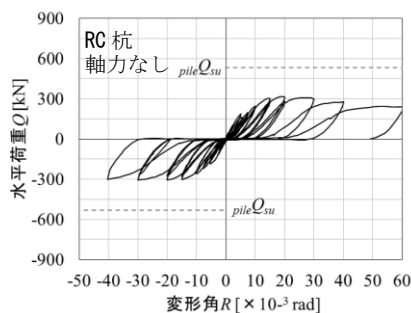


図-3 加力装置および加力プログラム

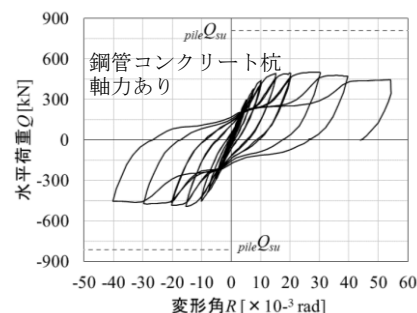


(a) 3-A-1



(b) 3-A-2

図-4 水平荷重-変形角関係



(c) 5-A-1

力が軸力を 0 とした試験体 3-A-2 よりも 178kN(正側)大きくなり、軸力による耐力の上昇が確認された。この軸力載荷による耐力上昇は CFT 天端(図-2 参照)に作用する軸力によって生じる支圧抵抗などによるものと考えられる。鉄筋の代わりに鋼管を用いた鋼管コンクリート杭の試験体 5-A-1 の最大耐力は 503kN であり、RC 杭の試験体 3-A-1 と同程度の耐力を発揮した。

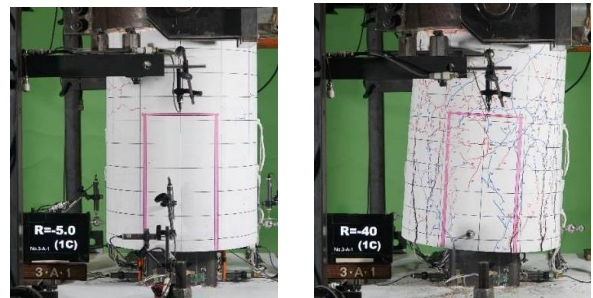
3.2 試験体状況

写真-1 は各試験体の変形角 $R=5.0$ および 40×10^{-3} rad 時の損傷状況を示す。軸力を作用させた RC 杭の試験体 3-A-1 では $R=7.5 \times 10^{-3}$ rad のサイクル、軸力 0 の試験体 3-A-2 では $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad のサイクルにおいて CFT 埋込部の杭側面に縦方向のひび割れが発生した。これは内部の CFT 部材から支圧力によって外側に押されることで生じたものと考えられ、変形角の進行とともにひび割れの本数および幅が拡大し、最終的に耐力低下が確認された。鋼管コンクリート杭の試験体 5-A-1 では $R=15 \times 10^{-3}$ rad のサイクルから杭の鋼管の局所的なふくらみが CFT 埋込部に目視で確認され、変形角の進行とともに変形が顕著となった。また、写真-1 より、 $R=40 \times 10^{-3}$ rad の大変形時には CFT 埋込部の損傷を伴いながら杭体が埋め込み部を中心に回転する様子が観察されており、CFT 埋込部の降伏または破壊で耐力が決定したと考えられる。

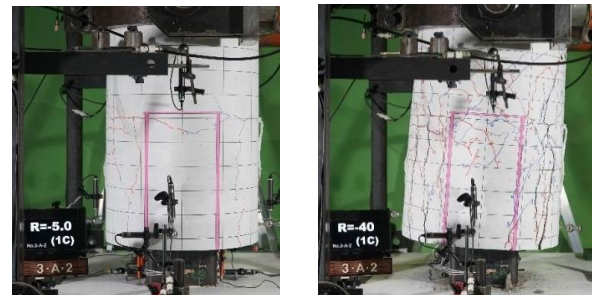
3.3 鉄筋のひずみ状況

図-5(a)および図(b)には加力直交側で計測したひずみ計測位置および $R=20 \times 10^{-3}$ rad の帯筋のひずみ分布を示す。帯筋のひずみは杭埋込部 CFT (図-1 参照) の加力点側(H3-B)に近い最も大きく、加力点側の CFT フランジから杭のコンクリートに大きな圧縮力が加わっていることがわかる。この力は主に杭天端側の杭体による CFT 部材への加力方向と逆方向の支圧力を反力としたテコ作用と、杭埋込部 CFT に直接加わるせん断力により応力伝達がなされていたと考えられる。同図(c)には加力点の CFT フランジから支圧力を受ける側の帯筋のひずみ

状況を示しており、最大耐力を確認した $R=20 \times 10^{-3}$ rad のサイクルにおいて帯筋が降伏ひずみに達している。これはコンクリートにかかる支圧力を帯筋が抵抗していたためと考えられる。また図-6 には試験体 3-A-2 の $R=+20 \times 10^{-3}$ rad における杭主筋の曲げ引張側の主筋のひずみ状況を示す。特に杭側面のひび割れが顕著な $450 \sim 650$ mm の計測位置の主筋においてひずみが大きくかつひずみの内外差も大きくなっていることから、主筋もコ



(a) 3-A-1 (左: $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad 時, 右: 40×10^{-3} rad 時)

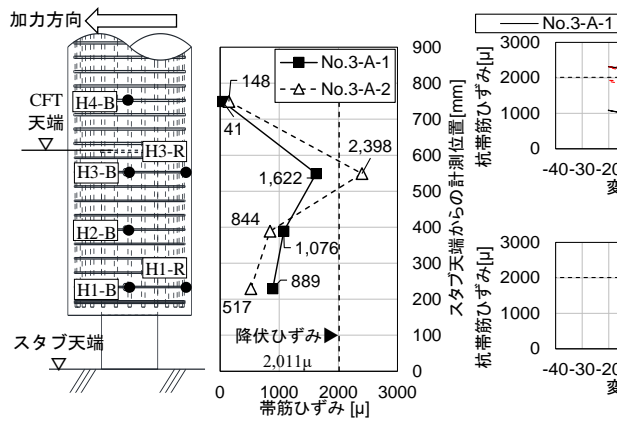


(b) 3-A-2 (左: $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad 時, 右: 40×10^{-3} rad 時)



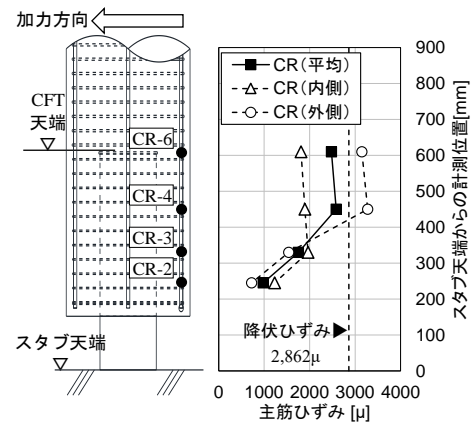
(c) 5-A-1 (左: $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad 時, 右: 40×10^{-3} rad 時)

写真-1 試験体状況



(a) ひずみ計測位置 (b) 帯筋ひずみ分布 ($R=20 \times 10^{-3}$ rad, H1~3-B 位置) (c) 帯筋ひずみ(H1-R, H3-R)

図-5 帯筋のひずみ状況



(a) 計測位置 (b) 主筋ひずみ分布 ($R=+20 \times 10^{-3}$ rad)

図-6 主筋のひずみ状況

ンクリートに加わる支圧力に抵抗していたと考えられる。

4. CFT 埋込部の終局耐力の評価

4.1 耐力の評価方法

本章では、図-7 に示す応力伝達機構を想定し、その累加として終局耐力の評価を検討する。

(1) CFT 鋼管フランジ面の支圧抵抗による耐力

前章で示した実験の損傷およびひずみ状況より、本実験の応力伝達機構は主に杭から CFT への曲げ応力伝達によって杭が回転することで生ずる CFT 埋込部の CFT フランジ面のコンクリートの支圧力による作用であると考えられる。これは、文献7)の埋込柱脚の応力伝達機構に類似している(ただし、本工法は加力点に近い杭側に埋め込まれている点が異なる)。同文献を参考に図-7 (a)に示す支圧力を仮定すれば、CFT 鋼管フランジ面の支圧抵抗による杭天端位置(図-1 参照)の CFT せん断力 ${}_jQ_{mu1}$ はこ作用で生ずる CFT 埋込部の CFT フランジ面の支圧力 P_{u1} および P_{u2} により式(1)で表現できる。また、モーメントのつり合い条件に加えて杭が剛体的に回転して杭から CFT フランジ面の支圧応力度が三角形分布になると仮定すると、 P_{u2} は式(2)で CFT 埋込部の支圧分布の長さ x_1 、 x_2 は式(3)および式(4)で表される。

$${}_jQ_{mu1} = P_{u1} - P_{u2} \quad (1)$$

ここで、

$$P_{u2} = P_{u1} / (x_1^2 / x_2^2) \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{3 \cdot L - 3 \cdot l_{cft} - l_{src}}{2 \cdot L - 2 \cdot l_{cft} - l_{src}} \cdot \frac{l_{src}}{3} \quad (3)$$

$$x_2 = l_{src} - x_1 \quad (4)$$

P_{u1} 、 P_{u2} ：それぞれこ作用で生ずる CFT 埋込部の CFT フランジ面の支圧力。 P_{u1} は加力点側。 P_{u2} は杭天端側で式(2)にて表される。

x_1 、 x_2 ：それぞれ CFT 埋込部の支圧分布の長さ。 x_1 は加力点側で式(3)、 x_2 は杭天端側で式(4)による。

L 、 l_{cft} 、 l_{src} ：それぞれスタブから加力点までの長さ、スタブから杭天端までの CFT 単体の長さおよび CFT 埋込部長さ

実験より杭埋込部では CFT フランジ面の支圧力による損傷が確認されていることから、CFT 鋼管フランジ面の支圧抵抗による耐力は、 P_{u1} に支圧抵抗耐力 P_{su1} を代入して計算する。支圧抵抗要素は RC 杭においては帯筋と考えると CFT 部材支圧面から 45 度方向のコンクリートのコーン上のひび割れを仮定し、その範囲(高さ)に含まれる帯筋より式(5)で算定できる。また、鋼管コンクリート杭の抵抗要素は降伏線理論から提案されたノンダイアフラム円形鋼管の面外降伏耐力⁸⁾を参考に、フランジ引張力を鋼管内側からの支圧力に置き換えた式(6)で算定できる。なお、同様の考え方は、類似する抵抗機

構の文献9でも用いられている。

$$P_{su1} = 2 \cdot \Sigma A_{w1} \cdot w \cdot \sigma_y \quad (5)$$

$$P_{su1} = \frac{t_{sp} \cdot {}_{sp}\sigma_y}{\sqrt{1 + \cos^2 {}_{sp}\theta}} \cdot (X_p + 2 \cdot l_{sp1}) + \frac{2 \cdot D_p \cdot {}_{sp}\theta \cdot m_p}{X_p} \quad (6)$$

ここで、

ΣA_{w1} ：コーン状破壊範囲を通過する杭帯筋の断面積の合計(図-8 (a)参照)

$w \sigma_y$ ：杭帯筋の降伏強度

$$X_p = \sqrt{\frac{2 \cdot D_p \cdot {}_{sp}\theta \cdot m_p \cdot \sqrt{1 + 2 \cos^2 {}_{sp}\theta}}{t_{sp} \cdot {}_{sp}\sigma_y}} \quad (7)$$

$$m_p = \frac{t_{sp}^2 \cdot {}_{sp}\sigma_y}{4}, \quad {}_{sp}\theta = \sin^{-1} \frac{B_{cft} + 2 \cdot dp}{D_p} \quad (8)$$

$$l_{sp1} = x_1 + 2 \cdot dp \quad (9)$$

t_{sp} 、 ${}_{sp}\sigma_y$ ：それぞれ杭鋼管の板厚および降伏強度

D_p ：杭径、 X_p ：降伏線高さ、 B_{cft} ：CFT 断面幅

${}_{sp}\theta$ ：CFT 鋼管中心と杭鋼管支圧幅端を結ぶ直線と

CFT 鋼管中心と支圧幅中央を結ぶ2直線の角度

m_p ：杭鋼管の単位長さ当たりの板材の全塑性モーメント

l_{sp1} ：コーン状破壊に有効な杭鋼管の杭材軸方向せん断有効長さ(図-8(b)参照)

(2) CFT 鋼管フランジ面支圧部の摩擦抵抗による耐力

前述した(1)の抵抗機構で生ずる支圧力により CFT フランジ面では図-7 (b)に示すような摩擦による応力伝達も生ずる。ここでは類似する抵抗機構である文献9を参考に、支圧力に摩擦係数および CFT せいを乗じた摩擦による抵抗モーメントを算定する。これを CFT 埋込部の高さの中央を中心としたモーメントと考えると、摩擦抵抗耐力分の杭天端の CFT せん断力 ${}_jQ_{mu2}$ は式(10)で表される。なお、支圧力は計算値が小さくなる P_{u2} を式(10)から算定して用いる。

$${}_jQ_{mu2} = {}_j\mu \cdot P_{u2} \cdot D_{cft} / \{L - (l_{cft} + l_{src} / 2)\} \quad (10)$$

ここで、

${}_j\mu$ ：CFT 鋼管フランジ面とコンクリート間の見かけ

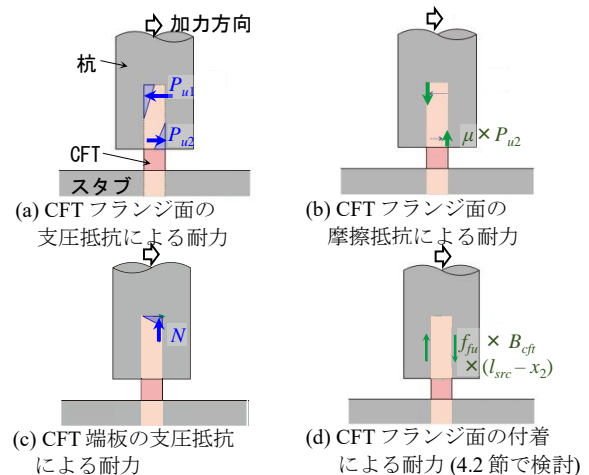


図-7 想定した CFT 埋込部の応力伝達

上の摩擦係数で文献9を参考に0.6とする

D_{cft} : CFT 鋼管の断面せい

(3) CFT 端板支圧 (軸力) 抵抗による耐力

実験では軸力による耐力上昇が確認された。軸力の耐力寄与は図-7 (c)に示す応力伝達を考えると、CFT 鋼管端板に作用する支圧力 N_b に偏心距離 e を乗ずることにより定まる CFT 鋼管端板(B.PL)位置での偏心モーメントから計算され、本試験体では加力点から端板位置までの距離で除すことで軸力による杭天端の CFT せん断力 jQ_{mu3} が式(11)で表される。偏心距離 e は、支圧面の応力度分布を台形分布または三角形分布と定め、最大応力度 σ_{max} が杭体の支圧強度 f_b となる場合の応力中心位置と CFT 芯の距離として定める。ただし、支圧強度 f_b はコンクリート圧縮強度 σ_B の2倍を上限¹⁰⁾とする。また、支圧面積は文献11を参考に杭断面積とした。

$$jQ_{mu3} = e \cdot N / \{L - (l_{src} + l_{cft})\} \quad (11)$$

ここで、

$$e/D_{BPL} = \begin{cases} (\alpha-1)/6 & \dots (\alpha \leq 2 \text{ の場合}) \\ 1/2 - 2/(3 \cdot \alpha) & \dots (\alpha > 2 \text{ の場合}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha = \sigma_B \cdot \sqrt{A_c/A_1} / (N/A_1) \quad (\text{ただし、}\sqrt{A_c/A_1} \leq 2) \quad (13)$$

N : 作用軸力, D_{BPL} : CFT の B.PL のせい, A_c : 支圧面積でここでは杭断面積¹⁰⁾, A_1 : 支圧面積でここでは CFT の B.PL の面積

4.2 終局耐力の評価

表-5 には前節の(1)~(3)で計算した各耐力の計算値(せん断力で表現, $jQ_{mu1} \sim jQ_{mu3}$)を示す。まず、CFT 鋼管フランジ面の支圧抵抗による耐力 jQ_{mu1} は、鋼管コンクリート杭の試験体 (5-A-1) と比べて RC 杭の試験体 (3-A-1, 3-A-2) の計算値が非常に小さい。一方で、実験結果では同一の軸力の試験体 3-A-1 (RC 杭) と 5-A-1 (鋼管コンクリート杭) は概ね近い耐力を発揮したことを鑑みると、RC 杭の jQ_{mu1} の計算値は過小と考えられる。これは、RC 杭は帯筋のみ加算しているが、杭の主筋量は帯筋よりも多く、実際にはこの作用による支圧力でコンクリートが押し出される力に対して、コーン破壊面内側 (CFT フランジ側) の範囲の主筋もひび割れ面のせん断抵抗として協力していたと考えられる。文献12)を参考に軸筋の効果を考慮すると、式(5)は式(14)として表現できる。表中にはこれを加味して再計算した CFT 鋼管フランジ面の支圧抵抗の計算耐力 jQ_{mu12} を示すが、これを加味することで RC 杭の試験体 (3-A-1, 3-A-2) と鋼管コンクリート杭の試験体 (5-A-1) の計算耐力は近い値となっている。なお、同表には jQ_{mu12} から再計算された支圧部の摩擦抵抗耐力 jQ_{mu22} も併せて示している。

$$P_{su12} = P_{su1} + \{1.65 \cdot (2 \cdot \Sigma A_{v1}) \sqrt{\sigma_B \cdot v \cdot \sigma_y (1 - \alpha_v^2)}\} \quad (14)$$

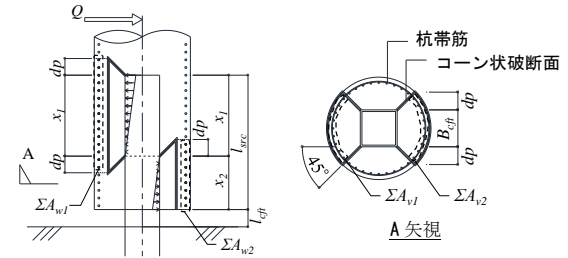
ここで、

ΣA_{v1} : コーン状破壊範囲を通過する杭主筋の断面積の合計 (図-8 (a)参照),

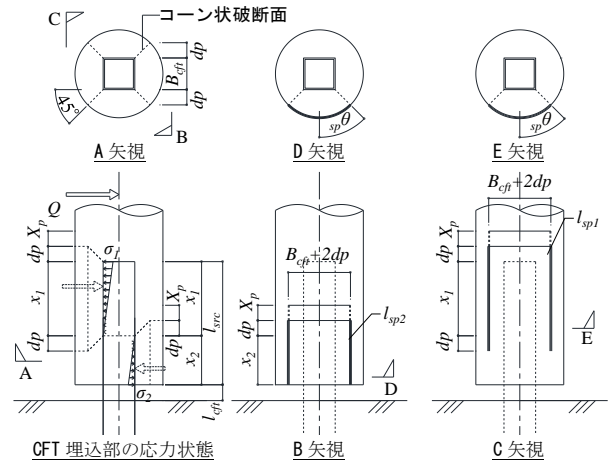
$v \cdot \sigma_y$: 杭主筋の降伏強度

α_v : 鉄筋の応力度の引張強度の負担比率で、ここでは0として略算した

次いで、CFT 端板支圧抵抗による耐力 jQ_{mu3} に着目すると、軸力の有無を変数とした試験体 3-A-1 と 3-A-2 の差が 178kN に対して計算値は 148kN であり、比較的良好に評価できていた。



(a) CFT 鋼管直交面の支圧抵抗 (杭帯筋および主筋)



(b) CFT 鋼管直交面の支圧抵抗 (鋼管コンクリート杭鋼管)

図-8 耐力計算の概要

表-5 CFT 埋込部における各計算耐力の計算値

試験体	jQ_{mu1} [kN]	jQ_{mu2} [kN]	jQ_{mu12} [kN]	jQ_{mu22} [kN]	jQ_{mu3} [kN]	jQ_{mu4} [kN]
3-A-1	47.1	17.4	155	57.1	148	54.7
3-A-2	47.1	17.4	156	57.6	0	55.9
5-A-1	141	52.1	141	52.1	145	53.1

jQ_{mu1} : CFT 鋼管フランジ面の支圧抵抗による耐力
 jQ_{mu2} : CFT 鋼管フランジ面支圧部の摩擦抵抗による耐力
 jQ_{mu12} : CFT 鋼管フランジ面の支圧抵抗による耐力において、RC 杭試験体は杭主筋の効果を加味した耐力
 jQ_{mu22} : jQ_{mu12} を考慮した支圧部の摩擦抵抗による耐力
 jQ_{mu3} : CFT 端板支圧抵抗による耐力
 jQ_{mu4} : CFT 鋼管フランジ面の付着による耐力

表-6 最大耐力および CFT 埋込部の計算値

試験体	Q_{exp} [kN]	jQ_{mu} [kN]	Q_{exp} / jQ_{mu}	jQ'_{mu} [kN]	Q_{exp} / jQ'_{mu}
3-A-1	495	360	1.37	415	1.19
3-A-2	317	214	1.48	270	1.17
5-A-1	503	338	1.49	392	1.29

Q_{exp} : 実験値

jQ_{mu} : 式(15)による接合部の計算耐力をせん断力で表現した値
 jQ'_{mu} : jQ_{mu} に CFT 鋼管フランジ面の付着力を考慮した接合部耐力をせん断力で表現した値で式(17)による

表-6 には各試験体の実験耐力 Q_{exp} および式(15)で算定した接合部耐力時のせん断力 jQ_{mu} を示す。

$$jQ_{mu} = jQ_{mu12} + jQ_{mu22} + jQ_{mu3} \quad (15)$$

表より、実験結果と計算耐力の比は 1.37~1.49 と実験結果を過小評価する結果である。

この原因を推測するため、式(15)において見込んでいない抵抗要素で、図-7 (d)に示す CFT 鉄骨フランジ面の付着を考慮することを検討する。付着の効果は、CFT 鋼管フランジ面に作用するコンクリートと鋼材との付着耐力が各フランジに逆方向に抵抗すると考え、付着強度にフランジの有効付着面積を乗じて付着力を算定する。この際、実験において杭天端位置の杭と CFT 鋼管フランジ面にはコンクリートの離間が観察されていたことから杭天端側の支圧力がかかる逆側のフランジは離間していたと考え、有効な付着長さは CFT 埋込部長さから x_2 (杭頭側の支圧長さで式(4)による) を減じた長さとする。この付着力を、(2)の抵抗機構と同様に CFT 鋼管せいを乗じてモーメントを算定し、杭天端レベルまで補正し、せん断力換算することで付着の効果は式(16)で算定した。

$$jQ_{mu4} = \frac{f_{fu} \cdot B_{cft} \cdot (l_{src} - x_2) \cdot D_{cft}}{L - (l_{src} / 2 + l_{cft})} \quad (16)$$

ここで、

f_{fu} : CFT 鋼管とコンクリートの終局付着強度で文献 11) を参考に $f_{fu} = 0.069 \cdot \sigma_B$

付着の効果を見込んだ接合部耐力時のせん断力 jQ'_{mu} は、文献 11) の付着のみの角形鋼管試験体 (鋼管内にコンクリート充填あり) の荷重変形関係において強度発揮後も耐力が維持されたことから、付着耐力 jQ_{mu4} を式(15)に累加して式(17)にて算定する。なお、有効な付着長さは図-7 (a)の支圧力 P_{u1} と重なるが、付着応力が拘束応力により上昇する^{例えは 13)} と考え、累加することとした。

$$jQ'_{mu} = jQ_{mu} + jQ_{mu4} \quad (17)$$

表-6 中には式(17)で計算した耐力 jQ'_{mu} を併せて示す。表より、付着を考慮することで実験結果と計算耐力の比は 1.17~1.29 となり、CFT フランジ面の付着を見込むことで式(15)の計算値よりも実験結果に近い結果となった。

5. まとめ

杭頭部を CFT で接続する構造の CFT 埋込部の終局耐力を確認する接合部実験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) いずれの試験体も杭の CFT 埋込部の損傷が支配的であり、CFT 埋込部での破壊モードを確認した。
- (2) 軸力載荷による耐力の上昇が確認された。また、軸力分の計算値は実験値に近い結果であった。
- (3) CFT フランジ面でのこ作用、こ作用による摩擦および軸力の抵抗要素を加味すると実験結果/計算値の比は 1.37~1.49 で評価された (ただし、RC 杭は主

筋の影響も考慮)。さらに、付着の影響を加味すると、実験結果/計算値の比は 1.17~1.29 となり、計算値は実験結果に近づいた。

参考文献

- 1) 建築コスト管理システム研究所：「杭頭半剛接合構法」の調査報告，建築コスト研究，No.60，pp.64-72，2008.1
- 2) 鈴木啓祐，平井慶一，井戸裕勇樹，福原武史，濱田純次：CFT を利用した杭頭半剛接合部の構造実験 (その 1：150mm 角 CFT 試験体)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.563-564,2020.9
- 3) 平井慶一，鈴木啓祐，井戸裕勇樹，福原武史，濱田純次：CFT を利用した杭頭半剛接合部の構造実験 (その 2：250mm 角 CFT 試験体)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.565-566,2020.9
- 4) 鈴木啓祐，南谷知輝，福原武史，平井慶一，井戸裕勇樹，濱田純次：CFT を利用した杭頭半剛接合部の構造実験 (その 4：変動軸力試験体)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.583-584,2021.9
- 5) 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，2017.3
- 6) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008.10
- 7) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2021.2
- 8) 福原武史，宮内靖昌，石川裕次，鈴木直幹：遠心成形中空 PCaPRC 柱-S 梁接合部の開発，日本建築学会技術報告集，第 34 号，pp.991-996，2010.10
- 9) 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報告集，Vol.44，No.2，pp.721-726，2022
- 10) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，1998.1
- 11) 宇佐美徹，毛井崇博，青木雅路，平井芳雄，伊藤栄俊：鉄骨柱から場所打ちコンクリート杭頭部への軸力伝達に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.547，pp.105-112，2001.09
- 12) 日本建築学会：現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説(2002)，2002.10
- 13) 木原弘輝，堀田久人，中林一茂：拘束下のコンクリートと鋼板の付着特性に関する研究:(その 3)実験の概要及び結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，pp.1135-1136,2000.7