

論文 角形鋼管を用いた杭頭接合部の水平せん断耐力に関する実験および解析的研究

福原 武史*1・水島 靖典*2・南谷 知輝*3・土居 晃基*4

要旨：型枠を兼用した角形鋼管の内側にコンクリートを充填したパイルキャップに杭頭を埋め込む杭頭接合部に関して、杭頭の水平せん断力を伝達する接合部を模擬したせん断実験を計 8 体実施し、構造性能を確認した。また、基準試験体に対して FEM 解析を実施し、実験の荷重変形関係を精度よく評価できることを確認するとともに、その最小主応力図から杭と鋼管の間のコンクリートの圧縮ストラットによる応力伝達を確認した。さらに、実験および解析を参考に杭と鋼管の間のコンクリートの圧縮ストラットを仮定した耐力評価方法を提案し計算値と実験値を比較したところ、その比（実験値／計算値）は 0.98～1.40 であった。

キーワード：合成・混合構造, 杭頭接合部, 既製杭, パイルキャップ, 角形鋼管

1. はじめに

筆者らは、これまで既製杭と上部構造（柱・梁）の間の応力を伝達するパイルキャップに型枠を兼用した円形鋼管を用い、軸力支持性能やせん断力伝達性能を実験的に確認してきた¹⁾。本工法は型枠およびパイルキャップ（フーチング）の配筋が省略されることで施工の合理化が図られるとともに、フーチング全体が鋼管に覆われることで変形性能の向上も見込まれる。一方で、フーチングサイズの円形鋼管を製作するにあたっては、精度を確保するための形状維持や、製作工期が長くなるなどの問題もある。このため、本論では図-1 に示すようにパイルキャップを角形鋼管とした杭頭部の構造実験を実施して構造性能を確認し、耐力評価方法を提案する。また、応力伝達機構を把握するため FEM 解析を実施し、耐力評価方法の検討の参考とした。

なお、本工法は既製杭の埋め込みが浅く杭頭曲げ応力の負担及び回転剛性を抑える半剛接合（図-1 (a)）および、杭頭鉄筋を用いず鋼管に既製杭を深く埋め込み曲げ応力を埋め込み部にてこ作用で積極的に伝達する剛接合

（図-1 (b)）で設計されることが想定される。本実験は図-1 (a)のディテールに加え、文献 1)に示す円形の場合と同様に同図(b)のディテールの耐力を評価するうえで必要となるこ作用における杭側面の支圧耐力の参考とするために実施した。

2. せん断実験

2.1 実験計画

(1) 試験体

表-1 に試験体一覧を、図-2 に試験体の断面および形状を示す。試験体は 1/3 程度の縮小スケールを想定し、試験体の上部は角形鋼管を用いたパイルキャップ、下部は既製杭を模擬した。パイルキャップと杭頭間には接触面の縁を切るために 20mm のスタイロフォームを挟んだ。

試験体は計 8 体で、外径 450mm 角、板厚 $t=6\text{mm}$ の鋼管をパイルキャップに用いた SS-1 を基準試験体とし、角形鋼管サイズ(SS-2)、杭の偏心(SS-3, SS-5)、コンクリート強度(SS-4)、鋼管に対する加力方向の角度(SS-6)、板厚(SS-7)および埋め込み深さ(SS-8)を実験変数とした。杭の

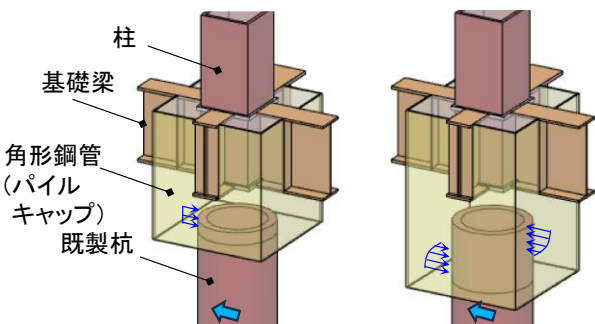


図-1 工法利用イメージと応力伝達の概要

表-1 試験体一覧

試験体	角形鋼管 (mm)	杭* (mm)	埋込深さ (mm)	備考
SS-1	□-450× t 6.0	SC 杭	75	基準
SS-2	□-360× t 6.0	ϕ 318.5× t 6.9 $t_c=52$		鋼管小
SS-3	□-450× t 6.0			鋼管杭
SS-4		ϕ 318.5× t 12.7		偏心(Y)
SS-5	鋼管杭			偏心(X)
SS-6		ϕ 318.5× t 6.9		45度
SS-7	□-450× t 2.3			板厚小
SS-8	□-450× t 6.0			150

t : 杭鋼管の板厚, t_c : SC 杭の肉厚

*いずれもコンクリートの中詰して利用

*1 竹中工務店 技術研究所 博士(工学) (正会員)
 *2 神戸大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)
 *3 竹中工務店 名古屋支店 設計部
 *4 竹中工務店 技術研究所 (正会員)

偏心は SS-3 では加力直交方向(Y 方向), SS-5 では加力方向(X 方向)に 45mm とした。加力方向の角度は, SS-6 試験体のみ角形鋼管を 45° 回転して製作することで模擬した。杭頭のパイルキャップへの埋め込み深さは SS-1~7 試験体では 75mm で共通, SS-8 のみ 150mm とした。

杭体に用いた円形鋼管の外径 ϕ は 318.5mm で共通とした。なお, SS-1~3 試験体では遠心成型して作成した SC 杭を用いたが, 製作の都合により SS-4 試験体以降は $t=12.7$ mm 鋼管杭に変更し, さらに SS-6 以降は $t=6.9$ mm とした。杭内部はスタイロフォームの固定と杭の補強を兼ねてコンクリートの中詰めをした。なお, 杭に用いた鋼管は実験で加力した荷重より十分せん断耐力が高く実験結果に影響が小さいと判断できる。また実験後も杭体の損傷は確認されなかった。

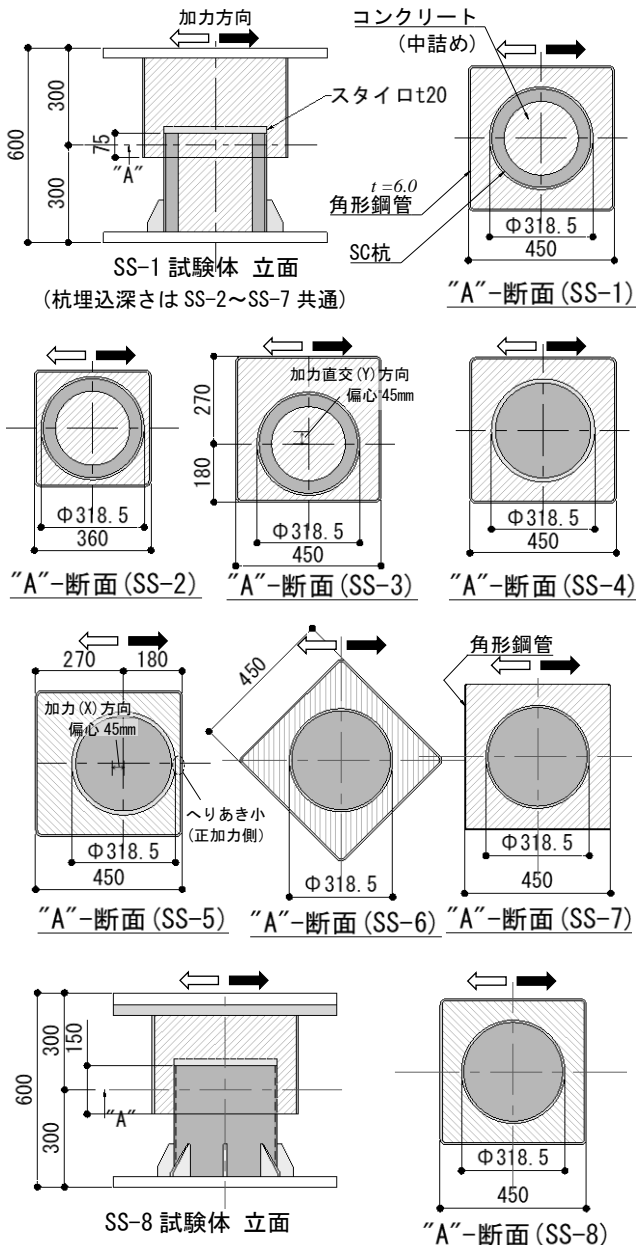


図-2 試験体

(2) 使用材料

角形鋼管および杭体に使用した鋼材の材料試験結果を表-2 に示す。パイルキャップ(角形鋼管と杭の間)および杭体の中詰めに使用したコンクリートの圧縮強度を表-3 に示す。パイルキャップのコンクリートは SS-4 のみ高強度としている。SC 杭のコンクリートの設計基準強度は $F_c=105\text{N/mm}^2$ である。

(3) 加力方法

加力は, 建研式加力装置を用い, 試験体高さ中央を加力芯として水平力を加えることで実施した。図-3 には試験体部を拡大した装置図を示す。水平変位は, 試験体上下の接続 PL 間の水平変位を計測した。水平力は正負繰り返し載荷としたが, 後述の荷重-変形関係は比較のために包絡線で示している。なお, 装置自重分と釣り合うカウンターウェイトを用いることで鉛直軸力は加えず, さらに杭頭とパイルキャップ間にスタイロを挟むことで杭の側面の支圧力のみで応力伝達されるようにした。

表-2 鋼材の機械的性質

部位	板厚 (mm)	試験体	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)
パイルキャップ (角形)	t-6.0	SS-1~5	350	448
	t-6.0	SS-6,8	299	432
	t-2.3	SS-7	255	353
杭 (円形鋼管)	t-6.9	SS-1~3	457	563
	t-12.7	SS-4~5	486	539
	t-6.9	SS-6~8	469	564

表-3 コンクリートの材料試験結果

試験体	パイルキャップ $c\sigma_B$ (N/mm ²)	中詰め $c\sigma_{B2}$ (N/mm ²)
SS-1	21.4	49.9
SS-2	22.3	51.0
SS-3	22.7	51.4
SS-4	55.4	52.5
SS-5	23.0	52.5
SS-6	20.3	90.6
SS-7	21.7	90.9
SS-8	21.2	93.8

$c\sigma_B$: パイルキャップに用いたコンクリートの圧縮強度, $c\sigma_{B2}$: 中詰めに用いたコンクリートの圧縮強度

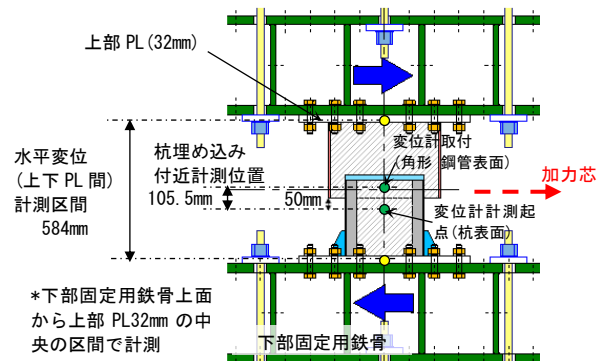


図-3 加力方法

2.2 実験結果

(1) 荷重-変形関係と破壊状況

写真-1には試験体の損傷状況を、図-4には実験の荷重変形関係の包絡線を示す。包絡線は正加力側のものを示しているが、SS-5試験体は杭の偏心で非対称の形状であるため、杭と鋼管のあきが小さい正側とあき大きい負側の包絡線（負側は変位、荷重にマイナスを除いて記載）をそれぞれ記載した。いずれの試験体も変位2mmまでに杭から角形鋼管の角部に向かってパイルキャップのコンクリートにひび割れが生じ、耐力低下または耐力上昇が頭打ちした。その後、SS-7試験体を除くといずれも変位4mm程度でひび割れ方向に沿ってコンクリートの圧壊が進行し、コンクリートの圧縮束の破壊モードであったと判断される。一方で、薄板の鋼管を用いたSS-7試験体では、耐力低下以降にひび割れ幅は進行したが、コンクリートの圧壊は観察されなかった。また、SS-7試験体の初期剛性が低いのは、最終的に上部PLへのせん断力は鋼管を介して伝達されるため鋼管の板厚の薄さが剛性に影響したと考えられる。以上から、杭から角形鋼管への応力伝達は杭と角形鋼管の角部の間のコンクリートの圧縮ストラットでなされ、この耐力が主に本実験の耐力に寄与していると考えられる。

最大耐力は、高強度コンクリートを用いたSS-3および埋め込みを深くしたSS-8試験体では基準試験体SS-1と

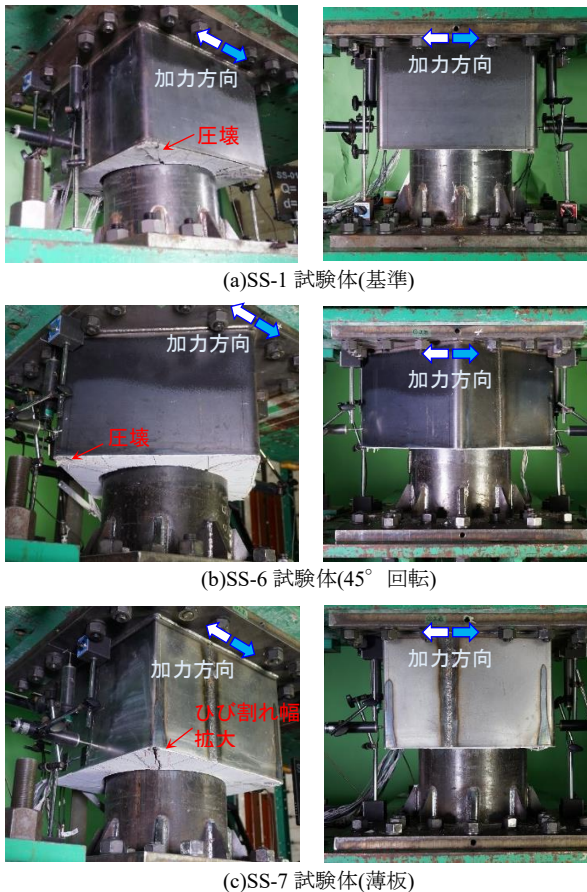


写真-1 試験体状況(水平変位 10mm 時)

比べてそれぞれ 1.56 倍、1.51 倍に上昇した。加力方向に偏心した SS-5 試験体では、杭と鋼管のあきが小さい正側

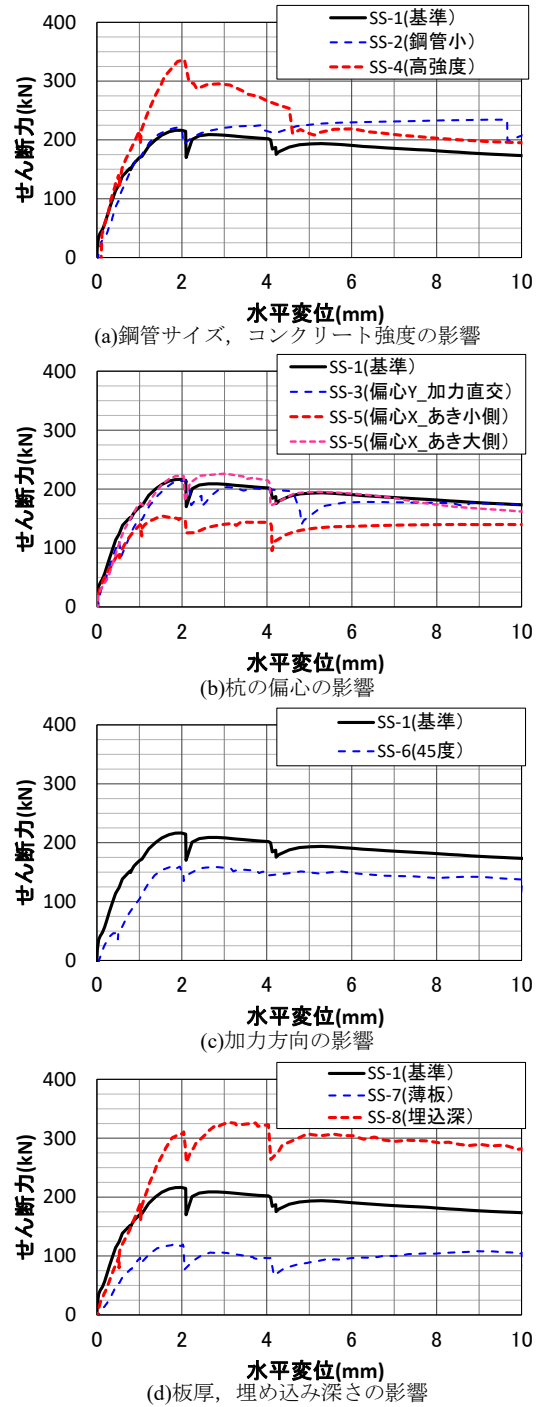


図-4 荷重変形関係(包絡線)

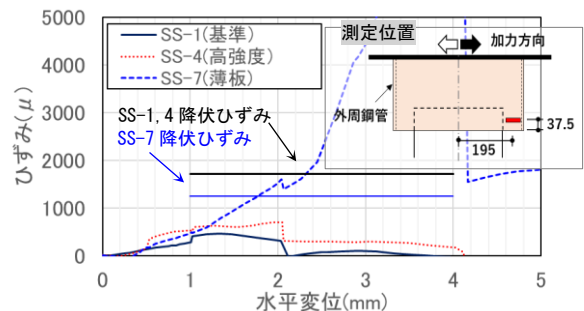


図-5 角形鋼管側面加力方向ひずみ状況(包絡線)

加力において基準試験体より耐力が 0.76 倍に低下した。これは、圧縮ストラットの加力方向成分が小さくなったためと考えられる。鋼管を 45 度回転した SS-6 試験体の耐力は SS-1 の 0.73 倍であったが、これは圧縮ストラットが 1 本になったためと考えられる。角形鋼管の板厚を薄くした SS-7 試験体は SS-1 の 0.56 倍となったが、後述するような鋼管の降伏に起因するものと考えられる。

(2) ひずみ状況

図-5 には角形鋼管の角部近傍の表面に貼り付けた水平方向のひずみ計測値を示す。基準試験体の SS-1 試験体は降伏ひずみに達していない一方で、鋼管の板厚が薄い SS-7 試験体は最大耐力を發揮した水平変位 2mm を越えたタイミングで明確に降伏ひずみを越えている。このため、鋼管の板厚が薄い場合は、圧縮ストラット耐力に達する前にその反力となる鋼管側の降伏に起因して耐力が決定したと推測される。

3. 解析的検討

3.1 解析モデル

本章では、本実験の応力伝達機構を解析的に検証するため、基準試験体 SS-1 を対象に FEM 解析を実施した。

解析モデルの概要を図-6 に示す。解析には汎用有限要素解析プログラム LS-DYNA10.0.0 を用い、加力には変位制御による動的陽解法を採用し、慣性力が無視できる速度で载荷を行う準静的载荷とした。同図(a)に解析モデルを示す。モデルの寸法は SS-1 と同様とし、メッシュサイズは 5mm 程度、要素数は 531,372、節点数は 522,132 である。同図(b)に使用した要素および材料モデルを示す。解析の主要な要素であるコンクリートには損傷塑性モデルを用いた Solid 要素、角形鋼管の鋼材には弾塑性の Shell 要素を用いた。また、同図(c)に示すように上部の固定用 PL は弾性体、モデル上部はピンローラ支持とし、下部の杭は剛体として固定し、実験の加力を模擬した。

コンクリートは積分点を要素中心 1 点とした低減積分 8 節点 6 面体一次 Solid 要素で作成した。材料は Grassel らによって提案された損傷塑性コンクリートモデル (Concrete Damage Plastic Model)²⁾を用いた。引張と圧縮それぞれの応力ひずみ関係の概念図を同図(d)に転載する。圧縮強度 $c\sigma_B$ は実験の材料試験結果を用い、引張強度 f_t は $0.56 \times c\sigma_B^{1/2}$ ($c\sigma_B$ の単位は N/mm^2) として定めた。

パイルキャップの角形鋼管は 4 節点一次 Shell 要素でモデル化し、積分点は板厚方向に 4 箇所、面内 1 箇所の低減積分要素を用いた。角形鋼管の材料は同図(e)に示すように塑性化後の応力-ひずみ関係を多直線近似した Mises の降伏条件に従う弾塑性体を用いた。なお、本試験体の材料試験結果は弾性ゲージを用いていたため、降伏荷重以降の応力-ひずみ関係は塑性ゲージを用いた既往

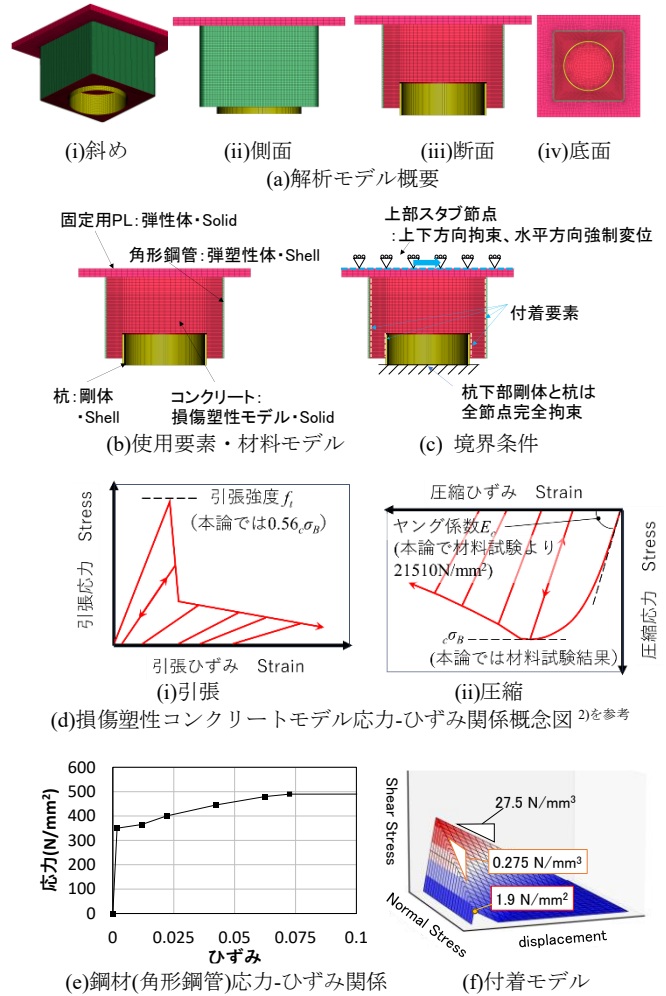


図-6 解析モデルの概要

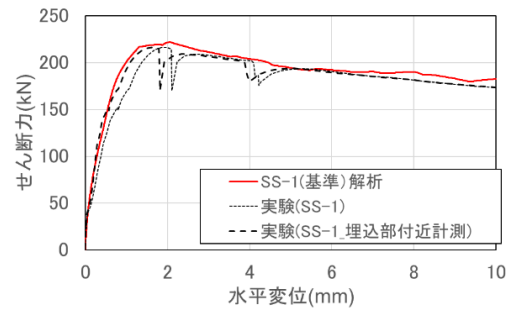


図-7 実験結果と解析結果の比較(SS-1)

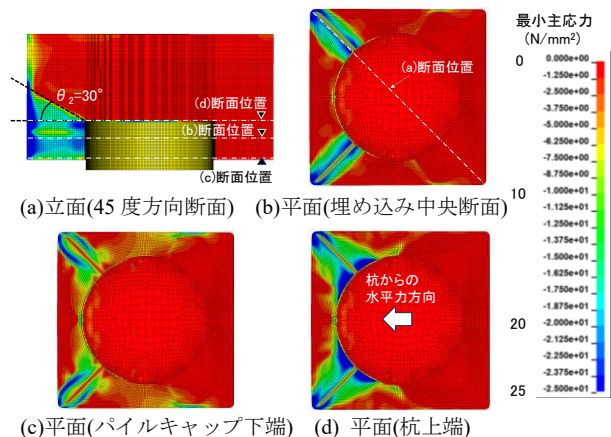


図-8 コンター図 (SS-1, 水平変位 2mm 時)

の材料試験結果の塑性化後の応力の値を、降伏応力の比でスケールリングして与えた。杭体とパイルキャップのコンクリート間およびパイルキャップコンクリートと角形鋼管の間のコンクリートと鋼材の境界部には堀田らが提案した付着モデル³⁾を用いた。これは、最大付着応力が垂直応力に比例し最大付着応力後は滑り量に伴って付着せん断応力が線形軟化するモデルで、同図(f)にそのモデル図と用いたパラメータを示す。杭体を表す剛体は4節点 Shell 要素でモデル化した。強制変位を与える上部固定用 PL は弾性体とし、ヤング係数を 205,000 N/mm² とした。

3.2 解析結果

図-7には実験結果と解析結果それぞれの荷重-変形関係を示す。実験の加力制御は試験体の上下 PL 間を計測しているが、解析モデルは杭が剛体であることから、同図中に杭埋め込み部付近で計測した水平変位も併せて示した。解析結果の最大耐力は実験結果を精度よく評価できていることが分かる。なお、実験で荷重が不連続に低下している箇所は、繰り返し載荷によるもので、次サイクルの加力途中の荷重変形関係が包絡線にプロットされたものである。

図-8には解析で最大耐力を概ね発揮した変位2mm時における応力コンターの平面および立面方向の断面図を示す。なお、図中右には最小主応力のコンターレベル(同図中で共通、材料試験強度前後の応力を把握しやすくするため下限を 25N/mm² で表示)を示している。同図(a)には圧縮ストラットに沿った(平面図の 45 度方向)断面における最小主応力を示すが、支圧応力は杭上部から高さ方向に約 30° 広がっていることが分かる。また、同図(b)には杭埋め込み深さの中央の高さにおける最小主応力を示しているが、圧縮応力は杭中央から鋼管の角部に向かって生じており、後述の 4.2 節で仮定した圧縮ストラットの応力伝達機構に近いことが確認できる。

4. 耐力に関する検討

4.1 耐力評価方法の検討

本章では、前章で得られた実験結果をもとに角形鋼管を用いた杭頭接合部の水平せん断耐力の評価方法を検討する。本試験体の応力伝達機構は実験の損傷状況より図-9(a)に示すコンクリートの圧縮束によるものと考え、圧縮ストラットの耐力 C_{st} は式(1)で算定する。

$$C_{st} = ac \sigma_B \cdot p A_c \quad (1)$$

ここで、

$ac \sigma_B$: プレストレストコンクリート設計施工規準・解説⁴⁾の支圧強度を参考に圧縮ストラットの高さ方向(支圧面積)の広がりを考慮した強度で、

$$ac \sigma_B = 1.8 \cdot \sqrt{\frac{p A_c'}{p A_c}} \cdot c \sigma_B^{(0.8 - c \sigma_B / 2000)} \quad (2)$$

$c \sigma_B$: コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

$p A_c$: 杭側に仮定する圧縮ストラットの支圧表面積で、

$$p A_c = b_{cs} \cdot l_d \quad (3)$$

$p A_c'$: 鋼管側に仮定する圧縮ストラットの高さ方向の広がりを考慮した支圧面積で、

$$p A_c' = b_{cs} \cdot (l_d + l_{d2}) \quad (4)$$

b_{cs} : 仮定する圧縮ストラット幅で、

$$b_{cs} = \theta \cdot p D, \quad \theta = 0.349 \quad (20^\circ \text{ の } rad \text{ 表示}) \quad (5)$$

l_d : 杭の埋め込み深さ

l_{d2} : 杭埋込下端から角形鋼管への圧縮ストラットの高さ方向の広がりで、

$$l_{d2} = (d_s - 0.5 \cdot p D) \cdot \tan(\theta_2) \quad (6)$$

d_s : 杭中心から圧縮ストラット方向の角形鋼管角部までの距離 $d_s = D_s / \sqrt{2}$, 杭の偏心が無い場合、杭の偏心がある場合は偏心を考慮して算定

$p D, D_s$: それぞれ杭径および角形鋼管せい

圧縮ストラット幅 b_{cs} は基準試験体 SS-1 のひび割れ図を参考に仮定し、最大耐力発揮後に観察された主要なひび割れ間の幅を図-10 に示すひび割れ図における杭中心からの角度 θ より定めた。

仮定した圧縮ストラットの高さ方向の広がり l_{d2} は、外観から判断できないため、FEM 解析のコンター図(図-8(a)参照)を参考に杭天端からの応力の広がり角度 θ_2 より設定した。

水平耐力 P_{cu} は、式(1)より算定した2方向の圧縮ストラット耐力をそれぞれ C_{st1}, C_{st2} とし、各ストラットと算定する水平せん断耐力の方向の角度を ϕ_{s1}, ϕ_{s2} とすると、式(7)で算定できる。

$$P_{cu} = \cos(\phi_{s1}) \cdot C_{st1} + \cos(\phi_{s2}) \cdot C_{st2} \quad (7)$$

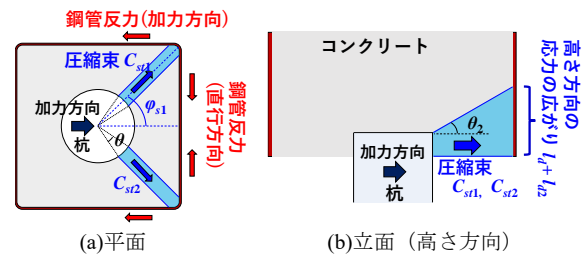


図-9 想定する応力伝達機構

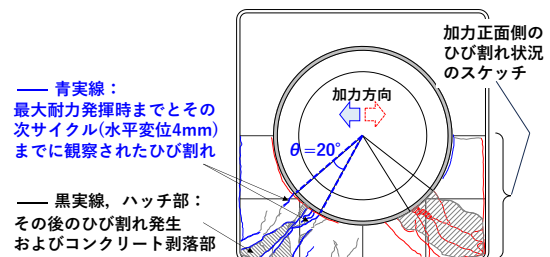


図-10 ひび割れ状況(SS-1 試験体)

なお、 ϕ_{s1} および ϕ_{s2} は杭の偏心が無い基準試験体 SS-1 では 1.57rad(45°), 角形鋼管を 45 度回転した SS-6 試験体は 0.rad(0°) および 1.57 rad(90°) とし、偏心のある試験体は偏心を考慮して算定する。この際には式(6)の d_s も偏心を考慮して C_{s1} , C_{s2} を算定する必要がある。

角形鋼管に薄板を用いた SS-7 試験体に関しては、反力となる鋼管で耐力が定まると考え、式(8)より算定する。

$$P_{su} = 2 \cdot t_s \cdot (l_{d1} + l_{d2}) \cdot \sigma_{ts} \quad (8)$$

ここで、

t_s : 角形鋼管の板厚

σ_{ts} : 加力方向の反力方向の角形鋼管の引張応力で、

$$\sigma_{ts} = 0.5 \sigma_y \quad (9)$$

σ_y : 角形鋼管の引張降伏強度

なお、式(9)の σ_{ts} は鋼管角部には圧縮ストラットから 2 方向の分力が生じていると考え、式(10)に示す引張応力 σ とせん断応力 τ の応力円において、分力が等しいと考えて $\sigma = \tau$ の条件で算定して得た。

$$(\sigma / \sigma_y)^2 + \{\tau / (\sigma_y / \sqrt{3})\}^2 = 1 \quad (10)$$

4.2 計算耐力と実験値の比較

表-4 には式(7)および(8)による実験値と計算値を、図-11 には実験値と計算値の比較を示す。実験値と計算値の比は鋼管が小さい SS-2 試験体では 1.40 と過小評価となったが、その他の試験体は 0.98~1.23 と比較的精度良く評価された。他の試験体と比べて SS-2 試験体が過小評価となっている要因は、杭と鋼管の距離が近く圧縮ストラットの応力伝達に加えて直接鋼管の板面に応力伝達がなされたこと、また鋼管が小さいことで鋼管板曲げの剛性が他の試験体より高く応力伝達されやすいことが推測される。以上、本実験結果に対する耐力評価方法を示したが、本実験のひび割れ状況や解析のコンター図を参考に定めた仮定を含むため、幅厚比や鋼管と杭サイズの比率等の組み合わせにより影響を受ける可能性があることに留意されたい。

5. まとめ

角形鋼管を用いたパイルキャップの杭頭接合部における水平せん断力の伝達機構を把握するため構造実験および FEM 解析を実施し、以下を明らかにした。

- (1) 実験の損傷状況から、杭頭の水平せん断力は杭と角形鋼管の間のコンクリートにおいて杭中心から角形鋼管の角部方向に形成される圧縮ストラットによりパイルキャップに伝達される。
- (2) 角形鋼管の板厚が薄肉になると標準の板厚の試験体と比べて耐力が低下した。これは前述の圧縮ストラットの反力となる角形鋼管の鋼材が先行して降伏することで耐力が決定したためと考えられる。
- (3) SS-1 試験体に対して FEM 解析を実施したところ、実

表-4 実験結果と計算結果の比較

試験体	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験 / 計算
SS-1(基準)	202 (+216, -187)	174	1.16
SS-2(鋼管小)	221 (+234, -208)	158	1.40
SS-3(偏心 Y)	208 (+214, -201)	182	1.14
SS-4(高強度)	338 (+337, -339)	345	0.98
SS-5(偏心 X_あき小)	154 (+154)	153	1.01
SS-5(偏心 X_あき大)	226 (-226)	212	1.07
SS-6(45 度)	161 (+159, -162)	134	1.20
SS-7(板厚小)	119 (+121, -116)	96.7	1.23
SS-8(埋込深)	324 (+327, -321)	301	1.08

実験値は正負平均で評価、()内に正負耐力を記載

SS-5 試験体は杭からのあきが正負で異なるので分けて評価

計算値は式(7)によるが SS-7 試験体は式(8)による

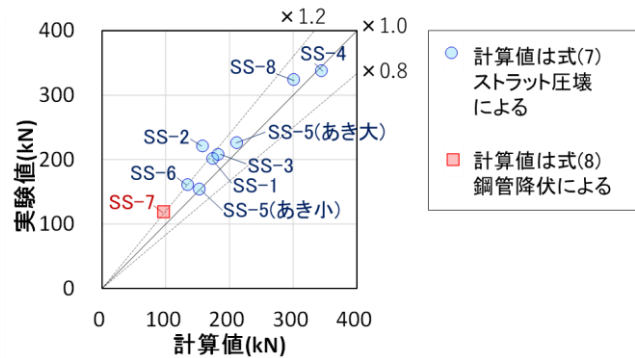


図-11 実験結果と計算結果の比較

験の荷重-変形関係を精度よく評価できた。また、最小主応力図から、耐力評価提案式で仮定する圧縮ストラットが確認された。

- (4) 圧縮ストラット幅を仮定した耐力評価式により実験結果を評価したところ、コンクリート強度、杭の偏心、角形鋼管の回転および埋込み深さを変数とした試験体に対して実験値/計算値の比は 0.98~1.40 であった。また鋼管が薄肉(2.3mm)の試験体は鋼管で決定する耐力評価式により実験値/計算値の比は 1.23 となった。

参考文献

- 1) 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
- 2) P. Grassl, et al.: CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. International Journal of Solids and Structures, 50(24), pp.3805-3816, 2013
- 3) 木原弘輝, 堀田久人, 中林 一茂: 拘束下のコンクリートと銅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(東北), 構造 III, pp.1135-1136, 2000.7
- 4) 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, 2022.3