

## 論文 SC 杭のパイルキャップにおける杭頭接合面耐力に関する実験的検討

小梅 慎平\*1・石川 一真\*2・岸田 慎司\*3

**要旨**：本研究では、SC 杭とパイルキャップとの接合を定着筋方式とし、軸力の有無やパイルキャップコンクリート強度の違いなどが杭頭接合面耐力に与える影響を確認する、実大スケールでの水平加力実験を行った。軸力が作用すると大きな接合面耐力が得られ、大きな回転角まで耐力低下が少ないことを確認した。また、円環断面を用いて、コンクリート圧縮強度とヤング係数を材料試験値の4~5倍にした断面解析結果は、実験結果と整合性があることを確認した。

**キーワード**：SC 杭，パイルキャップ，定着筋方式，杭頭接合面耐力，支圧係数

## 1. はじめに

近年、高層建物や重量の大きな建物の杭基礎においても、既製コンクリート杭の1柱1杭の設計が可能となり、杭1本が負担する水平力が従来よりも大きくなっている。それに伴い、曲げ耐力が大きいSC杭（外殻鋼管付き高強度コンクリート杭）を上杭に採用する設計が増加している。SC杭を杭頭部に使用することで、杭と基礎梁および柱との間の応力伝達を行うパイルキャップにもSC杭に見合った耐力が求められる。しかし、パイルキャップの構造性能については未解明な部分が多く、構造実験や解析が十分ではないのが現状である。

既製コンクリート杭の杭頭接合法は、主筋あるいは定着筋をパイルキャップに定着する方法（以下、定着筋方式）と、杭頭部をパイルキャップに杭径の1倍以上埋め込む方法（以下、埋込み方式）の2種類がある<sup>1)</sup>が、埋込み方式は実験による裏付けも少ないため、一般的に定着筋方式を採用することが主流となっている。ただし、定着筋方式においても、杭頭接合面の支圧効果について支圧係数 $\phi_c$ を3とした計算法が提案されている<sup>2)</sup>が、高軸力下でのその効果は明らかになっていない。

本研究では、SC杭とパイルキャップとの接合を定着筋方式とし、軸力の有無やパイルキャップコンクリート強度の違いなどが杭頭接合面耐力に与える影響を確認する、実大スケールでの水平加力実験を行った。

なお、杭頭定着筋のフレア溶接部は、かぶり厚さを確保するために、通常はパイルキャップに埋め込まれる。しかし本研究では、杭頭接合面のみでの耐力評価を目的としているため、杭頭定着筋のフレア溶接部分も含め、SC杭はパイルキャップに全く埋め込んでいない。ただし、半剛接としての使用は想定していない。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体概要

\*1 ジャパンパイル（株） 技術企画部 技師 修士(工学) (正会員)

\*2 ジャパンパイル（株） 技術企画部 部長付 博士(工学) (正会員)

\*3 芝浦工業大学 建築学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 に試験体諸元、表-2 に鉄筋の力学的特性、表-3 に試験体コンクリートの力学的特性、図-1 に試験体 A-1 の配筋図を示す。試験体は、実大スケールのSC杭、パイルキャップおよび基礎梁で構成される。杭頭接合部より先にSC杭を降伏させないよう、SC杭の鋼管厚は19mmとした。

パイルキャップには、はかま筋、ベース筋および帯筋を配筋した。試験体を製作するにあたって、実際の施工と同じく、パイルキャップが上、杭が下になる向きでコンクリートを打設した。なお、SC杭の中空部はポリスチレンフォーム断熱材で蓋をして、打設したコンクリートが中空部に入らないようにした。

基本試験体は一定軸力を作用させた試験体 A-1 とし、同仕様で軸力を作用させない試験体を試験体 A-2 とした。試験体 B-1、B-2 はそれぞれ A-1 と A-2 と比べて、高強度で太径の杭頭定着筋を用い、コンクリート圧縮強度を大きくした試験体である。

試験体 B-1、B-2 の杭頭定着筋は、定着長が40d（dは鉄筋の呼び名に用いた数値）を満足していないため、杭頭定着筋の先端に円環状のプレート<sup>3)</sup>を溶接により取り付けた。試験体 A-1、A-2、A-3、A-4 の杭頭定着筋は、定着長40dを満足しているが、プレートの影響を確認するため、試験体 A-1、A-2 にはプレートを取り付けた。

試験体 A-3、A-4 は杭頭定着筋の先端にプレートを取り付けておらず、試験体 A-3 は一定軸力、試験体 A-4 は変動軸力を作用させた。

## 2.2 試験装置概要

図-2 に試験装置図を示す。試験体のコンクリート打設時とは上下を反転させて試験体を載荷装置に設置し、基礎梁を反力床に緊結した。スライド支承が付いた鉛直ジャッキにより軸力を作用させた。鉛直ジャッキ、水平ジャッキ共に加力治具との接続部はピン支持とした。

軸力による付加曲げモーメントを考慮した杭頭接合

表-1 試験体諸元

試験体		A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2
杭	杭種	SC 杭 杭径 600mm 肉厚 t=90mm F <sub>C</sub> =105N/mm <sup>2</sup> 鋼管板厚 t <sub>s</sub> =19mm SKK490					
	杭頭定着筋	8-D29(SD345)			8-D35(SD390)		
	定着長	1195mm(41d)		1160mm(40d)		1195mm(34d)	
	プレート	あり		なし		あり	
パイル キャップ	幅×幅 ×高さ	1500mm×1500mm×1200mm					
	はかま筋 ベース筋	X 方向 : 8- D13(SD345), Y 方向 : 8- D13(SD345)					
	帯筋	6- D13(SD345)					
基礎梁	幅×せい	800mm×1100mm					
	主筋	上端筋, 下端筋ともに 6-D32(SD390)					
	あばら筋	10-D19(SD345)@100					
軸力(kN)	5000	0	5000	-500 ~5000	5000	0	

表-2 鉄筋の力学的特性

使用 部材	試験体	鉄筋 種類	降伏 強度 σ <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	引張 強度 σ <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E <sub>s</sub> (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	降伏 ひずみ (μ)
杭頭 定着筋	A-1,A-2 A-3,A-4	D29 (SD345)	387.8	564.9	19.48	2009
	B-1,B-2	D35 (SD390)	434.6	634.2	19.48	2231
	はかま筋 ベース筋 帯筋	D13 (SD345)	374.8	586.4	18.92	1981
基礎梁 主筋	A-1,A-2 A-3,A-4	D32 (SD390)	453.7	644.0	19.39	2340
	B-1,B-2	D32 (SD390)	453.4	648.3	19.24	2357
基礎梁 あばら筋	A-1,A-2 A-3,A-4	D19 (SD345)	402.4	599.8	19.04	2113
	B-1,B-2	D19 (SD345)	395.4	581.4	19.09	2071

表-3 試験体コンクリートの力学的特性

試験体	設計基準 強度 F <sub>C</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 σ <sub>B</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E <sub>c</sub> (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張 強度 σ <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度時 ひずみ (μ)
A-1	21	26.3	2.27	2.20	2431
A-2	21	28.5	2.51	2.57	2207
A-3	21	26.7	2.63	2.48	1929
A-4	21	27.6	2.53	2.17	2103
B-1	30	36.9	2.59	2.68	2310
B-2	30	35.6	2.80	2.51	2145

面の曲げモーメントの計算式を式(1)に示す。

$$M = P \cdot L + N \cdot \delta_H \quad (1)$$

ここに、M: 杭頭接合面の曲げモーメント、P: 水平力、L: 水平加力点から杭頭接合面までの距離 (2400mm)、N: 軸力、δ<sub>H</sub>: 鉛直ジャッキと加力治具との接続位置の水平変位とする。

### 2.3 実験計画

本実験は、回転角 θ にて制御を行う漸増変位正負交番繰返し载荷とした。なお、回転角 θ は SC 杭の側面に設置した変位計を用いて式(2)より求めた。

$$\theta = (\delta_{v1} - \delta_{v2}) / L_v \quad (2)$$

ここに、δ<sub>v1</sub>, δ<sub>v2</sub>: 杭頭接合面近傍の SC 杭の鉛直変位、L<sub>v</sub>: 変位計の設置間距離 (図-1 参照) とする。

正負交番加力を 1 サイクルとして、θ = 1.25/1000rad, 2.5/1000rad を各 1 サイクル、θ = 5/1000rad, 10/1000rad, 20/1000rad, 30/1000rad, 40/1000rad, 60/1000rad, 80/1000rad を各 2 サイクル行った。ただし、試験体 A-2, B-2 におい

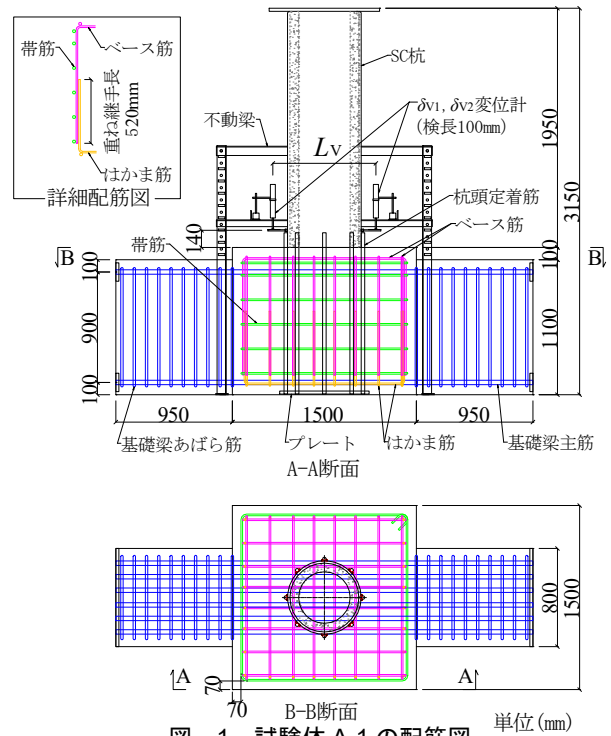


図-1 試験体 A-1 の配筋図

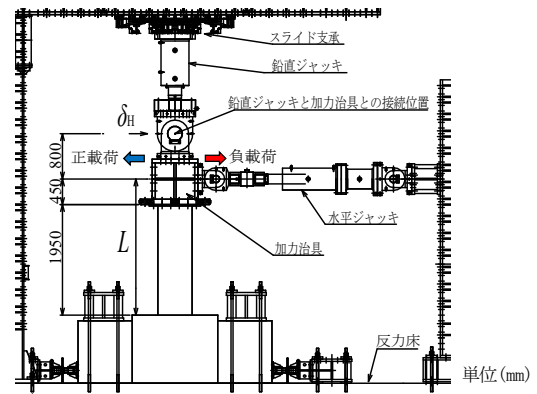


図-2 载荷装置図

ては、杭頭定着筋の破断によって試験の継続が困難となり、60/1000rad の 2 サイクル目を終えた段階で試験を終了した。

変動軸力を作用させた試験体 A-4 の载荷パスを図-3 に示す。同図に示した黒線は、後述する方法 B において支圧係数 φ<sub>c</sub>=2 と材料規格値 (σ<sub>y</sub>=345N/mm<sup>2</sup>, E<sub>s</sub>=205000 N/mm<sup>2</sup>, F<sub>C</sub>=21N/mm<sup>2</sup>, E<sub>c</sub> は NewRC 式を用いて算出) を使用して描いた杭頭接合面耐力である。载荷パスは長期軸力を 2500kN とし、正载荷では 5000kN、負载荷では引張軸力となる -500kN を作用させた。これは、杭径 600mm の SC 杭の下杭として、同径の PHC 杭 (F<sub>C</sub>=105N/mm<sup>2</sup>, A 種) の使用を想定した場合に、この下杭の長期許容軸力 3800kN の約 66%にあたる。なお、軸力を一定とした試験体では、軸力を 5000kN または 0kN とした。

試験体 A-1 の杭頭定着筋のひずみゲージ貼付け位置を図-4 に示す。図中の赤丸がひずみゲージ貼付け位置であり、全ての試験体で共通である。同図には杭頭定着筋

の名称と加力方向も併せて示した。正載荷時に加力前面となるのはW側である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 杭頭接合面の曲げモーメント-回転角関係

実験から得られた杭頭接合面の曲げモーメントと回転角との関係を図-5 に示す。本研究では、正載荷時と負載荷時のそれぞれの場合において、杭頭定着筋が圧縮降伏または引張降伏した時点を降伏として示している。なお、杭頭定着筋降伏時のSC杭の鋼管は弾性範囲内であった。

引張軸力を作用させた試験体 A-4 の負載荷時を除くと、全試験体が  $\pm 5/1000\text{rad}$  のサイクルで降伏を迎えた。この時、圧縮軸力を作用させた試験体は、加力前面側の杭頭定着筋が圧縮降伏し、軸力を作用させない試験体は、加力背面側の杭頭定着筋が引張降伏した。試験体 A-4 の負載荷時は、図-4 に示す W 側が引張域になるが、杭頭定

着筋 W と WC は正載荷時に圧縮降伏していたため、 $-10/1000\text{rad}$  のサイクルで杭頭定着筋 C が引張降伏した時点を降伏と判定した。

#### (1) 試験体 A-1, B-1

圧縮軸力を作用させ、プレートに有する試験体 A-1, B-1 は、 $\pm 30/1000\text{rad}$  から  $\pm 60/1000\text{rad}$  の間で耐力が微増し、 $\pm 60/1000\text{rad}$  の 1 サイクル目で最大耐力を記録している。両試験体とも、加力中に大きな音が発生すると同時に、耐力が低下する現象が生じた(図中の□)。杭頭定着筋のひずみの挙動及び試験後の目視確認により、図中の□の時点で、杭頭定着筋とプレートの溶接が破断し、耐力が低下したと考えられる。

#### (2) 試験体 A-3, A-4

圧縮軸力を作用させ、プレートに有さない試験体 A-3, A-4 (A-4 は正載荷時のみ) は、 $\pm 30/1000\text{rad}$  から  $\pm 60/1000\text{rad}$  の間で耐力の増減がほとんどなく、試験体 A-3 は正載荷時に  $30/1000\text{rad}$ 、負載荷時に  $-60/1000\text{rad}$ 、試験体 A-4 は  $60/1000\text{rad}$  のいずれも 1 サイクル目で最大耐力を記録している。

基本試験体である試験体 A-1 の骨格曲線を試験体 A-3 の正載荷と負載荷、試験体 A-4 の正載荷にピンク色の実線で併記した。試験体 A-1 と試験体 A-3 との最大耐力の差は、正載荷で 2.0%、負載荷で 0.3%であった。また、試験体 A-1 と試験体 A-4 との最大耐力の差は、正載荷で 2.3%であった。これより、プレートの有無が最大耐力に与える影響は小さいと考えられる。

#### (3) 試験体 A-2, B-2

軸力を作用させず、プレートに有する試験体 A-2, B-2

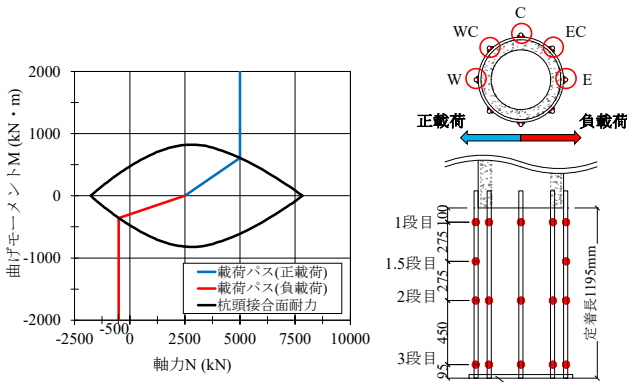
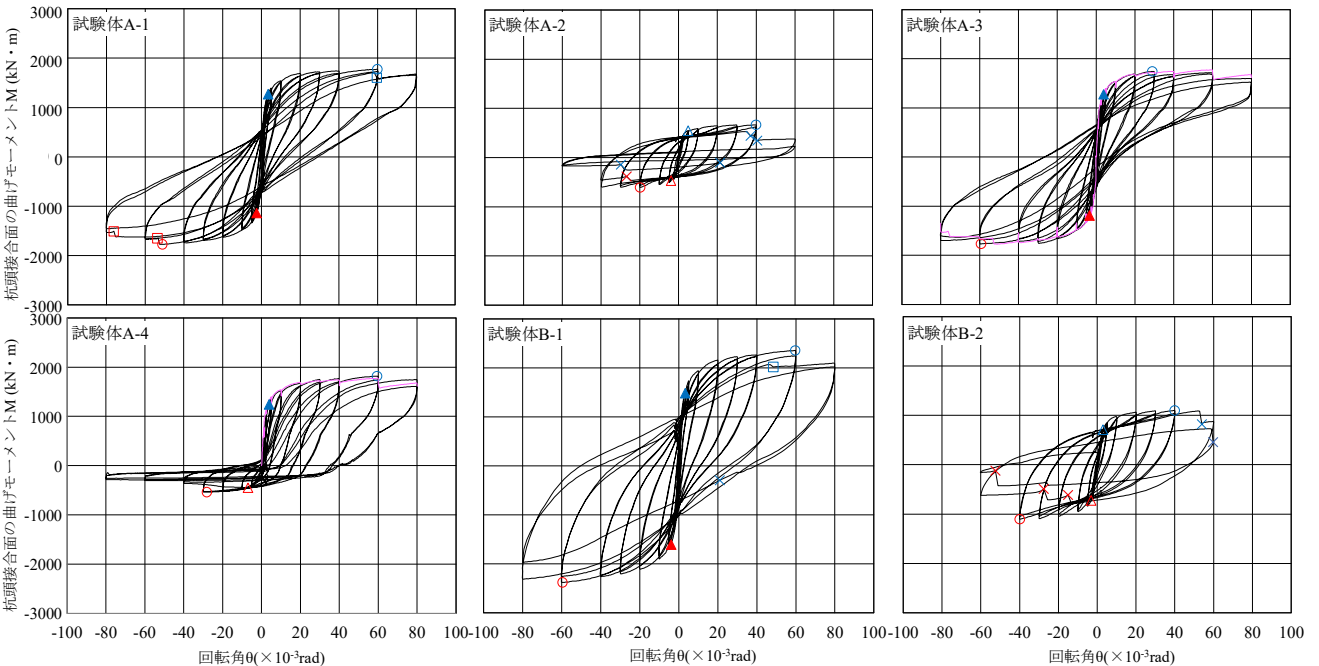


図-3 試験体 A-4 の載荷パス 図-4 試験体 A-1 ひずみゲージ貼付け位置



△: 杭頭定着筋引張降伏 ▲: 杭頭定着筋圧縮降伏 ○: 最大耐力 ×: 杭頭定着筋破断 □: 杭頭定着筋のプレートからの抜出し(推定) 青色は正載荷時、赤色は負載荷時の挙動を示す。ピンク色の実線は試験体A-1の骨格曲線を示す。

図-5 杭頭接合面の曲げモーメント M-回転角  $\theta$  関係

は、 $\pm 20/1000\text{rad}$  から  $\pm 40/1000\text{rad}$  の間で耐力の増減がほとんどなく、試験体 A-2 は正載荷時で  $40/1000\text{rad}$ 、負載荷時で  $-20/1000\text{rad}$ 、試験体 B-2 は正載荷時、負載荷時共に  $\pm 40/1000\text{rad}$  のいずれも 1 サイクル目で最大耐力を記録している。図中の×の時点で、杭頭定着筋が杭頭接合面付近で破断して、耐力が大きく低下した。

### 3.2 ひび割れ発生状況および破壊状況

パイルキャップのひび割れ状況の観察は、各回転角の 1 サイクル目の目標回転角到達毎に行った。ここでは、試験体 A-1 の試験終了時のひび割れ発生状況を図-6 に、S 方向から撮影した写真を写真-1 に示す。図-6 の青線が正載荷時に発生したひび割れ、赤線が負載荷時に発生したひび割れを示す。軸力の有無やプレートの有無に関わらず、どの試験体においても杭および杭頭定着筋の周囲にひび割れが集中して発生し、回転角が大きくなるに従って杭頭定着筋の抜け上がりと共に、杭頭定着筋の周囲のパイルキャップコンクリートがコーン状に浮き上がる破壊状況が確認された。

### 3.3 プレートの影響について

プレートが杭頭定着筋に及ぼした影響について検証する。図-7 に杭頭定着筋 E の各断面におけるひずみを正載荷時の回転角毎に示す。ただし、ひずみ計測値が降伏ひずみに到達した以後や、ひずみゲージが損傷した以後については、その断面のひずみを打点していない。

プレートを有する試験体 A-1 や A-2 の杭頭定着筋の 3 段目のひずみは、 $40/1000\text{rad}$  付近から増加し始め、

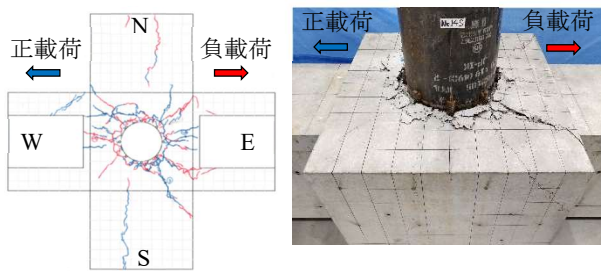


図-6 試験体 A-1 のひび割れ発生状況

写真-1 試験体 A-1 の破壊状況(S方向)

$60/1000\text{rad}$  になると  $1000\mu$  を超えるひずみが生じているが、プレートを有さない試験体 A-4 のひずみは、ほぼ変化していない。

これより、試験体 A-1 と A-2 では、プレートによって杭頭定着筋の先端が固定されている影響が現れており、試験体 A-1 では、杭頭定着筋とプレートの溶接が破断した際に耐力が低下したと考えられる。また、試験体 A-4 では、 $60/1000\text{rad}$  時に杭頭定着筋の先端が上方へ動いている可能性がある。

### 3.4 杭頭定着筋の破断について

写真-2 に試験体 A-2 の杭頭定着筋が破断した際の状況を示す。鉄筋の破断面は、生材が破断する際には破断面にくびれが生じると共に延性波面が生じるが、鉄筋に溶接を施すと破断面にくびれが生じることなく脆性波面が生じ、ひずみ硬化域まで伸びずに破断することが報告されている<sup>3)</sup>。試験体 A-2 においても、くびれが生じずに脆性波面が生じたため、後述する断面解析には鉄筋のひずみ硬化の影響は考慮しないこととした。

### 3.5 試験体仕様と軸力の影響について

図-5 に示した杭頭接合面の曲げモーメント-回転角関係より、以下のことが分かる。パイルキャップのコンクリート強度および杭頭定着筋の仕様を変えた試験体 A-1、A-2 と B-1、B-2 の実験結果を比較すると、試験体 B-1、B-2 の方が大きな杭頭接合面耐力が得られている。

軸力を  $0\text{kN}$  とした試験体 A-2、B-2 と軸力を  $5000\text{kN}$  とした試験体 A-1、B-1 を比較すると、試験体 A-1、B-1 の方が大きな杭頭接合面耐力が得られ、かつ、大きな回転角まで耐力低下が少なかった。

## 4. 杭頭接合面耐力の評価

### 4.1 断面解析方法

本研究では、解析断面の平面保持を仮定した断面分割法により、杭頭接合面耐力を計算した。材料の応力-ひずみ関係は、材料試験結果に基づくバイリニア型とし、コンクリートの引張側は無視、圧縮側は後述する方法で定義した。杭頭定着筋は 3.4 節で述べた破断状況より、

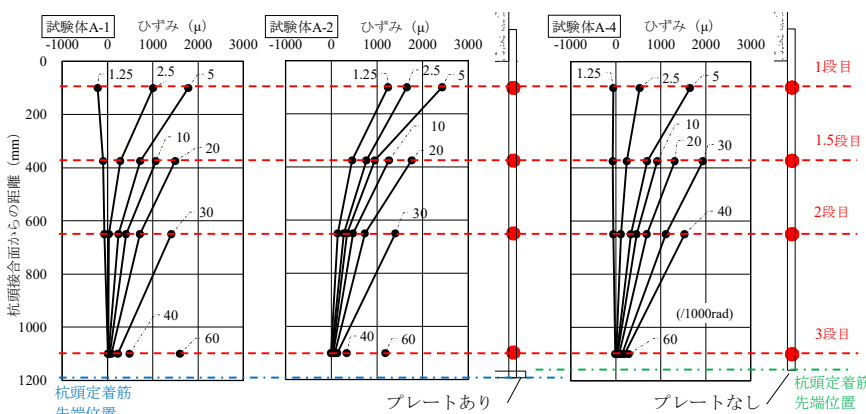


図-7 正載荷時の杭頭定着筋 E の各断面におけるひずみ分布

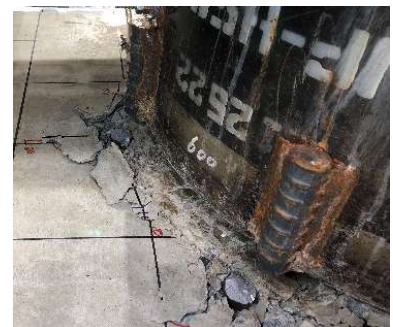
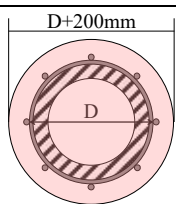
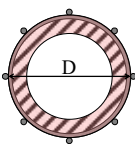
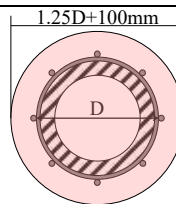
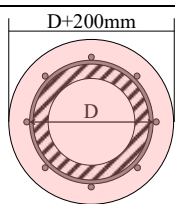
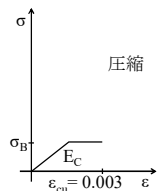
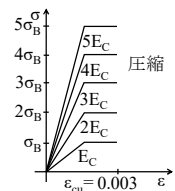
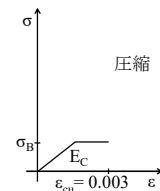
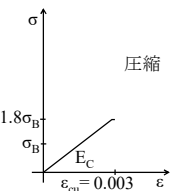
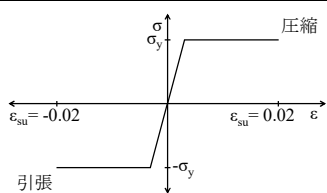


写真-2 試験体 A-2 の杭頭定着筋破断状況



表-4 断面解析方法の概要

方法	方法 A	方法 B	方法 C	方法 D
解析断面の取り方	 円形断面	 円環断面	 円形断面	 円形断面
応力-ひずみ関係	コンクリート 	コンクリート 	コンクリート 	コンクリート 
	杭頭定着筋 			
参考文献	文献 4)	文献 1)	文献 5)	文献 6)

降伏強度  $\sigma_y$ 、終局ひずみ  $\epsilon_{su}$  を 0.02 とした。

杭頭接合面耐力の計算においては、解析断面の取り方とコンクリートの応力-ひずみ関係の設定方法との組合せにより、いくつかの方法が提案されている。本研究で検討した 4 種類の方法を表-4 に示す。各方法の詳細は、参考文献を参照されたい。それぞれの解析に用いる断面は、方法 A、D は杭径  $D$  に 200mm を、方法 C は杭径  $D$  に  $\alpha=0.25D+100\text{mm}$  (ただし  $\alpha \leq 400\text{mm}$ ) を加えた円形断面であり、方法 B は杭と同じ円環断面である。

解析に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係は、方法 A、C はコンクリートの圧縮強度を材料試験で得られた  $\sigma_B$  とする。方法 B は支圧効果を考慮して、支圧係数  $\phi_c$  を用いて圧縮強度を  $\phi_c \cdot \sigma_B$ 、ヤング係数を  $\phi_c \cdot E_C$  とする方法である。参考文献 1) では  $\phi_c=2$  とされているが、本研究では  $\phi_c$  を 1, 2, 3, 4, 5 の 5 種類とした。方法 D は  $E_C$  を変えずに  $\sigma_B$  を 1.8 倍にする方法である。いずれの方法でも終局ひずみ  $\epsilon_{cu}$  は 0.003 とした。

なお、参考文献 1) において、円環断面で支圧効果を考慮する方法は、杭径より大きな断面を仮定する方法と比べて、物理的根拠がより明快であるとされている。

#### 4.2 各解析方法による計算値と実験値との比較

杭頭接合面の軸力と曲げモーメントとの関係について、本研究の実験結果と前述した 4 種類の解析結果とを比較し、図-8 に示す。降伏曲げモーメントの計算値は、圧縮側最外縁のコンクリートが  $\sigma_B$  に達した時、または引張側最外縁の杭頭定着筋が  $\sigma_y$  に達した時の曲げモーメントとした。終局曲げモーメントの計算値は、圧縮側最外

縁のコンクリートが  $\epsilon_{cu}$  に達した時、または引張側最外縁の杭頭定着筋が  $\epsilon_{su}$  に達した時の曲げモーメントとした。なお、試験体 A-3 は試験体 A-1 とほぼ同じ結果が得られたため、ここでは紙面の都合により、試験体 A-3 に関する説明や図を割愛した。

軸力を作用させない試験体 (A-2, B-2) や引張軸力を作用させた試験体 (A-4 の負荷荷) においては、どの解析方法を用いても、断面解析による曲げモーメントの計算値は、終局時、降伏時共に実験値とよく整合している。

しかし、軸力を作用させた試験体 (A-4 の正荷荷, A-1, B-1) は、解析方法による違いが現れた。まず、方法 A の場合は、いずれの試験体においても終局時、降伏時共に計算値は実験値を大きく下回っており、安全側の評価となっている。次に方法 B の場合は、終局時は  $\phi_c=5$  としても計算値は実験値を下回っており、降伏時は  $\phi_c=4 \sim 5$  とすると計算値は実験値とよく整合する。続いて方法 C の場合は、方法 A と同様に、終局時、降伏時共に計算値が実験値を下回っているが、方法 A よりも計算値が実験値に近い。最後に、方法 D の場合は、終局時は計算値が実験値とよく整合しているが、降伏時はどの試験体においても計算値が実験値を上回る結果となった。

以上より、検討した方法の中では、方法 B で  $\phi_c=4 \sim 5$  とすると、実験結果と最も整合性があると考えられる。

#### 5. まとめ

SC 杭がパイルキャップに埋め込まれていない杭頭接合部について、実大スケールの試験体を用いて、試験体

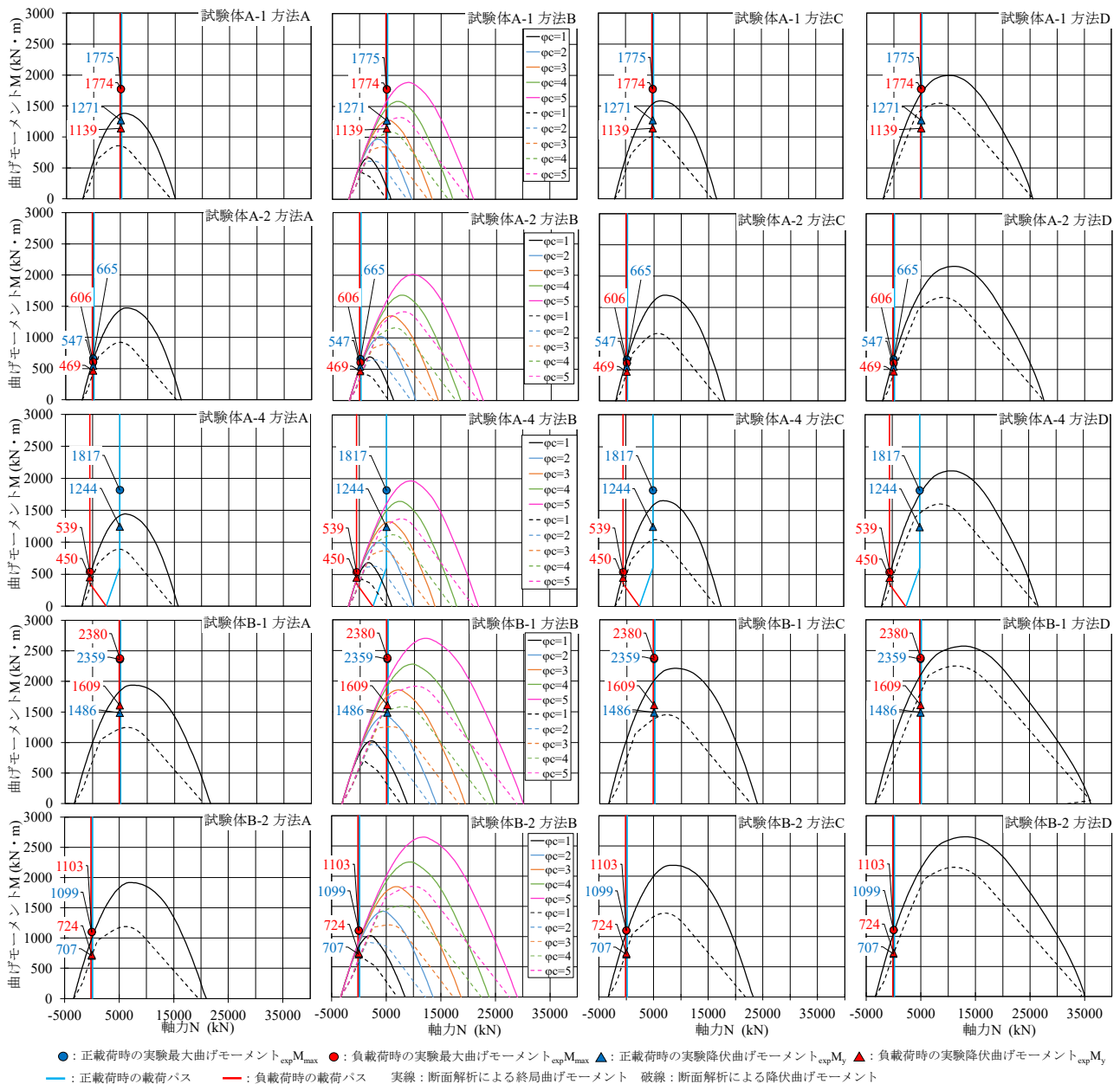


図-8 各断面解析方法で得られた NM 関係と実験値との比較

仕様や軸力をパラメータとして水平加力実験を行い、杭頭接合面耐力を確認した。

解析断面の取り方とコンクリートの応力-ひずみ関係の設定方法との組合せを変えた4種類の方法で杭頭接合面耐力を求め、実験結果と比較した。検討した方法の中では、解析断面は杭と同じ円環断面とし、コンクリート圧縮強度とヤング係数を材料試験値の4~5倍にすると、実験結果と最も整合性があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会: 基礎部材の強度と変形性能, pp.49-53, pp.162-167, 2022.3
- 2) 佐々木聡ほか: アンボンドアンカーを用いた既製コンクリート杭の杭頭半剛接合部の力学的挙動に関

する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.620, pp.81-86, 2007.10

- 3) 森山英治ほか: 場所打ちコンクリート杭の主筋に対する溶接の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.699-700, 2003.9
- 4) 日本建築学会: 建築基礎構造設計例集, pp.190-192, 2004.2
- 5) 土木研究所, 鋼管杭・鋼矢板技術協会, コンクリートパイル建設技術協会: 杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書(杭頭結合部に関する研究), pp.277-279, 2012.3
- 6) 松田 竜ほか: SC 杭頭埋込部の曲げ抵抗機構, 日本建築学会構造系論文集, Vol.85, No.776, pp.1291-1301, 2020.10