

# 既製杭の杭頭半剛接合法 (SRパイルアンカー工法)

Semi-rigid Connection Method on Pile Head for Pre-cast Concrete Piles  
-Semi-rigid Pile Anchor Method-

小林 恒一<sup>\*1</sup>、佐々木 聡<sup>\*2</sup>、小林 勝巳<sup>\*3</sup>、山本 秀明<sup>\*4</sup>、内海 祥人<sup>\*5</sup>、松山 俊樹<sup>\*6</sup>、田中佑二郎<sup>\*7</sup>

## 1. はじめに

近年、水平力が作用した既製杭の杭頭部に生じる曲げモーメントを低減させる半剛接合法について多くの研究開発が行われ、報告されている。杭頭部を半剛接合法とすると、杭頭の固定度が低減され、杭頭に作用する曲げ応力を低下させることができる。その結果、杭断面、基礎梁断面および配筋を合理的に設計できるので、基礎部全体のコストダウンが可能となる。

筆者らは、施工が簡便な半剛接合法として、丸鋼と定着板からなる定着筋を用いたSRパイルアンカー工法を開発し、財団法人日本建築センターの一般評定（BCJ評定-FD0229-01）を取得した。本工法を開発するにあたっては、杭頭接合法の(1)回転剛性、(2)曲げ耐力、(3)変形性能を確認するために、繰返し水平加力実験を行った。本報告では、その実験結果の概要を示すと共に、実験結果をもとに、杭頭接合法の終局曲げ強度、および、接合法の曲げモーメント-回転角関係について検討した結果を示す。

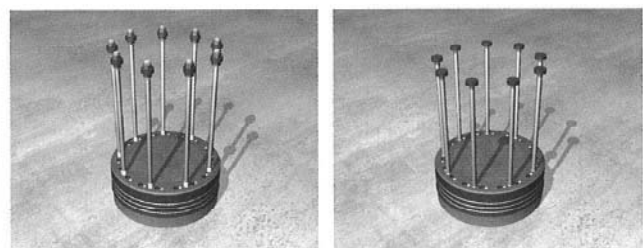
## 2. 工法概要

本工法（SRパイルアンカー工法；Semi-rigid Pile Anchor Method）の概要を図-1に示す。本工法は、既製コンクリ

ート杭（PHC杭、PRC杭）の杭頭接合部に適用するものである。主要部材は、定着筋（防錆処理を施したスタッド溶接用鉄筋または、ねじ込み用鋼材）の先端に定着板を設けたアンボンドアンカーを接合した部材であり、そのアンボンドアンカー部材を杭頭部端版に①ねじ込み接合または②スタッド溶接接合により接合するものである。

本工法は、アンボンドアンカーの伸びによる回転を利用した半剛接合法であり、水平力を受けた時に杭頭に生じる曲げモーメントを、杭頭固定の場合に比べて低減することができる。以下に、その特長を示す。

- ・異形鉄筋を用いて定着接合する工法と同様に容易な施工
- ・杭種変更、杭径のサイズダウン等によるコストダウンが可能
- ・基礎梁の配筋量の削減が可能



①ねじ込み接合                      ②スタッド溶接接合  
図-1 SRパイルアンカー工法概要図

\*1 KOBAYASHI Koichi：ジャパンパイル株式会社 技術開発部 主席技師

\*2 SASAKI Satoshi：株式会社フジタ 技術センター 建築研究部 主任研究員

\*3 KOBAYASHI Katsumi：株式会社フジタ 技術センター 建築研究部長

\*4 YAMAMOTO Hideaki：株式会社フジタ 建築本部 建築技術統括部 技術部

\*5 UTSUMI Yoshito：岡部株式会社 開発本部

\*6 MATSUYAMA Toshiki：岡部株式会社 開発本部

\*7 TANAKA Yujiro：ジャパンパイル株式会社 技術開発部

### 3. 実験概要

図-2に試験体の概要を示す。本試験体の杭頭接合部先端に定着板を有する定着筋(丸鋼)を既製杭の端板にスタッド溶接し、パイルキャップと接合する方式とした(図-2(c)参照)。試験体は計6体とし、実験因子は①軸力(-500kN、0kN、1500kN、3000kN)、②杭種(SC杭、PRC杭)、③杭径(径500mm、径600mm)とした。軸力は、長期軸力を想定して1500kN、さらに短期荷重時に作用する軸力として-500kN、0kN、3000kNを想定した。試験体の諸元を表-1に示す。

定着板を設けた定着筋を、杭頭端板外縁部より30mm内側の位置に均等間隔でスタッド溶接を行った。コンクリート打設は、試験体を水平に設置し、パイルキャップ側面より行った。また、杭頭のパイルキャップへののみみ深さは100mmとした。

パイルキャップのコンクリートには設計基準強度が27N/mm<sup>2</sup>の普通コンクリート(早強セメント)を用いた。定着筋にはSNR490Bを用い、パイルキャップのはかま筋およびフープ筋にはSD345を用いた。コンクリートおよび使用材料(定着筋、異形棒鋼)の力学的特性を表-2、3に示す。

加力方法は、パイルキャップをPC鋼棒で固定した片持ち梁形式とした。加力プログラムを表-4に示す。なお、図-3に示すように、水平力による曲げモーメントと軸力による付加曲げモーメントを累加して、接合部の曲げモーメント(M)を求めた。また、接合部の回転角( $\theta$ )の計測は、杭頭接合部近傍に取付けた変位計の値、杭端部のひずみ度を用いて算出した。

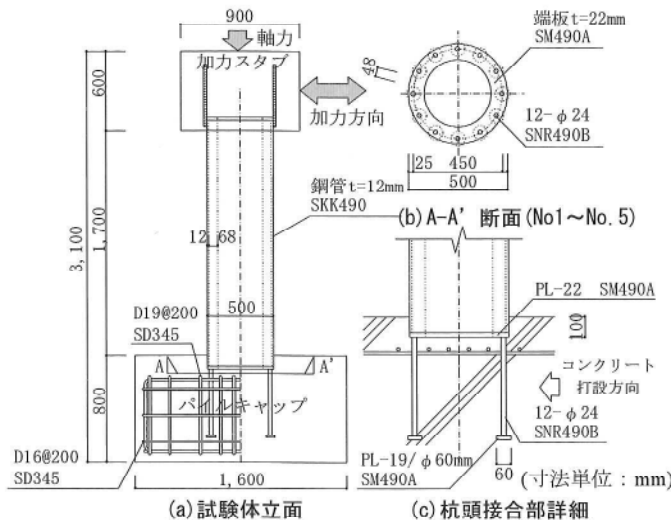


図-2 試験体の形状および寸法

表-1 試験体の諸元

試験体名	杭種	杭径(mm)	定着筋	定着長	軸力(kN)	シスポン比 M/(QD)
No.1	SC	500	12-φ24	20d <sub>b</sub> <sup>*1</sup>	0	4
No.2					1500	
No.3					3000	
No.4					-500	
No.5	PRC	600	16-φ24		1500	3.3
No.6					0	

\*1 d<sub>b</sub>:定着筋径

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体位置	試験体番号	圧縮強度σ <sub>B</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 <sup>*2</sup> (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
パイルキャップ	No.1~6	37.8	2.39	0.20	3.2
SC杭	No.1~4	89.5			
PRC杭	No.5,6	96.8			

\*2 1/3σ<sub>B</sub>時の割線による

表-3 定着筋と異形棒鋼の力学的特性

鉄筋の種類	試験体の位置	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
定着筋(φ24)	定着筋	363	537	2.15	28.8
異形棒鋼(D19)	パイル	377	590	1.90	17.0
異形棒鋼(D16)	キャップ	370	558	1.85	17.6

表-4 加力プログラム

段階	制御量	繰返し回数
P1	1/1000(rad)	1
P2	1/450(rad)	1
P3	1/400(rad)	1
P4	1/200(rad)	1
P5	1/100(rad)	2
P6	2/100(rad)	2
P7	3/100(rad)	2
P8	5/100(rad)	1
P9	破壊に至るまで	

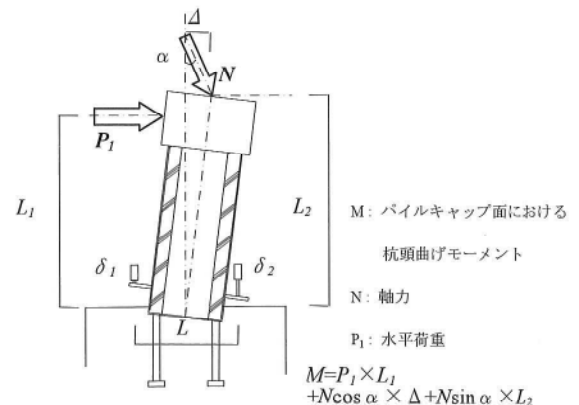


図-3 曲げモーメント(M)の算出方法

#### 4. 実験結果

表-5に実験結果の一覧を示す。実験終了時の試験体の状況を写真-1に、加力時のひび割れ状況を図-4に示す。また、図-5には各試験体の接合部曲げモーメント(M)-接合部回転角( $\theta$ )関係を示す。

杭径500mmのSC杭を用いた試験体No.1~4の最大荷重を決定する破壊モードは、杭頭接合部の定着筋が伸び出す形式の曲げ破壊であった。破壊までの過程は、水平力の増加に伴い、杭体とパイルキャップのコンクリートとの間に肌分かれが生じ、図-4に示すようにパイルキャップの表面に杭体を中心としたひび割れが若干発生した。その後、図-5(a)~(d)に示すように、曲げ引張側の定着筋に引張降伏が生じた後、杭頭接合部の曲げ剛性が低下した。さらに変形が進むと、定着筋のひずみ量およびパイルキャップの表面のひび割れが増大し、最大曲げモーメントに達した。試験体No.1~4のM- $\theta$  関係を比較すると、軸力が増大するにつれ、降伏曲げモーメントおよび最大曲げモーメントも大きくなっていることが分かる。さらに、試験体において最外縁の定着筋が降伏した後、1/20rad.程度の大変形時においても、変形の増大に伴う曲げ耐力の低下がほとんど無いことが確認された。なお、試験体No.4では最終サイクルにおいて1/20rad.以上に回転角が達したときに、定着筋が破断したと思われる音とともに、杭頭曲げモーメントが低下した。

杭径600mmのPRC杭を用いた試験体No.6の破壊モードは、試験体No.1~4と同様に、杭頭接合部の定着筋が伸び出す形式の曲げ破壊であった。図-5(f)に示すように、定着筋降伏後も、変形の増大に伴った急激な曲げ剛性低下は認められず、No.1~4のSC杭の試験体と同様に、1/20程度の大変形時においても急激な曲げ耐力の低下は認められなかった。加力終了後に試験体No.6の杭頭接合部を観察した結果、補強バンドでの損傷は確認されなかった。一方、杭径500mmのPRC杭を用いた試験体No.5の破壊モードは、杭頭部の補強バンドの縞鋼板が座屈したことによる杭体の曲げ破壊であった。水平力の増大に伴った曲げ圧縮力により、縞鋼板が座屈したと考えられる。

図-6に軸力の異なる試験体No.1~4のM- $\theta$  関係の包絡線を示す。同図より、軸力が小さい試験体ほど、杭頭接合部の回転剛性も小さくなることが確認された。言い換えると、軸力が低下するにつれ、杭頭接合部の回転剛性が小さくなることが確認された。

表-5 実験結果一覧

試験体	加力方向	最大せん断力	最大曲げモーメント	破壊モード
		実験値 (kN)	実験値 (kNm)	
No.1	正	245	490	接合部 曲げ破壊
	負	227	454	
No.2	正	337	820	接合部 曲げ破壊
	負	329	791	
No.3	正	402	1103	接合部 曲げ破壊
	負	431	1073	
No.4	正	221	400	接合部 曲げ破壊 <sup>*3</sup>
	負	209	368	
No.5	正	264	687	杭体 曲げ破壊 <sup>*4</sup>
	負	305	776	
No.6	正	383	765	接合部 曲げ破壊
	負	381	762	

\*3 最終加力サイクルにおいて定着筋の破断音を確認

\*4 縞鋼板の座屈を確認

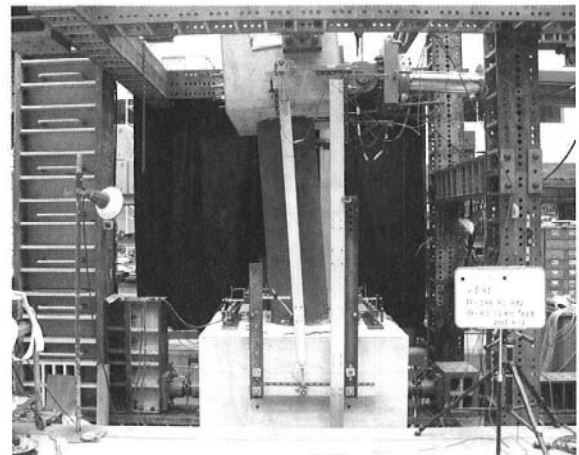


写真-1 試験終了後の状況 (No.1)

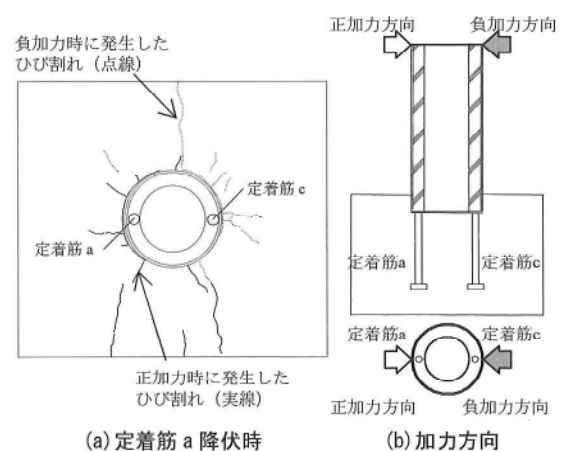


図-4 パイルキャップ表面のひび割れの例 (試験体 No.1)

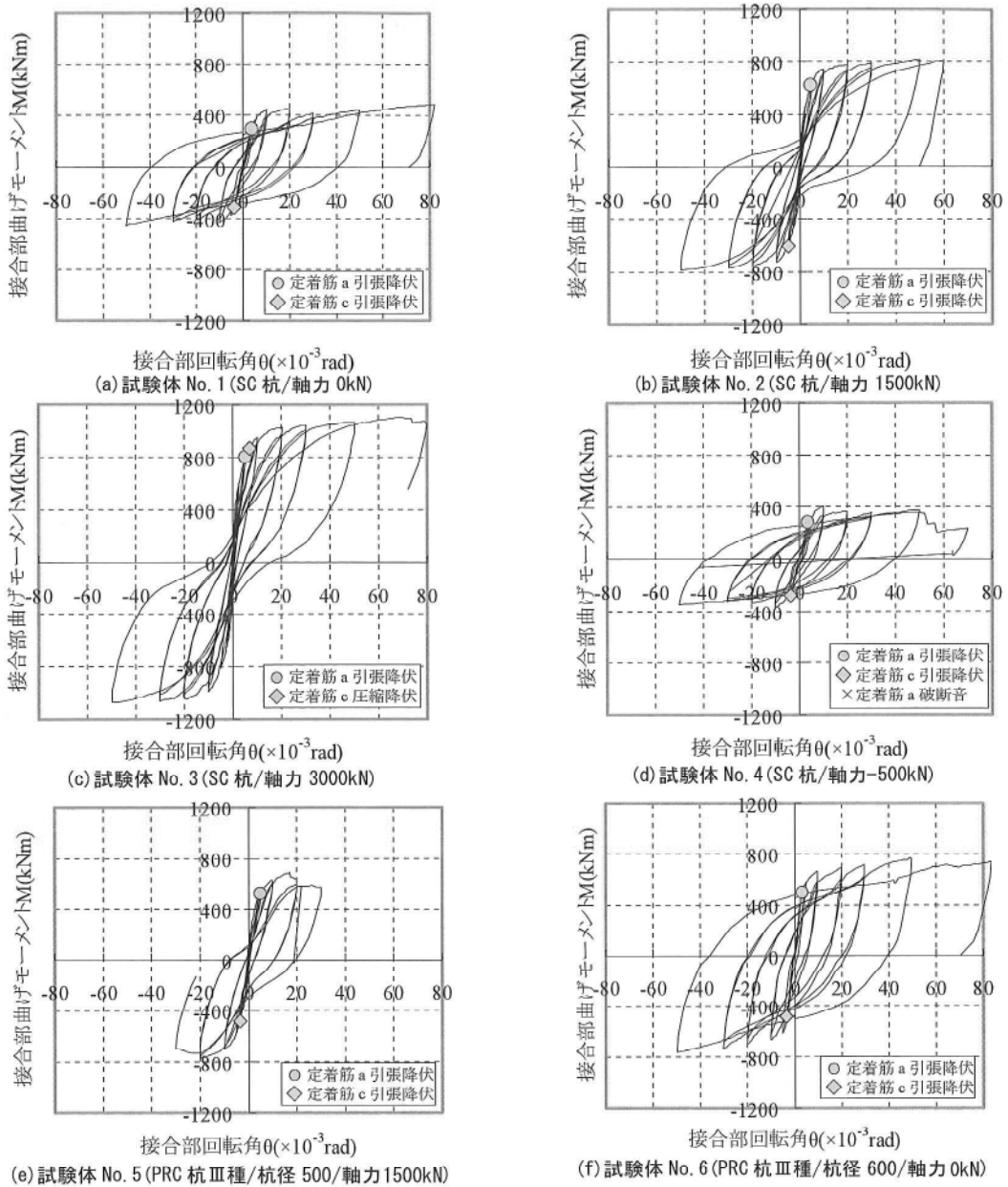


図-5 M-θ関係

## 5. 杭頭接合部の曲げ強度

### 5.1 杭頭接合部の有効断面

杭頭接合部の曲げ強度の検討の際、応力の拡がり、コンクリートの支圧効果等を考慮し、接合部の有効断面積に杭断面積よりも大きい仮定の円柱・円環を仮定する方法が慣用的に行われている。しかしながら、本研究では、後述のように接合部が杭頭部で回転することを考慮するので、図-7に示す杭頭接合部の有効断面積を仮定して検討を行う。

### 5.2 コンクリート圧縮強度の割増係数と最大曲げ強度

定着筋のひずみ硬化とコンクリートの支圧効果を考慮

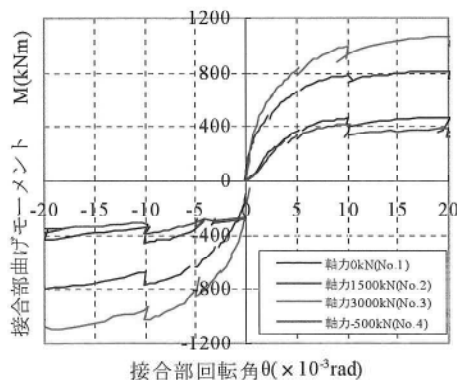


図-6 M-θ関係包絡線の比較

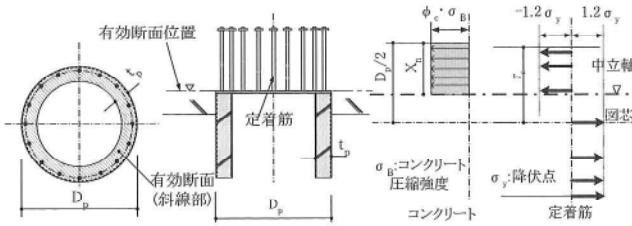


図-7 杭頭接合部の有効断面

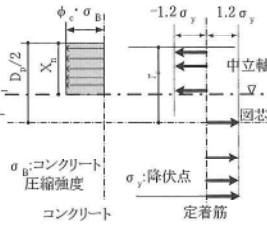


図-8 最大曲げ強度時の応力分布

し、図-8に示す応力分布を仮定して、最大曲げ強度について検討する。支圧効果によるコンクリートの圧縮強度の割増係数( $\phi_c$ )を変化させて算定した最大曲げ強度の計算値と本実験結果とを比較して図-9に示す。同図によるとコンクリートの圧縮強度を $3\sigma_B$  ( $\phi_c=3$ )とした時の計算値が実験値と良い対応を示している。上記計算法による最大曲げ強度の計算値と既往の実験データとを比較して図-10に示す。計算値は、実験値を安全側に評価する傾向にあるが、実験値と計算値との対応はほぼ良好である。

よって、本研究では、杭頭接合部の曲げ強度の評価にあたり、支圧効果によるコンクリートの圧縮強度の割増係数( $\phi_c$ )を3として検討を行う。

### 5.3 定着筋の降伏時の曲げ強度

定着筋に完全弾塑性、コンクリートに割増係数 ( $\phi_c$ ) を考慮したe関数の応力度( $\sigma$ ) - ひずみ度( $\epsilon$ )関係を仮定した曲げ解析を行い、定着筋降伏時の曲げ強度について検討する。仮定した $\sigma - \epsilon$ 関係を図-11に示す。なお、本研究の実験結果では、接合部のモーメント-回転角関係が $1/20\text{rad}$ 程度の大変形時においても、変形の増大に伴う曲げ耐力の低下が見られなかったことから、解析に用いるコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係は強度低下が生じないモデルを仮定した。本実験の定着筋の降伏時の曲げ強度の実験データと解析結果とを比較して図-12に示す。計算値は、作用軸力に関わらず実験値を安全側に評価している。

## 6. 接合部のモーメント-回転角関係の評価

### 6.1 接合部の回転変形機構

杭頭接合部の回転変形機構のモデルを図-13に示す。回転中心は断面の中立軸とし、曲げ引張側の定着筋のひずみが長さ方向に一様とすると、接合部の回転角 ( $\theta_j$ ) は式(1)で与えられる。

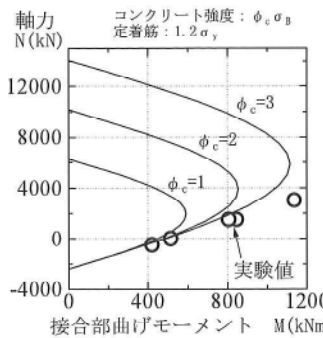


図-9 最大曲げ強度の計算値と本実験値との比較

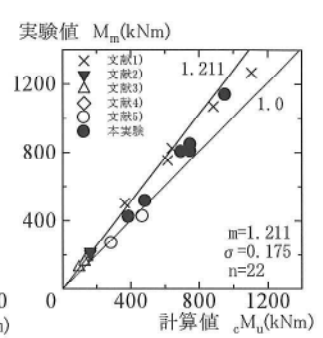


図-10 最大曲げ強度の計算値と既往の実験値との比較

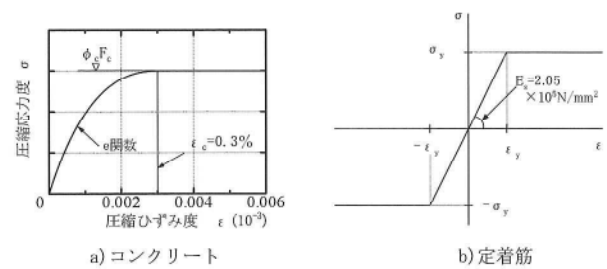


図-11 曲げ解析に用いた応力度-ひずみ度関係

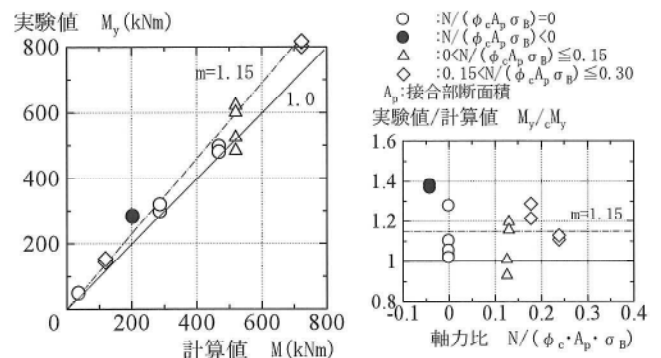


図-12 曲げ降伏強度の実験値と計算値との比較

$$\theta_j = \frac{\Delta b}{D_p/2 + r_s - X_{n0}} \quad (\Delta b = \epsilon \cdot L_b) \quad \dots\dots\dots (1)$$

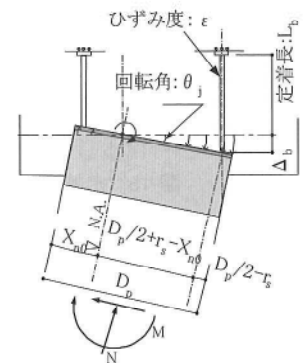


図-13 杭頭接合部の回転機構

ここで、 $D_p$ は杭径、 $r_s$ は杭芯から定着筋までの距離、 $X_{n0}$ は圧縮縁から中立軸までの距離、 $\epsilon$ は引張側最外縁の定着筋のひずみ度、 $L_b$ は定着筋の埋め込み長さである。

定着筋の引張降伏時のひずみ分布の例を図-14に示す。同図中には、解析により算定されるひずみ分布および中

立軸位置を併せて示す。解析値の中立軸位置、ひずみ分布共に、実験結果と良好に対応している。また、定着筋が曲げ引張時の長さ方向のひずみ分布を図-15に示す。定着筋とパイルキャップのコンクリートとの間には、ほとんど付着応力がなく、定着筋は長さ方向にほぼ様なひずみ分布を示している。これらより、式(1)で示す回転角の算定法およびその前提条件はほぼ妥当と考えられる。

### 6.2 接合部のモーメント-回転角関係

図-16に接合部の曲げモーメント(M)-回転角( $\theta_j$ )関係の実験値と計算値とを比較して示す。M- $\theta$ 関係の計算値は、曲げ解析の各解析ステップの曲げモーメントと、中立軸位置および定着筋のひずみ度を式(1)に適用して算定した回転角との関係を示す。M- $\theta$ 関係の計算値は、作用軸力にかかわらず、実験値の剛性および耐力を比較的精度良く評価している。

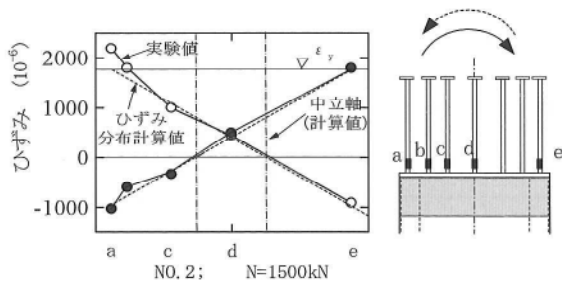


図-14 定着筋のひずみ分布 (断面方向)

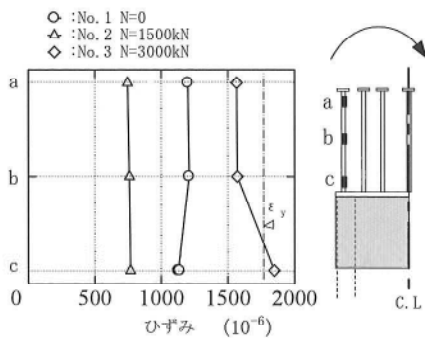


図-15 定着筋のひずみ分布 (軸方向)

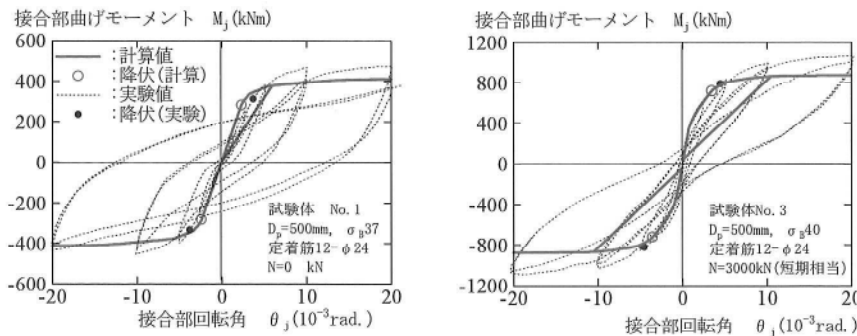


図-16 M- $\theta$ 関係の実験値と計算値との比較

## 7. まとめ

SRパイルアンカー工法の開発実験として実施した繰返し水平加力実験ならびにその実験結果に基づいた接合部の曲げ強度および曲げモーメント-回転角関係について検討して得られた知見を以下にまとめて示す。

- (1) 軸力が低下するにつれ、杭頭接合部の回転剛性が小さくなることが確認された。
- (2) 最外縁の定着筋が降伏した後、1/20rad程度の大変形時においても、変形の増大に伴う耐力低下は無く、杭頭接合部の変形性能が確保されていることが確認された。
- (3) 接合部の最大曲げ強度および降伏曲げ強度は、コンクリートの支圧効果による強度割増係数を3とした計算法で適切に評価することができた。
- (4) 接合部のモーメント-回転角関係は、解析により算定される曲げモーメントと中立軸を回転中心とし曲げ引張側の定着筋が一様に伸び出すと仮定した機構モデルを用いて概ね予測できる。

### 【参考文献】

- 1) 川合弘之, 稲田修, 他: SC杭を使った杭頭接合部に関する実験 (その1)(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I, pp.1551~1554, 1990.
- 2) 小嶋一好, 永井興史郎, 他: 基礎スラブと接合したPHC杭の曲げ性能に関する実験的研究, (その1)(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I, pp.529~532, 2002, (その3)(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I, pp.631~634, 2003.
- 3) 榎並昭, 岡田満, 他: アンカーボルト工法による杭とフーチングの接合部の曲げ耐力試験, (その1)~(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I, pp.1621~1626, 1994.
- 4) 橋本一也, 豊岡恒夫, 他: 杭頭接合部に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I, pp.1037~1038, 1995.
- 5) 平出務, 杉村義広, 大杉文哉: アンボンド型スタッド鉄筋を用いたPHC杭の杭頭接合法の力学特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第581号, pp.71~78, 2004.7.