

既製杭の杭頭半剛接合部の曲げモーメント－回転角関係の評価 － SR パイルアンカー工法の開発－

佐々木 聡 小林 勝己
山本 秀明 ^{*1}

概 要

近年、建築分野において、杭頭接合部の半剛接合工法に関する研究開発が、幾つか行われている。これらは、杭頭を半剛接合部とすると、応力の厳しい杭頭の曲げモーメントが低減され、基礎部分躯体数量の低減によるコストダウンが可能になることを意図している。

本研究は、既製杭の半剛接合工法の研究開発の一部であり、定着板を有する付着のない丸鋼を用いた杭頭接合工法の力学的挙動について検討を行った。本報告では、実大の杭頭接合部の水平加力実験の概要とその検討結果について示している。実大実験により、本接合部は、回転角が $1/20\text{rad}$ まで耐力低下の少ない優れた力学性能を持つことが確認された。また、パイルキャップのコンクリートの拘束効果を考慮した非線形曲げ解析をベースにした方法で、杭頭接合部の曲げモーメント－回転角関係を比較的精度良く評価することができた。

Study on the Relationship between Moment and Rotation for Semi-rigid Connections on
Pile Heads for Pre-cast Concrete Piles
・ Development of a Semi-rigid Connecting Method on Pile Heads for Pre-cast Concrete Piles ・

Abstract

Recently, several methods have been developed to improve the performance of semi-rigid connections on pile heads by reducing the stress on pile heads and decreasing the cost of foundation works.

This study was carried out as a part of research into the semi-rigid connecting method for pile heads on pre-cast concrete piles. This paper describes the mechanical behavior of the pile heads connected using un-bonded round steel bars with an anchor plate. Full-scale loading tests and numerical analysis were carried out to estimate the complicated behaviors of this type of connection. As a result, it was confirmed that the connection developed retains its bending capacity at rotational angles of less than $1/20$ radian. The prediction result based on the flexural analysis, which modeled the confined effect and non-linear stress - strain characteristics of the concrete, corresponded closely to the relationship between the bending moment and the rotation observed in the full scale tests.

キーワード: 杭頭接合部, 既製杭, 半剛接合,
曲げ強度, 回転性能

*1 建築本部 建築技術統括部 技術部

§1. はじめに

近年、既製杭の杭頭部の半剛接合工法についていくつかの研究開発が行われ、報告されている。杭頭部を半剛接合部とすると、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、基礎部分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工法を実現することを意図して、図1に示す丸鋼と定着板からなる定着筋の伸びにより回転変形が生じる工法について検討を行った。この工法では、定着筋と杭頭部端板との接合は、スタッド溶接、または、ねじ込みにより行われる。

本研究では、杭頭接合部の①回転剛性、②曲げ強度、ならびに、③変形性能を確認することを目的に、繰返し水平加力実験を行った。本報告では、その実験概要と杭頭接合部の曲げモーメントー回転角関係の評価法について示す。

§2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、既製杭とパイルキャップからなる実大試験体6体である。主な実験因子は①軸力(-500～3000kN)、②杭種(SC 杭,PRC 杭)、③杭径(径 500,mm 600mm)とした。圧縮軸力は、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 3000kN を想定した。試験体の諸元を表 1 に示す。

図2に試験体の形状および寸法を示す。杭頭接合部は、定着板を有する定着筋を、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により接合する形式とした。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、杭頭のパイキャップへののみ込み高さは 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^2 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 を使い、パイルキャップのはかま筋およびフープ筋にはそれぞれ SD345(D19)、SD345(D16) を用いた。コンクリートおよび鋼材の力学的特性を表 2, 表 3 にそれぞれ示す。

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_B (N/mm^2)	ヤング係数* ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	ポアソン比	割裂引張強度 (N/mm^2)
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			

*1 $1/3 \sigma_B$ 時の割線による

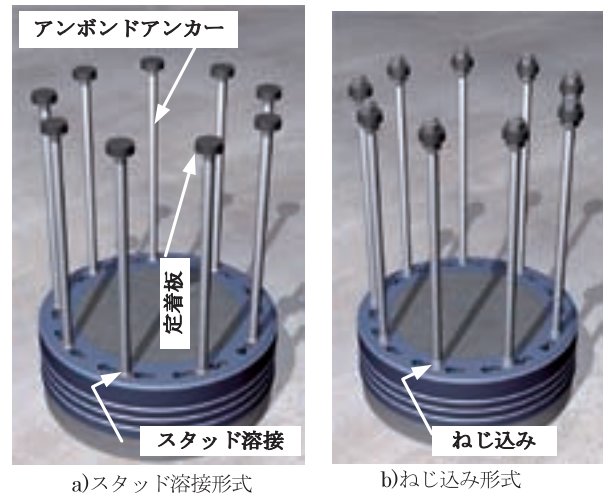


図 1 SRパイルアンカー工法の概要

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)	スパン比 M/(QD)
No.1	SC	500	12- ϕ 24	20 d_b *1	0	4
No.2					1500	
No.3					3000	
No.4					-500	
No.5	PRC	600	16- ϕ 24		1500	3.3
No.6	III種				0	

*1 d_b : 定着筋径

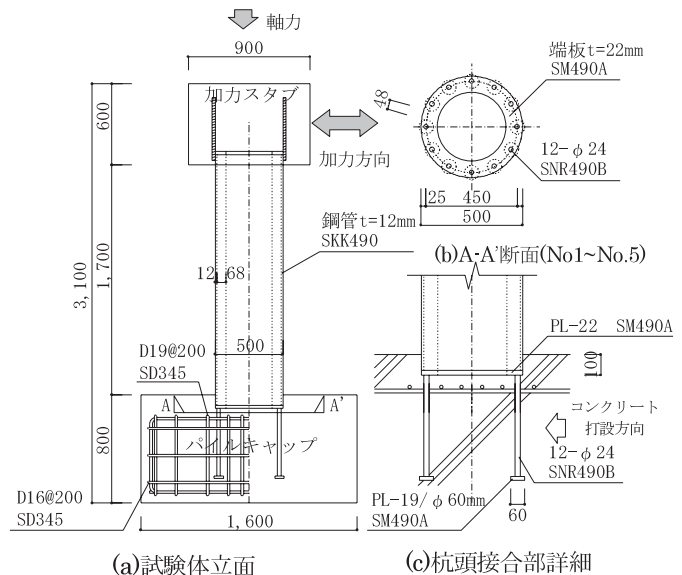


図 2 試験体の形状および寸法

表 3 定着筋と異形棒鋼の力学的特性

試験体名	試験体の位置	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)	伸び (%)
定着筋(ϕ 24)	定着筋	363	537	2.15	28.8
異形棒鋼(D19)	パイル	377	590	1.9	17
異形棒鋼(D16)	キャップ	370	558	1.85	17.6

2.2 加力および測定方法

加力方法は、パイルキャップをPC 鋼棒で反力フレームに固定した片持ち梁形式とした。加力時の作用軸力は、一定軸力とし、水平加力は、杭頭接合部の回転角を制御して行った。加力プログラムを表4に示す。

杭頭接合部の曲げモーメント(M)は、図3に示すように、水平力による曲げモーメントと加力点の変位および軸力により生じる付加曲げモーメントを考慮して算出した。接合部の回転角(θ)は、杭頭端部の軸方向変位から算出した。

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	

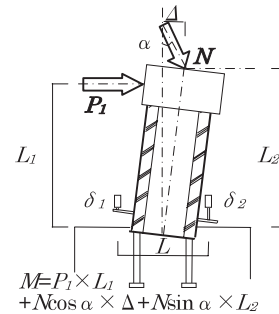


図3 曲げモーメント(M)の算出方法

3.1 実験結果の概要

実験結果の一覧を表5に示す。図4にパイルキャップのひび割れ状況例を示す。また、図5に杭頭接合部の曲げモーメント(M)と接合部回転角(θ)との関係を示す。なお、同図中に示す定着筋の降伏は、定着筋に貼付したひずみゲージの値より判定し、正負加力時ともに最外縁定着筋の引張降伏を示す。

試験体 No.1～4,6 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であった。特に引張軸力が作用した試験体 No.4 は、最終加力サイクルにおいて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急激に低下した。破壊までの過程は、いずれの試験体においても、曲げ引張側の定着筋が降伏するまでは、剛性低下がほとんど見られず、定着筋が引張降伏した後は、杭頭接合部の曲げ剛性が若干低下するとともに、定着筋の伸び量が顕著になり、最大曲げモーメントに達した。PRC 杭を用いた試験体 No.5 は定着筋が降伏した後、3/100rad.の加力サイクルにおいて杭の補強バンドの局部座屈が確認され、それに伴う荷重低下が見られた。

パイルキャップのひび割れ状況は、図4に例示するように、定着筋が降伏するまでは、杭を中心としたひび割れが多少生じる程度であった。その後の漸増の繰返し载荷により、ひび割れの発生、幅の増大が見られ、最終的には、杭をのみ込む部分のコンクリートの剥離が見られた。しかしながら、これらのコンクリートの損傷は、接合部の曲げモーメント－回転角関係に明確な影響は与えていなかった。

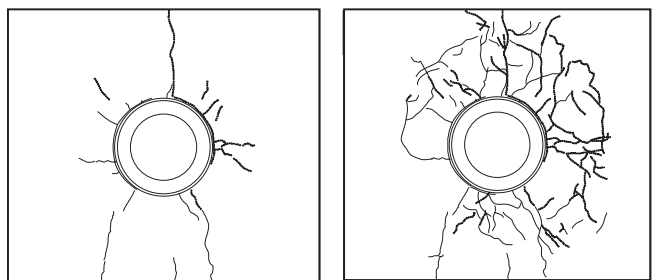
試験体 No.1～4 の M- θ 関係を比較すると、軸力が増大するにつれ、降伏曲げモーメントおよび最大曲げモーメントも大きくなっていることが分かる。また、各試験結果において最外縁の定着筋が降伏した後、1/20rad.程度の大変形時においても、急激な剛性および耐力の低下が生じていない。このことから、定着筋の伸び出しが生じる本工法の接合部は、優れた変形性能を有するといえる。

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 ^{*3}
	負	209	368	
No.5	正	264	687	杭体 曲げ破壊 ^{*4}
	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} 縦鋼板の座屈を確認



a)定着筋降伏時(1/200rad)

b)実験終了時

図4 パイルキャップのひび割れ状況例(No.1)

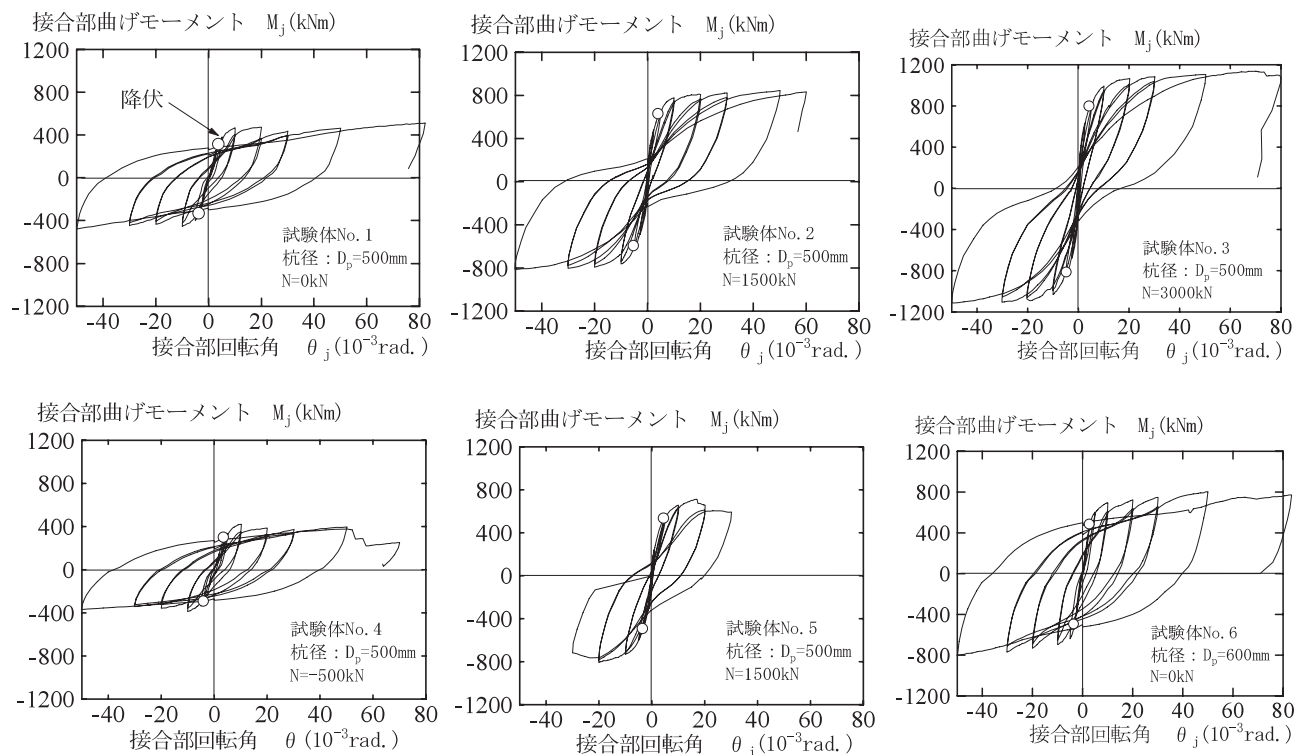


図 5 接合部のモーメント(M)－回転角(θ)関係

3.2 杭頭接合部の力学的挙動

3.2.1 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想の円柱あるいは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、後述のように杭頭接合部が回転することを考慮するので、図 6 に示す杭頭接合部の有効断面積を仮定して検討を行う。

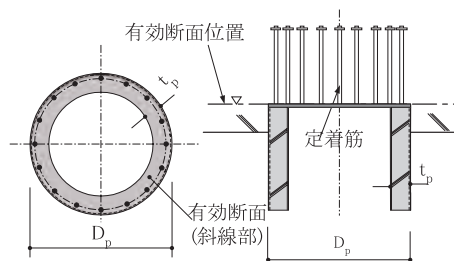


図 6 杭頭接合部の有効断面

3.2.2 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し、図 7 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 (ϕ) 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 8 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好に対応を示している。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 9 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 (ϕ) を 3 として検討を行う。

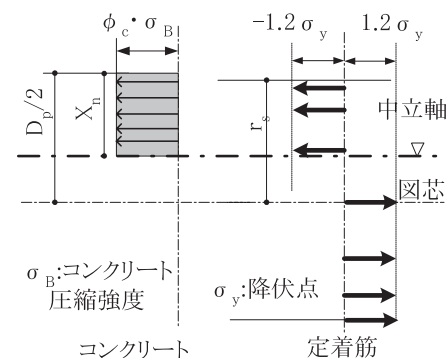


図 7 最大曲げ強度時の応力分布

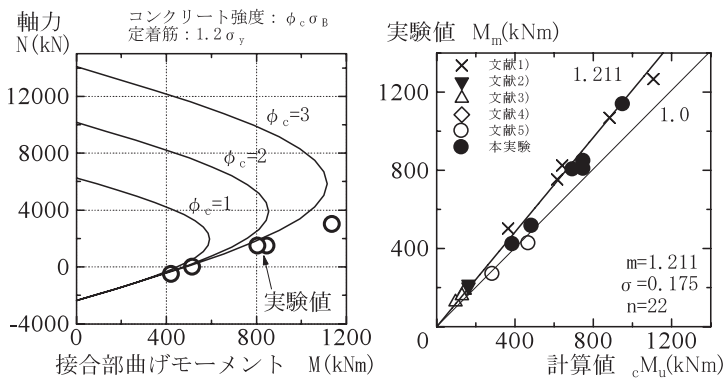


図8 最大曲げ強度の計算値と
本実験値との比較

図9 最大曲げ強度の計算値と
既往の実験値との比較

3.2.3 定着筋の降伏時の曲げ強度

定着筋に完全弾塑性性、コンクリートに割増係数(ϕ_c)を考慮した e 関数の応力度(σ)－ひずみ度(ϵ)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 10 に示す。なお、本研究の実験結果では、接合部の曲げモーメント－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。

定着筋の降伏時の曲げモーメントの実験値と計算値とを比較して図 11 に示す。計算値は、作用軸力にかかわらず実験値をほぼ安全側に評価している。

3.2.4 接合部のモーメント－回転角関係の評価

(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 12 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樣とすると、接合部の回転角(θ_j)は次式で与えられる。

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

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、 ϵ 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 13 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。

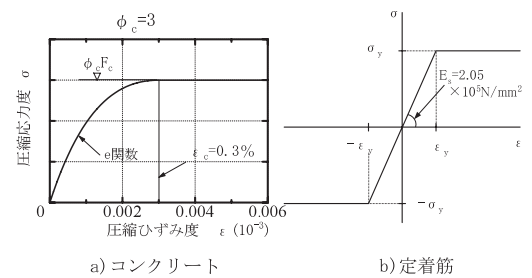


図 10 曲げ解析に用いた
応力度－ひずみ度関係

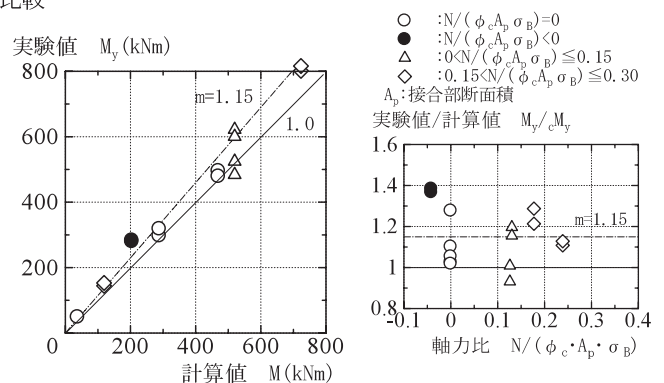


図 11 曲げ降伏強度の実験値と計算値との比較

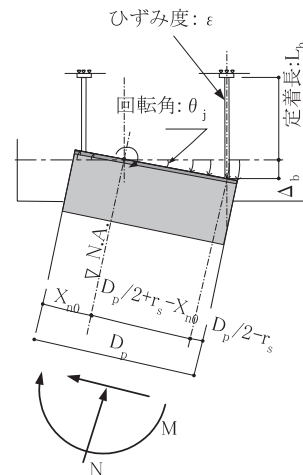


図 12 杭頭接合部の回転機構

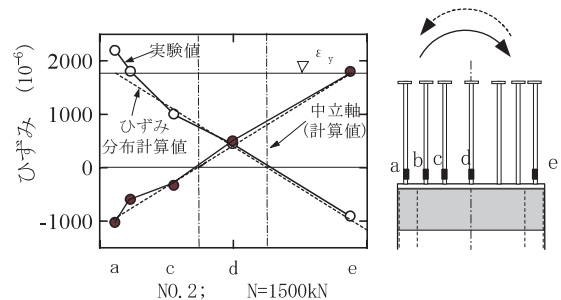


図 13 定着筋のひずみ分布(断面)

また、定着筋が曲げ引張時の長さ方向のひずみ分布を図 14 に示す。定着筋は長さ方向にほぼ様なひずみ分布を示し、定着筋とパイルキャップのコンクリートとの間には、ほとんど付着力がないことがわかる。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。

(2) 接合部のモーメント—回転角関係

図 15 に接合部の曲げモーメント(M)—回転角(θ)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)に代入して求め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。

§4. まとめ

定着板を有する付着のない丸鋼を用いた杭頭接合部の水平加力実験を行い、接合部の曲げモーメント—回転角関係について検討した。実験および解析的検討で得られた知見をまとめて以下に示す。

- (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、 $1/20\text{rad.}$ 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樣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。

謝 辞 SR パイルアンカー工法の開発は、株式会社フジタ、ジャパンパイル株式会社、岡部株式会社により、共同で行われた。関係諸氏には、多大なるご支援、有益なご意見を戴きました。ここに記して深謝します。

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), AIJ 大会, pp.1551~1554, 1990 年 10 月
- 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), pp.529~532, AIJ 大会 2002 年, (その 3)~(その 4) pp.631~634, AIJ 大会, 2003 年

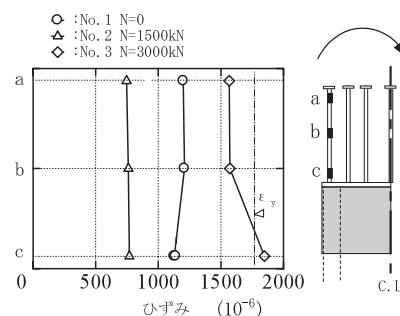


図 14 定着筋のひずみ分布 (軸方向)

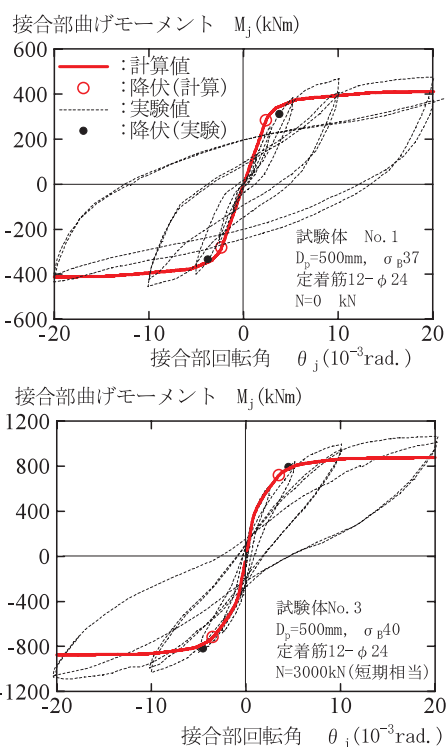


図 15 $M-\theta$ 関係の実験値と計算値との比較

- 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), pp.1621~1626, AIJ 大会 1994 年
- 4) 橋本一也, 豊岡恒夫, 他: 杭頭接合部に関する研究, pp.1037~1038, AIJ 大会, 1995 年
- 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 年 7 月



佐々木 聡

ひとこと

本工法の杭頭接合部に関して、比較的精度の良い評価ができたと考えている。今後、杭頭接合部の終局強度設計法について考えてみたいと思っている。