

# 場所打ちコンクリート杭の杭頭半剛接合に関する実験的研究

田畑 卓\* 西原 寛\* 野中 康友\*\*

## Experimental Study on Semi-Rigid Connection on Pile Tops on Cast-in-Place Concrete Piles

by Taku TABATA, Hiroshi NISHIHARA and Yasutomo NONAKA

### Abstract

Usually, the pile head joints were fixed in the foundation, although this often caused the design of the piles and the foundation beams often became uneconomical, because high bending moment occurs at the pile heads by earthquake. If the rotational stiffness of the pile head is reduced, the stress of the pile head and the foundation also go down. We developed a semi-rigid pile head connection for cast-in-place concrete piles. This method involved reducing the cross section area of the top of the pile head to half in order to reduce the rotational stiffness at the pile head, with the top of the pile head directly supporting the foundation. The structural performance was examined by both simple compression and bending shear tests.

### 要 旨

従来の一般的な杭基礎では杭とフーチングが剛接合されている。しかし、杭頭剛接合では地震時に杭頭部に大きな曲げモーメントが発生するため、杭ならびにフーチングや基礎梁の設計が不経済となることが多い。本報では杭頭頂部を杭軸部断面積の半分に縮小することにより杭頭部の回転剛性の低減を図った杭頭半剛接合工法について、単純圧縮実験および曲げせん断実験を実施し構造性能を検討した。

キーワード：杭頭半剛接合／場所打ち杭／構造実験／曲げ性能／せん断耐力

## 1. はじめに

従来の杭基礎構造では、杭とフーチングとを剛接合とするのが一般的である。これは杭基礎の剛性と耐力を高めることによって地震時の安全性を確保するという思想に基づいているが、一方で、杭頭部の接合形式を剛接合(杭頭固定)とすると、地震時には杭頭に大きな曲げモーメントが作用するため、杭ならびにフーチングや基礎梁は、必ずしも合理的な設計とならない。この観点からは、杭頭部は所要の耐力を有し、且つ回転剛性(あるいは杭頭固定度)の低い接合形式であることが望ましく、これまでも杭頭固定度を低減した半剛接合工法(例えば[1][2])、

あるいは杭頭ピン接合工法(例えば[3][4])などが幾つか提案・開発されている。

本報では場所打ちコンクリート杭を対象に開発した杭頭半剛接合工法について、工法概要と構造実験の概要を報告する。

## 2. 工法概要

本工法は、場所打ちコンクリート杭の杭頭部を凸型に成型し、その頂部の面積を杭軸部の半分に縮小するとともに、杭主筋をフーチングまで延長せず杭頭部で定着することによって、杭頭の固定度を小さくした杭頭半剛接合工法である。このとき杭に作

\* 技術研究所構造グループ

\*\* 建築本部技術部門

用する引抜き応力に対しては、必要に応じて杭とフーチングとを繋ぐ芯鉄筋を配筋する。接合部は直接にフーチングを支承し、杭頭に作用する荷重は、杭頭接合部の回転に応じて接合面あるいは接合面と芯鉄筋の両者を介して各構造部材へ伝達される。

図 1 に杭頭部の詳細を示す。芯鉄筋の配置形状は、基礎梁主筋との干渉に配慮して正方形配置と円形配置の 2 種類としている。また、引張り軸力の作用しない杭では芯鉄筋のない形式も選択可能である。凸型の杭頭接合部は、杭頭部の不良コンクリート(余盛部)を除去した後に気中にて築造する。このうち上部を接合部、下部を接合部本体、接合部とフーチングとの境界面を接合面と称する。

杭頭部の支持性能および靱性能を確保するため、杭頭接合部のコンクリート強度を杭軸部より高めに設定するとともに、接合部外周には炭素繊維シートを円形に成型した CFRP リングを設置し、接合部本体およびその直下の杭軸部せん断補強筋には 1275N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度せん断補強筋を用いる。なお、接合部外周には回転を拘束しないように緩衝材(発泡スチロールあるいはゴムチップ等)を敷き詰め接合部の外周を保護する。

表 1 に杭頭接合部の各部寸法を示す。杭頭接合部の各部寸法は杭軸部径との関係で定めている。

### 3. 単純圧縮実験

#### 3.1 目的

本工法においては、杭軸部に対して接合部の断面積を半分に低減していること、また接合部形状が極めて扁平であることなどの特徴がある。これらは杭頭接合部の圧縮特性に影響を及ぼす要因と考えられ、支持性能あるいは曲げ性能(回転性能)を評価する上ではその圧縮特性を適切に把握することが極めて重要である。そこで、杭頭接合部の仕様と圧縮特性の関係について検討する目的で、杭頭部近傍を模擬した縮小試験体により単純圧縮実験を行った。

#### 3.2 試験体および使用材料

表 2 に試験体諸元、表 3 および表 4 に使用材料の力学特性を示す。試験体は 5 体で、実験変数は接合部本体のせん断補強筋比および材種、接合部に巻く炭素繊維シートの有無、接合部コンクリート強度である。試験体配筋図を図 2 に示す。試験体断面は杭軸径  $pD=360\text{mm}$ 、接合部径  $jD=250\text{mm}$  の円形断面とし、スタブが  $500\text{mm} \times 500\text{mm}$  の正方形断面であ

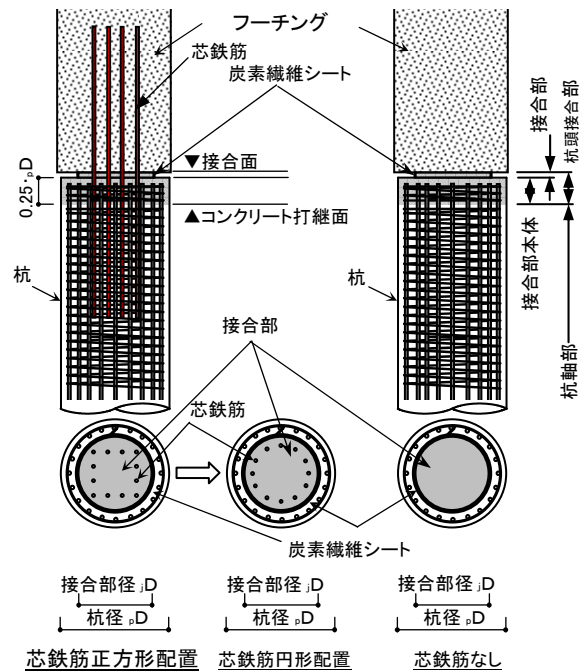


図 1 杭頭接合部の構成

表 1 杭頭接合部の各部寸法

部位	寸法	備考
接合部本体高さ	0.25 <sub>j</sub> D	$pD$ : 杭径
接合部径 (D)	0.70 <sub>j</sub> D	杭軸部断面積の 1/2
接合部高さ	70 100	$1000 \leq pD \leq 1400$ (mm) $1500 \leq pD \leq 2000$ (mm)
炭素繊維リング高さ	70-t 100-t	$1000 \leq pD \leq 1400$ (mm) $1500 \leq pD \leq 2000$ (mm)

t: コンパネ厚さ(10mm~12mm)



写真 1 試験体出来型(施工実験)

る。コンクリート設計基準強度は C48U2 試験体の接合部を 48N/mm<sup>2</sup> とした他は全て 30N/mm<sup>2</sup> である。杭主筋は 14-D10( $p_g=1.0\%$ )で共通とした。せん断補強筋は 1275N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度円形スパイラル筋とし、C30U2, N30U2, C48U2 試験体は U6.4@94( $p_w=0.2\%$ )、C30U3 試験体は U6.4@60( $p_w=0.3\%$ )とした。

ただし、C30D2 試験体では D6(SD295A)とした。また N30U2 試験体以外は、接合部の外周に目付 300g/m<sup>2</sup> の炭素繊維シートを 1 巻きしている。

### 3.3 実験方法

加力は 5000kN 試験機を用いて行った。試験体を試験機ベッドの上にセットした後、試験体の上に 500mm×500mm×100mm の加力プレートおよびロードセルを載せて断面中心に圧縮応力を载荷した。加力は 1 方向繰り返し载荷とし、長期および短期相当軸応力度で各 1 回の繰り返しとした。杭体および接合部の軸縮みは、スタブ天端から 0.5<sub>p</sub>D 位置、1.0<sub>p</sub>D 位置および接合部高さで測定した。

### 3.4 実験結果

写真2 に最終破壊状況の一例を示す。各試験体とも、杭軸部に縦方向のひび割れが発生した後に最大荷重となり、荷重が低下して最終に至った。最終破壊状況は杭軸部の縦ひび割れが大きく開き、接合部コンクリートが杭体にめり込んでいるのが観察された。接合部コンクリート自体は端部が若干欠ける程度で圧縮破壊はしていない。

表5 に実験結果一覧を示す。各試験体ではせん断補強筋量( $p_w \cdot \sigma_{wy}$ )と共に、最大軸応力度が増大する性状を示し、せん断補強筋比を  $p_w=0.3\%$  とした C30U3 では、接合部の最大軸応力度は  $1.7_j \sigma_B$  ( $\sigma_B$  :

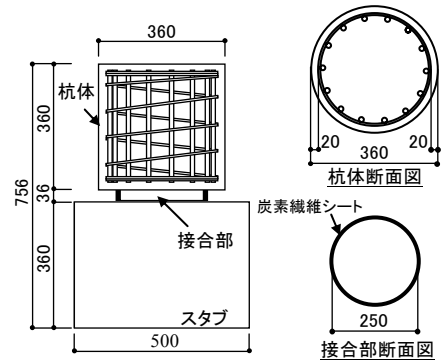


図2 試験体形状および配筋（単純圧縮実験）

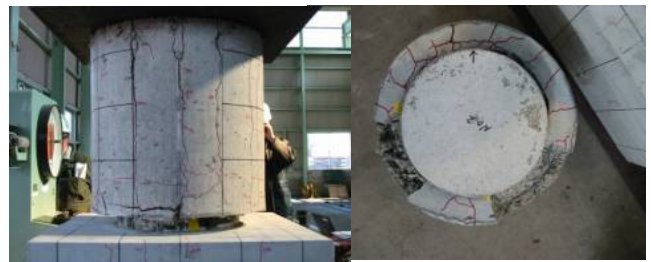


写真2 最終破壊状況例

表5 実験結果一覧（単純圧縮実験）

試験体名	杭ひび割れ応力度 N/mm <sup>2</sup>	最大応力度 N/mm <sup>2</sup>	
		杭体	接合部
C30U2	17.2	23.4	48.6 (1.59 <sub>j</sub> σ <sub>B</sub> )
C30U3	17.5	25.0	51.9 (1.70 <sub>j</sub> σ <sub>B</sub> )
C30D2	14.5	21.4	44.3 (1.45 <sub>j</sub> σ <sub>B</sub> )
N30U2	17.3	23.7	49.2 (1.61 <sub>j</sub> σ <sub>B</sub> )
C48U2	17.5	26.3	54.6 (1.04 <sub>j</sub> σ <sub>B</sub> )

表2 接合部圧縮実験試験体諸元

試験体	杭体せん断補強筋			炭素繊維シート	接合部 F <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>
	p <sub>w</sub> %	呼び名 (材種)	p <sub>w</sub> · σ <sub>wy</sub> N/mm <sup>2</sup>		
C30U2	0.2	U6.4(SBPD1275)	2.60	有り	30
C30U3	0.3		3.90		
C30D2	0.2	D6(SD295A)	0.59		
N30U2	0.2	U6.4(SBPD1275)	2.60	なし	48
C48U2	0.2		2.60	有り	

表3 コンクリートの力学的特性

部位	F <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	割裂強度 N/mm <sup>2</sup>
スタブ	30	32.8	2.89 × 10 <sup>4</sup>	2.4
杭・接合部	30	30.6	2.79 × 10 <sup>4</sup>	2.5
C48U2 接合部	48	52.3	3.76 × 10 <sup>4</sup>	4.1

表4 鉄筋の力学的特性

呼び名	材質	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>
D6	SD295A	414	556	1.8 × 10 <sup>5</sup>
D10	SD345	382	560	1.7 × 10 <sup>5</sup>
D13	SD345	368	514	1.7 × 10 <sup>5</sup>
U6.4	SBPD1275	1489	1519	2.0 × 10 <sup>5</sup>

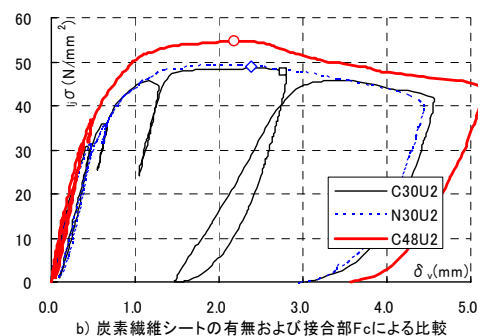
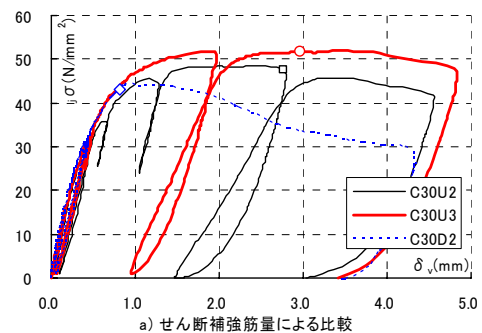


図3 接合部軸応力度—鉛直変位関係

接合部コンクリート圧縮強度)に達した。接合部のみコンクリート強度を高めた C48U2 の最大軸応力度は同一補強筋量の C30U2 に対して 12%程度増大したが、 $\sigma_B$  に対しては 1.04 倍程度に留まっている。

図 3 は接合部軸応力度と  $0.5_p D$  位置で計測した鉛直変位の関係である。同図中にはせん断補強筋が降伏した時点も併せてプロットしている。これによれば、最大軸応力度はせん断補強筋の降伏とほぼ同時に発生していることがわかる。また、せん断補強筋量が大きい試験体ほど、最大軸応力度を生じる際の鉛直変位が増大するとともに、最大軸応力度以降の荷重低下が小さくなる傾向が認められる。なお、C30U2 と N30U2 とでは最大荷重、最大荷重時軸変形とも同程度であり、炭素繊維シートの効果は殆どみられなかった。

### 4. 曲げせん断実験

#### 4.1 目的

本工法における杭の耐震性能は、杭頭接合部の回転性能と密接に関係するため、その構造性能を論じる上では、先ず、杭頭接合部の曲げ性能を適切に把握しておくことが重要である。特に本機構では接合部断面諸元のほか作用軸力によっても回転性能が変化することから、その曲げ剛性や曲げ耐力、靱性能は種々の軸力条件について定量的に評価できることが要求される。また、本工法により杭頭の作用曲げモーメントを低減し、杭径を縮小する観点からは、作用せん断応力度の増大に対して、十分なせん断耐力を確保しておく必要がある。

そこで、杭頭接合部の曲げ性状およびせん断性状の把握を目的とする曲げせん断実験を行った。なお、実験計画にあたっては、実際の杭の応力状態をできるだけ再現する意図から、不静定梁形式の試験体を採用している。

#### 4.2 試験体および使用材料

図 4 に試験体形状および配筋を、表 6 に試験体諸

元を示す。試験体は杭頭の曲げ性状を把握するための試験体 5 体(F1~F5)と、せん断性状を把握するための試験体 2 体(S1, S2)である。試験体は想定実杭の 1/4 縮小模型とし、杭軸径が 500mm、接合部径

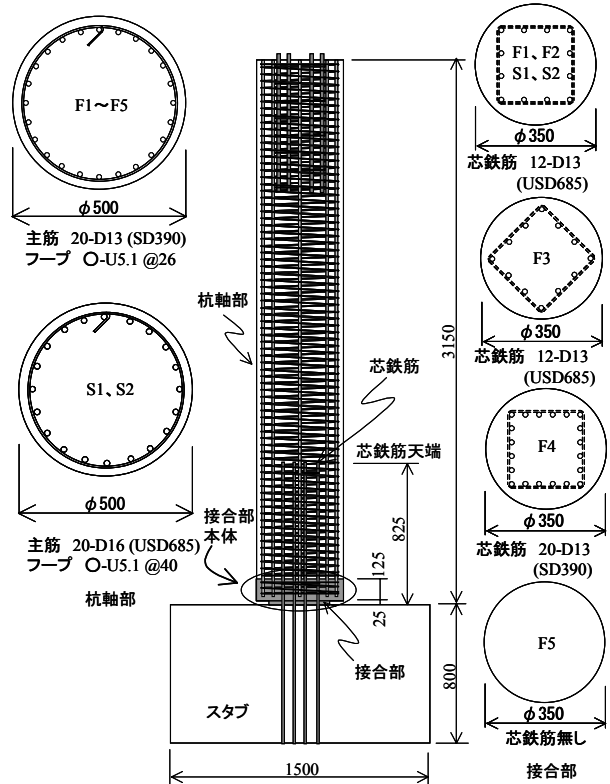


図 4 試験体形状および配筋

表 7 コンクリートの力学的特性

部位	$F_c$ N/mm <sup>2</sup>	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	割裂強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup>
杭軸部	30	31.4~40.4 35.3	1.9~2.9 2.6	2.58~2.79 2.67
接合部本体	42	42.6~46.3 44.6	2.4~3.3 2.9	2.74~2.96 2.84

下段は平均値を示す

表 8 鉄筋の力学的特性

呼び名	材質	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	伸び率 (%)
D13	SD390	459	620	$1.73 \times 10^5$	19
D13	USD685	705	932	$1.73 \times 10^5$	12
D16	USD685	735	966	$1.88 \times 10^5$	12
U5.1	SBPD1275	1461	1486	$2.00 \times 10^5$	10

表 6 試験体諸元

試験体	芯鉄筋	杭主筋	せん断補強筋	载荷軸力		想定破壊	パラメータ
F1	12-D13 (USD685)	24-D13 (SD390) $p_g=1.55\%$	2-U5.1@26 $p_w=0.3\%$	982kN	$0.17A_p \cdot F_c$	曲げ破壊	標準(長期軸力)
-679kN ~ 2945kN				$-0.65 \cdot N_y \sim 0.5A_p \cdot F_c$	変動軸力		
982kN $\leftrightarrow$ 1963kN				$0.17A_p \cdot F_c \leftrightarrow 0.33A_p \cdot F_c$	芯鉄筋 45° 配置		
982kN				$0.17A_p \cdot F_c$	芯鉄筋普通強度		
F2	なし	なし	なし	0	—	せん断破壊	接合部
S1				12-D13 (USD685)	20-D16 (USD685) $p_g=2.03\%$		2-U5.1@40 $p_w=0.2\%$
F3	20-D13 (SD390)						
F4	なし						
F5	なし						

$A_p$ : 杭軸部断面積  $F_c$ : 杭軸部コンクリート設計基準強度  $N_y$ : 芯鉄筋引張降伏軸力

が 350mm である。全試験体とも接合部の外周には目付け量 300g/m<sup>2</sup>、引張強度 3990 N/mm<sup>2</sup>、引張弾性率  $2.56 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>の炭素繊維シートを 1 巻きしている。

F1 試験体は標準となる試験体で、芯鉄筋には高強度鉄筋 USD685、せん断補強筋には 1275N/mm<sup>2</sup>級の超高強度円形スパイラル筋を用い、荷重軸力は長期軸力相当とした。芯鉄筋の配置は矩形配置としている。F2 試験体は荷重軸力を変動軸力とした試験体、F3 試験体は芯鉄筋配置を F1 に比べ 45° 回転させ、軸力は長期相当および短期相当を交互に荷重した。F4 および F5 試験体は軸力が長期相当で、芯鉄筋に SD390 鉄筋を用いた試験体および芯鉄筋無しとした試験体である。

S1 試験体は杭頭接合部のずれせん断耐力を確認するための試験体で、芯鉄筋は F1 試験体と同一で軸力をゼロとした試験体である。S2 試験体は軸力を引張  $0.6N_y$  ( $N_y$  は芯鉄筋の引張降伏時軸力)として接合部面の芯鉄筋によるダウエル耐力を確認した後、軸力を長期軸力相当として杭軸部のせん断耐力を確認する試験体である。

全試験体とも杭軸部およびスタブのコンクリートは  $F_c=30\text{N/mm}^2$ 、接合部本体は  $F_c=42\text{N/mm}^2$  である。使用材料の力学的性質を表 7 および表 8 に示す。

### 4.3 実験方法

加力は図 5 に示すように、油圧ジャッキ①を加力点、油圧ジャッキ②を反力点とした端部固定の不静定梁形式の荷重方法とした。それぞれ試験体頂部に所定の軸力を荷重し、油圧ジャッキ①により押し引きの正負交番繰り返して荷重を行った。なお、変動軸力の F2 試験体では水平力との相関で軸力を与え、正加力時を圧縮軸力、負加力時を引張軸力とした。

曲げ型試験体の F1~F5 はスタブから加力点までの距離  $L_1$ 、加力点から反力点までの距離  $L_2$  はともに 1500mm である。せん断型試験体の S1 および S2 は  $L_1=1000\text{mm}$ 、 $L_2=2000\text{mm}$  とした。

加力は変位制御とし、F1~F5 試験体はスタブから高さ 250mm(=0.5 $p$ D)位置での回転角  $j\theta$  で、S1、S2 試験体は加力点位置の水平変形から求めた部材角  $R$  でそれぞれ制御した。基本制御は  $j\theta$ 、 $R$  とも 1/400、1/200、1/100、1/50、1/33rad.である。F1、F2、F4、F5 試験体では 1/400rad.を 1 サイクル、以降を 2 サイクルとした。F3 試験体では長期および短期軸力で各々 1/400rad.を 1 サイクル、以降を 2 サイクルと

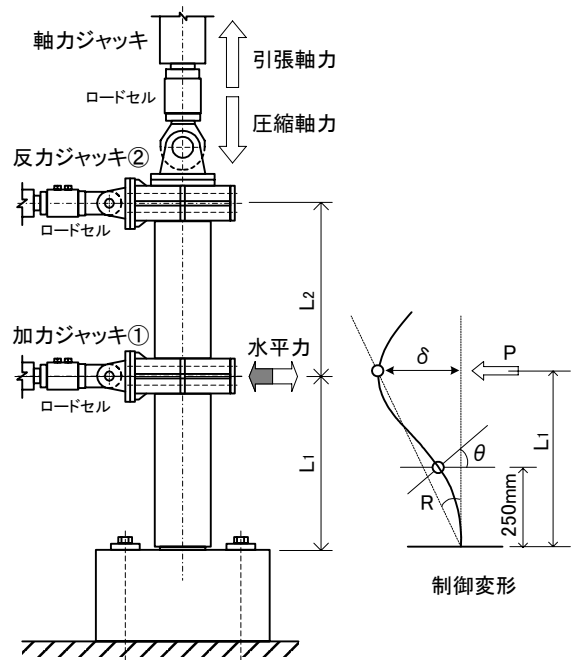


図 5 加力方法

した。S1、S2 試験体では各 1 サイクルとした。なお、荷重方法は実験状況に応じて適宜変更している。

### 4.4 履歴性状および破壊破壊状況

図 6 に各試験体の加力点水平荷重  $P$  と部材角  $R$  の関係、および最終破壊状況例を示す。

曲げ破壊型の F1~F5 試験体はいずれも顕著な荷重低下を生じず紡錘型の安定した履歴ループを描いている。芯鉄筋を有する F1~F4 試験体は、初期に杭軸部に曲げひび割れが発生し、水平荷重の増大とともに杭軸部のせん断ひび割れ、杭頭部およびコンクリート打継面近傍の縦ひび割れが発生した。接合部本体のひび割れ性状には軸力レベルの影響はみられない。コンクリート打継面近傍の縦ひび割れについては、 $j\theta=1/200\text{rad.}$ 時の残留ひび割れ幅で 0~0.05mm 程度、 $j\theta=1/33\text{rad.}$ ピーク時で 0.06~0.35mm であり、コンクリートに過大な損傷は観察されなかった。芯鉄筋の無い F5 試験体では、 $j\theta=1/33\text{rad.}$ まで接合部本体にひび割れが発生せず、曲げひび割れは接合面に集中する性状を示した。

接合部のずれせん断耐力を確認する試験体 S1 では、 $R=1/50\text{rad.}$ 時に接合部がスタブにめり込む現象と、接合面のずれを目視で確認した。接合部のダウエル耐力を確認する S2 試験体では、引張軸力を与えながら  $R=1/67\text{rad.}$ 時に接合面のずれを目視で確認した後、軸力を長期相当として加力を継続したところ、 $R=1/25\text{rad.}$ に向かうサイクルの途中で杭軸部の

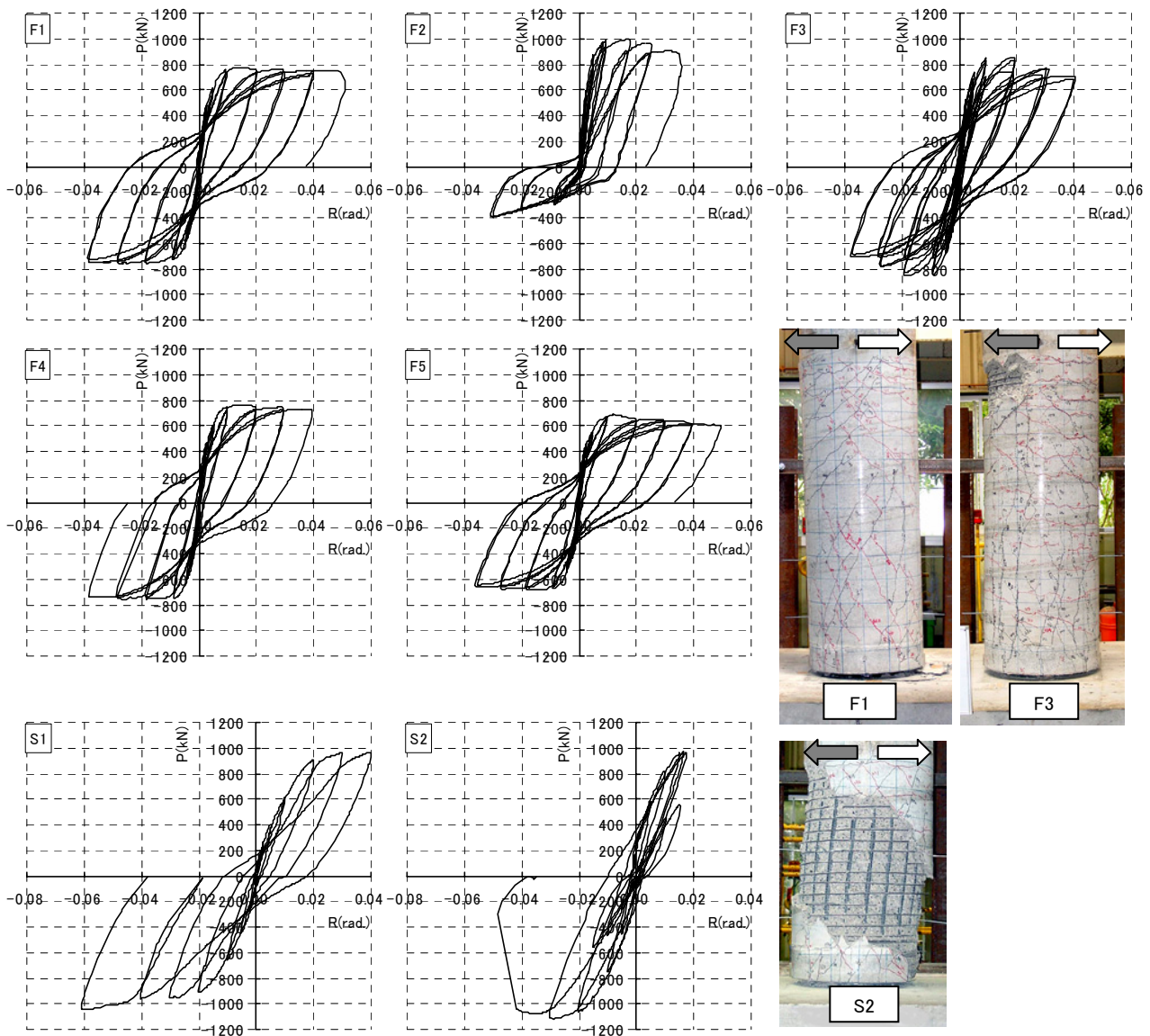


図 6 加力点水平荷重(P)－部材角(R)関係および最終破壊状況例

せん断破壊が生じた。

いずれの試験体も杭頭接合部およびコンクリート打継面杭側で支圧破壊は観察さず、接合部の炭素繊維リングの破断も 1/33rad.まで観察されなかった。

#### 4.5 杭頭接合部の曲げ性状

図 7 は曲げ型試験体について、杭頭接合部曲げモーメント( $jM$ )－回転角( $j\theta$ )関係の包絡線を実験要因により比較したものである。ここで、 $jM$  は载荷軸力による  $P\Delta$  効果を考慮した値(試験体頂部で計測したピンの回転変形に基づく補正)であり、 $j\theta$  はスタブ上面から 250mm( $pD/2$ )の高さで計測した鉛直変位から算出している。実験観察によれば、スタブ上面から 250mm の区間では杭体に顕著な曲げひび割れは発生しておらず、杭頭部の曲げ変形の殆どは接

合部近傍の微少区間に集中して生じたと判断される。

図 7a)より、変動軸力とした F2 試験体の剛性および最大曲げモーメントは、長期軸力相当の F1 試験体に対して正加力側で高く、負加力側で低い結果を示しており、曲げ性状と軸力との相関性が認められる。同図 b)より、芯鉄筋を 45° 配置とした F3 試験体は F1 試験体に比べると、変形の増大に伴い、高い曲げモーメントを負担する傾向があるが、その差は小さい。これは同試験体程度の軸力レベルでは、芯鉄筋の配置よりむしろ円形断面であるコンクリートの影響が支配的なためと考えられる。同図 c)では、芯鉄筋の強度が異なる F1 試験体と F4 試験体においてほぼ同程度の曲げモーメントを負担している。従って、杭頭接合部の回転変形においては、既往の研究[5][6]でも指摘されているように、芯鉄

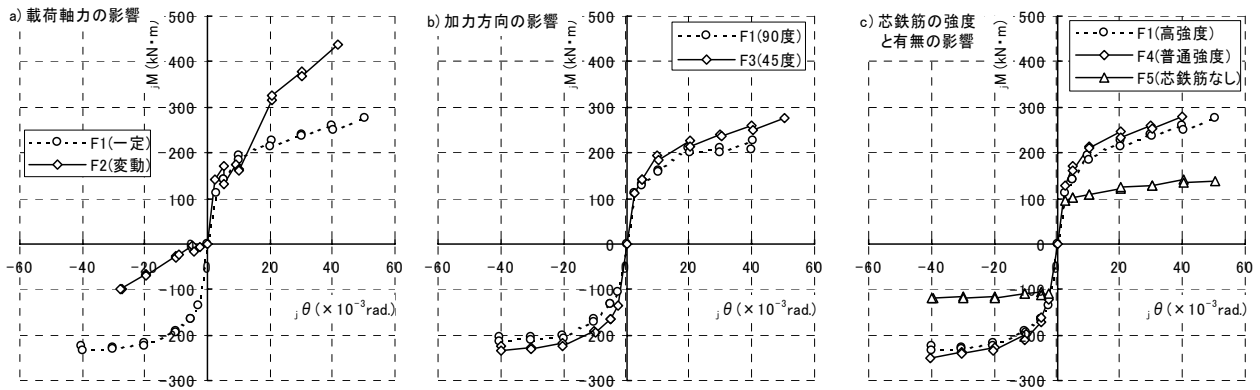


図7 杭頭接合部の  $M_j - \theta_j$  関係に及ぼす各実験因子の影響

筋の抜け出しや接合部コンクリートの杭体へのめり込み等に起因する付加回転変形を適切に考慮する必要があるが、本実験結果より、それらの付加回転変形に対しては、芯鉄筋の配置に対する加力方向の違いや、芯鉄筋の強度の違いが及ぼす影響は極めて小さいと判断される。芯鉄筋が無い F5 試験体の曲げモーメントは芯鉄筋のある F1 試験体や F4 試験体の半分程度に低減されていた。

図8はF1試験体について接合部内の芯鉄筋に貼付した歪みゲージ、F5試験体について接合部直上30mmの高さの杭体内に埋設したモールドゲージより求めた断面内歪み分布である。F5試験体は芯鉄筋が無いため引張り側の歪みがゼロとなっているが、圧縮側ではほぼ直線的な歪み分布を示している。芯鉄筋のあるF1~F4試験体においてもF1試験体と同様に、概ね直線的な歪み分布を示した。

そこで、これらの歪み測定値から接合部の平均曲率を算出し(F5試験体では圧縮側の歪み値で評価)、一方で接合部断面の断面曲げ解析を行い、 $M_j - \theta_j$  関係について実験値と解析値の適合性を検討した。図9にその結果を示す。断面曲げ解析にあたっては、鉄筋は材料試験結果に基づく完全弾塑性モデルとし、接合部コンクリートは3章に示した単純圧縮実験の結果を考慮して、最大強度がシリンダー強度の1.7倍で、且つ最大強度以降は強度低下を生じないモデルとした。図9より、断面曲げ解析結果は実験結果と良好に適合していることがわかる。

#### 4.6 曲げ型試験体の歪み性状

図10は曲げ型試験体における芯鉄筋引張降伏時の芯鉄筋材軸方向歪み分布である。歪みの小さい範囲で勾配がやや緩やかとなっているが、概ね、接合面から杭体とスタブへそれぞれ直線的な歪み分布形状を示している。各試験体では杭体内とスタブ内と

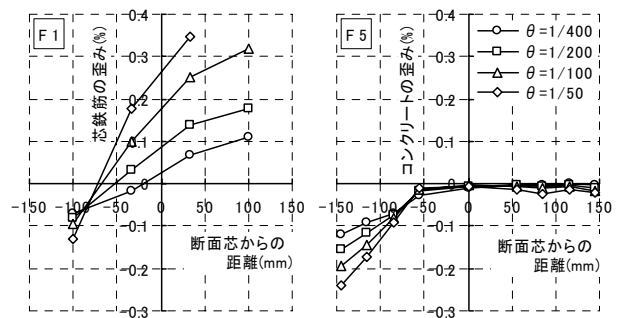


図8 接合部断面内歪み分布

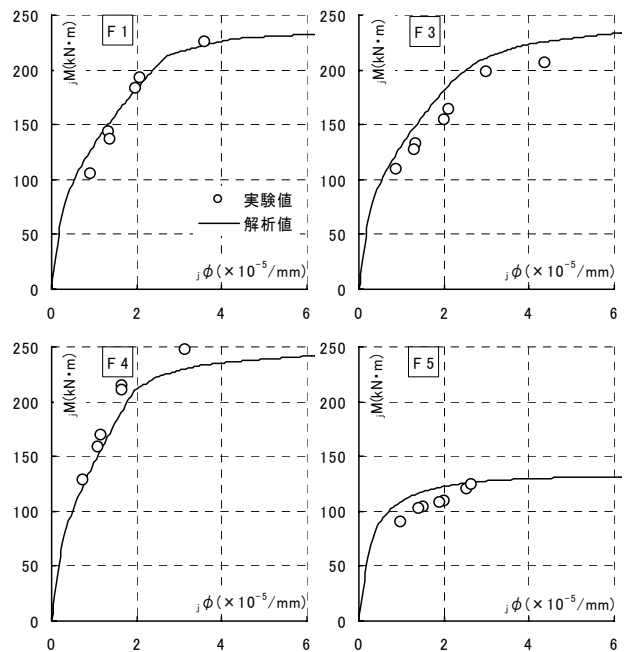


図9 接合部の曲げモーメントー曲率関係

で歪み分布の形状に明確な差はみられない。また、芯鉄筋に USD685 を用いた F1~F3 試験体と、SD390 を用いた F4 試験体とでは、接合面からの平均的な歪み勾配がほぼ等しく、同程度の付着応力度を生じていると判断できる。

図11は接合部外周の炭素繊維シートの円周方向

の平均歪みと回転角の関係である。各試験体とも水平力を与える前に軸力を載荷しているが、その時点では殆ど歪みを生じておらず、回転角の増加に従って歪みが増加している。 $\theta=1/33\text{rad}$ においては各歪みゲージより計測された最大歪みは、全試験体を通して 1.08%程度であり、引張強度時歪み(1.55%)に対しては7割程度に収まっていた。

#### 4.7 せん断耐力の評価式

本工法では、せん断破壊の形式を「接合部ずれ破壊」、「杭頭上部せん断破壊」、「杭軸部せん断破壊」の3つに分類する。図12にその概念図を示す。

接合部ずれ破壊耐力は、接合面コンクリートの摩擦抵抗( $Q_{ju1}$ )、あるいは芯鉄筋のダウエル抵抗( $Q_{ju2}$ )によって評価し[7]、杭頭上部せん断破壊ならびに杭軸部せん断破壊は、塑性理論に基づくトラス・アーチ機構( $Q_{su}$ )[8]により評価するものとした。なお、杭頭上部のせん断耐力の評価にあたっては、接合部と杭軸部の平均的な断面を仮定する。

$$Q_{ju1} = \mu \cdot N_c \quad (1)$$

$$Q_{ju2} = 1.65 \cdot \sum a_v \cdot \sqrt{\sigma_{Bf} \cdot \sigma_y'} \quad (2)$$

$$Q_{su} = b_t \cdot j_t \cdot p_{we} \cdot \sigma_{wy} + k_1 \cdot (1 - k_2) \cdot b_a \cdot d_a \cdot v \cdot \sigma_B \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{(L/d_a)^2 + 1} - (L/d_a)}{2} \quad k_2 = \frac{3 \cdot p_{we} \cdot \sigma_{wy}}{v \cdot \sigma_B}$$

ここで、

- $\mu$ : 摩擦係数( $\mu=0.6$ ),  $N_c$ : 圧縮合力(N)
- $\sum a_v$ : 芯鉄筋断面積( $\text{mm}^2$ )
- $\sigma_y'$ : 芯鉄筋有効強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
- $\sigma_{Bf}$ : 基礎フーチングコンクリート強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
- $b_t, j_t$ : トラス機構有効幅と有効主筋間距離(mm)
- $p_{we}$ : 有効せん断補強筋比
- $\sigma_{wy}$ : せん断補強筋強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
- $b_a, d_a$ : アーチ機構等価幅および等価せい(mm)
- $v$ : コンクリート圧縮強度有効係数
- $\sigma_B$ : 杭軸部コンクリート強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

#### 4.8 せん断耐力式の適合性

図13にS1試験体による杭頭せん断力 $Q_o$ と圧縮合力 $N_c$ の関係を示す。圧縮合力は接合部の曲げモ

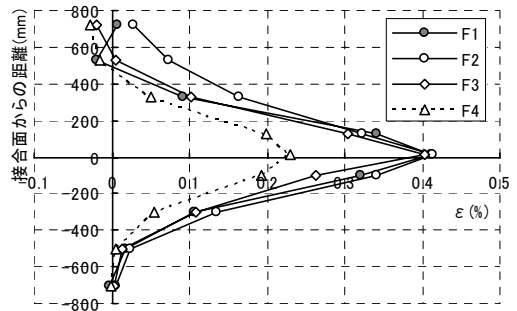


図10 芯鉄筋材軸方向歪み分布

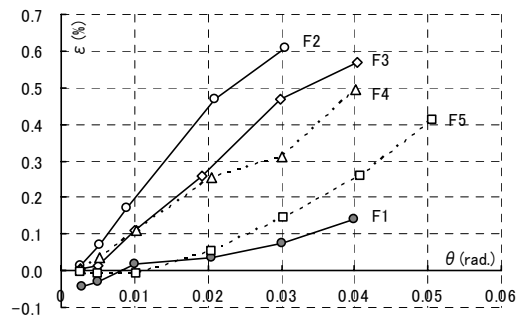


図11 炭素繊維シートの歪み推移

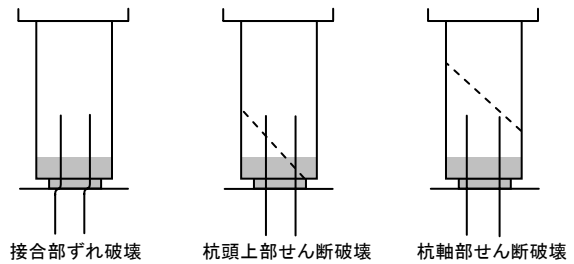


図12 せん断破壊形式の分類

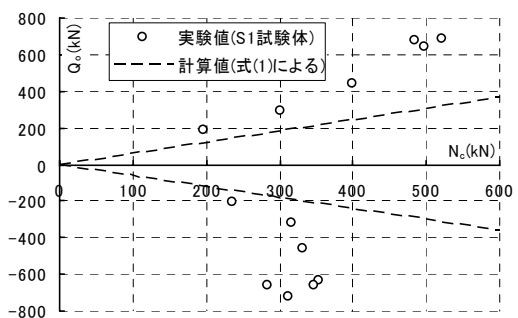


図13 接合面のせん断力と圧縮合力の関係

メント $M$ を正方形置換した接合部断面有効せいによる応力中心間距離で除して求めた。同図より、式(1)によるせん断耐力は実験結果を安全側に評価している。

図14はS2試験体における引張軸力時の杭頭せん断力 $Q_o$ と部材角 $R$ の関係である。本実験では計算耐力の1.2倍まで載荷することにより式(2)の妥当



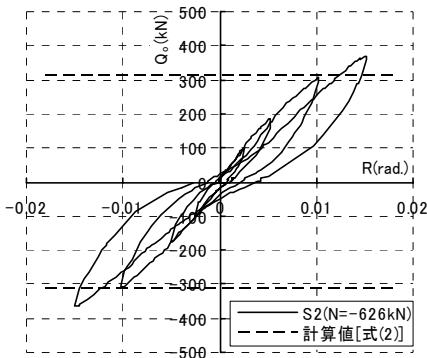


図 14 式(2)と実験結果の対応

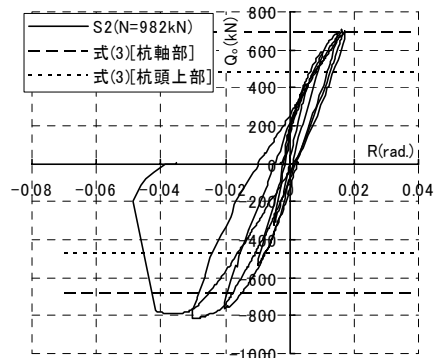
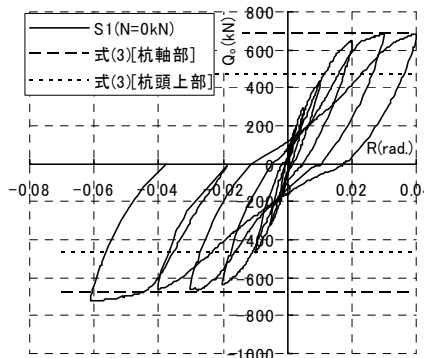


図 15 式(3)と実験結果の対応

性を確認した。

図 15 に S1 および S2 試験体の杭頭せん断力  $Q_s$  と部材角  $R$  の関係を示す。杭頭部の最大せん断力は S1 試験体で 723.7kN, S2 試験体で 814.9kN であり、式(3)による杭軸部せん断耐力に対してはそれぞれ 1.07, 1.18 倍の耐力であった。杭頭上部せん断耐力の計算値は杭軸部せん断耐力計算値の約 7 割であり、実験値をかなり安全側に評価している。なお、両試験体ではスタブ上面から 125mm, 325mm, 525mm の高さでせん断補強筋の歪みを計測したが、最大せん断力時までせん断補強筋の降伏はみられなかった。

## 5. 結論

杭頭半剛接合法の構造性能を調べるため、静的載荷実験を行った。得られた知見を以下に述べる。

- 1) 接合部コンクリートの圧縮強度は、シリンダー強度に比して高く、また接合部本体のせん断補強筋量の影響を受ける。
- 2) 種々の軸力条件下で杭頭接合部の回転性能を検証したが、いずれの試験体も回転角  $\theta=1/33\text{rad.}$  まで安定した履歴性状を示した。
- 3) 芯鉄筋の強度および配置形状が杭頭接合部の回転変形に及ぼす影響は小さい。
- 4) 杭頭接合部の曲げモーメントと曲率の関係は平面保持を仮定した断面曲げ解析により概ね評価できる。
- 5) 本工法におけるせん断耐力は、本報に示した算定式で安全側に評価することができる。

なお、本工法の開発は、青木あすなる建設、大木建設、熊谷組、西武建設、銭高組、間組、ピーエス三菱、前田建設工業との共同研究によっている。本報は一連の技術開発資料のうち構造実験について纏めたものである。

## 謝辞

本工法の開発にあたり、貴重なご意見やご指導を頂きました杉村義広先生(当時：東北大学大学院教授)に感謝の意を表します。また、実験に際して高周波熱錬(株)、東京鐵鋼(株)、(株)伊藤製鐵所、日鐵コンポジット(株)、(株)オーカワの方々には実験材料を提供して頂きました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 小林勝巳, 大西靖和, 森山英治, 丸隆宏, 寺岡勝, 木戸英樹, 和田章: 場所打ち杭の杭頭半剛接合法の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 9 号, pp.65-70, 1999.12
- [2] 安田聡, 川端一三, 小室努, 征矢克彦: 場所打ちコンクリート杭における杭頭半剛接合構法の開発, コンクリート工学, Vol.41, No.8, pp.17-24, 2003.8
- [3] 田藏隆, 大槻明, 青木孝, ほか 6 名: 球面接触による杭頭接合, 基礎工, pp76-80, 2001.12
- [4] 宮崎光生, 西村幸洋: 2 次設計対応の回転自由な杭頭接合, 基礎工, pp.64-71, 2001.12
- [5] 今井和正, 是永健好, 瀧口克己: めり込みを考慮した RC 部材端部の回転変形解析法, 日本建築学会構造系論文集, 第 562 号, pp.99-106, 2002.12
- [6] 小林勝巳, 丸隆宏, 大西靖和, 寺岡勝, 和田章: 水平力を受ける場所打ち杭—基礎梁部分架構の力学特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 509 号, pp.83-90, 1998.7
- [7] 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, pp.59-71, 2002
- [8] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, pp.142-162, 1999

