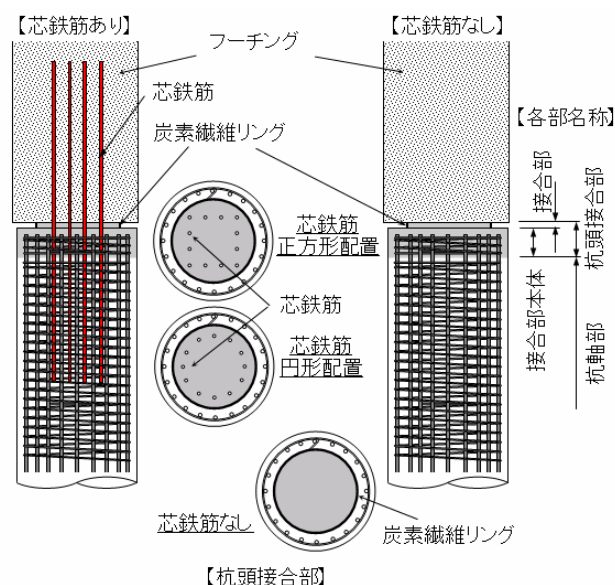


場所打ち杭を対象とした杭頭部における半剛接合工法に関する実験的研究

藤嶋 泰輔 ・ 野田 和政^{*1} ・ 今野 修^{*2} ・ 山下 俊英

Experimental Study on Partial Rigid Connection on Pile Head for Cast-in-Place Concrete Pile

Taisuke FUJISHIMA, Kazumasa NODA, Shu KONNO, Toshihide YAMASHITA



図一 杭頭接合部概要図



写真一 杭頭接合部出来型

研究の目的

従来より主流となっている杭頭剛接合構造は、地震時に杭頭部に大きな曲げモーメントが発生する。そのため、杭頭部の曲げモーメントが杭、フーチングならびに基礎梁の設計に対して支配的となることが多い。本研究は、杭頭接合部を半剛接合にした工法を開発し、地震時の杭頭曲げモーメントを低減することにより、フーチングならびに基礎梁等を含めた合理的な基礎構造全体の設計を可能にすることを目的としている。

技術の説明

本工法は、場所打ちコンクリート杭の杭頭部を凸形状に成型することにより、杭頭の固定度を低減する構造となっている。杭頭頂部は杭軸部断面積の半分に縮小されており、杭頭に作用する荷重は、杭頭接合部の回転に応じて、各構造部材へと伝達される。杭に引抜き力が作用する場合には、杭頭接合部中央に配筋した芯鉄筋により、フーチングと杭軸部間で応力が伝達される構造となっている。また、変動軸力が小さい場合での使用を想定した、芯鉄筋を有しない構造形式も提案している。

主な結論

本工法の適用範囲は、杭軸部径で $\phi 1000\text{mm} \sim 2000\text{mm}$ である。適用範囲内最大径の $1/4$ 縮尺模型による構造実験により、杭頭部の構造性能を確認した。曲げ破壊型試験体では、回転角 $1/33\text{rad}$ においても水平力が低下することなく安定した履歴性状となることを確認した。また、せん断破壊型試験体では、せん断耐力式の妥当性を検証した。構造実験により、本工法の杭頭部における構造性能を確認することができたため、実用化が可能となった。

*1 本店 建築部 技術支援

*2 本店 建築エンジニアリング・設計部 構造設計

場所打ち杭を対象とした杭頭部における 半剛接合工法に関する実験的研究

藤 嶋 泰 輔 野 田 和 政*¹
今 野 修*² 山 下 俊 英

要 旨

一般的な杭基礎構造物において、杭とフーチングの結合構造には、剛接合構造が用いられている。しかし、杭頭剛接合構造は、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、フーチングならびに基礎梁の設計が不経済となることが多い。杭頭の固定度を低減すれば、杭頭部に発生する応力が小さくなるため、基礎構造全体の合理的な設計が可能となる。そこで、場所打ち杭を対象とした合理的な構造形式となりうる杭頭半剛接合工法を開発した。

本工法は、固定度を低減するため、杭頭頂部を杭軸部断面積の半分に縮小して、フーチングを支承する構造である。引抜き力に対しては、杭とフーチングの間に芯鉄筋を配筋することにより、応力を伝達させる構造とした。本研究では、縮尺試験体による構造実験を行うことにより、杭頭接合部の構造性能を明らかにした。

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

目 次

- | | |
|-----------|---------------|
| 1. はじめに | 5. 曲げ破壊型実験結果 |
| 2. 工法概要 | 6. せん断破壊型実験結果 |
| 3. 構造実験概要 | 7. まとめ |
| 4. 破壊経過 | |

EXPERIMENTAL STUDY ON PARTIAL RIGID CONNECTION ON PILE HEAD FOR CAST-IN-PLACE CONCRETE PILE

Taisuke FUJISHIMA Kazumasa NODA
Shu KONNO Toshihide YAMASHITA

Synopsis:

We developed partial rigid pile head connection for cast-in-place concrete pile. Usually, pile head joints in foundation fixed, but in such a state, big bending moment occurs in pile head. If rigidity on pile head is reduced, the stress in pile head becomes small, and the stress in foundation becomes small, too. In order to reduce rigidity in pile head, the department in top of pile head is half of area in axis, and the top of pile head holds up foundation directly. When tensile force acts, the partial rigid pile head connection transfers the power to foundation and pile by the core reinforcements rod. We confirmed the structure performance by structure experiment of reduced scale model.

* 1 本店 建築部 技術支援 * 2 本店 建築エンジニアリング・設計部 構造設計

1. はじめに

一般的な杭基礎構造物の杭頭部は、フーチングに対して剛接合構造となっている。杭頭剛接合構造は、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、それが杭ならびにフーチング、基礎梁の設計に対して支配的な要因となり不経済な構造形式となる。一方、兵庫県南部地震でも杭頭部の被害が多数報告されており、杭頭剛接合構造の問題点と捉えることができる。

これに対し、杭頭部で回転を許容することが可能となれば、地震時の杭頭曲げモーメントを低減することができ、フーチングならびに基礎梁等、基礎構造全体を合理化できる可能性がある。

このような背景から、近年、杭頭部の曲げモーメントを低減する杭頭接合方法が多数提案されてきた¹⁾²⁾。

本報は、杭基礎構造物のうち、場所打ちコンクリート杭を対象とした、杭頭部の固定度低減を可能とする新しい接合工法（以下、杭頭半剛接合工法）の開発に関する報告を行うものである。

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することによって、杭頭部の固定度を低減する構造である。杭頭部の固定度とは杭の解析に用いる杭頭の接合条件であり、杭頭剛接合の場合（固定度 $\alpha=1.0$ ）の理論解に対する杭頭曲げモーメントの値の比により定義される。凸型の杭頭頂部は杭軸部断面積の半分で、杭頭に作用する荷重は、杭頭接合部の回転に応じて、各構造部材

へ伝達される。杭に引抜き力が作用する場合には、凸部に配置した芯鉄筋を介して、フーチングと杭との間で応力伝達される構造となっている。

図-1 に杭頭部の詳細を示す。芯鉄筋の有無により2つの構造形態に大別され、芯鉄筋の配置形状を正方形配置と円形配置とすることによって2種に分類している。引抜き力が発生しない場合を想定し、芯鉄筋を配置しない構造も可能とした。杭頭接合部（a）は、杭軸部（d）よりもコンクリート強度を高めており、接合面（A）とコンクリート打継面（B）により挟まれた部分を指す。

通常、場所打ちコンクリート杭の施工では、杭頭処理工程として不良コンクリート（余盛）の除去を行うが、本工法における凸形状の杭頭接合部は、杭頭処理後気中にて築造する。

杭頭接合部（a）は、凸上部が接合部（b）、下部が接合部本体（c）で構成される。また、靱性能を高めるため、接合部（b）の外周には炭素繊維リングを取り付け、接合部本体（c）ならびにその直下の杭軸部せん断補強筋には超高強度せん断補強筋を使用した。炭素繊維リングとは炭素繊維シートを円形に成型したものである。写真-1 に杭頭接合部の出来型の一例を示す。

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表記した。接合部本体の高さおよび接合部の径は、杭軸部径（ pD ）に対する比率が一定値となるようにした。接合部の高さは、回転性能ならびに施工性を考慮し、杭軸部径により2種類の高さとした。表中 t は接合部に炭素繊維リングを設置するための、コンパネの厚さを意味する。

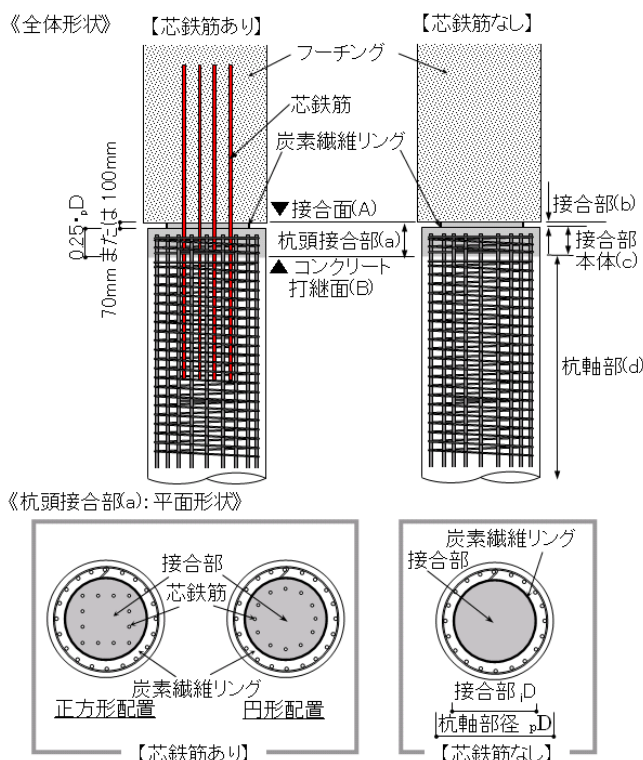


図-1 杭頭接合部の構成



写真-1 杭頭接合部の出来型（例）

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	$0.25pD$	pD : 杭軸部径
接合部径 (jD)	$0.7pD$	杭軸部断面積の 1/2
接合部高さ	70	pD : 1000~1400
	100	pD : 1500~2000
炭素繊維リング高さ	70-t	pD : 1000~1400
	100-t	pD : 1500~2000

t : 10mm~12mm

表-3 コンクリートの力学的特性

部位	F_c N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 $\times 10^4$ N/mm ²	割裂強度 N/mm ²
杭軸部	30	31.4~40.4	2.58~2.79	1.9~2.9
杭頭接合部	42	42.6~46.3	2.74~2.96	2.4~3.3

表-4 鉄筋の力学的特性

呼び名	材質	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	伸び %
D13	SD390	459	620	1.73×10^5	19
D13	USD685	705	932	1.73×10^5	12
D16	USD685	735	966	1.88×10^5	12
U5.1	UB1275	1461	1486	2.00×10^5	10

3.3 荷重方法

図-3 に加力方法を示す。構造実験は、油圧ジャッキ①を加力点、油圧ジャッキ②を反力点とした不静定梁形式の荷重方法とした。軸力ジャッキにより計画軸力を荷重した状態で、油圧ジャッキ①により押し引きの正負交番荷重を行った。曲げ破壊型の試験体（F1～F5）は、スタブから加力点までの距離 L_1 を 1500mm、加力点から反力点までの距離 L_2 を 1500mm とした。せん断破壊型の試験体（S1, S2）は L_1 を 1000mm、 L_2 を 2000mm とした。

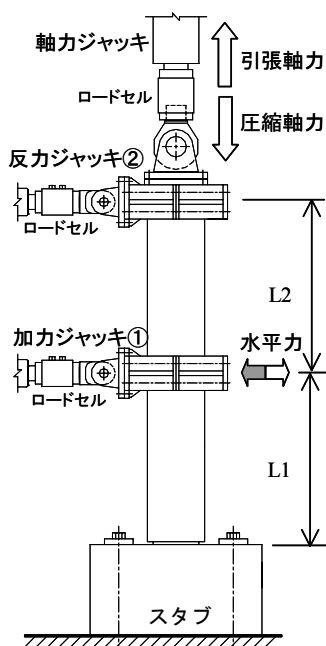


図-3 加力方法

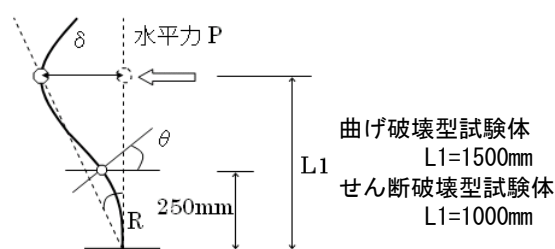


図-4 制御方法概要

図-4 に制御方法の概要を示す。曲げ破壊型試験（F1～F5）はスタブからの高さが 250mm の位置での回転角 θ で制御する変位制御とした。せん断破壊型試験（S1, S2）は加力点位置の水平変位から算出した部材角 R で制御した。基本的な制御は、 θ 、 R とも $\pm 1/400$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ rad.とした。F1, F2, F4, F5 試験体では $\pm 1/400$ rad.は 1 サイクル、そのほかは 2 サイクルとした。F3 試験体では長期および短期軸力で $\pm 1/400$ rad.を各 1 サイクル、その他は 2 サイクルとした。S1, S2 試験体は各 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. 破壊経過

写真-2 に最終破壊状況の例を示す。芯鉄筋を有する曲げ破壊試験体（F1～F4）は初期に杭軸部に曲げひび割れが発生し、水平力の増大とともに杭軸部にせん断ひび割れが発生し、その後杭頭部およびコンクリート打継面近傍に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の影響は確認されなかった。コンクリート打継面近傍の縦ひび割れは、 $\theta = 1/200$ rad.時に残留ひび割れ幅が 0.00～0.05mm 程度、 $\theta = 1/33$ 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、 $\theta = 1/33$ rad.までは接合部本体にはひび割れが発生しなかった。

接合面のずれせん断耐力を確認する S1 試験体では、 $R = 1/50$ rad.時に接合部がスタブにめり込む現象と、接合部のずれを目視で確認した。芯鉄筋のダウエル耐力を確認する S2 試験体では、引張軸力にて $R = 1/67$ rad.時に接合部のずれを目視で確認した。その後、同試験体により長期軸力相当で加力を継続し、 $R = 1/25$ rad.に向かうサイクルの途中で、杭軸部のせん断破壊が生じた。

いずれの試験体においても $1/33$ rad.まで接合部炭素繊維シートは破断しなかった。

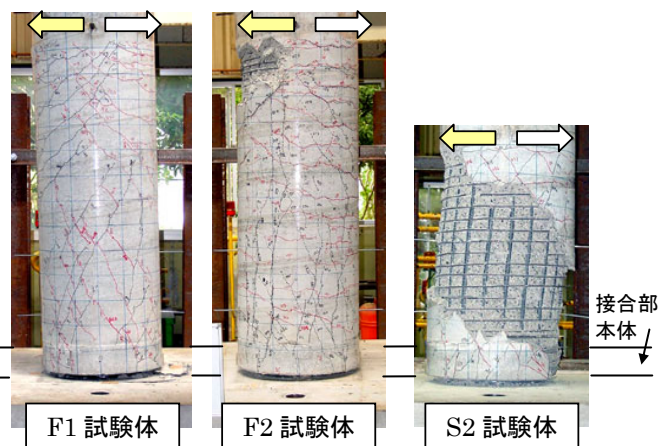


写真-2 最終破壊状況

5. 曲げ破壊型実験結果

5.1 曲げ破壊型試験体の荷重－変位関係

図-5 に各試験体の加力点水平力 P と部材角 R の関係を示す。

軸力の影響に着目すると、変動軸力の F2 試験体の P - R 関係は、圧縮軸力時に約 $R=1/1000\text{rad}$ で最大圧縮軸力に達しており、長期相当の F1 試験体に対し、剛性が高くかつ最大水平力が大きい。逆に引張側では約 $R=-1/500\text{rad}$ で最大引張軸力に達しており、F1 試験体に対し剛性が低くかつ最大水平力が小さい。

芯鉄筋配置に着目すると、芯鉄筋を 45° 方向回転させた F3 試験体は、長期軸力相当時には標準の F1 試験体とほぼ同一の履歴ループならびに最大水平力を示すが、短期軸力相当の場合には、F1 試験体に対して、剛性および最大水平力も大きくなった。

芯鉄筋の種類およびその有無に着目すると、普通強度の芯鉄筋を用いた F4 試験体、ならびに芯鉄筋を有しない F5 試験体の P - R 関係は、履歴性状ならびに最大水平力の両者とも標準の F1 試験体と優位な差は認められなかった。

以上より、各曲げ破壊型試験体の加力点水平力 P と部材角 R の関係では、軸力により剛性および最大水平力への影響が見られるものの、芯鉄筋の配置ならびに鉄筋の種類による影響は見受けられなかった。なお、芯鉄筋を有しない F5 試験体を含め、いずれの試験体においても最大水平力以降も大きな荷重低下が見られず、曲げ破壊型試験体の加力点水平力 P と部材角 R の関係は極端な耐力低下を起こさない安定した履歴性状を示した。

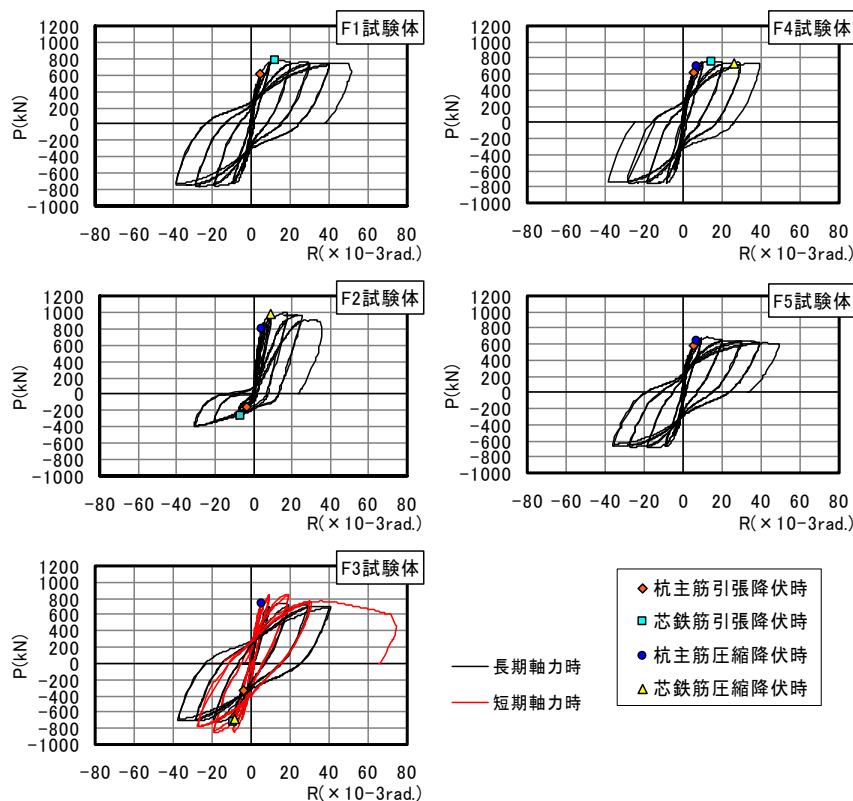


図-5 各曲げ破壊型試験体の P - R 関係

5.2 曲げ破壊型試験体の回転剛性

図-6 に杭頭接合部の曲げモーメント jM と回転角 θ の関係を包絡線により示した。ここでは、加力方向の影響ならびに芯鉄筋の強度と有無による影響に着目した。加力方向の影響に着目する（同図 a）と、変形の増大に伴い、F3 試験体は F1 試験体とほぼ同程度の曲げモーメントを負担しており、芯鉄筋の配置による影響は小さい。本試験体の軸力比レベルでは、杭頭接合部の回転剛性は芯鉄筋の配置よりもコンクリートの影響が支配的であるためと考えられる。芯鉄筋強度の異なる F4 試験体と F1 試験体を比較する（同図 b）と、両試験体の負担曲げモーメントはほぼ同程度である。また、芯鉄筋を有しない F5 試験体の負担曲げモーメントは、芯鉄筋を有する F1 試験体や F4 試験体の約半分程度に低減されている。

既往の研究^{3),4)}では、杭頭接合部の回転変形は、芯鉄筋の抜け出しや、接合部コンクリートが杭またはフーチングへめり込むことによる付加回転変形を適切に考慮する必要があることを指摘している。本実験結果から上記付加回転変形に対して、芯鉄筋の配置や強度の違いが及ぼす影響は小さいものと判断される。

6. せん断破壊型実験結果

6.1 せん断耐力の評価

杭頭のせん断力に対して 3 つの破壊形式（接合面ずれせん断破壊、杭頭部せん断破壊、杭軸部せん断破壊）を検討する（図-7）。接合面ずれせん断破壊の耐力 Q_{ma} は、圧縮軸力が作用する場合、摩擦係数を 0.6 とした摩擦耐力

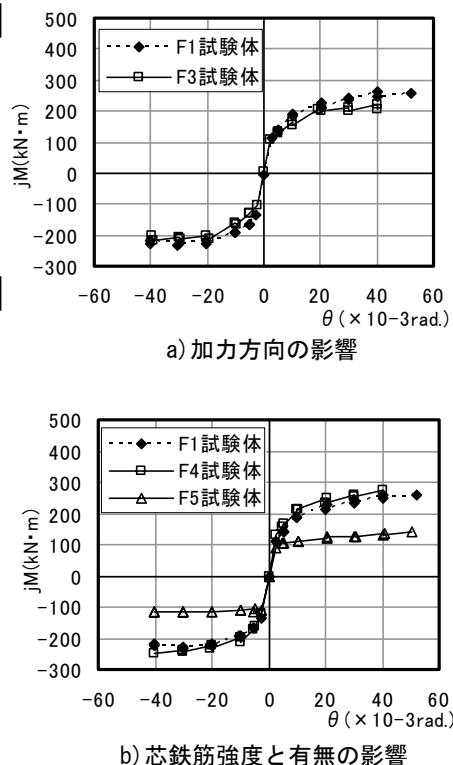


図-6 杭頭接合部の jM - θ 関係

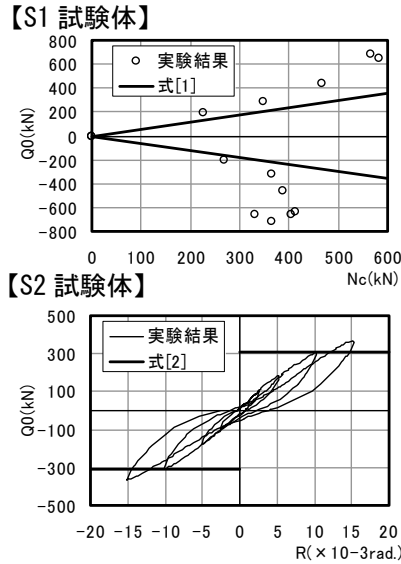
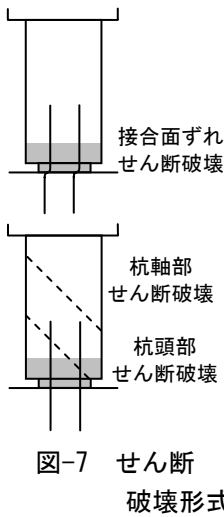


図-8 接合面ずれせん断破壊

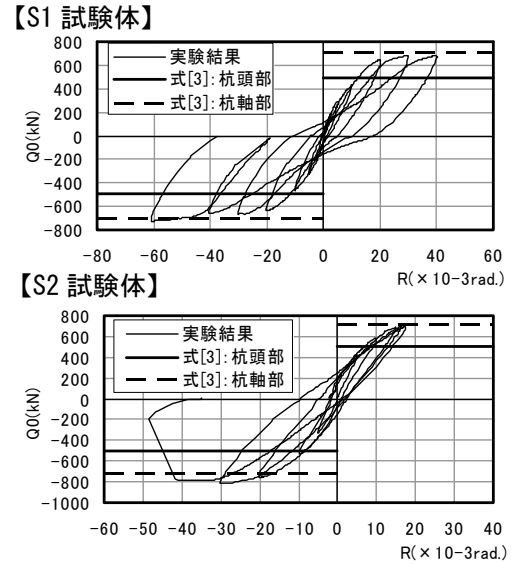


図-9 杭頭部および杭軸部せん断破壊

式⁵⁾[1]により、引張軸力が作用する場合、芯鉄筋のダウエル抵抗によるダウエル耐力式⁵⁾[2]により評価した。S1試験体が圧縮軸力時、S2試験体が引張軸力時に該当する。

$$Q_{ma} = \mu \cdot Nc \quad [1]$$

$$Q_{ma} = 1.65 \sum a_v \cdot \sqrt{\sigma_{Bf} \cdot \sigma_y'} / 1000 \quad [2]$$

杭頭部せん断破壊ならびに杭軸部せん断破壊は、塑性理論に基づくせん断耐力式⁶⁾[3]により評価した。本耐力式はトラス機構耐力（部材端の圧縮力がせん断補強筋の引張力に変換されてから伝わる力）とアーチ機構耐力（部材両端の圧縮領域を対角線状に結ぶ力）との足し合わせにてせん断耐力 Q_{su} を評価している。

$$Q_{su} = \{ b_t \cdot j_t \cdot e p_{we} \cdot \sigma_{wy} + k1 \cdot (1 - k2) \cdot b_a \cdot d_a \cdot v \cdot \sigma_B \} / 1000 \quad [3]$$

ここに、 μ ：摩擦係数（0.6）、 Nc ：圧縮合力（kN）

a_v ：全芯鉄筋断面積（mm²）、 σ_y' ：有効強度（N/mm²）

σ_{Bf} ：フーチングコンクリート強度（N/mm²）

b_t ：トラス機構有効幅（mm）、 j_t ：有効主筋間距離（mm）

$e p_{we}$ ：検討区間の有効せん断補強筋比

$e \sigma_{wy}$ ：検討区間のせん断補強筋材料強度（N/mm²）

$$k1 = \left[\sqrt{\left(\frac{L}{d_a} \right)^2 + 1} \right] - \left(\frac{L}{d_a} \right) \Big/ 2$$

$$k2 = 3 \cdot e p_{we} \cdot \sigma_{wy} / (v \cdot \sigma_B)$$

L ：アーチ機構長さ（mm）

d_a ：アーチ機構等価せい（mm）

b_a ：アーチ機構等価幅（mm）

v ：コンクリート圧縮強度の有効係数

σ_B ：杭軸部コンクリート強度（N/mm²）

6.2 せん断耐力式の妥当性

図-8 に接合面ずれせん断破壊の耐力式とせん断破壊型試験体の実験結果との関係を示す。S1試験体は各サイクルのピーク時の、S2試験体は引張軸力時の実験結果である。なお、S1試験体における圧縮軸力 Nc は、接合部の曲げモーメント jM を、接合部断面を矩形置換した有効せいの応力中心間距離で除した値により算定している。S1、S2両試験体において、実験結果は耐力式から算定される値よりも大きいことから、圧縮軸力の場合、摩擦係数を0.6とした摩擦耐力式[1]、引張軸力の場合、ダウエル耐力式[2]を用いることによって、接合面ずれせん断耐力を安全側に評価できることが明らかとなった。

図-9 に各せん断破壊型試験体（S1、S2）の杭頭せん断力 $Q0$ と、杭頭部ならびに杭軸部のせん断耐力式との関係を示した。両試験体ともに、実験結果は各破壊形式のせん断耐力を上回っていることから、提案する耐力式[3]は安全側の評価式であることがわかる。なお、杭頭部のせん断耐力は、杭軸部せん断耐力よりも小さい評価値となる。両試験体ともに、杭頭せん断力 $Q0$ は杭頭部せん断耐力値を超えていること、S2試験体は杭軸部せん断破壊であったことを考慮すると、杭頭部せん断耐力については、式[3]はかなり安全側の評価値となることがわかる。

7. まとめ

縮尺模型による構造実験を行うことにより、以下のことが確認できた。

- ①曲げ破壊試験結果の加力点水平力 P と部材角 R の関係では、载荷軸力が剛性および最大水平力に影響を与える。
- ②芯鉄筋の配置ならび強度の違いは、杭頭接合部の回転変形に与える影響は小さい。
- ③提案する破壊形式の異なる3つのせん断耐力式は実験結果を安全側に評価する。

以上より、杭頭半剛接合工法の構造性能を確認することによって、本工法の実用化の目処が立つに至った。

なお、本工法の開発は、青木あすなろ建設（株）、安藤建設（株）、大木建設（株）、（株）熊谷組、西武建設（株）、（株）銭高組、（株）間組、（株）ピーエス三菱との共同研究により行ったものである。

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多大なるご協力を頂きました。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，pp65-70，1999.12
- 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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（2002），日本建築学会，pp.59-71，2002.
- 6) 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，日本建築学会，pp142-162，1999.