

場所打ちコンクリート杭の杭頭半剛接合に関する研究

安藤建設(株) 田畑 卓

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。これらは杭基礎の剛性と耐力を高めることで地震時の安全性を確保する思想であるが、一方で、杭頭部には大きな曲げモーメントが作用することになり、杭や基礎梁の設計が不経済となることが多い。この観点からはむしろ、杭頭部の回転剛性はある程度低い方が杭頭部の作用曲げモーメントを抑制でき、さらに靱性を確保することで耐震性の向上と設計の合理化を図ることが可能となる。本報では場所打ちコンクリート杭を対象とした杭頭半剛接合工法について、構造性能上、特に重要な杭頭接合部の曲げ性能を実験的に調べたので報告する。

2. 工法概要

図1に杭頭部の詳細を示す。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、杭頭の回転剛性(あるいは固定度)を低減した杭頭半剛接合工法である。接合部は直接にフーチングを支承しており、杭に作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。

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。その際、杭頭部の支持性能および靱性を確保するため、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/mm² 級の超高強度せん断補強筋を用いる。表1に杭頭接合部の各部寸法を示す。

3. 実験概要

3.1 試験体

図2に試験体形状および配筋を、表2に試験

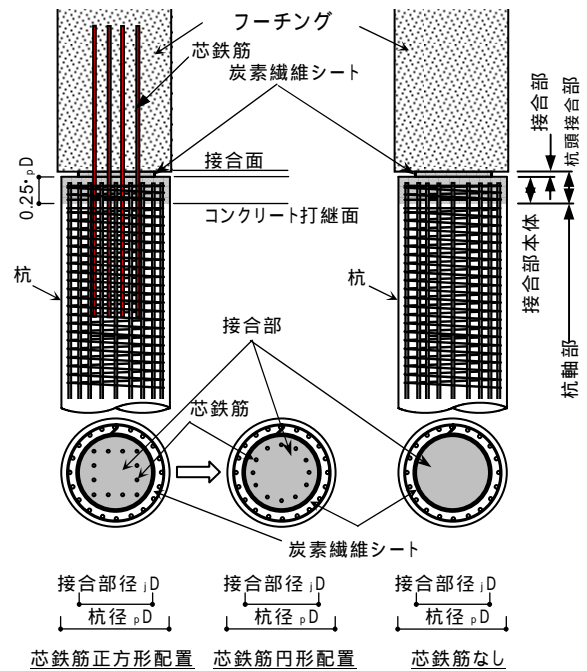


図1 杭頭接合部の構成

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 _p D | _p D: 杭径 |
| 接合部径 (_j D) | 0.70 _p D | 杭軸部断面積の 1/2 |
| 接合部高さ | 70 | 1000 _p D 1400 (mm) |
| | 100 | 1500 _p D 2000 (mm) |
| CFRP リング高さ | 70 - t | 1000 _p D 1400 (mm) |
| | 100 - t | 1500 _p D 2000 (mm) |

t: コンパネ厚さ(10mm ~ 12mm)

体諸元を示す。試験体は想定実杭の 1/4 縮小モデルで、杭軸径が 500mm、接合部径が 350mm である。試験体数は全 5 体とした。

F1 試験体は標準となる試験体で、芯鉄筋に高強度鉄筋 USD685、せん断補強筋に 1275N/mm² 級の超高強度円形スパイラル筋を用い、載荷軸力は長期軸力相当とした。ここで芯鉄筋は矩形配置としている。F2 試験体は載荷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載荷した。F4 および F5 試験体は軸力が長期相当で、それぞれ芯鉄筋に SD390 鉄筋を用いた試験体

Experimental Study on Semi-Rigid Connection on Pile Top on Cast-in-Place Concrete Pile

Taku TABATA

表 2 試験体諸元

| 試験体 | 芯鉄筋 | 杭主筋 | せん断補強筋 | 荷重軸力 | | パラメータ |
|-----|--------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|---|------------|
| F1 | 12-D13 (USD685) | 24-D13 (SD390) | 2-U5.1@26 $\rho_w=0.3\%$ | 982kN | $0.17A_p \cdot F_c$ | 標準(長期軸力) |
| F2 | | | | -679kN ~ 2945kN | $-0.65 \cdot N_y \sim 0.5A_p \cdot F_c$ | 変動軸力 |
| F3 | | | | 982kN 1963kN | $0.17A_p \cdot F_c$ $0.33A_p \cdot F_c$ | 芯鉄筋 45° 配置 |
| F4 | 20-D13 (SD390) | $\rho_g=1.55\%$ | | 982kN | $0.17A_p \cdot F_c$ | 芯鉄筋普通強度 |
| F5 | なし | | | | | 芯鉄筋なし |

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

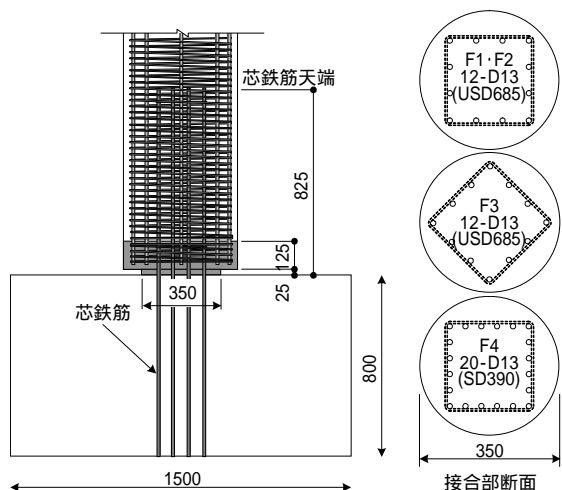


図 2 試験体形状および配筋

および芯鉄筋無しとした試験体である。なお、各試験体とも接合部の外周には目付け量 $300\text{g}/\text{m}^2$ 、引張強度 $3990\text{ N}/\text{mm}^2$ 、引張弾性率 $2.56 \times 10^5\text{ N}/\text{mm}^2$ の炭素繊維リングを 1 層巻きした。表 3 および表 4 に使用材料の力学的性質を示す。

3.2 実験方法

図 3 に加力方法を示す。加力は、油圧ジャッキを加力点、油圧ジャッキ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載荷し、油圧ジャッキにより押し引きの正負交番繰り返し荷重を行った。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。加力の制御は、スタブ天端から高さ $250\text{mm}(=0.5_p D)$ 位置での回転角 θ による変形制御とした。

4. 実験結果

4.1 履歴性状および破壊状況

図 4 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。いずれの試験体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 ~

表 3 コンクリートの力学的特性

| 部位 | 圧縮強度 N/mm^2 | 割裂強度 N/mm^2 | ヤング係数 $\times 10^4\text{N}/\text{mm}^2$ |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| 杭軸部 | 31.4 ~ 40.4 35.3 | 1.9 ~ 2.9 2.6 | 2.58 ~ 2.79 2.67 |
| 接合部 本体 | 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 4 鉄筋の力学的性質

| 呼名 | 材質 | 降伏強度 N/mm^2 | 引張強度 N/mm^2 | ヤング係数 N/mm^2 |
|------|----------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| D13 | SD390 | 459 | 620 | 1.73×10^5 |
| D13 | USD685 | 705 | 932 | 1.73×10^5 |
| D16 | USD685 | 735 | 966 | 1.88×10^5 |
| U5.1 | SBPD1275 | 1461 | 1486 | 2.00×10^5 |

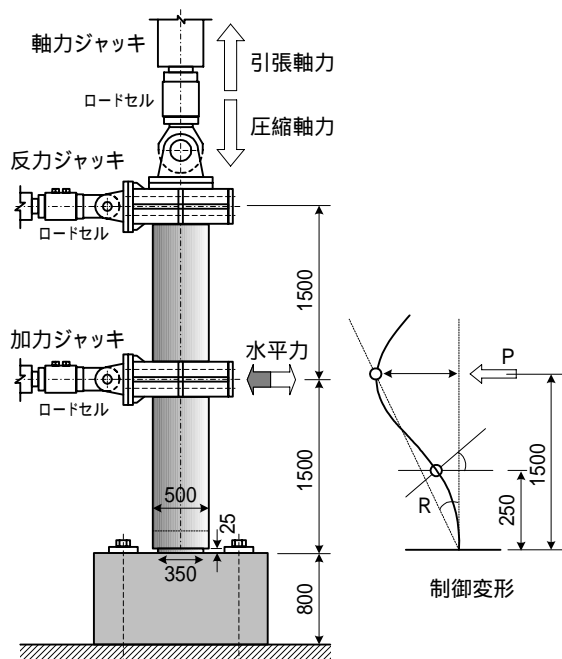


図 3 加力方法

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、 $\theta=1/200\text{rad}$ 時の残留ひび割れ幅で $0 \sim 0.05\text{mm}$ 程度、 $\theta=1/33\text{rad}$ ピーク時で $0.06 \sim 0.35\text{mm}$ であり、コンクリートに

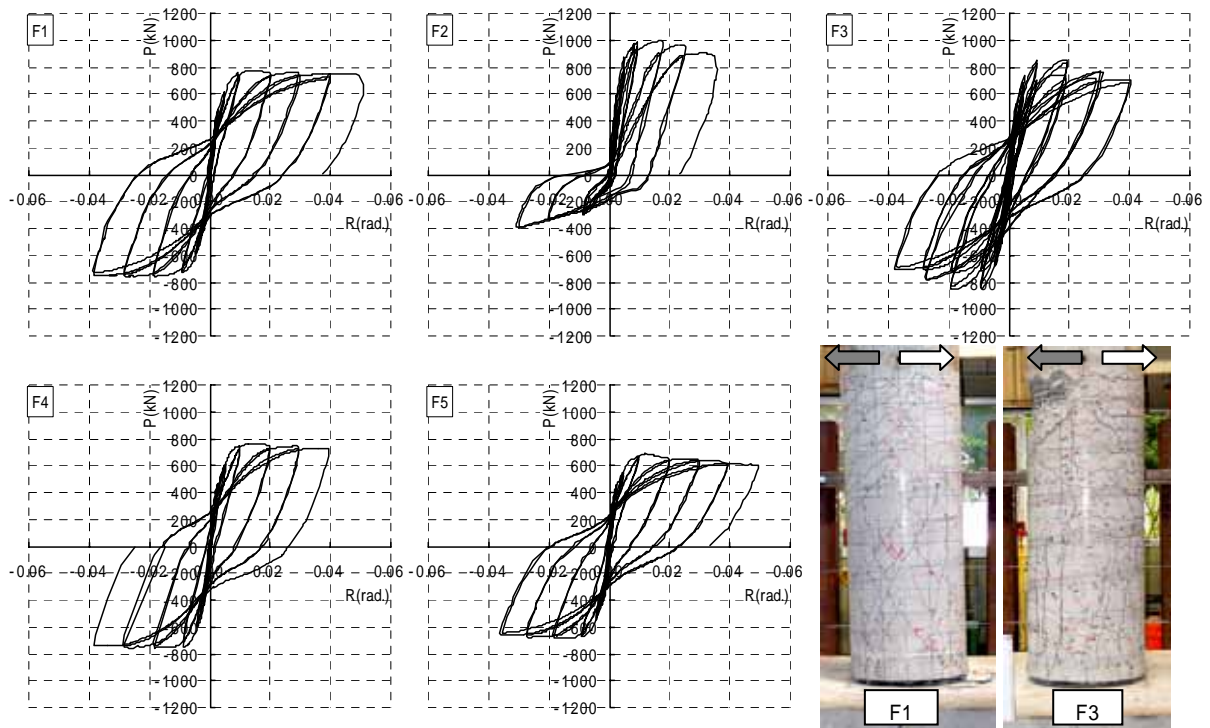


図 4 P - R 関係および最終破壊状況例

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、 $\theta = 1/33 \text{ rad}$ 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。

いずれの試験体も杭頭接合部およびコンクリート打継部での支圧破壊は観察されず、接合部の炭素繊維リングの破断も $1/33 \text{ rad}$ まで観察されなかった。

4.2 杭頭接合部の曲げ性状

図 5 は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 は載荷軸力による P 効果を考慮した値である(試験体頂部で計測したピンの回転変形に基づき補正)。

図 5a)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、曲げ性状と載荷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[1][2]でも指摘されているように、芯鉄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。

4.3 杭頭接合部の回転性能の評価

図 6 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、 $jM - j\theta$ 関係について実験値と解析値の適合性を検

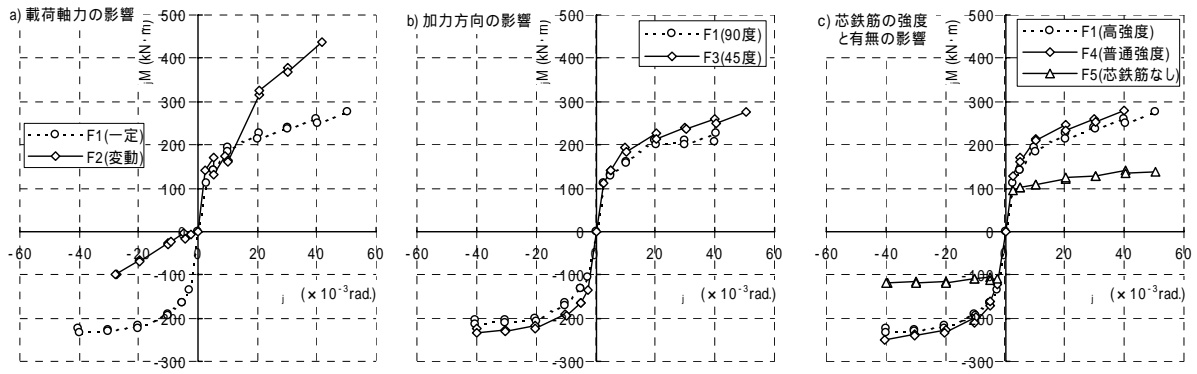


図5 杭頭接合部の $jM - j$ 関係に及ぼす各実験因子の影響

討した。ところで、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偏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たため、本実験とは別に杭頭接合部近傍を模擬した単純圧縮試験を実施している。その結果によれば、接合部の圧縮強度は接合部本体の補強筋量 ($p_w \cdot \sigma_{wy}$) の影響を受けるが、本実験と同一の補強筋量では、最大強度がシリンダー強度の1.7倍程度まで増大し、また明確な強度低下も生じなかった。

単純圧縮試験の結果に基づきコンクリートをモデル化し、また鉄筋を完全弾塑性モデルとして行った断面曲げ解析結果と本実験結果による $jM - j$ 関係との対応を図7に示す。同図より、断面曲げ解析結果は実験結果と良好に適合することが確認された。

5. まとめ

本実験より得られた知見を以下に示す。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。

謝辞: 本工法は、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開発である。杉村義広先生(当時: 東北大学大学院教授)には貴重なご意見と指導を頂きました。記して感謝の意を表します。

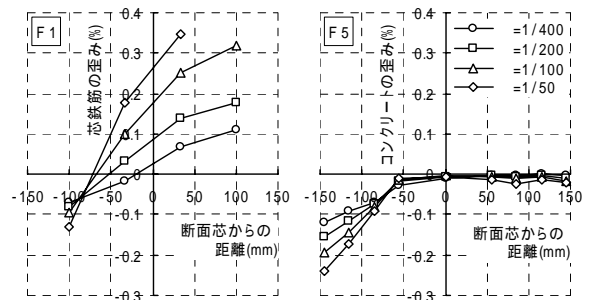


図6 接合部断面内歪み分布

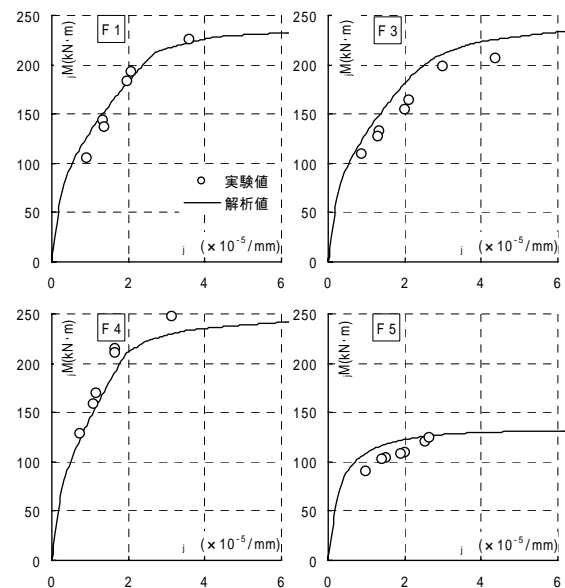


図7 接合部の曲げモーメント - 曲率関係

[1] 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.

[2] 小林勝己, 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.