

ダイレクトシーピー構法の開発

－鋼管柱と既製コンクリート杭を一体化させる杭頭接合法－

舟木秀尊* 武田彰文** 山田高之***

1. はじめに

建築物では柱と杭は鉄筋コンクリート造の基礎（フーチング）および基礎梁を介して接続するのが一般的である。一方、低層の鉄骨造建築物を対象として基礎および基礎梁部分の工事費の低減を図る様々な工法が開発されている。例えば、鋼管杭と鉄骨柱を連結し基礎梁を省略する工法や、内面リブ付き場所打鋼管コンクリート杭の内部に柱を埋込み、柱と杭を接続しH形鋼の基礎梁を用いる工法が挙げられる。

このような状況の中、様々な杭の中でコストメリットが大きいと考えられる既製コンクリート杭を用い、基礎および基礎梁の省略が可能な「ダイレクトシーピー構法」を開発した。構法の概要を図-1に、構法を用いた架構イメージを図-2に示す。本構法は、鋼管柱（Column）を杭（Pile）上部の鋼管コンクリートの内部に直接（Direct）埋込み、1柱1杭で建物を支持する構法である。

本報では、構法の概要、実用化のために実施した柱一杭接合部の構造性能確認実験、応力伝達機構を検証したFEM解析、および接合部の設計法について報告する。

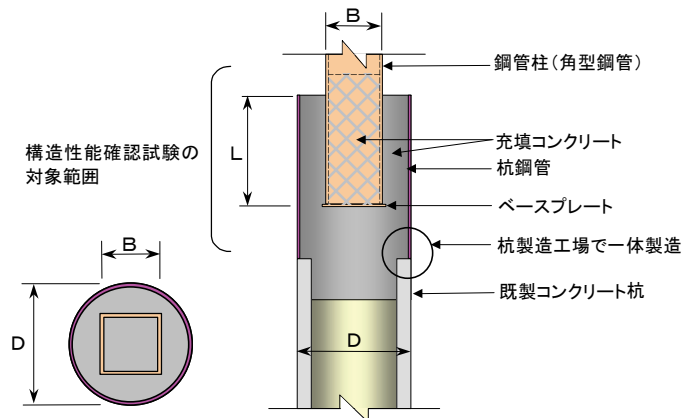


図-1 構法の概要

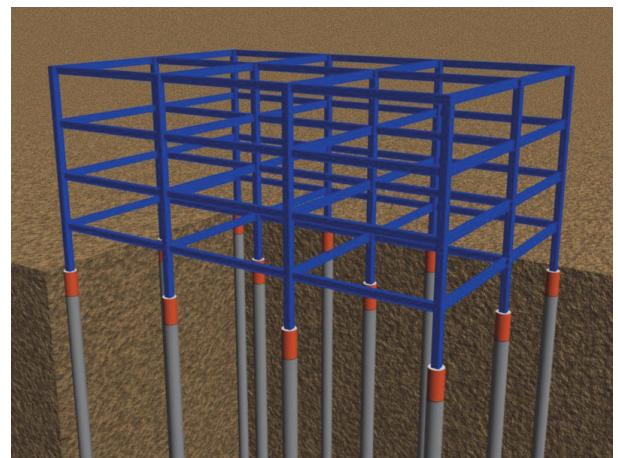


図-2 架構イメージ

2. 構法の概要

2.1 構成

本構法は、既製コンクリート杭（杭径D）、その上部の杭鋼管（肉厚t）、ベースプレートを取付けた角型鋼管柱（サイズB）および充填コンクリートから構成される（図-1参照）。使用材料を表-1に示す。

本構法では、ベースプレート（辺長=B+50 mm）を取り付けた鋼管柱を杭鋼管の内部に埋込む納まりとなっており、ベースプレートの外接円以上の内径を杭が有する必要がある。

表-1 使用材料

| 使用材料 | 使用材料の範囲 | |
|-----------|---------|---------------------------------|
| 既製コンクリート杭 | 径D | D = φ450~1200 (mm) |
| | 杭種 | PHC杭, PRC杭, SC杭 |
| 杭鋼管 | 肉厚t | t ≥ 9 (mm) |
| 角型鋼管柱 | サイズB | B = 150~650 (mm) |
| 充填コンクリート | 種類 | 普通コンクリート |
| | 強度 | Fc = 21~36 (N/mm ²) |

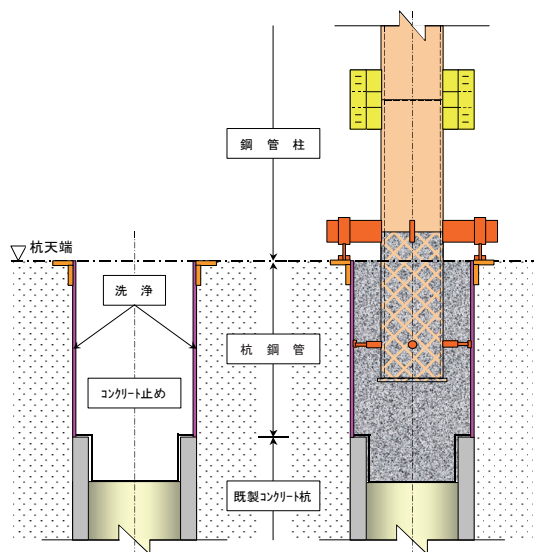
*技術研究所 **関西支社建築設計部 ***技術本部建築部

2.2 施工手順

本構法において杭の施工は通常の埋込み杭と同様の手順で行う。柱を埋設するための杭鋼管をあらかじめ既製杭の頭部に接合して杭と一体施工する点が特徴である。施工手順を表-2に示す。杭の打設後に上下・水平方向の施工誤差が生じても柱が通り芯上に設置できるように管理値を設定し、柱サイズBと杭径Dの組合せを決定している。

表-2 施工手順

| | |
|---|---------------------------------------|
| ① | 杭鋼管と既製コンクリート杭を工場で接続 |
| ② | 杭鋼管を既製コンクリート杭に取り付けた状態で埋込杭工法にて施工 |
| ③ | 杭鋼管内部の洗浄 (図-3 a参照) |
| ④ | 鋼管柱1階柱脚の建込み |
| ⑤ | 杭鋼管内部のコンクリート打設 |
| ⑥ | 杭鋼管内の充填コンクリートが硬化した後に鉄骨1節の建方 (図-3 b参照) |



a) 杭内の洗浄 b) 鉄骨1節の建方

図-3 施工手順の一例

3. 構造性能確認実験

3.1 実験の目的

杭鋼管と柱の接合部載荷実験は、埋め込み接合部の構造性能(耐力と変形性能、接合部の剛性、破壊性状)を把握する目的で実施した。各パラメータによる実験結果から、本構法における接合部の仕様と設計法の妥当性を検証する。

3.2 実験パラメータ

試験体は代表的な実大モデルを基本ケースとした全9体である。実験パラメータは、①柱の埋め込み深さ(1.5・B~2.5・Bの3ケース、B:柱せい)、②軸力(0~2500 kNの3ケース)、③杭と柱の寸法関係(柱サイズ□300~500 mm、杭径φ780~980 mm)、④杭と柱の偏心(加力方向に75 mm)である。試験体の諸元を表-4に、材料強度を表-5に示す。鋼管柱の下端にはベースプレート(柱径+50 mm角、厚さ22 mm)を取付けており、ベースプレート中央にはコンクリート打設孔(φ150 mm)を設けている。また、鋼管柱内は杭鋼管天端までコンクリートを充填している。

3.3 実験方法

基礎梁が無い構造の応力状況に近づけるため、試験体の下部ほど曲げ応力が增大する片持ち柱形式の載荷

表-5 材料強度

| 部材 | 材質 | 強度(N/mm ²) |
|-----------------|-----------------------------|--|
| 鋼管柱 | BCR295 | $\sigma_y=403, \sigma_u=437$ |
| 充填コンクリート | 普通Fc=30(N/mm ²) | $\sigma_B=32.5\sim38.8$ |
| 杭鋼管 (リブ無し鋼管) | SS400 | $\sigma_y=289\sim312$ $\sigma_u=429\sim439$ |
| ベースプレート | SS400 | - |

σ_B : コンクリートの実圧縮強度(実験日の値)

σ_y : 鋼材の降伏点強度, σ_u : 鋼材の引張強度

表-4 試験体の諸元

| 試験体 No. | 杭鋼管 径D×厚(mm) | 鋼管柱 径B×厚(mm) | 柱の埋込長 L(mm) | 水平力載荷方向への 偏心距離(mm) | 軸力 (kN) |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------------|---------|
| 1 | φ780×9 | □-400×19 | 800 (2.0・B) | - | - |
| 2 | φ780×9 | □-400×19 | 800 (2.0・B) | - | 1500 |
| 3 | φ780×9 | □-400×19 | 800 (2.0・B) | - | 2500 |
| 4 | φ780×9 | □-400×19 | 1000 (2.5・B) | - | - |
| 5 | φ980×12 | □-300×19 | 600 (2.0・B) | - | - |
| 6 | φ980×12 | □-400×19 | 800 (2.0・B) | - | - |
| 7 | φ780×9 | □-400×19 | 600 (1.5・B) | - | - |
| 8 | φ780×9 | □-400×19 | 800 (2.0・B) | 75 | - |
| 9 | φ880×12 | □-500×19 | 1000 (2.0・B) | - | - |

とした。試験体の設置状況を図-4に示す。水平方向の加力は柱への正負交番载荷とし、試験体No. 2とNo. 3については水平力と同時に一定軸力を载荷した。変位と鋼管ひずみの計測点を図-5に示す。変位計測は柱および杭鋼管の加力方向の変形量と充填コンクリートが杭天端から抜け上がる量について計測した。杭鋼管ひずみについては鋼管の降伏荷重を確認すると共に、柱から杭鋼管への応力伝達機構を把握するため杭鋼管外周180°の範囲において所定の間隔で計測した。

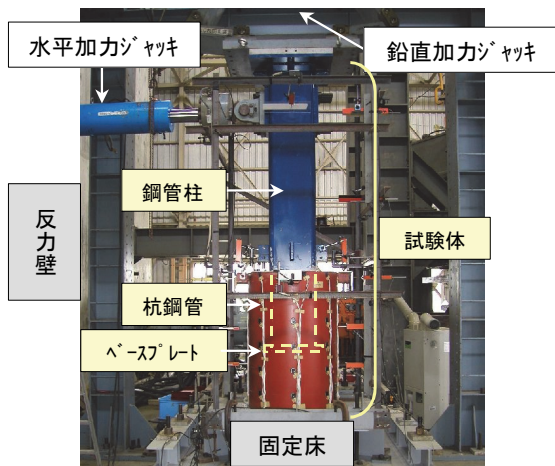


図-4 試験体の設置状況

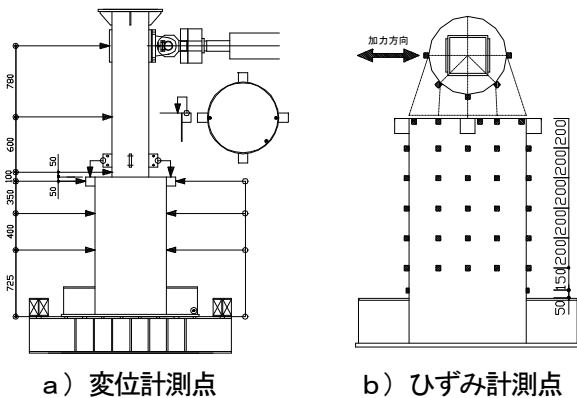


図-5 変位と鋼管ひずみの計測点

3.4 実験結果

a. 降伏耐力

標準タイプ (No. 1) と柱の埋め込み長さを変えたタイプ (No. 4, No. 7) は杭頭鋼管の縁部で降伏 (周方向応力) し、その後に柱脚が降伏した。軸力を载荷したタイプ (No. 2, No. 3) 及び杭鋼管の太いタイプ (No. 5, No. 6) では柱脚の降伏が先行し、その後に杭頭鋼管の縁部で降伏した。各試験体の降伏耐力について、実験値と計算値の比較を5章の表-7に示す。本接合部は杭頭鋼管の降伏によって耐力が決まる構造といえる。

b. 回転角と水平荷重の関係

代表的なパラメータについて、杭-柱接合部の回転角-水平荷重関係を比較する。なお、回転角は杭鋼管天端とその下方 800 mm (No. 1, 2, 3, 6, 8 の柱ベースプレート位置に相当) の2点での相対水平変位から算出した値である。柱の埋込長さによる影響を図-6に示す。埋込長さ $L \geq 2.0 \cdot B$ (No. 1 および No. 4) では载荷装置の能力の制限から最大耐力は確認できなかったものの、ほぼ同様の性状を示すことが分かった。一方、柱の埋込長さ $L = 1.5 \cdot B$ (No. 7) では、実験の最終段階で杭鋼管天端からのコンクリートの抜上り量が No. 1 および No. 4 の5倍程度もあり、両者の比較から $L \geq 2.0 \cdot B$ とすれば抜上りで耐力が決定されないことがわかった。柱が杭に対して偏心した影響を図-7に示す。No. 8 では水平力の载荷方向へ柱心を 75 mm 偏心させているが、No. 1 (偏心無) と比較して回転角-水平荷重関係においてその影響は確認できなかった。柱に軸力载荷したことによる影響を図-8に示す。各実験とも最大耐力は確認できなかったが、軸力の増加に伴い回転角-水平荷重関係の初期剛性が、No. 1 と比較してやや増大することがわかった。

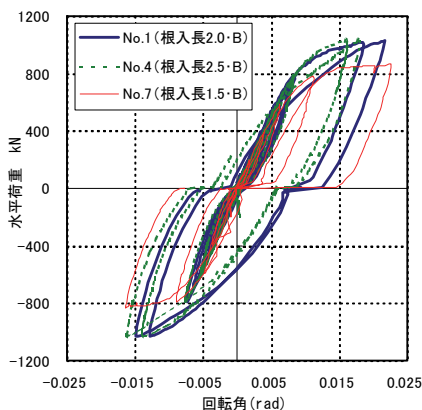


図-6 埋込長さの影響

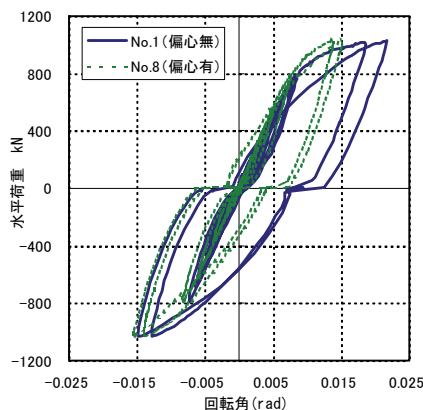


図-7 偏心の影響

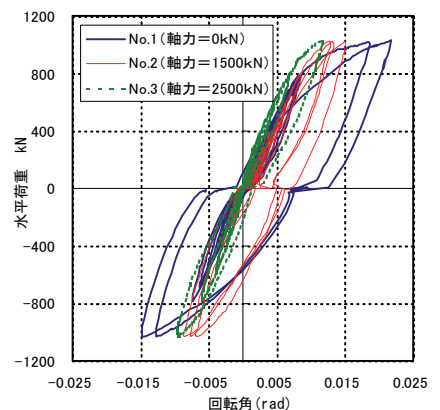
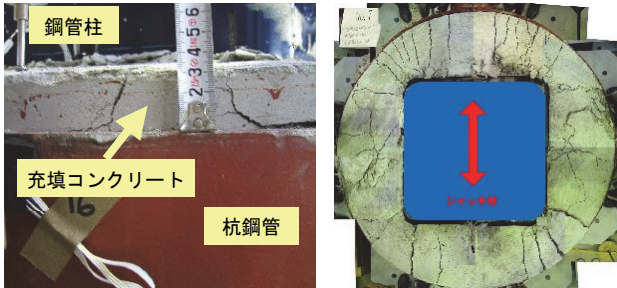


図-8 軸力の影響

c. コンクリートの破壊状況

杭頭ひび割れは杭頭鋼管が降伏した後に顕著に現れた。柱の埋込み長さが 1.5 B (No. 7) の場合には抜き破壊が見られた。コンクリートの破壊状況を図-9 に示す。杭頭のひび割れは各試験体でほぼ同じ位置に発生し、柱の埋込みが長いほど発生量は少なかった。



a) 杭頭の抜け上がり b) 杭頭のひび割れ

図-9 コンクリートの破壊状況 (No. 7)

d. 杭鋼管の主ひずみ分布

標準タイプ (No. 1)、埋込長が浅いタイプ (No. 7)、柱偏心タイプ (No. 7) の降伏荷重時の主ひずみ分布を図-10 に示す。いずれも杭頭の縁部にひずみ (応力) の発生が集中しており、これが耐力を決める要因となっている。また、埋込長が浅いタイプでは、応力伝達に有効な長さ (深さ) が小さいことから、縁部付近に応力がより集中して降伏耐力が低くなったと推察される。偏心タイプは標準タイプと主ひずみの分布が似ており、また降伏耐力への影響も見られなかった。

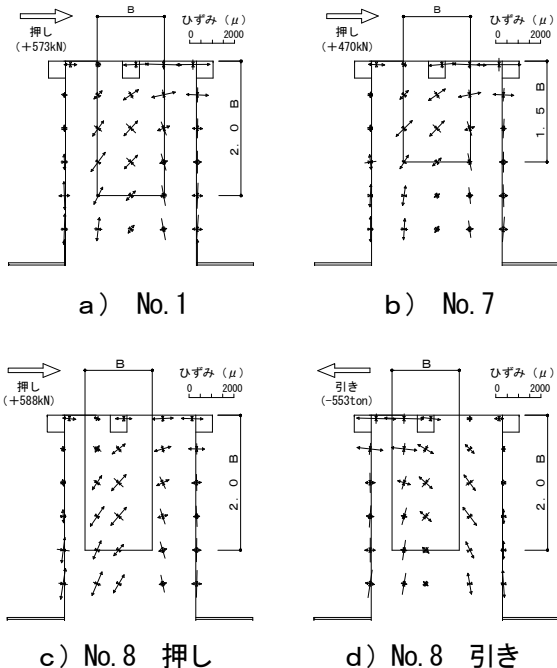


図-10 杭鋼管の主ひずみ分布

4. FEM解析

4.1 解析の概要

本解析は、柱-杭鋼管コンクリート接合部における応力伝達機構を把握することを目的とした。対象モデルの形状を図-11 に示す。試験体 No. 1 を基本ケースとして 45° 方向への加力も実施した。柱から杭鋼管への応力作用領域は図-12 のモデルを想定しており実験値との比較により検証する。解析には ADINA R&D Inc. の汎用プログラム ADINA ver8.1 を用いた。

4.2 解析モデル

解析モデルは図-13 に示すように対称性を考慮した全体の 1/2 モデルとした。材料物性を表-6 に、鋼材の $\sigma - \epsilon$ 関係を図-14 に示す。鋼管柱、充填コンクリート、杭鋼管共に 3D-solid 要素でモデル化し、各部材間には接触要素を用いた。境界条件は最下面の Z

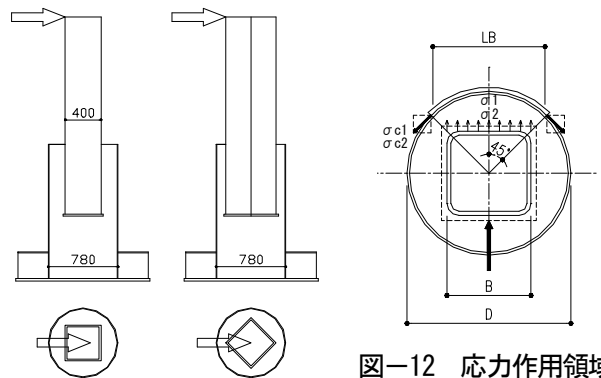


図-12 応力作用領域

図-11 対象モデルの形状

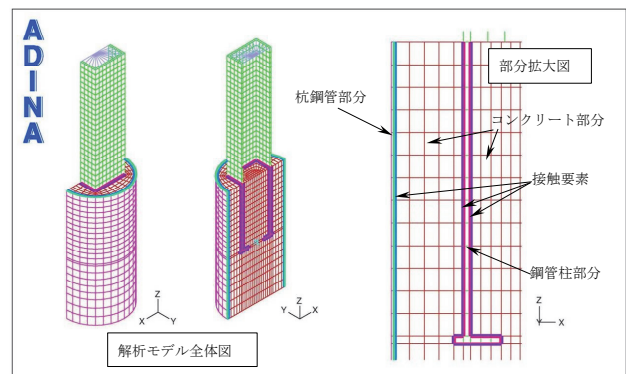


図-13 解析モデル (試験体 No. 1)

表-6 材料物性

| | 鋼管柱 | コンクリート | 杭鋼管 |
|---------------------------------------|--------|--------|-------|
| 材質 | BCR295 | Fc30 | SS400 |
| ヤング率 (kN/cm ²) E | 20500 | 2780 | 21300 |
| ポアソン比 | 0.3 | 0.167 | 0.3 |
| 降伏応力 (kN/cm ²) σ_y | 40.3 | — | 28.9 |
| 二次勾配 (kN/cm ²) E_T | 20.5 | — | 21.3 |

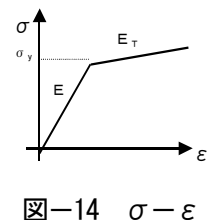


図-14 $\sigma - \epsilon$

方向を拘束し、対称性を考慮した切断面はY方向を拘束とした。鋼管柱の載荷面となる頂部は載荷点に対しX方向の従属変位拘束とした。加力は実験において杭鋼管の頂部が降伏を開始した 300 kN（全体モデルで 600 kN に相当）とした。接触要素については摩擦を考慮しコンクリートと鋼材の摩擦係数を 0.5 とした。

4.3 解析結果

柱から杭鋼管に支圧力が伝達される領域を L_B と定義（図-13参照）し、この領域における杭鋼管の応力分布について解析値と実験値を比較したものを図-15に示す。ここで解析値の支圧応力とは杭鋼管と充填コンクリートの間の接触要素に作用するせん断力を作用領域の面積で平均化したものである。解析結果は押し側の杭鋼管縁部と引き側の柱ベースプレート位置で支圧応力が大きくなっており、この傾向は実験値の分布と一致している。これにより応力作用領域の考え方が概ね妥当であることがわかった。杭鋼管、充填コンクリート、および柱部材の有効応力（45° 方向加力）を図-16に示す。杭頭縁部に応力が集中する傾向は 0° 方向加力についても同様の結果で、発生する応力の最大値も殆ど変わらなかった。各部材の弾性範囲において、加力方向が柱から杭鋼管への支圧力の伝達機構に与える影響は少ないと推察される。

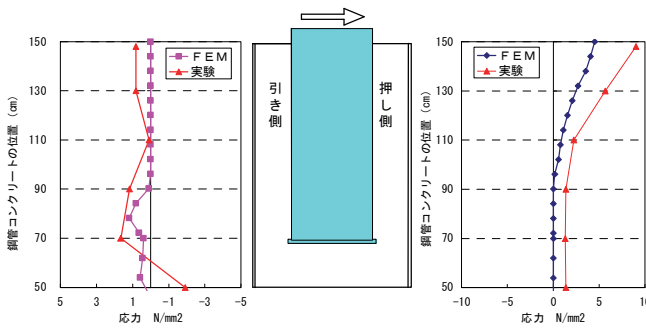


図-15 杭鋼管 (L_B 範囲) の応力分布

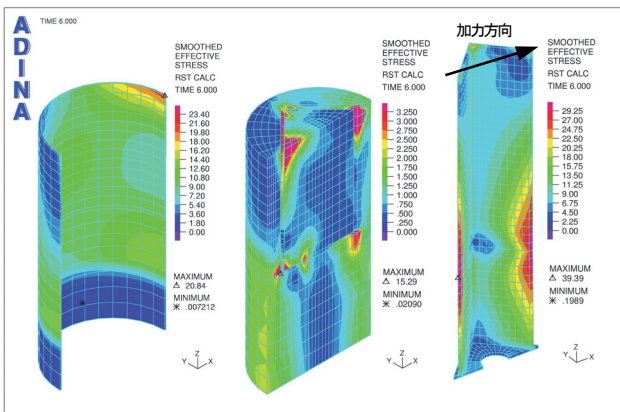


図-16 各部材の有効応力 (45° 方向加力)

5. 設計法

5.1 設計法の概要

本構法の設計においては、上部構造、杭および地盤を一体とした一体解析により各部の応力を算出する。また、一次設計時に引抜が生じる柱には適用しない。鋼管柱の杭鋼管への埋込長 L は、実験結果の知見を反映して $2.0 \cdot B$ (B : 柱サイズ) を基本とし、これに鉛直方向の施工誤差 (=50 mm) を加えた値以上とする。接合部（鋼管柱埋め込み部）の応力伝達モデルを図-17に示す。ベースプレート重心位置での短期許容曲げモーメント M_a は下式による。

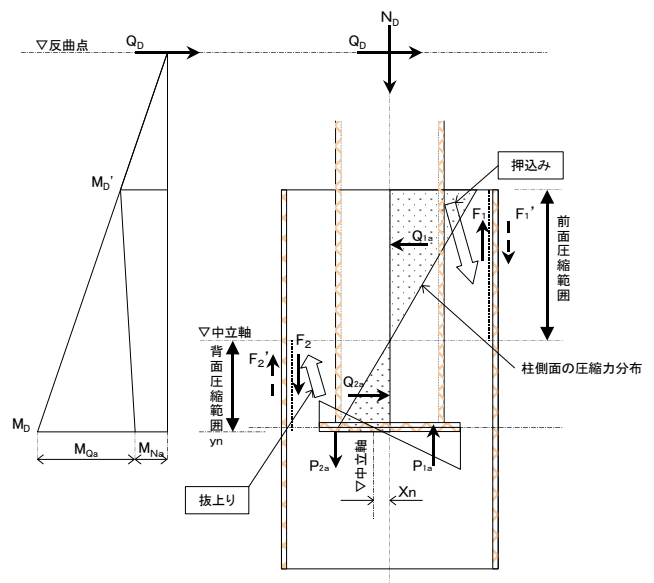


図-17 接合部の応力伝達モデル

$$M_a = M_{Qa} + M_{Na} \quad \dots (1) \text{式}$$

$$M_{Qa} = Q_{1a} \cdot y_{Q1} - Q_{2a} \cdot y_{Q2} \quad \dots (2) \text{式}$$

$$M_{Na} = P_{1a} \cdot x_{p1} + P_{2a} \cdot x_{p2} + F_1 \cdot D/2 \quad \dots (3) \text{式}$$

$$Q_D = Q_{1a} - Q_{2a} \quad \dots (4) \text{式}$$

$$N_D = P_{1a} - P_{2a} + F_1 \quad \dots (5) \text{式}$$

ここに、

M_{Qa} : 杭鋼管の側面に作用する圧縮力 Q_{1a} および Q_{2a} により決定される許容曲げモーメント

M_{Na} : ベースプレート上下面に作用する P_{1a} および P_{2a} により決定される許容曲げモーメント

Q_D, N_D : 設計用せん断力および設計用軸力

- Q_{1a} , Q_{2a} : 杭上部および下部で鋼管柱側面に作用する圧縮力
- P_{1a} , P_{2a} : ベースプレートに作用する上向きおよび下向き反力
- F_I : 杭上部で杭鋼管とコンクリート間の摩擦力
- y_{Q1} , y_{Q2} : ベースプレート底面から Q_{1a} および Q_{2a} の作用位置までの距離
- x_{P1} , x_{P2} : ベースプレート図心から P_{1a} および P_{2a} の作用位置までの距離
- D : 杭鋼管の径

5.2 計算値と実験値の比較

設計法の応力伝達モデルによって算出した短期許容曲げモーメントの計算値と接合部の載荷実験における降伏曲げモーメントの実験値の比較を表-7に示す。実験値の降伏耐力は、計算値の短期耐力に対して1.47~2.54倍の値を示しており、設計法が安全側の評価となっていることがわかる。

表-7 計算値と実験値の比較

| 試験体 | 実験値 (降伏耐力) kN・m | 計算値 (短期耐力) kN・m | 実験/計算 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-------|
| No. 1 | 1275 | 651 | 1.96 |
| No. 2 | 1526 | 768 | 1.99 |
| No. 3 | 1613 | 775 | 2.08 |
| No. 4 | 1426 | 967 | 1.47 |
| No. 5 | 875 | 538 | 1.63 |
| No. 6 | 1873 | 907 | 2.07 |
| No. 7 | 952 | 387 | 2.46 |
| No. 8 | 1230 | 650 | 1.89 |
| No. 9 | 2280 | 897 | 2.54 |

6. まとめ

鋼管柱と既製コンクリート杭を一体化させる基礎構法について実大モデルの載荷実験を行い、接合部の構造性能を確認した。また、FEM解析によって応力伝達モデルを検討し、接合部の設計法を導いた。

これらの検討を踏まえて本構法の仕様と決定し、施工手順をまとめた。開発において得られた知見を以下に示す。

- i. 鋼管柱を杭頭鋼管に2.0 B 埋め込むことで杭頭部に抜け上がり破壊が発生せず、接合部として十分

な耐力が得られる

- ii. 柱の偏心（水平力載荷方向に75mm）が接合部の降伏耐力に与える影響は小さく、柱軸力の増加によって埋め込み部の初期剛性は増大する
- iii. 柱から杭鋼管への応力作用領域を仮定し、実験値とFEM解析の応力分布を比較した結果、両者の傾向は一致した
- iv. 応力伝達モデルを反映させた設計式の短期許容曲げモーメントは、実験値の降伏曲げモーメントに対して安全側に評価できる

7. おわりに

本構法は礎（フーチング）および基礎梁を無くすることで土工事や型枠および鉄筋工事を削減し、基礎工事のコストダウンを図ることができる。また、杭基礎建物において従来工法に比べて工期を短縮できる。環境面では掘削工事に伴う残土などの産業廃棄物を削減することができる。今後、これらの特長を活かせる場面において本構法を積極的に適用していきたい。

【参考文献】

- 1) (社) 日本建築学会、「鋼構造接合部設計指針 7.4 埋込み柱脚の設計」、2001年
- 2) 今野他、「鋼管柱と鋼管コンクリート杭の一体化構造に関する研究 その1~5」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2002年
- 3) 武田、舟木、山田、「角型鋼管柱と既製コンクリート杭の一体構造に関する実験」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004年