

杭頭半剛接合構法「F.T.Pile構法」の開発

青島 一樹*1・安田 聡*1・石崎 定幸*1・島田 博志*2・小室 努*2・川端 一三*3

Keywords : flexible connection of pile head, cast-in-place concrete pile, pre-cast pile, aseismic design

杭頭半剛接合, 場所打ちコンクリート杭, 既製コンクリート杭, 耐震設計

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震において、杭基礎構造物の杭頭部に多数の被害が発生した。この結果は、従来の杭頭接合法の問題点を示唆するものであった。すなわち、従来工法では、杭主筋をパイルキャップ(基礎)に定着するなどして、杭頭接合部を剛接合とするものが主流であった。しかし、杭頭接合部を剛接合とした場合、地震時には杭頭部に大きな曲げモーメントが発生するため、杭体が損傷する要因となる(図-1(a)参照)。

当社では、杭頭接合部を剛接合とする従来工法を見直し、杭頭接合部を半剛接とする「F.T.Pile構法」を開発した。F.T.Pile構法では、杭頭接合部の回転拘束度が緩和されるため、地震時には杭頭部の曲げモーメントを低減することができる(図-1(b)参照)。杭頭の曲げモーメント低減は、基礎梁の曲げモーメント低減にも大きく寄与するため、基礎梁を含めた基礎構造全体の耐震性能を向上させることが可能となる。また、曲げモーメントの低減を積極的に設計に取り入れることで、杭径や基礎梁の合理化も可能となる。

本報では、F.T.Pile構法の構造性能を把握するために実施した静的構造実験と振動実験の概要、および実施プロジェクトへの適用例について報告する。

2. 構法概要

F.T.Pile 構法は、杭頭接合部を半剛接合とすることによって、杭基礎の耐震性能を向上させる構法であり、場所打ちコンクリート杭と既製コンクリート杭に対応する。構法の特徴は、杭頭部に特殊な装置を必要とせず、シンプ

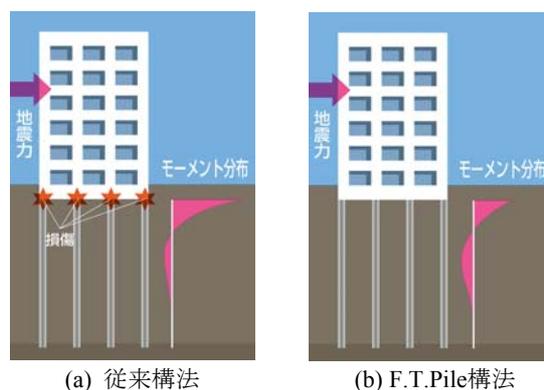


図-1 地震時に杭に作用するモーメント
Moment of pile under earthquake

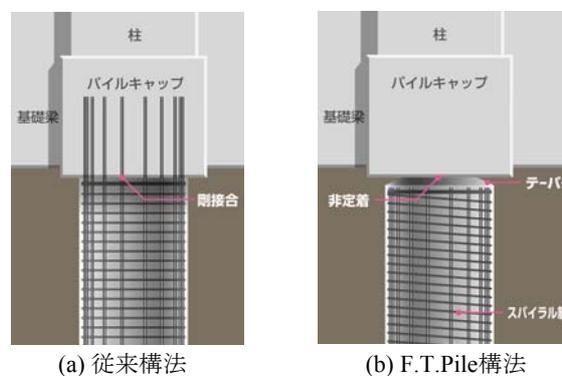


図-2 F.T.Pile構法(場所打ちコンクリート杭)
Structure of F.T.Pile (Cast-in-place concrete pile)

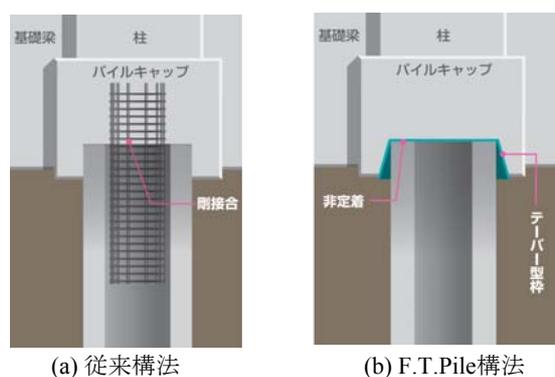


図-3 F.T.Pile構法(既製コンクリート杭)
Structure of F.T.Pile (Pre-cast concrete pile)

*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室
*2 設計本部構造グループ
*3 技術センター参事

ルかつ低コストで実施できる点にある。

場所打ちコンクリート杭については、図-2に示すように、杭主筋をパイルキャップに定着させず、杭頭接合部を錐台形状として接合面を縮小させることにより、杭頭回転剛性と曲げモーメントを制御可能にしている。あわせて、杭の横補強筋に高強度異形PC鋼棒のスパイラル筋を採用し、杭の変形能力を高めている¹⁾。

既製コンクリート杭については、図-3に示すように、杭頭をパイルキャップに50~100mm根入れし、根入れ部分の杭外周部と基礎の界面にテーパ状のクリアランスを設けた構造としている。このテーパ状のクリアランスが根入れ部の回転抵抗を無くすとともに、パイルキャップの損傷を防止する役目を果たす。また、杭頭せん断力は、クリアランスがゼロとなる杭頂部からパイルキャップへ伝達することが出来る。

杭に引抜き力が作用する場合、場所打ちコンクリート杭は杭頭断面中央部に芯鉄筋を配することで、既製コンクリート杭は鋼棒を杭頭端版に機械的に設置することで適用可能である。

3. 静的構造実験

3.1 場所打ちコンクリート杭

場所打ちコンクリート杭におけるF.T.Pile構法の杭頭接

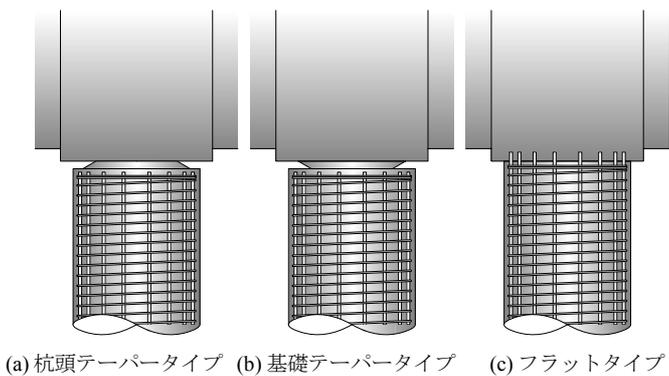


図-4 杭頭接合部
Flexible connection of pile head

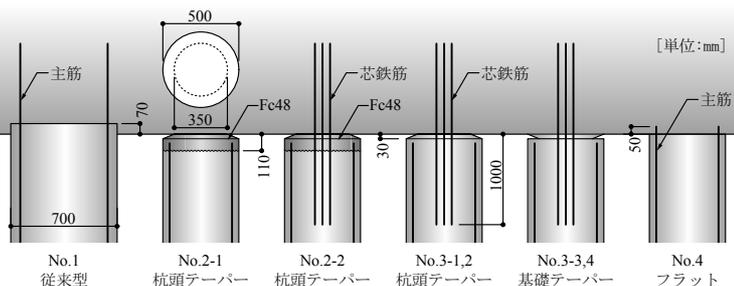


図-5 試験体一覧
List of specimens

合部は、図-4に示すように、杭頭部にテーパを設けて錐台形状とした「杭頭テーパタイプ」、パイルキャップ側に同様のテーパを設けた「基礎テーパタイプ」、テーパを設けずフラット形状とした「フラットタイプ」の3タイプがある。これらの杭頭接合部の構造性能を把握するために静的構造実験を実施した。

3.1.1 実験計画

図-5に試験体一覧を、図-6に代表的な配筋図を示す。試験体は、横補強筋に高強度異形PC鋼棒のスパイラル筋を使用した場所打ちコンクリート杭で、No.1では杭径φ700mm杭長4.2m、他の試験体では杭径φ500mm杭長3.0mである。No.1は杭主筋を基礎に定着した従来型の試験体

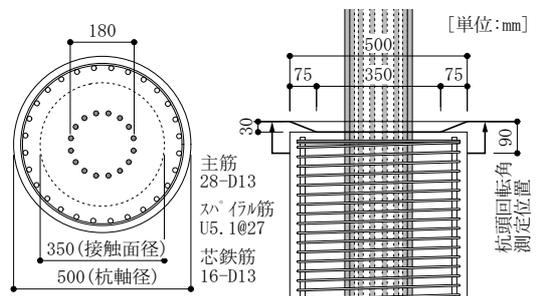


図-6 試験体配筋図例 (No. 3-4)
Figure of specimen

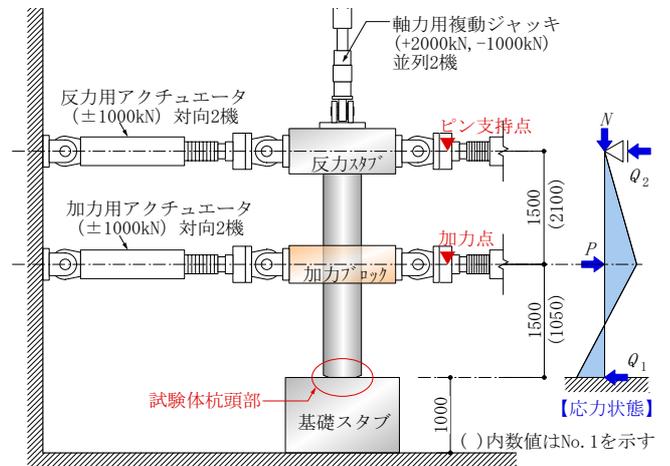


図-7 加力装置
Test set-up

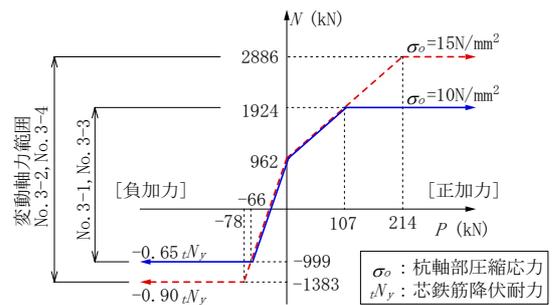


図-8 変動軸力の設定
Establishment of variable axial load

である。No.2、No.3シリーズは、杭頭部の回転性能を高めた杭頭テーパタイプ (No.2シリーズ、No.3-1,3-2) および基礎テーパタイプ (No.3-3,3-4) である。杭軸部と杭頭接合面の断面積比は2:1とした。No.2-2およびNo.3シリーズは、杭に変動軸力が生じる場合を想定した芯鉄筋 (USD685) を有する試験体である。No.4はテーパを設けないフラットタイプとし、杭主筋を基礎に50mmのみ込ませた。コンクリートの呼び強度は杭・基礎スタブともにFc30を基本とし、No.2シリーズの杭頭部 (基礎面から110mmの範囲) のみFc48を用いた。

図-7に加力装置を示す。杭体と基礎の位置関係を逆にした状態で試験体をセットし、試験体最上部を杭先端とした。加力は、杭先端 (反力スタブ) をピン支持し、杭長中間部 (加力ブロック) にせん断力を作用させた。試験体の実験時応力状態は、1次不静定の曲げモーメント分布となる。No.1、No.2シリーズおよびNo.4には一定軸力を、No.3シリーズには変動軸力を与えた。No.2シリーズでは異なる軸力の杭頭回転性能を確認する目的で、一つの試験体で5レベルに軸力を変化させた。始めに杭軸部の軸応力で長期軸力に相当する $\sigma_o=5\text{N/mm}^2$ の基準載荷を行い、続いて短期軸力相当の変動幅 $\pm 5\text{N/mm}^2$ の範囲で軸力を変化させた。No.3シリーズには、図-8に示すように、載荷荷重Pに対応した変動軸力Nを与えた。

3.1.2 実験結果

写真-1に最終破壊状況を示す。杭主筋を基礎に定着し

た従来型のNo.1は、杭頭部に曲げ圧壊による被りコンクリートの剥落が生じ、典型的な曲げ破壊型の性状を示した。これに対し、No.2、No.3シリーズは杭頭部にテーパをつけることにより、杭頭モーメントの低減を図っているため、杭頭には曲げひび割れは発生せず、損傷は極めて軽微であった。特に芯鉄筋のないNo.2-1、No.4は杭頭の損傷は皆無であった。

図-9に杭頭モーメント M_1 -回転角 θ 関係を示す。図-9(a)は杭頭形状の相違を比較したもので、縦軸の杭頭モーメントは $N \cdot D/2$ (N : 軸力、 D : 杭径) で除すことで無次元化している。杭主筋を基礎に定着しないことで、杭頭の最大曲げモーメントが低減され、さらに杭頭部を錘台形状にして基礎との接触面を小さくすることで回転剛性が低減され、かつ杭頭モーメントはさらに半分以下に低減されている。また、芯鉄筋のないNo.2-1、No.4は履歴ループ面積を持たない非線形弾性の履歴性状を示し、その除荷経路は載荷経路をもどる傾向を示した。

No.2シリーズは一つの試験体で5レベルの軸力を変化させたが、図-9(b)に示すように、杭頭モーメントは軸力に大きく依存していることがわかる。

芯鉄筋の有無を比較した図-9(c)によると、芯鉄筋を有するNo.2-2は、No.2-1と比較して、大きな杭頭モーメントが作用しており、また履歴ループも面積を持ち、芯鉄筋の杭頭モーメントへの寄与が窺われる。

変動軸力を与えた試験体は、図-9(d)に示すように、引



(a) No.1従来型 (杭頭剛接)



(b) No.2-1 (杭頭テーパ)

写真-1 最終破壊状況
Final failure pattern

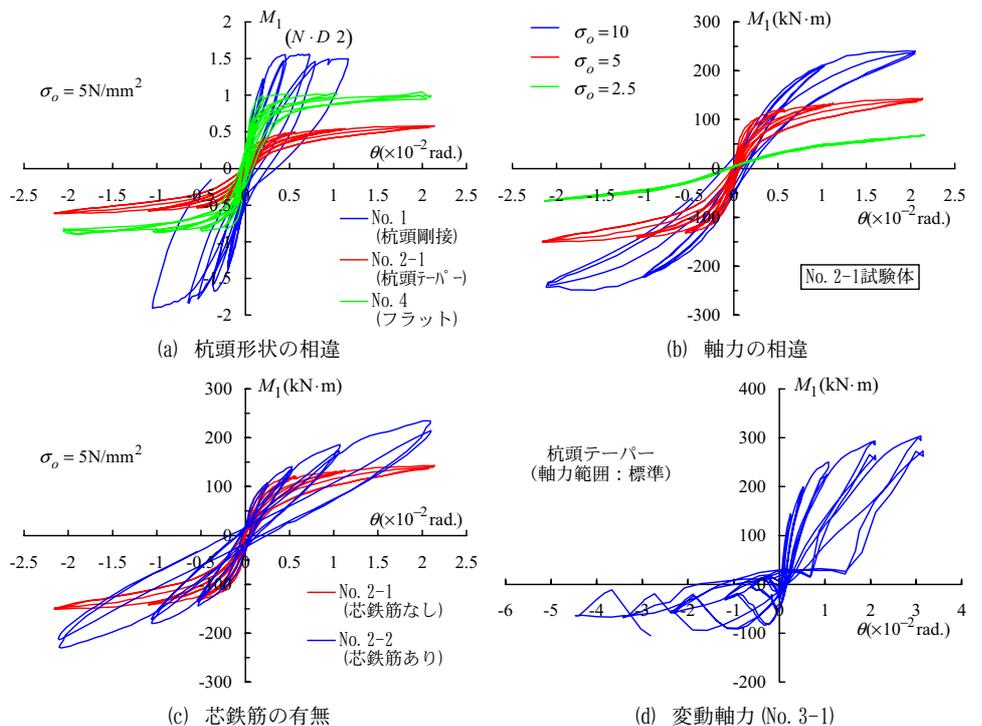


図-9 杭頭部の曲げモーメント-回転角関係
Moment of pile head joint - rotation relations

張軸力時(負加力)に杭頭の回転剛性が大きく低下し、負担曲げモーメントが低下することがわかる。

なお、杭頭部の損傷状況や $M_1 - \theta$ 関係において杭頭テーパタイプと基礎テーパタイプの相違による影響は見られなかった。

3.2 既製コンクリート杭

既製コンクリート杭を対象としたF.T.Pile構法の杭頭接合方法には、図-10に示すように、地震時に杭頭に引抜き力が作用しない箇所に適用する標準タイプと引抜き力が作用する箇所にも適用できる引抜き対応タイプの2種類がある。これらの杭頭接合部の回転性状とせん断耐力を把握することを目的に静的構造実験を実施した。

3.2.1 実験計画

構造実験には、杭径600mmの既製コンクリート杭と鉄筋コンクリート製のパイルキャップで構成される実大試験体を用いた。試験体の杭頭ディテールを図-10に示す。標準タイプは、杭頭を50~100mmパイルキャップへ根入れし、根入れした杭外周部とパイルキャップとの境界面にテーパ状のクリアランスを設けたものである。標準タイプの試験体は、杭種 (PHC杭、SC杭)、へりあき寸法 (200~500mm)、根入れ寸法 (50, 100mm) を変えて5体作製した。引抜き対応タイプの試験体は、主に鋼棒の材質 (普通鋼棒、PC鋼棒)、根入れ (0, 100mm) を変えて4体作製した。各試験体のコンクリート強度は、25.7~33.4(N/mm²)の範囲にある。

加力は、同一の試験体に対し、初めに杭頭接合部の回転性状 (曲げモーメント M と回転角 θ の関係) の照査 (曲げ実験と称す) を行い、その後せん断耐力の照査 (せん断

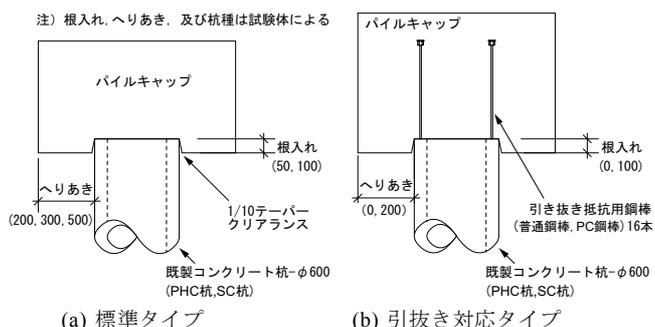


図-10 試験体の概要
Test-Body

実験と称す)を実施した。加力方法は、曲げ実験では片持ち梁形式を、せん断実験では1次不静定形式を採用し、正負交番加力を実施した。図-11に加力方法の概要を示す。曲げ実験は、試験体の天地を反転させた状態で反力フロアーに固定し、杭先端部分を上部アクチュエータで水平加力するものである。この際、杭先端に取り付けた軸力導入ジャッキによって、杭に一定軸力もしくは変動軸力を与えた。加力サイクルは部材角によって制御し、1ステップ2サイクルを基本として最大33.5~67×10⁻³radまでの加力を行った。せん断実験は、曲げ実験完了後に下部アクチュエータを取り付け、上部アクチュエータの水平変位をゼロ保持した状態で下部アクチュエータにより水平力を与えた。加力サイクルは、杭頭せん断力によって制御し、軸力レベルを変えて所定の杭頭せん断力を加え、最終的に最小軸力で接合部を破壊させる計画とした。主な計測項目は、杭頭接合部の回転角と水平変位、アクチュエータの水平荷重と水平変位、軸力導入ジャッキの荷重である。

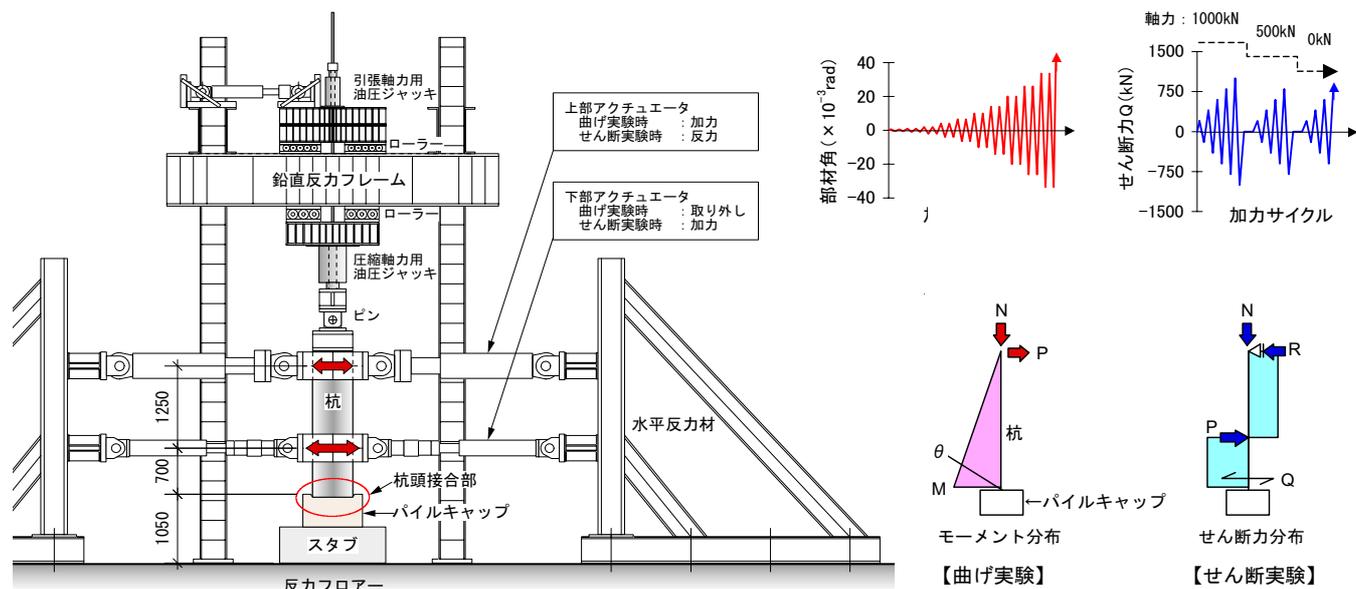
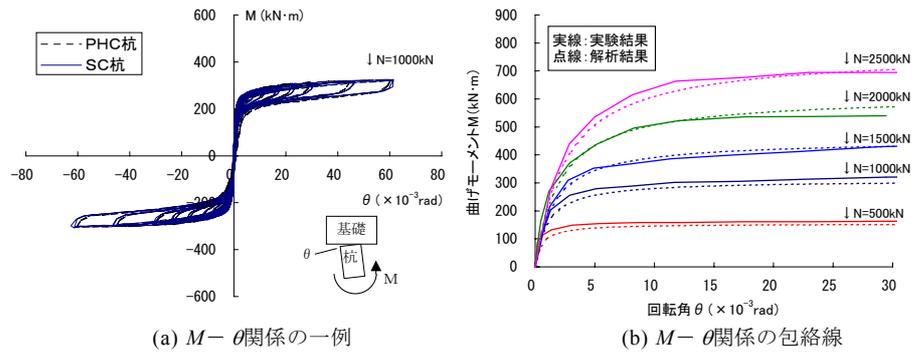


図-11 加力方法の概要
Loading method

3.2.3 実験結果の概要

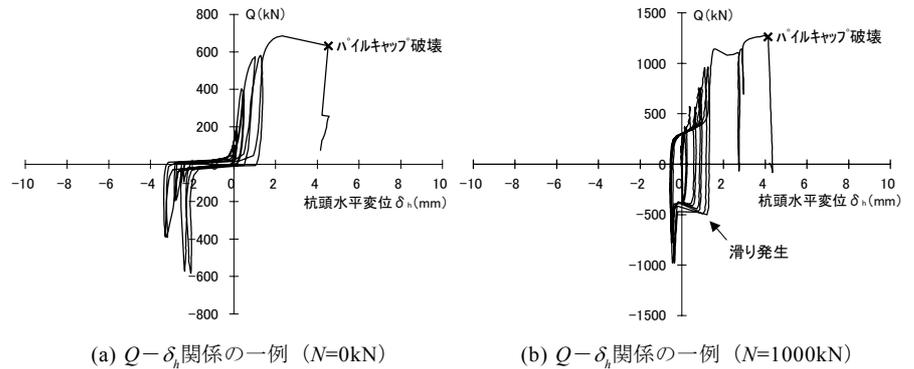
図-12(a)に一定軸力下における標準タイプの $M-\theta$ 関係の一例を示す。各試験体の $M-\theta$ 関係は、同一軸力においては、ほぼ同様の結果が得られ、杭種 (PHC杭、SC杭) の違いによる影響も見受けられない。履歴性状は非線形弾性的な挙動を示し、繰り返し加力による耐力低下も殆ど生じていない。図-12(b)に軸力の異なる $M-\theta$ 関係の包絡線を示す。最大曲げモーメントが軸力に応じて大きくなる傾向が明確に現れている。図には、軸力をパラメータとした解析結果を併記しているが、実験結果との対応は良好である。なお、引抜き対応タイプにおいては、標準タイプに比較して、鋼棒に起因する最大抵抗モーメントの増加がみられる。このため設計では、鋼棒の影響を考慮したモデル化を行っている。



(a) $M-\theta$ 関係の一例 (b) $M-\theta$ 関係の包絡線

図-12 曲げ実験結果の一例 (標準タイプ)

Results of bending tests



(a) $Q-\delta_h$ 関係の一例 ($N=0kN$) (b) $Q-\delta_h$ 関係の一例 ($N=1000kN$)

図-13 せん断実験結果の一例 (標準タイプ)

Results of shearing tests

図-13にせん断実験結果の一例(標準タイプ・へりあき500mm)を示す。図-13(a)は軸力0kNでの杭頭せん断力と杭頭水平変位の関係であり、水平変位が2mmを超えた段階から耐力低下を生じ、4mmを超えた段階でパイルキャップが破壊した。杭頭接合部のせん断耐力は686kNであった。図-13(b)は、軸力1000kNでの結果であり、杭頭せん断力が500kN程度で2mm程度の滑りが発生し(摩擦係数0.5程度)、杭頭せん断力が1200kN程度でパイルキャップが破壊した。また、引抜き対応タイプにおいては、滑り量の増大に伴い、鋼棒のダウエル効果が働き、標準タイプよりも大きなせん断耐力を示すことを確認した。設計においては、安全側の配慮からダウエル効果は考慮せず、軸力による摩擦抵抗とへりあき寸法(杭前面のパイルキャップコンクリートのせん断抵抗)をパラメータにしたせん断耐力式を用いている。

4. 地盤－杭基礎－建屋系の模型振動実験

杭頭半剛接合構法の杭基礎被害軽減効果と建屋応答に与える影響を動的実験により検証する目的で、地盤－杭基礎－建屋系の模型振動実験を実施した。

4.1 模型試験体

試験体を図-14に示す。試験体は、杭頭部を剛接合とした試験体(剛接合試験体)と半剛接合とした試験体(半剛接

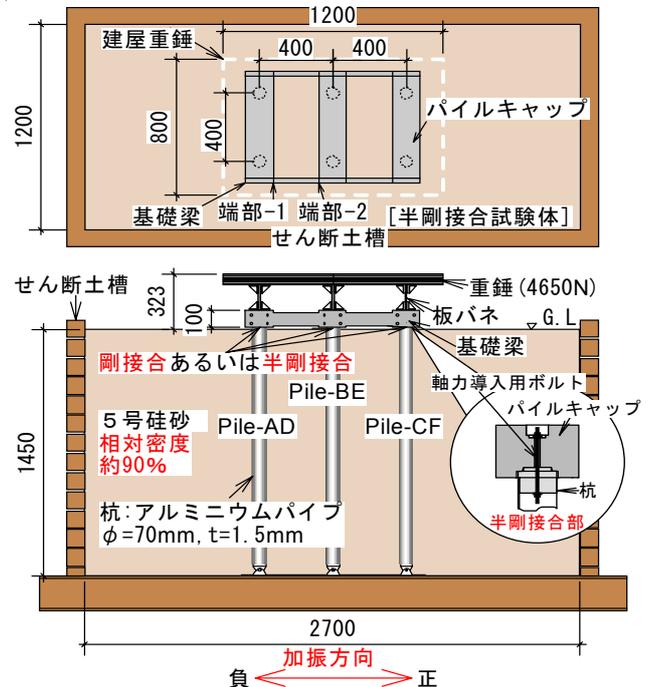


図-14 試験体 Experimental model

合試験体)の2つである。模型地盤は、5号硅砂を締め固めて作成した(目標相対密度90%)。杭は、外径70mm、肉厚1.5mmのアルミニウムパイプとし、加振方向3本×直交方向2本の合計6本とした。杭頭条件を剛接合あるいは半

剛接合とし、杭頭部をパイルキャップと基礎梁で連結した。半剛接合試験体の杭頭部は、実物同様、軸力に応じて回転性能が変化する模型となっている。建屋は、重錘(4650N)とパイルキャップに固定した板バネにより構成され、その周期は0.113s(実物換算1.7s)であった。

4.2 杭頭剛接合試験体と半剛接合試験体の比較

ここでは、八戸波を最大速度50cm/s(Level2)に基準化し、土槽底部に入力した結果について報告する。

4.2.1 主要な時刻歴

主要な時刻歴を図-15に示す。図-15(a)から、剛接合試験体と半剛接合試験体で建屋応答に顕著な違いがないことがわかる。図-15(b),(c)から、半剛接合試験体の中杭杭頭および基礎梁中側の曲げモーメントは、剛接合試験体と比較して安定して低減している。

4.2.2 杭・基礎梁の曲げモーメント分布

建屋の変位が負側に最大値を示す時刻($T=1.84375s$)の杭・基礎梁の曲げモーメント分布を図-16に示す。半剛接合試験体の杭の曲げモーメントの最大値は、剛接合試験体と比較して減少している。ただし、転倒モーメントの影響により押し込み側となる半剛接合試験体のPile-AD杭頭では、せん断力が集中し、曲げモーメントが剛接合試験体に近い値を示している。それに対応し、半剛接合試験体の基礎梁端部-1の曲げモーメントは、剛接合試験体に近い値を示している。

4.3 振動実験から得られた主な結論

- 1) 杭頭接合条件が建屋応答に与える影響は少ない。
- 2) 変動軸力の少ない中杭では、杭頭半剛接合構法の安定した被害軽減効果が確認された。
- 3) 半剛接合試験体では、転倒モーメントの影響により押し込み側となる杭とその杭に接続する基礎梁の曲げモーメントが剛接合試験体に近い値を示した。

なお、本実験は、文部科学省による「大都市大災害軽減化特別プロジェクト(テーマII震動台活用による構造物の耐震性向上研究)」の一環として実施したものである。

5. 実施適用例

本構法は、2004年6月時点で超高層建物を含む50件以上のプロジェクトに適用されている。ここでは、東京都中央区に建設されたマンションへの適用例について紹介する。

5.1 建物概要

図-17に建物外観パースを、表-1に建物概要を示す。この建物は地上12階、地下1階の鉄筋コンクリート造で、場所打ちコンクリート拡底杭を採用し、杭頭とパイル

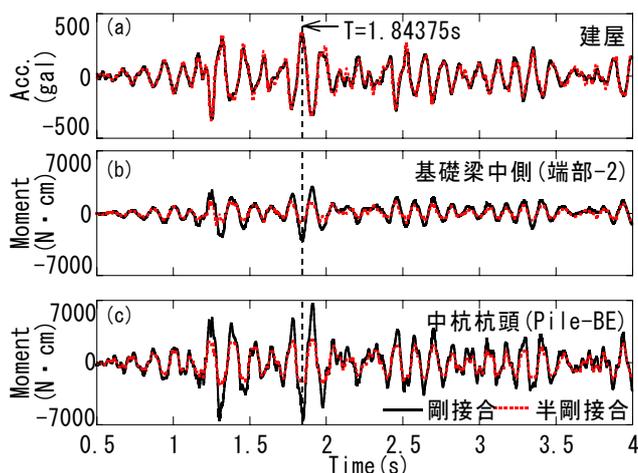


図-15 主要な時刻歴波形(八戸波、Level2)
Sectioned time history (Hachinohe-wave, Level2)

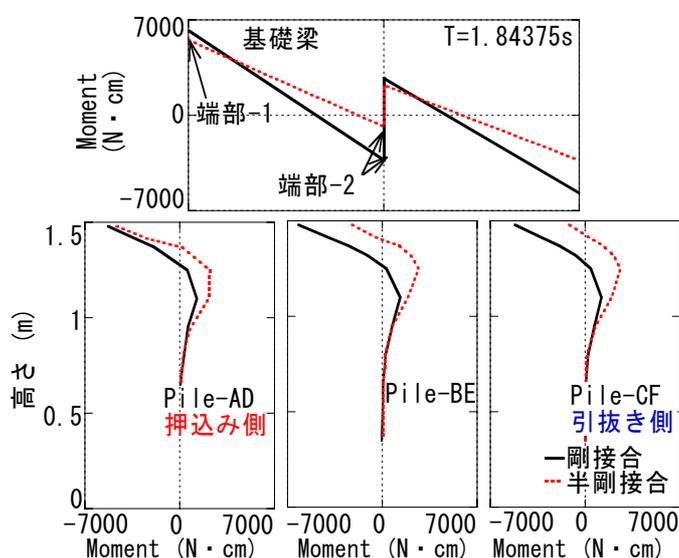


図-16 杭・基礎梁の曲げモーメント分布(八戸波、Level2)
Bending moment distribution of pile and footing beam



図-17 外観パース
Perspective of the building

表-1 建物概要

Outline of the building

| | |
|------|--|
| 用途 | 共同住宅 |
| 建設地 | 東京都中央区 |
| 主要構造 | 鉄筋コンクリート造 |
| 階数 | 地下1階, 地上12階 |
| 最高高さ | 36.77 m |
| 延床面積 | 6462 m ² |
| 基礎形式 | 場所打ちコンクリート拡底杭 (アースドリル工法) フラットタイプ (中杭) : φ1600(2500) テーパタイプ (側杭) : φ1300(1800)~φ1400(2000) ()内数値は拡底径を示す |
| 基礎底 | GL-5.3 m |
| 杭先端 | GL-35.0 m |

キャップとの接合部に本構法を採用した。

図-18に杭伏図を示す。軸力変動の小さい中杭にフラットタイプを、軸力変動が大きい側杭に杭頭テーパタイプ (芯鉄筋あり) を採用した。図-19に地盤状況を示す。基礎底はGL-5.3mであり、基礎底以深約20mの地盤は、N値の小さい沖積層が続く軟弱地盤である。杭支持層は、GL-35mのN値50以上の砂礫層とした。

5.2 構造設計

杭の地震時の応力は、上部建物の地震応答による慣性力と地震時の地盤変形を考慮した静的非線形解析を用いた。図-20に解析モデルを示す。基礎は剛と仮定し、杭体は曲げ変形およびせん断変形を考慮した線材に置換し、杭と基礎の接合部に杭頭回転ばねを設けている。杭頭回転ばねは杭頭モーメント-回転角関係の実験結果をトリリニアに置換した²⁾。地盤と杭は、建築基礎構造設計指針の方法により求まる地盤水平ばねでつなぎ、地盤側の節点に強制変位を与えた。

図-21に極めて希に起こる地震に対する解析結果の最大曲げモーメントと最大せん断力を、杭頭剛接とした場合と比較して示す。杭頭を剛接した場合に比べ、杭頭に生じる曲げモーメントが35~65%程度に低下しており、本構法の有効性が確認された。杭頭に生じるせん断力は杭頭接合部を剛接した場合と大きな差は見られない。

6. 施工事例

6.1 場所打ちコンクリート杭

杭頭部を除き、杭体の施工方法は従来の場所打ちコンクリート杭と同様である。写真-2に施工状況を示す。芯鉄筋を用いる場合、芯鉄筋は外周主筋の環状保持材に固定した芯鉄筋支持材(プレート等)により位置を確保し、外周主筋と芯鉄筋を一体として建込を行った。なお、芯鉄筋は円形配置とし、その直径はトレミー管が挿入できる最小径とした。杭頭テーパタイプでは、杭頭部に高強度コンクリート(Fc48)を使用し、精度良く錘台形状のテー

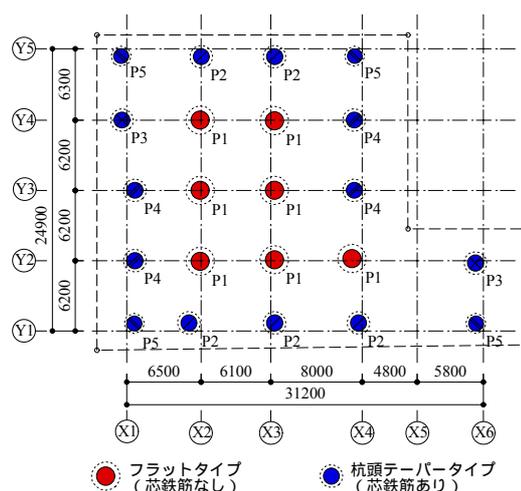


図-18 杭伏せ図

Plan of the pile

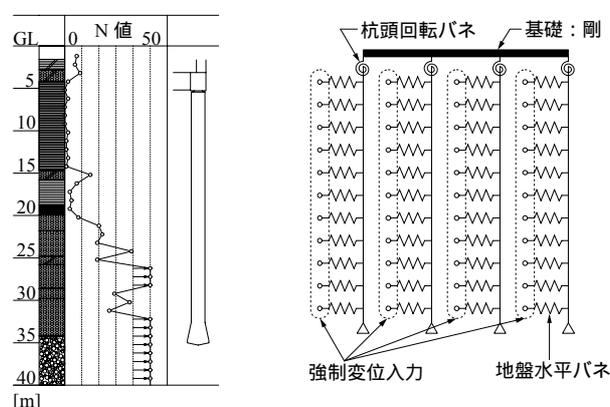
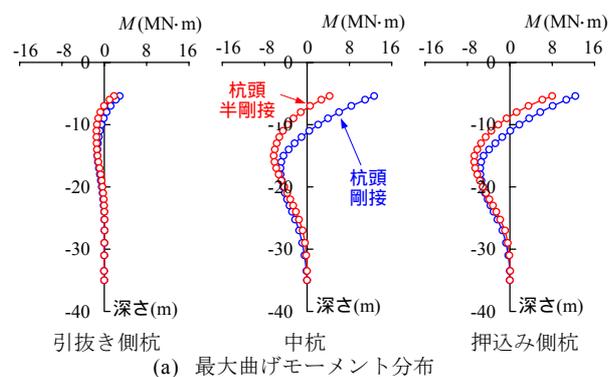


図-19 地盤概要

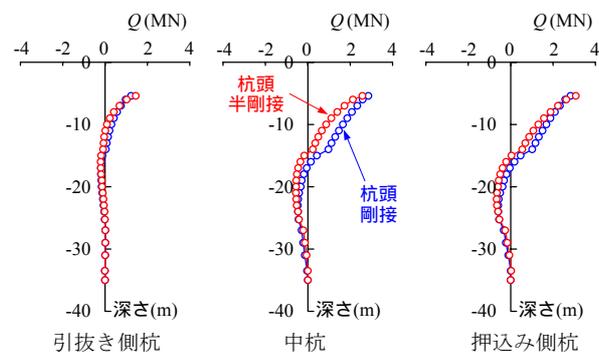
The soil profile

図-20 解析モデル

Analysis model



(a) 最大曲げモーメント分布



(b) 最大せん断力分布

図-21 静的非線形解析による結果
Result of static analysis

パーに成型するため、杭頭部のコンクリート打設は杭体の打設後別途気中にて行った。杭頭余盛コンクリートのはつり処理を行った後、杭頭部にテーパ成型用の型枠を設置した。型枠の天端には緩衝材(スタイロフォーム)を鍾台形状に成形したものを固定している。

「5. 実施適用例」で紹介した建物では、本構法を採用したことにより、従来に比べて杭径は300mm、基礎梁せいは400mm縮小し、掘削土量の削減とともにコスト低減に大きく寄与している。また、本構法は杭主筋をパイルキャップに定着していないため、パイルキャップおよび基礎梁の配筋作業が従来よりも容易であった。

6.2 既製コンクリート杭

図-22に既製コンクリート杭の杭頭接合部の施工手順について、F.T.Pile構法と在来工法を比較して示す。F.T.Pile構法は、原則として全ての既製コンクリート杭およびその施工法に対応でき、杭の施工に関しては在来工法と差異はない。杭の施工が完了した後、杭頭レベルまでの整地を行う。一般的な在来工法では、杭中空部の掘削・清掃作業を行い、杭中空部へ補強鉄筋を設置する。これに対し、F.T.Pile構法では、杭頭部にテーパ状のクリアランスを構築するための型枠(テーパ型枠)を設置する(写真-3(a)参照)。引抜き対応タイプの場合は、引抜き抵抗用鋼棒を既製杭端板のボルト孔を利用して設置する。その後は、捨てコン、基礎配筋、コンクリート打設となる。杭頭補強筋を用いないため、在来工法に比較しても施工性が良く、低コスト、短工期で実施できる。写真-3(b)にF.T.Pile構法を採用した場合の基礎の配筋状況を示すが、杭頭補強筋がないため、基礎の配筋作業についても施工性が向上する。

7. おわりに

兵庫県南部地震での杭基礎の被害を教訓とし、杭頭接合部を半剛接合とする「F.T.Pile構法」を考案・開発した。開発に際して実施した各種構造実験により、本構法によって杭頭に作用する曲げモーメントが低減され、杭頭の損傷を軽減できることを明らかにした。また、杭頭の曲げモーメントの低減を設計に取り込むことで、杭・基礎構造の合理化が可能となる。

本構法は、今回紹介した構造実験や実施プロジェクトにおける設計・施工で得られた知見をもとに、(財)日本建築センターの「杭頭接合工法評定」(BCJ評定-FD0071-01,02,FD0141-01)を取得した。現在、超高層から中低層まで、あらゆる規模・用途の建物に本構法が適用されている。今後も、高性能の杭・基礎構造をコスト低減をとも



写真-2 施工状況 (場所打ちコンクリート杭)
Situation of construction(Cast-in-place concrete pile)

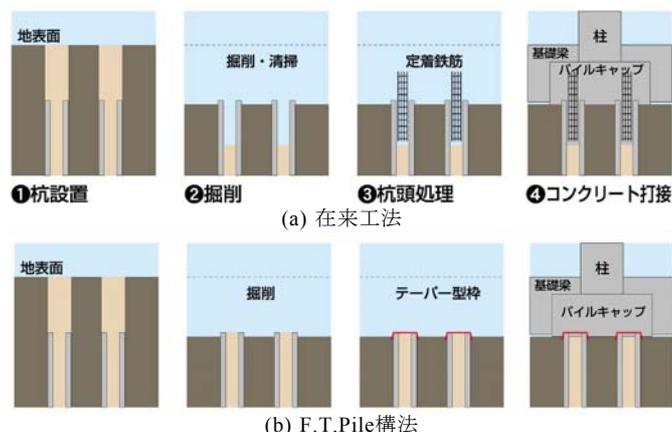


図-22 施工手順 (既製コンクリート杭)
Process of construction (Pre-cast concrete pile)



写真-3 施工状況 (既製コンクリート杭)
Situation of construction (Pre-cast concrete pile)

なって実現する「F.T.Pile構法」を杭基礎構造の標準構法として拡く普及展開する所存である。

参考文献

- 1)川端一三ほか：高性能場所打ちコンクリート杭の開発，コンクリート工学，Vol.38，No.7，pp.42-45，2000.7
- 2)今井和正ほか：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