

既製コンクリート杭の杭頭簡易接合法に関する研究

青島一樹・長瀧慶明・真島正人・和智勝則^{*1}・浅野真一郎^{*2}・前田 昇^{*3}

Keywords: Degree of Restraint for Rotation of Pile-Pilecap Joint, Pile Foundation, Seismic Design, FEM Analysis

杭頭固定度, 杭基礎, 耐震設計法, FEM解析

1. はじめに

筆者らは, 火力発電所のタービン建屋など軸力変動の少ない構造物を対象に, 既製コンクリート杭の杭頭簡易接合法¹⁾(定着筋を使用せず, 杭頭をパイルキャップに10cm根入れした杭頭接合法)の適用性に関する研究を行っており, 既にSC杭に杭頭簡易接合法を採用した際の杭頭接合部の耐力と回転性能に関する報告を行っている^{2), 3)}。

本報では, SC杭につづき実施したPHC杭の杭頭簡易接合法に関する実験の概要と結果, および数値シミュレーションについて報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は, 杭径600mm, 杭長4000mmのPHC杭(C種-JIS強化杭)と鉄筋コンクリート製のパイルキャップ(3100×1600×800mm)から構成されている。試験体は合計3体作製し, 杭頭接合法にはすべて簡易接合法を採用した。簡易接合法は, 杭をパイルキャップへ10cm根入れし, 中詰めコンクリートを杭天端から60cm(1D)まで打設する杭頭接合法である。図-1に簡易接合法の概要を示す。表-1に試験体を使用した杭の諸元を示す。パイルキャップの配筋は, 主筋およびフープ筋ともSD345-D16を使用し, 配筋量は前回実施したSC杭の実験²⁾と同一とした。表-2にパイルキャップに使用したコンクリートの力学特性を示す。

2.2 実験ケース

表-3に実験ケースの一覧を示す。実験は導入軸力を変えて3ケース実施した。導入軸力は, CASE-P1が長期軸

力を想定した980kN, CASE-P2が短期押込み軸力(長期軸力の2倍)を想定した1960kN, CASE-P3が短期引抜き軸力を想定した0kNとした。なお, 導入軸力は, 前回実施したSC杭の実験^{2), 3)}と同様である。

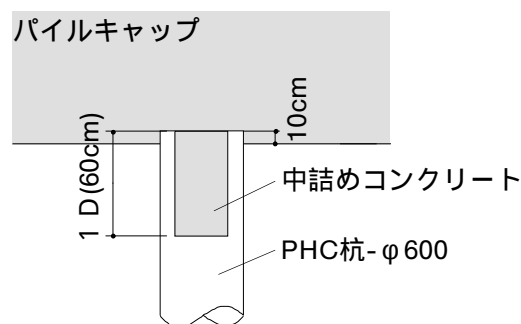


図-1 杭頭接合部の概要
Pile-pilecap joint

表-1 PHC杭の諸元
Properties of PHC-pile

外径 (mm)	厚さ (mm)	種別	P C 鋼棒		スパイラル鉄筋	
			φ × n	Ap(cm ²)	径(mm)	ピッチ(mm)
600	90	C	10.0 × 24	18.84	6.0	50

表-2 パイルキャップに使用したコンクリートの力学特性
Material properties of pilecap-concrete

試験体名	圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比
	σ _c (N/mm ²)	E (×10 ⁴ N/mm ²)	ν
CASE1	29.0	2.89	0.21
CASE2	29.7	2.95	0.21
CASE3	30.0	2.88	0.21

表-3 実験ケース
Test case

ケース名	杭頭接合法	軸力	備考
CASE-P1	簡易接合法	980kN	長期軸力を想定
CASE-P2		1960kN	短期押込み軸力を想定
CASE-P3		0kN	短期引抜き軸力を想定

*1 関西電力(株)総合技術研究所

*2 関西電力(株)舞鶴火力建設所

*3 (株)ニュージェック

2.3 加力方法

加力方法には、1次不静定架構の正負交番載荷方式²⁾、³⁾を採用した。図-2に加力方法の概要を示す。本加力方式は、加力荷重と反力荷重の実測結果から杭頭接合部に実際に生じた曲げモーメント M を算出できる。この曲げモーメント M には、杭頭接合部の回転剛性の影響が反映されている。一方、杭頭が完全固定であると仮定した場合、加力荷重から杭頭の固定端モーメント M_0 （以後、設計モーメントと称す）を算定でき、これらの比率から杭頭固定度（ $\alpha = M / M_0$ ）を求めることが出来る。

また、水平力の加力は杭頭の回転角によって制御し、 6×10^{-3} (rad)までを7ステップ（2サイクル/1ステップ：計14サイクル）に分割し、7ステップ以降は、杭体もしくは接合部の破壊まで、単サイクルで加力した。

2.4 測定項目

主な測定項目は、加力点と反力点の荷重・変位、杭頭接合部の回転角、パイルキャップの変位である。杭頭回転角は加力軸方向の杭対面2点の鉛直相対変位（杭の押込み・引抜け量）の差を測定スパンで除して求めた。

3. 実験結果

3.1 加力点のモーメント-変位関係

図-3に各ケースの加力点のモーメント-変位関係を示す。同図には各ケースにおける杭体の短期許容モーメント M_a と終局モーメント M_u を併記した。各ケースとも加力点において、杭材が曲げ破壊し、最大耐力に至った。杭材の最大耐力（実験値）は、 M_u （計算値）の1.03～1.09倍の範囲にあり、実験値と計算値は良く対応している。

3.2 杭頭接合部のモーメント-回転角関係

図-4に各ケースの杭頭接合部のモーメント-回転角関係を示す。杭頭最大モーメントはCASE-P3 < CASE-P1 < CASE-P2の関係にあり、軸力に応じて回転抵抗が増加する傾向がある。履歴ループの形状は、軸力を導入しているCASE-P1とCASE-P2では、エネルギー吸収の少ないS字形の形状を示している。一方、軸力を導入していないCASE-P3は、荷重の折り返し点で荷重が低下する摩擦ループ形に近い形状を示している。また、実験では基本的に同一ステップで2サイクルの加力を行っているが、各ケースの回転抵抗は、第1サイクル時に比較して第2サイクル時では若干低下している。

3.3 加力点と杭頭間のせん断力-加力点変位関係

図-5に各ケースの加力点と杭頭間のせん断力-加力点変位関係を示す。各ケースの同一変位時におけるせん断力を比較すると、軸力に依存していることが分かる。こ

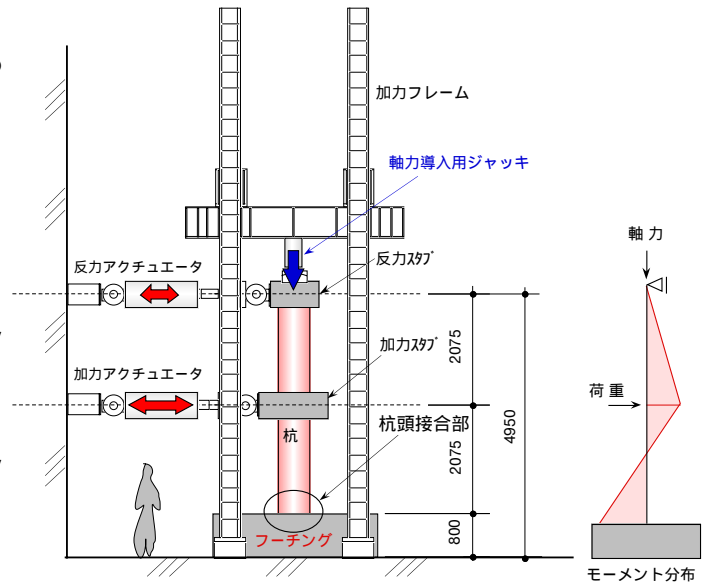


図-2 加力方法の概要
Test set-up

れは杭材の降伏耐力の違いに加え、簡易接合法の回転剛性が軸力に依存する性質が影響していると考えられる。なお、各ケースとも杭頭接合部は最大荷重時においても破壊していない。

3.4 杭頭固定度

図-6に各ケースの杭頭固定度と設計モーメントの関係（ $\alpha - M_0$ 関係）を示す。同図には、各ケースの杭体の M_a と M_u の値を併記した。杭頭固定度は設計モーメントの増加に伴い低下する傾向があり、各ケースとも M_a に比較して M_u 時の杭頭固定度が低い結果となった。ただし、軸力を導入していないCASE-P3では、初期の段階から急激に固定度が低下するため、この差は小さい。また、各ケースの杭頭固定度を比較すると、軸力の大きさに応じて、固定度が高くなる傾向がある。

3.5 杭頭接合部の破損状況

各ケースとも初期の段階（ $\theta = 0.25/1000$ rad程度）から杭とパイルキャップに剥離（肌別れ）が観測された。パイルキャップの破損状況は、CASE-P1ではヘアクラック程度、CASE-P2ではひび割れ発生が観測されなかった。一方、CASE-P3では、杭頭回転角が15/1000radを超えた段階で、ひび割れ幅が増大し、最終的にパイルキャップのコンクリート表面に浮き上がりが生じた。写真-1にCASE-P1とCASE-P2の最終破損状況を示す。

4. 考察

4.1 杭頭接合部のモーメント-回転角関係について

各ケースの杭頭接合部のモーメント-回転角関係（ $M - \theta$ 関係）について、正方向加力時の包絡線を図-7に、負

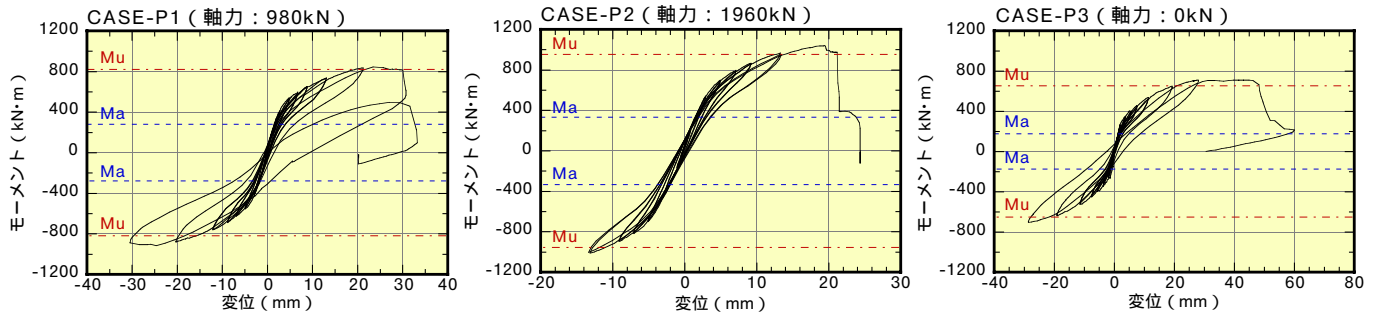


図-4 加力点のモーメント-変位関係
M- δ relationship

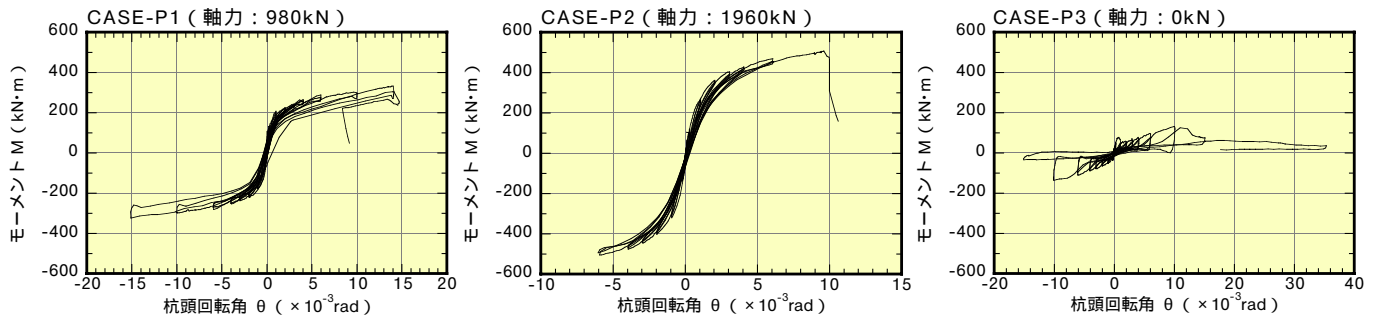


図-5 杭頭接合部のモーメント-回転角関係
M- θ relationship

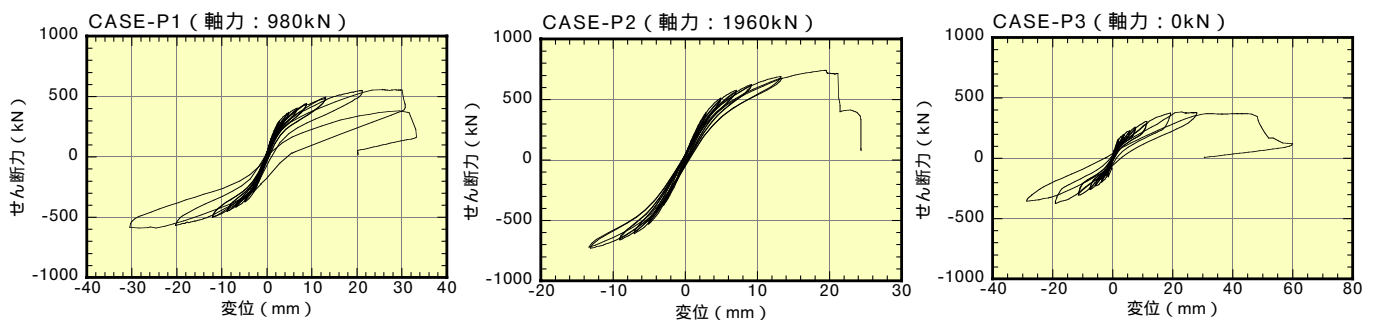


図-6 加力点と杭頭間のせん断力-加力点変位関係
Q- δ relationship

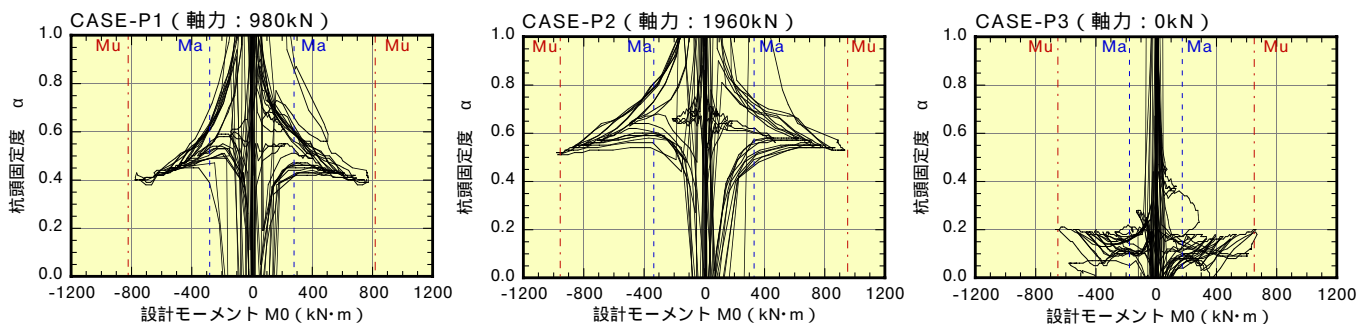


図-7 杭頭固定度-設計モーメント関係
 α - M_0 relationship

方向加力時の包絡線を図-8に示す。同図には、前回実施したSC杭の実験結果^{2),3)}(CASE-S1～S3:簡易接合法, CASE-S4:補強鉄筋を用いた通常接合法)を併記した。回転抵抗

PHC杭に杭頭簡易接合法を採用したCASE-P1～P3のM- θ 関係から、杭頭接合部の回転抵抗が軸力に依存していること(CASE-P3 < CASE-P1 < CASE-P2)が分かる。また、同一軸力下におけるPHC杭とSC杭(CASE-



CASE-P1 (軸力: 980kN)

CASE-P3 (軸力: 0kN)

写真-1 杭頭接合部の破壊状況
Final failure pattern of Pile-pilecap joint

S1～S3)のM- θ 関係は良く対応しており、杭種の違いによる影響は見られない。簡易接合法の回転に対する抵抗要素としては、軸力、杭とフーチング接触面の摩擦抵抗、コンクリートの圧縮抵抗等が考えられ、杭種には大きく依存しないと考えられる。なお、CASE-P1とCASE-S4の実験結果から、簡易接合法の回転抵抗は通常接合法の半分程度となることが分かる。

初期回転剛性

表-4に各ケースの初期回転剛性($\theta = 0.1 \times 10^{-3}$ rad時)を示す。同表には、同一軸力下におけるSC杭の実験結果を併記した。初期回転剛性は、導入軸力が0kNの場合、極端に低く、導入軸力が980kNと1960kNでは明確な差異が認められない。簡易接合法の場合、回転剛性の非線形性は、杭頭に作用する曲げ引張応力によって支圧面の縁応力がゼロになった時点から顕著になると考えられ、軸力が作用した場合、初期回転剛性に大きな違いが生じないと考えられる。一方、軸力が0kNの場合、初期回転剛性は、杭とフーチング接触面の付着抵抗と摩擦抵抗に大きく依存するため、極端に低くなったと考えられる。なお、軸力が作用したPHC杭の初期回転剛性は、SC杭の0.8倍程度と低い。これは、回転角測定点から杭端板まで(15cm)の間にける杭の剛性の違い(EIで約1.45倍)によるものと思われる。

4.2 杭頭固定度について

表-5に各ケースのMaおよびMu時の杭頭固定度の一覧を示す。同表には、前回実施したSC杭の結果を併記した。簡易接合法の杭頭固定度は、軸力に大きく依存し、PHC杭の場合、Ma時で0.25～0.65、Mu時で0.2～0.4程度となった。一方、SC杭の場合、Ma時で0.09～0.54、Mu時で0.07～0.35となり、PHC杭に比較して杭頭固定度が低い結果となる。この理由は、主にSC杭の耐力(Ma、Mu)がPHC杭に比較して高い(1.5～2.5倍)ため、大きな設計モーメントで評価されることによる。図-9に各ケースの α -M₀関係の包絡線をSC杭の結果と併せて示す。同図から、簡易接合法を採用したPHC杭とSC杭の α -M₀関係は、同一軸力下において大略対応しており、杭種による影響は小さいものと考えられる。

4.3 簡易接合法の耐力と限界回転角について

各ケースの杭頭接合部に作用した最大せん断力は、CASE-P1が589kN、CASE-P2が739kN、CASE-P3が384kNであり、いずれのケースにおいても接合部は破壊していない。また、前回実施したSC杭の実験では、簡易接合法を採用した杭頭接合部は、軸力0kN時において917kNのせん断耐力があることを確認している。実験に使用した杭(ϕ 600)の長期軸力(1000kN程度)を考慮すると、

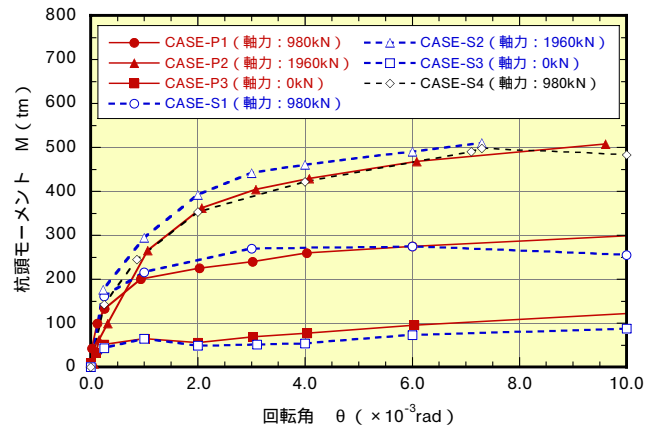


図-7 M- θ 関係の包絡線(正方向加力時)
Skeleton curve of M- θ relationship(Positive direction)

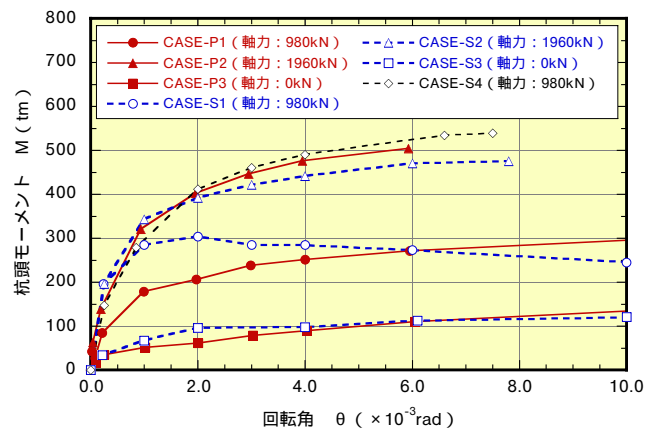


図-8 M- θ 関係の包絡線(負方向加力時)
Skeleton curve of M- θ relationship(Negative direction)

表-4 各ケースの初期回転剛性
Initial rotation stiffness

実験ケース (導入軸力)	PHC杭		SC杭	
	正方向	負方向	正方向	負方向
CASE-P1 (980kN)	534756	661027	646800	816667
CASE-P2 (1960kN)	547012	689978	766957	784000
CASE-P3 (0kN)	235886	250121	172480	155909

(単位: kN・m/rad)

表-5 各ケースの杭頭固定度
Degree of restraint for rotation of pile-pilecap joint

実験ケース	杭種	軸力 (kN)	杭頭固定度	
			Ma時	Mu時
CASE-P1	PHC	980	0.53～0.57	0.4程度
CASE-P2		1960	0.60～0.65	0.5程度
CASE-P3		0	0.25～0.33	0.2程度
CASE-S1	SC	980	0.35～0.37	0.22～0.23
CASE-S2		1960	0.50～0.54	0.34～0.35
CASE-S3		0	0.09～0.17	0.07～0.11
CASE-S4*		980	0.47～0.56	0.36～0.41

*CASE-S4のみ通常接合法

簡易接合法を採用した杭頭接合部は、引抜き力が生じない条件では、充分なせん断力伝達能力があると言える。

一方、各試験体の杭頭接合部に生じた最大回転角は、CASE-P1が15/1000rad、CASE-P2が11/1000rad、CASE-P3が35/1000radであった。軸力が作用しているCASE-P1とP2については、最大回転角に至っても、 $M-\theta$ 関係は安定しており、フーチングの損傷も殆ど認められなかった。しかし、軸力が作用していないCASE-P3については、回転角が1/100radを越えた段階から、 $M-\theta$ 関係が不安定となり、フーチングのひび割れが増大した。従って、簡易接合法の限界回転角（損傷限界）は、軸力に依存すると思われ、軸力が作用しない場合は1/100rad程度が目安と考えられる。

5. 数値シミュレーション

5.1 解析概要

実験によって得られた杭頭接合部の $M-\theta$ 関係について、3次元FEMによる数値シミュレーションを実施した。図-10に解析モデルの概要を示す。この解析モデルにおいて、杭とフーチングの接触面（杭頭天端-パイルキャップ面、根入れ部の杭頭側面-パイルキャップ面）に、剥離・滑動挙動を表現するための復元力特性を組み込んでいる^{2), 3)}。

5.2 復元力特性

接触面の $\tau-\gamma$ 関係（滑動挙動）は、面圧に応じた拘束応力を超えた場合に滑りが生じるようモデル化した。拘束応力の定義は、クーロン摩擦を拡張したもので、面圧 σ_p が正の場合、接着力 c と摩擦応力 $\mu \cdot \sigma_p$ の和で与えられる。ただし、拘束応力の上限值として τ_{max} （最大降伏応力）を設けた。面圧が負の場合は、接着力 c と摩擦応力 $\mu \cdot \sigma_p$ の和で与えられるものとし、 μ_2 は接着力 c と引張り強度 σ_t の間を直線近似するかたちで決めた。接触面の $\sigma_p-\epsilon$ 関係（剥離挙動）は、面に引張り強度以上の負圧が働いた場合に、剥離するようモデル化した。なお、モデル化の詳細は既報^{2), 3)}を参照されたい。

パイルキャップのコンクリートの材料特性については、線形、および非線形の2パターンの解析を実施した。非線形モデルについては、コンクリート圧縮試験により得られた $\sigma-\epsilon$ 関係をトリリニでモデル化した。線形モデルには、その初期剛性を用いた。また、杭材の材料特性については、線形モデルとした。

5.3 解析定数

表-6に接触定義に用いた解析定数を示す。接着力 c については、既往の研究⁴⁾で行われた実験結果を参考とし

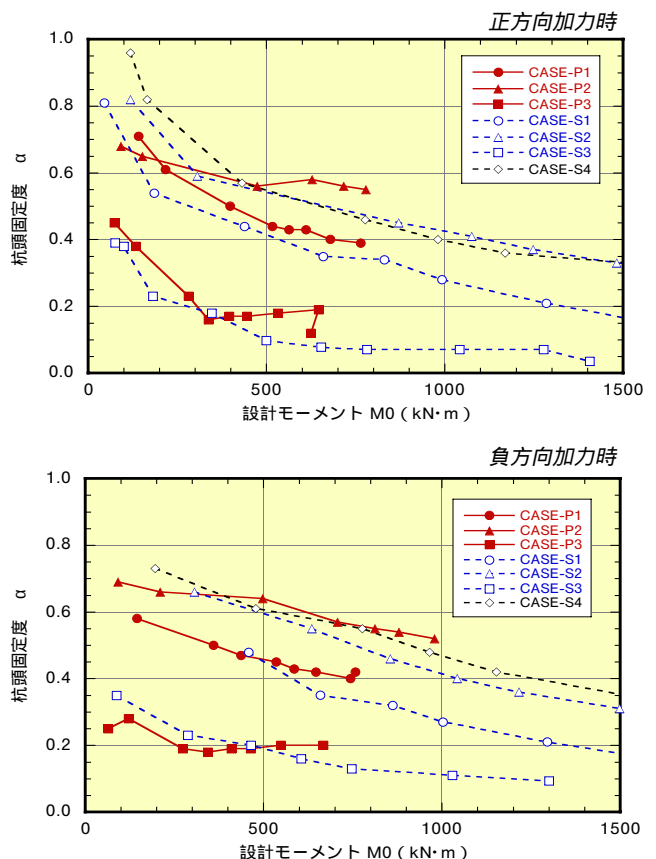


図-9 $\alpha-M_0$ 関係の包絡線
Skeleton curve of $\alpha-M_0$ relationship

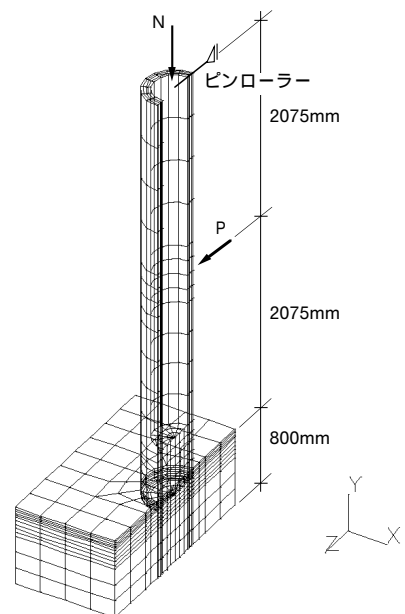


図-10 解析モデル
Numerical model

表-6 接触定義に用いた解析定数
Properties of contact surface

接触部	引張り強度 σ_t (N/mm ²)	接着力 c (N/mm ²)	摩擦係数 μ	最大降伏応力 τ_{max} (N/mm ²)
杭頭天端	1.5014	0.5030	0.8	1.7022
杭頭側面	0.2515	0.5030	0.8	1.7022

た、杭頭側面とパイルキャップ境界面の引張り強度に関しては、着着力の1/2と仮定した。一方、杭頭天端の引張り強度は、中詰めコンクリートの曲げ引張り強度相当と考え、コンクリートの曲げ引張り強度の算定式 $\sigma_t = 1.8 (F_c)^{0.5}$ から算定した。また、最大降伏応力は、コンクリートのせん断強度の算定式 $\tau_{max} = (F_c)^{0.5}$ より求めた。摩擦係数については、杭頭天端および杭頭側面とも、既往の研究⁵⁾等から $\mu = 0.8$ とした。

5.4 解析結果

図-11に各実験ケースのM- θ 関係の解析結果を実験結果と併せて示す。同図から、線形解析と非線形解析とも、定性的には実験値に良く一致していることが分かる。一方、線形解析と非線形解析の結果を比較すると、両解析結果の差は比較的大変形時から生じ、非線形解析では回転抵抗が頭打ちになり、線形解析では緩やかな勾配を保持する傾向がある。これに対し、実験結果の傾向は、緩やかな勾配で回転抵抗が増加しており、線形解析の結果に近い。この原因としては、パイルキャップのコンクリート支圧面の挙動が現れているものと考えられる。既往の文献⁶⁾等によるとコンクリートの支圧強度は、その支圧面積にもよるが3倍以上となることが示されており、支圧面では非線形解析のような強度の低下(破壊)が生じないことが予測される。また、実験終了後に行った支圧面の目視調査でも支圧面のコンクリートに破壊は確認されなかった。このことから、M- θ 関係における大変形時の傾向が線形解析の結果に近いものになったと考えられる。

6. まとめ

実験、および解析から以下の知見を得た。

- (1) 簡易接合法の回転性状(M- θ 関係)は、軸力に大きく依存するが、杭種には殆ど依存しない。
- (2) ただし、SC杭とPHC杭では大きな耐力差があるため、見かけ上、 M_a 、 M_u 時の杭頭固定度に違いが生じる。
- (3) 簡易接合法は、引抜き力が生じない条件では、充分なせん断力伝達能力がある。
- (4) 簡易接合法の損傷限界に対する回転角は、軸力に依存すると思われ、軸力が作用しない場合は1/100rad程度が目安となる。
- (5) 剥離・滑動の力学モデルを組み込んだ3次元FEMによって、実験結果を比較的良く予測できることが分かった。

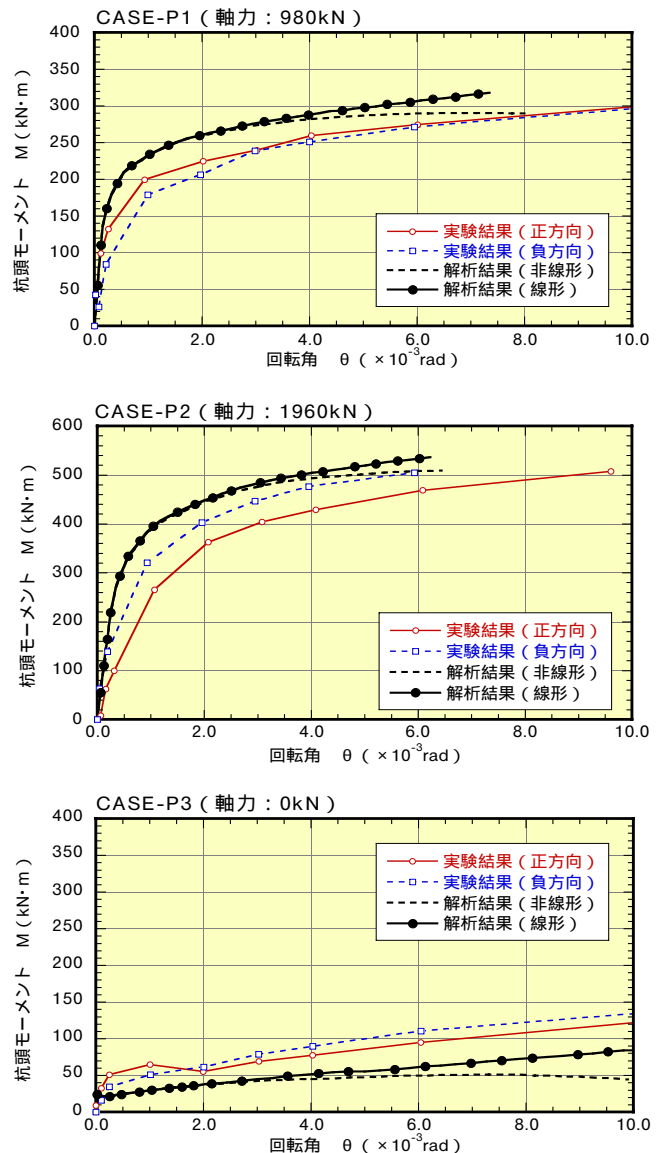


図-11 杭頭接合部のM- θ 関係の解析結果
Numerical results of M- θ relationship

参考文献

- 1) 杉村義広, 平出 努: 高強度プレストレストコンクリート杭とフーチング接合部の回転拘束度および破壊耐力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集 第373号, 1987.3, pp.111-120
- 2) 櫻井和夫, 前田 昇, 近藤 英則, 他: SC杭の杭頭接合部に関する研究(その1~4, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 2001.9, pp.435-442
- 3) 青島一樹, 長瀧慶明, 真島正人, 他: SC杭の杭頭接合部に関する研究, 大成建設技術センター報 No.34, 2001.11
- 4) 渡辺 徹, 青島一樹, 他: 既存杭とフーチングの付着性能に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 1999.9, pp.719-720
- 5) 安田 聡, 小室 努, 他: 杭主筋を基礎に定着しない杭頭接合部の構造性能, コンクリート工学年次大会, 2002.6
- 6) 例えば, (社)日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, pp.92~93, (社)日本建築学会, 1987.2