

プレキャストパイルキャップ構法における杭頭接合部の構造性能 Structural Performance of Pile-head Joint in Precast Concrete Pile Cap Construction Method

新井 寿昭* 郡司 康浩**
Toshiaki Arai Yasuhiro Gunji
桜井 悦雄*** 原 智紀***
Etsuo Sakurai Tomonori Hara

要 約

本構法は、既製コンクリート杭のパイルキャップをプレキャストコンクリート造として事前に製作し、現場で杭頭部にかぶせるように設置して杭頭との間にグラウトを施工することにより杭頭接合部を構築する構法である。パイルキャップをプレキャスト化することにより、施工の合理化を図ることが可能になる。また、杭頭部に作用する地震時曲げモーメントを低減し、地震時の損傷を軽減できる。

本報では、構法概要と開発にあたり実施した構造性能確認実験について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 構法概要
- § 3. 構造性能確認実験
- § 4. 実験結果
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

既製コンクリート杭（以下、既製杭）のパイルキャップは、杭の施工後に地盤を掘削し、杭頭処理を実施した後にパイルキャップの配筋・コンクリートを打設することが一般的である。配筋工事においては、足元が悪い杭頭部での作業となること、杭頭部の定着筋のほかパイルキャップと基礎梁や柱の鉄筋が密に配筋されることから施工性が悪く多大な労力が必要となっている。また、近年では建物の高層化や杭体の高支持力化などに伴い、杭1本に作用する地震時水平力が増大傾向にある。一般的には、杭とパイルキャップの接合部分である杭頭部は固定条件として設計されることから杭頭部に大きな地震時応力が発生し、杭頭部の損傷が懸念される。

そこで、本開発ではパイルキャップの施工性を合理化することを目的にパイルキャップをプレキャストコンクリート造（以下、PCaパイルキャップ）として、杭頭部との接合部に関する施工性や品質を確認するとともに、

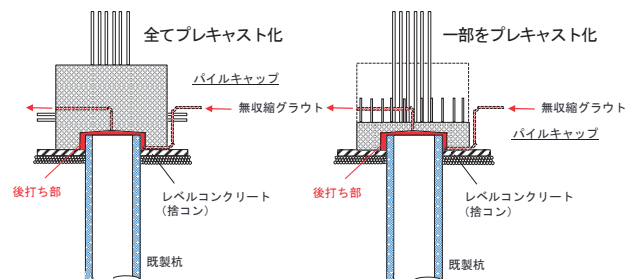
実大の杭材・PCaパイルキャップを用いた構造性能確認実験を実施した。

本報では、構法概要を述べるとともに、構法開発にあたって実施した構造性能確認実験概要と実験結果の一部について報告する。

§ 2. 構法概要

本構法の概要を図一1に示す。本技術は、既製杭のパイルキャップの一部または全部をプレキャストコンクリート（以下、PCa）造として事前に製作し、現場で杭頭部にかぶせるように設置して杭頭との間にグラウトを充填した上で、後打ちコンクリートを施工することにより杭頭接合部を構築する構法である。

本構法は、引張軸力が作用しない既製杭とPCaパイルキャップの杭頭接合部を対象としている。杭頭に定着筋を設けず杭埋込部の側面に緩衝材を巻き付けることにより杭頭の固定度を低減し、さらにPCaパイルキャップ内に規定した鉄筋を配置することにより地震時の損傷を軽減することが可能になる。



図一1 構法の概要

* 技術研究所

** 技術研究所建築技術グループ

*** 建築技術部

§3. 構造性能確認実験

3-1 実験概要

実験は、PCaパイルキャップを杭頭部にかぶせるように設置した杭頭接合部を模擬した試験体を対象に、水平荷重に対する杭頭接合部の回転挙動およびパイルキャップの耐力を確認することを目的に、2シリーズに分けて実施した。最初の実験（H-0シリーズ）では杭頭側面に設置する緩衝材の有無をパラメータとし、続いて実施した実験（Hシリーズ）では、杭頭側面に緩衝材を設置した試験体を対象にグラウトの有無、パイルキャップのコンクリート強度、軸力、杭の施工誤差（パイルキャップへの埋込深さ、パイルキャップと杭の芯ずれ）をパラメータとした。

3-2 実験概要（H-0シリーズ）

(1) 試験体概要

試験体の概要を表一および代表的な試験体図（H-0-2）を図一に示す。試験体は、既製杭（SC杭）を用いた実大として、杭径はφ400mm（肉厚65mm）、パイルキャップ寸法は1,000mm×1,000mmとした。杭種は杭材での破壊を先行させないため490N級（SKK490）のSC杭（杭径φ400、鋼管厚さ $t_s=12$ mm、コンクリート厚さ $t_c=53$ mm）とした。

本構法では、施工性に配慮してパイルキャップと杭頭部の接合部を簡易にすることから定着筋を設置しない。なお、杭頭部のパイルキャップへの埋込深さは200mmとした。また、パイルキャップコンクリートの強度は 30 N/mm^2 とした。杭頭部に施工する無収縮グラウトは 36 N/mm^2 以上、かつパイルキャップのコンクリート強度以上が確保されるプレミックス品を使用した。試験体に用いた材料（パイルキャップのコンクリート、杭頭部充填グラウト）の試験結果を表二および表三に示す。

なお、杭頭部のグラウト部には鉄筋が配置されないことから、パイルキャップに埋め込んだ杭頭側面からパイルキャップの縁空き部に伝達される曲げ応力の緩和を図るために、杭天端より10mm下がった位置からパイルキャップ底面の範囲の杭頭側面には緩衝材を設置した。

H-0-1は杭頭側面に緩衝材を設置しない試験体、H-0-2は上記に示したように杭頭側面に緩衝材を設置した試験体であり、本試験では緩衝材の有無による影響を確認することを目的とした。

(2) 荷重方法

荷重試験装置概要を図三に示す。水平荷重実験は、反

力フレーム一式を用いて実施した。

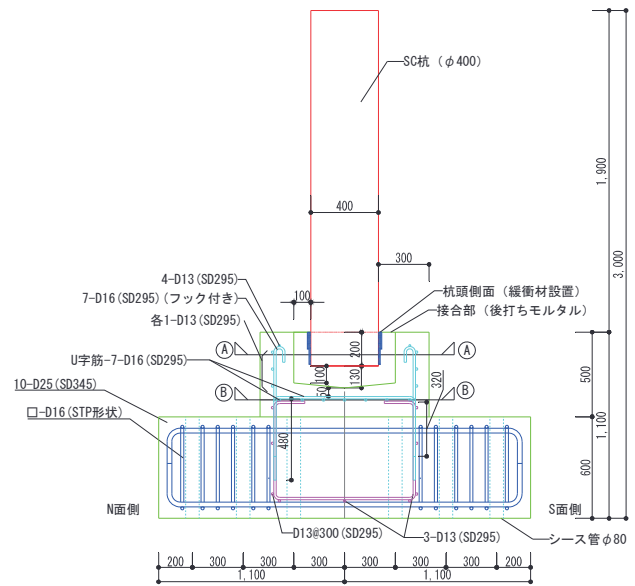
試験体は杭が上方となるように試験体製作時とは反転した状態で反力床にセットし、PC鋼棒によりスタブを固定した。軸力は、油圧ジャッキシステムを用いて軸力

表二 材料試験結果（パイルキャップコンクリート）

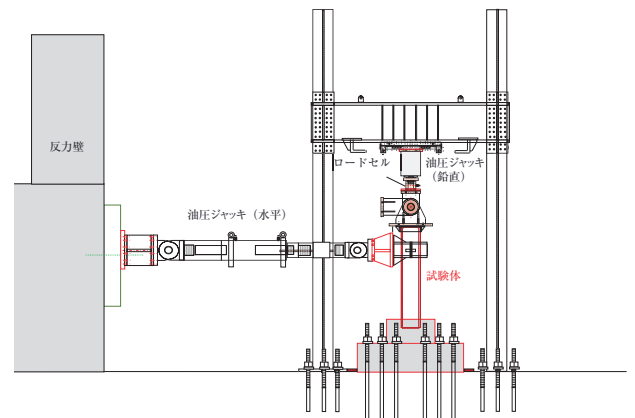
試験No	目標圧縮強度 (N/mm ²)	実圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
H-0-1	30.0	33.2	2.24	22,467
H-0-2		33.8	2.48	23,900

表三 材料試験結果（杭頭部充填グラウト）

試験No	目標圧縮強度 (N/mm ²)	実圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
H-0-1	36.0	70.6	2.90	22,300
H-0-2		75.1	2.53	22,533



図一 試験体の概要（H-0-2）



図三 荷重試験装置概要

表一 試験体の概要（H-0シリーズ）

試験No	試験	杭径 D(mm)	杭種	杭頭接合部		PC寸法 (mm)	PCコンクリート強度 (N/mm ²)	軸力 (kN)	PCへの埋込み深さ		杭とパイルキャップとの間隙		杭頭部接合材
				緩衝材有/無					埋込長 H(mm)	H/D	杭上面(mm)	杭側面(mm)	
H-0-1	水平	400	SC杭	無		1,000×1,000 高さ500 (スタブは除く)	30	1,500	200	0.5	100	100	無収縮モルタル
H-0-2				有									

を一定値に保持した。水平荷重は反力壁および3,000 kN油圧ジャッキシステムを用いて実施した。荷重方法は、試験杭に所定の軸力(1,500 kN)を導入した後に、油圧ジャッキを用いて正負交番繰返し荷重として加力した。水平荷重実験時には、杭頭回転角を確認しながら変位制御にて実施した。

3-3 実験概要 (Hシリーズ)

(1) 試験体概要

試験体の概要を表-4 および代表的な試験体図(H-3)を図-4に示す。試験体は、H-0シリーズと同様に既製杭(SC杭)を用いた実大として、杭径はφ400 mm(肉厚65 mm)、パイルキャップ寸法は1,040 mm×1,040 mmとした。杭種・杭仕様、杭頭部充填グラウトはH-0シリーズと同様とした。パイルキャップコンクリートの強度は、24 N/mm²を標準として、45 N/mm²の試験体も製作した。試験体に用いた材料(パイルキャップのコンクリート、杭頭部充填グラウト)の試験結果を表-5 および表-6に示す。

HシリーズではH-2を標準と位置づけ、H-1では杭頭接合部にグラウトをあと施工せずに、在来工法と同様に杭頭接合部がパイルキャップコンクリートで構築されるものである。H-3は杭の施工誤差(水平方向)を考慮して杭の水平位置をずらした試験体、H-4も杭の施工誤差(上下方向)を考慮してパイルキャップへの埋込深さを小さくした試験体である。H-5は杭に作用する軸力レベルを変えた試験体、H-6はパイルキャップコンクリートの強度を高くした試験体、H-7は杭体による影響を確認するためにSC杭からPHC杭(C種、Fc=105 N/mm²)に変えた試験体である。

(2) 荷重方法および計測概要

荷重試験装置および荷重方法は3-2(2)と同様である。なお、試験杭に導入する軸力は1,200 kNを標準とし、H-5のみ600 kN、1,200 kN、1,800 kNの3段階の軸力とした。なお、パイルキャップの杭芯がずれているH-3では、水平荷重による施工誤差(水平芯ずれ)による影響確認を目的とすることから、圧縮軸力位置は杭芯に合わせた。

水平荷重は杭頭回転角にて制御することとし、最大50

×10³ radを目標とした。なお、軸力をパラメータとしたH-5では、初期の回転剛性を確認することを目的として各軸力(600 kN、1,200 kN)で最大5.0×10³ radまで試

表-5 材料試験結果 (パイルキャップコンクリート)

試験No	目標圧縮強度 (N/mm ²)	実圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
H-1	24.0	25.5	1.93	21,000
H-2		26.5	2.34	22,400
H-3		26.6	2.37	22,000
H-4		26.7	1.87	22,400
H-5		25.0	2.23	22,300
H-6	45.0	62.1	3.06	31,333
H-7	24.0	29.7	1.99	24,700

表-6 材料試験結果 (杭頭部充填グラウト)

試験No	目標圧縮強度 (N/mm ²)	実圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
H-1	36.0	-	-	-
H-2		67.4	2.69	24,100
H-3		68.2	3.34	24,200
H-4		72.4 (72.8)	1.90 (1.95)	23,900 (24,000)
H-5		66.6	2.65	23,800
H-6	45.0	66.4 (68.8)	2.02 (2.01)	23,633 (24,200)
H-7	36.0	72.0	2.63	24,600

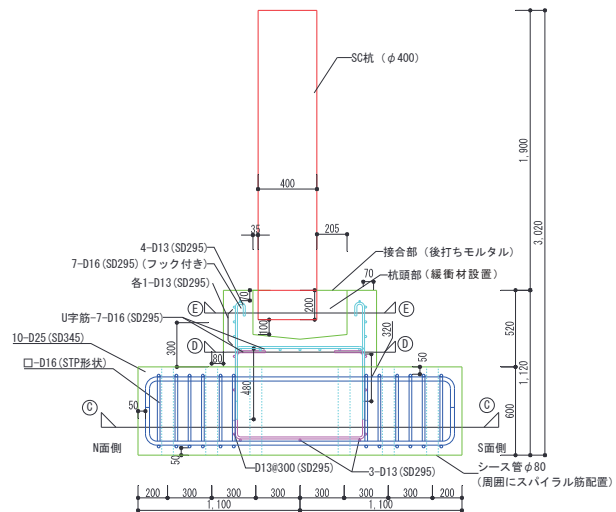


図-4 試験体の概要 (H-3)

表-4 試験体の概要 (Hシリーズ)

試験No	試験	杭径 D(mm)	杭種	杭頭接合部		PC寸法 (mm)	PCコンクリート強度 (N/mm ²)	軸力 (kN)	PCへの埋込み深さ		杭とパイルキャップとの間隙		杭頭部接合材
				緩衝材有/無					埋込長 H(mm)	H/D	杭上面(mm)	杭側面(mm)	
H-1	水平	400	SC杭	有	1,040 × 1,040 高さ520 (スタブは除く)	24	1,200	200	0.5	-	-	コンクリート	
H-2										100	100		
H-3										100	15 (185)		
H-4										100	100		
H-5										600	100		無収縮モルタル
H-6										1,200	100		
H-7			1,800							100			
H-7			PHC杭(C種)		45	1,200	200	0.5	100	100			

験を実施し、軸力 1,800 kN で他の試験体と同様の最大 $50 \times 10^3 \text{ rad}$ まで载荷した。杭頭回転角は水平加力軸方向の杭対面 2 点の鉛直変位を測定し、この差を測定スパンで除して求めた。

計測項目は荷重、制御用変位、载荷点の水平・鉛直変位、杭頭部の水平・鉛直変位、パイルキャップの水平・鉛直変位、鉄筋のひずみゲージおよびモールドゲージとした。

§4. 実験結果

4-1 H-0 シリーズ

(1) 軸力-水平変位関係

载荷軸力と水平変位関係を図-5 に示す。いずれの実験ケースともに、軸力は水平変位によらず一定に保持できており、杭頭側面に設置した緩衝材が軸力保持性能に影響していないことを確認できた。

(2) 杭頭曲モーメント-杭頭回転角関係

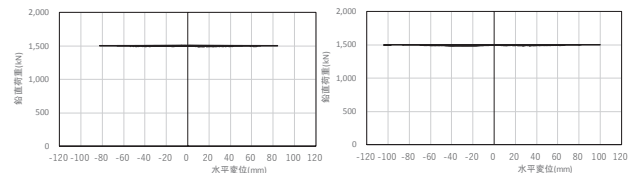
杭頭曲げモーメント-杭頭回転角の関係を包絡線として図-6 に示す。杭頭部の曲げモーメントは、水平荷重に载荷点から杭材端部までの距離を乗じ、これに軸力による負荷モーメントを加算して求めた。同図には、各ケースにおける最大偏心モーメント $M_e (=N \times D/2)$ (N : 軸力, D : 杭径) を併記した。 M_e は試験体を剛体と仮定したときの最大発生(浮上り)モーメントに相当する。なお、ここで示した杭頭曲げモーメント-杭頭回転角においては、载荷装置の不具合によるものと考えられるサイクルについては削除している。

H-0-1 (緩衝材無し) と H-0-2 (緩衝材有り) を比較すると、H-0-1 に対して H-0-2 では剛性および最大曲げモーメントともに小さい。H-0-2 の最大曲げモーメントは概ね最大偏心モーメント M_e と同等であるが、H-0-1 の最大曲げモーメントは最大偏心モーメントの 1.20~1.25 倍程度となっており、杭頭部の側面抵抗が寄与しているためと考えられる。

(3) 破壊状況

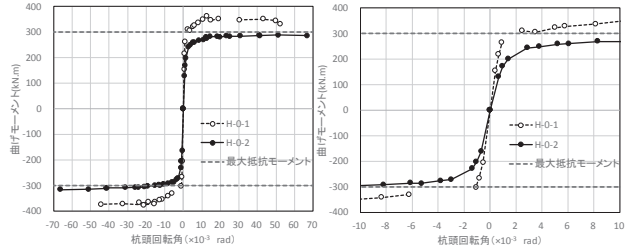
各試験体の試験後の状況を写真-1 に、パイルキャップ上面の最終ひび割れ図を図-7 に示す。ひび割れは各サイクルピーク時点で目視観察により、試験体にマーキングした。ひび割れ図の図中、「黒色：正方向加力時のひび割れ」、「赤色：負方向加力時のひび割れ」を示している。

緩衝材無しの H-0-1 では、パイルキャップ上面には加力方向および加力直交方向、斜め方向にひび割れが生じた。杭頭回転角が $50 \times 10^3 \text{ rad}$ の際に局所的に 10 mm を超えるひび割れ(斜め方向)がパイルキャップ上面に生じた。緩衝材有りの H-0-2 では、杭頭回転角 $5.2 \times 10^3 \text{ rad}$ 時にパイルキャップ上面(後打ちグラウト部)に载荷方向に縦ひび割れが発生した。パイルキャップ上面のコンクリート部には、 $50 \times 10^3 \text{ rad}$ 時に斜め方向にひび割れが



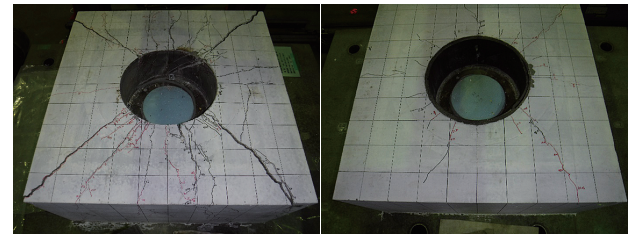
(1) H-01 (緩衝材無し) (2) H-02 (緩衝材有り)

図-5 軸力-水平変位関係



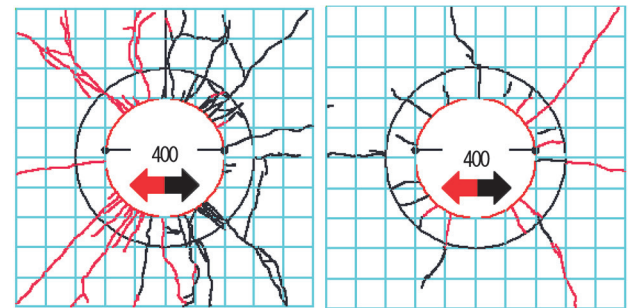
(1) 最大杭頭回転角まで (2) $0 \sim 10 \times 10^3 \text{ rad}$

図-6 杭頭曲げモーメント-杭頭回転角関係



(1) H-0-1 (2) H-0-2

写真-1 実験終了後状況



(1) H-0-1 (2) H-0-2

図-7 ひび割れ状況

生じた。パイルキャップ上面のひび割れ幅は最大で 0.20 mm (加力方向: $-66 \times 10^3 \text{ rad}$ 時) であった。

以上より、パイルキャップの損傷は緩衝材の有無(杭頭部の側面抵抗)に影響されることがわかった。

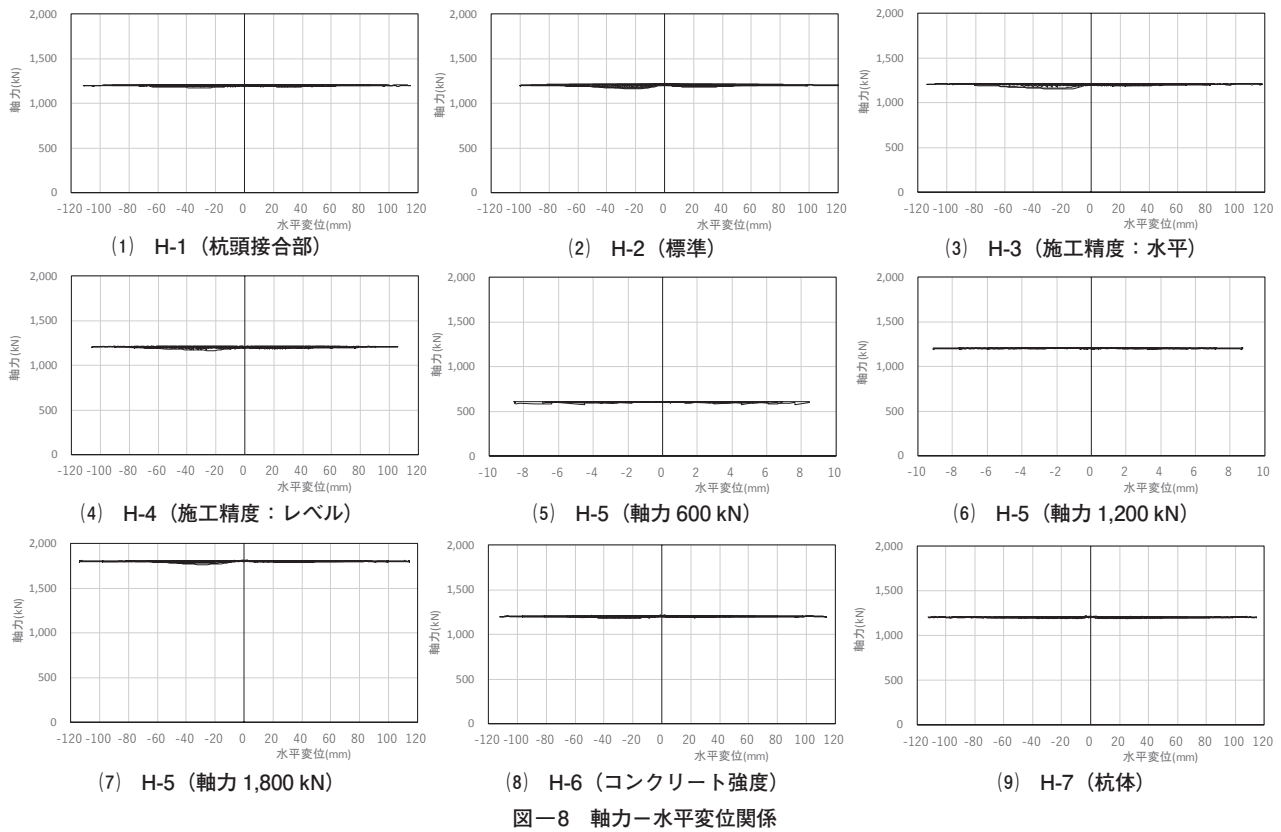
4-2 H シリーズ

(1) 軸力-水平変位関係

载荷軸力と水平変位関係を図-8 に示す。いずれの実験ケースともに、軸力は水平変位によらず一定に保持できており、軸力保持性能に問題ないことを確認できた。

(2) 杭頭曲モーメント-杭頭回転角関係

杭頭曲げモーメント-杭頭回転角の関係を包絡線として図-9 および図-10 に示す。図-9 では全ケースを重ねて、図-10 では今回標準として位置づけている H-2 の

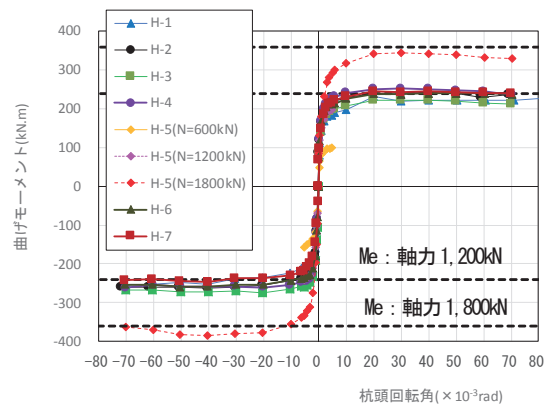


図—8 軸力—水平変位関係

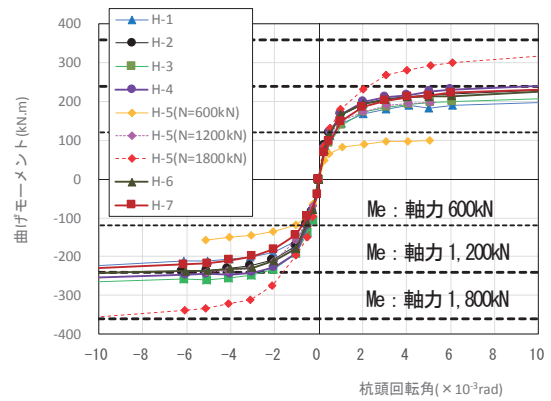
結果を各ケースに併記した。杭頭部の曲げモーメントは、水平荷重に載荷点から杭材端部までの距離を乗じ、これに軸力による付加モーメントを加算して求めた。同図には、各ケースにおける最大偏心モーメント $M_e (=N \times D/2)$ (N : 軸力, D : 杭径) を併記した。 M_e は試験体を剛体と仮定したときの最大発生 (浮上り) モーメントに相当する。

全ケースの結果を示した図—9 から、軸力依存性が認められ、高軸力になるほど高い回転抵抗を示していること、各試験ケースの最大曲げモーメントは最大偏心モーメントに M_e に漸近していることがわかる。

杭頭接合部が異なる H-1 (パイルキャップコンクリート) と H-2 (グラウト：標準) を比較すると、H-1 の最大曲げモーメントが H-2 よりやや低い。杭頭接合部の材料強度の違いによるものと考えられる。水平方向の施工精度をパラメータとした H-3 と H-2 を比較すると、正方向の最大曲げモーメントは H-2 の方が、負方向の最大曲げモーメントは H-3 の方がやや大きい。へりあきの距離が影響しているものと考えられる。高さ方向の施工精度をパラメータとした H-4 と H-2 では大きな違いは認められず、杭が低止まりして杭頭部のグラウト厚さが大きくなっていても影響は小さいと考えられる。一定軸力を変化させた H-5 と H-2 における軸力 1,200 kN の比較では、顕著な違いは認められない結果となり、H-5 では最初に実施した軸力 600 kN の荷重による影響はないと判断される。パイルキャップコンクリートの強度を高くした H-6 と H-2 では大きな違いは認められず、パイルキャップコン



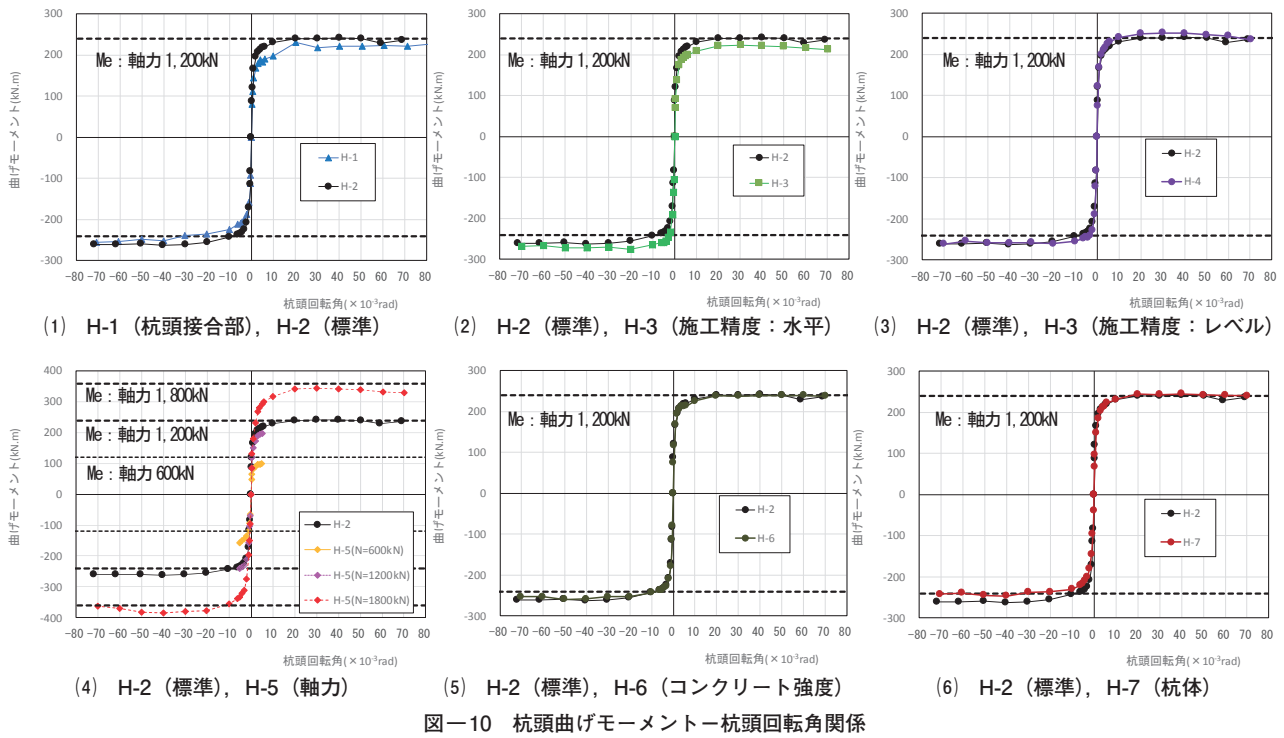
(1) 最大杭頭回転角まで



(2) 0~10×10⁻³ rad

図—9 杭頭曲げモーメント—杭頭回転角関係

クリートの強度の影響は小さいと考えられる。杭体を PHC 杭とした H-7 と H-2 では大きな違いは認められない結果となった。このことから杭頭曲げモーメント—杭頭回転角は杭種に依存しないと考えられる。



図一〇 杭頭曲げモーメント-杭頭回転角関係

(3) 破壊状況

パイルキャップのひび割れ図を図一〇に示す。ひび割れ図は、 70×10^3 rad までにひび割れが生じた試験体を対象に、各試験体の最終状況を示す。ひび割れは、各サイクルピーク時点で目視観察により試験体にマーキングした。ひび割れ図の図中、「青色：正方向（N側に引張）加力時のひび割れ」、「赤色：負方向（S側に押込み）加力時のひび割れ」を示している。

H-1および軸力・杭頭回転角の小さい範囲の荷重のH-5（軸力600kN, 1,200kN），ならびにコンクリート強度の高いH-6では、実験実施範囲においてひび割れは生じなかった。ひび割れが生じた試験体では、パイルキャップ上面には加力方向および加力直交方向、斜め方向にひび割れが生じた。荷重方向のパイルキャップ側面には、中央の縦ひび割れ、斜めひび割れが生じた。荷重直交方向のパイルキャップ側面には、中央の縦ひび割れ、パイルキャップ上面の斜めひび割れが側面に達し伸展した斜めひび割れが発生した。

H-2では、杭頭回転角 50×10^3 rad 時にパイルキャップ上面（後打ちグラウト部）に荷重方向に縦ひび割れが発生し伸展、 -60×10^3 rad 時に斜め方向に、 70×10^3 rad 時に加力直交方向にひび割れが生じた。パイルキャップ上面のひび割れ幅は最大で0.15mm（加力直交方向、斜め方向： 70×10^3 rad 時）、側面のひび割れ幅は最大0.20mm（加力方向： 70×10^3 rad 時）であった。

H-3では、杭頭回転角 -2×10^3 rad 時にパイルキャップ上面（後打ちグラウト部）に斜め方向にひび割れが発生したが軽微で、その後 40×10^3 rad までひび割れ幅の増大、伸展は認められなかった。加力方向には -30×10^3 rad 時にへりあきの小さいN側のパイルキャップ端部（コン

クリート部）およびパイルキャップ側面に縦ひび割れが発生した。その後、パイルキャップ上面には加力直交方向および斜め方向にひび割れが発生し、パイルキャップ端部まで進展した。へりあきの小さいN側のパイルキャップ側面では、 50×10^3 rad 時に後打ちグラウト部の下端付近から斜め方向のひび割れが生じた。パイルキャップ上面のひび割れ幅は最大で0.85mm（加力方向： 70×10^3 rad 時）、側面のひび割れ幅は最大0.9mm（加力方向： 70×10^3 rad 時）であった。

H-4では、杭頭回転角 -20×10^3 rad 時にパイルキャップ上面（後打ちグラウト部）に荷重方向にひび割れが発生し伸展、 30×10^3 rad 時に斜め方向に、 -70×10^3 rad 時に加力直交方向にひび割れが生じた。パイルキャップ上面のひび割れ幅は最大で0.45mm（加力方向： -70×10^3 rad 時）、側面のひび割れ幅は最大0.15mm（加力方向： -70×10^3 rad 時）であった。

H-5（軸力1,800kN）では、杭頭回転角 -40×10^3 rad 時にパイルキャップ上面の加力方向の端部（コンクリート部）およびパイルキャップ側面にひび割れが発生し伸展、 -50×10^3 rad 時に加力直交方向および斜め方向にひび割れが生じた。パイルキャップ上面のひび割れ幅は最大で1.30mm（斜め方向： -70×10^3 rad 時）、側面のひび割れ幅は最大0.65mm（加力方向： -70×10^3 rad 時）であった。

H-7では、杭頭回転角 40×10^3 rad 時にパイルキャップ上面（後打ちグラウト部）に斜め方向に、 70×10^3 rad 時に加力方向にひび割れが生じた。ひび割れは概ね後打ちグラウト部に発生している状況であった。パイルキャップ上面のひび割れ幅は最大で0.10mm（斜め方向： 50×10^3 rad 時）、側面のひび割れ幅は最大0.04mm（加力方

向： -70×10^3 rad 時）であった。

以上より、パイルキャップの損傷はへりあき部の大きさと軸力に影響されることがわかった。

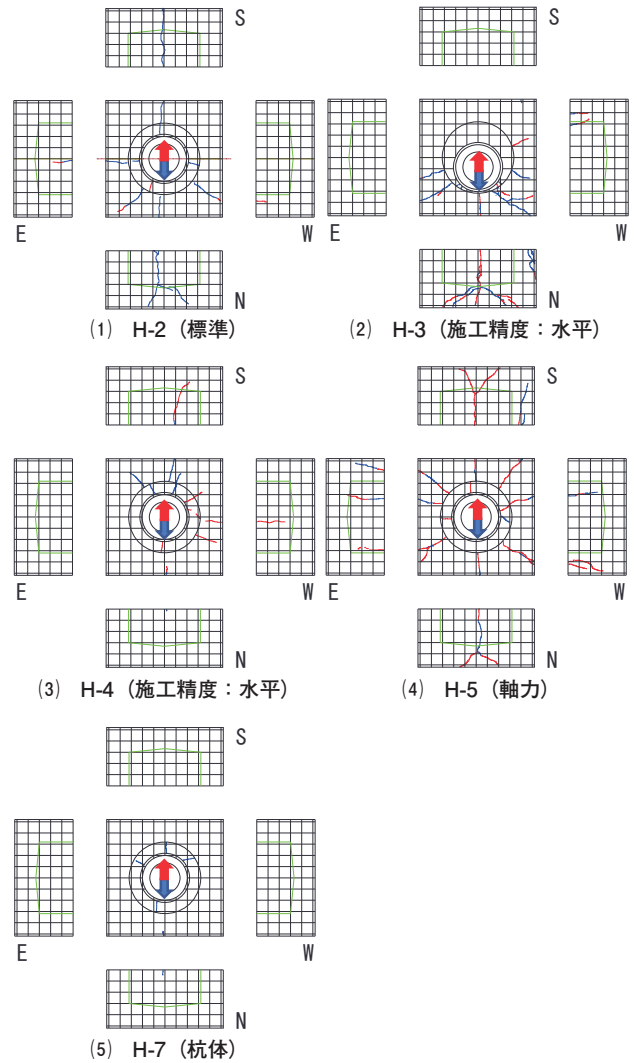
§5. おわりに

PCaパイルキャップを杭頭部にかぶせるように設置した杭頭接合部を模擬した試験体を対象に、水平荷重に対する杭頭接合部の回転挙動およびパイルキャップの耐力を確認することを目的に、構造性能確認実験を実施した。

本報では、杭頭接合部の回転挙動に着目した杭頭曲げモーメントと杭頭回転角の結果について報告した。

H-0シリーズの実験より、杭頭曲げモーメントと回転角の関係において、緩衝材が有る場合には杭頭部の側面抵抗が寄与しないことから、緩衝材が無い場合に比べて剛性および最大曲げモーメントが小さくなることがわかった。緩衝材の有無により杭頭曲げモーメントと回転角関係に違いがあることを確認できた。また、緩衝材が無い場合にはパイルキャップにひび割れが多く発生し、かつひび割れ幅も大きい。緩衝材が有る場合にはパイルキャップに生じるひび割れが少なく、かつひび割れ幅も小さいことがわかった。パイルキャップの損傷は緩衝材の有無（杭頭部の側面抵抗）に影響されることを確認できた。

Hシリーズの実験より、杭頭曲げモーメントと回転角の関係から、軸力依存性が認められ、高軸力になるほど高い回転抵抗を示すこと、最大曲げモーメントは軸力と杭径から求まる最大偏心モーメントに漸近する傾向を示すことを確認できた。また、パイルキャップの損傷はへりあき部の大きさと軸力に影響されるが、杭頭回転角が概ね 20×10^3 rad まではひび割れが生じないことを確認できた。



図一11 ひび割れ状況
(杭頭回転角 70×10^3 rad)