

論文 SC 杭のパイルキャップにおける埋込み部耐力に関する基礎的検討

小梅 慎平*1・石川 一真*2・岸田 慎司*3

要旨：本研究では、定着筋方式と埋込み方式、および両方式を併用した場合の杭頭接合部耐力を実験的に確認するため、実大スケールでの水平加力実験を行った。実験結果からパイルキャップの破壊状況や杭頭接合面位置での曲げモーメントと回転角の履歴ループ形状などについて確認した。また、杭頭定着筋を取り付ける、もしくは杭の埋込み長を大きくすると杭頭接合面位置の曲げモーメントが大きくなることや、定着筋方式と埋込み方式を併用した場合、杭頭接合部耐力と埋込み部耐力との累加が成り立つことを確認した。

キーワード：SC 杭, パイルキャップ, 埋込み方式, 埋込み部耐力, 埋込み長

1. はじめに

近年、高層建物や重量の大きな建物の杭基礎においても、既製コンクリート杭の1柱1杭の設計が可能となり、杭1本が負担する水平力が従来よりも大きくなっている。それに伴い、曲げ耐力が大きいSC杭（外殻鋼管付き高強度コンクリート杭）を上杭に採用する設計が増加している。SC杭を杭頭部に使用することで、杭と基礎梁および柱との間の応力伝達を行うパイルキャップにもSC杭に見合った耐力が求められる。しかし、パイルキャップの構造性能については未解明な部分が多く、構造実験や解析が十分ではないのが現状である。

図-1に基礎部材と部位の名称を示す。本論文では、杭頭部上端とパイルキャップが接する面を杭頭接合面、パイルキャップのうち、杭が埋め込まれている部分を埋込み部と称し、その長さを杭の埋込み長 h とした。

既製コンクリート杭の杭頭接合法は、杭の主筋あるいは杭頭定着筋をパイルキャップに定着する方法（以下、定着筋方式）と、杭頭部をパイルキャップに杭径の1倍以上埋め込む方法（以下、埋込み方式）の2種類がある。なお、定着筋方式においても、通常は杭頭部をパイル

キャップに100mm以上埋め込む。

現状では、一般的に定着筋方式を採用することが主流となっているが、杭頭接合面の耐力評価について、解析断面を杭径より大きな仮想RC断面とする方法²⁾³⁾や、解析断面は杭と同一の円環とし、パイルキャップのコンクリート強度を割り増す方法⁴⁾などが提案されており、評価方法は定まっていない。このため、筆者らは既往の研究⁵⁾において杭頭接合部耐力の実験的検討を行い、解析断面を杭と同一の円環とし、支圧効果を考慮してパイルキャップコンクリート強度を4~5倍に割り増した解析結果が実験結果と最も整合性があることを報告した。

埋込み部の耐力評価については、鋼管杭を用いた実験から破壊モードや耐力式を提案した研究⁶⁾や、杭が埋め込まれたパイルキャップの挙動に関する研究⁷⁾、杭頭接合部耐力と埋込み部耐力の耐力式を提案した研究⁸⁾などがある。しかし、埋込み部に特殊な配筋を施しているものや、補強筋の効果に検討の余地があるとの指摘⁹⁾があるものなど、規準化されるような耐力式の確立には至っていない。また、杭頭接合面の耐力と埋込み部の耐力の累加について、実験的に示した研究もない。

そこで、本研究では、定着筋方式と埋込み方式、および両方式を併用した場合の杭頭接合部耐力を実験的に確認するため、実大スケールでの水平加力実験を行った。なお、本論文で報告する実験は、埋込み部の基本的な性状を理解するため、軸力をゼロとした。

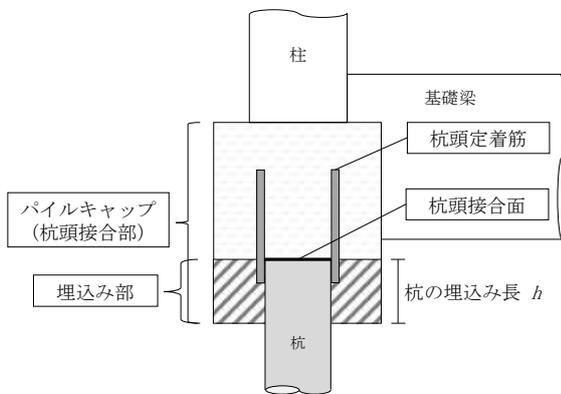


図-1 基礎部材と部位の名称

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1に試験体諸元、表-2に鉄筋の力学的特性、表-3に試験体コンクリートの力学的特性、図-2(a)に試験体A-2の配筋図、図-2(b)に試験体A-8の配筋図を示す。試験体は、実大スケールのSC杭、パイルキャップおよび基礎梁で構成される。杭頭接合部より先にSC杭

*1 ジャパンパイル (株) 技術企画部 技師 修士(工学) (正会員)

*2 ジャパンパイル (株) 技術企画部 部長付 博士(工学) (正会員)

*3 芝浦工業大学 建築学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

を確保するために、通常はパイルキャップに埋め込まれる。しかし、試験体 A-2 は、杭頭接合面のみの耐力評価を目的としているため、杭頭定着筋のフレア溶接部分も含め、SC 杭はパイルキャップに全く埋め込んでいない。また、試験体 A-2 は、既往の研究⁵⁾で杭頭接合面耐力を比較検証するために用いたものであり、杭頭定着筋の定着長は 40d (d は鉄筋の呼び名に用いた数値) を満足していたが、杭頭定着筋の先端に円環状のプレートを溶接により取り付けられた試験体であった。

試験体 A-6, A-8 はそれぞれ試験体 A-2 に対し、杭の埋込み長を 300mm (杭径の 0.5 倍)、600mm (杭径の 1.0 倍) に変化させた。試験体 A-5, A-7 はそれぞれ試験体 A-6, A-8 から、杭頭定着筋を取り除いた試験体である。

杭頭接合面耐力の耐力評価を目的とした試験体 (埋込み長が 0mm) には、はかま筋、ベース筋および帯筋を一般的な約 200mm ピッチで配筋した。埋込み部の耐力評価を目的とした試験体 (埋込み長が 300mm または 600mm) には、パイルキャップ補強筋の効果を期待して、はかま筋、帯筋、主筋、立上げ筋、外横筋、内横筋を約 100mm ピッチで配筋した。ここで、外横筋とは、埋込み部に配筋されている帯筋のことを指す。杭頭定着筋およびパイルキャップ補強筋には、ひずみゲージを貼り付け、ひずみ値を計測した。

なお、杭の埋込み長に関わらず、SC 杭の中空部はポリスチレンフォーム断熱材で蓋をして、パイルキャップに打設したコンクリートが中空部に入らないようにした。

2.2 荷重装置概要

図-3 に荷重装置図を示す。実際の杭、パイルキャップおよび基礎梁とは上下を反転させて、試験体を荷重装置に設置し、基礎梁を反力床に緊結した。そのため、本研究では、杭が埋め込まれている面をパイルキャップ下面と称す。鉛直ジャッキ、水平ジャッキ共に加力治具との接続部はピン支持とした。

杭頭接合面位置の曲げモーメントの計算式を式(1)に示す。

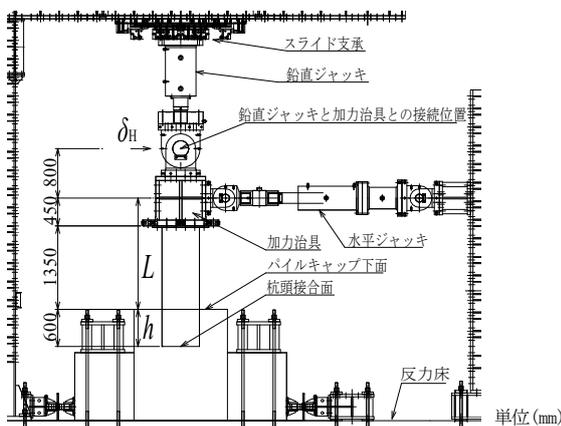


図-3 荷重装置図 (試験体 A-7 設置時)

$$M = P \cdot (L + h) + N \cdot \delta_H \quad (1)$$

ここに、 M : 杭頭接合面位置の曲げモーメント、 P : 水平力、 L : 水平加力点からパイルキャップ下面までの距離、 h : パイルキャップ下面から杭頭接合面までの距離、 N : 軸力 (本論文の試験体ではゼロ)、 δ_H : 鉛直ジャッキと加力治具との接続位置の水平変位とする。なお、本研究における全試験体で $L+h$ の値は共通である。

2.3 実験計画

本実験は、回転角 θ にて制御を行う漸増変位正負交番繰返し荷重とした。なお、回転角 θ は SC 杭の側面に設置した変位計を用いて式(2)より求めた。

$$\theta = (\delta_{V1} - \delta_{V2}) / L_V \quad (2)$$

ここに、 δ_{V1} , δ_{V2} : パイルキャップ下面近傍の SC 杭の鉛直変位、 L_V : 変位計の設置間距離 (図-2 参照) とする。

正負交番加力を 1 サイクルとして、 $\theta = 1.25/1000\text{rad}$, $2.5/1000\text{rad}$ を各 1 サイクル、 $\theta = 5/1000\text{rad}$, $10/1000\text{rad}$, $20/1000\text{rad}$, $30/1000\text{rad}$, $40/1000\text{rad}$, $60/1000\text{rad}$, $80/1000\text{rad}$ を各 2 サイクル行った。ただし、試験体 A-2 においては、杭頭定着筋の破断によって試験の継続が困難となり、 $60/1000\text{rad}$ の 2 サイクル目を終えた段階で試験を終了した。

3. 実験結果

3.1 杭頭接合面位置の曲げモーメント-回転角関係

実験から得られた杭頭接合面位置の曲げモーメントと回転角との関係を図-4 に示す。正載荷時と負載荷時のそれぞれの場合における、杭頭定着筋およびパイルキャップ補強筋が引張降伏した時点を同図中に示した。また、試験体 A-2, A-5 および A-7 の図中には、材料試験結果を用いた杭頭接合面位置の曲げモーメントの解析値 (以下、計算値) を破線で示した。試験体 A-2 の計算値は、既往の研究⁵⁾で示したように、解析断面を円環とし、コンクリート強度を 5 倍とした断面解析により求めた杭頭接合面耐力である。試験体 A-5, A-7 の計算値は、文献⁷⁾を参考に、杭側方のパイルキャップコンクリートに生じる直応力度より算定した式(3)を用いて求めた埋込み部耐力である。なお、式(3)において、パイルキャップ補強筋の効果は考慮されていない。

$$\text{cal}M_{\max} = \sigma_B \cdot \left(\frac{D \cdot h^2}{6L + 4h} \right) \cdot (L + h) \quad (3)$$

ここに、 $\text{cal}M_{\max}$: 杭頭接合面位置の曲げモーメントの計算値、 σ_B : パイルキャップコンクリート強度、 D : 杭径とする。

(1) 試験体 A-2

杭頭定着筋を取り付け、杭の埋込み長を 0mm とした試験体 A-2 は、 $\pm 20/1000\text{rad}$ から $\pm 40/1000\text{rad}$ の間で耐

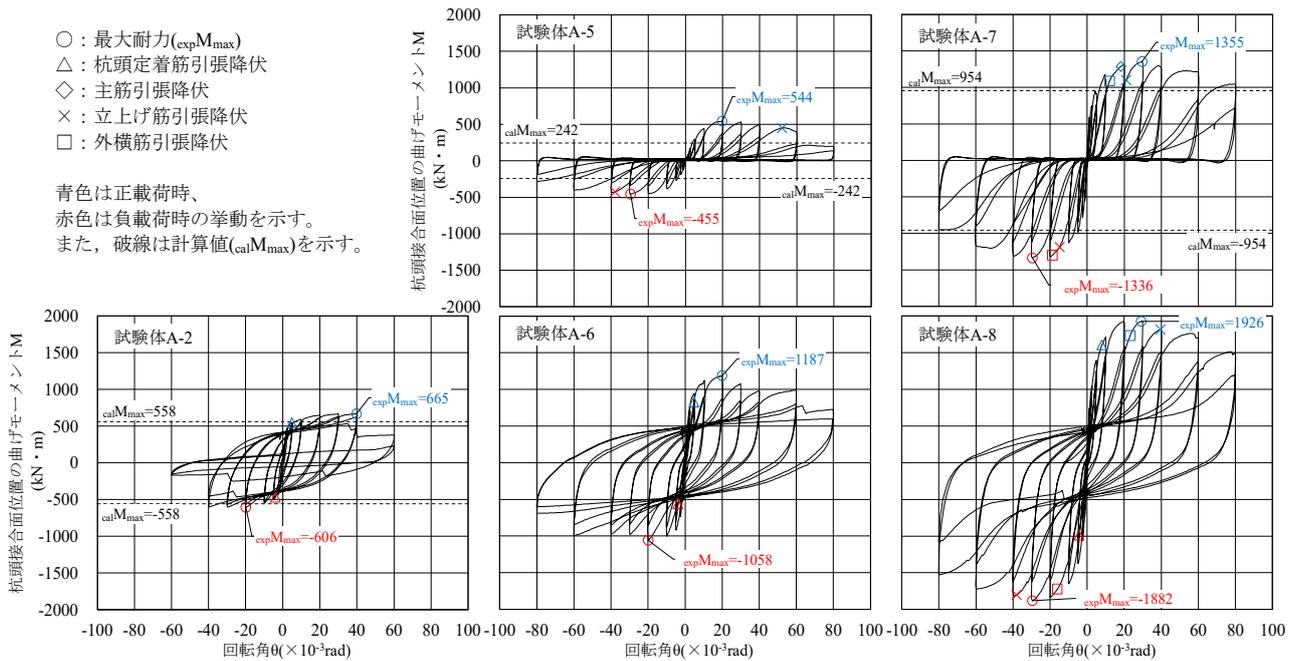


図-4 杭頭接合位置の曲げモーメント M-回転角 θ 関係

力の増減がほとんどなく、正載荷時で 40/1000rad、負載荷時で -20/1000rad のいずれも 1 サイクル目で最大耐力を記録した。また、-40/1000rad の 2 サイクル目以降で、杭頭定着筋が杭頭接合面付近で破断して、耐力が大きく低下した。M-θ 関係の履歴ループは、紡錘型となった。

(2) 試験体 A-5

杭頭定着筋を取り付けず、杭の埋込み長を 300mm とした試験体 A-5 は、正載荷時で 20/1000rad、負載荷時で -30/1000rad のいずれも 1 サイクル目で最大耐力を記録した。また、最大耐力を迎えるまでに、パイルキャップ補強筋が降伏することはなかった。M-θ 関係の履歴ループは、スリップ型となった。

(3) 試験体 A-6

杭頭定着筋を取り付け、杭の埋込み長を 300mm とした試験体 A-6 は、正載荷時、負載荷時共に ±20/1000rad のいずれも 1 サイクル目で最大耐力を記録した。最大耐力を記録する以前の +5/1000rad および -10/1000rad において、杭頭定着筋は降伏したが、パイルキャップ補強筋は降伏しなかった。M-θ 関係の履歴ループは、試験体 A-2 と A-5 を足し合わせたような形となった。

(4) 試験体 A-7

杭頭定着筋を取り付けず、杭の埋込み長を 600mm とした試験体 A-7 は、正載荷時、負載荷時共に ±30/1000rad のいずれも 1 サイクル目で最大耐力を記録した。最大耐力を記録する以前に、主筋、立上げ筋および外横筋が降伏した。M-θ 関係の履歴ループは、スリップ型となった。

(5) 試験体 A-8

杭頭定着筋を取り付け、杭の埋込み長を 600mm とし

た試験体 A-8 は、正載荷時、負載荷時共に ±30/1000rad のいずれも 1 サイクル目で最大耐力を記録した。最大耐力を記録する以前に、杭頭定着筋および外横筋が降伏した。M-θ 関係の履歴ループは、試験体 A-2 と A-7 を足し合わせたような形となった。

以上の結果から、本実験における M-θ 関係の履歴ループの形状は、杭頭定着筋を取付け、パイルキャップに杭を埋め込まない試験体は紡錘型となり、杭頭定着筋を取り付けず、パイルキャップに杭を埋め込む試験体はスリップ型となった。さらに、杭頭定着筋を取付け、パイルキャップに杭を埋め込む試験体は紡錘型とスリップ型を足し合わせたような形となった。

また、杭頭定着筋を取付ける、もしくは杭の埋込み長を大きくすると杭頭接合位置の曲げモーメントが大きくなった。

最大耐力と計算値を比較すると、試験体 A-2 は最大耐力と計算値がおおよそ整合している。しかし、試験体 A-5、A-7 は、最大耐力が計算値を上回る結果となった。これは、計算値の算出において、パイルキャップ補強筋の効果を考慮していないことが原因と考えられる。

3.2 ひび割れ発生状況および破壊状況

パイルキャップのひび割れ状況の観察は、各回転角の 1 サイクル目の目標回転角到達毎に行った。各試験体の試験終了時のひび割れ発生状況を図-5 に、S 方向から撮影した写真を写真-1 に示す。図-5 の青線が正載荷時に発生したひび割れ、赤線が負載荷時に発生したひび割れを示す。また、図-5 の試験体 A-2 には、パイルキャップ側面の名称も併せて示す。正載荷時の加力方向前

面となる側面を W 面，加力方向背面となる面を E 面，加力方向に平行な面を N 面，S 面と称す。

試験体 A-2 は，杭および杭頭定着筋の周囲にひび割れが集中して発生し，回転角が大きくなるに従って杭頭定着筋の抜け上がりと共に，杭頭定着筋の周囲のパイルキャップコンクリートがコーン状に浮き上がる破壊状況が確認された。

杭の埋込み長を 600mm とした試験体 A-7，A-8 は，パイルキャップ下面ではひび割れが杭から放射状に進展し，特に加力方向から斜め 45° 方向に大きなひび割れが発生した。また，正載荷時には W 面に縦ひび割れ，N 面と S 面には斜めひび割れ，そして E 面には横ひび割れが発生した。

杭の埋込み長を 300mm とし，杭頭定着筋を取り付けていない試験体 A-5 は，試験体 A-7，A-8 と同様に，パイルキャップ下面ではひび割れが杭から放射状に進展し，特に加力方向から斜め 45° 方向に大きなひび割れが発生した。また，側面についても本数は少ないが，試験体 A-7，A-8 と同様のひび割れが発生した。

杭の埋込み長を 300mm とし，杭頭定着筋を取り付けた試験体 A-6 は，杭が埋め込まれている他の試験体とは異なるひび割れが発生した。10/1000rad から加力背面のパイルキャップコンクリートが浮き上がり始め，杭頭定着筋の周囲のパイルキャップコンクリートがコーン状に浮き上がる破壊状況となった。これは，杭頭定着筋を取り付けた試験体 A-2 の破壊状況と同じであるが，その範囲は試験体 A-2 と比べて倍以上となった。同様に杭頭定着筋を取り付けた試験体 A-8 は，このような破壊状況ではなかったため，杭頭定着筋を取り付けた場合，杭の埋込み長によってパイルキャップの破壊状況が異なることが確認された。

4. 杭頭接合面耐力と埋込み部耐力の累加

実験結果から杭頭接合面耐力と埋込み部耐力との累加について検討する。

図-6(a)に試験体 A-2，A-5 および A-6 の M- θ 関係の骨格曲線を示す。同図には，試験体 A-2 と A-5 の目標回転角到達時の曲げモーメントを累加した曲線（紫色の折れ線）を併記している。正載荷，負載荷共に，最大耐力付近の 20/1000rad や 30/1000rad までは，試験体 A-2 と A-5 を累加した耐力と試験体 A-6 の耐力は，概ね近い値を示した。なお，試験体 A-2 の杭頭定着筋が 40/1000rad の 2 サイクル目以降で破断し，大きく耐力低下したことにより，累加耐力も 60/1000rad 時に大きく低下している。

図-6(b)に試験体 A-2，A-7 および A-8 の M- θ 関係の骨格曲線を示す。同図には，図-6(a)と同様に試験体 A-2 と A-7 の累加曲線を併記している。正載荷，負載荷共

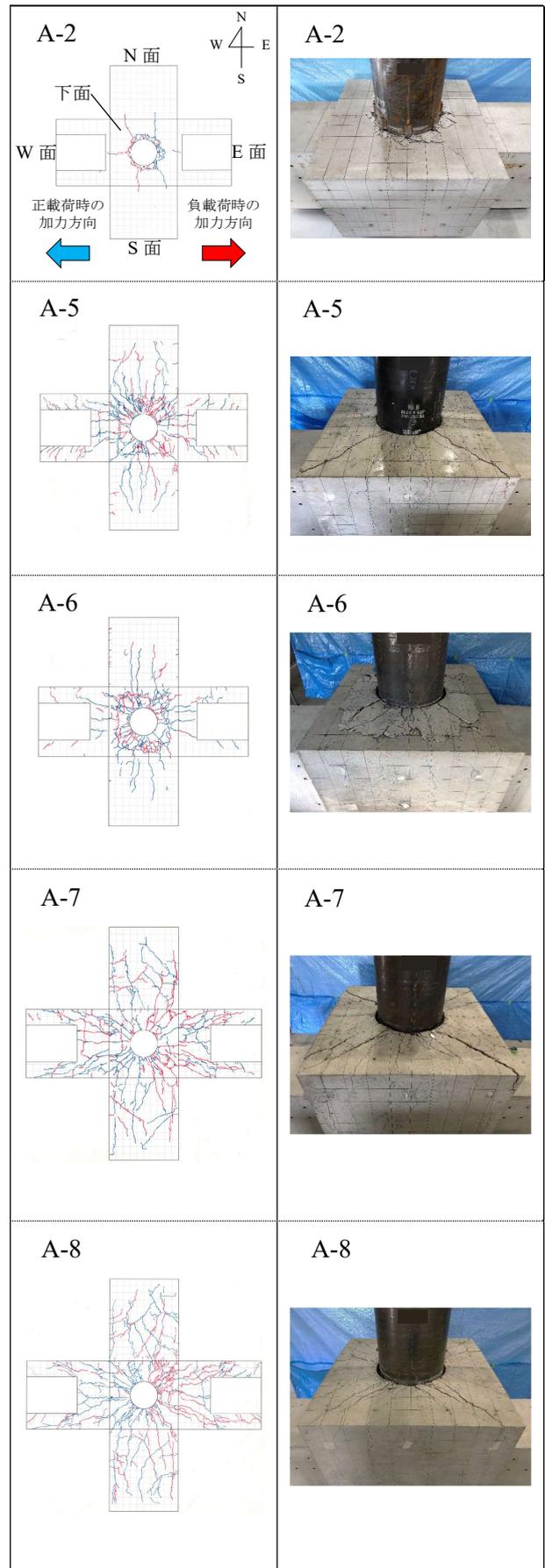
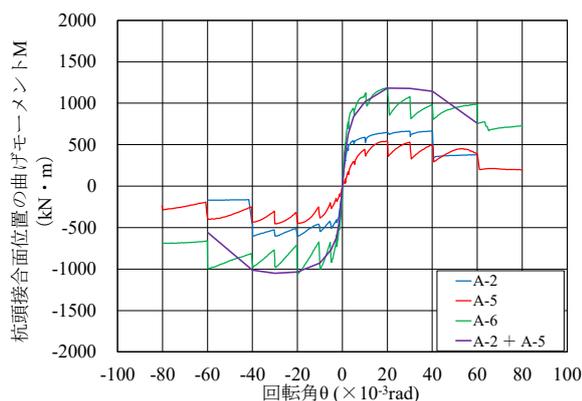
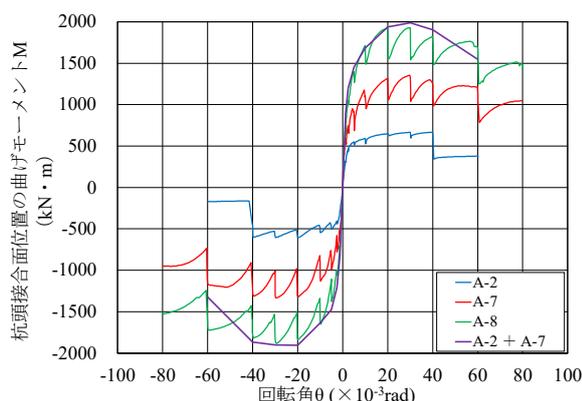


図-5 試験終了時のひび割れ発生状況

写真-1 試験終了時の破壊状況(S方向)



(a) 埋込み長 300mm



(b) 埋込み長 600mm

図-6 M-θ 関係の骨格曲線と曲げモーメントの累加曲線

に、最大耐力付近の 20/1000rad や 30/1000rad までは、試験体 A-2 と A-7 の累加耐力と試験体 A-8 の耐力は、概ね近い値を示した。

以上のことから、実験した範囲の埋込み長においては、杭頭接合耐力と埋込み部耐力との累加が成り立つことが確認できた。

5. まとめ

本研究では、定着筋方式と埋込み方式、および両方式を併用した場合の杭頭接合部耐力を実験的に確認するため、実大スケールでの水平加力実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 杭頭定着筋を取り付ける、もしくは杭の埋込み長を大きくすると杭頭接合位置の曲げモーメントが大きくなることを確認した。
- (2) パイルキャップ補強筋の効果を考慮していない埋込

み部の耐力式は、実験値を過小評価した。

- (3) 定着筋方式と埋込み方式を併用した場合、実験した範囲の埋込み長においては、杭頭接合耐力と埋込み部耐力との累加が成り立つことを確認した。

今後の課題として、パイルキャップ補強筋の効果及び軸力や基礎梁の影響を検証し、それらを考慮した埋込み部の耐力式を構築する必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：基礎部材の強度と変形性能，2022.3
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計例集，pp.190-192，2004.2
- 3) 土木研究所，鋼管杭・鋼矢板技術協会，コンクリートパイル建設技術協会：杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書（杭頭接合部に関する研究），pp.277-279，2012.3
- 4) 佐々木 聡ほか：アンボンドアンカーを用いた既製コンクリート杭の杭頭半剛接合部の力学的挙動に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.620，pp.81-86，2007.10
- 5) 小梅慎平，石川一真，岸田慎司：SC 杭のパイルキャップにおける杭頭接合部耐力に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.2，pp.547-552，2023
- 6) 桐原英秋，牧野俊雄，棚橋秀光，秋山 宏：鋼管くい基礎接合部の終局耐力と変形能力，日本建築学会構造系論文報告集，No.366，pp.132-141，1986.8
- 7) 黒正清治ほか：正負交番繰返し水平力を受ける杭と基礎の接合部に関する実験研究（その 1）～（その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.2323-2328，1981.9
- 8) 松田 竜ほか：SC 杭頭埋込部の曲げ抵抗機構，日本建築学会構造系論文集，Vol.85，No.776，pp.1291-1301，2020.10
- 9) 日比野 陽，高橋広生，楠 浩一，向井智久：パイルキャップが先行破壊する既製杭基礎接合部の補強筋の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.2，pp.541-546，2023