

論文 周辺架構を考慮したパイルキャップの耐震性能評価に関する実験研究

酒井 慎二^{*1}・岸田 慎司^{*2}・小林 恒一^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨：本研究は柱・基礎梁・(既製)杭のついたパイルキャップの破壊性状や、パイルキャップ内における各種補強筋の効果ならびにパイルキャップ周囲への応力伝達メカニズムを把握する目的で、パイルキャップの幅せい寸法と軸力をパラメータとした試験体の載荷実験を行った。パイルキャップの上下で断面の異なる部材がついているため、通常の柱・梁接合部よりも複雑な挙動が見られた。本報ではその実験結果について報告する。

キーワード：パイルキャップ, 基礎梁, 既製杭, 袴筋, 耐震性能

1. はじめに

パイルキャップは上部構造の応力を地盤に伝達する重要な接合部の部材である。特に地震時などで外部応力が作用した場合、内部に複雑な応力が作用すると考えられる。しかしながら上部構造のように多くの研究が行われておらず^{1)~3)}、また、基礎構造は通常掘削しなければ観察することができないため、地震等の損傷を受けた場合でも実際の破壊状況を把握することも難しい。以上のような背景からパイルキャップは、応力伝達メカニズムなど不明確な点が多い。

現在、パイルキャップの設計は構造規定に基づいて行われている。しかし、内部の各種補強筋の効果についても考慮されておらず、多くが設計者の判断に委ねられている。一方で根拠となる実験に乏しいのが現状である。この結果、パイルキャップは大断面化しており安全性には優れていると思われる一方で不経済とも考えられる。

既報⁴⁾⁵⁾では二本群杭におけるパイルキャップの鉛直載荷実験結果について報告した。本研究では、一本の単杭を用いた実際の建物の柱、基礎梁、杭、パイルキャップを縮小した試験体で載荷実験を行い、パイルキャップとその周辺架構の応力伝達メカニズム等を明らかにし、設計に必要な基礎データを得ることを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1に試験体諸元、図-1に試験体概要、表-2にコンクリートの力学的性状、表-3に鋼材の力学的性状を示す。試験体は6~10層程度の中層の実在建物の基礎構造に関して事前分析を行い、その傾向を基にして試験体の各部材の大きさを設定した。試験体は3体製作し、パイル

キャップとその周囲に取り付いている杭・基礎梁・柱から構成された十字型の部分架構とし、実在建物の約1/4縮小モデルとした。試験体のパラメータは、

- ① パイルキャップの幅とせいの寸法
- ② 導入軸力

の二種類とした。パイルキャップの寸法は、2タイプとし、実物件のボリュームを想定した「標準型」タイプが2体と柱せい寸法までスケールダウンした「縮小型」タイプが1体の合計3体とした。また軸力を導入した試験体は柱の短期軸力を想定して軸力比0.32で導入を行った。なお、試験体名は「RC-(軸力比)-(パイルキャップ幅せい寸法)」とする。

表-1 試験体諸元

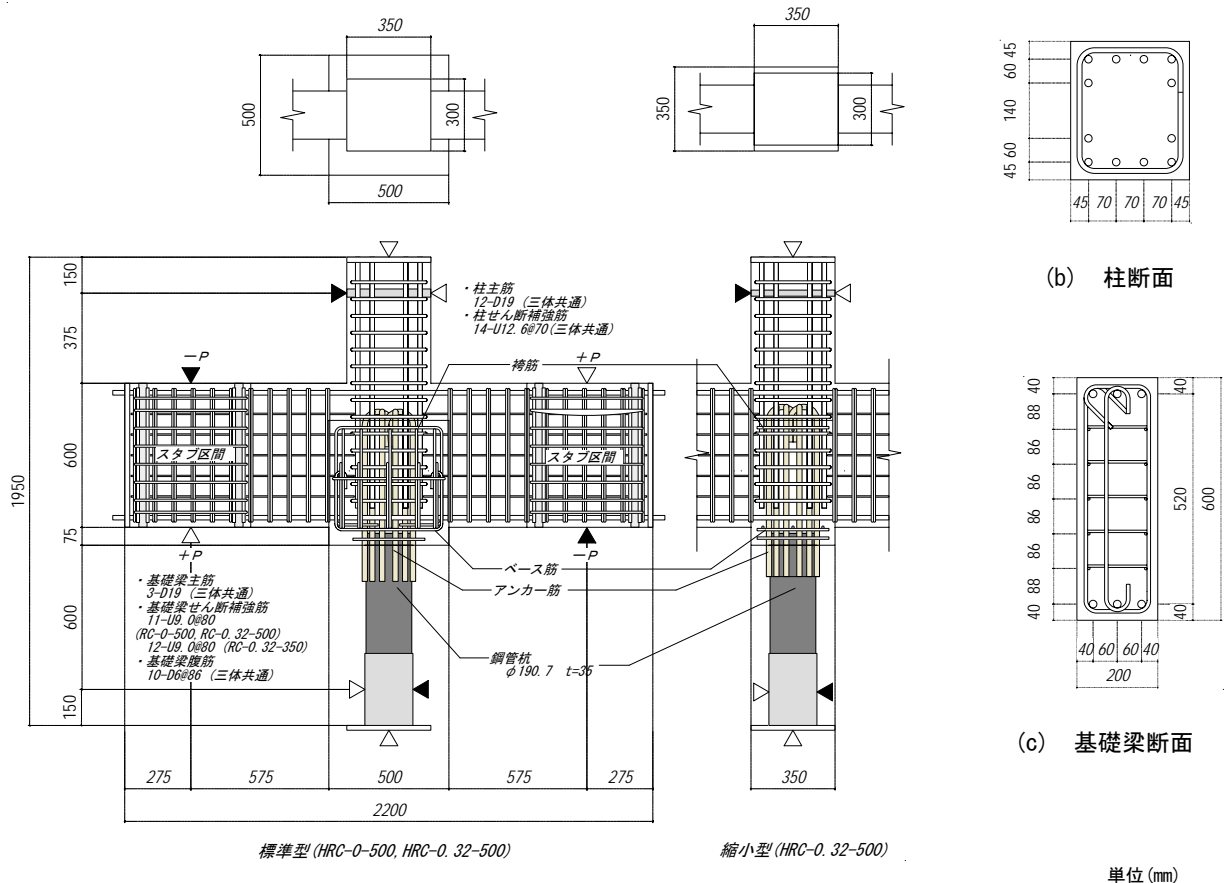
| | RC-0-500 | RC-0.32-500 | RC-0.32-350 |
|----------------------|--|-------------|--------------------------------------|
| | 標準型 | | 縮小型 |
| 試験体図 | | | |
| 軸力比 | 0 | 0.32 | |
| パイルキャップ (幅×せい×高さ) | 500×500×520 | | 350×350×520 |
| 柱 b×D= | 主筋 : 12-D19(USD685) pt=1.88(%) せん断補強筋 : U12.6@70 pw=1.19(%) | | |
| 基礎梁 b×D= | 主筋 : 上下3-D19(USD685) pt=0.74(%) せん断補強筋 : U9.0@80 pw=1.2(%) 腹筋 : 10-D6@86 | | |
| パイルキャップ | ベース筋 : 5-D10 袴筋 : 5-D10 せん断補強筋 : 1-D10 | | ベース筋 : 3-D10 袴筋 : 3-D10 *ともに直筋 |
| | *幅方向、せい方向とも同一本数 | | |
| 杭 | 鋼管 : φ190.7 t=35 アンカー筋 : 12-D22(USD685) | | |

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部建築学科 准教授・工博 (正会員)

*3 ジャパンパイル株式会社

*4 東京工業大学 セキュアマテリアル研究センター 教授・工博 (正会員)



(a) 試験体配筋

表-2 コンクリートの力学的性状

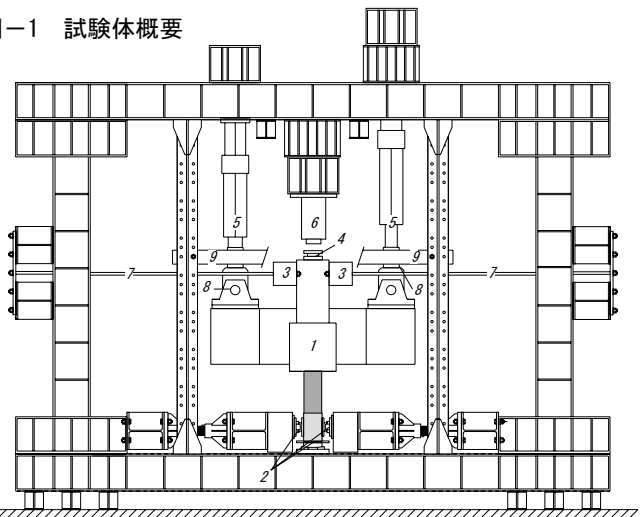
| コンクリート | 圧縮強度 | 割裂強度 | ヤング係数 |
|--------|-------------------|-------------------|------------------------------------|
| | N/mm ² | N/mm ² | ×10 ⁴ N/mm ² |
| | 30.2 | 2.8 | 2.39 |

表-3 鋼材の力学的性状

| 鋼材 | 使用箇所 | 降伏応力度 | 最大応力度 | ヤング係数 |
|--------------|---------|-------------------|-------------------|------------------------------------|
| | | N/mm ² | N/mm ² | ×10 ⁴ N/mm ² |
| D6 (SD295A) | 梁腹筋 | 334 | 480 | 1.89 |
| D10 (SD295A) | パイルキャップ | 340 | 466 | 1.87 |
| D19 (USD685) | 柱、梁主筋 | 697 | - | 1.85 |
| D22 (USD685) | 杭アンカー筋 | 694 | - | 1.82 |
| φ9.0 | 梁せん断補強筋 | 1407 | 1470 | 1.89 |
| φ12.6 | 柱せん断補強筋 | 1413 | 1467 | 2.01 |
| STKM13A-SH | 鋼管杭 | 423 | 508 | - |

*鋼管杭の力学的性状はミルシートによる

図-1 試験体概要



1. 試験体、2. かまぼこ支承、3. 柱固定用治具、4. 球座、5. 100tf油圧ジャッキ
6. 200tf油圧ジャッキ、7. PC鋼棒、8. ロードセル、9. 面外拘束チャンネル

図-2 荷装置

柱および基礎梁の断面は全試験体とも共通である。柱断面は300mm×350mmで主筋にはD19(USD685)を12本用いた。基礎梁断面は200mm×600mmで主筋には上端・下端ともD19(USD685)を各3本用い、組み立て筋としてD6(SD295A)の腹筋を10本配筋している。パイルキャップ内部の補強筋はD10(SD295A)鉄筋を用い、「RC-0-500」及び「RC-0.32-500」試験体は褥筋、ベース筋、せん断補

強筋を配筋して実物件におけるパイルキャップを再現した。なお、「RC-0.32-350」試験体は配筋スペースの都合上、褥筋とベース筋は直筋で配筋を行った。杭は厚肉(t=35mm)の鋼管を用い、パイルキャップへ50mm埋め込み定着させるとともにアンカー筋12本を用いて定着させた。また鋼管杭内部にはコンクリート打設前にグラ

ウトを充填した。コンクリートは設計基準強度 27N/mm^2 とし、すべての試験体、全部材共通とした。

本実験ではパイルキャップの破壊性状を把握するため、通常よりもパイルキャップ周辺部材の耐力を上げて設計を行っている。この結果、標準型の「RC-0-500」及び「RC-0.32-500」は鋼管杭の杭頭のアンカー筋の降伏で試験体の耐力が決定する。

2.3 加力方法

載荷装置図を図-2 に示す。試験体は全ての支点をピン機構で構成するように固定を行った。杭の下端はかまぼこ支承で支持した。柱の上端は PC 鋼棒を用いて反力フレームと緊結することによって所定の位置に固定した。また、柱頭部に取り付けた試験体の固定治具を柱から伸ばしたチャンネルを用いて面外方向変形を拘束した。

鉛直方向加力は 200kN 油圧ジャッキを用い、球座を介して試験体にコンクリートの圧縮強度の 0.32 に相当する軸力を導入した。水平方向加力は、左右の梁端に 1000kN 油圧ジャッキを鉛直に取り付け左右の基礎梁にそれぞれ逆向きの力で正負繰り返し載荷を行った。載荷スケジュールは荷重 $Q=50\text{kN}$ で一回、 100kN 以降は 100kN 刻みで加力を行い、各 2 回ずつ繰り返した。ただし、繰り返し時及び負側の載荷は各サイクルの一回目のピーク時の変位により制御する変位制御とした。いずれの試験体も最大耐力を迎えた時点で載荷を終了した。

2.4 計測方法

基礎梁端部から試験体に導入した荷重の計測は左右の油圧ジャッキの先端に取り付けたロードセルを用いて行った。加力点における鉛直点位置および接合部せん断変形は、試験体の上下反曲点高さに埋め込んだインサートを支点として取り付けた変位測定用治具からの変位を用いて求めた。ここで、変位測定用の治具は柱および杭の変形に追従できるように上部の反曲点はピン、下部の反曲点は鉛直方向に対して移動可能なピンローラーとなるように取り付けた。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況概要

図-3 に最大変形時におけるひび割れ発生状況を示す。試験体に生じたひび割れは観測面である前面の破壊状況を中心に記録した。すべての試験体において基礎梁の曲げひび割れ発生後、せん断ひび割れ、柱およびパイルキャップに斜め方向にひび割れが発生した後に最大耐力に至った。載荷荷重が増加するに従って基礎梁とパイルキャップの危険断面には両部材の逆方向の変形に伴い、ねじれせん断によるひび割れが入った。「RC-0-500」及び「RC-0.32-500」は変位の増大に伴ってパイルキャッ

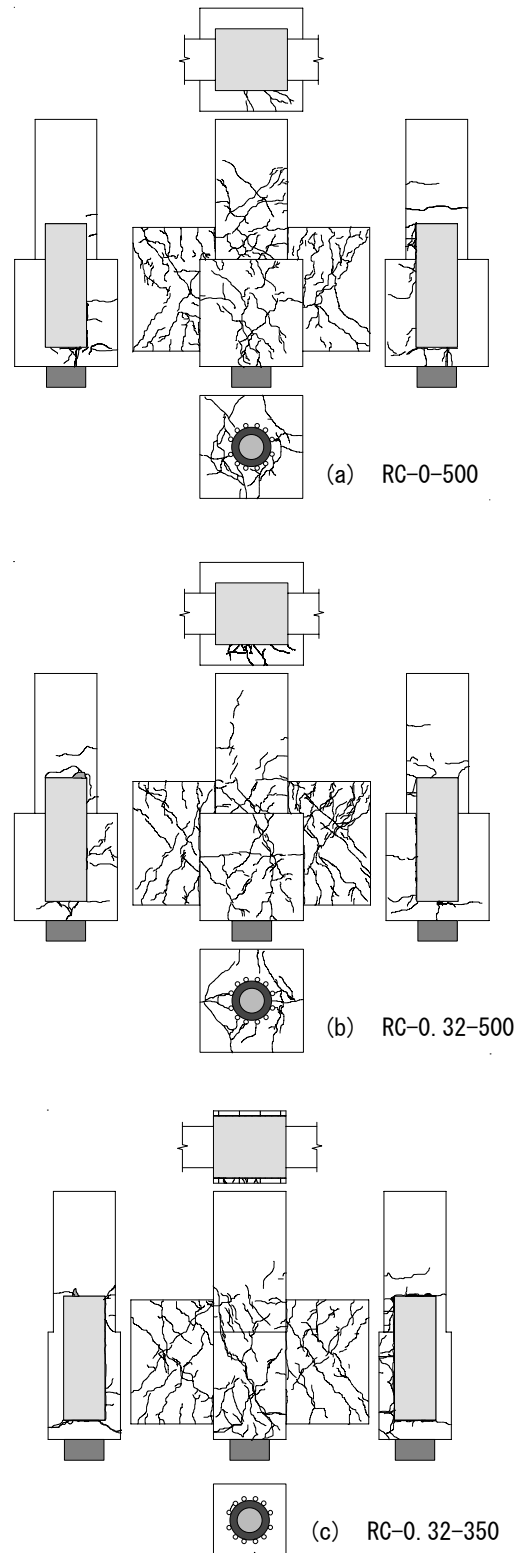


図-3 最終破壊状況

プ底部の杭頭周囲には抜け出しによるひび割れが入った。上記の2体はパイルキャップが柱の断面よりも大きく面外に広がっている。このため、柱の下端の危険断面に生じたひび割れは、すぐにパイルキャップ表面に発生

することはなく、荷重の増加に伴って柱端のほぼ同じ位置からひび割れが入った。これらのひび割れは除荷すると閉じた。しかし、パイルキャップ内の補強筋には除荷した場合でも、引張りひずみが残留した。「RC-0.32-350」試験体は、パイルキャップ底部の杭頭付近のコンクリートにひび割れや抜け出しなどの損傷は殆ど生じず、パイルキャップに発生したせん断ひび割れが次第に大きくなり最大耐力時に達した。また、主要なひび割れは、パイルキャップ下端の基礎梁主筋位置から柱と基礎梁の上端危険断面に向けてパイルキャップを横切るように発生した。

表-4 に各試験体の損傷発生時における層せん断力、層間変形角の値を示す。ひび割れ発生荷重は目視によりひび割れが入ったことを確認し、その時の荷重、変形角をとった。

3.2 層せん断力-層間変形角関係

図-4 に層せん断力 Q -層間変形角 R の関係を示す。層せん断力はロードセルで測定した左右の基礎梁の荷重を平均したものとし、層間変形角は基礎梁の両側の鉛直方向変位を加力点間の距離で除した値とした。各試験体とも Q - R 曲線の形状は紡錘形であった。「RC-0-500」及び「RC-0.32-500」試験体は杭頭のアンカー筋が降伏後に荷重の上昇は緩やかになり、その後は杭の抜け出しが増加したため変位のみが増大した。軸力を導入した「RC-0.32-500」は軸力を導入していない「RC-0-500」よりも1割程度耐力が上昇した。標準型の2体については耐力が上昇しないことを確認した時点で除荷した。「RC-0.32-350」試験体は杭のアンカー筋が降伏する直前にパイルキャップのせん断ひび割れが拡大したことにより耐力が決定し、それ以降は耐力が上昇しなかったため除荷を行った。

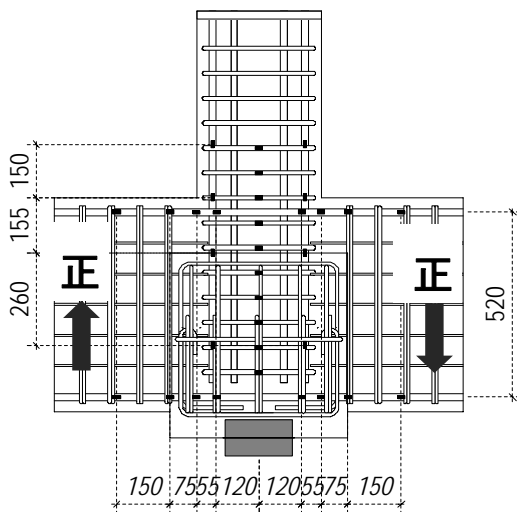


図-5 ひずみゲージ位置 単位 (mm)

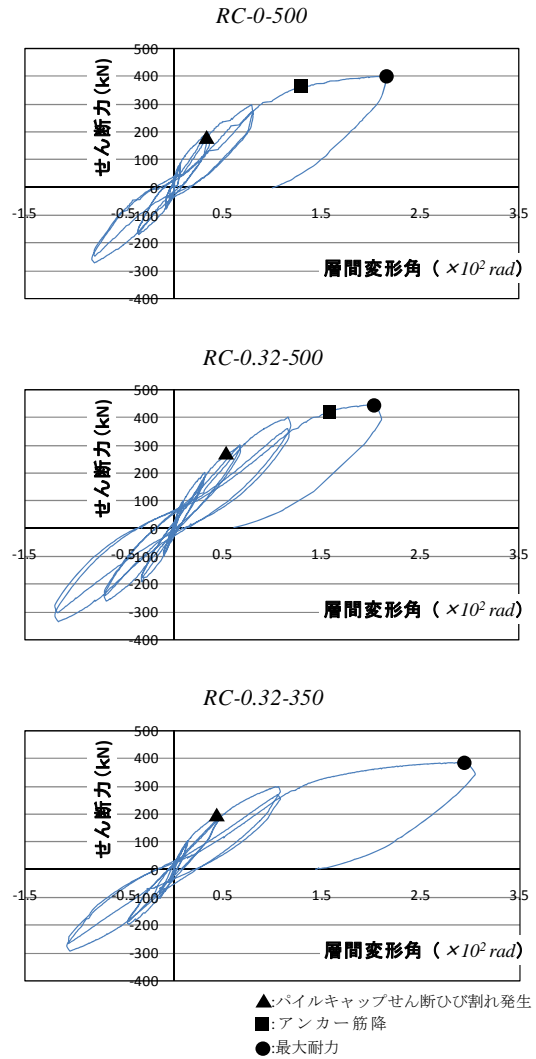


図-4 各試験体の層せん断力-層間変形角関係

表-4 実験結果一覧

| | RC-0-500 | | RC-0.32-500 | | RC-0.32-350 | |
|----------------|----------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| | Q | R | Q | R | Q | R |
| | [kN] | [$\times 10^{-2}$ rad] | [kN] | [$\times 10^{-2}$ rad] | [kN] | [$\times 10^{-2}$ rad] |
| 基礎梁曲げひび割れ発生 | 84.6 | 0.07 | 92.0 | 0.08 | 75.0 | 0.1 |
| パイルキャップせん断ひび割れ | 188.5 | 0.32 | 276.1 | 0.58 | 196.0 | 0.46 |
| アンカー降伏 | 342.0 | 1.15 | 421.5 | 1.58 | - | - |
| 最大耐力 | 399.6 | 2.15 | 445.7 | 2.04 | 387.2 | 2.96 |

3.3 ひずみ分布

図-5 に柱、基礎梁に貼ったひずみゲージの位置を示す。ゲージの位置は各部材の危険断面位置を中心に貼付した。ひずみは図面上で前面と背面の同一位置にある鉄筋に貼ったひずみゲージの値を平均した。図-5 では標準型の試験体を示しているが、縮小型も同一位置へゲージを貼った。以下、各サイクルのピーク時と最大耐力時におけるひずみ性状について示す。また、図ではパイルキャップおよび基礎梁の各部材の上端位置を示した。

(1) 柱主筋ひずみ

図-6 に正方向載荷時における柱主筋のひずみを示す。ゲージの位置はパイルキャップの中心を原点とし、原点からゲージまでの距離を示している。右側主筋はすべてのゲージが引っ張り方向にひずみを生じていた。全試験体とも基礎梁面(415mm)が危険断面となっている。いずれも危険断面位置でひずみが最大となり、上下の補強筋のひずみは距離が離れるにつれて減少している。一方で左側の主筋は、パイルキャップ面(280mm)が危険断面位置となり、危険断面よりも上部が圧縮側、下部が引っ張り側となった。本来は正方向載荷時には圧縮側であるが、このように下部で引っ張りに側に作用したのは、引っ張り力の作用するアンカー筋の応力が、コンクリートの付着を通じて横に配筋された柱主筋へと伝達されたためと考えられる。なお、負方向載荷時も圧縮側鉄筋では同様の挙動が見られた。

(2) 柱せん断補強筋

図-7 に正側加力時における柱のせん断補強筋のうち下端から10段目までの補強筋のひずみを示す。

図において縦軸は最下段の補強筋位置を原点とし、その位置から各補強筋の位置を高さを示している。ひずみ測定の結果、降伏したものはなかった。すべての試験体においてパイルキャップの中心位置でひずみが最大となり、この補強筋を中心に上下段の補強筋は距離が離れるほどひずみは単調に減少している。RC-0.32-350 試験体は最大耐力時、下部で大幅にひずみが増加している。これは最大耐力時にパイルキャップに入ったせん断ひび割れが大きく開いたためである。

試験体は、パイルキャップが柱の断面よりも面外に出ているが、そのことによる影響は柱のせん断補強筋の性状からは見られなかった。なお、負方向載荷時も正方向載荷時と同様の傾向が見られた。

(3) 基礎梁主筋ひずみ

図-8 に正方向加力時における基礎梁の上段、下段の主筋のひずみと試験体の中心からゲージ位置までの距離を示す。上端筋はパイルキャップよりも上側にあり、パイルキャップ部材が基礎梁主筋のひずみに及ぼす影響は少ないと思われる。柱、梁接合部では上段筋と同じ

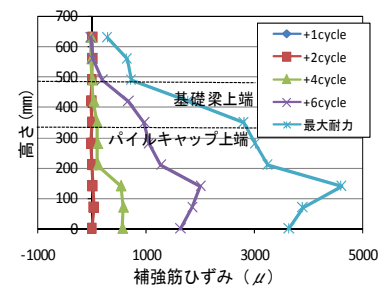
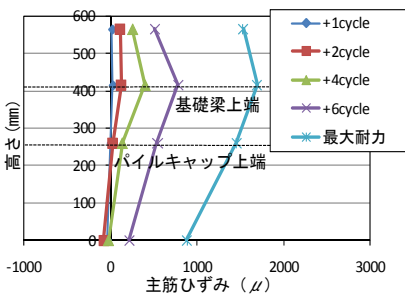
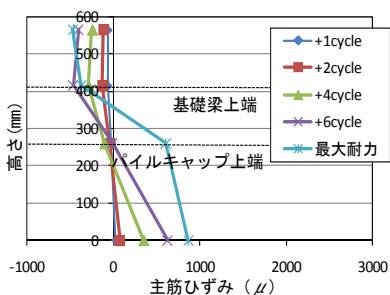
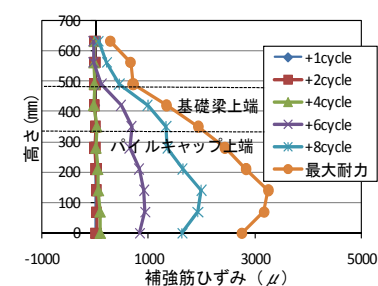
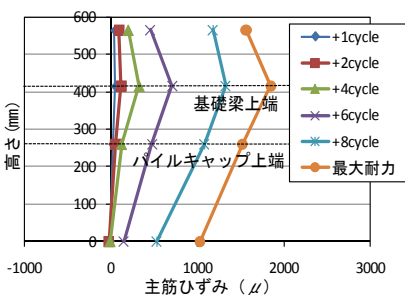
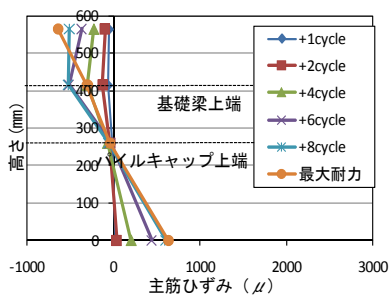
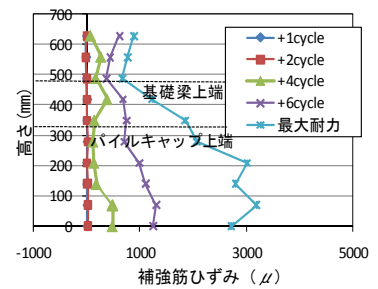
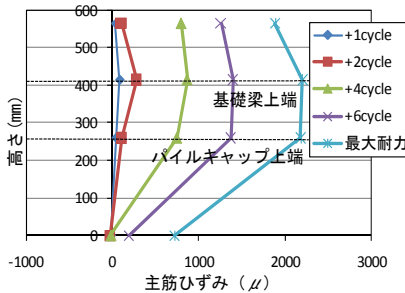
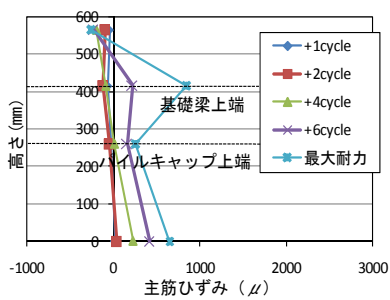


図-6 柱主筋ひずみ性状

図-7 柱せん断補強筋ひずみ性状

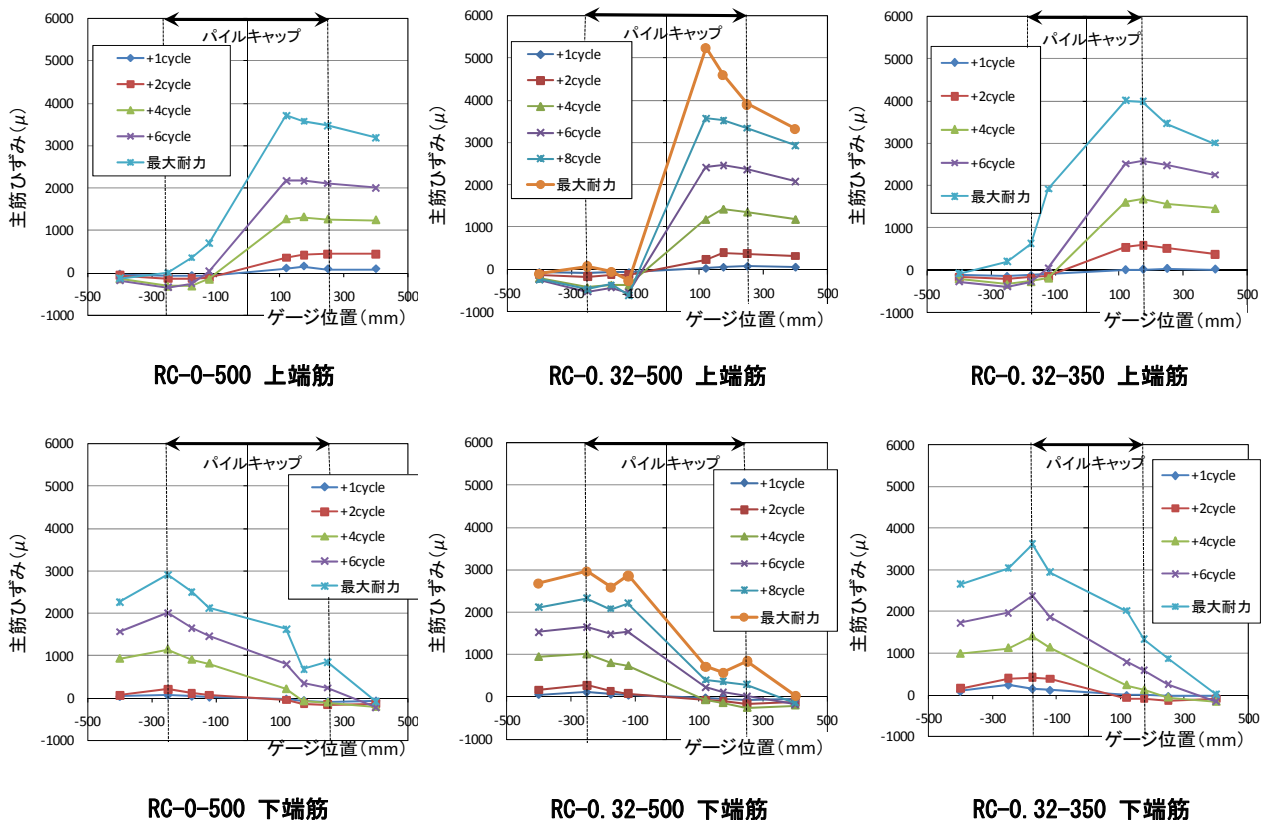


図-8 基礎梁主筋ひずみ性状

性状が下端筋でも見られ⁶⁾、本実験ではRC-0.32-350試験体がそれに当てはまる。一方で標準型の2体の下端筋の性状は左右の梁ともにパイルキャップ端部でひずみが最大となり、パイルキャップの内部域ではひずみ勾配は緩やかであった。これは、パイルキャップ内は各種の補強筋が非常に密に配筋されており、パイルキャップとその内部の鉄筋が一体的に変形していたためと思われる。軸力を導入した試験体ではその傾向が顕著に表れた。

4.まとめ

実建物のパイルキャップとその周辺部材を縮小化した試験体の載荷実験に関して結果報告を行った。パイルキャップを小さくすることでパイルキャップのせん断ひび割れ発生荷重は3割程度低い結果となり現状でのボリュームが耐震性能にも優れていると思われる。しかし、補強方法によってはボリュームを抑えることも可能と思われる。パイルキャップの研究は非常に少ないため今後はさらに実験データの蓄積が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり株式会社大林組の久保田篤史氏の御協力を頂きましたことに深く感謝いたします。また、高周波熱錬株式会社、東京鉄鋼株式会社に鋼材の提供をしていただきました。本研究は応用セラミックス研

究所の共同利用研究として行われたものです。

参考文献

- 1) 小林勝巳ほか：水平力を受ける場所打ち杭—基礎梁部分架構の力学的特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第509号，pp.83-90，1998.7
- 2) 小林勝巳ほか：側柱下の場所打ち杭—基礎梁部分架構の耐震性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第520号，pp.61-68，1999.6
- 3) 小林勝巳：場所打ち杭を用いた杭基礎構造の耐震性向上に関する研究，博士論文，2000.3
- 4) 酒井 慎二ほか：2本群杭で支持されたパイルキャップの鉛直載荷に対する耐震性能評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.3，pp.415-420，2007
- 5) 田中佑二郎ほか：2本群杭で支持されたパイルキャップの鉛直載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.427-428，2006.9
- 6) 柏原慎吾ほか：鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の破壊性状への接合部アスペクト比の影響（その2 破壊性状），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.477-478，2003.9
- 7) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性性能保証型耐震設計指針・同解説