

既製杭を使用した中柱におけるパイルキャップの耐震性能評価 に関する実験

SEISMIC RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE INTERIOR PILE CAP USING PRECAST PILE

岸田 慎司*, 久保田 篤史**, 石川 一真***, 酒井 慎二****
小林 恒一*****, 林 静雄*****

*Shinji KISHIDA, Atsusi KUBOTA, Kazuma ISHIKAWA,
Shinji SAKAI, Koichi KOBAYASHI and Shizuo HAYASHI*

The pile cap is the very important member connected with column, footing beams and pile. As vertical members, there are two kinds of member, column and pile, in a pile cap. So, the seismic behavior of pile cap is much complicated than the beam column joint. The experiments on the reinforced concrete interior pile cap which were composed of one column, two footing beams and one pile were carried out under cyclic loadings.

In this paper, the effects of the axial force of column and the volume of pile cap on the seismic behavior, e.g., the process of damages, failure mechanism and the ultimate strength of pile cap, are described.

Keywords : *pile cap, footing beams, pile seismic performance, joint, shear deformation*

パイルキャップ, 基礎梁, 杭, 耐震性能, 接合部, せん断変形

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材である。特に、地震時には内部に複雑な応力が発生する。しかしながら通常、基礎構造は地震で損傷を生じても、掘削しなければその状況を確認することが難しいことなどから、地震時の挙動は明らかではない。現在、パイルキャップについては、上部構造のように多くの研究が行われておらず、根拠となる実験に乏しく、応力伝達メカニズムなど不明確な点が多い。そのため、パイルキャップの設計は、設計者の判断に委ねられるところが多く、建物が高層化し、上部構造は合理的な損傷評価設計を指向しているにもかかわらず、パイルキャップに対しては、内部の各種補強筋の効果についても考慮されないなど、合理的な評価は行われなまま構造規定に基づいて行われているのが現状である¹⁾。

パイルキャップの力学的性能や配筋方法に関する研究は、鉛直支持性能に関するものが多く、田邊ら²⁾、鈴木³⁾、及び、酒井ら⁴⁾の一連の研究がある。いずれも引張りあるいは圧縮力のみを受けたときの性能を調べるもので、地震時性能としては、小林ら⁵⁾の研究があるに過ぎないが、パイルキャップの終局強度や変形状には言及していない。

筆者らは、単杭を用いた柱、基礎梁、杭、パイルキャップを縮小した部分架構試験体の載荷実験を行い、報告⁶⁾した。本研究は、中

柱脚部におけるパイルキャップの地震時挙動をより詳しく報告するものであり、パイルキャップの合理的な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

試験体諸元を表1に、試験体概要を図1に、コンクリートの力学的性能を表2に、鋼材の力学的性能を表3に示す。まず、高支持力の既製杭を使用した、6~10層の建物の基礎構造に関して分析を行い、その結果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、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形の部分架構とし、実大建物の約1/4縮小モデルとした。

試験体は3体とし、そのパラメータは、「パイルキャップのせいと幅」と「柱軸力」の2種類とした。

パイルキャップは、幅とせいが同寸法の正方形断面とし、実物件のボリュームを想定した「標準型」タイプを2体と柱せいと同寸法までスケールダウンした「縮小型」タイプを1体とした。

また「標準型」1体と「縮小型」には軸力を導入した。試験体名は「RC-(軸力比)-(パイルキャップ幅せい寸法)」としている。

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、

* 芝浦工業大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)

** 榊大林組本店 工修

*** ジャパンパイル(株)技術本部

**** 芝浦工業大学大学院工学研究科建設工学専攻
大学院生

***** 独立行政法人原子力安全基盤機構耐震安全部
上席研究員

***** 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

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology, Dr. Eng.

Osaka Main Office, OBAYASHI Corporation, M. Eng.

Engineering Division, JAPAN PILE Corporation

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology

Senior Researcher, Seismic Safety Division, Japan Nuclear Energy Safety Organization

Prof., Secure Material Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

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)を用い、

表 1 試験体諸元

試験体図	RC-0-500	RC-0.32-500	RC-0.32-350
	標準型		縮小型
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 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 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		

「RC-0-500」及び「RC-0.32-500」は袴筋、ベース筋、せん断補強筋を配筋して建物におけるパイルキャップをモデル化した。なお、「RC-0.32-350」は配筋スペースの都合上、袴筋とベース筋は直筋で配筋した。

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 D22 (USD685) 12 本を用い、定着長さは 180 度フック 567mmとした。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/mm²とした。打設は縦打ちとし、全部材、すべての試験体共通とした。

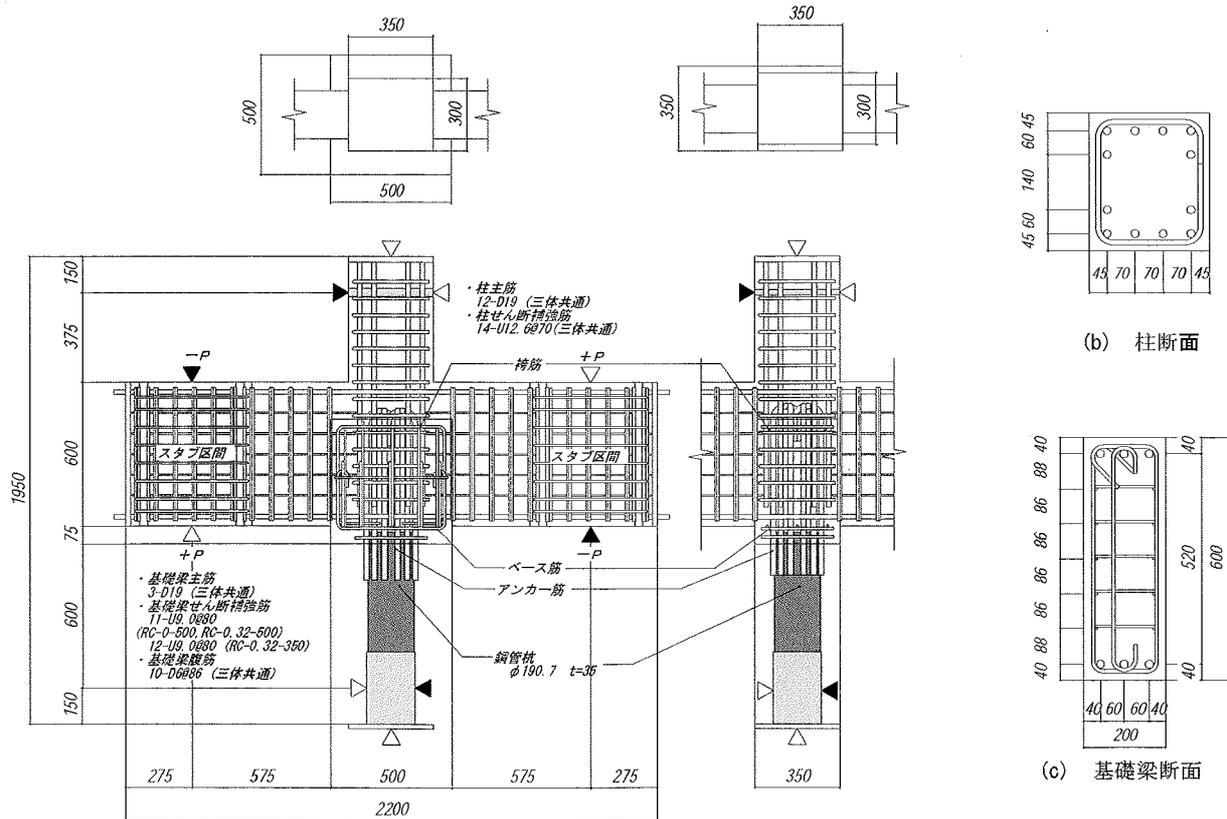
表 2 コンクリートの力学的性能

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 鋼材の力学的性能

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	
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
U9.0	梁せん断補強筋	1407	1470	1.89
U12.6	柱せん断補強筋	1413	1467	2.01
STRM13A-S	鋼管杭	423	508	-

*鋼管杭の力学的性状はミルシートによる



標準型 (RC-0-500, RC-0.32-500)

縮小型 (RC-0.32-350)

(a) 試験体配筋

単位 (mm)

図 1 試験体概要

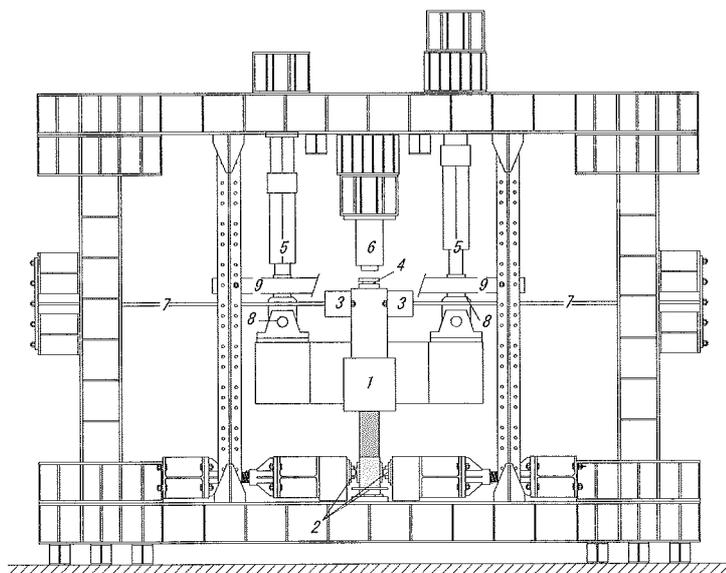
本実験ではパイルキャップの破壊性状を把握することを目的としているため、通常よりもパイルキャップ周辺部材の耐力を上げた。そのために、杭には厚肉の鋼管を用い、アンカー筋には高強度鉄筋を使用したため、アンカー筋の定着端が、パイルキャップから飛び出している。実験での破壊形式は、結果として、標準型の「RC-0.500」及び「RC-0.32-500」は鋼管杭の杭頭のアンカー筋の降伏、縮小型の「RC-0.32-350」はパイルキャップのせん断破壊となった。

2.2 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支持させた。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で支持させた。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2000kN油圧ジャッキを用い、球座を介して柱にコンクリートの圧縮強度の0.32倍の軸方向応力度を導入した。

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、左右の基礎梁端の鉛直変形がそれぞれ逆向きに等しくなるよう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1回、100kN以降は100kN刻みで加力を行い、各2回ずつ繰り返した。1回目正載荷時の荷重の除荷点は荷重制御とし、1回目負荷重以降の繰り返し制御は1回目正荷重時の変位で繰り返し制御を行った。



1. 試験体, 2. かまぼこ支承, 3. 柱固定用ジグ, 4. 球座, 5. 1000kN 油圧ジャッキ, 6. 2000kN 油圧ジャッキ, 7. PC 鋼棒, 8. 面外拘束ジグ

図2 載荷装置

2.3 計測方法

荷重は左右基礎梁端部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計測した。加力点における鉛直変位およびパイルキャップのせん断変形は、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られ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られた。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況概要

最大変形時におけるひび割れ発生状況を図3に示す。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

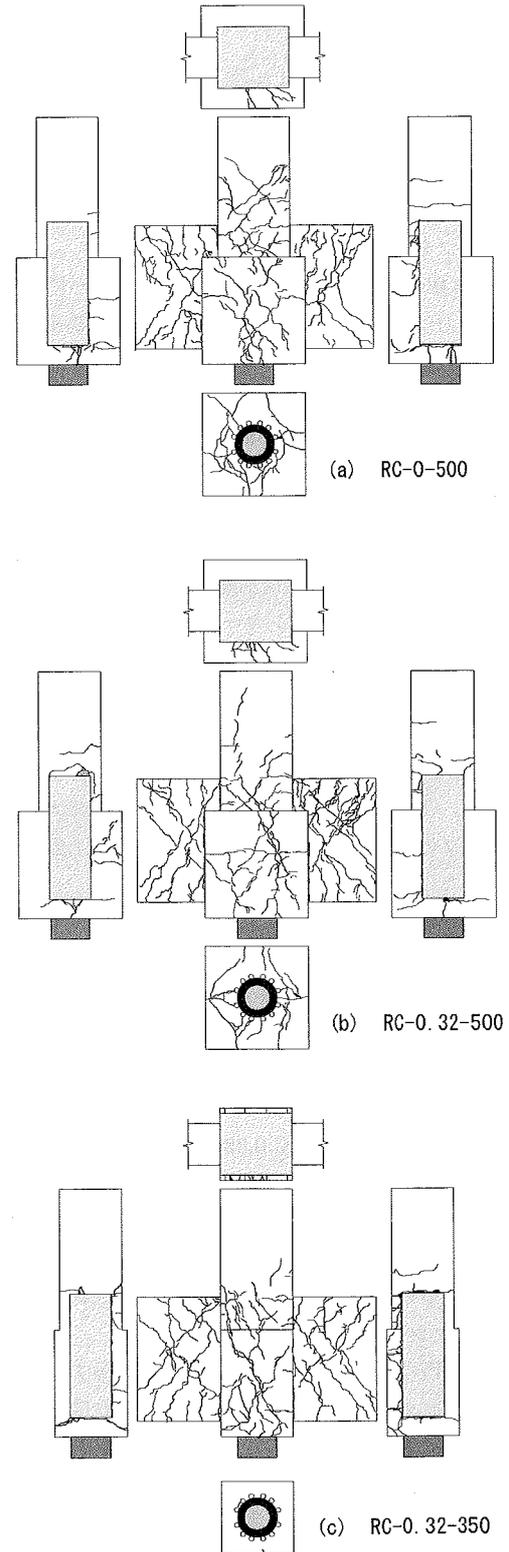


図3 最終破壊状況

後に最大耐力に至った。「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広がることはなく、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」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に達した。主たるひび割れは、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。

本実験では柱の支点間距離と梁の加力点間距離が同じであるので、層せん断力は、ロードセルで測定した左右の基礎梁のせん断力を平均したものとなる。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。

各試験体の損傷発生時における層せん断力、層間変形角の値を表4に示す。ひび割れ発生荷重は目視により確認した。

3.2 層せん断力-層間変形角関係

層せん断力-層間変形角の関係を図4に示す。各試験体とも層せん断力-層間変形角曲線の形状は紡錘形であった。「RC-0-500」及び「RC-0.32-500」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て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1割程度耐力が上昇した。標準型の2体についてはアンカー筋が降伏し、その後耐力が上昇しないことを確認したうえで除荷した。「RC-0.32-350」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、耐力が上昇しなくなったため除荷した。

3.3 基礎梁主筋のひずみ分布

正方向加力時における基礎梁の上段および下段の主筋のひずみ分布を図5に示す。上端筋はパイルキャップよりも上側にあるので、柱面位置でのひずみが最大となっている。標準型で柱軸力のない「RC-0-500」とパイルキャップせいの小さい「RC-0.32-350」では、接合部内で、主筋の付着劣化が生じ、圧縮域でのひずみがやや引張ひずみになっており、特に「RC-0.32-350」の場合にその傾向が著しい。下端筋では、いずれも、引張ひずみはパイルキャップ端部で最大となっている。接合部での付着劣化は上端筋よりもやや大きくなっている。パイルキャップせいが柱と同じ「RC-0.32-350」では、上部構造における柱梁接合部の梁主筋とほぼ同じ性状を示している。

3.4 パイルキャップのせん断強度とせん断変形

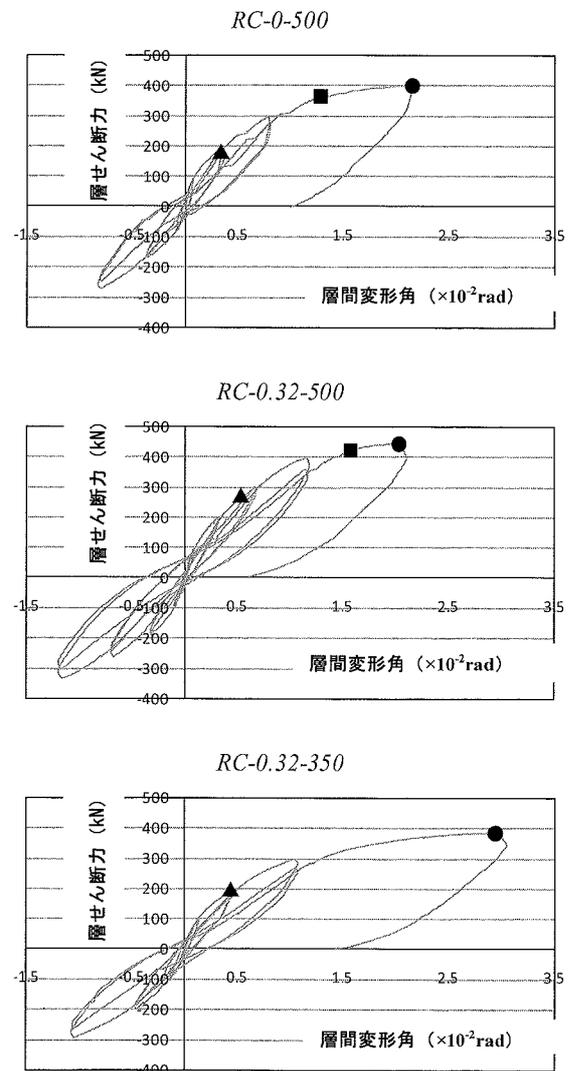
パイルキャップ内のはかま筋ひずみ分布を図6に示す。基礎梁中央およびパイルキャップ中心位置のはかま筋のひずみはパイルキャップコーナーのはかま筋に比べて大きい。梁や柱からの応力がパイルキャップに徐々に広がりながら伝達していくので、パイルキャップ全断面が有効にはならない。上部構造の十字形柱梁接合部においては、接合部としての有効な幅は柱幅と梁幅の平均とし、有効なせいは柱せいとするのが一般的である。

パイルキャップでは、基礎梁の降伏断面が柱面とパイルキャップ面と左右で異なり、基礎梁のせん断力も異なることになるが、ここでは、左右を平均して、1本の鉛直材と基礎梁からなる構造と簡略化して検討を行う。さらに、鉛直材として、柱、パイルキャップ、杭があり、それぞれ、幅とせいが異なっているので、仮想鉛直材を表5に示すように、4通りの考え方に基づいて、パイルキャップのせん断応力度実験値を計算し、式(2)と式(3)の計算値と比較する。

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	$\times 10^2 \text{rad}$	kN	$\times 10^2 \text{rad}$	kN	$\times 10^2 \text{rad}$
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
アンカー筋降伏	342.0	1.15	421.5	1.58	-	-
最大耐力	399.6	2.15	445.7	2.04	387.2	2.96

Q：層せん断力，R：層間変形角



●：最大耐力，■：杭アンカー筋降伏
▲：パイルキャップせん断ひび割れ発生

図4 各試験体の層せん断力-層間変形角関係

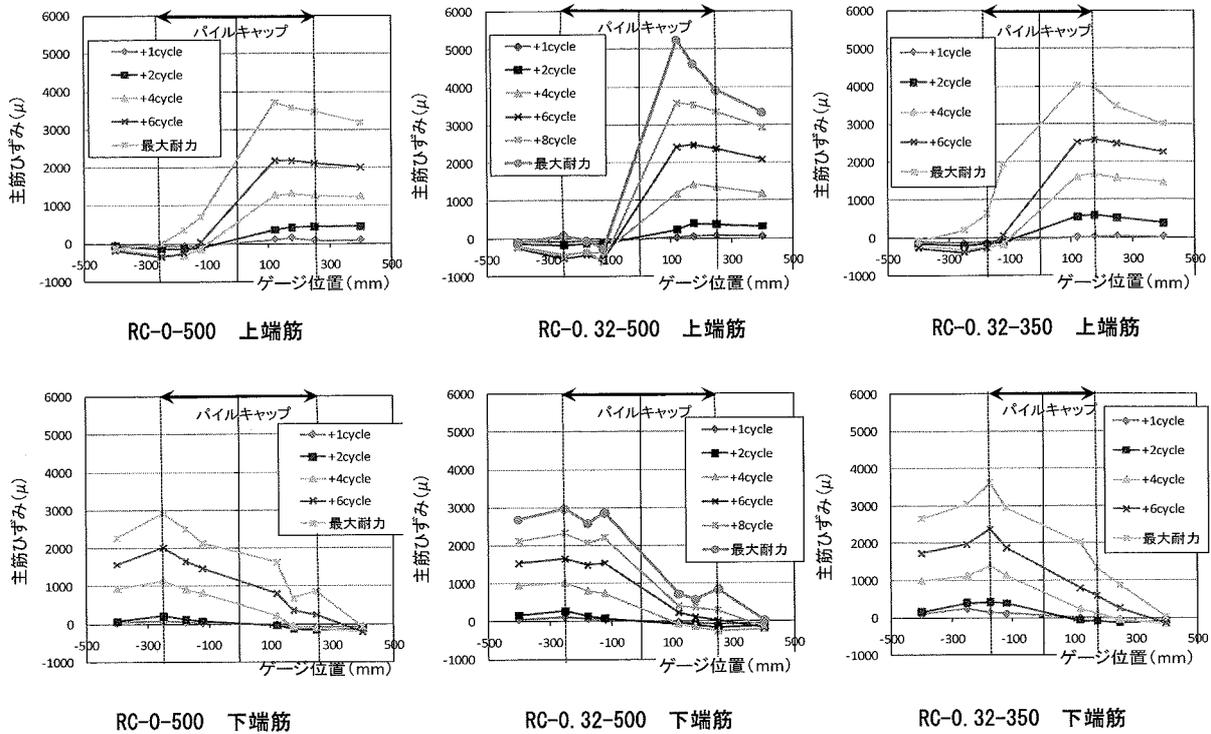


図5 基礎梁主筋ひずみ性状

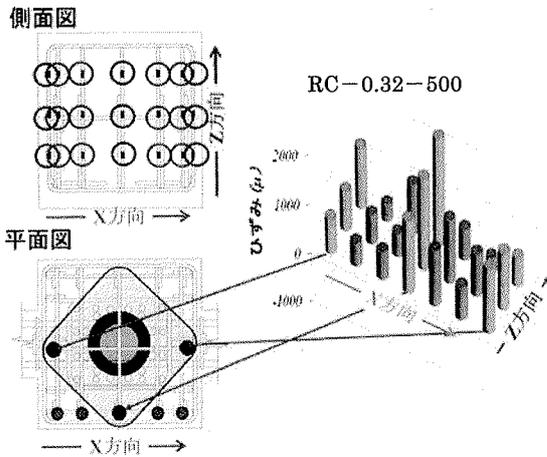


図6 パイルキャップはかま筋のひずみ分布

表5 仮想鉛直部材断面の設定

	仮想鉛直部材断面の考え方	標準型(mm)		縮小型(mm)	
		幅	せい	幅	せい
C-1	柱	250	350	250	350
C-2	柱とパイルキャップの平均	300	425	263	350
C-3	パイルキャップ	350	500	275	350
C-4	柱, パイルキャップ, 杭の平均	290	396	265	346

$$V_{\text{exp}} = \frac{M_1 + M_2}{j} - V_c \quad \dots\dots(1)$$

$$\tau_{\text{exp}} = \frac{V_{\text{exp}}}{b_j \cdot D_j}$$

水平材は基礎梁とするので、パイルキャップのせん断応力 (τ_{exp}) は、表5に示す仮想鉛直材と基礎梁からなる十字形接合部として式(1)で計算する。

ここで、 M_1 、 M_2 は仮想鉛直部材端位置での基礎梁の曲げモーメント、 j は基礎梁の応力中心間長さ ($7d/8$ とする)、 V_c は柱のせん断力、 b_j は仮想鉛直部材幅と基礎梁幅の平均、 D_j は仮想鉛直部材せいである。また、 D_j が異なると、梁端加力点位置から仮想鉛直部材端までの距離も異なることに注意が必要である。

せん断ひび割れ強度計算値は、弾性理論に基づき式(2)で、終局強度は靱性保証指針⁷⁾に基づいて式(3)で計算した。

$$\tau_{\text{cal}} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T \cdot \sigma_0} \quad \dots\dots(2)$$

$$\sigma_T = 0.33 \times \sqrt{\sigma_B}$$

$$\tau_{\text{max cal}} = 0.8 \cdot \phi \cdot \sigma_B^{0.7} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 σ_B はコンクリート圧縮強度、 σ_0 は、柱軸力を仮想鉛直部材の断面で除した値、 ϕ は直交梁の拘束なし (0.85) である。

パイルキャップのせん断ひび割れ強度の実験値と計算値の比較を図7に示す。縮小型の場合、柱せいとパイルキャップせいを同じにしたので、どの場合でも計算値はほぼ同じ値となった。標準型の場合もあわせて考えると、仮想鉛直部材は、柱とパイルキャップの平均 (C-2)、あるいは、杭、柱及びパイルキャップの平均 (C-4) とするのが良い。

最大せん断強度実験値と終局強度計算値の比較を図8に示す。この場合、仮想鉛直部材を柱単体 (C-1) としたほうが良いようであるが、標準型の2体は、杭の曲げ降伏で最大強度が決まっております。

パイルキャップはせん断破壊を起こしていないことを考えると、せん断終局強度を計算する場合も、ひび割れ強度の計算と同様に、仮想鉛直部材は、柱とパイルキャップの平均(C-2)、あるいは、杭、柱及びパイルキャップの平均(C-4)とするほうが適用性が良いと考える。

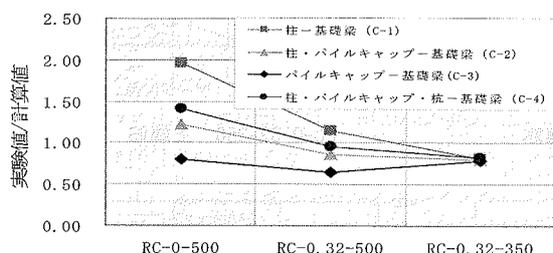


図7 せん断ひび割れ強度の実験値との比較

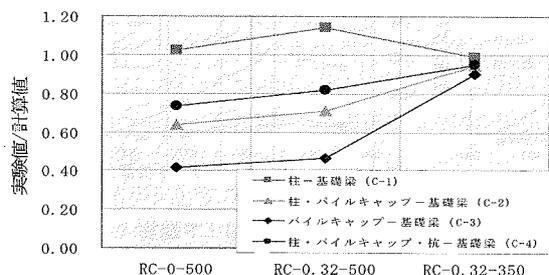


図8 せん断最大強度の実験値との比較

仮想鉛直部材を杭、柱及びパイルキャップの平均(C-4)とした場合の、パイルキャップのせん断応力とせん断変形角の関係を図9に、その正加力時包絡線の比較を図10に示す。

柱軸力のない「RC-0-500」は、他の2体よりややスリップした逆S字の復元力特性となっている。せん断ひび割れ強度は軸力のある2体はほぼ同じであり、柱軸力のない「RC-0-500」は他の2体よりやや低い。

パイルキャップがせん断破壊した、パイルキャップの小さい「RC-0.32-350」は、他の2体と比べて、最大耐力も剛性も大きいですが、せん断変形角0.01近くでの繰返しによる耐力低下は大きい。

4. まとめ

柱、杭、基礎梁で構成される十字形骨組みの実験を行い、中柱、基礎梁、杭の接合部であるパイルキャップの地震時挙動について考察した。本実験の範囲では、パイルキャップのひび割れ強度とせん断終局強度は、鉛直部材の断面を柱とパイルキャップ、あるいは、柱、杭とパイルキャップの平均として、柱梁接合部に関する既往の研究成果を応用することで推定可能であると考えている。しかし、本実験は、高支持力の既製杭を使用した中低層建物を想定したもので、杭の直径が柱寸法より小さな場合であり、また、試験体数も3体と少なく、最終破壊も必ずしもせん断破壊ではない。高層建物の場所打ちコンクリート杭のように柱寸法より杭径が大きい場合もある。

種々の場合についてパイルキャップの有効断面積の定量化は、今後の課題である。

謝辞

本研究は、東京工業大学応用セラミックス研究所全国共同利用研

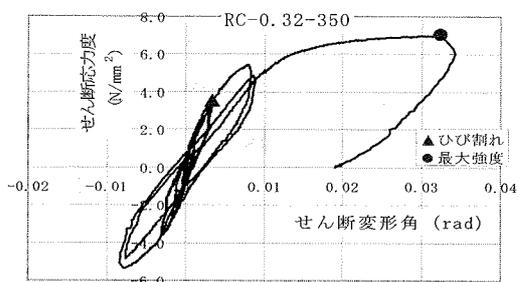
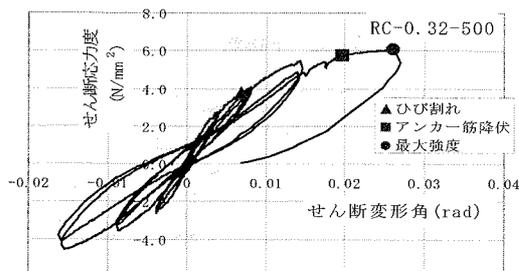
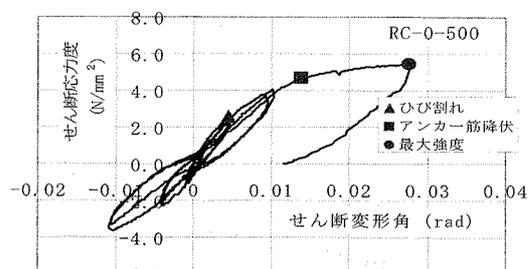
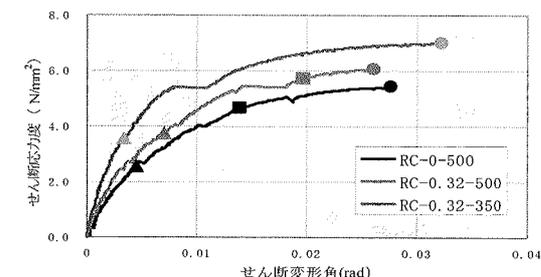


図9 パイルキャップせん断応力とせん断変形角



●：最大強度，■：杭アンカー筋降伏，▲：せん断ひび割れ

図10 パイルキャップせん断応力とせん断変形角包絡線

究の一環として行われたものです。また、高周波熱練(株)、東京鉄鋼(株)には鉄筋を提供していただきました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針
- 2) 田邊成ほか：4本杭に支持されたRC床版の降伏線理論による曲げ耐力算定式，コンクリート工学年次論文報告集，20巻3号，pp.235-240，1998
- 3) 鈴木邦康：鉛直力と曲げモーメントを受ける杭支持独立フーチングの破壊性状と耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，27巻2号，pp.517-522，2005
- 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，29巻3号，pp.415-420，2007
- 5) 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，509号，pp.83-90，1998.7
- 6) 林静雄ほか：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，コンクリート工学年次論文報告集，30巻3号，319-324，2008
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説

(2008年10月4日原稿受理，2009年2月25日採用決定)