

論文 既製杭を用いたト形部分架構パイルキャップの破壊性状の検討

郡司 大裕*1・岸田 慎司*2・向井 智久*3・毎田 悠承*4

要旨：柱と杭と基礎梁およびパイルキャップを1つの架構としての性能評価を目的とした実験は少なく、パイルキャップに関する力学的根拠に基づいた性能評価の手法は確立されていない。本論では実構造物を想定した時に軸力を変動させた架構として実験を行い、建物の継続使用という観点から破壊形式の明確化を目的とした。最大耐力時のパイルキャップ内補強筋の歪み分布と、パイルキャップせん断破壊・柱脚曲げ破壊といった異なる2種類の破壊性状から破壊形式を明確に分類することが可能であることを確認した。

キーワード：パイルキャップ, パイルキャップせん断破壊, 柱脚曲げ破壊, ト形部分架構, 変動軸力

1. はじめに

大地震時における建築物の耐震性能は、現行の耐震基準において確保されているが、地震後の継続使用を確保する対策については確立されていない。杭体・基礎構造材の基本性能を把握するための実験研究は行われているが、上部構造と下部構造の架構としての性能評価を目的とした実験は少ないため、パイルキャップに関する力学的根拠に基づいた性能評価の手法は確立されていない。

そこで本研究では、軸力を変動させた場合の架構とした実験を行い、各部材(柱・基礎梁・パイルキャップ・杭)の破壊性状より建物の継続使用に及ぼす影響を検討する。また、パイルキャップ内部の補強筋を松本¹⁾によるかご筋型(縦筋・帯筋)として配筋し、パイ

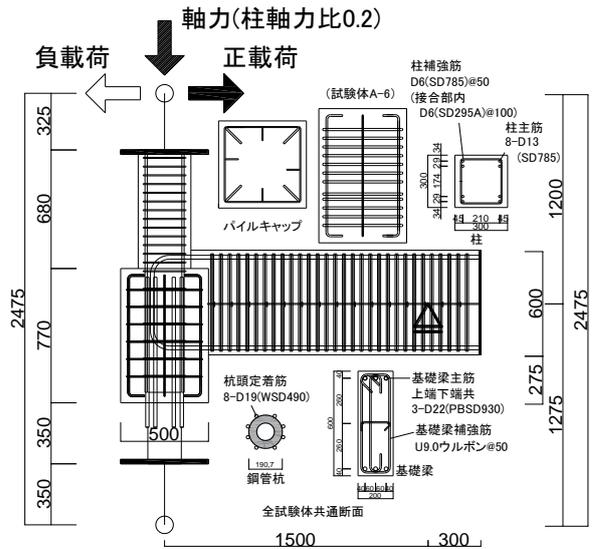


図-1 試験体概要図(試験体 A-4)

表-1 試験体諸元

試験体	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
軸力 (柱軸力比)	778kN (0.31)	767kN (0.30)	499kN (0.19)	0~578kN (0~0.21)	559kN (0.21)
柱	幅×せい 300mm×300mm				
	主筋 8-D13(SD345)		8-D13(SD785)		
	帯筋 D6(SD345)@50		D6(SD785)@50		
	(パイルキャップ内)		D6(SD295A)@100		D13(SD785)@50
基礎梁	幅×せい 200mm×600mm				
	主筋 6-D22(PBSD930)				
	補強筋 U9.0(1275MPa)ウルボン@50				
杭	杭体 S45C Φ190.7mm 鋼管厚45mm				
	杭頭定着筋 8-D19(WSD490)				
パイルキャップ	せい×幅×高さ 500mm×500mm×770mm				
	縦筋(90度方向) 4-D6(SD295A)		4-D10(SD295A)		4-D6(SD295A)
	縦筋(45度方向) 4-D10(SD295A)		4-D13(SD295A)		4-D10(SD295A)
	帯筋 6-D6(SD295A)@100				6-D13(SD785)@50

表-2 コンクリート材料特性

試験体	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (×10 ⁴ N/mm ²)	圧縮強度時ひずみ (μ)	引張割裂強度 (N/mm ²)
A-2,A-3	28.2	2.30	2295	2.2
A-4	28.2	2.30	2005	1.9
A-5	28.9	2.11	2759	2.0
A-6	31.0	2.32	2495	2.1

*1 三井住友建設株式会社

*2 芝浦工業大学 建築学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 建築研究所 構造研究グループ 研究員 博士(工学) (正会員)

表-3 鉄筋材料特性(*は0.2%オフセットにより算出)

試験体	鋼材	使用部材	降伏応力度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)
A-2 A-3	D6(SD295A)*	パイルキャップ・柱補強筋	484.2	1.91	4405
	D6(SD345)*	柱補強筋	497.3	1.87	4657
	D10(SD295A)	パイルキャップ	374.2	1.89	1980
	D13(SD295A)	パイルキャップ	346.1	1.82	2050
	D13(SD345)	柱主筋	361.5	1.72	2217
	D19(USD490)	杭頭定着筋	521.9	1.78	4107
	D22(PBSD930/1080)*	基礎梁主筋	1007.6	2.02	6745
U9.0(SBPD1275/1420)*	基礎梁補強筋	1307.5	1.92	8808	
A-4 A-5 A-6	D6(SD295A)*	パイルキャップ・柱補強筋	455.8	1.83	4487
	D6(SD785)*	柱補強筋	942.2	2.01	6674
	D10(SD295A)	パイルキャップ	381.9	1.83	2081
	D13(SD785)	パイルキャップ・柱主筋	813.7	1.99	4247
	D19(USD490)	杭頭定着筋	518.9	1.86	3465
	D22(PBSD980/1080)*	基礎梁主筋	970.0	2.03	6790
	U9.0(SBPD1275/1420)*	基礎梁補強筋	1400	1.95	9180

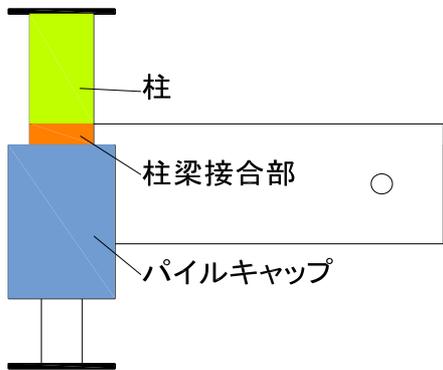


図-2 各部材の範囲

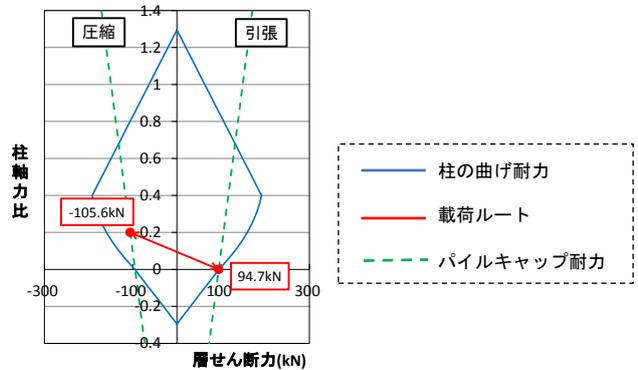


図-3 軸力と水平力の载荷ルート

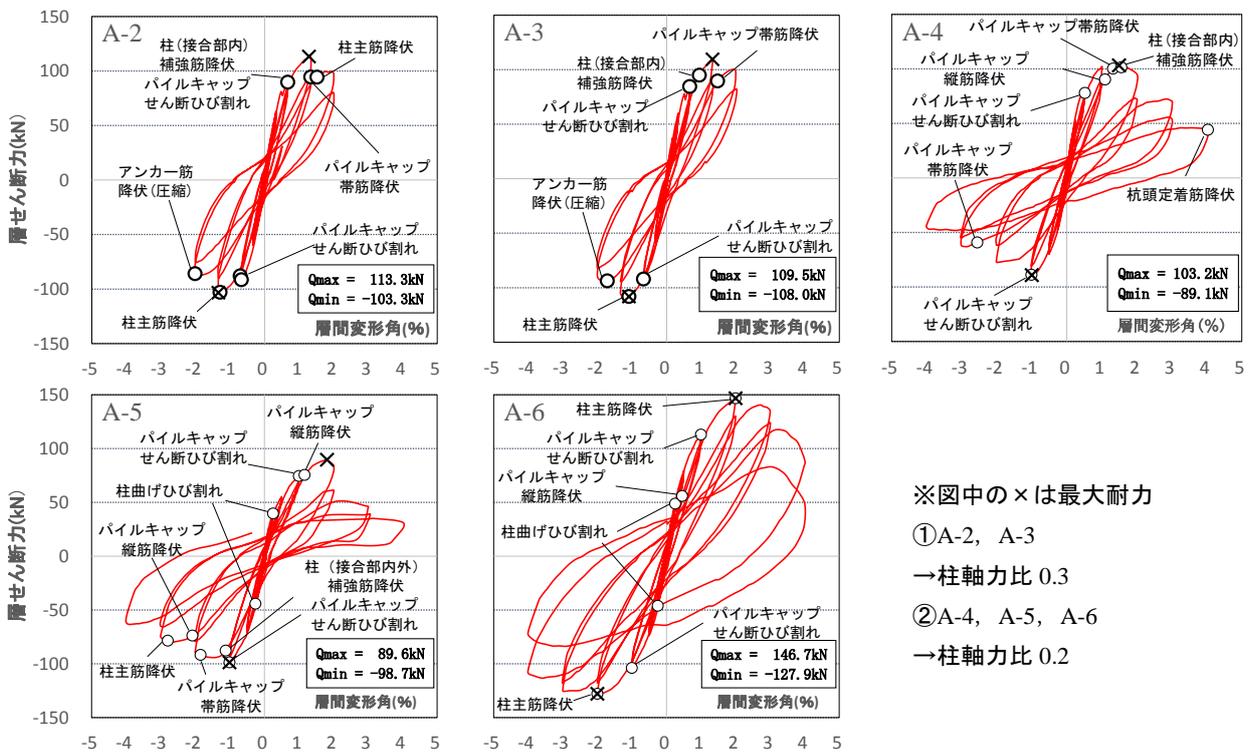


図-4 層せん断力-層間変形角関係

※図中の×は最大耐力

- ①A-2, A-3
→柱軸力比 0.3
- ②A-4, A-5, A-6
→柱軸力比 0.2

ルキャップ内の縦筋量および帯筋量の変化による破壊性状の確認も目的とした。さらに継続使用という観点から、既往の研究^{1)~3)}にて確認された破壊形式について分類および明確化のため、パイルキャップせん断破壊と柱脚曲げ破壊の検討を行う。

2. 試験体及び実験概要

本研究で基準とした試験体 A-4 の試験体概要を図-1、試験体諸元を表-1、コンクリートの材料特性を表-2、鉄筋の材料特性を表-3、各部材（柱・基礎梁・パイルキャップ・柱梁接合部（以下、接合部）・杭）の範囲を図-2 に示す。試験体は約 1/3 スケールのト形部分架構とし、鉄筋コンクリート造地上 8 階建ての集合住宅の側柱下部を想定して設計を行った。

図-3 に軸力を変動させた試験体 A-5 の軸力と水平力の載荷ルートを示す。軸力は層せん断力に依存する形で変動載荷とした。目標層せん断力は桑原³⁾が提案したパイルキャップ破壊耐力式を準用した。さらに式(1)より梁せん断力を算出し、目標梁せん断力とした。

試験体 A-6 では帯筋量の違いによるパイルキャップ耐力増加を見込み、帯筋の鉄筋径および強度、間隔を変え、帯筋量 (p_w) を試験体 A-4 の 8.12 倍とした。またコンクリートは一体打ちとした。

試験体 A-2 はパイルキャップ内の縦筋量・帯筋量ともに基準の試験体 A-4 と同一である。試験体 A-3 はパイルキャップ内縦筋量を試験体 A-2 の 3.13 倍とした。

本研究の加力方法は、柱頭および柱脚をピン支持、基礎梁端をピンローラー支持とし、加力は柱頭加力点に軸力（柱軸力比 0.2）を導入後、同加力点より水平力を導入し、柱頭位置の変化における層間変形角にて制御を行い、正負交番繰返し載荷とした。

3. 実験結果

3.1 層せん断力-層間変形角関係

図-4 に各試験体の層せん断力-層間変形角関係を示す。層せん断力 Q_c は実験で計測した梁せん断力 V_b を用いて力の釣合いより求めた。釣合い式を以下に示す。

$$Q_c = V_b \cdot \frac{l_c}{l_b} \quad (1)$$

l_c : 柱頭ピン-杭脚ピン間距離 (mm)

l_b : 基礎梁端ピン-心間距離 (mm)

試験体 A-2, A-3 は実験時の不備により、目標層間変形角の 2/3 の値で載荷を行った。

本研究の基準試験体 A-4 は層間変形角 $R=1.5\%$ (負載荷 $R=1\%$) で最大耐力に達した。最大耐力後の耐力低下は正載荷で 32.3% ($R=3\%$ と比較), 負載荷で 14% ($R=2\%$ と比較) であった。軸力を変動させた試験体 A-

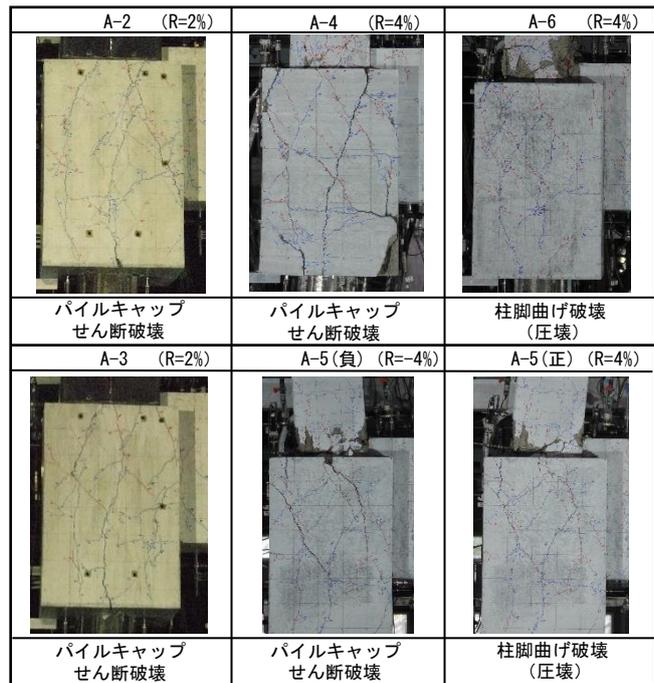


写真-1 各試験体最終破壊状況

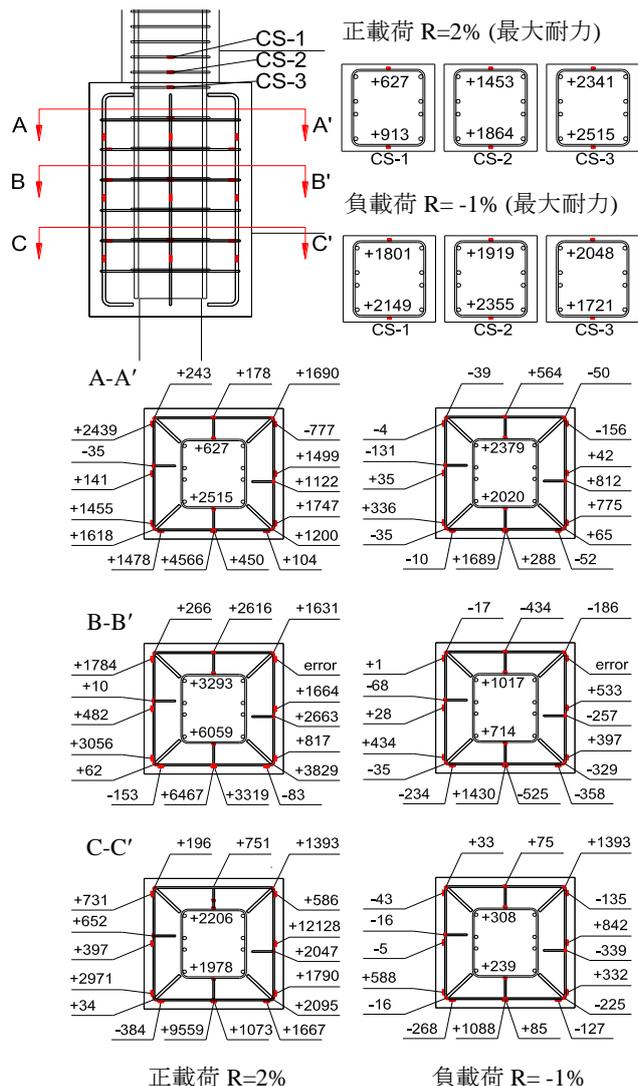


図-5 パイルキャップ内補強筋の歪み分布 (試験体 A-4)

5はR=1.8% (負荷荷 R=1%)で最大耐力に達した。最大耐力後の耐力低下は正載荷で48.8% (R=3%と比較), 負荷荷で10.4% (R=2%と比較)であった。試験体 A-4 と比較すると同軸力比の負荷荷では耐力低下率に差があまりなかった。一方で正載荷では軸力比が小さい A-5 の耐力低下率が高くなった。帯筋量を増加させた試験体 A-6 では正負で R=2%時に最大耐力に達した。最大耐力後の耐力低下は正載荷で8.4%, 負荷荷で2.5% (R=3%と比較)であった。帯筋量の効果により, A-6 の最大耐力は A-4 より正載荷で42%上回り, 負荷荷で44%上回る結果となった。

試験体 A-2 は正負で R=1.34%時に最大耐力に達した。最大耐力後の耐力低下は正載荷で14.1% (R=2%と比較), 負荷荷で17.4% (R=2%と比較)であった。縦筋量を増加させた試験体 A-3 では R=1.33% (負荷荷 R=1.29%)で最大耐力に達した。最大耐力後の耐力低下は正載荷で12% (R=2%と比較), 負荷荷で17.4% (R=2%と比較)であった。試験体 A-2, A-3 は最大耐力および耐力低下率にあまり差が生じない結果となった。

3.2 破壊性状

写真-1 に各試験体の最終破壊状況を示す。試験体 A-4 は最大耐力前にパイルキャップ内の補強筋 (パイルキャップ縦筋・帯筋・柱帯筋) が降伏し, 最大耐力以降, パイルキャップのせん断ひび割れ幅が増大したことからパイルキャップせん断破壊と判断した。試験体 A-5 は最大耐力前にパイルキャップ縦筋・帯筋, 柱帯筋が降伏し, パイルキャップのせん断ひび割れ幅の増大も見られた。しかし軸力比を小さくした正載荷で柱脚

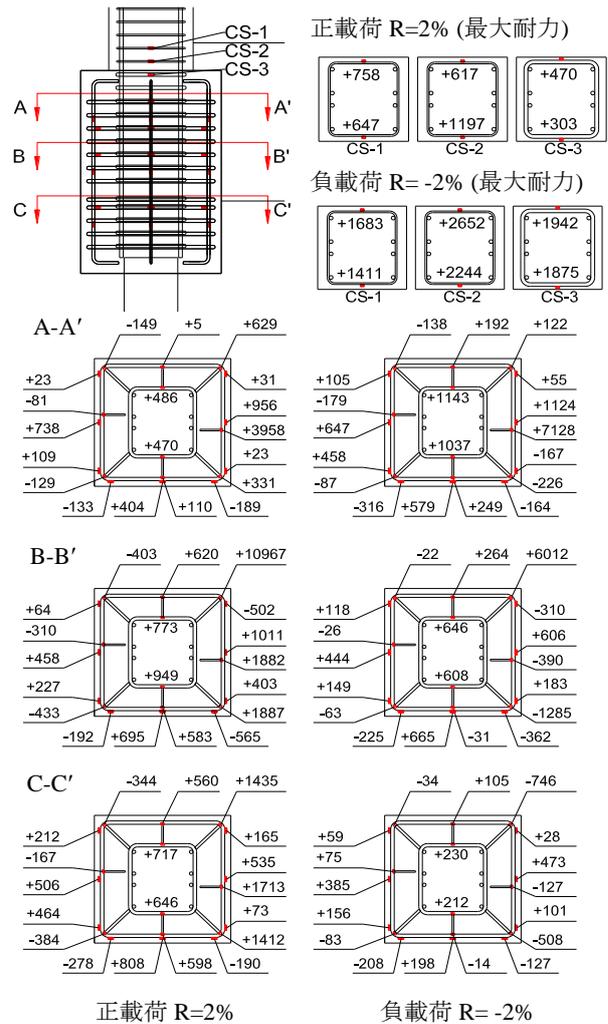


図-6 パイルキャップ内補強筋の歪み分布 (試験体 A-6)

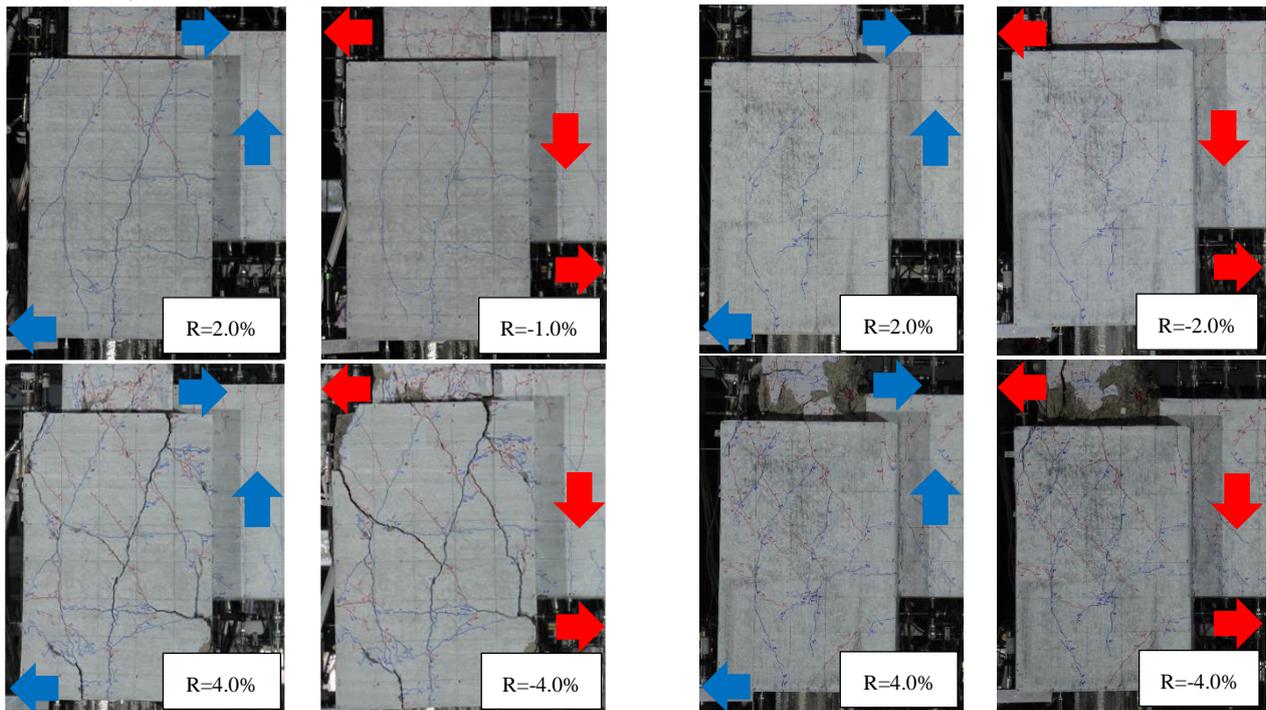


写真-2 最大耐力時および最終破壊時の様子 (左: 試験体 A-4, 右: 試験体 A-6)

部に損傷が集中したことから、正載荷は柱脚部の曲げ圧壊、負載荷はパイルキャップせん断破壊と判断した。試験体 A-6 は最大耐力前に柱主筋が降伏した。さらに最大耐力時に柱脚部の圧壊が見られた。このことから、柱脚部曲げ圧壊と判断した。

試験体 A-2,A-3 は最大耐力時において、パイルキャップのせん断ひび割れ幅の増大が顕著であり、柱脚部および接合部に圧壊が見られなかった。またパイルキャップ内補強筋の歪み量が大きく出ていることからパイルキャップせん断破壊と判断した。

3.3 パイルキャップ内補強筋の歪み分布

破壊形式をパイルキャップせん断破壊とした試験体 A-4 の最大耐力時パイルキャップ内補強筋の歪み分布を図-5、柱脚曲げ破壊とした試験体 A-6 の最大耐力時パイルキャップ内補強筋の歪み分布を図-6 に示す。

パイルキャップがせん断破壊した試験体 A-4 の正載荷では、パイルキャップ帯筋の歪みが A-A'~C-C' のパイルキャップ全体で大きくなった。さらに柱帯筋も全体的に歪みの値が大きくなった。一方で、パイルキャップ縦筋の歪みの値は基礎梁側に集中して出ている。負載荷では正載荷で降伏しているため、パイルキャップ内補強筋の歪みの値は小さくなった。しかし、正載荷時と同様にパイルキャップ帯筋と柱帯筋の鉄筋の歪みの値は大きく出ている。また正負両方向で接合部内の柱帯筋の歪みが大きかった。

柱脚が曲げ破壊した試験体 A-6 では、正負両方向でパイルキャップ内補強筋の歪みがあまり出なかった。しかし基礎梁側の鉄筋と接合部の柱帯筋では大きな値を示した。これは最大耐力前に、正負両方向で柱脚と接合部の境目の位置で柱主筋が降伏したため、応力が柱脚および接合部に集中したためと考えられる。さらに柱主筋、基礎梁主筋、杭頭定着筋は高強度の鋼材を使用していることもあり降伏はしなかったが、それぞれの鉄筋の危険断面位置の歪み量が大きくなることを確認できた。

4. 破壊形式の分類

既往の研究^{1)~3)}では、パイルキャップのせん断破壊と柱脚部の曲げ破壊の2種類の破壊形式が確認されている。写真-2に各破壊形式の基準とした試験体 A-4,A-6 の最大耐力時および最終破壊時の様子を示す。本研究では、パイルキャップのせん断破壊および柱脚部の曲げ破壊を明確化させるため、それぞれの破壊現象を挙げて考察する。

4.1 パイルキャップせん断破壊の検討

パイルキャップに破壊が集中した試験体 A-2,A-3,A-4 を対象にパイルキャップのせん断破壊の検討を行う。

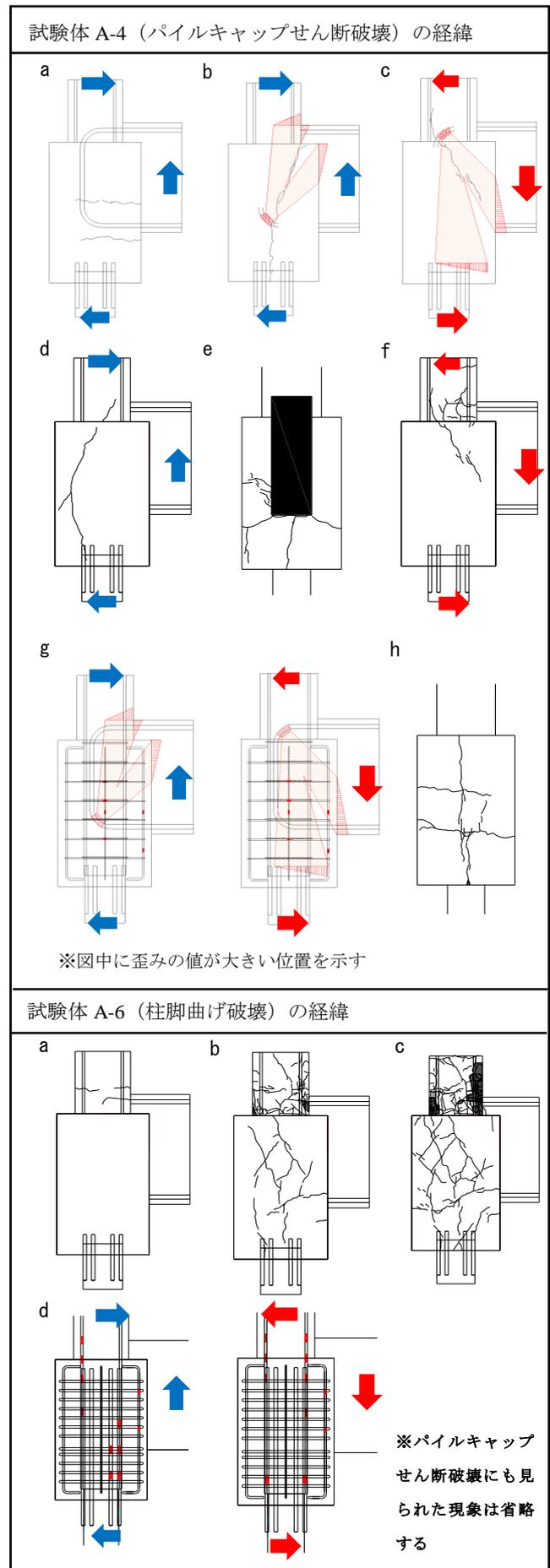


図-7 ひび割れおよび鉄筋の降伏状況の経緯

図一7に最大耐力前後で確認されたひび割れおよび鉄筋の降伏状況の経緯を示す。また図中(b),(c),(g)に桑原³⁾による基礎梁主筋の折曲げ部による支圧力を示す。以下に、パイルキャップのせん断破壊の試験体に見られた特徴的な現象を列挙する。a. 基礎梁主筋に沿ってパイルキャップに水平方向にひび割れが入った。b. 正載荷でパイルキャップ中央部から上下に大きくひび割れが入った。c. 負載荷で柱脚部からパイルキャップ上部にかけて大きくひび割れた。d. 最大耐力時に接合部から杭頭部にかけて縦ひび割れが入った。e. パイルキャップ-基礎梁の接合面で、パイルキャップ下部に鉛直方向と斜め方向にひび割れが入った。加えて、パイルキャップ-杭頭部との接合面にひび割れが進展した。f. 負載荷方向では最大耐力を迎えるまでパイルキャップに目立った損傷は見られず、接合部と柱脚に損傷が集中した。g. パイルキャップ内の補強筋（パイルキャップ縦筋・帯筋、柱帯筋）が大きく歪んだ。h. パイルキャップ-基礎梁の接合面とは反対側の面で、柱主筋に加えてパイルキャップ内補強筋が降伏し、柱主筋に沿って正載荷で縦ひび割れが入った。さらに負載荷で水平方向のひび割れがパイルキャップ中央に入った。i. 最大耐力以降、正載荷ではパイルキャップ下部の損傷が顕著であった。負載荷ではパイルキャップへの損傷も大きいことに加え、接合部の損傷も顕著に表れた。

パイルキャップがせん断破壊した試験体において、パイルキャップ内の補強筋は正負で基礎梁主筋から形成されるストラットにかかる箇所歪みの値が大きく出ている。このことから、基礎梁主筋の折曲げ部による支圧力がパイルキャップのせん断破壊に大きく影響すると考えられる。しかし、基礎梁主筋から形成されるストラット外からのひび割れの発生や、パイルキャップのせん断破壊後に接合部に損傷が集中することなど、今後継続的に検討を進めていく必要がある。

4.2 柱脚曲げ破壊の検討

柱脚部に破壊が集中した試験体 A-6 を対象に柱脚部の曲げ破壊の検討を行う。以下に、柱脚部の曲げ破壊の試験体に見られた特徴的な現象を列挙する。a. 柱脚部と接合部の境目の位置に曲げひび割れが入った。b. 基礎梁主筋に沿ってパイルキャップに水平方向にひび割れが入った。c. 正載荷でパイルキャップ中央部から上下に大きくひび割れが入った。d. 負載荷で柱脚部からパイルキャップ上部にかけて大きくひび割れた。e. 最大耐力時に接合部から杭頭部にかけて縦ひび割れが入った。f. さらに正載荷の最大耐力時に柱脚部で圧壊が確認された。g. パイルキャップ-基礎梁の接合面で、パイルキャップ下部に鉛直方向と斜め方向にひび割れが入った。加えて、パイルキャップ-杭頭部との接合面

にひび割れが進展した。h. パイルキャップ内の補強筋（パイルキャップ帯筋、柱帯筋）の歪み量は小さかった。一方で柱主筋、杭頭定着筋、パイルキャップ縦筋の一部が降伏した。i. 最大耐力以降、パイルキャップへの損傷はあまり見られなかった。一方で、柱脚部に損傷が集中し、正載荷側では柱主筋の座屈が生じた。

既往の研究^{1)~3)}において、破壊性状が柱脚曲げ破壊と判断された試験体数は少ないため、今後パイルキャップがせん断破壊した試験体と同様に、データの蓄積が求められる。

5. まとめ

柱と杭と基礎梁およびパイルキャップを1つの架構としてパイルキャップ内鉄筋量を変数とした実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) パイルキャップがせん断破壊した試験体において、パイルキャップ内の補強筋は正負で基礎梁主筋から形成されるストラットにかかる箇所歪みの値が大きく出ていることから、基礎梁主筋の折曲げ部による支圧力がパイルキャップのせん断破壊に影響を及ぼすと考えられる。
- (2) 最大耐力時のパイルキャップ内補強筋の歪み分布から、パイルキャップがせん断破壊した試験体のパイルキャップ内の補強筋の歪みの値が大きいに対して、柱脚部が曲げ破壊した試験体では歪みの値が小さくなることを確認した。
- (3) 試験体 A-5 では軸力の変動により正載荷で柱脚曲げ破壊、負載荷でパイルキャップせん断破壊と正負で異なる破壊性状を示す結果となった。

参考文献

- 1) 松本玄德他：軸力を受けるト形部分架構におけるパイルキャップの耐震性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.445-446, 2010.9
- 2) 大和久貴義他：ト形部分架構を有するパイルキャップの耐震性能に及ぼす基礎梁位置の影響, コンクリート工学年次論文集, pp.695-698, 2013.9
- 3) 桑原亮他：既製杭を用いたト形部分架構パイルキャップのせん断強度式の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol38, No.2, pp.331-336, 2016

【謝辞】

本研究は平成29年度住宅・建築物高度化事業「大地震後の継続使用性に資する杭および杭頭接合部の技術開発」および(国研)建築研究所指定課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」により実施しました。関係各位に謝意を表します。