

接合部の構造条件によるPCaPC柱の 耐震性能および損傷状況の比較

生田 麻実¹・三木 朋広²

¹正会員 工修 明石工業高等専門学校助教 都市システム工学科（〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西679-3）

²正会員 工博 神戸大学大学院准教授 工学研究科（〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1）

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下、PC)柱は、RC構造と比較して耐力の上昇や除荷した際に残留変位が小さくなる原点指向性が期待できる。このPC構造と施工性が高いプレキャスト(以下、PCa)工法を併用したプレキャストプレストレストコンクリート(以下、PCaPC)構造は、コンクリート構造物の効率的な設計・施工に有効である。しかし、上部構造の適用事例と比較して、下部構造ではPCaPC構造設計手法の一般化には至っておらず、施工事例は極めて少ないのが現状である。PC橋脚に関してはプレストレストコンクリート技術協会によりガイドライン¹⁾が策定されており、根拠づけとして池田ら²⁾による縮小模型実験が行われている。導入プレストレス力、PC鋼材の付着をパラメータとして、40×40cm正方形断面に軸方向鉄筋D13を32本配置したRC橋脚と、耐力を概ね合わせるためプレストレスに応じて鉄筋の一部をPC鋼材へ置き換えたPC橋脚の正負交番載荷によって、PC橋脚ではRC橋脚と比較して残留変形が小さく、原点指向性の高い橋脚であることが報告されている。しかし既設のPC橋脚やPCa橋脚においても一体打ちRC橋脚と同等以上の耐震性能を持つことを実用化の担保としており、PCaPC構造の特徴を設計に活かすには至っていない。PCaPC柱の特徴を踏まえた設計や解析モデル化の構築に向けては、PCaPC柱の構造条件の違いによる耐震性能や損傷状況への影響について明確にする必要がある。

本研究ではPCaPC柱の構造条件による特性の変化を比較するため、コンクリート部の接合部の有無、接合部での軸方向鉄筋の連続性および鉄筋量をパラメータとしたPC柱供試体を製作し、正負交番載荷

表-1 供試体の条件一覧

供試体	柱部のコンクリートの条件	接合部の基部からの高さ(mm)	軸方向鉄筋の本数	接合部での軸方向鉄筋条件
M-C4-S4	一体打ち	---	4	連続
J-C4-S4	接合部有	+50	4	連続
J-C12-S4	接合部有	+50	12	連続
J-DC-S4	接合部有	+50	4	不連続

実験を行って荷重-変位関係とその包絡線、累積吸収エネルギー、残留変形等の基本的な耐震性能およびPC鋼材ひずみの分布について把握することを目的とした。また目視観察と画像解析から、供試体表面のひずみ分布および損傷状況を把握した。

2. 実験概要

(1) 供試体概要

供試体の条件一覧、使用材料の物性と配筋詳細をそれぞれ表-1、表-2、図-1に示す。供試体は、柱部は250×250mmの正方形断面であり、下部にフーチング部を有する。柱基部から750mm上方位置を載荷高さとした。表-1に示す記号Mの供試体は柱部とフーチングを連続して打設した一体打ち供試体であり、記号Jの供試体は接合部を有する供試体として製作した。柱基部から+50mm上方位置に接合部を設けた。接合部のある供試体Jシリーズではフーチングより上方を接合部高さ位置で打ち止め、フーチング部のコンクリート硬化後の打継ぎ面にテフロンシートを設置して付着を切り、接合部より上部のコンクリートを打継ぐことでPCa部材を圧着した接合面に近い状態を模擬し、圧着によって接合部でのせん断力を伝達した。図-1に示すPC鋼材位置に#1000標準型スパイラルシース(内径φ23mm、外径φ25.5mm)を配置

表-2 使用材料の物性

供試体	コンクリート (早強ポルトランドセメント)			グラウト	PC 鋼材 SWPR7B $\phi 15.2$		軸方向鉄筋 SD345 D10	せん断補強筋 SD295 D6
	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)		0.2%耐力 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)		
M-C4-S4	168	69.0	39 200	71.5	1846	196 000	379	344
J-C4-S4	164	62.6	37 100	71.5	1846	196 000	379	344
J-C12-S4	120	51.9	33 000	65.3	1810	191 000	369	353
J-DC-S4	24	55.8	36 500	76.6	1846	196 000	379	344

し、コンクリートの硬化後にシース内に配置した PC 鋼材にプレストレスをポストテンション方式で導入してグラウトを注入した。プレストレスは PC 鋼材が荷重によっても降伏しない領域で実験を行うことを想定し柱断面に対して 4MPa とした。また、PC 鋼材の定着部に設置したロードセルにより、緊張力導入から荷重試験までのプレストレスはほぼ無いことを確かめた。また、供試体名中央の記号が C4 の供試体では軸方向鉄筋を断面あたり 4 本、記号 C12 の供試体では 12 本配置し、軸方向鉄筋が柱とフーチング下部まで連続させた。記号 DC の供試体では同種同形の鉄筋を 4 本配置しているが、接合部では軸方向鉄筋は連続していない。いずれの供試体も、せん断補強筋量は曲げ破壊が先行するよう設定した。

(2) 正負交番荷重

写真-1 に正負交番荷重試験の様子を示す。供試体断面における角部の記号は、写真手前左側の北東角を A、そこから反時計回りに B, C, D, 中央を E とする。また、側面の記号を AB(北)面, BC(西)面, CD(南)面, AD(東)面とした。300kN 油圧アクチュエータを用いて水平力を正負(東西方向)に作用させた。水平力作用位置での水平変位をせん断スパン高さで除して部材角(%rad)とし、部材角制御で次の目標部材角まで正負交番荷重を行った。部材角 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2%rad まで各部材角で 2 サイクル正負交番荷重を行い、その後 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8%rad まで各部材角 1 サイクルずつ荷重を行った。8%rad 以降は部材角片側のみ約 10%rad まで押切り、その後除荷して荷重を終了した。またこの際、柱基部の高さ 0mm を基準位置、上方向を+として PC 鋼材の各 -320mm, +50mm, +125mm, +200mm, +375mm 位置および一部の供試体で -50mm 位置にひずみゲージを貼付け、PC 鋼材ひずみを測定した。

(3) 画像解析による非接触ひずみ計測

正負交番荷重を行う際、荷重方向に直交する

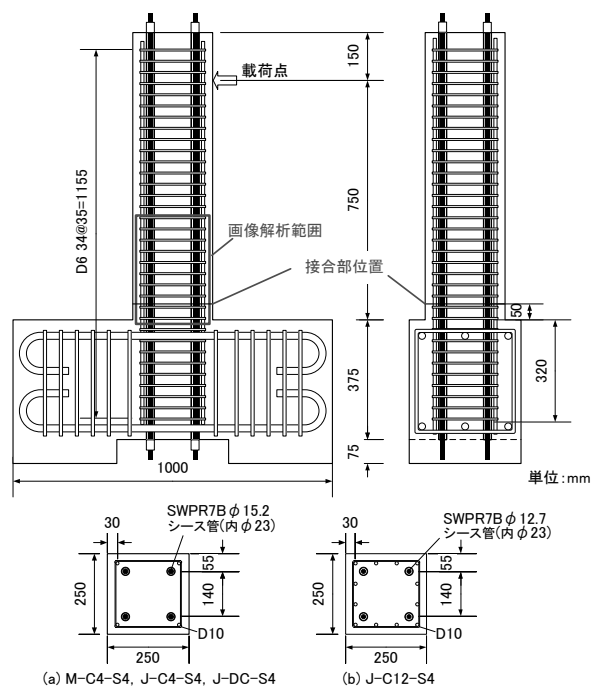


図-1 供試体配筋図(側面図は J-C-S4)

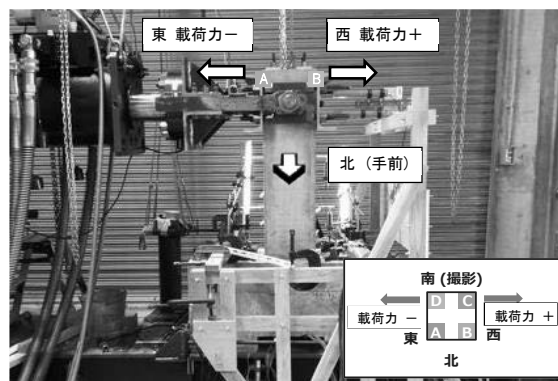


写真-1 正負交番荷重試験

CD(南)面をデジタルカメラ(画素数約 5030 万画素、絞り値 $f/5.6$, 露出時間 $1/40$ 秒, ISO-400 焦点距離約 50mm)によって撮影し、デジタル画像相関法を用いてひずみ分布を計測した。デジタル画像相関法とは、荷重等による変形前の画像中の試験体表面部において選択した任意の画素が変形後の画像中でどの位置に移動したかを推定することができる手法である³⁾。本研究においては図-1 に示す範囲のように柱基部から柱の荷重点高さ半分程度を解析領域として、

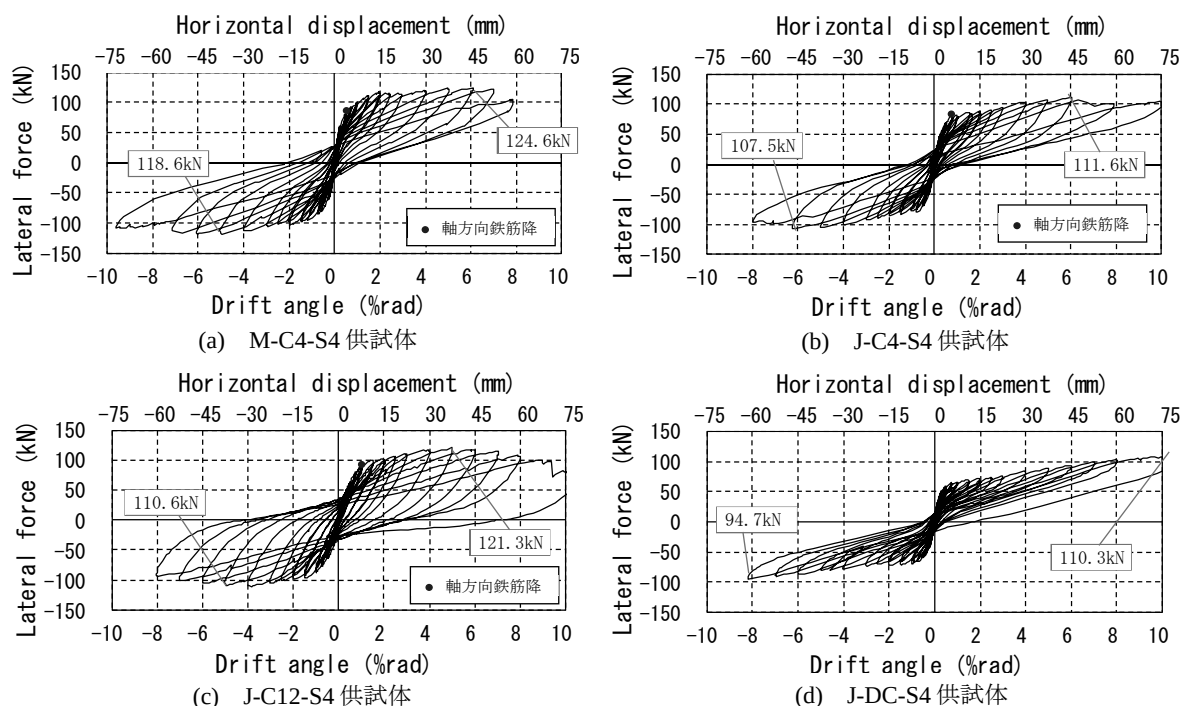


図-2 荷重-部材角(水平変位)関係

載荷開始前から各部材角サイクルでの最大変位時の画像を変形後画像としてひずみ分布の変化を計測した。

3. 実験結果

(1) 荷重-部材角関係

正負交番載荷実験によって得られた各供試体の荷重-部材角(または載荷点高さでの水平変位)関係を図-2に示す。まず、構造条件による荷重-部材角関係の違いを比較する。J-DC-S4を除く3体はいずれも部材角約5~6%radにおいて最大荷重を示しているが、接合部で軸方向鉄筋が不連続であるJ-DC-S4では部材角約10%radまで載荷を行っても各サイクルにおける荷重最大点が低下せず、部材角の増加に伴い緩やかに増加し続けた。コンクリートの接合部の有無によって比較すると、一体打ちのM-C4-S4の最大耐力は柱基部から50mm上方に接合部を設けたJ-C4-S4より13kN高く、本実験条件内ではプレストレスの導入によって圧着されている場合でもコンクリート部に接合部を有することで耐力が低下することがわかった。次に軸方向鉄筋の本数による耐力への影響を比較する。軸方向鉄筋4本を配置したJ-C4-S4と比較して軸方向鉄筋12本を配置したJ-C12-S4の最大耐力は約10kN高く、またJ-C12-S4はJ-C4-S4と比較して、除荷時の載荷履歴ループが荷重0kN方向により膨らんだ形状を示した。

荷重-部材角関係における各部材角1サイクル目

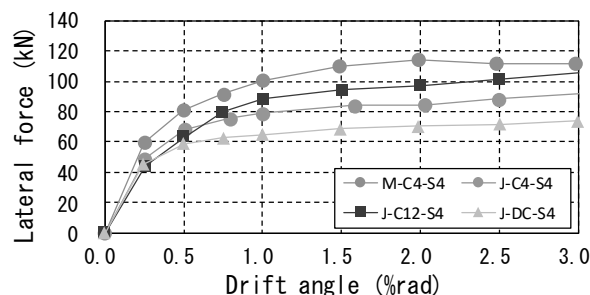


図-3 荷重包絡線

の最大荷重点を結んだ包絡線を図-3に示す。いずれの供試体でも軸方向鉄筋が降伏する部材角約0.5~1%radまでに荷重最大点が大きく増加し、以降は部材角の増加に伴い緩やかな勾配で増加している。M-C4-S4とJ-C4-S4を比較すると、いずれの部材角においても一体打ちであるM-C4-S4の荷重値が高く、部材角3%rad程度までの初期において剛性が高い。これは一体打ちであるために鉄筋、PC鋼材に加えてコンクリート部でも載荷による引張力を負担しているためと考えられる。J-C4-S4とJ-C12-S4を比較すると、部材角0.75%rad以降においてJ-C12-S4の荷重値がJ-C4-S4より高く、軸方向鉄筋量による荷重値への影響は軸方向鉄筋の降伏後に顕著となった。J-DC-S4では軸方向鉄筋による載荷力の負担がないため、部材角0.5%rad以降のいずれの部材角でも荷重値が最も小さい。

次に、荷重-水平変位関係より求めた各部材角における累積吸収エネルギーを図-4に示す。算出にあたってはいずれの部材角においても1サイクル目の

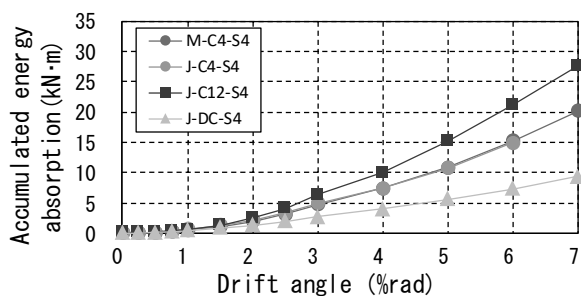


図-4 累積吸収エネルギー

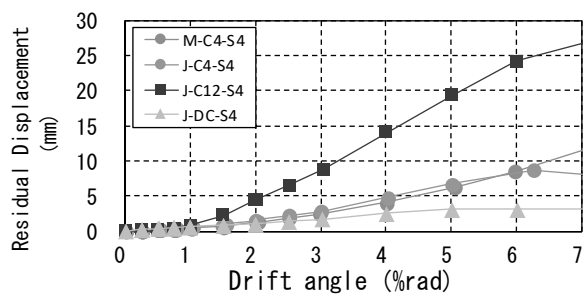
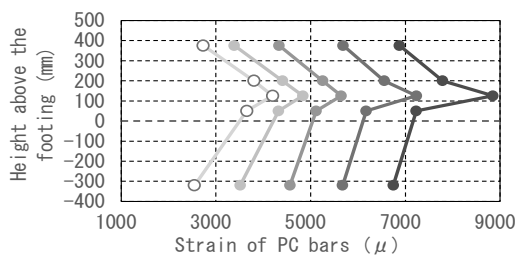
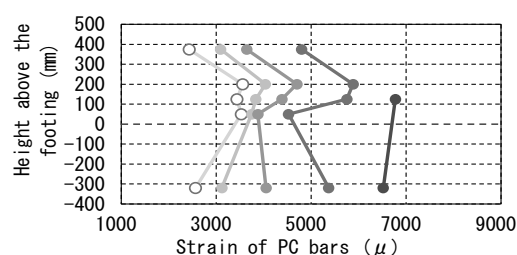


図-5 残留変位

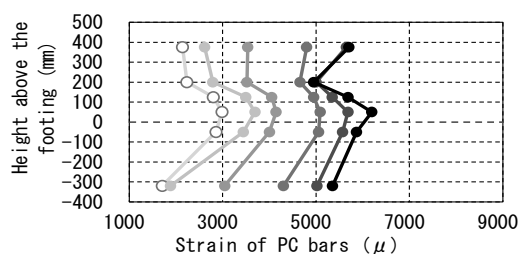
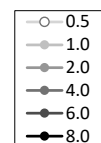


(a) M-C4-S4 鋼材 A

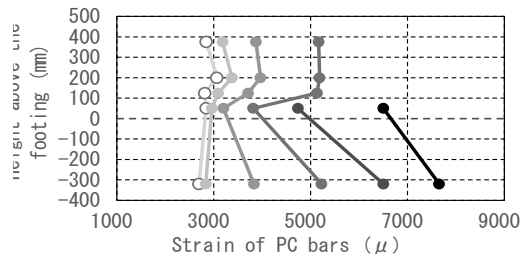


(b) J-C4-S4 鋼材 A

凡例：部材角(%rad)



(c) J-C12-S4 鋼材 A



(d) J-DC-S4 鋼材 A

PC 鋼材の
降伏ひずみ
= 約 9500 μ

図-6 最大部材角時の PC 鋼材ひずみ

荷重一部材角関係における載荷ループに囲まれる面積を吸収エネルギーとし、これを累積した値を横軸に示す各部材角までの累積吸収エネルギーとして算出した。J-C12-S4 の軸方向鉄筋が 12 本である供試体は他 3 体の供試体と比較していずれの部材角においても累積吸収エネルギーが大きい。M-C4-S4 と J-C4-S4 はいずれの部材角においても累積吸収エネルギーがほぼ同じ値であり、コンクリート接合部の有無による累積吸収エネルギーへの影響はみられなかった。J-DC-S4 は他供試体と比較していずれの部材角においても累積吸収エネルギーが小さく、部材角 6%rad では基準供試体 J-C4-S4 の約半分の値を示している。これは J-DC-S4 では軸方向鉄筋が接合部で不連続であり、エネルギー吸収に貢献していないためである。すべての供試体で鉄筋降伏後にグラフ勾配が増加しており、載荷によるエネルギーの吸収は降伏後の軸方向鉄筋の塑性変形による貢献分が大きく、累積吸収エネルギーの大きさは軸方向鉄筋量による影響が支配的であると考える。

各部材角の 1 サイクル載荷後に荷重を 0kN まで除荷した際の載荷点高さにおける水平変位を残留変位として最大経験部材角との関係を図-5 に示す。どの

供試体でも経験最大部材角の増加に伴い残留変位が増加しており、載荷に伴う損傷の進展により原点位置への復元性が小さくなっている。M-C4-S4 と J-C4-S4 の残留変位は部材角 6%rad まではほぼ同じであり、接合部の有無による残留変位の差はほぼなかった。J-C4-12 と J-C12-S4 を比較すると、部材角 1.5%rad 以降いずれ部材角でも J-C12-S4 の残留変位が大きく、部材角約 0.5~1%rad で降伏し塑性変形した軸方向鉄筋が、除荷および導入プレストレスによって供試体が原点位置に戻る復元性・原点指向性の作用を阻害していると考えられる。J-DC-S4 は軸方向鉄筋が接合部で不連続であるため復元性が阻害される要素が少なく、他 3 体の供試体と比較していずれの部材角においても残留変位が非常に小さく、高い原点指向性を示している。

(2) PC 鋼材ひずみ

載荷力正側の各サイクル最大変位時において生じた引張側の PC 鋼材 A(北東角部)のひずみを供試体高さ方向の分布として図-6 に供試体ごとに示す。PC 鋼材ひずみ値は緊張前をゼロとし、緊張による初期ひずみ約 2000 μ を含んだ値とする。また、部材角

2%rad までは2サイクル載荷後の値を示す。4体に共通して、部材角 4%rad まではいずれの供試体のどの高さにおいても部材角の増加に伴い PC 鋼材ひずみが増加している。高さ位置によって負担割合に差があるものの、フーチング内である-320mm 位置および柱高さ中央の+375mm 位置のひずみ値も部材角に伴い増加していることから、供試体高さ全域に渡って PC 鋼材が載荷による引張力を負担していることがわかる。M-C4-S4 では部材角 6%rad まではひずみの高さ方向分布のうち柱基部から+125mm 位置で最もひずみが大きくなっている。柱の曲げモーメントは柱基部で最も大きくなるが、柱基部に近い-50mm, +50mm 位置ではフーチング部からの拘束が大きいため一体打ち供試体では+125mm 位置で最もひずみが大きくなると考えられる。J-C4-S4 では部材角 0.5%rad では高さ方向の分布のうち+50mm から+200mm 位置までひずみが大きく接合部およびその周辺で目開きに伴い大きく変形をしている。部材角 1.0%rad 以降は接合部位置である+50mm 位置のひずみは部材角に伴う増加率が小さく、+100mm および+125mm 位置のひずみが大きく表れた。J-C12-S4 の部材角 6%rad までの高さ方向分布においては高さ-50mm, +50mm, +125mm でひずみが大きくなっている。J-DC-S4 では接合部位置である柱基部より+50mm 位置のひずみが高さ方向の分布において最も小さく、また部材角の増加に伴うひずみ値の増加も小さい。

(3) 供試体表面の損傷状況

写真-2 に部材角 2%rad および 6%rad の載荷を行った後、部材角 0%rad まで除荷を行った際の供試体表面 CD(南)面の損傷状況を示す。M-C4-S4 では部材角 2%rad の供試体表面に曲げひび割れは目視できず、載荷時に生じたひび割れが除荷によって目視が難しい状態まで閉じている。部材角 6%rad では載荷方向に面する AD(東)面、BC(西)面で圧壊が起こり、コンクリートが柱基部から供試体高さ約+150mm 位置まで剥落しており、CD(北)面でも閉じ切らないひび割れが目視できた。J-C4-S4、J-C12-S4 は部材角 2%rad で接合部に沿って断面外縁のコンクリートがわずかに欠損している。また、柱基部から接合部位置の高さ 50mm までの領域において、引張および圧縮縁となる AD(東)面、BC(西)面に近い角部にひび割れが生じ、剥落の兆候が見られる。部材角 6%rad では接合部より上方でも角部において大きく圧壊して剥落している。また接合部から柱基部からの供試体高さ+100mm までの領域でひび割れが進展しており、接合部周辺の圧壊および圧縮の影響が表れていると考え

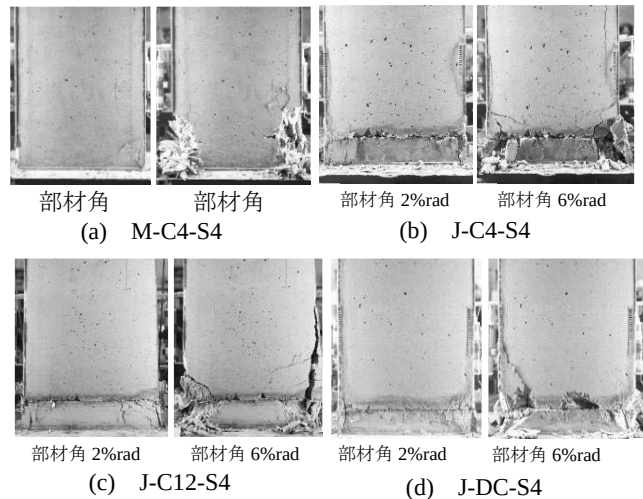


写真-2 供試体表面の損傷状況

られる。J-C12-S4 は部材角 6%rad では J-C4-S4 と比較して、載荷方向に面する AD(東)面、BC(西)面で角部だけでなくかぶりコンクリートが面全体で剥落しており、引張側から進展し CD(南)面を横断しているひび割れの本数も多い。角部だけでなく断面 1 辺の間にも塑性変形した軸方向鉄筋が存在しているため、面全体を剥落させており、前述した PC 鋼材ひずみ値が大きくなる高さ領域と一致する。J-DC-S4 では部材角 2%rad において接合部より下部の角部がわずかに縦方向へひび割れているが、曲げひび割れの発生は確認できず、他 3 体の供試体と比較して損傷が少ない。部材角 6%rad においては接合部周辺における角部の圧壊が生じているが、曲げひび割れから進展した損傷は見とめられず、損傷は圧縮側の載荷力によるものが主である。

(4) 画像解析による供試体表面のひずみ分布

図-7 に載荷力正側載荷時における各サイクル最大部材角時の供試体 CD(南)の画像解析による非接触ひずみ計測結果を示す。一体打ちである M-C4-S4 では部材角 0.25%rad で柱基部と柱上部にもひずみが集中している。一方、高さ+50mm 位置に接合部のある J-C4-S4、J-DC-S4 では部材角 0.25%rad から接合部位置にひずみ集中箇所が現れ、柱基部の損傷よりも低部材角から接合部での目開きが起きていることがわかる。部材角 2%rad までの低部材角時においては、M-C4-S4 では部材角の増加に伴い柱高さ中央まで複数本のひび割れが生じ、基部のひび割れと共にひび割れ幅が進展している。J-C4-S4 では接合部の開口に加えて、部材角 0.5%rad で柱高さ 150mm 位置にもひび割れが発生するものの、部材角の増加に伴っては柱基部および接合部の開口のみが進展した。J-C12-S4 では部材角 0.5%rad で発生した柱上部のひ

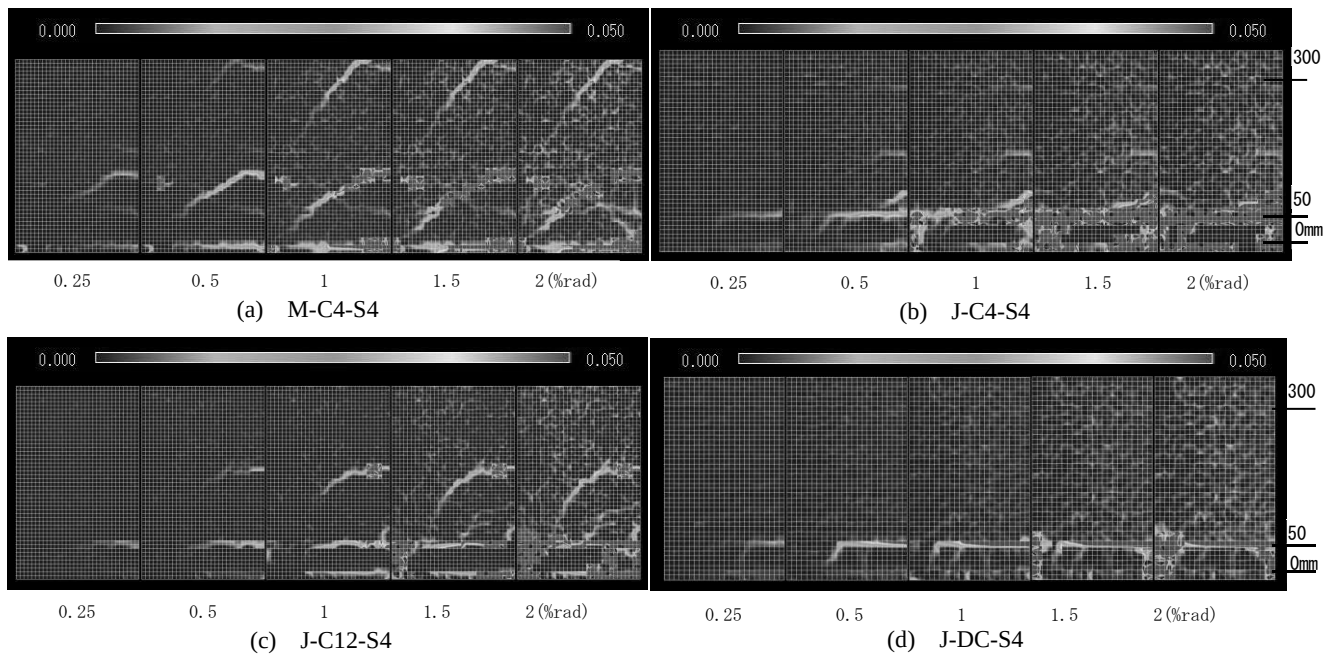


図-7 画像解析による供試体表面のひずみ分布(最大部材角時)

び割れが部材角の増加とともに長くなり、柱基部、接合部、柱上部のひび割れがいずれも部材角の増加に伴い進展している。J-DC-S4 供試体では部材角の増加に伴い接合部の開口と、柱基部から接合部までの角部の損傷のみが進展し、柱基部や接合部より上部にはひび割れが生じなかった。これは軸方向鉄筋が接合部で不連続であることから軸方向鉄筋の変形に追従した供試体表面の変形と損傷が生じなかったためと考える。J-DC-S4 では、接合部より上部の柱部が剛体として接合部を起点に回転するような挙動をしており、曲げ変形による柱部に発生するひずみはほとんどない、あるいは非常に小さいと考えられる。

4. まとめ

柱基部での接合部の有無、軸方向鉄筋量および連続性を変化させた 4 体の供試体への正負交番载荷により、得られた知見を以下に示す。

- (1) 一体打ち供試体では、接合部のある供試体と比較して部材角 3%rad 程度までの载荷初期における剛性および供試体最大耐力が高くなったが、累積吸収エネルギーや残留変位への接合部の有無による影響はなかった。
- (2) 一体打ち供試体では供試体高さ方向にひび割れが複数本分散し部材角の増加に伴って進展するのに対し、接合部のある供試体では柱基部および接合部のひび割れ開口が主に進展した。
- (3) 軸方向鉄筋を 12 本を配置した場合、4 本配置し

た場合と比較して最大耐力、累積吸収エネルギー、残留変位が増加した。部材角 2%rad までのひずみ分布においては、接合部より上部に発生したひび割れについても、部材角の増加に伴い柱基部、接合部の開口とともにひび割れ長さが進展した。

- (4) 接合部位置で軸方向鉄筋が不連続の場合、部材角約 10%rad までの载荷では最大耐力があらわれず、荷重最大点が緩やかに上昇し続けた。軸方向鉄筋が不連続の場合、連続の場合と比較して累積吸収エネルギーおよび残留変位が小さく、原点指向性の高い挙動を示した。また、接合部より上部では载荷によるひずみがほとんど発生しなかった。

謝辞：本研究の一部はJSPS「国際的な活躍が期待できる研究者の育成(R2904)」の一貫として実施した。

参考文献

- 1) 社団法人プレストレストコンクリート技術協会：プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン，1999.11
- 2) 池田尚治，森 拓也，吉岡民夫：プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.40，No.5，pp.40-47，1998.9
- 3) 三木朋広，林 大輔：画像相関法による局所的圧縮力を受けるコンクリートの非接触ひずみ計測，建設工学研究所論文報告集，第 52 号，pp.53-60，2010.11