

論文 正負交番荷重を受けるプレキャストプレストレストコンクリート柱の接合部条件が耐震性状に与える影響に関する基礎研究

生田 麻実*1・三木 朋広*2

要旨: プレキャストプレストレスト構造を模して柱基部に接合部を設けたプレストレストコンクリート柱供試体において、接合部の有無、軸方向鉄筋の連続性、柱断面内での PC 鋼材の配置をパラメータとした供試体を製作し、正負交番荷重によって荷重-部材角関係の包絡線、累積吸収エネルギー、残留変位への影響を調べた。この結果、軸方向鉄筋が連続の場合、不連続の場合と比較して累積吸収エネルギーが大きいこと、軸方向鉄筋が不連続な場合および引張縁近傍でプレストレス力による復元性が大きい場合は残留変位が小さくなることがわかった。また、載荷中に撮影した供試体表面の画像解析によって、ひずみ分布の可視化を行った。

キーワード: プレキャストコンクリート、プレストレストコンクリート柱、接合部、正負交番荷重、画像解析

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下、PC)柱では、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)工法を併用する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。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 橋脚の正負交番荷重によって、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、PC および PCa 構造の特徴を設計に落とし込むには至っていない。そのため、PCaPC 柱の設計や解析モデル化の構築を目指し、構造条件と耐震性状の関係の知見を蓄積する必要がある。

これまでの著者らの研究³⁾では、橋脚基部に接合部が存在する状態を模擬し PC 鋼棒を用いてプレストレスを導入した供試体へ正負交番荷重を行い、一体打ちにより製作した供試体との比較を行った。この研究では接合部のある PC 柱供試体は接合部の柱断面内で軸方向鉄筋が連続しておらず、軸方向鉄筋が連続した一体打ち PC 柱供試体と比較して、載荷による累積吸収エネルギー、残

留変位ともに小さくなる傾向にあった。これは主に軸方向鉄筋のエネルギー吸収における貢献分や降伏後の挙動が主因であると考えられるが、コンクリート部の連続性の影響、PC 鋼材のエネルギー吸収貢献分、軸方向鉄筋の貢献分をそれぞれ明確に分割してとらえる必要がある。また、既往の池田ら²⁾の PC 柱の正負交番荷重実験では、導入プレストレス力の総量をパラメータとしている。しかし、同量のプレストレス力導入を行った PC 柱でも、断面内での鋼材径や配置によって引張縁で発揮される復元力特性等には違いがあると考えられる。

これらの構造条件による特性の変化を比較するため、PCaPC 柱の接合部の有無、接合部での軸方向鉄筋の連続性、PC 鋼材の配置をパラメータとした PC 柱供試体ならびに比較用一体打ち PC 柱供試体を製作し、正負交番荷重実験を行って荷重-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状および 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

2.1 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

表-1 供試体条件一覧

供試体	基部+50mm 高さでのコンクリートの状態	基部+50mm 高さでの軸方向鉄筋条件	PC 鋼材の配置
M-C-S4	一体打ち	連続	4×SWPR7B φ 15.2
J-C-S4	接合部有	連続	4×SWPR7B φ 15.2
J-DC-S4	接合部有	不連続	4×SWPR7B φ 15.2
J-C-S5	接合部有	連続	4×SWPR7B φ 12.7 1×SWPR7B φ 15.2

*1 明石工業高等専門学校 都市システム工学科助教 修士(工学) (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 使用材料の特性

供試体	コンクリート (早強ポルトランドセメント使用)			グラウト 圧縮強度 (N/mm ²)	PC 鋼材 SWPR7B φ15.2		軸方向鉄筋 SD345 D10 降伏強度 (N/mm ²)	せん断補強筋 SD295 D6 0.2%耐力 (N/mm ²)
	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-C-S4	168	69.0	39200	71.5	1846	196 000	379	344
J-C-S4	164	62.6	37100	71.5	1846	196 000	379	344
J-DC-S4	24	55.8	36500	76.6	1846	196 000	379	344
J-C-S5	22	55.8	35800	72.5	1763(φ12.7)	196 000(φ12.7)	379	344
					1846(φ15.2)	194 000(φ15.2)		

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。M-C-S4 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、J-C-S4, J-DC-S4, J-C-S5 はフーチングとの接続部である柱基部から50mm上方に接合部のある供試体として製作した。接合部のある供試体ではフーチングと柱基部より50mm上方位置で打ち止め、に写真-1 のように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、柱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、プレストレス力による圧着によって接合部でのせん断力を伝達した。柱基部から750mm上方位置を載荷高さとした。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力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。プレストレス力はPC鋼材が載荷によっても降伏しない領域で実験を行うことを想定し4MPaとした。PC鋼材はM-C-S4, J-C-S4, J-DC-S4 では断面の各隅に4本のφ15.2鋼材を配置し、J-C-S5 では断面の角に配置する4本をφ12.7鋼材とし、断面中央にφ15.2鋼材を配置した。このときφ12.7鋼材には37kN, φ15.2鋼材には100kNの緊張を行った。また、M-C-S4, J-C-S4, J-C-S5 の3体では軸方向鉄筋が柱とフーチング下部まで連続するよう配置し、J-DC-S4 供試体では同種同形の鉄筋を配置しているが、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。

2.2 正負交番載荷

写真-2 に供試体載荷の様子を示す。供試体断面にお

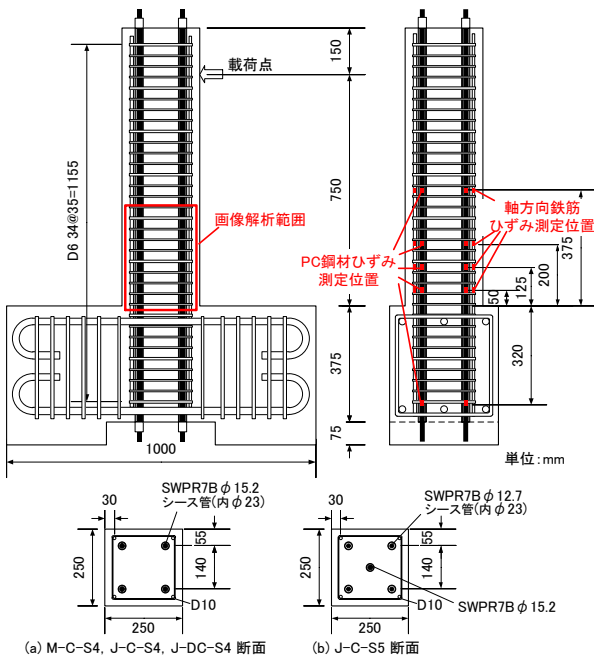


図-1 供試体配筋図 (側面図はM-C-S4 供試体)

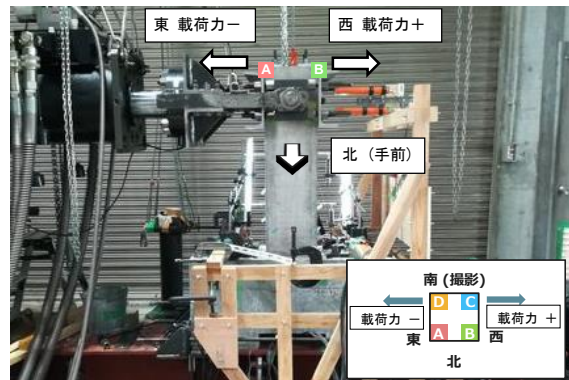


写真-2 載荷装置



写真-1 打継ぎ面におけるコンクリート間の付着抑制



写真-3 画像解析撮影の様子・解析範囲

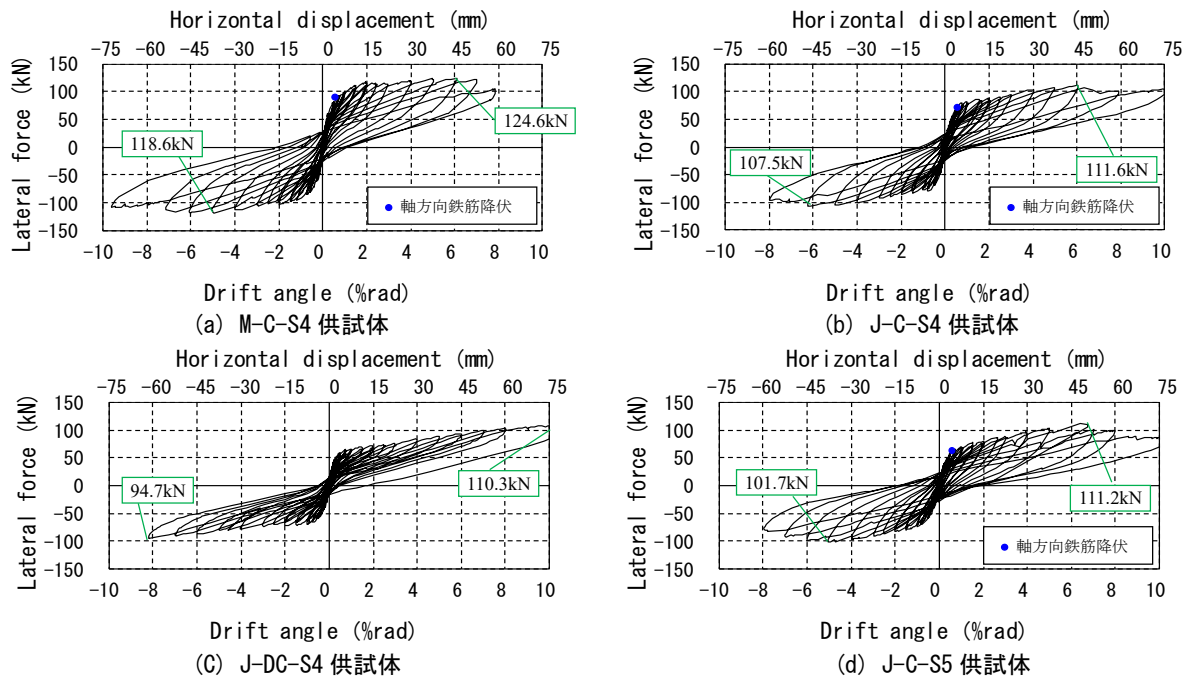


図-2 荷重-部材角(水平変位)関係

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載荷を行った。部材角0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2%radまで各部材角で2サイクル正負交番載荷を行い、その後2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8%radまで各部材角1サイクルずつ載荷を行った。8%rad以降は部材角片側のみ約10%radまで押し切り、その後除荷して載荷を終了した。

この際、図-1に示すように柱基部の高さ0mmを基準位置、上方向を+としてPC鋼材の各-320mm, +50mm, +125mm, +200mm, +375mm位置にひずみゲージを貼付け、PC鋼材ひずみを測定した。軸方向鉄筋はM-C-S4, J-C-S4, J-C-S5では柱基部から+50mm, +125mm, +200mm, +375mm位置で測定したが、J-DC-S4は+50mm位置で軸方向鉄筋が連続していないため、他3箇所のひずみを測定した。

2.3 画像解析による非接触ひずみ計測

正負交番載荷を行う際、載荷方向に直交する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、載荷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⁴⁾。本研究においては写真-3に示すよ

うに柱基部から柱の載荷点高さ半分程度を解析領域として、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

3.1 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(または水平変位)関係を図-2に示す。一体打ち供試体M-C-S4は最大荷重124.6kN、接合部のあるJ-C-S4, J-C-S5は約110kNを示し、3体はいずれも部材角約6%rad時に最大荷重を示した。軸方向鉄筋が基部+50mm位置で不連続であるJ-DC-S4では、部材角10%radまで載荷を行っても各サイクルの荷重最大点が低下せず、部材角の増加に伴い緩やかに荷重最大点が増加し続けた。またJ-DC-S4は除荷による原点指向性が高い履歴形状を示した。

この載荷履歴から読み取れる耐震性状として、荷重-部材角関係における包絡線、累積吸収エネルギー、残留変位について比較した。まず荷重-部材角関係における各部材角1サイクル目の最大荷重点を結んだ包絡線を図-3に示す。部材角4%radまでではどの部材角においてもM-C-S4の荷重が他の3体と比較して高く、初期から大きな荷重値を示した。これはM-C-S4では接合部のコンクリートが一体打ちであることによって初期の引張力を負担しており、特にコンクリートの損傷が小さい部材角4%rad程度までの初期においては基部周辺のコンクリートが剛性に寄与しているためである。

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

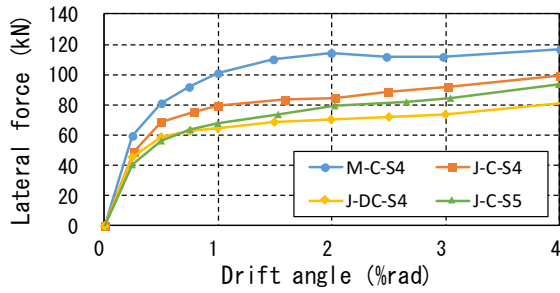


図-3 荷重-部材角における包絡線

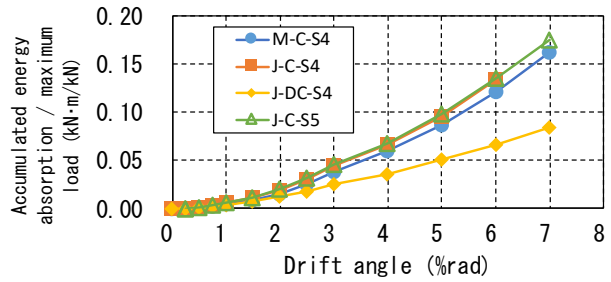


図-4 累積吸収エネルギー

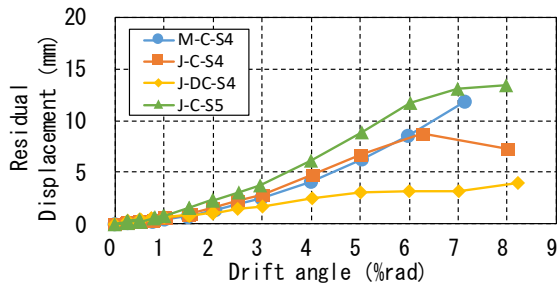


図-5 残留変位

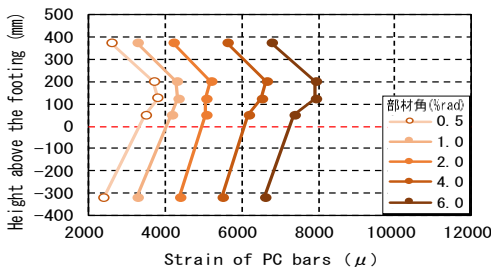
累積した値を累積エネルギーとして算出した。この累積吸収エネルギーをそれぞれの最大荷重で除して正規化した値と経験最大部材角との関係を図-4 に示す。ただし荷重の低下を示さなかった J-DC-S4 は荷重終了までの最大荷重で除した値とした。M-C-S4, J-C-S4, J-C-S5 の3体はいずれの部材角においてもほぼ同じ累積吸収エネルギーの値を示した。一方 J-DC-S4 は他3体と比較していずれの部材角においても累積吸収エネルギーが小さく、部材角 6%rad では他3体の半分以下の値を示している。M-C-S4, J-C-S4, J-C-S5 では軸方向鉄筋が降伏した部材角約 0.5%rad 以降において、軸方向鉄筋の変形によってエネルギー吸収していると考えられる。J-DC-S4 では接合部で軸方向鉄筋連続しておらず、軸方向鉄筋がエネルギー吸収に貢献していないため、累積吸収エネルギー値

が小さくなったと考える。

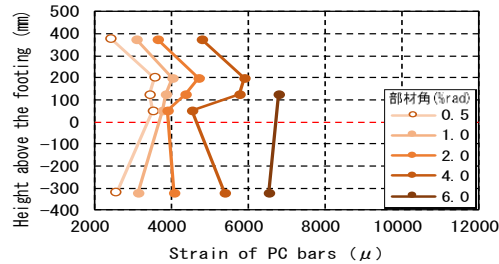
次に、供試体の変形についてみていく。各部材角の1サイクル後に荷重を0kNまで除荷した際の荷重点高さにおける水平変位を残留変位として最大経験部材角との関係を図-5 に示す。経験最大部材角の増加に伴い残留変位も増加しており、J-C-S4, J-C-S5 は部材角 6%rad までほぼ同じように増加している。M-C-S4, J-C-S4, J-C-S5 は J-DC-S4 と比較して比較して残留変位が大きく、降伏後の軸方向鉄筋の引張塑性変形により、導入プレストレスによる復元性・原点指向性の作用が阻害されていると考える。また J-C-S5 は引張縁に近い柱断面4隅のPC鋼材が他供試体に比べて細径かつ1本あたりの導入プレストレス力が小さいため、供試体の復元力への貢献が M-C-S4, J-C-S4 と比較して小さく、原点指向性が低くなっている。この結果から、供試体の残留変位は降伏した軸方向鉄筋の存在と引張縁近傍でのプレストレス力の大きさによる復元力が大きく影響すると推測する。ただし、累積吸収エネルギーおよび残留変位に与える軸方向鉄筋とプレストレス力の影響の定量化は今後の課題である。

3.2 PC鋼材ひずみおよび軸方向鉄筋ひずみ

荷重力正側の各サイクル最大変位時において生じたPC鋼材AとDのひずみを平均し、引張側鋼材の最大部

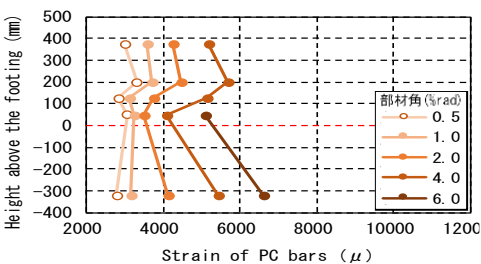


(a) M-C-S4 供試体

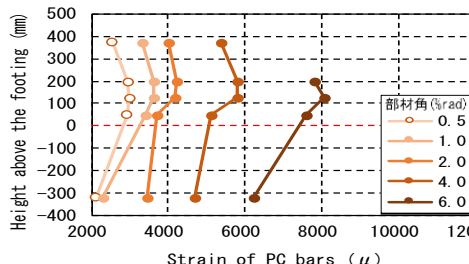


(b) J-C-S4 供試体

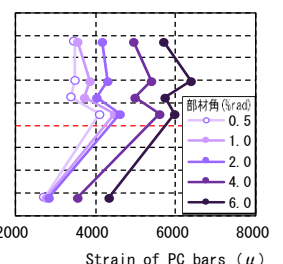
PC鋼材の降伏ひずみ
φ15.2鋼材 約9500μ
φ12.7鋼材 約9000μ



(c) J-DC-S4 供試体



(d) J-C-S5 供試体 (φ12.7鋼材)



(e) J-C-S5 供試体鋼材

図-6 PC鋼材ひずみの高さ方向分布

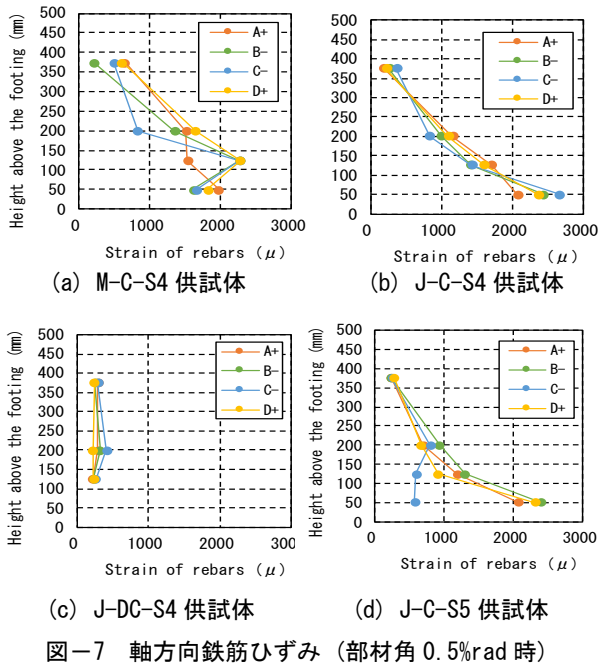


図-7 軸方向鉄筋ひずみ (部材角 0.5%rad 時)

材角時のひずみ値として供試体高さ方向の分布を図-6に示す。PC 鋼材ひずみ値は緊張前をゼロとし、緊張による約 2500 μ を含む。また、部材角 2%rad までは 2 サイクル 載荷後の値を示す。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おり、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-C-S4 ではどの部材角においてもフーチング内部の -320mm 位置や柱高さ中央の +375mm 位置の PC 鋼材ひずみと比較して、柱基部周辺である +50mm, +125mm, +200mm 位置の PC 鋼材ひずみが大きく表れる傾向にあった。対して、柱基部に接合部を設けた J-C-S4, J-DC-S4, J-C-S5 では部材角 1%rad 以降においては接合部位置である +50mm のひずみが、これより上部の +125mm, +200mm, +375mm 位置のひずみより小さく表れた。J-C-S5 ではどの部材角においても +125mm 位置の PC 鋼材ひずみが高さ方向分布において最も大きく、鋼材 A および D が他の供試体と比較して細径であるため、部材角の増加に伴いより顕著に +125mm 位置のひずみが突出した。+50mm 位置は柱基部でフーチングに近いため、フーチング部による拘束の効果を受けてひずみ値が小さくなり、+125mm 位置においてひずみ値が最大を示したと考える。

載荷前を 0 μ として部材角 0.5 および 0.5%rad 時の引張側軸方向鉄筋ひずみの供試体高さ方向の分布を図-7に示す。M-C-S4 では 4 本中 3 本の鉄筋が柱基部から +125mm 位置で降伏ひずみである 2000 μ 以上となり、降伏している。軸方向鉄筋においてもフーチング部による拘束の効果を受けひずみが小さくなったと考える。一方、

接合部のある J-C-S4 および J-C-S5 は 1 本を除き接合部位置である柱基部から +50mm 位置で鉄筋の降伏が起きている。周辺のコンクリートによる拘束効果がないため接合部位置で降伏し、部材角 0.5%rad 以降の載荷では +50mm 位置の軸方向鉄筋が塑性化して変形するに伴い、除荷時に抵抗することで供試体の復元力を阻害すると考えられる。また J-DC-S4 供試体では軸方向鉄筋は不連続であることからひずみがほとんど生じていない。

3.3 供試体表面の損傷状況

写真-4 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-C-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-C-S4 および J-C-S5 では部材角 2%rad では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 では接合部より周辺が特に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られる。また、柱高さ全域にわたり軸方向鉄筋に沿って縦方向のひび割れが生じた。これはせん断補強筋フックが 120°と浅く、定着長が 36mm と比較的短かったため付着割裂ひび割れを防止できなかったと考える。

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、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

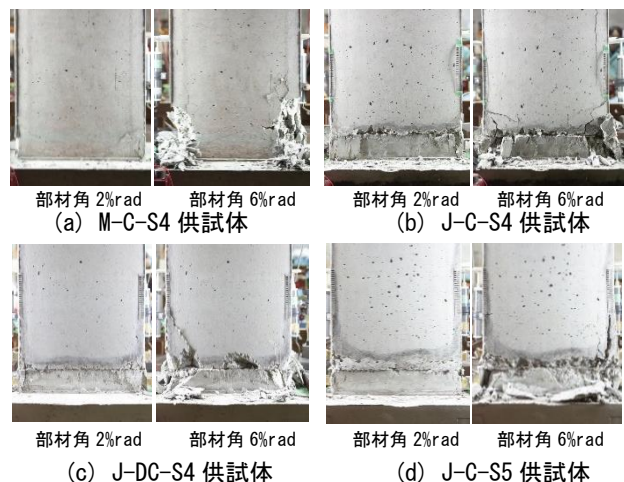


写真-4 供試体表面の損傷状況

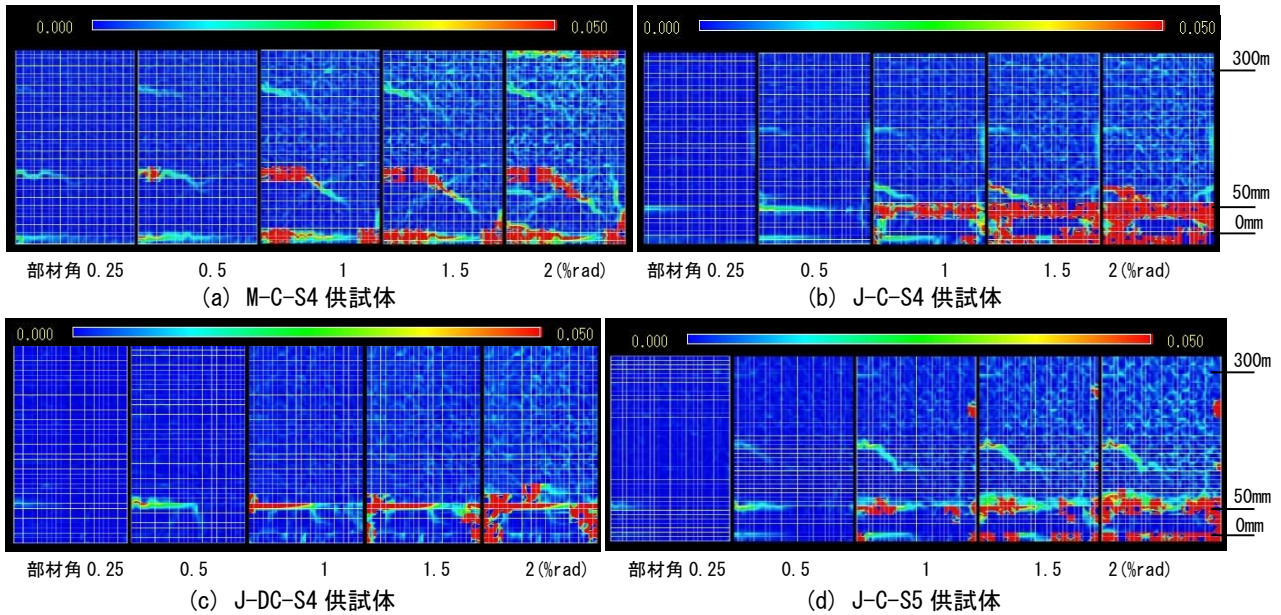


図-8 画像解析による供試体表面のひずみ分布

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ない。

3.4 画像解析による供試体表面のひずみ分布

図-8 に載荷力負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。部材角 2%rad までの低部材角時においては、M-C-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-C-S4, J2-C5 においては部材角 0.5%rad から接合部より上部に曲げひび割れが生じているものの、部材角の増加に伴っては主に柱基部および接合部の開口のみがひび割れとして進展し、上部の曲げひび割れはあまり進展しない。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随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。

4. まとめ

柱基部での接合部の有無、軸方向鉄筋の連続性、断面での PC 鋼材の配置の条件を変化させた 4 体の供試体への正負交番載荷により、得られた知見を以下に示す。

- (1) 柱基部が一体打ちの場合、接合部がある場合と比較して部材角 4%rad までの荷重-部材角の包絡線において、初期に荷重値が大きくなる挙動を示した。
- (2) 柱の累積吸収エネルギーは、軸方向鉄筋が接合部で連続していない場合、連続している場合と比較して小さくなった。

- (3) 柱の残留変位は、軸方向鉄筋が連続していない場合、また引張縁近傍にかかるプレストレス力が大きい場合に小さくなった。

- (4) PC 鋼材のひずみ計測により、PC 鋼材を断面隅に 4 本配置した接合部のある供試体では、部材角の増加に伴い接合部位置のひずみが高さ方向分布のうち最も小さくなる傾向がみられた。

- (5) 供試体表面の損傷写真および画像解析結果から、接合部の有無および軸方向鉄筋の連続性が曲げひび割れの発生と進展に影響していることがわかった。

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) 生田麻実，三木朋広：正負交番荷重を受けるプレキャストプレストレストコンクリート柱の画像解析による損傷の可視化に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.523-528，2019
- 4) 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