

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画像解析による損傷の可視化に関する基礎研究

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, 一体打ちプレストレストコンクリート柱供試体に正負交番荷重を行い, 基本的な耐震性状を調べるとともに, 変形前と変形後に撮影した供試体表面の画像解析によって, ひずみ分布, ひび割れの性状, 損傷の範囲を面的に可視化した。その結果, 接合部のある供試体では一体打ち供試体と比較して, 累積吸収エネルギー, 残留変位が小さくなり, ひずみやひび割れは基部の一部領域に集中することがわかった。また, 画像解析結果からひびわれ幅を算出し, ひび割れ幅が部材角の増加に伴い増加する傾向をとらえることができた。

キーワード: プレキャスト, プレストレストコンクリート柱, 損傷の可視化, 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)構造では, RC構造と比較して耐力の上昇や除荷した際に残留する変位が小さくなる原点指向性が期待でき, また施工性が良いプレキャスト(以下, PCa)工法によりプレキャストプレストレスト(以下, PCaPC)構造とすることもコンクリート構造物の効率的な設計・施工に有効であると考えられる。しかし, 上部構造で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。

土木分野の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。この実験の結果, 導入プレストレス力, PC鋼材の付着をパラメータとしたPC橋脚の正負交番荷重によって, 同型の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, 大規模地震時の破壊特性や変形性能, 損傷についての知見は必ずしも十分に蓄積されていない。また, PCa構造接合部の挙動について, 連続性がないことの影響を把握する方法が少ない。本研究では, PCa施工により橋脚基部に接合部が存在する状態を模擬した柱供試体を製作してプレストレスを導入し, 正負交番荷重を行った。この結果について一体打ちにより製作した供試体との比較を

行い, 基本的な耐震性状を調べるとともに, 柱基部周辺の損傷について画像解析による非接触ひずみ計測を行った。これによりひずみ分布, ひび割れの性状, 損傷の範囲等を面的に可視化して, 把握することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の使用材料の物性と配筋詳細をそれぞれ表-1, 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。柱部とフーチングを連続して打設した一体打ち供試体と, 接合部のある供試体を製作した。接合部のある供試体はフーチングと柱基部より50mm上方位置で打ち止め, 打継ぎ面はレイタンス処理等を行わず, フーチング部のコンクリートが硬化した後に柱部の鉄筋を配置してコンクリートを打ち継いだ。ここで接合部とは, 供試体製作においては打継ぎ作業を行っているが, 打継ぎ面処理を行わないことによりフーチング部と柱部のコンクリートの接着が極めて弱い状態とし, 実構造においてPCa部材を圧着した接合面に近い状態を模擬したものである。フーチングとの接続部である柱基部から750mm上方位置を載荷高さとした。図-1に示すPC鋼材位置に標準型スパイラルシース管(内径φ23mm, 外径φ25.5mm)を配置してコンクリートを打設し, 硬化後にPC鋼棒をシース内に4本配置

表-1 使用材料の物性

供試体	コンクリート (早強ボルトランドセメント使用)			グラウト	PC鋼材 SBPR(930/1180)φ13mm		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 (kN/mm ²)		圧縮強度 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)		
一体打ち	46	36.3	34.2	67.7	1175	201	369	328
接合部有	41	35.4	37.5	67.7	1175	201	369	328

*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)

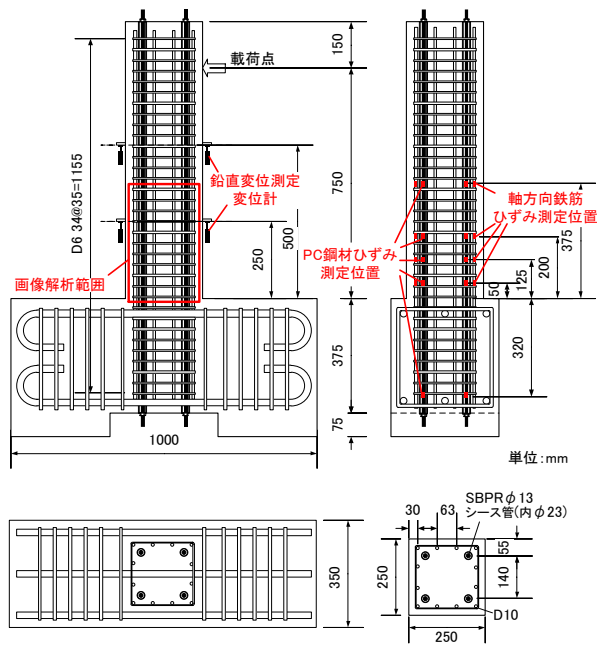


図-1 供試体配筋図（一体打ち供試体）

し、4MPa の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。一体打ち供試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、接合部のある供試体では供試体四隅に同種同径の鉄筋を配置したが、接合部では軸方向鉄筋は連続していない。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 正負交番荷重

写真-1 に供試体荷重の様子を示す。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 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, 2.5, 3%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 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。接合部のある

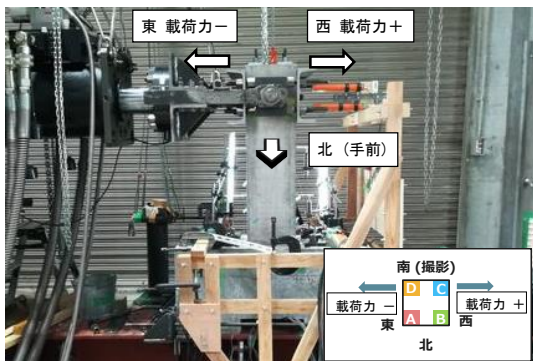


写真-1 荷重装置

供試体では部材角正側のみ 9, 10%rad まで荷重を行った。

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 4 本の各 -320mm, +50mm, +125mm, +200mm, +375mm 位置に 1 枚ずつひずみゲージを貼付け、PC 鋼材ひずみを測定した。軸方向鉄筋は一体打ち供試体では柱基部から +50mm, +125mm, +200mm, +375mm 位置で測定したが、接合部のある供試体は +50mm 位置で軸方向鉄筋が連続していないため、他 3 箇所のみひずみを測定した。

また、BC(西面)、AD(東面)の柱基部から 1D(柱部の断面幅 $D=250\text{mm}$)および 2D 上方位置に変位計を設置し、鉛直方向変位を計測した。AB(北面)では軸方向鉄筋位置(水平方向に端部から 30mm 内側位置)でクラックスケールを用いてひび割れ幅の測定を行った。接合部のある供試体では接合部に沿ってひび割れが発生すると予想される AD 面の水平方向中央箇所に、鉛直方向に接合部を挟む形で π 型変位計を設置して接合部の開きを計測した。

2.3 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 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、一体打ち焦点距離 60mm、接合部有焦点距離 47mm)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⁾。本研究においては写真-2 に示す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、荷重開始前から各部材角サイクルにおける最大変位時、および除荷後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。

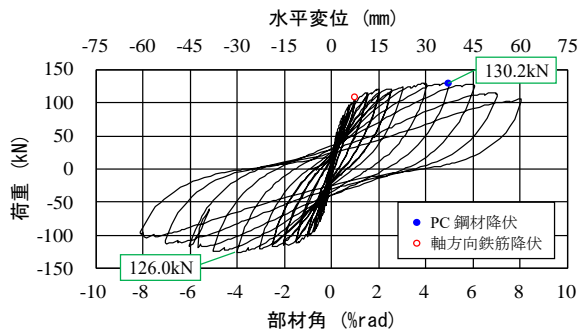
3. 実験結果

3.1 荷重一部材角関係

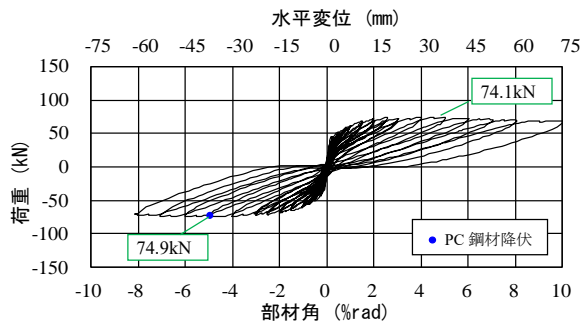
正負交番荷重時の荷重一部材角(または水平変位)関係を図-2 に示す。一体打ち供試体は最大荷重 130.2kN、接合部のある供試体では最大荷重 74.9kN を示し、最大耐力



写真-2 画像解析撮影の様子・解析範囲



(a) 一体打ち供試体



(b) 接合部のある供試体

図-2 荷重-部材角(水平変位)関係

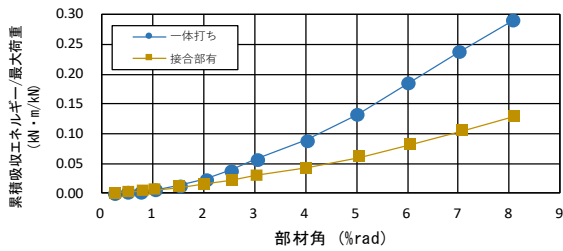


図-3 累積吸収エネルギー

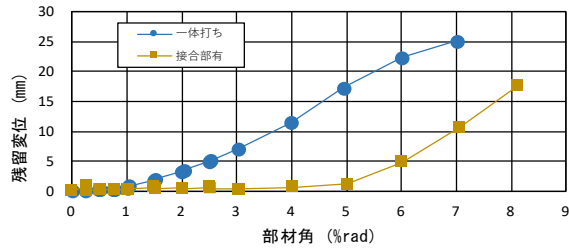


図-4 残留変位

に約 1.7 倍の違いが生じた。接合部のある供試体では柱基部の接合部で軸方向鉄筋が連続していないため、軸方向鉄筋が曲げ耐力に寄与しないことが、最大荷重に差が生じる主たる要因である。写真-3 に部材角 8%rad 載荷後の供試体の様子を示す。一体打ち供試体は柱下部で曲げひび割れが卓越し、供試体角部のコンクリートが圧壊して曲げ破壊をしている。接合部のある供試体では柱基部から接合部までのコンクリートが圧壊、剥落して破壊している。最大荷重点時変位はいずれの供試体でも部材角 5%rad であり、PC 鋼材が降伏ひずみに達した部材角とほぼ一致した。最大荷重点以降、一体打ち供試体では各部材角サイクルでのピーク荷重は緩やかに減少し、部材角 8%rad で最大荷重の 75%程度となった。一方、接合部のある供試体では最大荷重点以降もほぼ各サイクルのピーク荷重が低下せず、部材角 8%rad においても最大荷重の 93%程度の耐力を有していることがわかる。

この荷重-部材角関係より、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 2 サイクル載荷を行った部材角においても 1 サイクル目のみを対象とし、荷重-部材角関係図において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累積エネルギーとして算出した。耐力の異なる 2 体を比較するため、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最大経験部材角の関係を図-3 に示す。部材角 2%rad 以降では 2 体の供試体の累積吸収エネルギーに大きな差が生じ、8%rad では一体打ち供試体と比較して接合部のある供試体の累積吸収エネルギーは半分以下の値を示している。一体打ち供試体においては降伏後の軸方向鉄筋が荷重エネルギーの吸収機構として働いて

いると考えられる。一方、接合部のある供試体では軸方向鉄筋が柱基部で連続していないことからエネルギー吸収に貢献していないと推察できるため、累積吸収エネルギー値が小さくなったと考える。

各部材角の 1 サイクル後に載荷荷重を 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経験最大部材角との関係を図-4 に示す。一体打ち供試体では初期より、接合部のある供試体では部材角 5%rad 以降、経験最大部材角の増加に伴い残留変位も増加している。部材角 1%rad 以降では接合部のある供試体と比較して一体打ちの供試体の残留変位が大きいことがわかる。これは、降伏後の軸方向鉄筋の塑性化および変形により、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ためと考える。一方、接合部のある供試体では最大荷重点の部材角である 5%rad までは残留変位が非常に小さく、原点指向性が高い。コンクリートの損傷範囲が接合部周辺に集中し、軸方向鉄筋が接合部周辺に存在しないためプレストレスによる復元性を阻害するものがなく、ひび割れが基部から接合部までの領域に集中



(a) 一体打ち

(b) 接合部有

写真-3 部材角 8%rad 載荷後の供試体の様子

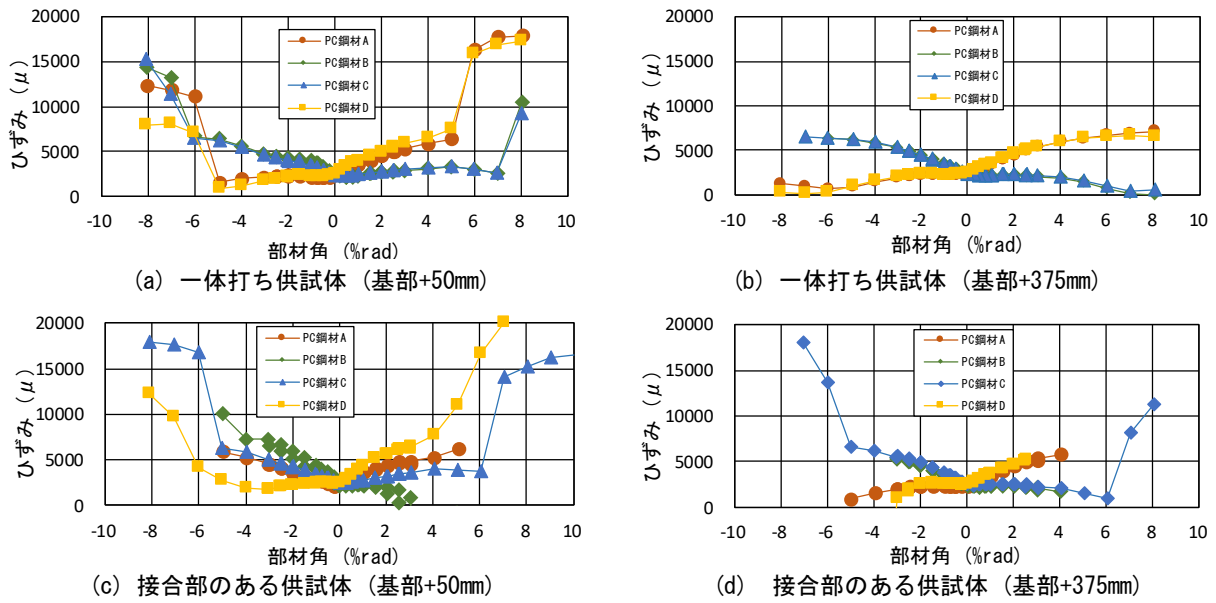


図-5 PC鋼材ひずみ-部材角関係

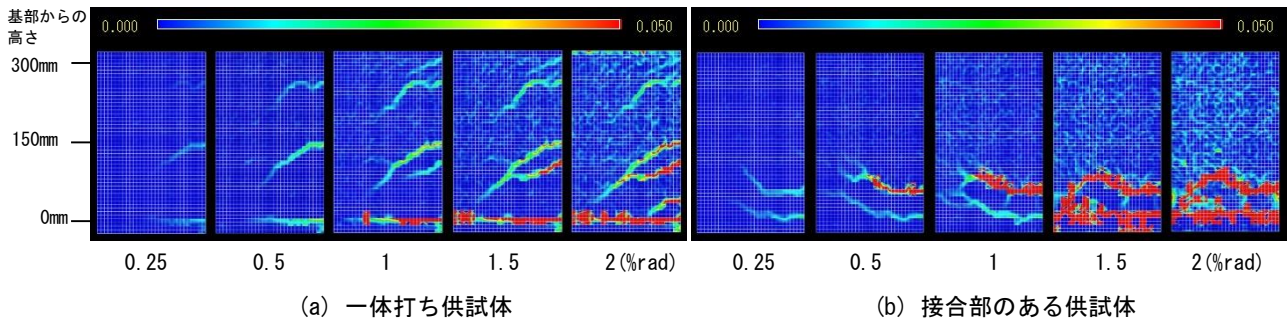


図-6 ひずみ分布の変化

することによって、残留変位が小さくなっていると考えられる。ポストピークである部材角 5%rad 以降は接合部のある供試体でも PC 鋼材が降伏、塑性化するため、供試体の残留変位が急激に増加している。

3.2 PC 鋼材ひずみ

柱部の基部周辺である基部+50mm 位置と、荷重点までの半分の高さである基部から+375mm 位置の各サイクルでの最大変位時の PC 鋼材のひずみを図-5 に示す。プレストレス力導入による緊張によって約 2300 μ の引張ひずみが生じた状態から荷重を開始した。部材角 $\pm 4\%$ rad 以上においてデータの無い点はひずみゲージが破損したため計測を終了した箇所である。基部から+50 mm では一体打ち供試体、接合部のある供試体ともに部材角 4~5%rad 程度で引張側の PC 鋼材が降伏ひずみ(0.2%耐力ひずみ)である約 7800 μ に達した。この部材角は供試体が耐力を示したときの部材角と一致する。これより大きな部材角では、中立軸が PC 鋼材よりも外側となるため、部材角正側、負側ともに大きな塑性引張ひずみが生じている。また、PC 鋼材の降伏によってプレストレス力による復元性が失われたことにより、3.1 節で述べたように 5%rad 以降で供試体の残留変位が急激に増加していると

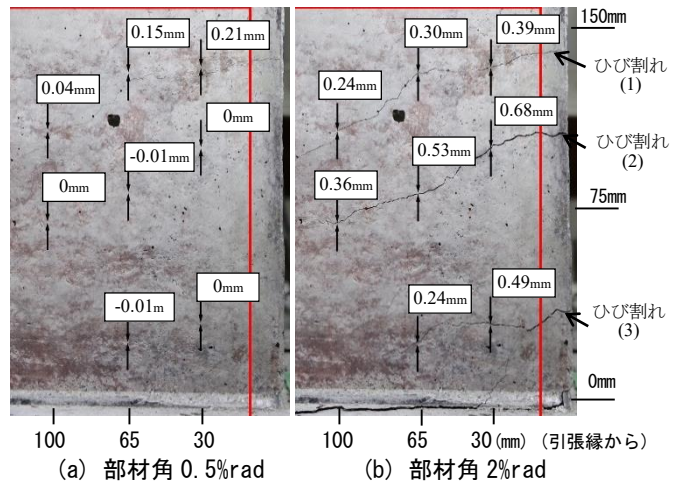


図-7 画像解析によるひび割れ幅の算出(一体打ち)

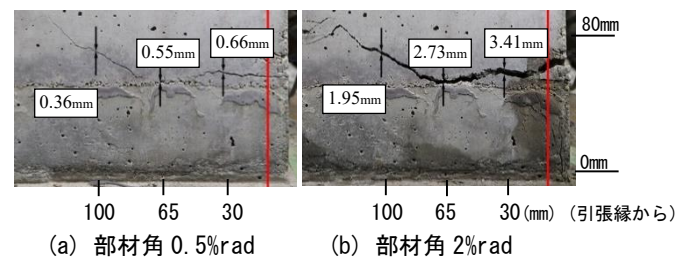
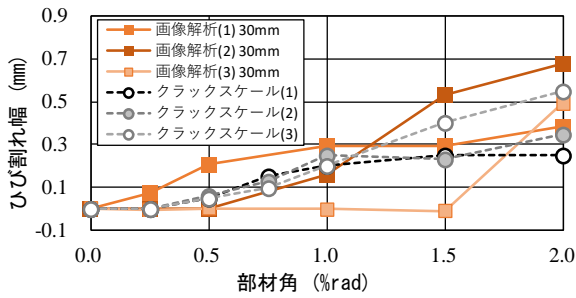
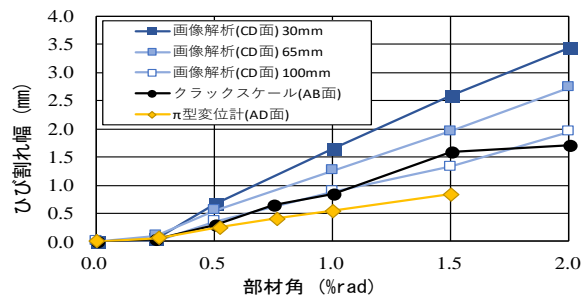


図-8 画像解析によるひび割れ幅の算出(接合部有)

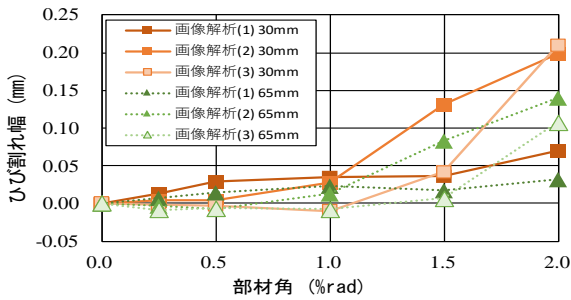


(a) 一体打ち供試体

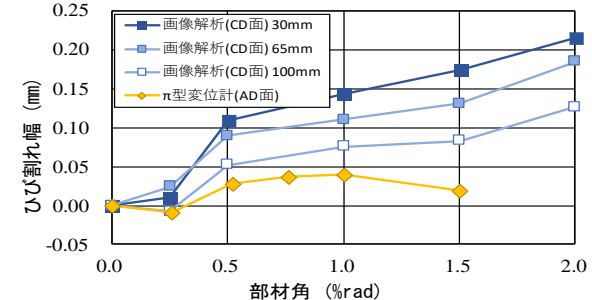


(b) 接合部のある供試体

図-9 各載荷サイクルの最大部材角時のひび割れ幅の変化



(a) 一体打ち供試体



(b) 接合部のある供試体

図-10 荷重 0kN 時の残留ひびわれ幅の変化

考えられる。接合部のある供試体では一体打ち供試体の PC 鋼材と比較して、PC 鋼材 4 本のひずみ値のばらつきが大きい。これは接合部に軸方向鉄筋が存在しないため、損傷による応力の影響が PC 鋼材に集中すること、供試体角部ごとのひび割れ位置や損傷範囲の程度に差があり、軸方向鉄筋による応力負担がないためこれらの影響が相対的に大きくなることが要因であると考えられる。

3.3 供試体表面のひずみ分布

2 体の供試体の CD(南)面を撮影し、画像解析による非接触ひずみ計測を行った。一体打ち供試体での軸方向鉄筋降伏後の損傷を計測するため、載荷開始前を基準に部材角 2%rad までを対象とした。解析結果を図-6 に示す。

一体打ち供試体では、基部から柱中央に曲げひび割れが分散して発生しており、部材角 0.25%rad からひずみが該当箇所集中していたことがわかる。部材角の増加に伴い局所的にひずみが大きくなり、ひび割れ長さおよびひびわれ幅が進展し、損傷していることが可視化できた。

接合部のある供試体では、基部+0mm および+50mm から発生したひび割れのみが進展し、これより高い箇所には引張ひずみが集中した箇所がない。損傷は基部に集中しており、接合部の開きより上部はほぼ剛体として接合部を基点とした回転をしていると推測できる。

3.4 画像解析によるひび割れ幅の算出

画像解析によって図-6 でひび割れ箇所として描画された領域の次の箇所において、ひび割れの上下の節点のピクセル移動量を実寸法に換算し、ひび割れ幅として算出した。算出箇所は軸方向鉄筋位置である引張縁から水平方向へ 30mm 内側の位置、2%rad でのひび割れ先端周

辺である引張縁から 100mm 内側の位置、およびその中間である引張縁から 65mm 内側の位置の 3 か所とした。一体打ち供試体では算出したひび割れ 3 本を上方から順にひび割れ(1)~(3)とした。図-7、図-8 に部材角 0.5%rad および 2%rad で算出したひび割れ幅を示す。1 本の連続したひび割れにおいては引張縁に近いほどひび割れ幅が大きく、内側ほどひび割れ幅が小さく算出される傾向があり、目視での水平方向のひび割れ幅の変化と一致する。

図-9 にひび割れ幅と部材角の関係を示す。いずれの供試体、いずれの算出箇所においても部材角の増加に伴いひび割れ幅が増加している。また、いずれの部材角においても、一体打ち供試体の 3 本の各ひび割れ幅と比較して、接合部のある供試体の接合部のひび割れ幅が大きい。ここからも一体打ち供試体では損傷が供試体鉛直方向に分散しているのに対し、接合部のある供試体では接合部周辺に損傷が集中し、接合部のひび割れが開いていることがわかる。また、画像解析によるひび割れ幅の計測では、目視でひび割れが確認される前の状態であっても、ひび割れ幅を算出することができるため、一体打ち供試体のひび割れ(3)が部材角 1.5%rad でひび割れ発生し、2%rad までに大きく開いた挙動を観察できた。

図-9 (b) に接合部のある供試体に設置した π 型変位計によって計測したひび割れ幅と、クラックスケールによって水平方向に引張縁から 30mm 内側位置で測定したひび割れ幅の部材角増加に伴う変化を合わせて示す。画像解析(CD 面)、 π 型変位計の設置(AD 面)、クラックスケールによる測定(AB 面)はそれぞれ異なる供試体面で行ったため、ひび割れ幅の数値を直接比較することはできな

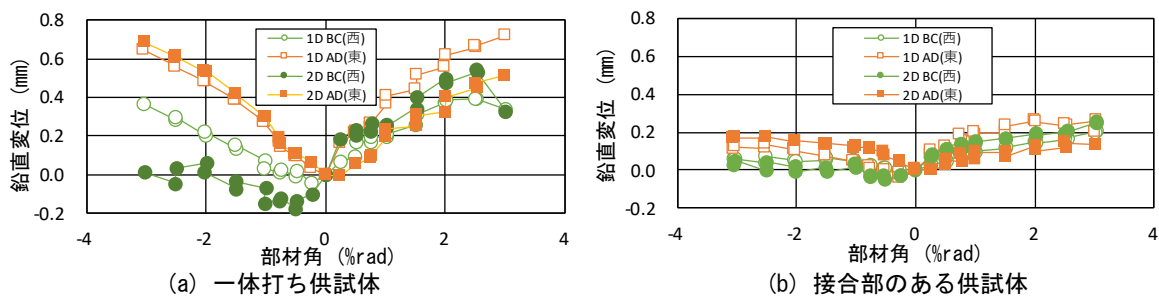


図-11 部材角 0%rad 時の供試体柱部の鉛直変位

いが、部材角増加に伴いひび割れ幅が増加する傾向は一致している。 π 型変位計は基部+50mmの接合部位置で測定を行ったが、基部+0mm位置のひび割れが開く影響を受け、接合部位置でのひびわれ幅が実際より小さく測定されている可能性がある。画像解析によるひび割れ幅の算出とその他の方法によるひび割れ幅の計測の一致精度については、今後同一箇所のひび割れを解析、計測することによって検証する必要がある。

3.5 画像解析による残留ひび割れ幅の算出

載荷開始前の画像を基準とし、各部材角サイクル後に荷重 0kN まで除荷した際と比較して画像解析を行い、残留ひび割れ幅を算出した。図-10に残留ひび割れ幅と経験最大部材角の関係を示す。部材角 0.5%rad 以下では、ひび割れが目視で判別できないほど小さいが、画像解析からは 0.05mm 以下ひび割れ幅が残留していることがわかる。部材角 2%rad では、いずれの供試体でも最大で約 0.20mm のひび割れが残留している。一体打ち供試体では複数のひび割れ幅の累積が供試体全体の变形として残留するため、接合部のある供試体と比較して供試体の残留変位が大きく表れたと考えられる。一体打ち供試体ではひび割れ(3)が部材角 1.5%rad から 2%rad にかけて大きく進展し、ひび割れ幅も大きく残留した。接合部のある供試体では π 型変位計で測定した残留ひび割れ幅と比較して、画像解析から算出した残留ひび割れ幅が大きく、これらの傾向は最大部材角時のひび割れと同様であった。

3.6 供試体の鉛直方向変位

図-11に各載荷サイクル後、部材角 0%rad の原位置まで除荷した際の供試体高さ 1D, 2D 位置における鉛直変位と経験最大部材角の関係を示す。いずれの供試体でも部材角の増加に伴い鉛直変位が増加しており、測定位置が上方へ変位している。これは、供試体が上方へ伸びる方向の変形をしていることを示す。一体打ち供試体における鉛直変位は測定箇所におけるばらつきが大きい、これは一体打ち供試体では荷重による損傷が柱基部から荷重点高さ中央に分布し、部材角 0%rad まで除荷した際も残留ひびわれが各ひずみ集中箇所に蓄積すること、軸方向鉄筋の塑性変形の影響によって供試体面の鉛直方向変化に差が生じるためと考えられる。一方、接合部のあ

る供試体は一体打ち供試体と比較して鉛直変位が小さい。これは軸方向鉄筋が塑性変形していないこと、また損傷箇所が基部周辺に集中しており、除荷後のひび割れが原位置の状態へ近い形で閉じることによると考えられる。

4. まとめ

プレストレスを導入した一体打ち柱供試体と接合部のある柱供試体の正負交番載荷および画像解析により、得られた知見を以下に示す。

- (1) 荷重一部材角関係から、接合部のある供試体の累積吸収エネルギーは一体打ち供試体より小さく、8%rad で半分以下となった。
- (2) 残留変位はいずれの部材角においても一体打ち供試体より接合部のある供試体で小さい傾向にあった。
- (3) 画像解析によりひずみ分布を可視化し、一体打ち供試体では柱基部から荷重点高さ中央にかけてひずみおよびひび割れが分布し、接合部のある供試体では接合部周辺に損傷が集中している様子が確認できた。
- (4) 画像解析によって、節点移動量からひび割れ幅の算出ができた。部材角の増加に伴い最大部材角時のひび割れ幅および除荷後の残留ひび割れ幅が増加する傾向がわかった。

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。また研究の一部は平成 30 年度阪神高速若手研究助成を受けて行った。

参考文献

- 1) 社団法人プレレストコンクリート技術協会：プレ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：プレレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究，プレ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