

## 正負交番载荷を受けるPCaPC柱の接合部が柱の損傷に及ぼす影響

明石工業高等専門学校 修士(工学) ○生田 麻実  
神戸大学 正会員 博士(工学) 三木 朋広

Abstract : A prestressed concrete column specimen with a joint and a monolithic prestressed concrete column specimen as a reference were prepared to use in the reversed cyclic loading test. The joint was made at the base of the column to simulate a connection of precast prestressed concrete members. The experiment shows that the relationship between the lateral load and drift angle, accumulated energy absorption and residual lateral displacement differed in each specimen. The main reason of the difference is that the specimen with a joint has non-continuous axial rebars at the joint. The influence of the discontinuity of the axial longitudinal at the joint on the failure mode and the deformation performance was experimentally confirmed by the measurement of the strains of PC bars and the longitudinal rebars. In addition, the strain distribution was visualized in terms of the image analysis using digital images of the specimen surface taken before and after deformation during loading test.

Key words : Precast Prestressed Concrete Columns, Reversed cyclic loading, Digital image analysis

### 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する変位が小さくなる原点指向性が期待できる。プレキャスト(以下、PCa)工法と併用するプレキャストプレストレスト(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。これまでの著者らの研究<sup>1)</sup>によって、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にプレストレスを導入し、それを対象とした正負交番载荷を行い、一体打ちにより製作した供試体との比較によって基本的な耐震性状を把握した。本研究では同载荷実験において、柱基部周辺の画像解析により非接触ひずみ計測を行い、ひずみ分布、ひび割れの性状と範囲を可視化するとともに、ひび割れ幅の算出、ひび割れ発生荷重の推定を行った。

### 2. 実験概要<sup>1)</sup>

#### 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250×250 mm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50 mm上方位置で打ち止め、打継ぎ面はレイタンス処理などを行わず、フーチング部のコンクリートが硬化したあとに柱部の鉄筋を配置してコンクリートを打ち継いだ。ここでいう接合部とは、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750 mm上方位置を载荷高さとした。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φ23 mm, 外径φ25.5 mm)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本配置し、4MPaの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。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

表-1 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使用)			グラウト	PC 鋼材 SBPR(930/1180) φ 13mm		軸方向鉄筋 SD345 D10	せん断補強筋 SD295 D6
	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
一体打ち	46	36.3	34 200	67.7	1175	201 000	369	328
接合部有	41	35.4	37 500	67.7	1175	201 000	369	328

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 正負交番载荷

写真-1 に供試体载荷の様子を示す。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。300 kN 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载荷を行った。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サイクル正負交番载荷を行い、その後 3.5, 4, 5, 6, 7, 8 (%rad)まで各部材角1サイクルずつ载荷を行った。接合部のある供試体では部材角正側のみ 9, 10 (%rad)まで载荷を行った。

この際、図-1 に示す位置で PC 鋼材ひずみおよび軸方向鉄筋ひずみを測定した。接合部のある供試体は柱基部から上方へ+50 mm 位置で軸方向鉄筋が連続していないため、ほか 3 箇所のひずみを測定した。また、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

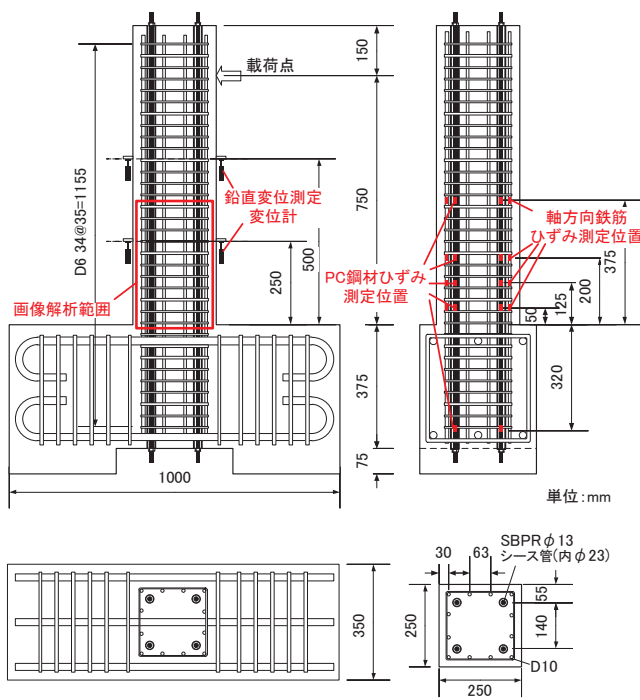


図-1 供試体配筋図 (一体打ち供試体)

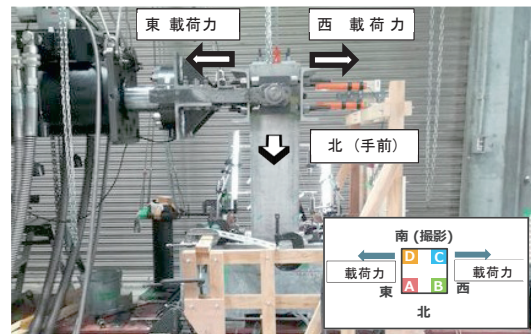


写真-1 载荷装置

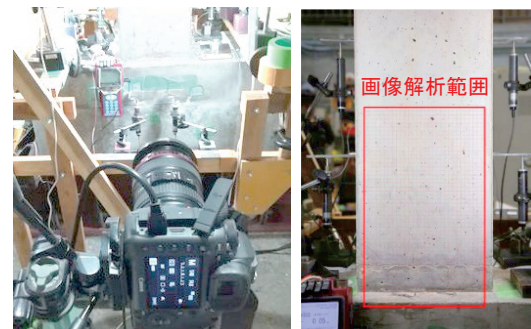


写真-2 画像撮影の様子・解析範囲

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、荷重など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できる手法である<sup>2)</sup>。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それぞれの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。なお、断面計算によって最大耐力理論値を算出した場合、軸方向鉄筋12本と0本では約30kNの差が生じる。最大荷重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て、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しなかった。

この荷重一部材角関係より、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サイクル荷重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、荷重一部材角関係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。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ことが分かる。

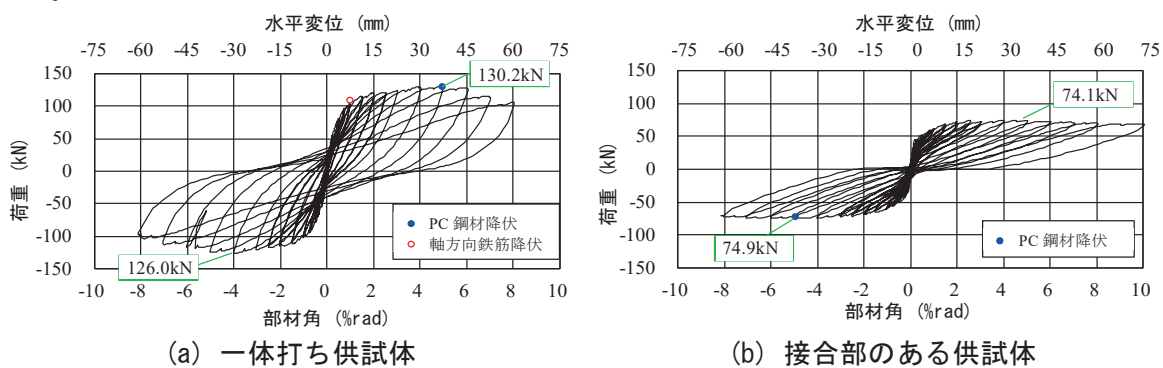


図-2 荷重一部材角(水平変位)関係

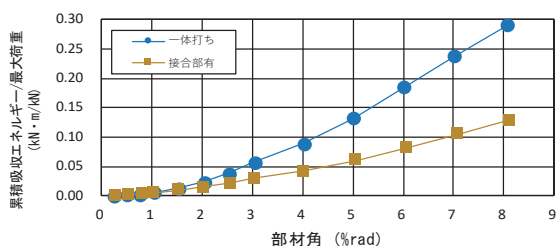


図-3 累積吸収エネルギー

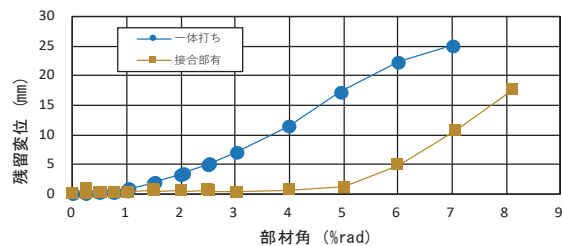


図-4 残留変位

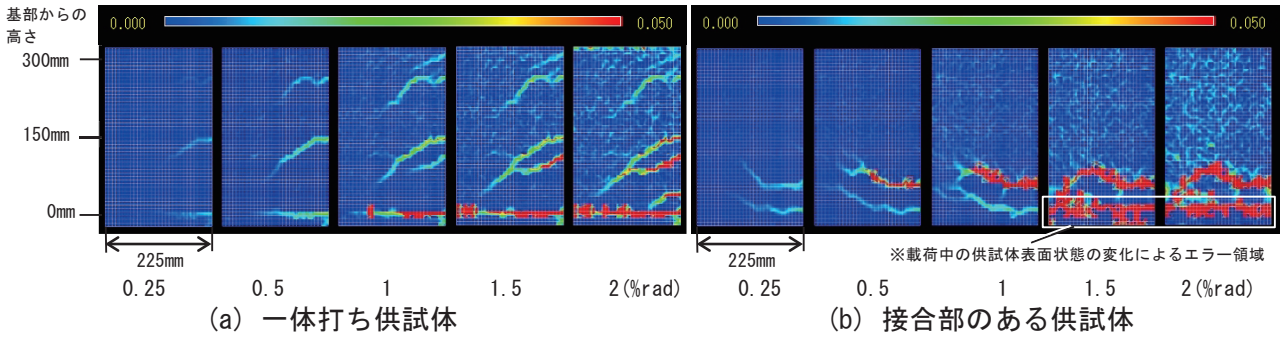


図-5 ひずみ分布の変化

各部材角の1サイクル後に荷重を0 kN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分かる。部材角5%rad以降のポストピークでは、接合部のある供試体でも残留変位が急激に増加した。

3.2 供試体表面のひずみ分布

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。載荷開始前を基準とし、一体打ち供試体での軸方向鉄筋降伏後の部材角2%radまでを対象とした。解析結果を図-5に示す。図-5では載荷力正側のそれぞれの部材角での最大変位時ひずみ分布を示しているため、載荷力負側によって生じたひび割れは閉じており、コンター図上では引張ひずみとして表示されていない。

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、後にひび割れが目視される箇所には部材角0.25%radの状態からひずみが集中していたことが分かる。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、接合部周辺から発生したひび割れのみが進展し、+50mm位置より上方で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て回転していたと推測できる。

3.3 画像解析によるひび割れ幅の算出

画像解析によって図-5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。算出したひび割れを上方から順にM-crack(1)~(4)、J-

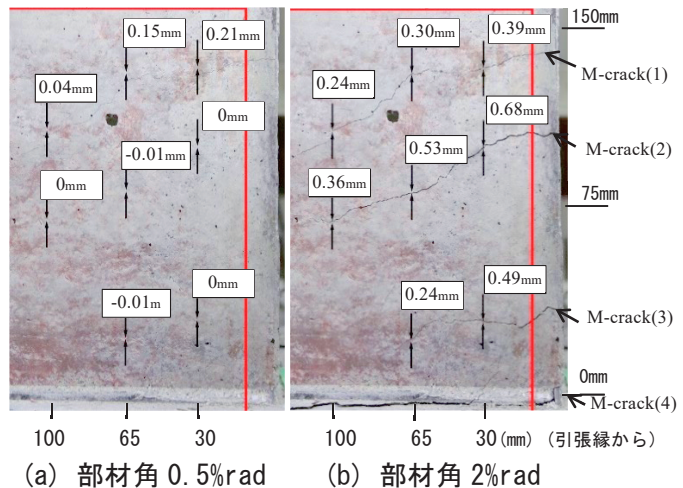


図-6 画像解析によるひび割れ幅の算出(一体打ち)

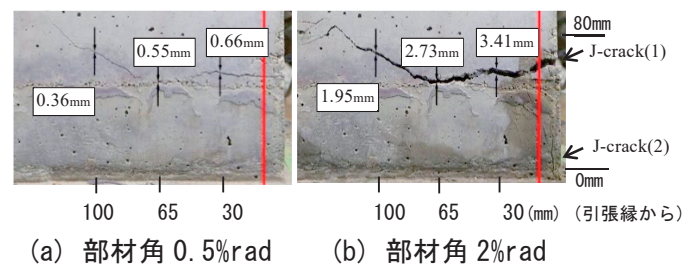
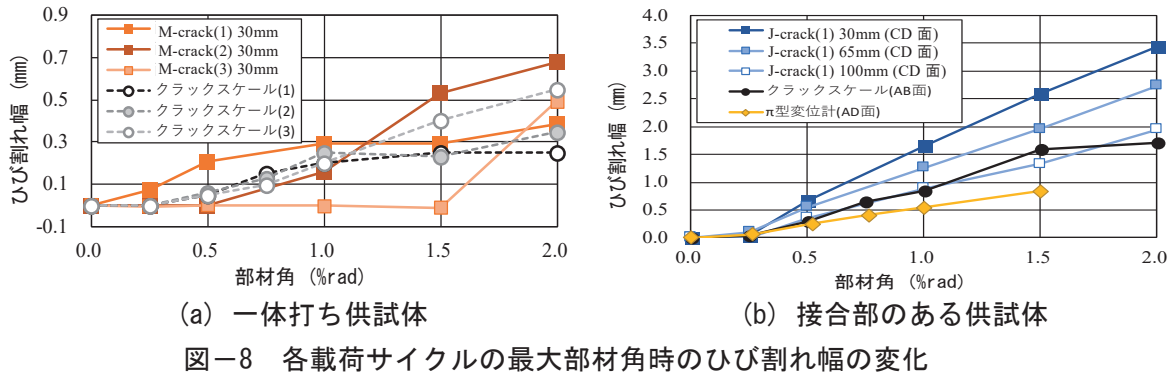


図-7 画像解析によるひび割れ幅の算出(接合部有)



crack(1)～(2)とした。図-6、図-7に部材角 0.5%rad および 2%rad で進展したひびわれ幅の画像解析による算出値を示す。1本の連続したひび割れで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-8にひび割れ幅と部材角の関係を示す。いずれの供試体においても、すべての算出箇所でも部材角の増加に伴いひび割れ幅が増加していることが分かる。また、いずれの部材角においても、一体打ち供試体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。

図-8(b)には、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できないものの、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型変位計をもちいて基部+50mmの接合部位置で開口変位を測定したが、基部+0mm位置のひび割れが開くことで変位計の下側標点が上方へわずかに移動する影響を受け、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算出とそのほかの方法によるひび割れ幅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。

### 3.4 ひび割れ発生荷重前後の画像解析によるひび割れ幅の算出

図-9にひび割れ発生荷重前後までの画像解析によるひび割れ幅と水平荷重の関係を示す。一体打ち供試体では、20kNで柱基部であるM-crack(4)が、また30kNでM-crack(1)が発生した。接合部のある供試体では、30kNで柱基部のJ-crack(2)が、45kNで接合部のJ-crack(1)が発生した。いずれのひび割れも荷重の増加に伴いひび割れ幅が増加している。また、AD面のπ型変位計による計測でも43kNでひび割れが発生しており、J-crack(2)のひび割れ発生荷重とほぼ一致していた。いずれの供試体でもまず柱基部にひび割れが発生しているが、図-7のように接合部のある供試体は接合部位置にひび割れが発生した後は接合部の開口の進展が卓越していることが分かる。

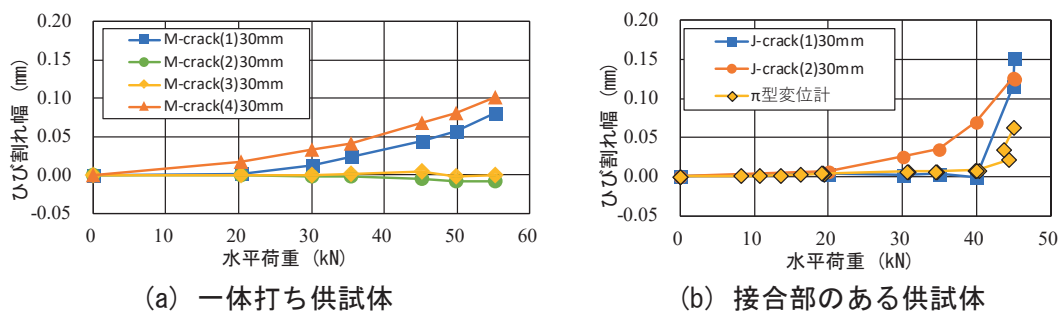


表-2 ひびわれ発生荷重の推定値 (kN)

供試体	画像解析による算出値	$\pi$ 型変位計の計測による算出値	断面計算による算出値	軸方向鉄筋の荷重-ひずみ関係による算出値
一体打ち	20	---	45	(明確なひずみ勾配変化点なし)
接合部有	30	43 (接合部での計測)	15~45 (引張強度による値の幅)	45

### 3.5 ひび割れ発生荷重の推定

表-2 に載荷時の計測データおよび 3.4 節で説明した画像解析から算出したひび割れ発生荷重の推定値を示す。接合部のある供試体は、本実験では打継ぎ作業前にレイタンス処理を行っていないため、低荷重の間は接合部のコンクリートも引張応力を負担していることが推察される。そのため、断面計算によるひび割れ発生荷重の推定においては、接合部のコンクリートが一体打ちと同等の引張強度を有していると仮定した場合を最大値、引張強度をゼロと仮定した場合を最小値として、ひび割れ発生荷重値に範囲をもって示す。

また、軸方向鉄筋ひずみの計測から、荷重-ひずみ関係の勾配変化点をひび割れ発生荷重と推定した。ここでは、ひび割れ発生前はコンクリートと鉄筋、PC 鋼材によって負担されていた引張応力が、ひび割れ発生後は主に鉄筋と PC 鋼材の負担へと変化するためにひずみ増分が大きくなると仮定した。画像解析により推定したひび割れ発生荷重は、そのほかの方法から推定したひび割れ荷重と比較して小さい値を示した。画像解析によるひずみ計測では目視によるひび割れ確認が困難な低荷重時、またコンクリートによる引張応力の負担が残存しており軸方向鉄筋のひずみ増分に変化が現れないような低荷重時においても微細なひび割れの発生を捉えることができたと考えられる。

## 4. おわりに

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-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、8rad で半分以下となった。また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。
- (2) 画像解析によりひずみを可視化し、一体打ち供試体では柱基部から柱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する様子が確認できた。
- (3) 画像解析において節点移動量からひび割れ幅の算出を行い、部材角の増加に伴いひび割れ幅が大きくなり、接合部のある供試体では一体打ち供試体よりひび割れ 1 本あたりのひび割れ幅が大きくなる傾向を確認した。また画像解析による算出結果からひび割れ発生荷重を推定した。

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) 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
- 2) 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