

## 上面から水分供給を受ける PC 梁の ASR による変形状

九州大学大学院	学生会員	○阪井	峻
九州大学大学院		修士 (理学)	山本 大介
九州大学大学院	正会員	博士 (工学)	濱田 秀則
九州大学大学院	正会員	博士 (工学)	佐川 康貴

Abstract : In this study, PC beam specimens with using ASR reactive aggregate which moisture was supplied only from the top surface were prepared. These specimens were intended to be bridge superstructure without waterproof layer. The internal cracks and the deformation of specimen due to ASR expansion were observed. As the results, the amount of internal cracks in the PC beam and those in the plain beam without prestressing were almost same. Furthermore, prestressing reduced the longitudinal expansion and the camber of the beam. The degradation of mechanical properties of concrete due to ASR changed the failure pattern in the bending test from flexural tension to shear compression failure.

Key words : ASR, PC beam, Internal crack, Deformation behavior

### 1. はじめに

1986年にアルカリシリカ反応 (ASR) の抑制対策が実施されて以来, 新設構造物のASRによる劣化事例は著しく減少していると考えられる。しかし, それ以前に建設されたコンクリート構造物にはASRによる劣化が見られるものもある。道路橋示方書では, 平成14年 (2002年) 版からアスファルト舗装を施工するコンクリート床板は防水層などの設置が原則とされたが, それ以前に建設された橋梁では, ASRの促進要因となる雨水がコンクリートに供給され, ASRによる劣化が助長されることが懸念される。

既往の研究<sup>1), 2)</sup>においてASRが生じたプレストレストコンクリート (PC) 供試体を対象に, 膨張挙動評価や, ASRにより生じた表面ひび割れ特性, 耐荷特性などに関する研究は数多く行われてきたが, ASR膨張量ごとの内部ひび割れ性状および反り変形に関する検討は, ほとんどないのが現状である。

本研究では, PC梁の上面のみから水分供給をすることで, 防水層のない橋梁上部工の状態の一部を模擬した。そして, ASRにより劣化したPC梁供試体の内部ひび割れおよび変形状について実験的に考察した。また, 曲げ載荷試験を行い, PC梁供試体の破壊形態について検討した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント (密度  $3.16\text{g/cm}^3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} 0.51\%$ ) を, 細骨材は石灰石砕砂 (表乾密度  $2.65\text{g/cm}^3$ , 吸水率  $1.43\%$ ) を使用した。粗骨材はペシマム現象を起こす反応性骨材 (表乾密度  $2.68\text{g/cm}^3$ , 吸水率  $1.56\%$ ) と非反応性骨材である石灰石砕石 (表乾密度  $2.70\text{g/cm}^3$ , 吸水率  $1.43\%$ ) を質量比  $3:7$  で用いた。なお, この反応性骨材は JIS A 1145 「骨材のアルカリシリカ反応性試験 (化学法)」の結果, アルカリ濃度減少量  $R_c$  は  $93\text{mmol/l}$ , 溶解シリカ量  $S_c$  は  $641\text{mmol/l}$  であり, 「無害でない」と判定されたものである。

コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比 (W/C) は  $40\%$  とした。コンクリート中のアルカリ総量を高めるため, 練混ぜ水に  $\text{NaCl}$  試薬を添加し,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  が  $8\text{kg/m}^3$  となるようにした。

#### 2.2 供試体

図-1 に示すような  $110 \times 210 \times 750\text{mm}$  の梁部材の供試体と, 膨張挙動をモニタリングするため円柱供試体

表-1 コンクリートの配合

供試体	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			混和剤		NaCl (kg/m <sup>3</sup> )		
		W	C	S	G				
					反応性	石灰石			
ASRあり	40	180	450	754	280	658	1688	18	10.8
ASRなし					993 (石灰石のみ)				0

(φ100×200mm)を作製した。また梁供試体の比較用に、同寸法の無筋梁供試体 (ASR あり) と、PC にはあるが骨材に反応性骨材を用いずに石灰石碎石のみを使用した PC 梁供試体 (ASR なし) も作製した。

打設後 24 時間で脱型し、供試体を湿布で覆い、20℃、100%R.H.の環境で材齢 28 日まで養生した。その後、PC 梁供試体では鋼製シースの内部に PC 鋼棒を断面中心より 35mm 下方に偏心させて配置し、引張強度の 65%の 160kN の緊張力を与え、プレストレス (下縁 13.8N/mm<sup>2</sup>, 上縁 0.4N/mm<sup>2</sup>) を導入した。プレストレス導入後、円柱供試体は 100%R.H.で、梁供試体の側面はエポキシ樹脂を塗布し、上面は水を湛水、下面は乾燥させる条件で、40℃環境下で促進養生を実施した。プレストレス導入後を膨張量の初期値 (0μ) とした。また、プレストレス導入後に、梁供試体の反り量、超音波伝播速度および PC 鋼棒のひずみの初期値を計測した。さらに、円柱供試体が設定した膨張量 (500μ, 1000μ, 2000μ) に達した時点で梁供試体の内部ひび割れ観察を行った。また、円柱供試体の膨張量が 0μ 時および 2000μ 時に PC 梁供試体 (ASR あり) の下面に変位計を設置し、曲げ載荷試験を行った。表-2 に供試体の種類および本数の一覧を示す。なお、μは「×10<sup>-6</sup>」を表す。

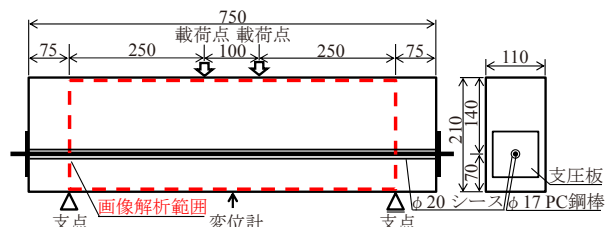


図-1 供試体形状寸法

表-2 供試体の種類および本数の一覧

供試体	膨張量などのモニタリング	内部ひび割れ観察 (500μ,1000μ,2000μ時)	曲げ試験
PC(ASRあり)	1本	3本(500μ,1000μ,2000μ時)	2本
PC(ASRなし)	1本	—	—
無筋	1本	3本(500μ,1000μ,2000μ時)	—

### 3. 促進膨張試験による劣化進行状況

本研究では、材齢28日にプレストレスを導入した後、梁供試体上面の膨張量、反り量、超音波伝播速度、PC鋼棒のひずみの初期値を計測した。また、ASRによる内部ひび割れの進展過程を観察するため、円柱供試体の膨張量が500μ, 1000μ, 2000μに達した時点で、梁供試体を切断し、内部ひび割れ観察を行った。

#### 3.1 実験方法

##### (1) 膨張量および反り量

プレストレス導入後を膨張量の初期値 (0μ) とし、ゲージプラグを、円柱供試体には側面に、梁供試体には上面に貼り付け、コンタクトゲージ法により膨張量を測定した。また、梁供試体の反り変形を計測するため、鋼製アングルの基準高さからの梁供試体の上面および下面の距離を、デプスゲージを用いて計測した。

##### (2) 超音波伝播速度およびPC鋼棒のひずみ

図-2に示す測定点A-Eにおいて鉛直方向および梁幅方向の超音波伝播時間の計測し、伝播時間で除して、超音波伝播速度を算出した。PC鋼棒に検長5mmのひずみゲージを貼付し、PC鋼棒のひずみを測定した。

##### (3) 蛍光樹脂含浸による内部ひび割れ観察

プレストレスを除荷した後、図-3に示すように観察面が210×110mmの大きさとなるようにコンクリートカッターで切断して試料を採取し、真空の条件で蛍光樹脂の含浸を行った。ブラックライトを照射した際に目視できる、ひび割れ総延長をコンクリート断面積で除し、内部ひび割れ密度を算出した。

#### 3.2 実験結果

##### (1) 促進膨張試験結果

図-4に梁供試体の梁軸方向および梁軸直角方向と円柱供試体の膨張量の変化を示す。円柱供試体は9日

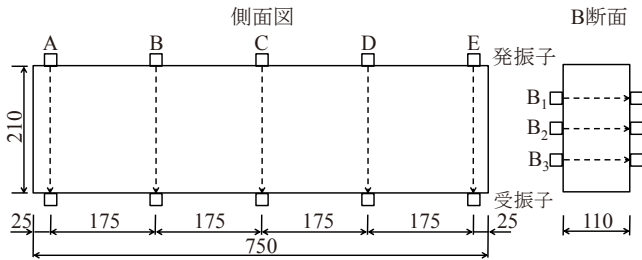


図-2 超音波伝播速度の測定位置  
(左図：鉛直方向，右図：梁幅方向)

約500 $\mu$ に、15日で約1000 $\mu$ に達した。また、47日で約2000 $\mu$ に達した。PC梁供試体 (ASRなし) の軸方向および軸直角方向が吸水膨張の影響で、約200 $\mu$ 膨張する結果となった。PC梁供試体 (ASRあり) では、プレストレスの拘束により、軸直角方向の膨張が軸方向の膨張と比べて卓越し、軸直角方向の膨張量は軸方向の膨張量の2.2倍程度の値を示した。また、95日で無筋梁供試体の軸方向は約3500 $\mu$ 、軸直角方向は約3000 $\mu$ 膨張した。PC梁供試体 (ASRあり) と無筋梁供試体を比較すると、PC梁供試体 (ASRあり) の軸直角方向の膨張量は無筋梁供試体の膨張量よりもやや大きい結果となったが、軸方向の膨張量は、プレストレスの拘束により無筋梁供試体の膨張量の半分程度に抑制された。

(2) 内部ひび割れ観察結果

写真-1に円柱供試体の膨張量2000 $\mu$ 時 (促進期間47日) におけるPC梁供試体 (ASRあり) および無筋梁供試体の内部断面のブラックライト照射像を示す。ここで、ひび割れ角度0~30度は水平方向ひび割れ、角度31~60度は斜め方向ひび割れ、角度61~90度は鉛直方向ひび割れと定義する。写真-1よりASRによりひび割れが多く発生していることが分かる。

図-5に円柱供試体の膨張量500 $\mu$ 時 (促進期間9日)、膨張量1000 $\mu$ 時 (促進期間15日)、膨張量2000 $\mu$ 時 (促進期間47日) に算出した内部ひび割れ密度と促進期間の関係を示す。図-5よりPC梁供試体と無筋梁供試体の内部ひび割れ密度はほぼ同様に増加する傾向があり、プレストレスの拘束の有無で内部ひび割れ密度はほぼ変わらないことが分かった。また、促進期間15日までに内部ひび割れ密度は大きく増加した。

図-6に膨張量2000 $\mu$ 時の上面より70mm、140mmと高さ方向で3等分したときの内部ひび割れ密度を示す。本研究では、上面のみから水を供給したため、下面付近よりも上面付近の方が多くひび割れが発生した。また、PC梁供試体と無筋梁供試体の内部ひび割れ密度の

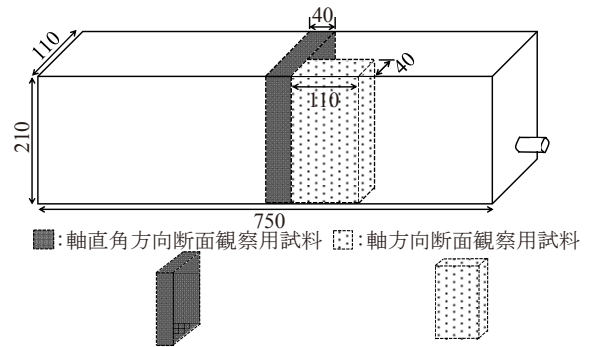


図-3 内部ひび割れ観察用の試料採取位置

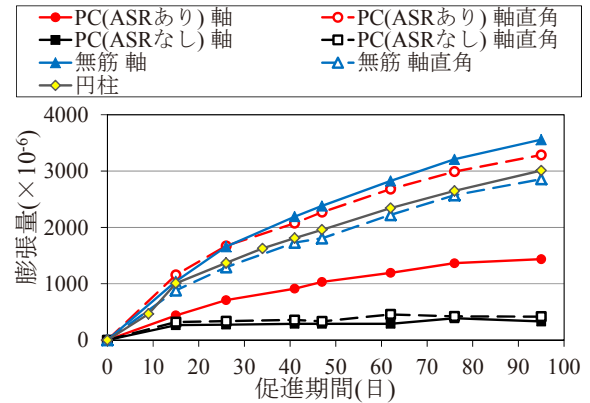


図-4 PC 梁上面の膨張量の変化

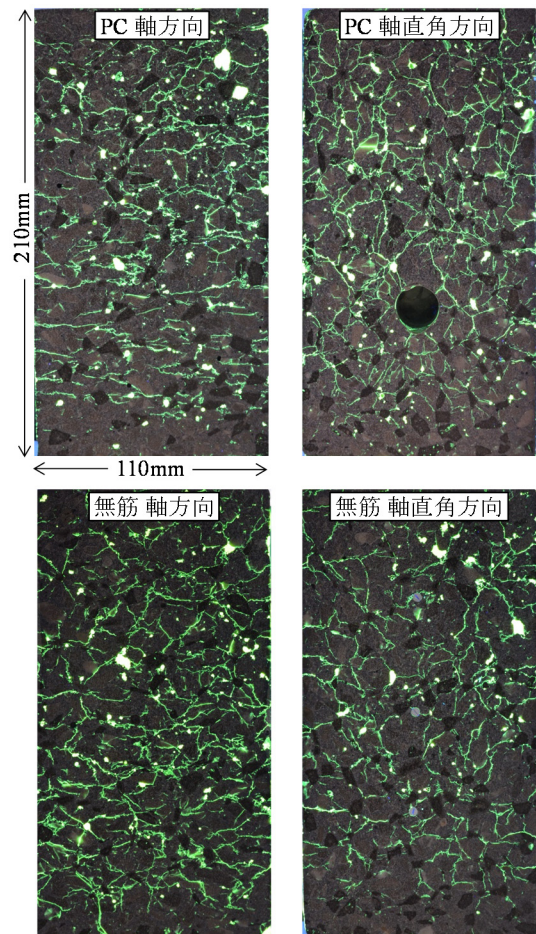


写真-1 膨張量 2000 $\mu$  時の内部断面のブラックライト照射像

合計は165~174m/m<sup>2</sup>で大差はなかった。しかし、PC軸方向の断面では、プレストレスの拘束により、水平ひび割れが多く発生していることが分かる。本研究では、下縁側にPC鋼棒を偏心させて配置したため、下部分では水平ひび割れが下部分全体の75%程度占めていることが確認できた。また、中部分全体の55%程度、上部分全体の45%程度が水平ひび割れであった。上面に近い部分ほど、プレストレスの拘束が小さくなるため、水平ひび割れの占める割合が小さくなり、斜めひび割れと鉛直ひび割れの割合が大きくなったと考えられる。PC軸直角方向および無筋梁供試体の断面では、各方向のひび割れが占める割合は同程度であった。

(3) 反り量の測定結果

図-7に梁供試体のスパン中央における反り量の経時変化を示す。なお、プレストレス導入による反り量は、PC梁供試体(ASRあり)の上面は0.17mm、下面は0.11mmであり、PC梁供試体(ASRなし)の上面は0.13mm、下面は0.11mmであった。図よりPC梁供試体(ASRなし)の反り量は、促進期間95日で上面は0.14mm、下面は0.27mmであった。PC梁供試体(ASRあり)の反り量は、促進期間95日で上面は0.85mm、下面は0.39mmであり、ASRの影響により、PC梁供試体(ASRなし)よりも大きく反り返る結果となった。無筋梁供試体の反り量は、拘束があるPC梁供試体(ASRあり)よりも大きく反り返り、促進養生95日で上面は1.36mm、下面は0.86mmであった。ここで、膨張量の測定結果から、促進期間95日での上面軸方向の長さとの下面軸方向の長さの比を計算すると、無筋梁供試体は1.0030、PC梁供試体(ASRあり)は1.0021、PC梁供試体(ASRなし)は1.0007であり、無筋梁供試体が最も大きかった(実際に測定した反り量も無筋梁供試体が最も大きい)。また、PC梁供試体(ASRあり)はプレストレスにより軸方向の膨張が抑制されたため、PC梁供試体(ASRあり)の方が無筋梁供試体よりも反り量が小さくなったと考えられる。

(4) 超音波伝播速度およびPC鋼棒のひずみの測定結果

図-8に超音波伝播速度の経時変化を示す。図-8中の値は、図-4で示した経路A~Eの5箇所を測定した結果の平均値である。PC梁供試体(ASRなし)の超音波伝播速度の低下は見られなかったが、PC梁供試体(ASRあり)と無筋梁供試体の超音波伝播速度は、ASRによりひび割れが生じたため、大きく低下する結果となった。また、促進期間95日に点B(図-2中に示す)における高さごと(上面より52.5mm, 105mm, 157.5mm)の超音波伝播速度の値を表-3に示す。上部の方が超音波伝播速度は低下する結果となった。これは図-6で確認したように、上面付近の方が下面付近よりもひび割れが多いことによるものと考えられる。

図-9にプレストレス導入後からのPC鋼棒のひずみの変化を示す。PC鋼棒のひずみは、PC梁供試体(ASRあり)の方がPC梁供試体(ASRなし)より低下する結果となった。PC梁供試体(ASRあり)の方では、ケミ

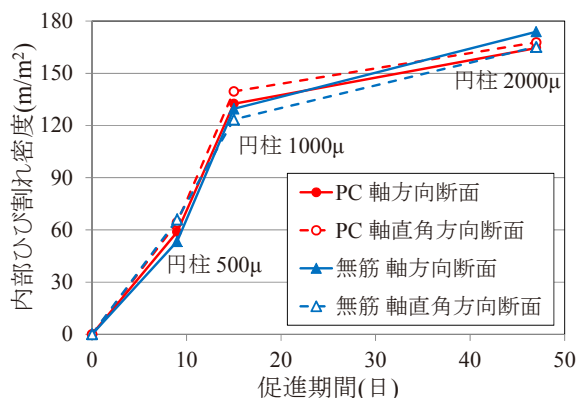


図-5 促進期間と内部ひび割れ密度の関係

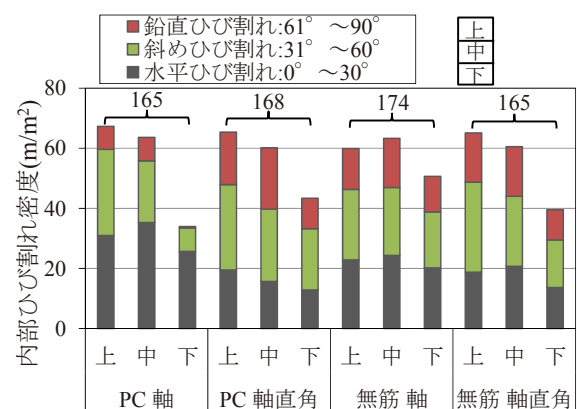


図-6 膨張量 2000 μm 時の各断面の内部ひび割れ密度

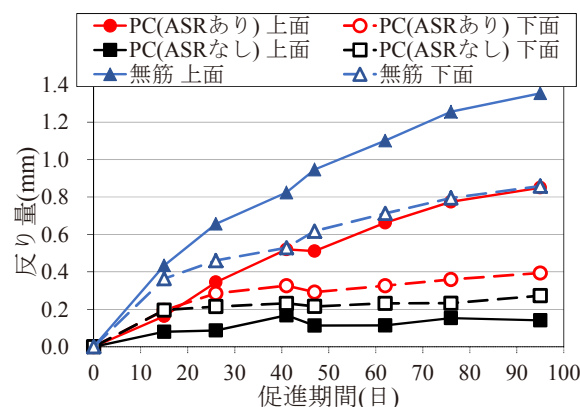


図-7 反り量の経時変化

カルプレストレスの影響でPC鋼棒のひずみは増加するとも思われるが、ASRによるひび割れが原因となる弾性係数の低下などの影響の方が大きかったと考えられる。

4. 曲げ載荷試験の結果

円柱供試体の膨張量が0 $\mu$  (促進期間0日) および2000 $\mu$  (促進期間47日) において、梁供試体の曲げ載荷試験を行い、ASRによりひび割れが生じたPC梁供試体の破壊形態について考察した。また、デジタル画像相関法を用いて、曲げ載荷試験時におけるPC梁供試体の側面の変形を計測し、ひずみ分布の特徴について検討した。

4.1 実験方法

PC梁供試体の下面に変位計を設置し、曲げ載荷試験を行った。載荷位置およびデジタル画像相関法による解析範囲 (210 $\times$ 600mm) は図-1に示すとおりとした。また、デジタル画像相関法におけるパターン認識を容易にするため、側面に黒色塗料を吹き付け、ランダム模様とした。そして、載荷時に荷重を加えた直後を初期と見なし、25kN増加させるごとに、コンクリート表面の画像をデジタルカメラ (2048画素 $\times$ 2048画素) で撮影した。実験終了後に25kNごとの画像を初期の画像と比較し、画像を解析することでひずみ分布を求めた。

4.2 実験結果

表-4に円柱供試体の膨張量0 $\mu$ 時と2000 $\mu$ 時の圧縮強度および弾性係数を示す。ASRによるひび割れの影響で圧縮強度は約19%、弾性係数は約45%低下した。

図-10に曲げ載荷試験時の荷重-変位関係を、図-11に荷重-PC鋼棒のひずみ関係を示す。また、図-12に破壊状況を示す。膨張量0 $\mu$ 時 (促進期間0日) では、約150kNで曲げひび割れが発生した。そして、PC鋼棒が降伏した後、上縁コンクリートが圧壊し、曲げ引張破壊した。これに対し、膨張量2000 $\mu$ 時 (促進期間47日) では、約125kNで曲げひび割れが発生した。そして、最大荷重 (207kN) で斜めひび割れが発生した後、急激に載荷点付近が圧壊し、せん断圧縮破壊した。表-4から確認できるように、コンクリートの圧縮強度および弾性係数が減少したため、せん断耐力が低下したためと考えられる。また、図-9でPC鋼棒のひずみが低下していることから、促進期間47日のPC梁供試体のプレストレスは低下していると考えられる。曲げひび割れは、促進期間0日のPC梁供試体では、約150kNで発生したが、促進期間47日のPC梁供試体では、約125kNで発生した。この違いはプレストレスの低下の影響などによるものと考えられる。

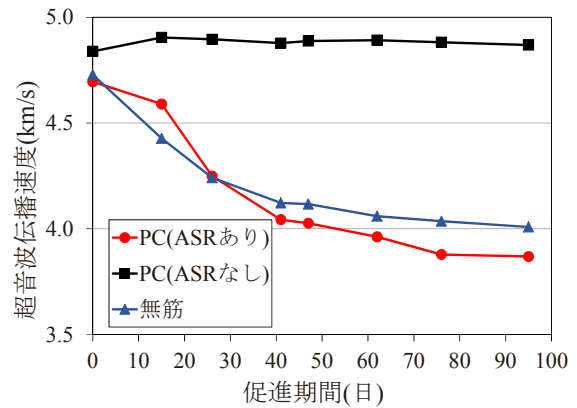


図-8 鉛直方向の超音波伝播速度の経時変化

表-3 梁幅方向の超音波伝播速度の測定結果 (単位: km/s)

測定箇所	PC(ASRあり)	無筋	PC(ASRなし)
B <sub>1</sub>	3.58	3.89	4.80
B <sub>2</sub>	3.74	3.85	4.82
B <sub>3</sub>	4.35	4.26	4.76

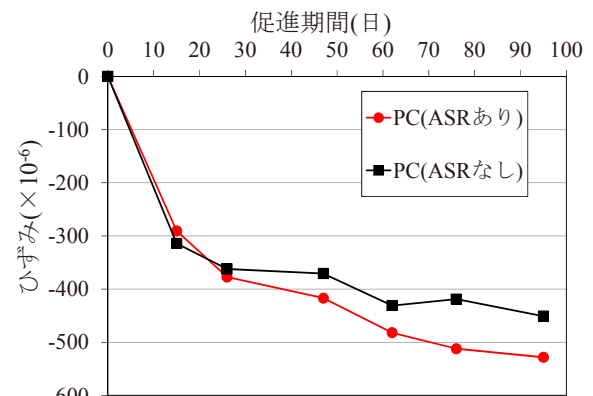


図-9 PC鋼棒のひずみの変化

表-4 円柱供試体の力学的性質

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
膨張量 0 $\mu$	48.8	37.7
膨張量 2000 $\mu$	39.6	20.8

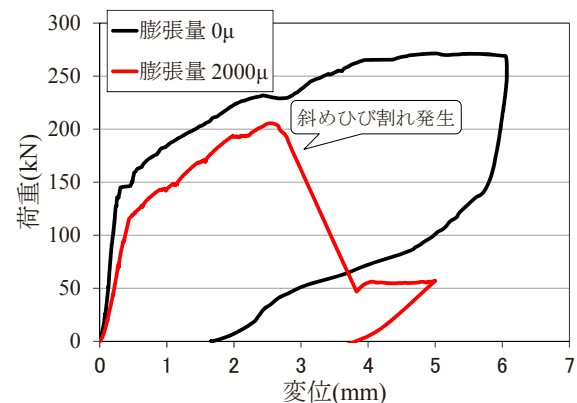


図-10 荷重-変位関係

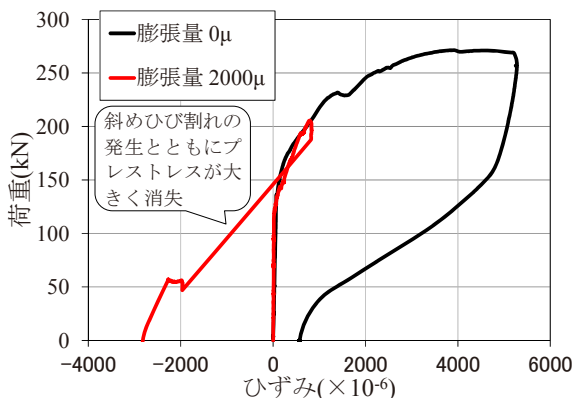


図-11 荷重-PC鋼棒のひずみの関係

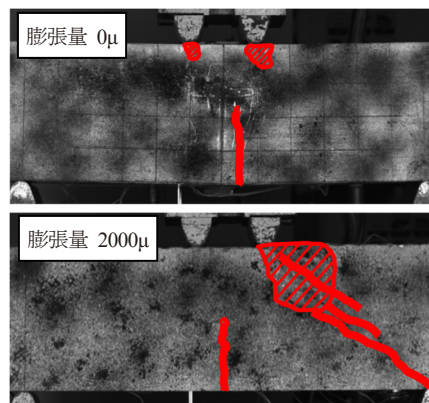


図-12 曲げ載荷試験時の破壊状況

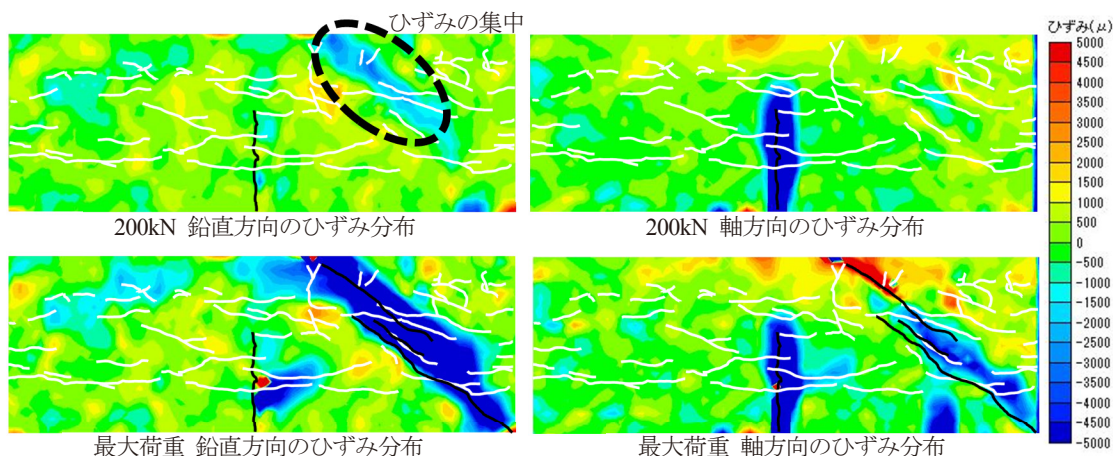


図-13 膨張量 2000 μ 時の鉛直方向のひずみと軸方向のひずみ分布 (正：圧縮, 負：引張)

図-13に促進期間47日のPC梁供試体の200kN時と最大荷重 (207kN) 時におけるデジタル画像相関法による鉛直方向のひずみと軸方向のひずみ分布を示す。また同図には、ASRによるひび割れ (白色) と目視観察による曲げ載荷試験によって生じたひび割れ (黒色) のスケッチを併記した。図-13より、200kN時の鉛直方向のひずみ分布の破線内にひずみの集中が確認できる。また、最大荷重時にはひずみの集中に沿った斜めひび割れに進展していることも分かる。デジタル画像相関法により得られたひずみが大きい位置と、ひび割れの位置は、一致していることが確認できた。

## 5. まとめ

- (1) 促進期間47日のPCおよび無筋梁供試体の内部ひび割れ密度は165~174m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>であり、大差はなかった。また、PC梁供試体の軸方向の断面では、上面付近の方がプレストレスの拘束が小さくなるため、上面に近いほど、水平ひび割れの割合が小さくなり、斜めひび割れと鉛直ひび割れの割合が大きくなった。
- (2) プレストレスの拘束により軸方向の膨張が抑制されたため、PC梁供試体の反り変形の方が無筋梁供試体の反り変形より小さくなった。
- (3) 本研究の範囲では、PC梁供試体の破壊形態は、曲げ引張破壊からせん断圧縮破壊へと変化した。これはASRによるひび割れの影響でコンクリートの力学的性質が低下したことによるものと考えられる。

謝辞 本研究はJSPS科研費15K18101の助成を受けたものです。ここに感謝の意を表します。

- 参考文献 1) 高木祐介, 廣井幸夫, 牧大樹: ASR劣化したコンクリートの材料特性と小型PC試験体のひび割れ特性, プレストレストコンクリート工学会第25回シンポジウム論文集, pp.215-220, 2016.10
- 2) 阿部亮太, 高谷哲, 山本貴士, 宮川豊章: 過大な膨張を与えたPCはり部材の耐荷特性, プレストレストコンクリート工学会第21回シンポジウム論文集, pp.367-370, 2012.10