

論文 ASR 膨張が生じた PC 梁部材の変形性状およびコンクリートのひび割れ性状に関する実験的検討

田城 亨*1・山本 大介*2・濱田 秀則*3・佐川 康貴*4

要旨: 本研究では、アルカリシリカ反応 (ASR) により劣化する PC 梁供試体の変形性状およびコンクリートのひび割れ性状を明らかにするため、PC 梁供試体 (110×210×750mm)、円柱供試体 (φ100×200mm) を作製し、ASR 膨張に伴う反り変形とコンクリートのひび割れ性状に関して考察を行った。その結果、梁供試体膨張率を用いて梁供試体の中立軸の反り量のある程度の精度で求められることが分かった。また、供試体表面および内部のひび割れは、円柱供試体膨張率 0.3% までは主にひび割れ総延長が増大し、ひび割れ密度の増加が収束した膨張率 0.3% から 0.4% までは主にひび割れ幅が増大する結果となった。

キーワード: アルカリシリカ反応, 反り変形, 表面ひび割れ, 内部ひび割れ

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) は高強度のコンクリートが用いられるため、劣化に対する抵抗性が高くなるが、単位セメント量が大きいいため、アルカリシリカ反応 (ASR) の要因の一つであるアルカリ量が高くなる可能性がある。ASR に対する抑制対策が 1986 年に制定されて以来、新設構造物における ASR 損傷事例は減少した。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版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防水層の無い橋梁では、桁上部で水分がコンクリートに供給されやすく、ASR が生じることが懸念される。実際に、PC 構造物において ASR により劣化した事例¹⁾が報告されている。

ASR 劣化した PC 構造物の維持管理を行うためには、劣化の進行具合を定量的に把握し、評価する必要がある。しかし、ASR 劣化した実構造物において、膨張前の基準長さを計測することが無いため、その構造物の劣化段階を定量的に判断することは難しい。既往の研究^{2),3)}において、ASR が発生した PC 梁の耐荷特性や膨張挙動評価等に関する研究は多く行われているが、PC 梁の膨張率と反り変形量の関係、またコンクリート表面および内部のひび割れが膨張に伴いどのように進展するのかという、劣化段階に沿った PC 梁の変形性状やひび割れ性状の評価に関する研究は少ないのが現状である。ASR による劣化予測を行う上で、これらのコンクリートの変形性状やひび割れ性状に関するデータは、有用であると考えられる。

本研究では、PC 梁供試体に上面のみから水分供給をすることにより、防水層の無い PC 橋梁上部工の供用環境の一部を模擬した。そして、PC 梁供試体の ASR 膨張に伴う

反り変形量とコンクリート表面および内部ひび割れ性状の詳細な把握を目的とし、実験的に考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 使用材料および配合

セメントに普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³, Na₂O_{eq} 0.51%) を、細骨材に石灰石砕砂 (表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 1.43%) を使用した。粗骨材には混合率 30% でペシマム現象を起こす反応性骨材 (表乾密度 2.68g/cm³, 吸水率 1.56%, 最大寸法 20mm) と非反応性骨材である石灰石砕石 (表乾密度 2.70g/cm³, 吸水率 1.43%, 最大寸法 20mm) 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 93mmol/l、溶解シリカ量 S_c は 641mmol/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調整するため、練混ぜ水に NaCl 試薬を添加し、Na₂O_{eq} を 8kg/m³ とした。

(2) 供試体

図-1 に示すような梁供試体 (110×210×750mm) と、膨張挙動をモニタリングするための円柱供試体 (φ100×200mm) を作製した。また梁供試体では比較用に、ASR が発生しないように骨材に反応性骨材を用いず、石灰石砕石のみを使用した PC 梁供試体 (110×210×750mm) と、ASR が発生するよう反応性骨材と非反応性骨材をペシマム配合で用いた無筋梁供試体 (110×210×750mm) も作製した。供試体名は反応性骨材を使用した PC 梁供

*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (学生会員)

*2 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 技術職員 修士 (理学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

供試体種類	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤		
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		AE減水剤 (g/m ³)	AE剤 (ml/m ³)
					反応性	非反応性		
R(ASRあり)	40	180	450	754	280	658	1688	18
N(ASRなし)					0	939		

試体は PC-40-R、石灰石のみを使用した PC 梁供試体は PC-40-N、無筋梁供試体は NR-40-R とした。なお、供試体は阪井ら⁴⁾と同一のものを使用し、本論文では、膨張量と反り量の関係性およびコンクリートのひび割れ性状を主眼とし、得られた知見を述べる。

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 PC 鋼棒を鋼製シースの内部に断面中心より 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/mm²、上縁 0.4N/mm²)を導入した。プレストレス導入後、円柱供試体は 100%R.H.で、梁供試体の側面は遮水のためにエポキシ樹脂を塗布し、上面に水を湛水、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。

2.2 測定項目および実験方法

本研究では、材齢28日のプレストレス導入後を膨張率の初期値(0%)とした。また、プレストレスを導入した後、梁供試体上面、下面の軸方向および軸直角方向の膨張率、反り量の初期値を測定した。さらに、ASR膨張によるコンクリートの表面および内部ひび割れの進展過程を観察するため、円柱供試体が設定した膨張率(0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%)に達した時点で表面ひび割れ観察を行い、その後梁供試体を切断し、内部ひび割れ観察を行った。それぞれの実験方法を以下に示す。

(1) 膨張率

円柱供試体は側面、梁供試体は上面および下面にゲージプラグを貼り付け、コンタクトゲージを用いて軸方向および軸直角方向の膨張率を約2週間の間隔で測定した。

(2) 反り量

鋼製アングルに梁供試体を設置し、梁供試体の上面および下面とそれぞれの基準高さとの距離を、ダイヤルゲージを用いて膨張率の測定時に反り量も測定した。

なお、図-2に示すように鋼製アングル内における梁供試体の支点は梁供試体の両端から25mmの位置(梁軸方向の支点間距離は700mm)になるように設置した。

(3) 表面ひび割れ観察

梁供試体上面(750×110mm)の目視できるひび割れを観察し、ひび割れ総延長を梁供試体上面の面積で除し、表面ひび割れ密度を算出した。また、OHPシートに10mm間隔の格子を設け、ひび割れをトレースした。格子を通過するひび割れを図-3のように角度θで3つに分類し、

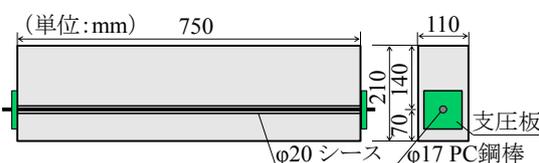


図-1 梁供試体形状寸法

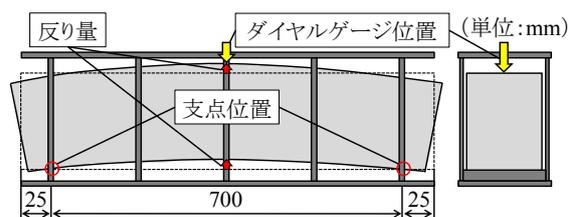


図-2 反り量測定方法

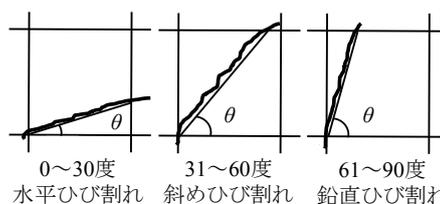


図-3 角度で分類したひび割れの模式図

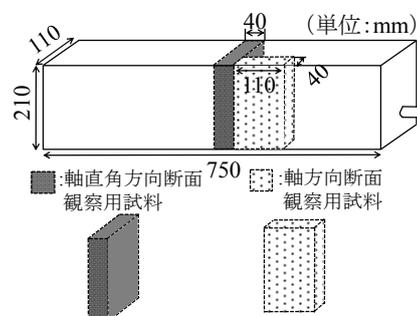


図-4 内部ひび割れ観察用試料採取位置

ひび割れ角度 0~30 度を水平方向ひび割れ(軸方向ひび割れ)、角度 31~60 度を斜め方向ひび割れ、角度 61~90 度を鉛直方向ひび割れ(軸直角方向ひび割れ)とした。

(4) 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-4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、切断したコンクリートの断面積で除し、内部ひび割れ密度を算出した。

3. 実験結果

3.1 促進膨張試験結果

図-5 に梁供試体上面、図-6 に梁供試体側面の梁軸

直角方向，下面の梁軸方向および梁軸直角方向の膨張率の変化を示す。また，図-5には円柱供試体の膨張率の変化も示す。促進膨張試験の結果，基準となる円柱供試体は9日で約0.05%，16日で約0.1%，50日で約0.2%，95日で約0.3%，217日で約0.4%の膨張率に達した。

PC-40-Nの上面は吸水膨張により僅かに膨らみ，下面は乾燥収縮と軸方向のクリープの影響を受け，僅かに収縮した。PC-40-RとNR-40-Rについて，梁供試体には上面からのみ給水しているため，PC-40-R，NR-40-Rともに上面は大きく膨張した。下面はNR-40-Rの軸方向のみ膨張しているが，NR-40-Rは下面に軸方向の拘束がないため，上面が軸，軸直角の両方向に大きくASR膨張した影響を受け，若干膨らんだと考えられる。図-5より，PC-40-Rはプレストレスの拘束の影響を受け，軸直角方向の膨張が軸方向の膨張と比べて2.3倍程度卓越する結果となった。また，PC-40-RはNR-40-Rと比較して，上面軸直角方向の膨張率はNR-40-Rの膨張率よりもやや大きい結果となったが，上面軸方向の膨張率は，プレストレスの拘束によりNR-40-Rの膨張率の約38%に抑制された。

図-6において，PC-40-Rの軸および軸直角方向はPC-40-Nと比べると，それぞれ大きく収縮する結果となったが，これはPC-40-RがASR劣化することにより弾性係数が低下し，プレストレスの拘束の影響をより大きく受けた結果であると考えられる。PC-40-RとNR-40-Rの側面は軸直角方向にほぼ同様に膨張する傾向がみられた。

3.2 梁供試体の変形状 (反り量計測結果)

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-40-Rの上面は0.17mm，下面は0.11mmであり，PC-40-Nの上面は0.13mm，下面は0.11mmであった。プレストレス導入後のPC-40-Rの反り量は，促進膨張期間217日で上面は1.05mm，下面は0.42mmであり，プレストレスの影響に加えてASRの影響により，PC-40-Nよりも大きく反り返る結果となった。また，PC-40-Rの上面，下面の反り変形はNR-40-Rと比較してそれぞれ59%，36%となっているが，これは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であると考えられる。

梁供試体の上面および下面の反り量に差異が生じているが，これは梁供試体側面がASRにより軸直角方向に膨張しているからである。円柱供試体の膨張率0.4%時のPC-40-Rの側面軸直角方向の膨張率は約0.37%であることから，ASRによるPC-40-Rの側面軸直角方向の膨張量は， 210 (側面梁軸直角方向スパン長) $\times 0.37 \times 10^{-2} = 0.78\text{mm}$ と求められる。また，図-7よりPC-40-Rの上面および下面の反り量の差異は $1.11 - 0.42 = 0.69\text{mm}$ となり，側面軸直角方向の膨張量と上面および下面の反り量の差異はほぼ同程度となることが分かる。同様にNR-40-

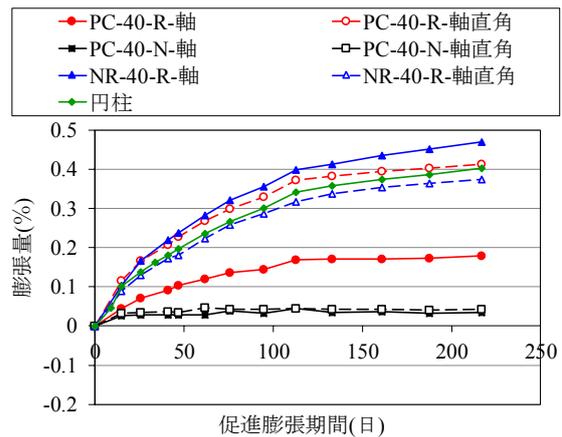


図-5 梁供試体上面の膨張率の経時変化

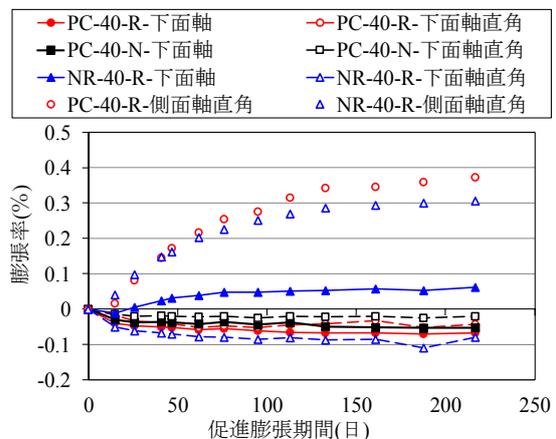


図-6 梁供試体側面および下面の膨張率の経時変化

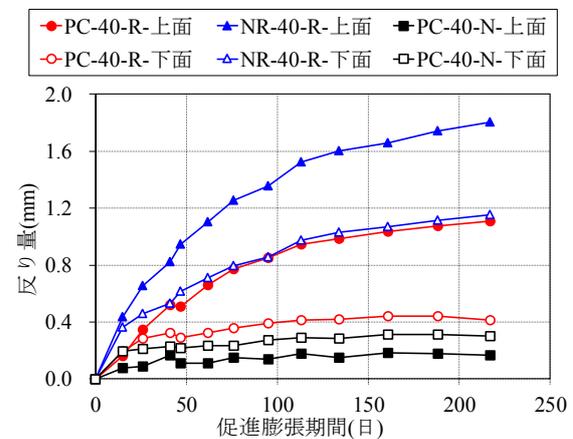


図-7 梁供試体スパン中央の反り量の経時変化

Rについても側面軸直角方向の膨張量は0.64mm，上面および下面の反り量の差は0.65mmであることから，同程度となることが確認できる。

ここで，図-5，図-6より，促進膨張期間217日でのPC-40-Rの上面軸方向の膨張率は約0.18%，側面軸直角方向の膨張率は約0.37%，下面軸方向の収縮率は約0.07%である。PC-40-Rの上面，側面および下面が全て一様に膨張および収縮したとすると，上面は 700 (上面および下面梁軸方向支点間スパン長) $\times 0.18 \times 10^{-2} = 1.26\text{mm}$ 膨張し，下面は $700 \times 0.07 \times 10^{-2} = 0.49\text{mm}$ 収縮したという

ことになる。さらにここで、ASR 膨張による梁供試体のひずみの高さ方向の傾きを表す指標として曲率 φ (1/m) を定義する。平面保持を仮定し、図-8 のような変形後の PC-40-R 軸直角方向断面のひずみ分布を考えると、曲率 $\varphi = \varepsilon/y$ となり、 $\varepsilon_1 = 0.63\text{mm}$ 、 $\varepsilon_2 = 0.25\text{mm}$ となる。また、PC-40-R 側面は梁軸直角方向に 0.78mm 膨張したので、ASR 膨張後の軸直角方向のスパン $y_1 + y_2$ は $y_1 + y_2 = 210.78\text{mm}$ (梁供試体高さ 210mm) であり、 $y_1 = 150.90\text{mm}$ 、 $y_2 = 59.88\text{mm}$ と中立軸の位置が分かり、曲率 φ は約 $\varphi = 4.17 \times 10^{-3}$ となる。そして ASR 膨張に伴う梁供試体の変位を δ として以下の式(1)により中立軸の δ_n を算出した。

$$\delta = \frac{\varphi \times L^2}{8} \quad (1)$$

ここで、 L : 梁供試体中立軸の軸方向スパン。
 これより、PC-40-R の変位量 δ_n は $\delta_n = 0.26\text{mm}$ となることが分かった。同様に、定期的に測定した膨張率の結果を用いて PC-40-R、NR-40-R について δ_n の経時変化を求めた。その結果を図-9 に示す。PC-40-R の δ_n は上面と下面の反り量の中間の値となり、NR-40-R の δ_n は下面の反り量より僅かに大きい値となった。PC-40-R は図-5、図-6 より、軸方向に上面は膨張、下面は収縮しており、上面膨張量の方が下面収縮量より大きい結果であった。このことから、PC-40-R の中立軸の反り量は上面と下面の間のやや下面の反り量に近い値をとると考えられ、PC-40-R の δ_n の計算結果はおおよそ中立軸の反り量と一致していると考えられる。NR-40-R は軸方向に上面、下面ともに膨張している結果であったため、NR-40-R の中立軸の反り量は下面の反り量よりも小さい値をとると考えられるが、図-9 より NR-40-R の δ_n は下面の反り量よりも僅かに大きい値となった。この違いが生じたのは反り量計測時に支点のずれ等による誤差が生じたためであると考えられる。しかし、この結果より、梁供試体の ASR による膨張率を知ることができれば、中立軸の変位量(反り量)をある程度の精度で求めることができることが分かった。なお、実構造物の膨張率を知ることが困難であるため、実構造物に適応する段階には至っていない。

3.3 ひび割れ性状

(1) コンクリート表面ひび割れ観察結果

図-10 に円柱供試体の膨張率 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4% に梁供試体上面の目視できるひび割れより算出した表面ひび割れ密度と促進期間の関係を示す。PC-40-R の表面ひび割れ密度は膨張率 0.05% から 0.4% までプレストレスの拘束のため、平均して NR-40-R の約 51% 程度となった。これは NR-40-R が PC-40-R よりも大きく反り変形した影響もあると考えられる。また、PC-40-R は促進膨張期間 47 日、NR-40-R は促進膨張期間 15 日までに表面ひび割れ密度が大きく増加しており、この期

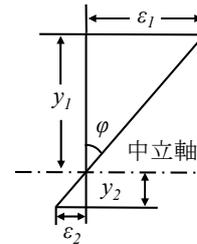


図-8 変形後の梁供試体内軸直角方向断面のひずみ分布の仮定

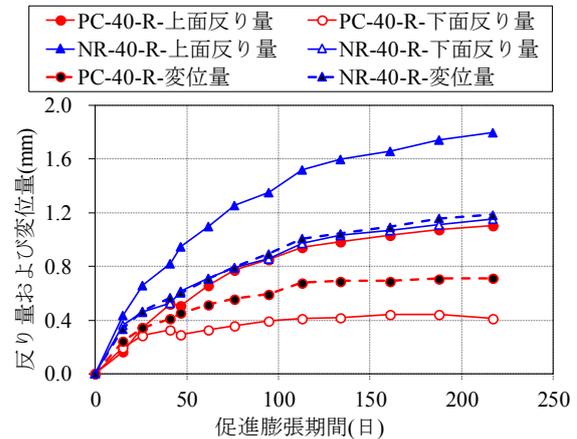


図-9 梁供試体の反り量および変位量の経時変化

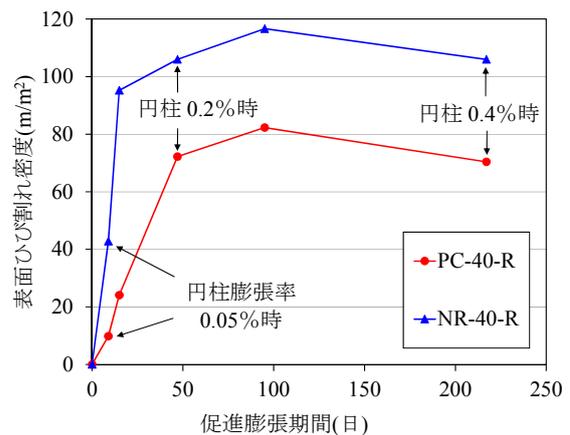


図-10 表面ひび割れ密度の経時変化

間にコンクリート表面にひび割れ総延長が大きく増大したことが分かる。膨張率 0.3% 以降は、表面ひび割れ密度は収束する結果となった。

図-11 に円柱供試体の膨張率 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 時に算出した方向別の表面ひび割れ密度の割合を示す。この図では全体 100% として、その中に存在する鉛直(軸直角方向)、斜め、水平(軸方向) ひび割れの割合を示している。これより、拘束のない NR-40-R は各膨張段階において鉛直、斜め、水平ひび割れそれぞれの割合が同程度でコンクリート表面ひび割れが進展していったことが分かる。それに対し、PC-40-R はプレストレスの拘束のため、軸方向ひび割れである水平ひび割れが 0.05% から 0.4% の全膨張段階で 50% を超えており、斜め、鉛直ひび割れに比べて卓越していた。

図-12 に全体を 100% としたひび割れ幅とひび割れ密

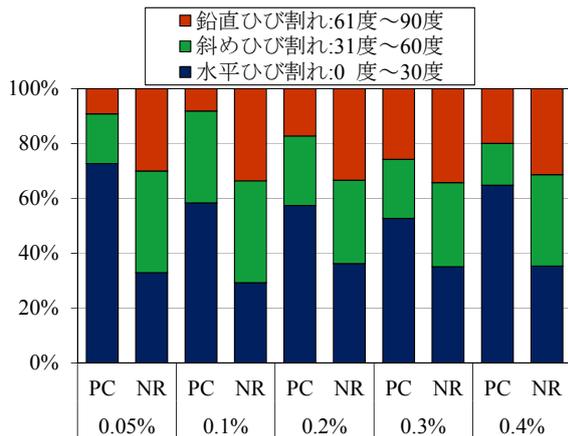


図-11 表面ひび割れ密度の角度による分類

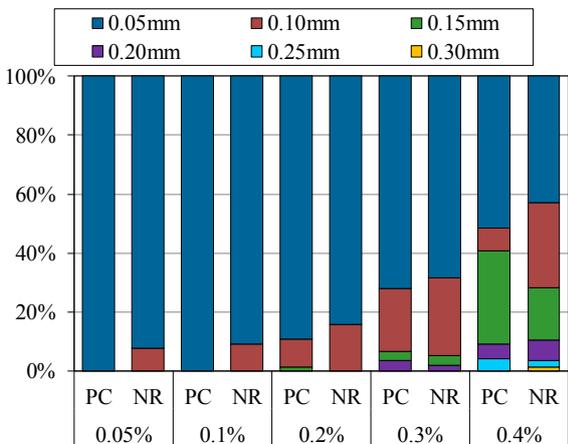


図-12 表面ひび割れのひび割れ幅による分類

度の関係を示す。膨張率 0.4%へと膨張するにつれて、PC-40-R および NR-40-R のひび割れ幅は増大した。膨張率 0.4%では 0.25mm, NR-40-R においては 0.30mm のひび割れが確認できた。また、図-10 で円柱膨張率が 0.3% 以降は表面ひび割れ密度の増加は収束したが、図-12 よりひび割れ幅は増大している。これより、本研究では膨張率 0.3%までは主に表面ひび割れ総延長が増加し、膨張率 0.3%から 0.4%までは主に表面のひび割れ幅の増加が進展したと考えられる。

(2) コンクリート内部の微細ひび割れ観察結果

写真-1に円柱供試体の膨張率0.4%時（促進期間217日）におけるPC-40-RおよびNR-40-Rの内部断面のブラックライト照射像を示す。写真-1よりASRにより上面から下面に向けてひび割れが多く発生していることが分かる。

図-13に円柱供試体の膨張率0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%時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-9は、PC-40-RとNR-40-Rそれぞれの表面ひび割れ密度の増加傾向には明確な差があったが、内部ひび割れ密度はどちらもほぼ同様に増加する傾向が見られた。これは、コンクリート表面はコンクリート内部に比べて、周囲のコンクリートによる拘束が少ないため、さらに反り変形の影響を受けやすいためであると考えられ

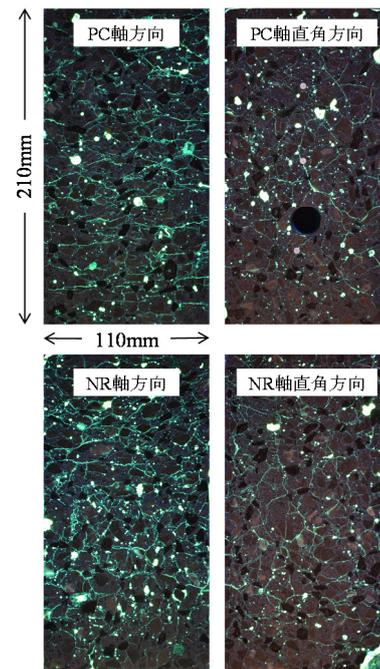


写真-1 膨張率 0.4%時の内部断面のブラックライト照射像

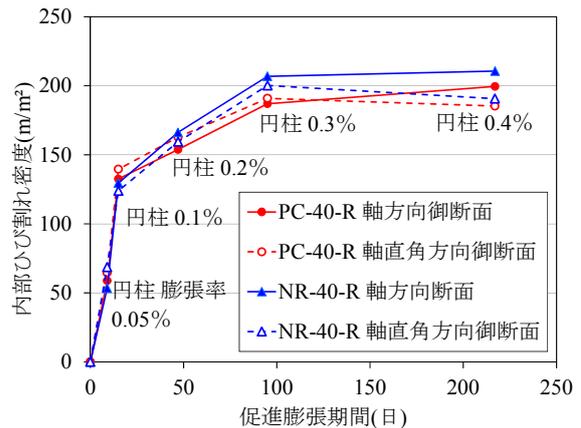


図-13 内部ひび割れ密度の経時変化

る。このことから、内部ひび割れ密度はプレストレスの拘束の有無ではほぼ変わらないと考えられる。また、促進膨張期間15日までに内部ひび割れ密度は大きく増加し、円柱供試体の膨張率0.3%以降はほぼ一定であった。

図-14に写真-1の目視できるひび割れより算出した円柱供試体の膨張率 0.4%時の内部ひび割れ密度を示す。このグラフには、切断した梁供試体断面を上面より 70mm, 140mm と高さ方向で 3 等分して、各部分のひび割れ量の推移をまとめた。本研究では上面のみから水を供給したため、下面付近に比べて上面付近の方に ASR ひび割れが多く発生した。図-14において下部と比較して上部および中部の方が、内部ひび割れ密度が大きいことが確認できる。また、PC-40-R は PC 鋼棒を下縁側に偏心させて配置しているため、PC 軸方向断面においてプレストレスの拘束により他の断面に比べて水平ひび割れが大きく、さらに上部から下部に向けて水平ひび割れの全体

に占める割合が大きくなっていることが分かる。

図-15 に全体を 100%とした円柱供試体の膨張率が 0.2%, 0.3%, 0.4%でのひび割れ幅と内部ひび割れ密度の関係を示す。0.05%, 0.1%時の密度はここでは省略した。図-12 の表面ひび割れ幅の推移と同様に、拘束のある PC-40-R のひび割れ幅は NR-40-R よりも小さく、膨張率 0.4%へと膨張するにつれて、PC-40-R および NR-40-R のひび割れ幅は増大した。図-13 では膨張率 0.3%以降は内部ひび割れ密度の増加は収束したが、図-15 から膨張率 0.3%から 0.4%へ膨張する過程で 0.20mm, 0.25mm, 0.30mm のひび割れの占める割合が増加していた。これより、膨張率 0.3%までは主に内部ひび割れ総延長が増加し、膨張率 0.3%から 0.4%までは主に内部のひび割れ幅の増加が進展したと考えられる。また、図-13 で確認したように内部ひび割れ密度は PC-40-R と NR-40-R とでほぼ同様に増加しているが、ひび割れ幅は NR-40-R の方が PC-40-R よりも大きく増加する傾向が見られた。

4. まとめ

本研究では、PC 梁の上面のみから水分を供給し、防水層のない PC 橋梁上部工の一部を模擬した。そして ASR 膨張に伴う PC 梁供試体の反り変形とコンクリートの表面および内部ひび割れ性状に関して実験的に考察した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 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-40-R の上面、下面の反り変形は NR-40-R と比較してそれぞれ 59%, 36%に抑制された。
- (2) 梁供試体の上面および下面の反り量の差異が梁供試体に側面の軸直角方向の膨張量とほぼ同程度となることが確認された。
- (3) 梁供試体の膨張率を用いて、中立軸の変位量(反り量)をある程度の精度で求められることが分かった。
- (4) PC-40-R の表面ひび割れ密度は NR-40-R と比べてプレストレスの拘束のために、円柱の膨張率 0.05% から 0.4%までで平均して約 51%であり、表面ひび割れ幅も NR-40-R の方が大きい結果となった。
- (5) PC-40-R の軸方向断面において、下縁側に偏心しているプレストレスの拘束により、水平ひび割れの全体に占める割合が鉛直ひび割れ、斜めひび割れよりも卓越し、割合は上部から下部に向けて増加した。
- (6) PC-40-R と NR-40-R の内部ひび割れ密度はほぼ同様に増加していったが、内部ひび割れ幅は NR-40-R の方が大きく増加した。
- (7) 供試体表面および内部のひび割れは、膨張率 0.3%までは主にひび割れ総延長が増大し、ひび割れ密度の増加が収束した膨張率 0.3%から 0.4%までは主にひび割れ幅が増大する結果となった。

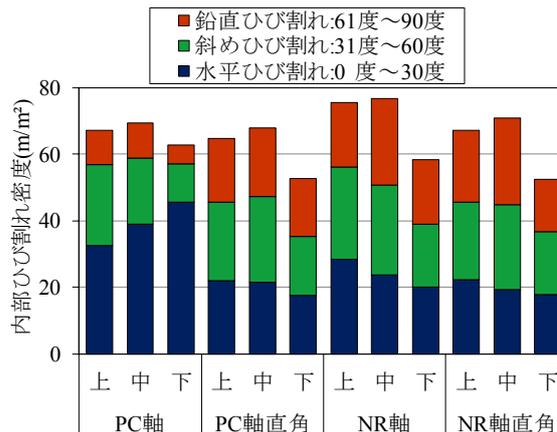


図-14 膨張率 0.4%時の各断面の角度で分類した内部ひび割れ密度

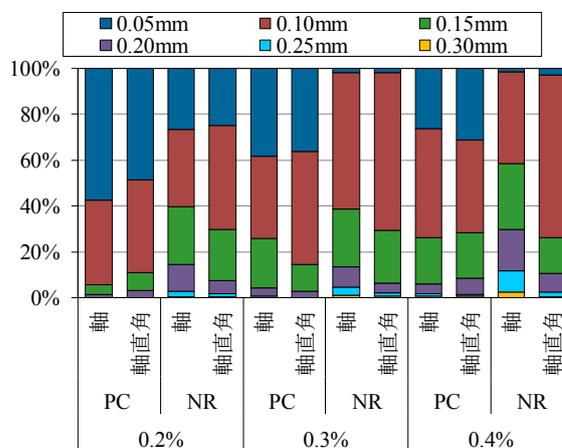


図-15 内部ひび割れのひび割れ幅による分類

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP15K18101 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) 尾花祥隆, 鳥居和之: プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1065-1070, 2008
- 2) 養田理希, 古川柳太郎, 尾花祥隆, 鳥居和之: ASR による劣化を生じた PC 梁部材の耐荷特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1305-1310, 2007
- 3) 上田尚史, 中村光, 国枝稔: ASR を生じた PC はりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1261-1266, 2009
- 4) 阪井峻, 山本大介, 濱田秀則, 佐川康貴: 上面から水分供給を受ける PC 梁の ASR による変形性状, プレストレストコンクリート工学会第 26 回シンポジウム論文集, pp.81-86, 2017.10