

# 論文 ASR 劣化 PC 梁試験体から採取したコアの力学的性質

稲垣 崇秀<sup>\*1</sup>・尾花 祥隆<sup>\*2</sup>・石井 豪<sup>\*3</sup>・鳥居 和之<sup>\*4</sup>

**要旨:**ASRにより劣化したPC梁部材における外観の変状およびコンクリートの劣化性状を把握する目的で、約3年間屋外暴露したPC梁試験体からコアを採取し、コアの力学的性質を詳細に検討した。その結果、ASR劣化したPC梁試験体から採取したコアの力学的性質はPC鋼材の拘束によるひび割れの発生に密接に関係しており、コアの採取位置により圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度が大きく相違することが明らかになった。

**キーワード:** ASR, PC 梁試験体, コア, 屋外暴露, 蛍光顕微鏡観察

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC）部材は、PC鋼材の拘束によりひび割れを制御できることや、高強度のコンクリートが使用されることから、一般に耐久性が高い部材であるといわれている。しかし、近年では、橋梁や舗装、タンクなど各種PC部材においてアルカリシリカ反応（以下、ASR）による劣化の事例が報告されている<sup>1)</sup>。そのため、コンクリート構造物の耐久性向上を目的として、鉱物質混和材が使用されることがあり、PC桁に高炉スラグ微粉末を使用してPC桁の塩害対策を検討した報告<sup>2)</sup>がある。その一方で、高炉スラグ微粉末によるPC桁の長期にわたるASR抑制効果に関する検討は比較的少ないのが実状である<sup>3),4)</sup>。

ASR劣化構造物の劣化度判定の指標の一つとして、通常、構造物からのコアによる調査・診断が行われている。コアによる調査・診断は、コンクリートの強度低下を定量的に評価できるが、実構造物を傷つけることが問題とされている。PC構造物の劣化度判定および補強設計においては、桁中央部および橋軸方向から採取したコアの劣化度の把握がより重要となる。しかし、PC構造物の場合は、PC鋼材の位置を考慮して採取する必要があるために、調査結果をいかに補修・補強計画に活用するかが課題となる。また、これまでにASR劣化したPC部材からコア

を採取して、採取位置による力学的性質を検討したものは少ないのが実状である。

本研究では、PC部材におけるASR劣化の特徴および拘束度、膨張率が内部コンクリートの力学的性質におよぼす影響を検討することを目的としている。そこで、実構造物を模擬したPC梁試験体を作製し、屋外環境条件下に約3年間暴露を行なった。約3年が経過した時点で、PC梁試験体からコアを多数採取し、コンクリートの力学的性質とASRによるひび割れ状況を把握するために各種試験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究に使用したセメントは、早強ポルトランドセメント（T社製、密度：3.14g/cm<sup>3</sup>、比表面積：4510cm<sup>2</sup>/g）およびブレイン粉末度が6000の高炉スラグ微粉末（S社製、密度：2.91g/cm<sup>3</sup>、比表面積：5800cm<sup>2</sup>/g）である。使用骨材として、反応性骨材（記号：R）には北海道札幌近郊産の安山岩砕砂および碎石（化学法（JIS A1145）の結果：Sc=688mmol/l、Rc=78mmol/l、Sc/Rc=8.8）を使用した。また、非反応性骨材（記号：N）として、岐阜県揖斐川産の川砂（化学法（JIS A1145）の結果：Sc=33mmol/l、Rc=64mmol/l、Sc/Rc=0.5）および川砂利（化

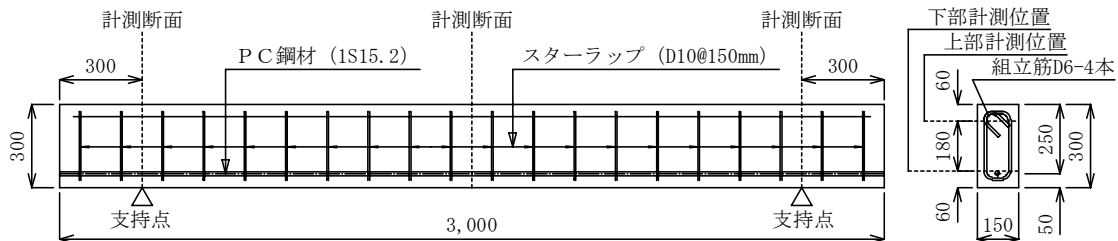


図-1 PC 梁試験体の概要

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 西日本旅客鉄道 (株) (正会員)

\*3 (株) 安部日鋼工業 技術工務本部 開発部 開発課

\*4 金沢大学大学院 理工研究域 環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

配合種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						添加アルカリ <sup>*4</sup>	混和剤 A (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	BFS	S	G					
早強+スラグ <sup>*1</sup> +反応性骨材 (高炉 R <sup>*2</sup> )	38	44	150	198	198	833	1040	18.9	0.7	10	2±1	
早強+反応性骨材 (早強 R <sup>*2</sup> )	38	44	150	395	---	839	1048		1.2			
早強+スラグ <sup>*1</sup> +非反応性骨材 (高炉 N <sup>*3</sup> )	34	41	142	209	209	723	1048	---	0.55	2.5		
早強+非反応性骨材 (早強 N <sup>*3</sup> )	35	41	146	417	---	731	1045	0.55				

- \*1 早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を50%置換し使用した。
- \*2 R: Reactive aggregate (反応性骨材, 碎石の骨材最大寸法 25mm)
- \*3 N: Non-Reactive aggregate (非反応性骨材, 川砂利の骨材最大寸法 25mm)
- \*4 NaCl (塩化ナトリウム)を等価 Na<sub>2</sub>O 量で 10kg/m<sup>3</sup> となるように添加した。

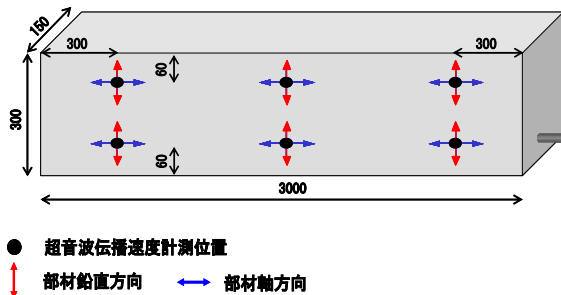


図-2 PC 梁試験体の膨張率および超音波伝播速度の計測位置

学法 (JIS A1145) の結果: Sc=32mmol/l, Rc=45mmol/l, Sc/Rc=0.7) を使用した。

### 2.2 PC 梁試験体の概要

PC 梁試験体の概要を図-1 に示す。試験体は、断面 150×300×長さ 3000mm に 1S15.2 の PC 鋼材を下縁側に 100mm 偏心させて 1 本配置した梁部材である。配筋スターラップとして SD295A-D10 の鉄筋を 150mm 間隔で配置した。PC 梁試験体は打設後に蒸気養生 (60°C) を実施し、打設後 18 時間経過後、プレテンション方式によりプレストレス (導入直後の PC 鋼材の応力: 1261N/mm<sup>2</sup>) を導入した。その後、約 2 週間屋内にて密封養生を行った後に、日当たりの良い屋外に 2 点支持で暴露を開始した。なお、PC 梁試験体は 2005 年 7 月に作製し、暴露地点の降水量は年間 1800mm、日照時間は 2000 時間である。

### 2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。配合種類として、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 50% 置換したものと安山岩砕砂・碎石 (以下、高炉 R)、早強ポルトランドセメントと安山岩砕砂・碎石 (以下、早強 R)、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 50% 置換したものと川砂・川砂利 (以下、高炉 N)、および早強ポルトランドセメントと川砂・川砂利 (以下、早強 N) の 4 配合とした。高炉 R および早強 R に関しては、ASR 膨張を早期に発生させる条件としてアルカリ (NaCl) を等価 Na<sub>2</sub>O 量で 10kg/m<sup>3</sup> になるように添加した。なお、PC 梁試験体の配合は PC 製品工場にて実績のある配合と

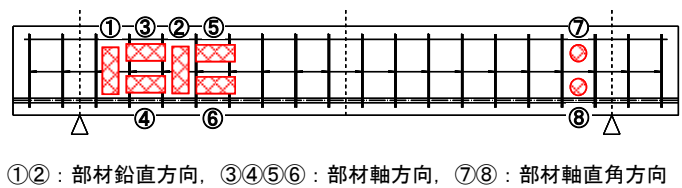


図-3 PC 梁試験体からのコアの採取位置

し、設計基準強度は 50N/mm<sup>2</sup>、配合強度 (材齢 28 日) は 60N/mm<sup>2</sup> であった。

### 2.4 測定項目

#### (a) PC 梁試験体における測定

コンクリートの膨張率および超音波伝播速度の計測位置を図-2 に示す。計測を行う断面は両端より 300mm および支間中央とし、試験体側面の上縁側および下縁側にて 3 ヶ月毎に実施した。膨張率の計測位置は上縁および下縁から 60mm 内側とし、南側面の部材軸方向および部材鉛直方向について行った。また、試験体のそり量は、試験体下面の両端部間に水糸を張り、試験体中央下面の水糸との距離を計測した。なお、本研究では試験体のプレストレス導入方向を部材軸方向としている。

#### (b) コア試験体における測定

コアの採取位置を図-3 に示す。なお、図中の番号はコアの採取位置番号とした。コアは PC 梁試験体の部材軸方向、部材軸直角方向および部材鉛直方向の 3 方向から採取した。採取したコアは、φ55×110mm に整形し、超音波伝播速度を計測した後に、JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従い圧縮強度および静弾性係数を測定した。また、コアの断面を厚さ 5mm に切断し、蛍光塗料入りのエポキシ樹脂を含浸した後、蛍光顕微鏡観察を実施した。さらに、エネルギー分散型 X 線回折装置付き走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) により ASR ゲルの生成状況およびその化学組成を調べた。

## 3. PC 梁試験体の ASR 劣化性状

### 3.1 膨張率およびそり量

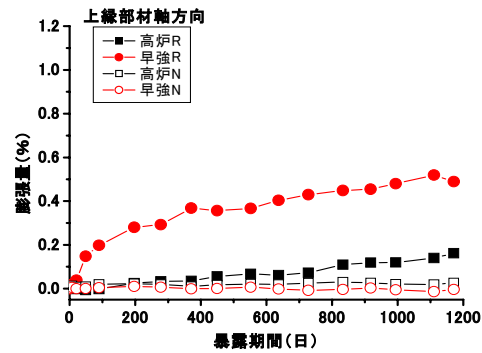
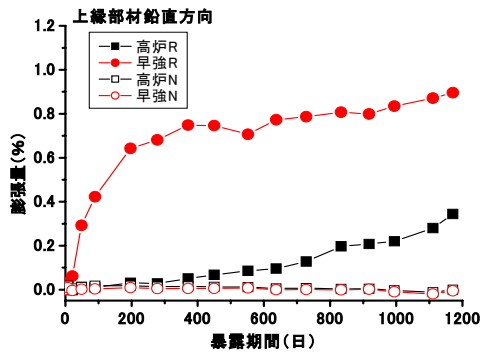


図-4 PC 梁試験体上縁の膨張率

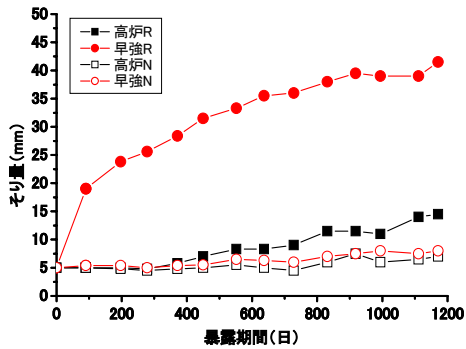


図-5 PC 梁試験体のそり量

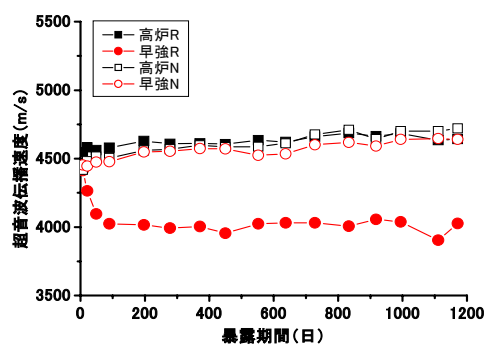


図-6 PC 梁試験体の超音波伝播速度

PC 梁試験体上縁における部材鉛直方向および部材軸方向の膨張率を図-4 に示す。なお、測定値は中央部および端部の平均値とした。早強 R は屋外暴露を開始して約 50 日が経過した時点で、すでに顕著に膨張し、暴露後約 3 年が経過した時点では、部材鉛直方向の膨張率は 0.9% となった。一方、高炉 R は、屋外暴露を開始して二夏が経過した頃（暴露後約 1 年が経過した頃）から膨張し始め、暴露後約 3 年が経過した時点で部材鉛直方向の膨張率は 0.35% となった。本研究においては、反応性の高い骨材を用い、比較的多くのアルカリを添加しており、50% のスラグ置換率では ASR を完全に抑制することはできなかった。一方、膨張挙動の特徴としては、部材鉛直方向の膨張が部材軸方向の約 2 倍の膨張率となった。これは、部材軸方向の膨張が PC 鋼材のプレストレスにより抑制されたためであると推察された。そのため、試験体側面では、PC 鋼材の配置位置による拘束度の相違から、試験体上部では亀甲状、試験体下部および下面で PC 鋼材に沿ったひび割れが生じたのが特徴的だった。また、ASR 劣化の進行は、季節的な変動の影響を受けることが知られており、本研究においても、PC 梁試験体の膨張率は気温が高い夏季に進展し、冬季には停滞する傾向を示した。

PC 梁試験体のそり量の経時変化を図-5 に示す。早強 R では、暴露開始時からそり量が緩やかに増加する傾向があり、暴露後約 3 年が経過した時点で 39mm のそり量が生じていた。一方、高炉 R については、膨張が始まっ

た暴露後約 1 年が経過した頃からそり量の増大が確認され、暴露後約 3 年が経過した時点では 14mm となり、その値は早強 R の 1/3 程度となった。本研究では、PC 鋼材の配置が下縁に偏心してあるために、試験体下部の膨張は抑制される傾向にあった。そのため、PC 梁試験体上部と下部における膨張量の相違がそりを促進したものと考えられた。

### 3.2 超音波伝播速度

PC 梁試験体の超音波伝播速度の結果を図-6 に示す。なお、測定値は図-2 に示す 6 箇所の測定位置における平均値とした。早強 R の超音波伝播速度は、暴露開始後 50 日が経過した時点で初期値（4400m/sec）から約 350m/sec 低下しており、この段階ですでに ASR が発生していたものと推察された。これは、暴露を開始した時期が 7 月で気温が高い時期であったことから、暴露初期から急速に ASR が進行したものと考えられた。さらに、暴露後 3 ヶ月が経過した時点では、超音波伝播速度が約 10% 低下したが、その後は 4000m/sec 程度で安定していた。また、早強 R の超音波伝播速度の低下時期は、膨張が発生し始めた時期ともよく対応していた。それに対して、高炉 R、高炉 N および早強 N は超音波伝播速度の低下がまったく見られなかった。

## 4. PC 梁試験体から採取したコアの力学的性質

### 4.1 圧縮強度および静弾性係数

コアの採取位置による圧縮強度および静弾性係数の試

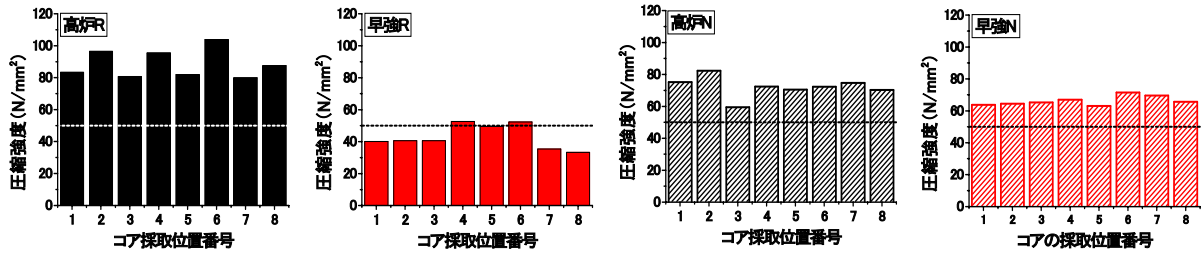


図-7 PC 梁試験体から採取したコアの採取位置による圧縮強度の比較（設計基準強度：50N/mm<sup>2</sup>，配合強度：60N/mm<sup>2</sup>）

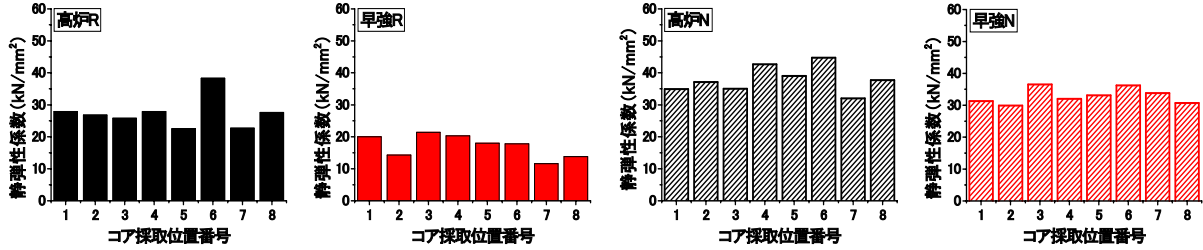


図-8 PC 梁試験体から採取したコアの採取位置による静弾性係数の比較

験結果を図-7 および図-8 に示す。早強 R のコアの圧縮強度は、設計基準強度を下回っており、コアの採取方向により強度特性が大きく相違した。すなわち、部材軸直角方向および部材鉛直方向から採取したコアの圧縮強度は、部材軸方向から採取したコアの約 80% となっていた。また、静弾性係数についても同様の傾向が認められた。これは、部材軸方向のコアはプレストレスによる拘束で、ASR にもなう膨張率が低減され、コンクリート内のひび割れの進展が抑制されたためであると考えられた。そのため、最もプレストレスによる拘束の影響を受ける PC 鋼材付近から採取したコアの圧縮強度が最大となった。一方、高炉 R は、PC 梁試験体で ASR 劣化が確認されていたが、4 配合の中で最も高い圧縮強度を示した。これは、高炉 R では高炉スラグ微粉末の混入により潜在水硬性が長期にわたり発揮されたためであると考えられた。しかし、高炉 R の静弾性係数は、ASR の発生により高炉 N および早強 N と比較して顕著に低下していた。一般に、ASR 劣化したコンクリートの特徴として、圧縮強度と比較して静弾性係数が大きく低下することが知られており、高炉 R においても ASR の進行による内部の微細ひび割れの影響が静弾性係数の低下に寄与したものと推察された。

コアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度の関係を図-9 に示す。図中では、プロットが健全なコンクリートを示す曲線<sup>9)</sup>から原点に近づくほど ASR による劣化がより大きいものと判定される。早強 N および高炉 N は、曲線付近にプロットされており、ASR による劣化は確認されなかった。一方、早強 R は、曲線から原点方向に離れた位置にプロットされており、ASR 劣化を生じているものと判定された。また、高炉 R に関しては、圧縮強度は 4 配合で最大となったが、静弾性係数/圧縮強度の値は早

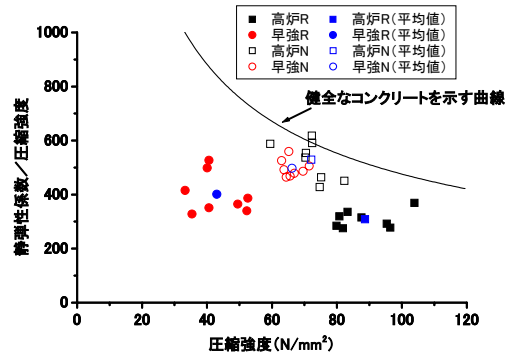


図-9 PC 梁試験体から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度の関係

強 R よりも小さく、300~400 程度の値となった。

#### 4.2 超音波伝播速度

コアの超音波伝播速度の結果を図-10 に示す。早強 R は圧縮強度と同様に超音波伝播速度の値も低下が認められたが、コンクリートの品質で優または良<sup>7)</sup>と判定される 4200~4700m/sec であった。高炉 R では、超音波伝播速度の低下率は小さく、良好な値を示しており、静弾性係数と比較して超音波伝播速度の低下は小さくなった。

コアで測定した超音波伝播速度の測定値とコアの採取位置において PC 梁試験体で測定した超音波伝播速度の関係を図-11 に示す。高炉 R、早強 N および高炉 N の測定値は PC 梁試験体およびコアにおいてほぼ同程度（破線付近）の値を示していた。一方、早強 R は PC 梁試験体での測定値と比較してコアでの測定値の方が大きな値を示した。これは、早強 R の PC 梁試験体は ASR により試験体のかぶりに多数のひび割れが生じていたことが原因として考えられた。PC 梁試験体の部材鉛直方向から採取したコアのひび割れ深さを写真-1 に示す。写真より、高炉 R のひび割れ深さは表面から 8mm 程度に留まって

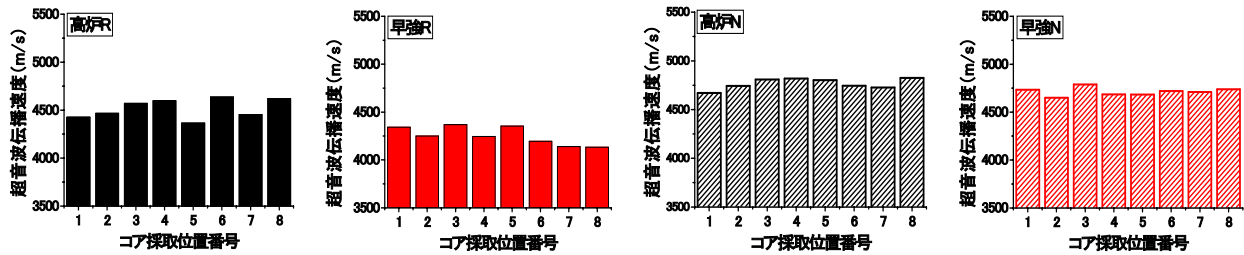


図-10 PC 梁試験体から採取したコアの採取位置による超音波伝播速度の比較

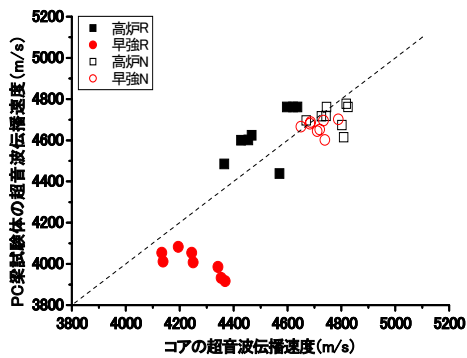


図-11 PC 梁試験体とコア試験体の超音波伝播速度の相関性

いたのに対して、早強 R のひび割れ深さはスターラップ筋近くまで達していることが分かる。このように、早強 R では PC 梁試験体の表面で幅が広く、かつ深いひび割れが多数発生しており、PC 梁試験体での超音波伝播速度の低下に影響したものと考えられる。従って、ASR 劣化を生じた構造物で超音波伝播速度による測定を行う場合には、表面のひび割れによる影響を十分に考慮する必要があることが明らかになった。

#### 4.3 コアの圧縮強度と PC 梁試験体の膨張率の関係

早強Rにおけるコア採取位置でのPC梁試験体の膨張率とコアの圧縮強度との関係を図-12に示す。PC梁試験体の膨張率の増加とともにコアの圧縮強度は低下しており、PC梁試験体の膨張率が0.2%を越えると、コアの圧縮強度が大きく低下する傾向が認められた。すなわち、PC鋼材の拘束を受ける試験体下縁の部材軸方向より採取したコアは圧縮強度の低下がほとんどないのに対して、拘束が小さい上縁、部材端部および部材鉛直方向より採取したコアは圧縮強度が大きく低下していた。従って、PC梁試験体においては、膨張率を0.2%以下に抑えることにより、コンクリートの圧縮強度の低下を効果的に抑制できるものと推察された。

### 5. コアの微細ひび割れの観察とASRゲルの化学組成

#### 5.1 コア切断面の微細ひび割れの発生状況

コアの断面に蛍光樹脂を含浸させた後に紫外線ライトを照射し、ひび割れ観察を行った結果を写真-2および写真-3に示す。写真-2より早強Rは、骨材界面やセメントモルタル、粗骨材を貫通するひび割れが存在し、高炉

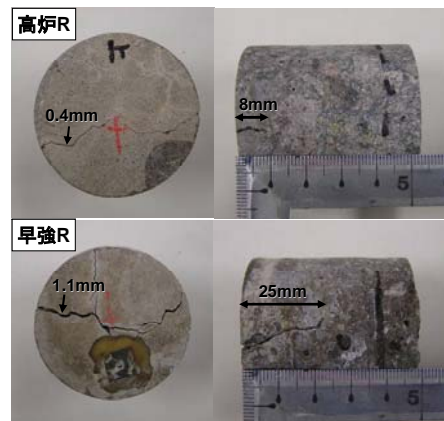


写真-1 部材鉛直方向から採取したコアのひび割れの状況

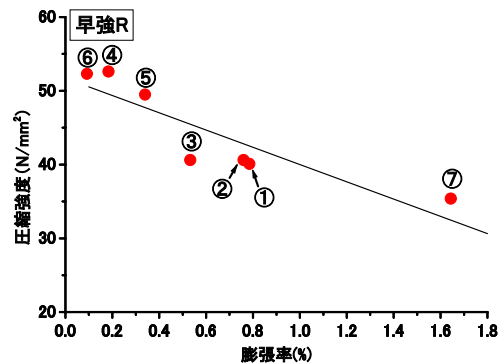


図-12 PC 梁試験体の膨張率とコアの圧縮強度の関係 (図中の数字は採取位置番号を示す)

Rに比べてひび割れの幅および密度がともに大きくなった。また、写真-3に示す蛍光顕微鏡観察の結果、早強Rでは、ひび割れ幅が100 $\mu$ m以上のものが多数発生しており、それらが骨材界面およびセメントモルタル中に脈状や放射状に発達し、連続的なひび割れ網が形成されていた。一方、高炉Rの断面では細骨材界面のモルタル部分にひび割れが発生していたが、ひび割れ幅は早強Rの1/2程度に抑制されていた。このようなコンクリートの微細ひび割れ発生状況の相違が、早強Rおよび高炉Rの静弾性係数の低下に密接に関係していることが明らかになった。

#### 5.2 ASRゲルの化学組成

高炉Rおよび早強Rの骨材周囲に生成したASRゲルの走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) による観察結果を図-13に示す。早強Rにおいては、5mm程度の骨材粒子が最も

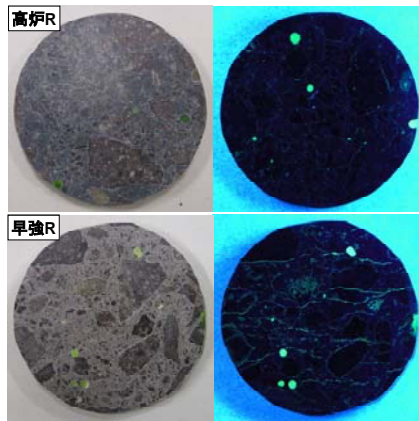


写真-2 コア断面のひび割れの状況

反応しており、骨材の粒子径によってASRの程度が大きく異なっていた。一方、ASRゲルの化学組成（モル百分率）は、高炉Rおよび早強Rともにアルカリ分（ $R_2O$ ）が6～13%、シリカ分が35～55%、カルシウム分（CaO）が35～50%の範囲であり相違がほとんど認められなかった。これまで高炉スラグ微粉末を含有したコンクリートのASRゲルの化学組成を検証した事例はほとんどない。高炉Rと早強RのASRゲルの化学組成を比較すると、両者はほぼ同様の値であることから、ASR劣化の大小はASRゲルの化学組成によるものではなくASRゲルの生成量、すなわち骨材のASRの進行度によるものと考えられた。

## 6. 結論

本研究では、約3年間屋外暴露したPC梁試験体のASR劣化性状および試験体から採取したコアの力学的性質について検討した。

本研究より得られた主要な結果は以下に示す通りである。

- (1) PC梁試験体では環境条件やPC鋼材によるプレストレスの影響により、部材鉛直方向の膨張が卓越し、膨張の異方性によりPC鋼材に沿ったひび割れおよびそりが生じた。
- (2) ASR劣化したPC梁試験体から採取したコアの圧縮強度は採取位置によって大きく異なり、PC鋼材による拘束の影響が大きい試験体下部の部材軸方向から採取したコアの圧縮強度が最大になった。
- (3) ASRが発生した高炉スラグ微粉末を含有したPC梁試験体から採取したコアは、圧縮強度が増加していたにもかかわらず、静弾性係数は低下していた。
- (4) PC梁試験体における表面の膨張率とコアの圧縮強度には良好な相関性があり、PC梁試験体表面の膨張率の増加に従いコアの圧縮強度も低下する傾向がみられた。
- (5) PC梁試験体のASRゲルの化学組成は高炉スラグ微粉末添加の有無に関わらず、ほぼ同様な値となった。

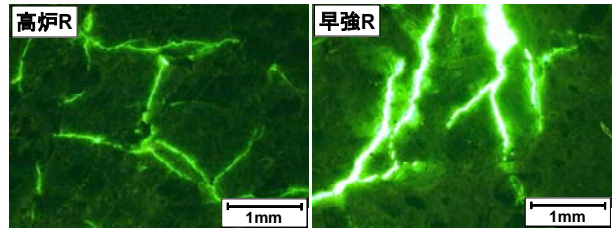


写真-3 蛍光顕微鏡による微細ひび割れの観察結果  
(セメントモルタル部分)

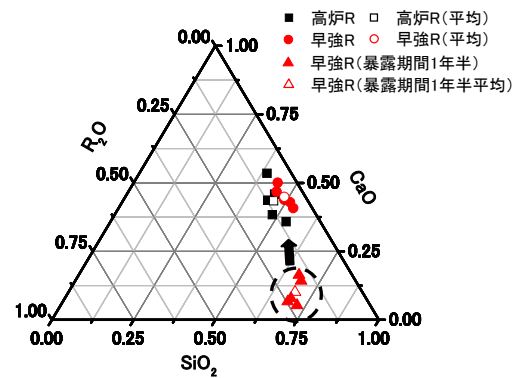


図-13 ASRゲルの化学組成

謝辞：本研究の実施にあたり、ご協力いただいたBSPC研究会、並びに安部日鋼工業（株）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.1065-1070，2008.6
- 2) 小島孝昭，豊福俊泰，小林一輔：塩害に対応した高耐久性PC建造物の建設と性能評価に関する研究，土木学会論文集，No.802，Vol.69，pp.235-253，2005.11
- 3) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート建造物の開発，1998
- 4) 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梁部材の耐荷力特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1305-1310，2007.6
- 5) 北沢宏和，宇治公隆，國分勝郎，上野敦：アルカリ骨材反応を生じたPC桁コンクリートの炭素繊維シートによる補修効果の検討，コンクリート工学論文集，第13巻，第2号，pp.117-127，2002.5
- 6) 小林一輔，森弥也，野村謙二：圧縮強度試験によるアルカリ骨材反応の診断方法，土木学会論文集，No.460，pp.151-154，1993.2
- 7) 川村満紀：基礎土木工学シリーズ5，土木材料学，森北出版株式会社，p.83，1996