

報告 PC梁部材のASR劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末の効果の確認を目的とした暴露試験

養田 理希^{*1}・鳥居 和之^{*2}・横山 博司^{*3}・古川 柳太郎^{*4}

要旨: 高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応抑制効果を評価する目的で、反応性骨材およびアルカリ (NaCl) を含有するプレストレストコンクリート梁試験体を作製し、屋外にて長期暴露試験を開始した。一夏を過ぎた暴露期間3ヶ月において、早強セメント単味配合の試験体にはひび割れが多数発生し、高炉スラグ微粉末を含有した配合の試験体では全くひび割れが発生していない。本報告は、プレストレストコンクリートに対する高炉スラグ微粉末のアルカリシリカ反応抑制効果について検討したものである。

キーワード: ASR, 暴露試験, 高炉スラグ微粉末, プレストレストコンクリート, 蒸気養生

1. はじめに

プレストレストコンクリート構造物 (以下, PC 構造物と略記) はプレストレスによりひび割れを制御できることや、鉄筋コンクリート構造物と比較して高強度のコンクリートが用いられていることなどから、耐久性が高い構造物である。しかし、構造物の設置される環境条件や用いられる材料によっては劣化を生じる場合がある。このような状況より、最近では高炉スラグ微粉末を用いて耐久性を向上したPC構造物が建設される事例が報告されている¹⁾。高炉スラグ微粉末は塩化物イオンの浸透やアルカリシリカ反応 (以下, ASR と略記) を抑制する効果があることが知られているが、PC 構造物に対する ASR 抑制効果に関する報告は少ない²⁾。このことから、BSPC 研究会では高炉スラグ微粉末を含有したPC構造物の ASR 抑制効果を明らかにするため、反応性骨材を含有する PC 梁試験体を作製し、屋外における長期暴露試験を計画した。

本報告は、暴露試験開始後夏季3ヶ月を経過した時点で、すでに早強セメント単味配合を適

用した試験体ではひび割れが顕著に発生するなどの劣化症状が現れ、高炉スラグ微粉末を含有する配合の試験体ではひび割れの発生などが全く見られていないことより、PC 梁部材の ASR 劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したセメントは早強ポルトランドセメント (密度: 3.14g/cm^3 , 比表面積: $4510\text{cm}^2/\text{g}$ 記号: H), 高炉スラグ微粉末は粉末度 6000 のもの (密度: 2.91g/cm^3 , 比表面積: $5800\text{cm}^2/\text{g}$, 記号: BFS) である。反応性骨材は事前に行ったモルタルバー試験³⁾で顕著な ASR 膨張が確認された北海道札幌近郊産の安山岩 (化学法 (JIS A1145) の結果: $\text{Sc}=688\text{mmol/l}$, $\text{Rc}=78\text{mmol/l}$, $\text{Sc/Rc}=8.8$) の砕砂および砕石を使用した。また、比較のため無害骨材として、岐阜県揖斐川産の川砂 (化学法 (JIS A1145) の結果: $\text{Sc}=33\text{mmol/l}$, $\text{Rc}=64\text{mmol/l}$, $\text{Sc/Rc}=0.5$) および川砂利 (化学法 (JIS A1145) の結果: $\text{Sc}=32\text{mmol/l}$, $\text{Rc}=45\text{mmol/l}$, $\text{Sc/Rc}=0.7$) を使用した。

*1 (株)安部工業所 技術開発部技術開発課長補佐 (正会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 (株)安部工業所 執行役員中部支店長 (正会員)

*4 新日鐵高炉セメント(株) 営業部 技術部長

表-1 コンクリートの配合

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

* : B=C+BFS

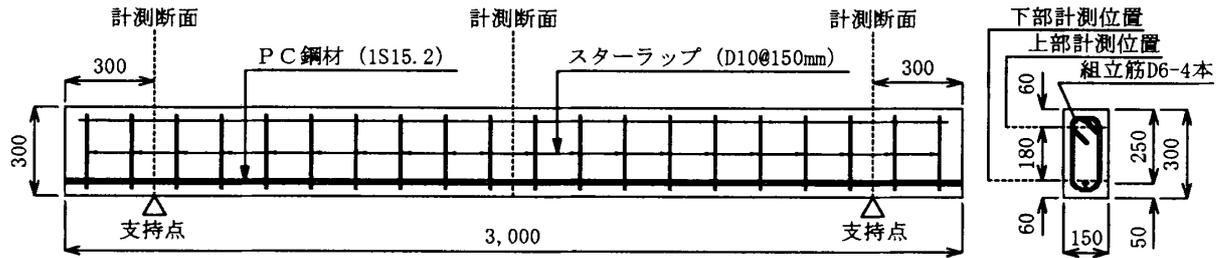


図-1 試験体形状

表-2 試験体の概要

試験体 No.	配合種類	導入時プレストレス	試験体本数
H-A	H+反応性骨材	188.0 (kN)	4
B-A	H+BFS+反応性骨材		2
H-G	H+健全骨材		4
B-G	H+BFS+健全骨材		2



写真-1 屋外暴露の状況

2.2 コンクリートの配合

反応性骨材を用いた配合については、骨材のアルカリシリカ反応性との関係より、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 Na₂O 量で 10kg/m³ になるように添加した。なお、NaOH を多量に添加するとコンクリートの強度性状に悪影響を与えることが懸念されたため NaCl を用いた。また、セメントおよび高炉スラグ微粉末のアルカリ量は考慮していない。無害骨材を用いた配合については、PC 製品工場にて実績がある配合を用いた。コンクリートの配合を表-1 に示す。

2.3 試験体の概要

試験体は、断面 150mm×300mm×長さ 3000mm に 1S15.2 の PC 鋼材を 1 本配置した梁部材である。試験体の形状を図-1 に、試験体の概要を表-2 にそれぞれ示す。初期養生条件は蒸気養生 (60℃) とし、打設後 18 時間経過後、プレテンション方式にてプレストレスを導入した。その

後、約 2 週間経過した後に屋外に暴露した。

2.4 測定概要

試験体は、岐阜市郊外の PC 製品工場内の日当たりの良い屋外に 2 点支持で設置した。写真-1 に屋外暴露の状況を示す。コンクリートの膨張量および超音波伝播速度計測を行う断面は両端より 300mm の断面および支間中央断面とし、試験体側面の上下縁側および下縁側にて 1 ヶ月毎に実施した。膨張率計測は、南側面の部材軸方向および部材軸直交方向について行った。また、暴露開始約 1 ヶ月の時点で H-A の上面にひび割れが顕著に発生し始めたため、H-A 上面に、部材軸方向および部材軸直交方向の膨張率を計測するため、ゲージプラグを追加した。計測位置は、側面については上縁および下縁より 60mm 内側、上面については部材幅方向の中心とし、標点間距離は 100mm である。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

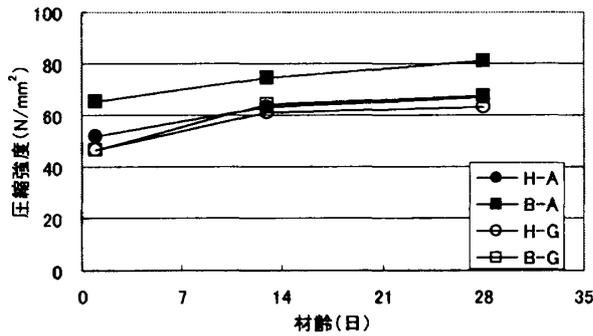


図-2 コンクリートの圧縮強度

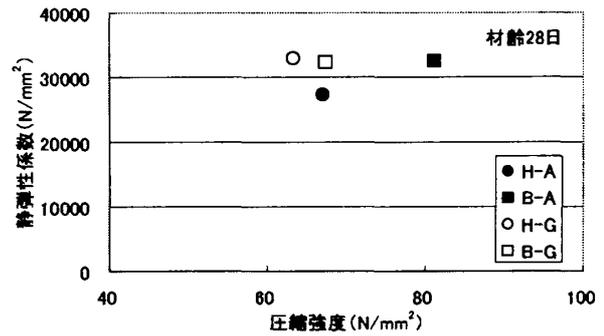


図-3 コンクリートの静弾性係数

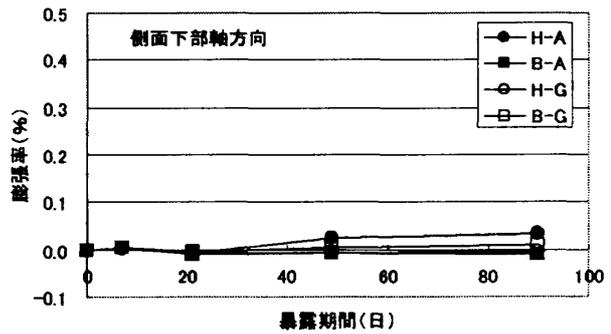
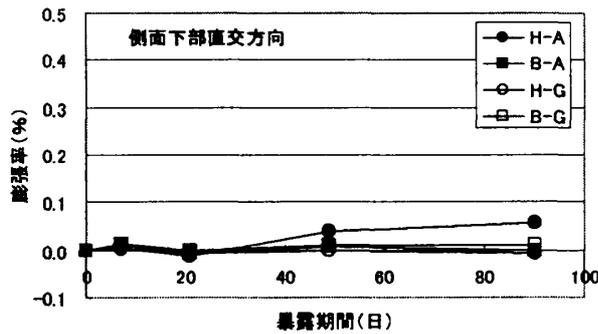
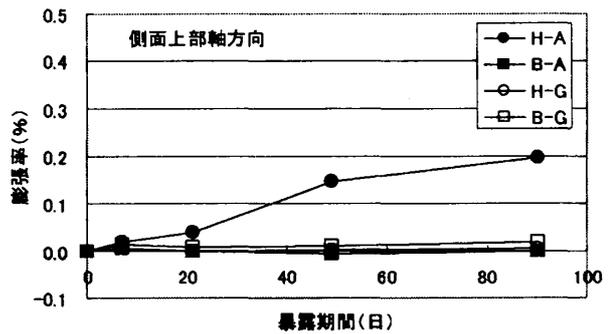
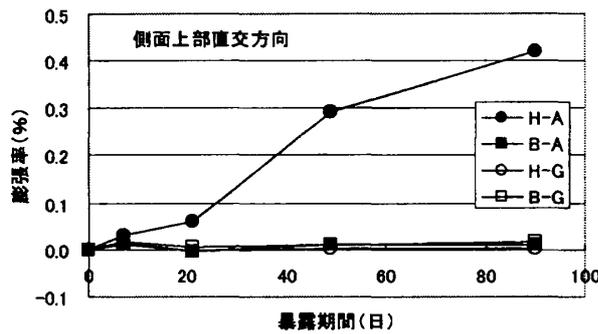


図-4 試験体の膨張率 (側面)

している。

試験体のそり量およびひび割れ観察は暴露開始後 3 ヶ月にて実施した。コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、試験体と同時に作製した $\phi 100 \times 200$ の円柱供試体について計測した。

3. 試験結果および考察

3.1 コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度は、プレストレス導入時 (材齢 18 週間)、材齢 13 日および 28 日、静弾性係数は、材齢 28 日にて計測した。コンクリートの圧縮強度および静弾性係数を図-2 および 3 に示す。

圧縮強度は、B-A の値が他の供試体と比較して大きくなっている。これは、アルカリ (NaCl) を多量に混入させたため、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性が顕著に現れたと考えられる。材齢 28 日に至る強度発現の傾向に関しては、供試体

による差異は見られない。しかし、静弾性係数においては、H-A の値が一般よりも小さくなっており、材齢 28 日の時点で、すでに ASR による微細なひび割れが発生し、静弾性係数の低下を生じたと考えられる。一方、B-A に関しては、H-A よりも大きな静弾性係数を示しており、高炉スラグ微粉末により ASR が抑制されていると思われる。

3.2 試験体の膨張特性

一般に ASR による膨張は長い年月を掛けてゆっくりと進展する。本試験では、多量のアルカリ (NaCl) および反応性の高い砕石および砕砂を用いることで、短期間で ASR による膨張を生じさせていることが特徴である。

図-4 および 5 に部材側面および上面の膨張率を示す。膨張率の測定結果は、試験体種類ごと

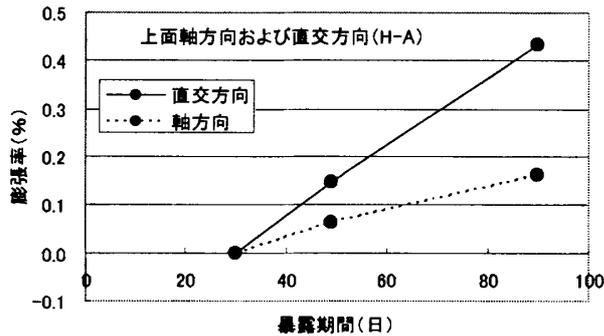


図-5 膨張量計測結果 (上面)

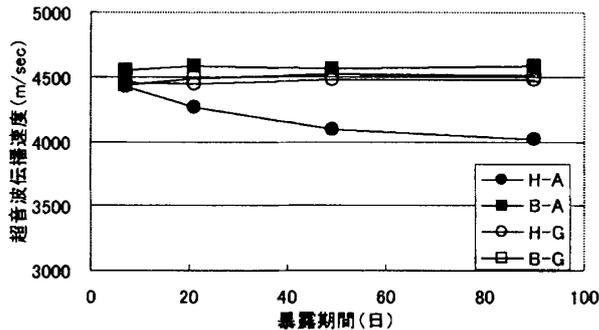


図-7 試験体の超音波伝播速度

に部材側面上部, 下部および部材軸方向, 直交方向それぞれで平均している。

H-A は, B-A を含む他の試験体が全く膨張を生じていないのに対して顕著な膨張を生じている。H-A の膨張について以下に述べる。部材側面に関しては, 部材上部において, 暴露開始直後から顕著な膨張が生じている。また, 部材下部においても, 膨張率は小さいが同様の傾向が見られる。部材軸方向および部材軸直交方向の膨張率は, 上部と下部で大小はあるが, 全体的に部材軸直交方向は部材軸方向の 2 倍程度の値を示している。部材上面に関しても部材軸直交方向に大きな膨張を示している。部材上部と下部の膨張挙動の違いは, PC 鋼材の配置が下縁に偏心しており, 試験体下部の膨張が拘束されていることや, 試験体上面は, 特に日射や雨水の影響を受けやすいことから ASR を促進させ, 上部と下部の膨張に大きな差が現れていると考えられる。また, 全体的に部材軸直交方向の膨張が大きくなっていることは, 軸方向の膨張がプレストレスにより拘束されているためと考えられる。

H-A の高さ方向の膨張率の変化を図-6 に示す。部材軸方向に関して, 膨張率が一様でなく, 試験体両端が大きく中央付近は小さい傾向が見ら

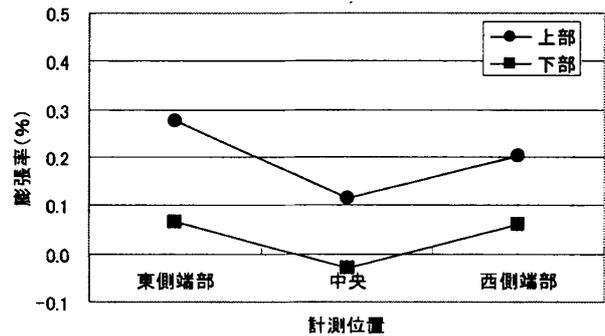


図-6 H-A の高さ方向の膨張率の変化

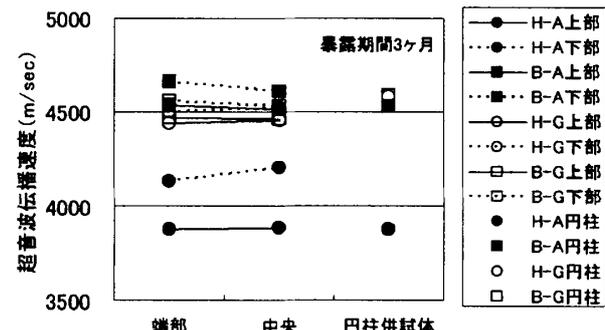


図-8 試験体各部およびコンクリート供試体の超音波伝播速度分布

れる。本試験体はプレテンション方式でプレストレスを導入しており, 端部の定着はPC 鋼材とコンクリートとの付着力で行われている。一般にプレテンション方式の定着長は, 鋼材径の 65 倍⁴⁾と言われており, 部材端部 (PC 鋼材自由端) から鋼材径の 65 倍の距離までは, 部材中央部などに比べてプレストレス量が小さくなっている。1S15.2 の PC 鋼材の定着長は 988mm であるが, 端部計測断面は試験体端部より 300mm の位置であり, プレストレスが中央部よりも小さくなっている。よって, 端部はプレストレスによる ASR 膨張の拘束効果が小さいため, 中央部よりも膨張量が大きくなっていると考えられる。

3.3 試験体の超音波伝播速度

図-7 に試験体の超音波伝播速度を示す。超音波伝播速度は, 暴露開始当初は全ての試験体においておおよそ 4500m/sec であった。しかし, H-A については暴露期間 20 日の計測時点で低下する傾向が見られ, この時点で, すでに ASR が生じているものと推測される。これは, 暴露開始時期が 7 月であり気温が高いことなどから, 暴露開始直後より ASR が進行したと考えられる。また, 計測結果は, 膨張の発生時期 (図-4 参照)

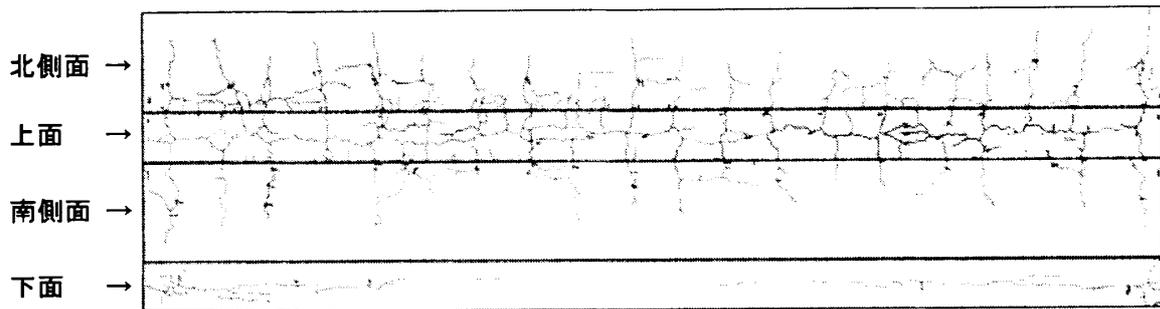


図-9 ひび割れ発生状況 (H-A)

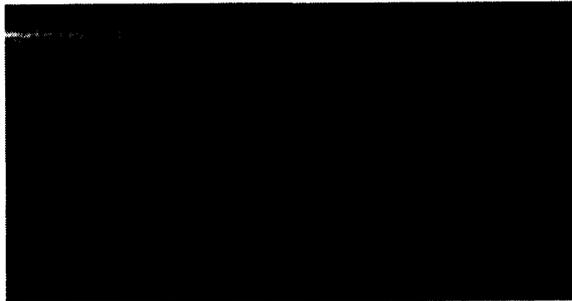


写真-2 上面のひび割れ発生状況 (H-A)

とも対応している。暴露期間 3 ヶ月が経過した時点では、H-A の超音波伝播速度は 10%程度低下しているが、B-A に関しては、H-G、B-G と同様に 4500m/sec 程度を維持しており、高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果が発揮されていると考えられる。

試験体各部およびコンクリート供試体の超音波伝播速度分布（暴露期間 3 ヶ月）を図-8 に示す。H-A の超音波伝播速度は、試験体上部では端部および中央部に差が見られず、コンクリート供試体と同等であった。上部はプレストレスによる拘束が期待できないため、コンクリート供試体と同等の値を示していると思われる。試験体下部は上部よりも大きな値を示し、端部の値が中央部よりも小さくなっている。膨張特性と同様にプレストレスの効果が考えられる。

H-A 以外については、端部と中央部の値に明確な違いは見られないが、上部と下部については下部がやや大きい値を示す傾向が見られ、部材作製時の締め固めの影響による密実さの違いやプレストレスによる応力状態が表れていると考えられる。

3.4 ひび割れ発生状況

全ての試験体のうち、H-A のみに顕著なひび割

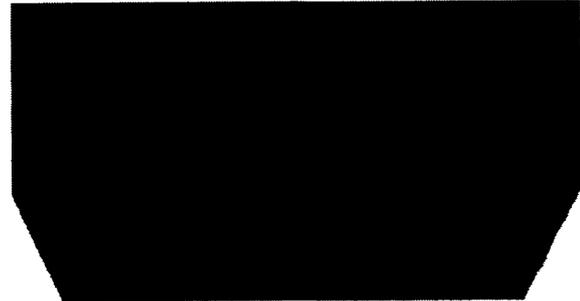


写真-3 底面のひび割れ発生状況 (H-A)

れが発生している。H-A のうち代表的な試験体について暴露期間 3 ヶ月の時点にて透明なシートに写し取ったひび割れ発生状況を図-9 に、上面および底面の代表的なひび割れ発生状況を写真-2 および 3 に示す。試験体上面には部材軸方向にほぼ連続した 0.2~0.4mm のひび割れが見られる。また、部材軸直交方向には 0.2~0.35mm のひび割れが、全長に渡りスターラップ配置位置に発生している。側面においては、上面の部材軸直交方向のひび割れと繋がった 0.2~0.3mm のひび割れが発生している。また、上面から底面に向かうに従い、ひび割れ幅および本数は減少し、底面までは到達していない。試験体底面については、中央付近にはひび割れが少なく、端部に向かうに従って部材軸方向のひび割れが多くなる傾向が見られ、部材軸直交方向のひび割れは発生していない。ひび割れ幅は 0.1~0.25mm 程度である。部材軸直交方向のひび割れも生じている。部材端部付近では、上面、側面および底面の全てにおいてひび割れ幅が 0.5~0.6mm と大きくなっており、側面から底面に到達するものや底面の部材直交方向に発生したひび割れが認められた。

本試験体は、PC 鋼材の配置が大きく下縁側に

偏心しているため、下縁側に大きな圧縮力、上縁側には引張力が作用している。よって、上面にはRCもしくは無筋構造物とよく似たひび割れが卓越して発生し、部材軸方向に拘束を受ける底面では、PC鋼材に沿った方向性のあるひび割れが発生していると考えられる。また、底面は、日射や雨水の影響が少なくASRの進行が遅いため、ひび割れの発生が少ないと考えられる。端部のひび割れが部材軸方向および直交方向ともに大きくなっていることおよび底面に部材軸直交方向のひび割れが生じているのは、端部付近は中央部に比べてプレストレスが小さいことが影響していると考えられる。実際のPC橋梁におけるASRによるひび割れは、支間中央よりも端部付近に多く見られ、下フランジ側面および底面に、プレストレス方向に沿った微細なひび割れが発生しており、本試験とも対応している。

ひび割れは、試験体暴露後30日以内の非常に早い時期に発生している。一方、冬季に作製した同一配合（反応性骨材使用およびNaCl添加）のコンクリート供試体を2月より暴露していたが、夏季を迎えるまでは0.1mm以下の小さなひび割れが発生している程度であった。しかし、7月から8月にH-Aと同様な大きなひび割れに進展した。このことからASRは冬季にはあまり進行せず、夏季に大きく進行することが伺えた。

3.5 試験体のそり

試験体中央で計測した暴露期間3ヶ月における各試験体のそり量を表-3に示す。表中の計算値の算出は、以下の条件にて行い、全ての試験体の平均値を示した。プレストレス導入時の静弾性係数は材齢28日の静弾性係数（H-A以外）より推測した値、クリープ係数は90日の値をそれぞれ用いた。そり量は、H-A以外の試験体の実測値と計算値はよく一致している。一方、H-Aについては、計算値の約4倍と非常に大きな値を示しており、ASRによる膨張の影響と考えられる。

4. まとめ

本試験結果をまとめると以下のものである。

- (1) 高炉スラグ微粉末6000を早強ポルトランド

表-3 試験体のそり量 (mm)

そり量	H-A	B-A	H-G	B-G
実測値	19.0	5.0	5.4	5.0
計算値	4.7			

セメントの50%に置換して用いたPC構造物は、ASRを抑制する効果が認められる。

- (2) プレストレスによる拘束が大きい部分と小さい部分とでは、小さい部分の方がASRによる劣化が進行しやすい。
- (3) ASRは、気温や湿度が高い夏季において顕著に進行する。
- (4) PC構造物にASRが生じた場合、その膨張作用により、そり上がり等の変形を生じる恐れがある。

本暴露試験は2年間を予定している。暴露終了時には、梁部材の載荷試験（曲げ、せん断）を計画しており、PC構造部材としての高炉スラグ微粉末のASR抑制効果を検証する予定である。本研究はBSPC研究会（㈱安部工業所、オリエンタル建設㈱、日本高圧コンクリート㈱、㈱ピーエス三菱、ピーシー橋梁㈱、前田製管㈱、三井住友建設㈱、新日鐵高炉セメント㈱）が金沢大学へ委託して実施している。試験実施にあたり協力いただいた金沢大学大学院自然科学研究科蔡云峰氏、松村将充氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小島孝昭, 豊福俊泰, 小林一輔: 塩害に対応した高耐久性PC構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/V-69, pp235-253, 2005.
- 2) 土木学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, 1996.
- 3) 蔡云峰, 鳥居和之, 横山博司, 古川柳太郎: 促進養生法による高炉スラグ微粉末のASR抑制効果の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, pp. 763-768, 2005.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IIIコンクリート橋編, 2002.