

## 高炉スラグ微粉末を用いたプレストレストコンクリートのASR劣化抑制効果

(株)安部日鋼工業	正会員	○蓑田 理希
(株)安部日鋼工業	正会員	松山 高広
新日鐵高炉セメント(株)		古川 柳太郎
金沢大学大学院	工学博士	鳥居 和之

## 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、一般に鉄筋コンクリート構造物(以下、RC構造物と略記)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使用材料によっては劣化を生じる場合がある。この対策として、最近では高炉スラグ微粉末を用いて耐久性を向上させたPC構造物の建設事例が報告されている<sup>1)</sup>。高炉スラグ微粉末は、塩化物イオンの浸透やASRを抑制する効果があることが知られているが、RC構造物とは異なるコンクリートの配合(単位セメント量の増大)とプレストレスによる拘束の2点を特長とするPC構造物に対するASR抑制効果に関する報告は少ない<sup>2)</sup>。このことから、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。

本報告では、暴露期間1年9ヶ月経過時点で、早強セメント単味配合適用の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たのに対し、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がほとんど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<sup>3</sup>,比表面積:4510cm<sup>2</sup>/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<sup>3</sup>,比表面積:5800cm<sup>2</sup>/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<sup>3)</sup>で顕著なASR膨張を確認した北海道札幌近郊産の安山岩(化学法(JIS A1145)の結果:Sc=688mmol/l, Rc=78mmol/l, Sc/Rc=8.8)の砕砂および砕石を使用した。また、比較のために無害骨材として、岐阜県揖斐川産の川砂(化学法(JIS A1145)の結果:Sc=33mmol/l, Rc=64mmol/l, Sc/Rc=0.5)および川砂利(化学法(JIS A1145)の結果:Sc=32mmol/l, Rc=45mmol/l, Sc/Rc=0.7)を使用した。

## 2.2 試験体の概要

試験体は、断面150mm×300mm、長さ3000mmの梁部材に1S15.2のPC鋼材を下縁側に100mm偏心させて1本配置している。試験体の形状を図-1に、試験体の概要を表-1にそれぞれ示す。初期養生は蒸気養生(60℃)を実施し、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、暴露した。屋外暴露の状況を写真-1に示す。暴露位置の降水量と日照時間は、年間約1800mm、約2000時間である。

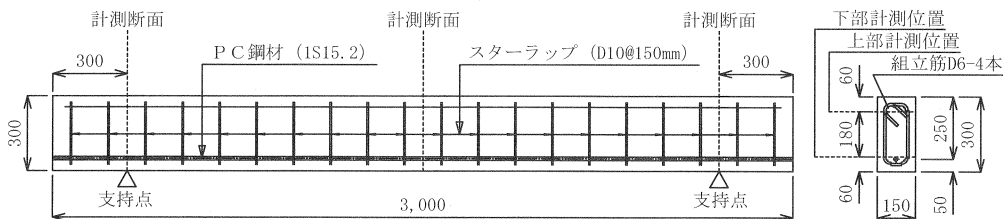
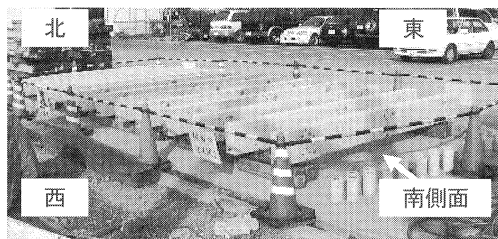


図-1 試験体形状

表一 PC 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)	2
B-A	H+BFS+反応性骨材		2
H-G	H+無害骨材		2
B-G	H+BFS+無害骨材		2



写真一 屋外暴露の状況

表二 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> )						混和剤 A (B×%)	スラン プ (cm)	空気 量 (%)
			W	C	BFS	S	G	添加 アルカリ			
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

### 2.3 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 ASR 膨張を早期に発生させるためにアルカリ (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, 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二に示す。

### 2.4 測定概要

曲げ耐力等の力学性状を解明するにあたり, PC 構造を保った状態での継続的な計測を行うために, 非破壊検査として, コンクリートの膨張率および超音波伝播速度の計測を行うこととした。計測を行う断面は支点 (両端より 300mm の位置) および支間中央とし, 計測位置は試験体側面の上縁および下縁より 60mm 内側とした。計測はおおよそ 3 ヶ月毎に実施した。膨張率の計測は, 標点間距離を 100mm とし, 写真一の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。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。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 PC 試験体の膨張性状

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) と反応性の高い, 安山岩の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。PC 試験体の膨張率の変化を図三に示す。膨張率の測定結果は, 試験体種類ごとの部材側面上部, 下部および部材軸方向, 直交方向のそれぞれの平均値である。H-A は, B-A を含む他の試験体がほとんど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 試験体の膨張は, とくに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。これは, 暴露開始時期が 7 月であり気温が高い時期であることから, 暴露開始直後より ASR が急速に進行したものと考えられる。

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

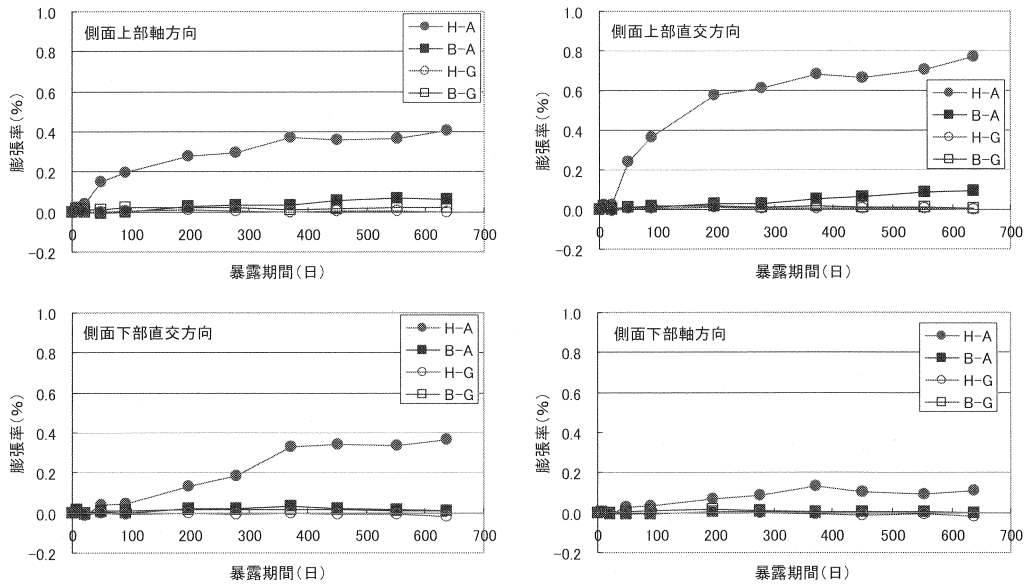


図-3 PC試験体の膨張率の変化 (側面)

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く、ASRが促進されていることによると考えられる。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。B-Aに関しては、2回目の夏季(暴露期間300~400日頃)に側面上部において若干の膨張が認められた。暴露期間1年9ヶ月におけるH-A、B-Aの膨張率を表-3に示す。ASRによる膨張率が高炉スラグ微粉末のASR抑制効果を示しているとする、高炉スラグ微粉末を用いた場合と比較して13.4%に抑制すると考えられる。しかしASRの進行度合いは、日射や雨水の影響で試験体の部位によって膨張率が異なること、ASRによる膨張は夏季に著しく進展する<sup>4)</sup>こと、反応性骨材の種類によって膨張挙動が異なることなど、暴露条件や暴露期間および材料などによって変化するため、ASR抑制効果を数値化して表現するには、多くの要因を考慮する必要があると考えられる。

表-3 ASRによる膨張率の比較

	膨張率 (%)		B-A / H-A
	B-A	H-A	
上側鉛直	0.096	0.773	12.4%
上側水平	0.062	0.403	15.4%
平均	0.079	0.588	13.4%

### 3.2 PC試験体の超音波伝播速度の変化

PC試験体の超音波伝播速度を図-4に示す。計測は、部材厚(150mm)方向について、英国C.N.S. INSTRUMENTS LTD製パンジットにより行った。H-Aの超音波伝播速度は、暴露開始直後より低下する傾向があり、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、3.1に前述したように、暴露開始時期の気温が高かったことが原因と考えられる。暴露期間3ヶ月経過時点では、H-Aの超音波伝播速度は暴露開始時より10%程度低下し、その後、若干の減少傾向は見られるものの暴露期間1年9ヶ月まで4000m/sec程度で安定している。また、超音波伝播速度の低下時期は、膨張の発生時期(図-3参照)ともよ

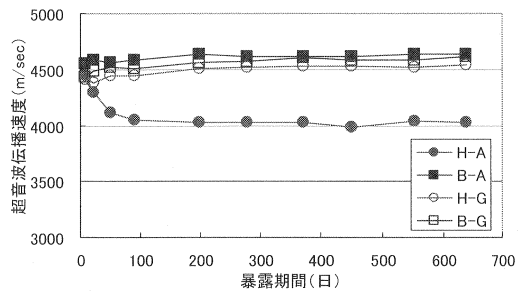


図-4 PC試験体の超音波伝播速度の変化

く対応している。一方、B-A に関しては、H-G、B-G と同様に暴露開始時より 4500m/sec 程度を維持し、良好であることを示しており、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。

### 3.3 PC 試験体の膨張率と超音波伝播速度の関係

H-A 試験体の各測定位置の直交方向および軸方向の平均膨張率と超音波伝播速度の関係を図-5 に示す。試験体表面の膨張率の増大に反比例して超音波伝播速度が低下する傾向が認められる。超音波伝播速度は、ヤング係数および圧縮強度に比例する傾向があるため<sup>5)</sup>、膨張率の増大に伴いヤング係数および圧縮強度の低下が推測される。また、試験体上部は下部と比較して、膨張率が大きく、超音波伝播速度が小さくなっていることから、試験体上部は下部よりもヤング係数および圧縮強度の低下などの ASR 劣化が進行していると考えられる。

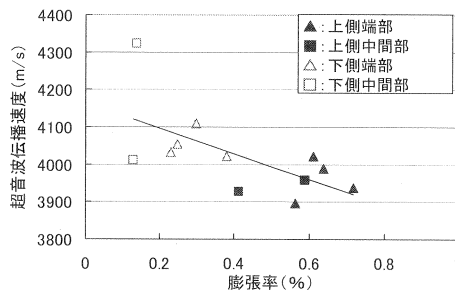


図-5 H-A 試験体の膨張率と超音波伝播速度の関係

## 4. まとめ

本試験の結果をまとめると以下のようである。

- (1) 高炉スラグ微粉末 6000 を早強ポルトランドセメントの 50% に置換して用いた PC 試験体には、ASR による顕著な劣化は発生しなかった。
- (2) 本研究における高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果は、高炉スラグ微粉末を用いない場合に比べて劣化進行速度が 13% 程度まで低減されると考えられた。しかし、使用材料・暴露期間などの各種要因が複雑に影響することが考えられるため、さらに検討を進めたい。
- (3) ASR 劣化を生じた供試体の膨張は長期にわたって継続しているが、超音波伝播速度の低下は、暴露開始後、数ヶ月で大きな低下を示し、その後あまり変化していない。
- (4) ASR 劣化を生じた試験体の膨張率と超音波伝播速度には相関関係が認められ、膨張率の増大からヤング係数および圧縮強度の低下が推測された。
- (5) PC 梁試験体では、日射や雨水の影響により、ASR の進行状況が部位によって異なることが分かった。

このため、実構造物の調査においては調査箇所を選定に注意が必要である。

本暴露試験は今後も継続する予定であり、PC 構造部材としての高炉スラグ微粉末の長期的な ASR 抑制効果をさらに検証する予定である。本研究は BSPC 研究会 ((株)安部日鋼工業, オリエンタル建設(株), 日本高圧コンクリート(株), (株)ピーエス三菱, ピーシー橋梁(株), 前田製管(株), 三井住友建設(株), 新日鐵高炉セメント(株)) が金沢大学へ委託して実施している。

## 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) 蕨田理希, 鳥居和之, 横山博司, 古川柳太郎: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, pp.839-844, 2006.
- 5) 川上英男, 脇敬一, 今井重行: コンクリートの共振周波数・超音波伝播速度と静弾性係数及び強度との関係について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, pp.619-624, 1993.