

高炉スラグ微粉末6000を用いたPC梁のASR劣化抑制効果の報告

(株)安部日鋼工業	正会員	工修	○石井	豪
(株)安部日鋼工業	正会員		宮島	朗
(株)安部日鋼工業	正会員		松山	高広
金沢大学大学院		工学博士	鳥居	和之

1. はじめに

近年、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¹⁾。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、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、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、2005年7月に骨材のASR膨張を早期に確実に発生させるために、多量のNaClを添加した反応性骨材を含有するPC梁試験体を作製し、屋外における促進暴露試験を開始した。本試験については、2006年および2007年の本シンポジウム³⁾で、暴露開始後6ヶ月および1年9ヶ月経過時点の試験報告を行っている。本書は、暴露開始後3年3ヶ月経過時点について、高炉スラグ微粉末6000を用いたPC梁のASR劣化抑制効果について報告するものである。

2. 試験内容

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(H)、高炉スラグ微粉末(BFS)の6000g/cm²である。反応性骨材は事前に行ったモルタルバー試験⁴⁾で顕著なASR膨張を確認した北海道札幌近郊産の安山岩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および川砂利を使用した。

2.2 PC梁試験体の概要

PC梁試験体は、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、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。

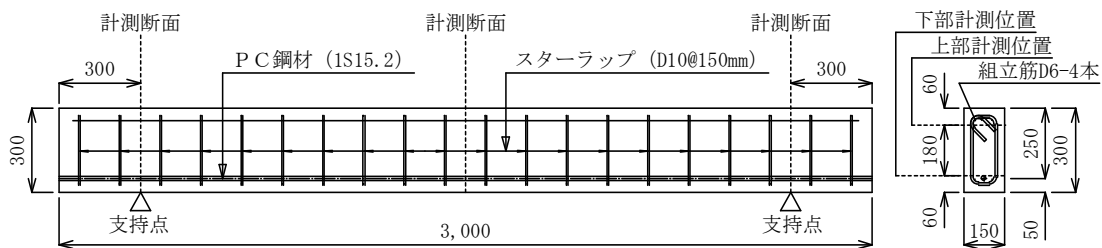


図-1 PC梁試験体形状

表-1 PC梁試験体の概要

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-1 PC梁試験体

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膨張を早期に確実に発生させ、比較試験が進められるように、特に多量のNaClを添加した。(アルカリ (NaCl) は等価Na₂O量で10kg/m³)

2.4 試験概要

2.4.1 定期計測

- ①膨張量 : コンタクトストレインゲージにより、側面6箇所(図-2)および反応性骨材使用のものについては上面についても計測を行った。
- ②超音波伝播速度: 軸直交方向について6箇所(図-3)の計測と、同時に円柱供試体についても行った。
- ③そり量 : 支間中央部のそり上がり量を計測した。

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面および下縁より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-1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。

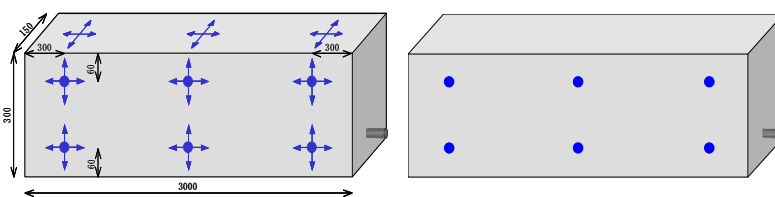


図-2 膨張量計測位置

図-3 超音波伝播速度計測位置

計測は、標点間距離を100mmとし、写真-1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。

2.4.2 荷重試験

図-4にPC梁試験体の変位計、荷重計設置概要を示す。

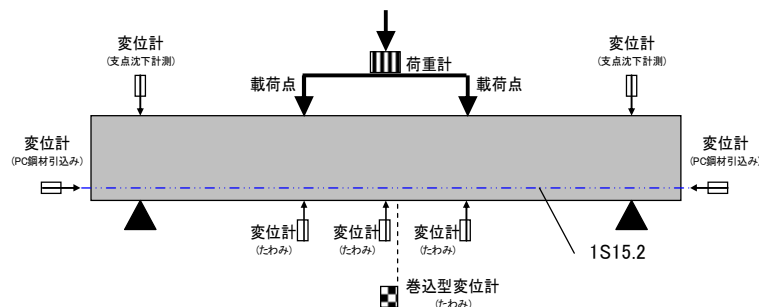


図-4 変位計、荷重計設置概要

3. 試験結果および考察

3.1 PC梁試験体の膨張性状

PC梁試験体の膨張率の変化を図-5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 供試体は、暴露開始直後から膨張が生じ、特に部材上部において顕著に現れている。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量は、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。

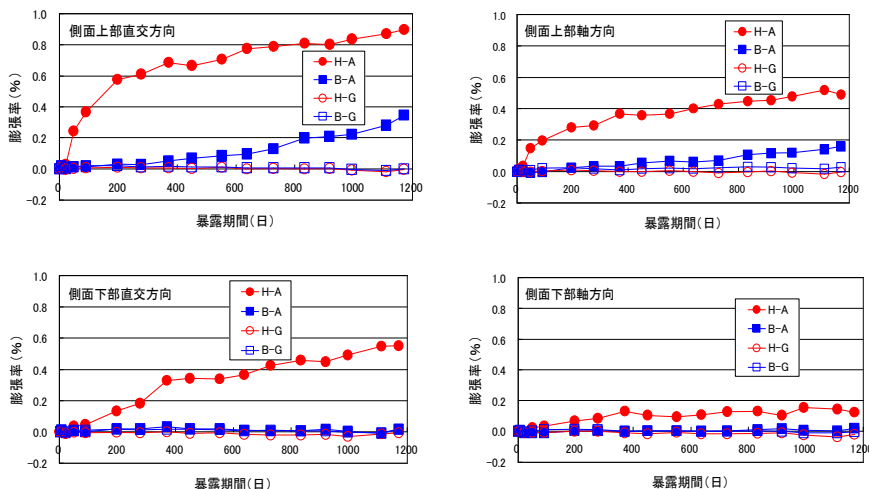


図-5 PC梁試験体の膨張率

B-A については、暴露開始後 300~400 日頃に側面上部において若干の膨張が認められ、その後、側面上部軸方向および直交方向ともに H-A の場合と大きく異なり、1 年遅れて緩やかな勾配で膨張が進行した。

暴露期間 3 年 3 ヶ月における H-A, B-A の側面上部の膨張率を表-2 に示す。この結果から膨張率の比率は、高炉スラグ微粉末を用いた場合には、早強セメント単味に対して、37%程度 (約 1/3) であることが分かった。

表-2 ASR による膨張率の比較

	膨張率 (%)		B-A / H-A
	B-A	H-A	
直交方向	0.334	0.896	38.4%
軸方向	0.162	0.490	33.1%
平均	0.253	0.693	36.5%

3.2 PC 梁試験体の超音波伝播速度の変化

PC 梁試験体および円柱供試体の超音波伝播速度を図-6 に示す。

図の PC 梁試験体および円柱供試体のグラフは、それぞれの全試験体の平均を示した。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。PC 梁試験体における H-A の超音波伝播速度は、

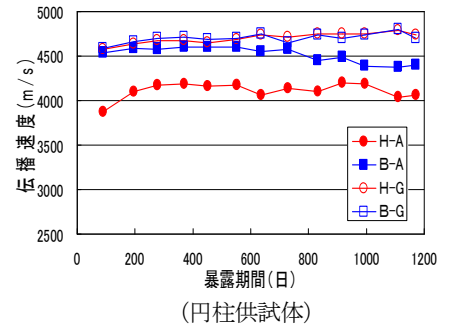
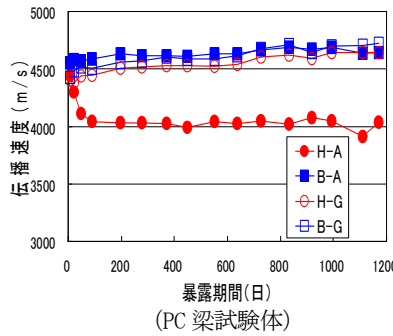


図-6 超音波伝播速度

暴露開始直後から低下し、暴露期間 3 ヶ月経過時点では、暴露開始時より 10%程度低下し、その後 4000m/sec 程度で安定している。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、「3.1 節」の膨張性状では、PC 梁上部に膨張の進行が確認されたが、PC 梁全体の平均超音波伝播速度としては大きな変化ではなく、ASR 抑制効果が発揮されていると考えられる。また、円柱供試体についても PC 梁試験体と同様な傾向であり、B-A に関しては、200m/sec 程度の低下が認められた。これは、プレストレスの影響が無いためと推測する。

3.3 PC 梁試験体の膨張率と超音波伝播速度の関係

図-7 は、暴露開始 1 年 9 ヶ月と 3 年 3 ヶ月における 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示す。図中に示す直線は、暴露開始 1 年 9 ヶ月と 3 年 3 ヶ月のそれぞれの測定結果の線形近似線である。暴露開始後 1 年 9 ヶ月時点では、近似線は右下がりであり、PC 梁試験体上側の ASR 劣化が下側よりも著しいことが分かる。しかし、暴露開始後 3 年 3 ヶ月時点では、近似線は水平に近くなっており、下部側の ASR 劣化が上部側の状態に近づいているものと考えられる。

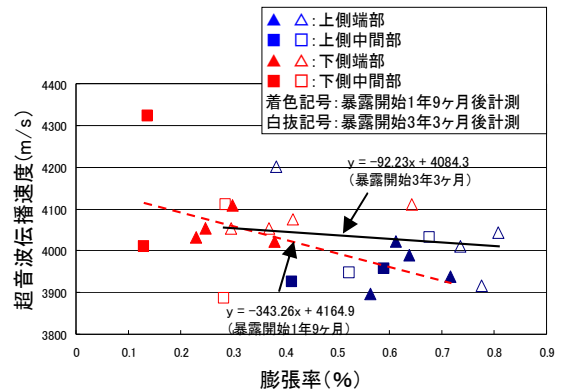


図-7 H-A 試験体の膨張率と超音波伝播速度

3.4 そり量

PC 梁試験体のそり量の変化を図-8 に示す。

H-A では、暴露開始直後から、そり量が穏やかに増加する傾向であった。暴露開始後 3 年 3 ヶ月時点では、約 40mm 生じた。一方 B-A については、暴露開始後 1 年ごろからそりの増加が始まり、暴露開始後 3 年 3 ヶ月時点で約 14mm となり、H-A の約 1/3 程度である。また、H-G および B-G については、クリープ変形によるそりと考えられ、暴露開始後 3 年 3 ヶ月時点で約 8mm となった。

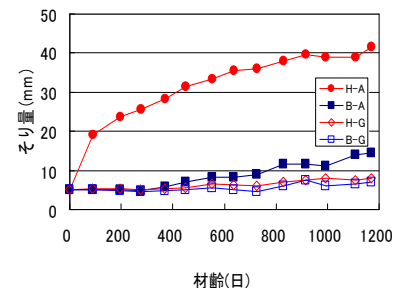


図-8 そり量の経時変化

3.5 弾性係数と圧縮強度

図-9 に円柱供試体の弾性係数と圧縮強度の関係を示す。左図は暴露開始後 28 日後、右図は暴露開始後 3 年 3 ヶ月後のデータであるが、H-A および B-A については、弾性係数および圧縮強度の低下が見られる。これは、円柱供試体における超音波伝播速度の低下の関係と類似する。また、H-G および B-G については、弾性係数および圧縮強度の低下はなく土木学会値とほぼ一致する。

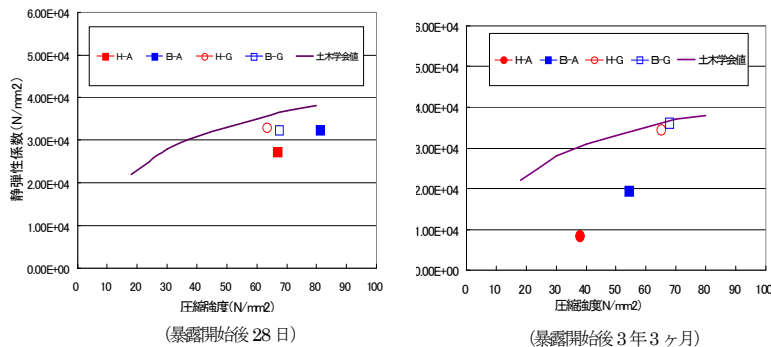


図-9 円柱供試体の弾性係数と圧縮強度

3.6 PC 梁載荷試験

図-10 に暴露開始後 3 年 3 ヶ月経過した PC 梁の載荷試験結果を示す。H-A については、PC 梁全体の膨張率の増加および超音波伝播速度の低下ならびに円柱供試体の圧縮強度および弾性係数の低下などからも予測できるが、PC 梁載荷試験の結果は、ASR の劣化として、他の PC 梁試験体より 20%程度の耐力力の低下が確認できた。また B-A については、PC 梁試験体上部の膨張率進行が確認されたものの、PC 梁全体としては、H-G および B-G と同等の耐力力があることが判明した。

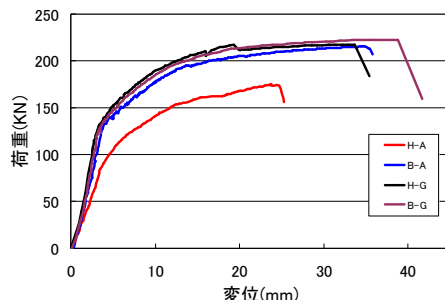


図-10 PC 梁載荷試験結果

4. まとめ

本試験の結果をまとめると以下のようなものである。

- 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 梁試験体の膨張については、早強セメント単味の場合と大きく異なり、1 年遅れて緩やかな勾配で進行し、高炉スラグ微粉末 6000 の ASR 抑制効果が大いことが分かった。暴露期間 3 年 3 ヶ月における膨張率の比率は、高炉スラグ微粉末 6000 を用いた場合には、早強セメント単味に対して、37%程度 (約 1/3) である。
- ②高炉スラグ微粉末を混和した PC 梁は、PC 梁試験体の載荷試験から、梁の上部側に ASR による劣化が発生しても、下部側に大きな劣化が発生していない状態では、上載荷重に対する耐力力の低下は殆ど無い。

本暴露試験体の計測については、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していく予定である。本研究は BSPC 研究会 ((株)安部日鋼工業, オリエンタル白石(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たものであり、この書面をお借りして関係者に感謝の意を表します。

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) 養田理希, 松山高広, 古川柳太郎, 鳥居和之: 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, プレストレストコンクリート技術協会第 16 回シンポジウム論文集, pp. 83-86, 2007.
- 4) 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.