

高炉スラグ微粉末50%置換PC梁部材のASR劣化抑制効果の検証

(株)安部日鋼工業 正会員 ○菱田 理希
 金沢大学大学院 工学博士 鳥居 和之
 (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

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。

本論文は、暴露試験開始後、夏季から冬季までの半年を経過した時点で、早強セメント単味配合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、高炉スラグ微粉末を含有する配合の試験体では劣化症状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/cm³,比表面積:4510cm²/g記号:H)、高炉スラグ微粉末は粉末度6000のもの(密度:2.91g/cm³,比表面積:5800cm²/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 A 1145)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、比較のため無害骨材として、岐阜県揖斐川産の川砂(化学法(JIS A 1145)の結果:Sc=33mmol/l, Rc=64mol/l, Sc/Rc=0.5)および川砂利(化学法(JIS A 1145)の結果:Sc=32mmol/l, Rc=45mol/l, Sc/Rc=0.7)を使用した。

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。

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)						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

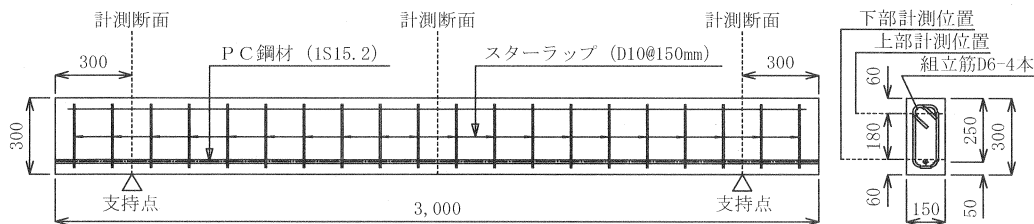


図-1 試験体形状

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+無害骨材		4
B-G	H+BFS+無害骨材		2

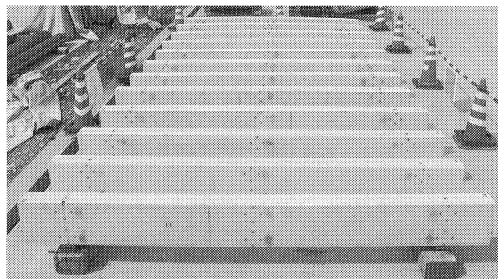


写真-1 屋外暴露の状況

2.3 試験体の概要

試験体は、断面 150mm×300mm、長さ 3000mm に IS15.2 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、試験体側面上縁側および下縁側にて 1 ヶ月から 3 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 ヶ月より実施した。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 φ100×200 の円柱供試体について計測した。

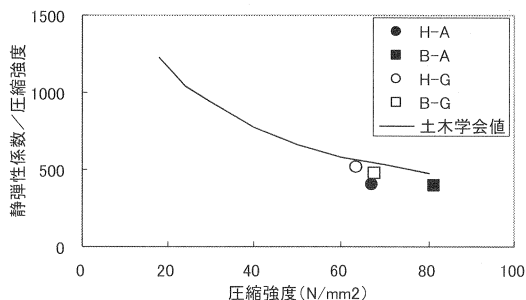


図-2 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係

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

材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2 に示す。一般に ASR により劣化したコンクリートは圧縮強度の低下に比較して静弾性係数の低下が大きいことが知られている。図中の土木学会値は健全なコンクリートを示しており、H-A は他と比較して、若干ではあるが健全なコンクリートから離れた位置にあると思われる。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

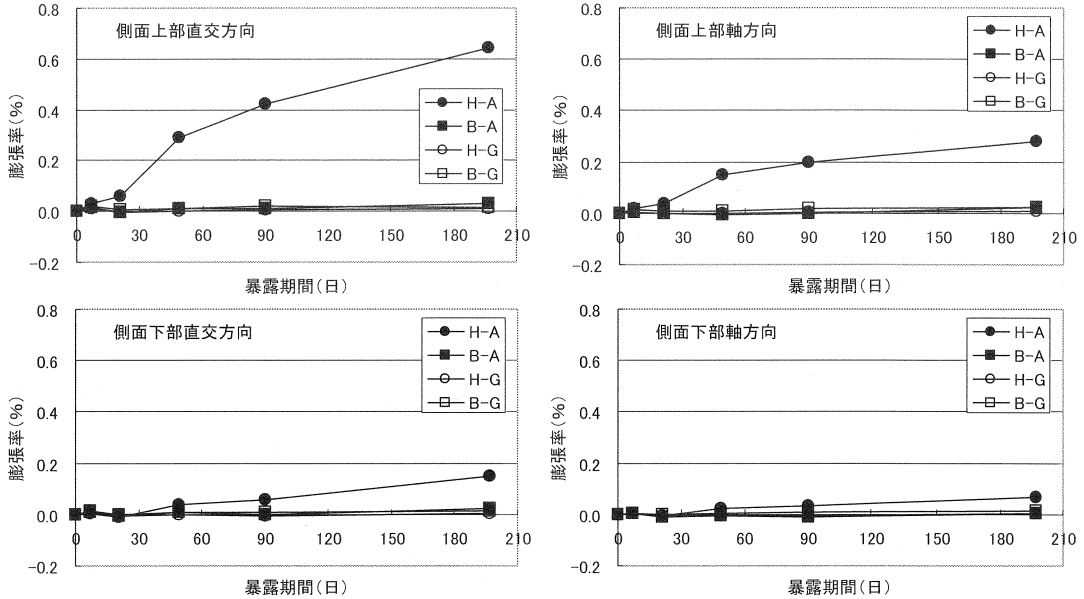


図-3 試験体の膨張率 (側面)

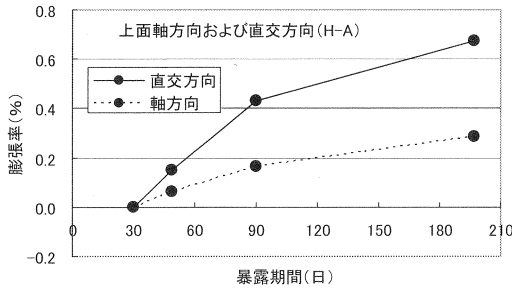


図-4 試験体の膨張率 (H-A 上面)

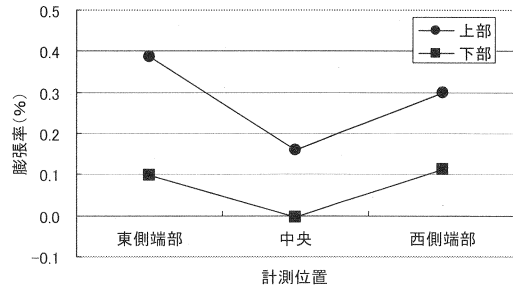


図-5 H-A の高さ方向の膨張率の変化

低下を生じつつあると考えられる。B-A に関しては、H-A よりも健全なコンクリートに近い位置にあり、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。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。

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と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-3 および 4 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

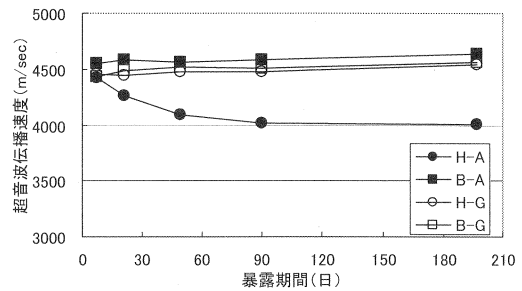


図-6 試験体の超音波伝播速度

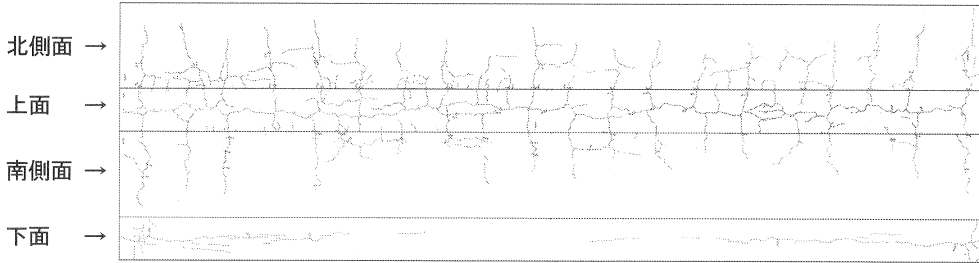


図-7 ひび割れ発生状況 (H-A)

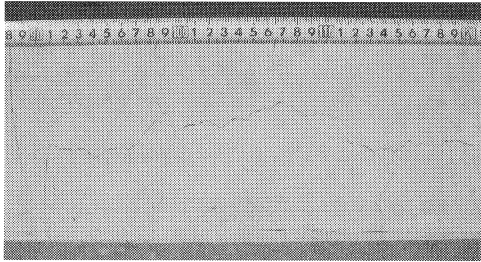


写真-2 上面のひび割れ発生状況 (H-A)

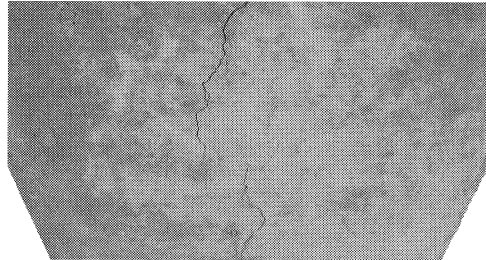


写真-3 底面のひび割れ発生状況 (H-A)

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-5に示す。部材軸方向に関して、膨張率が一樣でなく、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。IS15.2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い。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-6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-3参照)とも対応している。暴露期間6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以上を維持しており、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。

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-7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および直交方向に0.2~0.4mmのひび割れが見られる。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

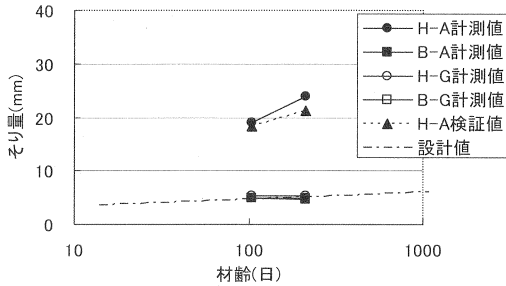


図-8 試験体のそり量

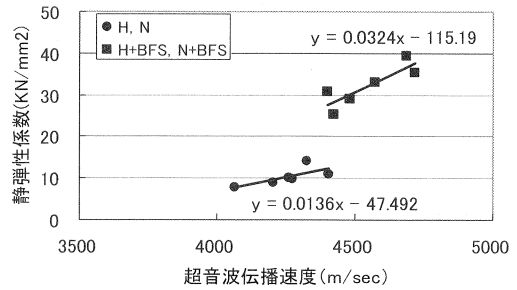


図-9 供試体の超音波伝播速度と静弾性係数の関係

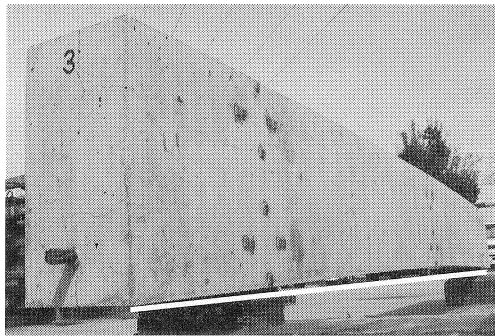


写真-4 H-A 試験体のそり状況

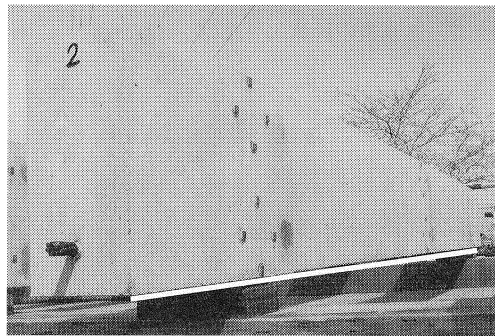


写真-5 B-A 試験体のそり状況

が発生し、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、部材軸方向に0.1~0.25mm程度のひび割れが発生しており、部材端部に多く中央付近では少ない傾向が見られる。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6ヶ月における各試験体のそり量を図-8に、H-AおよびB-Aの代表的な試験体のそり状況を写真-4, 5に示す。そり量は、H-A以外の試験体の計測値と設計値はよく一致している。一方、H-Aについては、写真-4, 5に示すように顕著なそりを生じており、計算値の約5倍と非常に大きな値を示している。この変形は、ASRによる膨張の影響と考えられる。

H-Aのそり量について検証を試みる。先に実施したコンクリートバー試験⁵⁾において、本試験と同様に塩

化ナトリウムを混入させた円柱供試体を採取し、屋外にて1年間暴露した。これらの静弾性係数および超音波伝播速度の計測結果を図-9に示す。配合は本試験と同様のもの(H, H+BFS)に加え、骨材に反応性の川砂、川砂利を用いたものを追加し、さらに水セメント比を50%として普通ポルトランドセメントを用いた配合(N, N+BFS)も実施した。ポルトランドセメントのみの配合は本試験と同様に高炉スラグ微粉末を混入した場合と比較してASR劣化による静弾性係数および超音波伝播速度の低下が生じている。ASR劣化を生じた早強および普通ポルトランドセメントのみの供試体について求めた近似式を式(1)に示す。

$$y = 0.0136 x - 47.492 \quad (1)$$

式(1)にH-A試験体の超音波伝播速度を代入して静弾性係数を求めると、暴露期間3ヶ月:7200N/mm², 同6ヶ月:7000N/mm²を得る。図-6に示すように、超音波伝播速度の低下が暴露開始50日頃までに大きく低下し、これ以降は安定していることから、式(1)より得られた静弾性係数をプレストレス導入時の静弾性係数に換えて、そり量の計算式(式(2), (3), (4))にあてはめる。

$$\delta_p = \frac{P_t \cdot e_p \cdot \ell^2}{8Ec \cdot I} \quad (\text{プレストレスによるそり}) \quad (2)$$

$$\delta_d = \frac{5M_{d0} \cdot \ell^2}{48Ec \cdot I} \quad (\text{試験体自重によるそり}) \quad (3)$$

$$\delta_\phi = \phi (\delta_p + \delta_d) \quad (\text{クリープによるそり}) \quad (4)$$

検証結果を図-8に検証値として示す。検証値は計測値と比較的よく一致している。なお、計算にあたり、クリープ係数は6ヶ月の値、プレストレスは、リラクセーションとコンクリートの膨張量計測結果から算出した増加応力を考慮した値を有効緊張力とした。

4. まとめ

本試験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を高炉スラグ微粉末の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小さい部分は、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り、静弾性係数を推測することで、変形を検証することが可能である。

本暴露試験は2年間で予定している。暴露終了時には、梁部材の荷重試験を計画しており、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(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) 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.
- 5) 松村将充, 養田理希, 蔡云峰, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末を含有したプレレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, 2006.