

論文 ASRによる劣化を生じたPC梁部材の耐荷力特性

養田 理希^{*1}・古川 柳太郎^{*2}・尾花 祥隆^{*3}・鳥居 和之^{*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(PC)のアルカリシリカ反応(ASR)の抑制効果を確認する目的で、反応性骨材(安山岩碎砂および碎石)を含有するPC梁試験体を作製し、屋外にて長期暴露試験を開始した。二夏を過ぎた暴露期間15ヶ月において、早強セメント単味配合の試験体にひび割れが多数発生した。また、ASRにより劣化を生じた早強セメント単味配合の試験体の曲げ耐力が、健全な試験体よりも大きく低下した。本論文は、PCに対する高炉スラグ微粉末のASR抑制効果を長期暴露により確認するとともに、ASRにより劣化したPC梁部材の耐荷力および変形性状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, 曲げ耐力

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、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、暴露期間15ヶ月を経過した時点で、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たのに対して、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。また、ASR劣化を生じた早強セメント単味配合試験体と比較用の健全試験体について曲げ試験を実施し、ASRによる劣化が生じたPC梁部材の耐荷力および変形性状について検討を行った。

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 A1145)の結果: Sc=688mmol/l, Rc=78mmol/l, Sc/Rc=8.8)の碎砂および碎石を使用した。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。

*1 (株)安部日鋼工業 技術本部開発部開発課長 (正会員)

*2 新日鐵高炉セメント(株) 営業部 技術部長

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻

*4 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)

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±1
H+BFS+反応性骨材	38	44	150	198	198	833	1040	-----	0.7	±2.5	-----
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

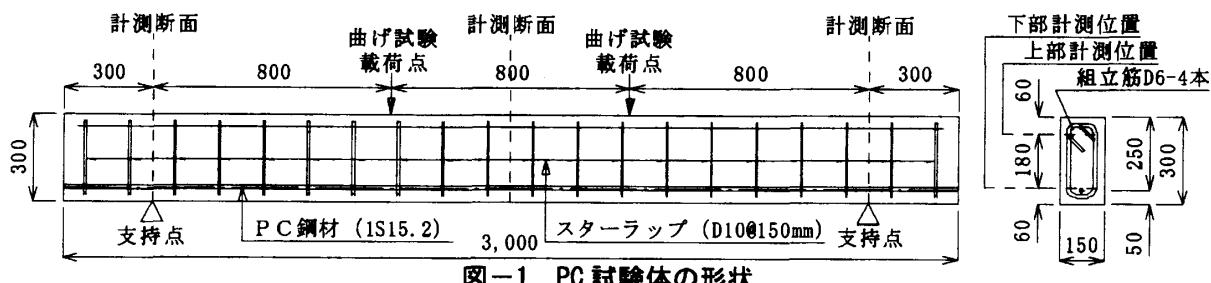


図-1 PC 試験体の形状

表-2 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	4	
B-A	H+BFS+反応性骨材	188.0	2
H-G	H+無害骨材	(kN)	4
B-G	H+BFS+無害骨材		2

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 ASR 膨張を早期に発生させるためにアルカリ (NaCl) を等価 Na_2O 量で $10\text{kg}/\text{m}^3$ 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 $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、長さ 3000mm の梁部材に 1S15.2 の PC 鋼材を 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-2 にそれぞれ示す。初期養生は蒸気養生 (60°C) を実施し、打設後 18 時間経過後、プレンション方式にてプレストレス（導入直後の

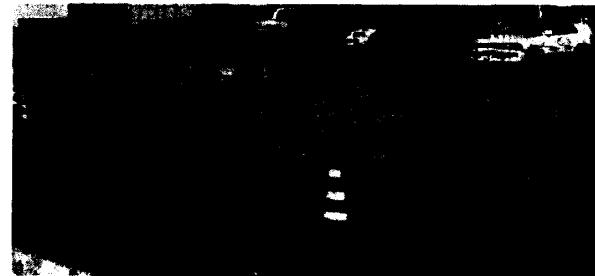


写真-1 屋外暴露の状況

応力： 1261 N/mm^2 ）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。写真-1 に屋外暴露の状況を示す。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。

2.4 測定概要

コンクリートの膨張量および超音波伝播速度の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。計測位置は、側面は上縁および下縁より 60mm 内側とし、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。

コンクリートの圧縮強度およびヤング係数は、試験体と一緒に作製し、試験体と一緒に暴露し

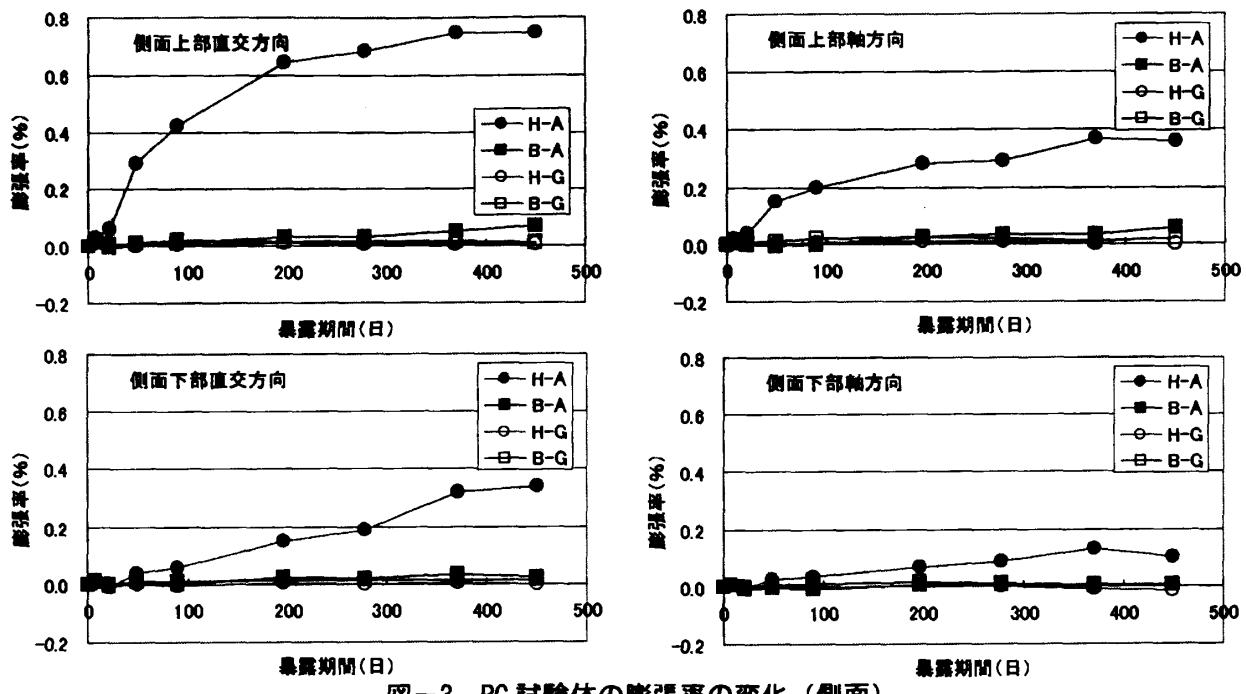


図-3 PC 試験体の膨張率の変化（側面）

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ヤング係数

暴露期間 15 ヶ月におけるコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を図-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ヤング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一般のコンクリートを示しているが、H-A は他と比較して、一般のコンクリートよりも圧縮強度およびヤング係数ともに大きく低下しており、とくにヤング係数の低下が顕著である。H-A 円柱供試体は数 mm 幅のひび割れが発生しており、ヤング係数の大きな低下を生じたと考えられる。一方、B-A に関しては、一般のコンクリートと同様であり、高炉スラグ微粉末により ASR が抑制されていることがわかる。

3.2 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、安山岩の碎石および碎砂を用いることで、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 に PC 部材（側面）の膨張率を示す。膨

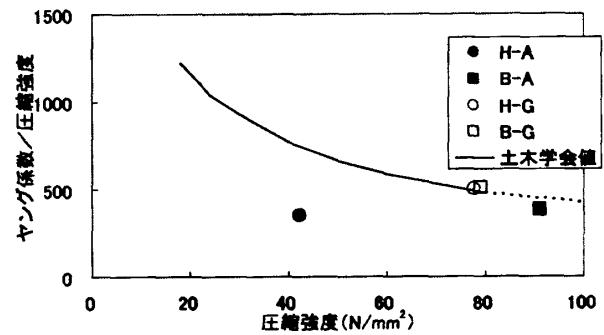


図-2 コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係

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 部材側面の膨張は、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。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ていることや、試験体上面は、とくに日射や雨水の影響を受けやすく、ASR



写真-2 H-A 試験体のひび割れ状況 (左: 側面中央, 中: 上面, 右: 下面)

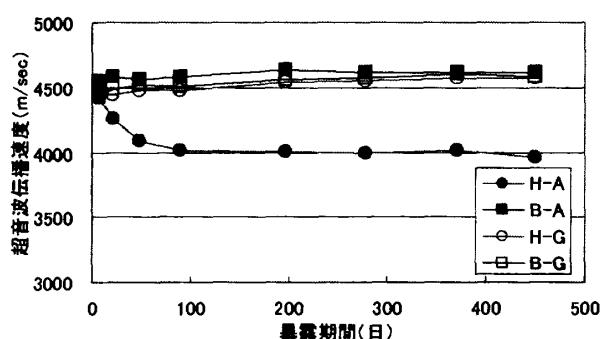


図-4 PC 試験体の超音波伝播速度の変化

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。膨張は気温が高い時期に顕著な進展を見せるが⁴⁾、1回目の夏季（暴露開始から50日頃まで）と2回目の夏季（暴露300日から400日頃まで）を比較すると、側面上部の膨張は2回目の夏季にはやや緩慢になっている。一方、側面下部は2回目の夏季に大きな膨張を示しており、膨張が今後も続くことが予想される。B-Aに関しては、2回目の夏季に若干の膨張が認められた。

3.3 PC 試験体の超音波伝播速度の変化

図-4にPC試験体の超音波伝播速度を示す。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、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。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、その後、暴露期間15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 PC 試験体のひび割れ発生状況

暴露試験体のうち、H-Aのみに顕著なひび割れが発生した。H-A試験体の暴露期間15ヶ月におけるひび割れ発生状況を写真-2に示す。試験体上面には部材軸方向にほぼ連続した幅0.6~1.0mmのひび割れが発生している。また、部材軸直交方向には、幅0.4~0.8mmのひび割れが全長にわた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幅0.4~0.8mmのひび割れが発生している。また、上縁から下縁に向かうに従い、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。しかし、下面より高さ30~80mm付近に、最大幅0.6mmのPC鋼材に沿ったひび割れが生じている。試験体底面については、部材軸方向のひび割れが全長にわたって生じており、端部で幅0.6~1.0mm、中央付近では幅0.4~0.8mmであった。部材軸直交方向のひび割れはほとんど発生していない。本試験体は、PC鋼材が下縁に大きく偏心して配置されており、その応力状態と日射や雨水の影響がひび割れの発生状況に影響していると考えられる⁴⁾。

3.5 PC 試験体の曲げ耐力と破壊状況

初期値として暴露試験開始時（材齢28日）にH-GおよびB-G各2体ずつについて曲げ試験を

表-3 コンクリートの力学的性質とPC試験体の曲げ試験の概要

試験体No.	実施時期	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ試験	検証による計算
H-A	初期値	67.1	27.3	×	×
	暴露後	42.2	14.6	○[H-A-e1, H-A-e2]	○[H-A-ek]
B-A	初期値	81.2	32.3	×	×
	暴露後	91.2	34.4	×	×
H-G	初期値	63.4	33.0	○[H-G-i]	×
	暴露後	77.7	38.5	○[H-G-e]	○[H-G-ek]
B-G	初期値	67.5	32.3	○[B-G-i]	×
	暴露後	79.1	39.7	×	×

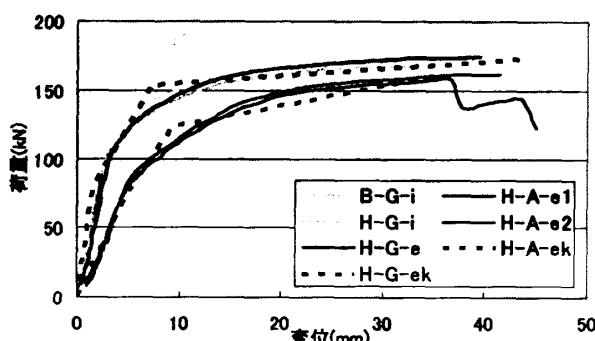


図-5 荷重-変位曲線

実施し、今回、暴露 15 ヶ月経過時に H-A および H-G 試験体各 2 体ずつについて曲げ試験を実施した（載荷方法は図-1 参照）。曲げ試験時のコンクリートの圧縮強度とヤング係数および曲げ試験の概要を表-3 に示す。H-G, B-A および B-G では、暴露後の圧縮強度およびヤング係数が、材齢 28 日時点の値よりも、それぞれ 12~23%, 7~23% 増加している。一方、H-A に関しては、材齢 28 日時点に対して暴露後の値は、圧縮強度が 37%，ヤング係数は 47% 低下している。

PC 試験体の荷重-変位曲線を図-5 に示す。図中の凡例は表-3 に対応している。H-G-i, B-G-i および H-G-e は曲げ耐力および破壊形態が同様であったため、2 体の平均値を示した。H-A-e1, H-A-e2 は破壊形態が大きく異なったため、試験体ごとに示した。なお、H-G-e および H-A-e についての計算値を H-A-ek および H-G-ek として併記した。試験結果および計算値を表-4 に示す。

荷重と変位の関係は、H-G-i と B-G-i は、ほぼ同様の傾向であるが、B-G-i がやや大きい耐力を示した。これは B-G-i のコンクリートの圧

表-4 曲げ試験および検証結果

試験体 No.	試験結果 (kN)		検証による計算 (kN)	
	ひび割れ 発生荷重	破壊荷重	ひび割れ 発生荷重	破壊荷重
H-A	65	162.1	75.9	161.9
	50	158.3		
H-G	85	168.0	78.7	172.5
	95	175.0		

縮強度がやや大きいことが影響していると思われる。暴露後の H-G-e は初期値の H-G-i, B-G-i とほぼ同様であり、暴露による曲げ耐力の低下は生じていない。暴露後の B-A に関しては曲げ試験を行っていないが、コンクリートの圧縮強度およびヤング係数の低下を生じていないことから、H-G-e と同様の曲げ耐力を有していると考えられる。H-A-e1 および H-A-e2 は、いずれも H-G-e よりも曲げ耐力が低下し、ひび割れ発生までの荷重に対する変位の発生量も H-G-e よりも大きくなつた。また、破壊形態は、H-A-e1 が圧縮縁コンクリートの圧壊、H-A-e2 は PC 鋼材の破断を生じた。なお、H-A-e2 の圧縮縁コンクリートは、試験後ハンマーで打撃を与えることで容易に剥落する状態であった。

H-A-e1 および H-A-e2 の変形性状および破壊性状に関して、H-G-e よりも同一荷重時の変位が大きいことは、コンクリートのヤング係数の低下と ASR 劣化によるひび割れが上縁側のコンクリートの剥離をもたらし、圧縮域の減少を生じたことが影響しているものと思われる。また、終局時についても、圧縮域の減少が、曲げ耐力の低下につながつたと考えられる。上縁コンクリートの破壊形態を写真-3 に示す。破壊後の H-A-e1, H-A-e2 の観察結果より、上縁コンク

リートは、上縁に生じていたスター・ラップに沿ったひび割れおよび軸方向のひび割れで分割され、ブロック状に剥離した（写真-4 参照）。圧壊により剥離した断面を等曲げモーメント区間に平均化すると、深さ 26.8mm の欠損断面となる。一方、コンクリートと PC 鋼材が、付着により一体となった挙動をしていると仮定すると、暴露後の H-A 試験体のコンクリートの膨張量は、PC 鋼材に 175N/mm^2 の増加応力を発生させていくこととなる。よって、曲げ耐力試験時の PC 鋼材の有効緊張力は、H-G-e が 1090N/mm^2 であるのに対して、H-A-e1 および H-A-e2 は、 1415N/mm^2 まで増加していたと推定される。コンクリートのヤング係数の低下、上縁部の断面欠損および PC 鋼材の有効緊張力の増加を考慮した PC 試験体の曲げ耐力の計算結果が H-A-ek である。計算値は実験値とよく合っていることがわかる。また、同一条件の試験体で異なる破壊形態が生じたことは、コンクリートの圧縮域が脆くなっていたこと、PC 鋼材の緊張力が過大となっていたことで、圧縮縁コンクリートの圧壊と PC 鋼材の破断の両方が同時に発生しうる状態にあったものと推測される。

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) PC 梁試験体では、局所的な環境条件より、ASR の進行状況が部位によって異なり、膨張が収束しつつある部位や継続して進行する部位が存在した。このため、実構造物の調査においては調査箇所の選定に注意が必要である。
 - (3) ASR 劣化を生じた PC 梁部材の曲げ耐力は、健全なものに比べて低下する場合があった。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 ASR 抑制

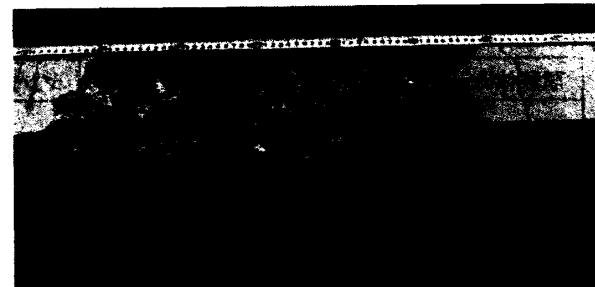


写真-3 上縁コンクリートの破壊形態



写真-4 上縁コンクリートのブロック化した剥離片

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。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松村将充氏に感謝の意を表する。

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) 斎田理希、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.