

# 論文 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性の評価

松村 将充\*<sup>1</sup>・蓑田 理希\*<sup>2</sup>・蔡 云峰\*<sup>3</sup>・鳥居 和之\*<sup>4</sup>

**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性を評価する目的で、反応性骨材を含有するコンクリート試験体を作製し、湿気槽および飽和 NaCl 溶液浸せきの 2 種類の養生条件下でコンクリートの配合が膨張挙動およびひび割れ密度に及ぼす影響について比較検討した。その結果、アルカリ (NaCl) が内在する場合および外部から浸透する場合のいずれも高炉スラグ微粉末の置換率 50%で膨張を効果的に抑制できること、コンクリートの膨張率と動弾性係数との組み合わせにより試験体の損傷度が正確に評価できること、などが明らかになった。

**キーワード**：ASR, 高炉スラグ微粉末, プレストレストコンクリート, デンマーク法

## 1. はじめに

近年、塩害、アルカリシリカ反応 (ASR) などのコンクリートの耐久性の改善の一環として、高炉スラグ微粉末を含有するプレストレストコンクリート (PC) が開発されている<sup>1)</sup>。PC 部材の ASR 劣化に関する報告はこれまで少ないが、桁、床版、舗装、タンクなどの各種 PC 構造物で ASR による損傷が実際に発生しているようである。PC 構造物の ASR 劣化に関してはコンクリートの配合と PC 鋼材の拘束による特異性を考慮する必要がある。コンクリートの配合面 (低水セメント比) では単位セメント量 (アルカリ量) の増大 (促進要因) と水分、アルカリ分の移動度の低下 (抑制要因) の ASR 劣化に対する相反する効果がある<sup>2)</sup>。また、部材レベルではプレストレスによる、大きな拘束により ASR によるひび割れおよび変形が一定の方向に卓越する傾向がある。一方、コンクリートのアルカリシリカ反応性は実際の配合で評価できる方法が望ましいとされており、RILEM TC ARP の原案などが提示されているが、添加アル

カリの種類とその量、促進養生条件と判定基準値 (材齢) など、試験法の統一的な規格はいまだ確立されていない。従来、高炉スラグ微粉末の ASR の抑制効果は、試験が簡単に実施できることから、骨材のアルカリシリカ反応性の判定試験であるモルタルバー法に準拠した方法で検討されてきているが、モルタルとコンクリートで得られる結果の整合性については必ずしも明確にはなっていない<sup>3)</sup>。

本研究は、高炉スラグ微粉末を含有したコンクリートのアルカリシリカ反応性を評価する目的で、反応性骨材を含有するコンクリート試験体を作製し、湿気槽および飽和 NaCl 溶液浸せきの 2 種類の養生条件下でコンクリートの配合が膨張挙動およびひび割れ密度に及ぼす影響について比較検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料およびコンクリートの配合

本研究に使用したセメントは普通ポルトランドセメント (密度:  $3.16\text{g/cm}^3$ , 比表面積:

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 (株) 安部工業所 技術開発部 (正会員)

\*3 (株) ホクコン 材料開発室 (正会員)

\*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 骨材の物理的性質および化学法 (JIS A 1145) の結果

骨材の種類	A 骨材		B 骨材		C 骨材		
	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	
	砕砂	砕石	川砂	川砂利	川砂	砕石	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.71	2.66	2.62	2.63	2.56	2.99	
吸水率 (%)	1.3	1.8	1.6	1.6	1.6	0.6	
化学法 (mmol/l)	Sc	688	688	230	353	23	15
	Rc	78	78	129	68	80	23
	判定	無害でない	無害でない	無害でない	無害でない	無害	無害

表-2 コンクリートの配合

配合種類	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)	
			W	C	BFS	S	G			
PC	セメント単味 BFS50%	38	44	150	395	0	839	1048	10±2	2±1
				150	198	198	833	1040		
RC	セメント単味 BFS50%	50	46	160	320	0	903	1024		
				160	160	160	897	1017		

3310cm<sup>2</sup>/g) および早強ポルトランドセメント (密度: 3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 4520cm<sup>2</sup>/g) の 2 種類であり, 高炉スラグ微粉末はブレン粉末度 6000 のもの (略号 BFS, 密度: 2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 5870cm<sup>2</sup>/g) である。骨材の物理的性質およびアルカリシリカ反応性を表-1 に示す。反応性骨材は, 実構造物での ASR 損傷が確認されている, 北海道産の安山岩の砕砂および砕石 (A 骨材) と富山県産の川砂および川砂利 (B 骨材) を使用した。それらの主要な反応性鉱物は輝石安山岩に含有するクリストバライトと火山ガラスである。富山県産の川砂および川砂利には安山岩粒子がペシマム混合率に近い 20~30%含有されている。また, 化学法 (JIS A 1145) にて「無害」と判定された骨材として, 佐賀県産の川砂およびカンラン岩砕石 (C 骨材) を使用した。コンクリートの配合を表-2 に示す。本研究では橋梁の RC 桁および PC 桁への高炉スラグ微粉末の適用を想定している。このため, コンクリートの配合を RC 配合 (使用セメント: 普通ポルトランドセメント, 水セメント比: 50%) と PC 配合 (使用セメント: 早強ポルトランドセメント, 水セメント比: 38%) の 2 種類として, 高炉スラグ微粉末の置換率を 50%と一定にした。試験条件は反応性骨材 A および B

の 2 種類, PC 配合・RC 配合の高炉スラグ微粉末有無の 4 種類を組み合わせた計 8 種類を基本とし, 全部で 26 種類の試験体を作製した。初期養生条件は標準養生 (20℃) と蒸気養生 (55℃, 最高温度保持時間 6 時間) の 2 種類であり, 型枠脱型後に密封養生を 1 週間実施した。

## 2.2 実験方法

コンクリート試験体は 75mm×75mm×400mm の角柱であり, 配合ごとに 2 本ずつ作製した。コンクリートの促進養生条件は温度 40℃, 相対湿度 100%の湿気槽養生と温度 50℃の飽和 NaCl 溶液浸せき養生 (デンマーク法) の 2 種類である。湿気槽養生ではデンマーク法との比較ができるように, 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。それに対して, 外部からアルカリが常時供給されるデンマーク法ではセメントのアルカリは調整しなかった。コンクリート試験体の測定項目は膨張率 (コンパレータ法) および動弾性係数 (たわみ振動法) である。JCI AAR3<sup>4)</sup> では 6 ヶ月材齢にて 0.1% 以上の膨張率を示すものを「有害」, 0.1%未満の膨張率を示すものを「無害」としてコンクリートのアルカリシリカ反応性の判定を実施している。コンクリート試験体のひび割れ (幅 0.05mm 以上) は材齢 3 ヶ月および 6 ヶ月の時

点で転写し、画像解析装置によりひび割れの総延長 (cm) からひび割れ密度 (cm/cm<sup>2</sup>) を計算した。また、促進養生終了後に酢酸ウラニル蛍光法および 0.1N の硝酸銀水溶液噴霧法により試験体内部での ASR ゲルの生成状況と塩分浸透との関係について調べた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 骨材のアルカリシリカ反応性

骨材の化学法 (JIS A 1145) の結果を図-1 に示す。化学法の結果より、北海道産の A 骨材、富山県産の B 骨材は「無害でない」と、佐賀県産の C 骨材は「無害」と判定された。A,B,C 骨材の化学法の判定結果はモルタルバー法の結果 (JIS A 1146) とも一致していた。

骨材の促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) の結果を図-2 に示す。より厳しい養生条件である ASTM C 1260 では、北海道産の A 骨材、富山県産の B 骨材は大きな膨張を示すが、佐賀県産の C 骨材は膨張していないことから判断すると、佐賀県産の C 骨材には反応性珪物がほとんど含有されていないものと判断された。

#### 3.2 骨材の組み合わせの影響

コンクリート (PC 配合) の膨張率に及ぼす骨材の組み合わせの影響を図-3 に示す。コンクリートの初期養生条件に関して、蒸気養生のものは標準養生のものと比較して、初期材齢における ASR が促進される傾向があったが、長期における両者の膨張挙動には大きな相違が認められなかった。図-3 に示すように、湿気槽養生の場合、練り混ぜ時に混入したアルカリの効果で、北海道産の A 骨材および富山県産の B 骨材は初期材齢から大きな膨張が発生するが、3 ヶ月以後は膨張がほぼ収束する傾向が認められた。また、佐賀県産の C 骨材は膨張がまったく発生していない。これらの結果は 3.1 のモルタルバー法の結果とも対応している。一方、飽和 NaCl 溶液浸せき養生の場合、NaCl 溶液が内部に浸透するまでに一定の時間が必要になり、浸せき 2 ヶ月以後から膨張が始まった。しかし、一旦膨張が始まると、ひび割れからアルカリ溶液が内

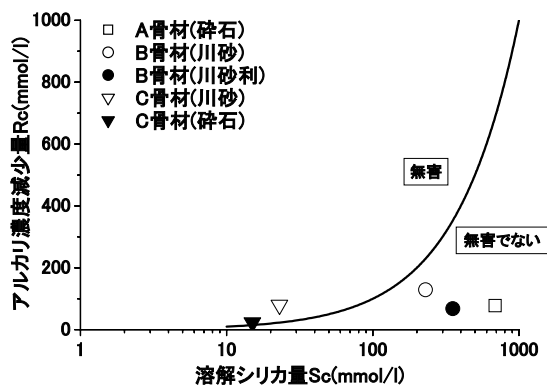


図-1 化学法 (JIS A 1145) の判定結果

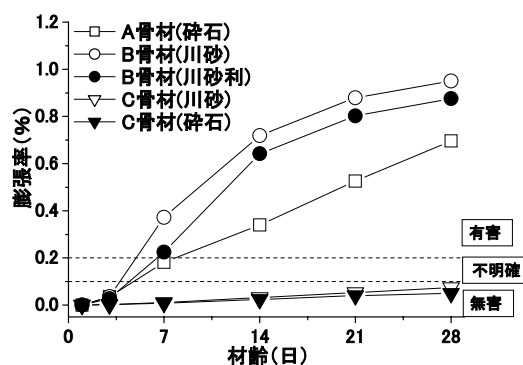


図-2 ASTM C 1260 の判定結果

部に容易に浸透するので、長期にわたって膨張が継続し、6 ヶ月材齢での富山県産の B 骨材の膨張率は湿気槽養生の場合よりもかなり増大した。それに対して、佐賀県産の C 骨材は反応性珪物が含有されていないので、膨張がまったく発生しなかった。全体的に、各骨材の組み合わせによる膨張挙動は湿気槽養生と飽和 NaCl 溶液浸せき養生でほぼ一致していた。

本研究では表面劣化の指標である膨張率と内部劣化の指標である動弾性係数との関係について検討した。コンクリート (PC 配合) の動弾性係数に及ぼす骨材の組み合わせの影響を図-4 に、コンクリート (RC および PC 配合) の最終膨張率 (6 ヶ月材齢) と動弾性係数との関係を図-5 にそれぞれ示す。図-4 および図-5 より、コンクリートの配合 (RC および PC 配合) や骨材の組み合わせには関係なく、コンクリート試験体では 0.04% 程度の膨張率で微細なひび割れが試験体の表面にまず発生し、膨張率が 0.1% 以上になった段階で動弾性係数が大きく低下す

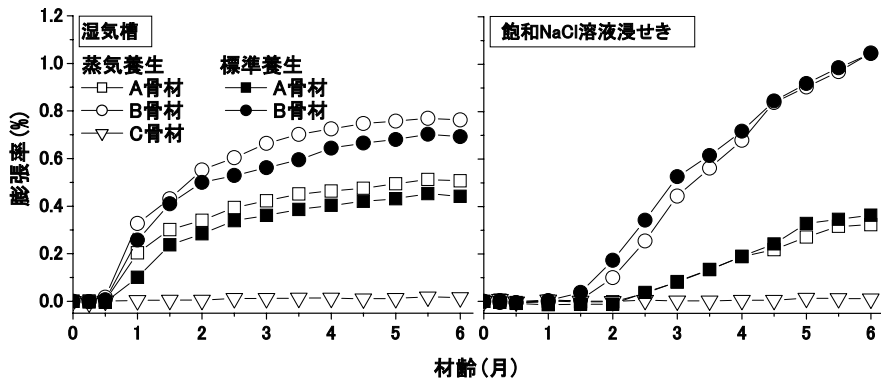


図-3 コンクリート (PC 配合) の膨張挙動

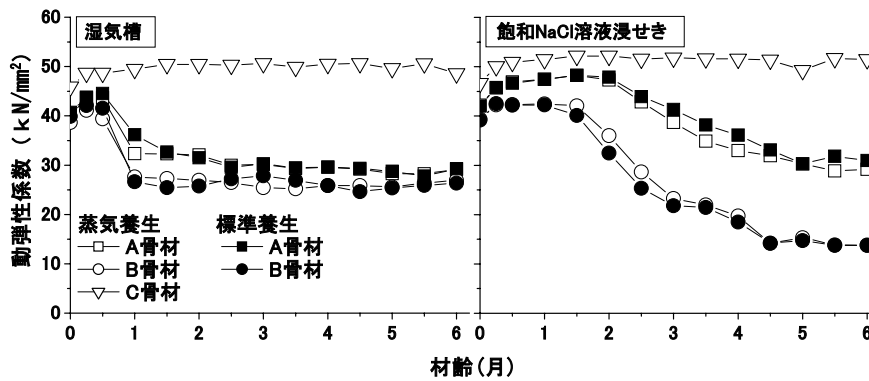


図-4 コンクリート (PC 配合) の動弾性係数の変化

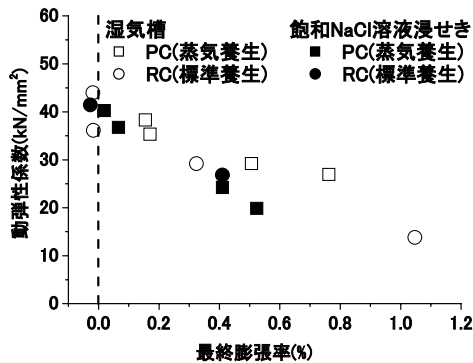


図-5 コンクリート試験体の最終膨張率と動弾性係数の関係

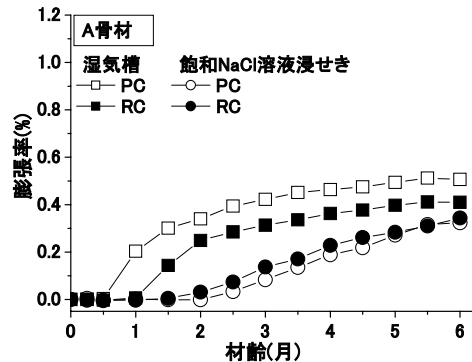


図-6 コンクリート (RC および PC 配合) の膨張挙動

ることが確認された。また、湿気槽養生と飽和 NaCl 溶液浸せき養生との相違も小さいことから、コンクリートの動弾性係数の低下（内部劣化の程度を表す指標）は膨張率との関係で一義的に評価でき、JCI AAR3 の判定基準値（6 ヶ月材齢にて 0.1% 以上）が概ね妥当であると判断できた。以上の結果より、コンクリートの膨張率と動弾性係数の変化とはよく対応しており、

膨張率と動弾性係数の測定を組み合わせることにより、ASR による損傷度をより正確に評価できるものと考えられた。

### 3.3 水セメント比および高炉スラグ微粉末添加の影響

コンクリート (RC および PC 配合) の膨張率に及ぼす水セメント比の影響を図-6 に示す。図-6 に示すように、湿気槽養生の場合、A 骨

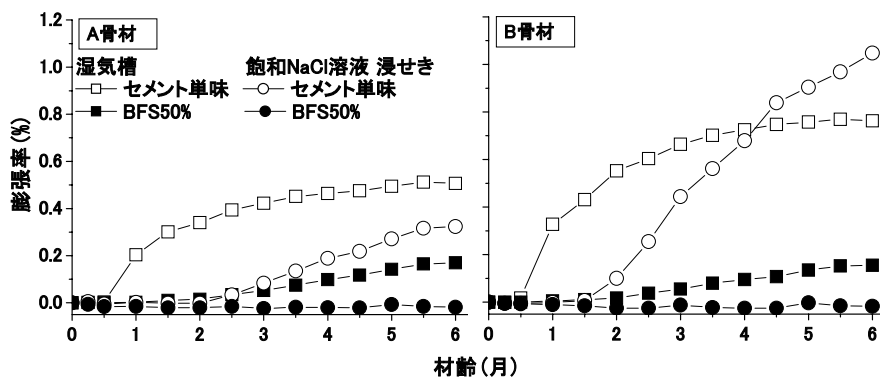


図-7 コンクリート (PC 配合) の膨張挙動

材を使用した PC 配合 (水セメント比 35%) のものは RC 配合 (水セメント比 50%) のものよりも膨張率が若干大きくなった。本実験のように NaCl を練り混ぜ時に添加した場合、フリーデル氏塩の生成と水酸化カルシウムの分解の過程で ASR が発生するアルカリ雰囲気はコンクリートに形成されるが、PC 配合では早強ポルトランドセメントの使用と単位セメント量の増加の相乗効果により上記の水和反応が促進されたものと推察された<sup>5)</sup>。一方、飽和 NaCl 溶液浸せき養生の場合、A 骨材を使用した PC 配合のものは RC 配合のものよりも塩分の浸透が大きく低減されるので、初期における膨張率は小さくなったが、塩分が内部に浸透するにつれて長期における膨張挙動には大きな相違は認められなかった。

コンクリート (PC 配合) の膨張率に及ぼす高炉スラグ微粉末 50% 添加の影響を図-7 に示す。高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果に関して、北海道産の A 骨材と富山県産の B 骨材ではほぼ同様な傾向が認められた。すなわち、湿気槽養生の場合、セメント単味と比較して高炉スラグ微粉末添加のものは膨張量が大きく低減されているが、2 ヶ月材齢以後に膨張が始まり、6 ヶ月材齢では 0.1% 程度の膨張率になり、実際にひび割れが発生した。したがって、NaCl が多量にコンクリート中に存在する使用条件下では高炉スラグ微粉末 50% 添加でも ASR の発生を完全に抑制できないことが明らかになった。一方、飽和 NaCl 溶液浸せき養生の場合、A 骨材およ

表-3 コンクリート試験体の塩分浸透深さ (mm)

配合種類	A 骨材		B 骨材	
	セメント単味	BFS 50%	セメント単味	BFS 50%
RC	全浸透	10	—	—
PC	全浸透	4	全浸透	5

全浸透：75mm×75mm の断面に完全に浸透

び B 骨材のいずれも高炉スラグ微粉末 50% 添加のものは長期にわたり膨張がまったく発生しなかった。コンクリート試験体の塩分浸透深さ (6 ヶ月材齢) を表-3 に示す。セメント単味のものは水セメント比や骨材の種類に関係なく 6 ヶ月材齢にて試験体の中心まで塩分が完全に浸透しているのに対して、高炉スラグ微粉末 50% 添加のものは緻密な内部組織の形成により塩分の浸透深さが 10mm 程度の表面部分に限られていた。酢酸ウラニル蛍光分析より、飽和 NaCl 溶液浸せき養生の ASR ゲルの生成領域は塩分の浸透領域と一致することが確認されている。したがって、飽和 NaCl 溶液浸せき養生における高炉スラグ微粉末添加による ASR の抑制効果の発揮はコンクリートの塩分浸透性の低減に起因するものと推察された。

### 3.4 コンクリートのひび割れおよびポップアウトの発生状況

コンクリート試験体の膨張率とひび割れ密度との関係を図-8 に示す。ASR によるコンクリートの損傷はひび割れの進展とひび割れ幅の拡大とに特徴づけることができる。北海道産の A

骨材と富山県産のB骨材はコンクリート試験体の全面に亀甲状のひび割れが発生しており、コンクリート試験体の最終膨張率と画像解析から測定したひび割れ密度との間には良好な相関性が認められた。一方、富山県産のB骨材は、セメント単味および高炉スラグ微粉末50%添加のいずれもASRによるひび割れが顕著となる以前の段階で試験体の表面に直径5mm程度のポップアウトが発生しており、材齢の経過とともにポップアウトの発生個数が増加した。ポップアウトは川砂中の安山岩粒子を核にしており、RC配合よりもPC配合にて、また湿気槽養生よりも飽和NaCl溶液浸せき養生にて、より顕著に発生した。ASRによるポップアウトの発生は表面付近に存在する、高い反応性をもつ粒子が局部的に膨張する現象であり、高濃度の塩分が浸透する条件下では高炉スラグ微粉末50%添加による抑制効果は小さいものと推察された。

#### 4. 結論

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性の評価に関して得られた結果を以下に示す。

- (1) 骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関して、モルタルバーとコンクリートバーの結果は良く対応していた。
- (2) 反応性骨材を使用したコンクリートバーの膨張挙動は湿気槽養生と飽和NaCl溶液浸せき養生でほぼ一致したが、飽和NaCl溶液浸せき養生は湿気槽養生と異なり長期にわたり膨張が継続した。
- (3) コンクリートの膨張率と動弾性係数の測定を組み合わせることにより、ASRによる損傷度を正確に評価できた。また、コンクリートの膨張率とひび割れ密度との間には良好な相関性が認められた。
- (4) アルカリ(NaCl)が内在する場合および外部から浸透する場合のいずれも高炉スラグ微粉末50%添加のものはセメント単味のものよりもASRによる膨張量を大きく

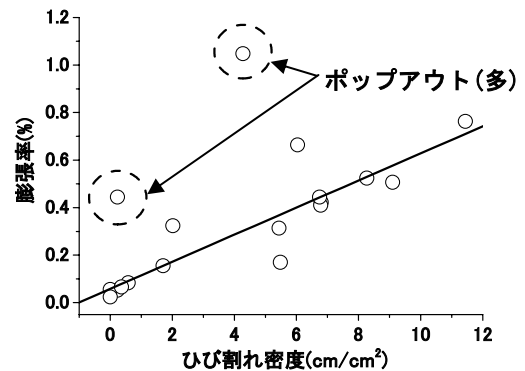


図-8 コンクリート試験体の最終膨張率とひび割れ密度との関係

低減できた。

- (5) 反応性の高い、川砂中の安山岩粒子では高炉スラグ微粉末添加の有無や養生条件に関係なくポップアウトが早期に発生した。

謝辞：試験体の作製にご協力いただいた BSPC 研究会に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発，1998。
- 2) 澤田由美子，Kwon Youngjim，浜幸雄，田畑雅幸，鎌田英治：高強度コンクリートのアルカリ骨材反応性と高炉スラグ微粉末による抑制効果に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第479号，pp.1-6，1996。
- 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) 日本コンクリート工学協会：コンクリート法によるアルカリ骨材反応判定試験方法研究委員会報告，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.1，pp. 7-16，2005。
- 5) 鳥居和之，友竹博一：アルカリシリカ反応によるモルタルの膨張挙動に及ぼすセメントと反応性骨材の組合せの影響，土木学会論文集，No. 739/V-60，pp.251-263，2003。