

## 論文 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

蔡 云峰\*<sup>1</sup>・鳥居 和之\*<sup>2</sup>・横山 博司\*<sup>3</sup>・古川 柳太郎\*<sup>4</sup>

**要旨**：粉末度の異なる 3 種類の高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果を確認する目的で、高炉スラグ微粉末を添加した反応性骨材含有モルタルを作製し、3 種類の促進養生条件下（JIS A1146, ASTM C1260 およびデンマーク法）でのモルタルの膨張挙動に及ぼす高炉スラグ微粉末の種類とその置換率の影響について検討した。その結果、促進養生試験法により高炉スラグ微粉末の種類とその置換率による ASR 抑制効果の評価を迅速にできることが明らかになった。

**キーワード**：ASR 抑制対策, 高炉スラグ微粉末, 促進試験法, ASTM C1260, デンマーク法

### 1. はじめに

アルカリシリカ反応（ASR 略記）を抑制する方法として、高炉スラグ微粉末（BFS 略記）やフライアッシュの添加が有効であるとされている。BFS による ASR 抑制の機構は、セメントの希釈効果以外にも、水和生成物がアルカリを内部に取り込むこと、アルカリや水分の移動度が低下すること、および水酸化カルシウムが減少すること、などにより説明されている<sup>1)</sup>。近年、BFS の高粉末度の製品が開発されており、耐久性（塩害、ASR）の改善を目的として、プレストレストコンクリート構造物にも適用されてきている<sup>2)</sup>。従来、ASR 抑制対策を目的として、混合セメントを使用することは、一部の地域を除いて稀であったが、地域的な骨材資源の活用を念頭に入れると、今後は混合セメントを積極的に ASR 抑制対策として使用することが増えるものと考えられる。BFS による ASR 抑制効果の確認では、反応性骨材の岩石・鉱物学的性質との関係から適切な BFS の種類とその置換率を選択することが重要であり、コンクリートの品質管理の目的から迅速な評価法の開発が望ま

れている<sup>3)</sup>。

本研究は、2 種類の反応性骨材（安山岩砕石および川砂利）を対象として、3 種類の促進養生試験（JIS A1146, ASTM C1260 およびデンマーク法）によりモルタルの膨張挙動に及ぼす高炉スラグ微粉末の種類とその置換率の影響について検討したものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料およびモルタルの配合

本研究に使用したセメントおよび高炉スラグ微粉末の化学成分を表-1 に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント(略号 NP, 密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3260cm<sup>2</sup>/g)および早強ポルトランドセメント(略号 HP, 密度: 3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 4580cm<sup>2</sup>/g)の 2 種類であり、高炉スラグ微粉末はブレーン粉末度が 4000 (略号 BFS4000), 6000 (略号 BFS6000) および 8000 (略号 BFS8000) の 3 種類である。セメントおよび高炉スラグ微粉末の等価アルカリ量は 0.30 ~ 0.43% であり、それらのアルカリ(Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O)の構成比率はほぼ同一のものである。

\*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 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)

\*3 安部工業所(株) 技術開発部長 (正会員)

\*4 新日鉄高炉セメント(株) 技術部長

表-1 セメントおよび高炉スラグ微粉末の化学成分(%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl
NP	20.53	5.26	2.96	64.60	0.96	0.25	0.13	1.95	0.22	0.31	0.21	0.010
HP	20.58	4.77	2.38	65.08	1.09	0.22	0.09	3.08	0.20	0.35	0.38	0.005
BFS4000	33.11	14.65	*0.21	42.48	5.6	0.58	0.15	1.98	0.26	0.26	0.01	0.003
BFS6000	33.03	13.61	*0.14	42.56	5.77	0.55	0.20	3.06	0.16	0.22	0.01	-----
BFS8000	32.04	14.91	*0.22	41.93	5.49	0.64	0.17	3.15	0.24	0.19	0.01	0.004

\*印は FeO を示す

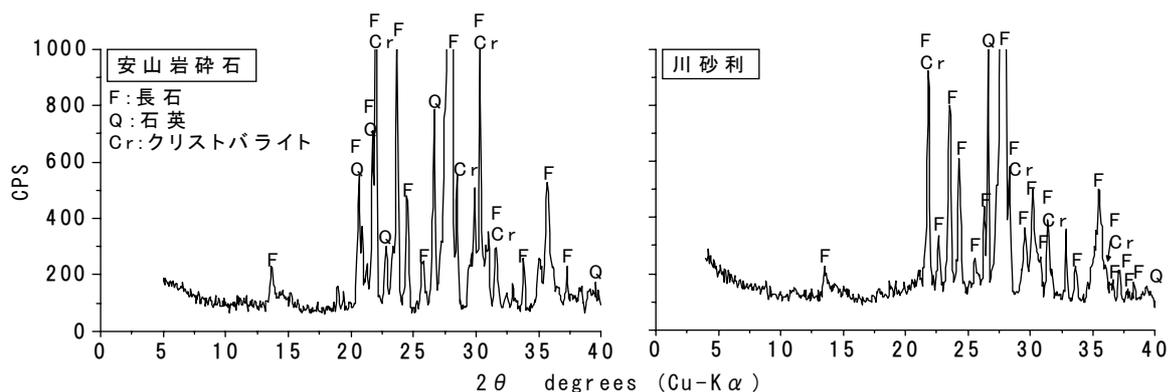


図-1 反応性骨材（安山岩砕石および川砂利）のX線回折図

反応性骨材としては、北海道札幌近郊産の安山岩砕石(化学法(JIS A1145)の結果；Sc=688 mmol/l, Rc=78 mmol/l, Sc/Rc=8.8)と富山県常願寺川産の川砂利(化学法(JIS A1145)の結果；Sc=353 mmol/l, Rc=68 mmol/l, Sc/Rc=5.2)を使用した。反応性骨材のX線回折図を図-1に示す。安山岩砕石(略号CS, 風化・変質のない均質な岩体からのもの)の反応性鉱物は火山ガラスとクリストバライトであり、川砂利(略号RG, 安山岩粒子を20~30%含有し、その値付近にペシマム値が存在する)の反応性鉱物は同様に火山ガラスとクリストバライトである。

本研究では、試験要因として、反応性骨材の種類(CSおよびRG)、セメントの種類(NPおよびHP)、モルタルの水セメント比(35%および50%)、高炉スラグ微粉末のブレン粉末度(BFS4000, 6000および8000)とその質量置換率(25%および50%)を選択し、それらの要因を種々に組み合わせたモルタルを作製した。

## 2.2 促進養生試験による膨張量の測定

高炉スラグ微粉末使用によるASR抑制効果

の確認は次に示す3種類の促進養生試験により実施した。なお、高炉スラグ微粉末のASR抑制効果の有無はそれぞれの試験法の骨材の判定基準値に準拠した。

### (1) JIS A1146-2001

使用セメントの等価Na<sub>2</sub>O量を水酸化ナトリウム溶液の添加により1.2%に調整し、モルタルバー(40×40×160mm)を作製し、温度40℃、相対湿度100%の条件下で長さ変化を6ヶ月間測定した。JIS A1146では、0.05%以上(3ヶ月材齢)または0.1%以上(6ヶ月材齢)の膨張量を「無害でない」と判定する。

### (2) デンマーク法

使用セメントのアルカリ量を調整せず、モルタルバー(40×40×160mm)を作製し、温度50℃の飽和NaCl溶液に浸漬した条件下で長さ変化を3ヶ月間測定した。デンマーク法では、3ヶ月材齢にて0.1%以下(無害)、0.1%~0.4%(不明)、0.4%以上(有害)と判定する。なお、試験終了後、0.1Nの硝酸銀溶液をモルタルの破断面に噴霧し、塩分の浸透状況を確認した。

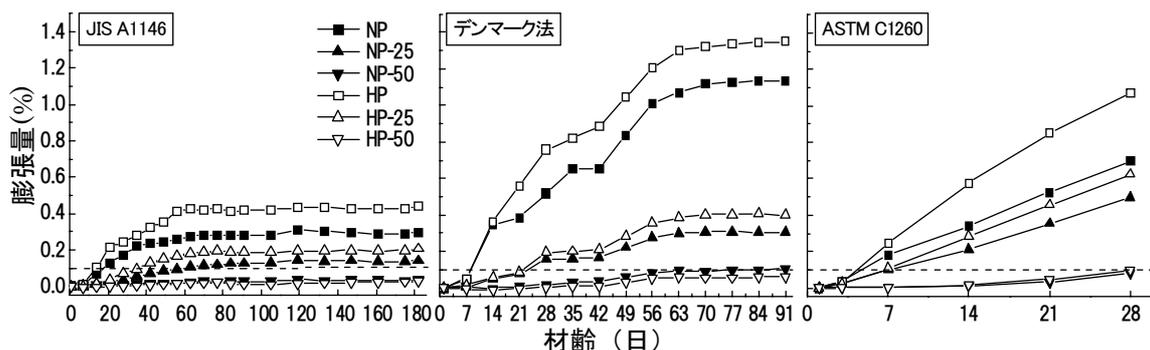


図-2 安山岩碎石を使用したモルタル (W/C=50%, BFS6000) の膨張挙動

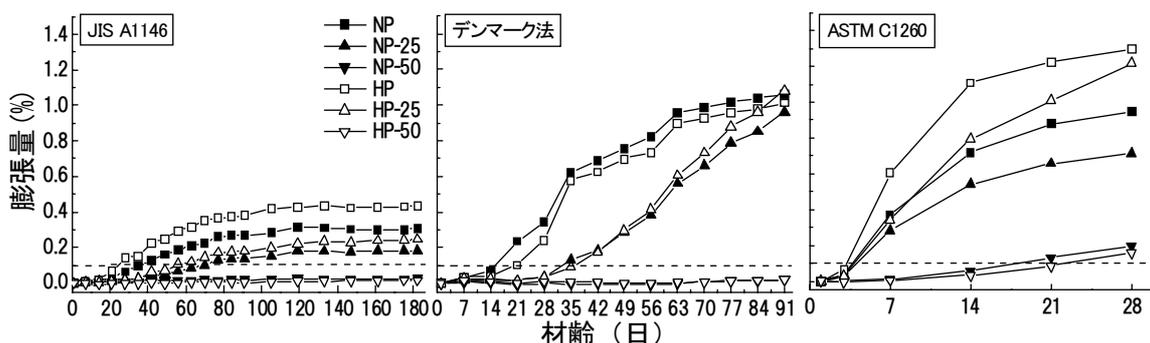


図-3 川砂利を使用したモルタル (W/C=50%, BFS6000) の膨張挙動

### (3) ASTM C1260

使用セメントのアルカリ量は調整せず、モルタルバー(25×25×285mm)を作製し、温度 80℃ の 1N・NaOH 溶液に浸漬した条件下で長さ変化を 1 ヶ月間測定した。ASTM C1260 では、14 日材齢にて 0.1%以下(無害)、0.1~0.2%(不明)、0.2%以上(有害)と判定する。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 高炉スラグ微粉末の置換率とモルタルの膨張量

促進養生試験法 (JIS A1146, デンマーク法および ASTM C1260)におけるモルタル(W/C=50%, BFS6000, 置換率 25%および 50%)の膨張挙動を図-2 および図-3 に示す。3 種類の促進養生試験法にてアルカリの種類およびその供給状態が異なるので、2 種類の反応性骨材に対してのモルタルの膨張挙動が相違している。すなわち、JIS A1146 ではモルタルからのアルカリの溶出の影響により材齢 2 カ月以後の膨張が頭打ちに

なっているのに対し、デンマーク法、ASTM C1260 では外部からのアルカリの供給により測定期間中の膨張が継続されており、最終的な膨張量がかなり大きくなった。また、セメントの種類に関しては、HP は NP よりも膨張量が大きくなる傾向があり、セメントの鉱物組成の相違による水酸化カルシウム量の多少が関与していると考えられた<sup>3)</sup>。さらに、反応性骨材の種類に関しては、JIS A1146 では反応性骨材の種類による相違が見られないが、高炉スラグ微粉末の置換率 25%のものの膨張挙動の相違より明らかのように、デンマーク法および ASTM C1260 では川砂利は安山岩碎石と比較して材齢にともなう膨張が急速に進行した。一方、高炉スラグ微粉末の置換率に関しては、反応性骨材およびセメントの種類に関係なく、高炉スラグ微粉末の置換率とともに膨張量が大きく低減されており、3 種類の促進養生試験法のいずれの条件下でも高炉スラグ置換率 50%のものは長期にわたり膨張が効果的に抑制されていた。

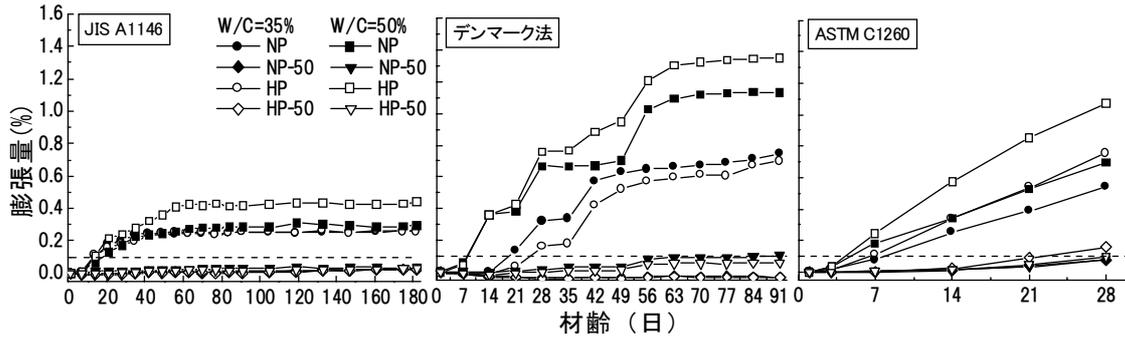


図-4 安山岩砕石を使用したモルタル (W/C=35%または 50%, BFS6000) の膨張挙動

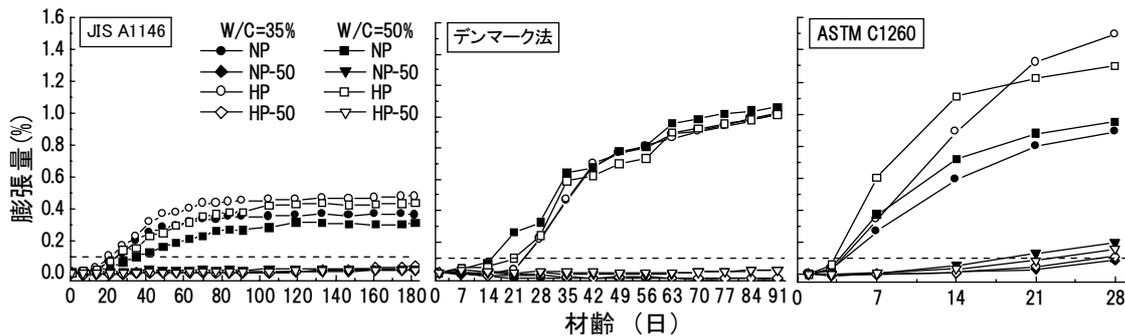


図-5 川砂利を使用したモルタル (W/C=35%または 50%, BFS6000) の膨張挙動

### 3.2 水セメント比とモルタルの膨張量

促進養生試験法 (JIS A1146, デンマーク法および ASTM C1260)におけるモルタル(W/C=35%または 50%, BFS 置換率 50%(BFS6000))の膨張挙動を図-4 および図-5 に示す。低水セメント比のモルタルは緻密な内部組織が形成されており、モルタル内部での水分、アルカリの移動度および外部からのモルタルへのアルカリの浸透度が小さくなることが予想される。しかし、JIS A1146 では、反応性骨材の種類により膨張量の低減効果が異なり、川砂利は水セメント比が 35%のものは水セメント比が 50%のものとは比べて膨張量が若干増大している。JIS A1146 では、練り混ぜ時に一定量のアルカリをモルタルに混入しており、反応性骨材と添加アルカリとの量的な関係で、水セメント比による影響が相違したものになったと推測される。一方、デンマーク法および ASTM C1260 では、NP および HP の水セメント比が 35%のものは外部からのアルカリの浸透が小さいので、初期における膨張が抑制されているが、長期的には大きな膨張が

発生している。これは、ひび割れが発生した以後はひび割れを通してアルカリが内部に供給されるために、水セメント比の影響が小さくなることを意味している。一方、高炉スラグ微粉末を添加したモルタル (BFS 置換率 50%) ではいずれの水セメント比のものも膨張が効果的に抑制されていた。

### 3.3 高炉スラグ微粉末の粉末度とモルタルの膨張量

促進養生試験法 (JIS A1146 およびデンマーク法)におけるモルタル(W/C=50%, BFS 置換率 50% (BFS4000,6000 および 8000))の膨張挙動を図-6 および図-7 に示す。JIS A1146 では、高炉スラグ微粉末を用いたモルタルはいずれの組み合わせのものも 6 カ月材齢での膨張量が 0.05%以下となっており、高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果が確認されている。また、温度 40°C、湿度 100%の養生条件下 (JIS A1146)でも初期材齢にて自己収縮による影響が現われているものがあることがわかる。自己収縮は基本的にセメントおよび高炉スラグ微粉末の水和

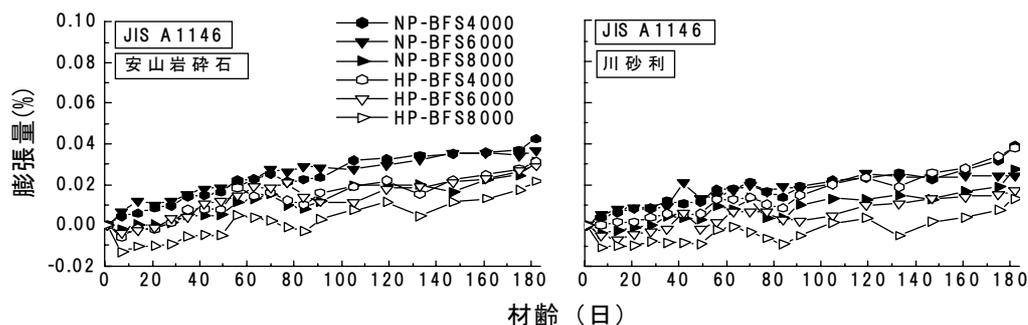


図-6 モルタル (JIS A1146, W/C=50%, 置換率 50%) の膨張挙動

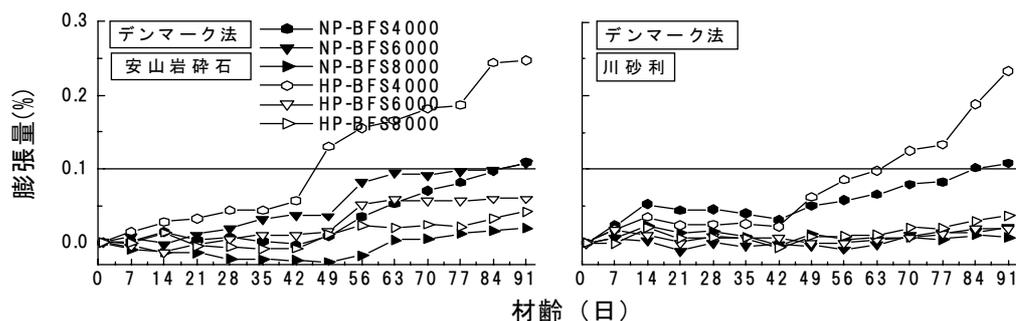


図-7 モルタル (デンマーク法, W/C=50%, 置換率 50%) の膨張挙動

反応度に依存することから、自己収縮量は高炉スラグ微粉末の粉末度が大きいものほど、また NP よりも HP との組み合わせにてより顕著になっている<sup>4)</sup>。したがって、JIS A1146 にて高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果を検討する際には初期における自己収縮の影響を考慮することが必要になる。

一方、デンマーク法では JIS A1146 のように初期に収縮が発生するものではなく、高炉スラグ微粉末の粉末度が大きいものほど膨張が抑制されていた。すなわち、BFS4000 は BFS6000, 8000 と異なり HP および NP の両組み合わせにて 91 日材齢における膨張量が 0.1% を上回った。これらの結果より、高炉スラグ微粉末を使用したモルタルの ASR 抑制効果の判定には JIS A1146 よりもデンマーク法が適していると判断された。

### 3.4 促進養生試験による膨張量測定の有効性

促進養生試験法 (JIS A1146, デンマーク法および ASTM C1260) の判定基準の材齢における膨張量の関係を図-8 に示す。外部からアルカリが供給されるデンマーク法および ASTM C1260 では判定基準材齢での溶液の浸透性が判

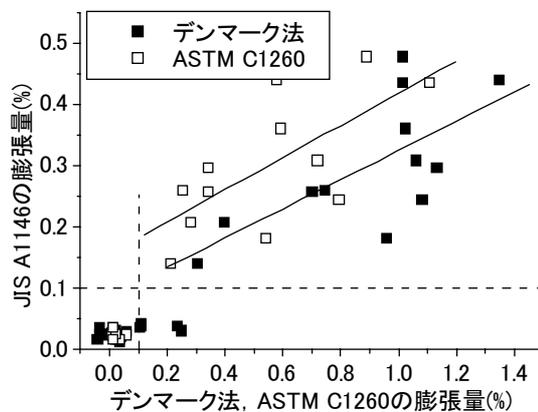


図-8 JIS A1146 法とデンマーク法、ASTM C1260 法の膨張量の比較

表-2 モルタル (安山岩碎石, BFS6000) の塩分浸透深さ (mm)

W/C=35%	NP	12	HP	11
	NP-50	9	HP-50	5
W/C=50%	NP	*	HP	*
	NP-25	8	HP-25	7
	NP-50	5	HP-50	6

\* : 40mm 角の断面に完全浸透

定結果に影響することになる。表-2 に示すように、デンマーク法 (40 mm 角の断面) では、セメント単味のものとは異なり、高炉スラグ微粉末のものでは91日材齢にて、中心部までアルカリが浸透していないものがあった。このことは、硝酸銀溶液の噴霧による塩分の浸透領域と酢酸ウラニル蛍光法による ASR ゲルの発生領域との対応関係からも確認された。それに対して、ASTM C1260 (25 mm 角の断面) では、14日材齢にて中心部までアルカリがほぼ浸透していると判断された。JIS A1146 とデンマーク法、ASTM C1260 とでは、ASR を促進させるアルカリの種類とその供給状態が異なり、後者は前者よりも最終的な膨張量が大きくなり、判定が早期に可能であるという特徴がある。図-8 に示すように、JIS A1146 とデンマーク法、ASTM C1260 の間にはばらつきがあるが、一定の相関性が認められた。また、ASTM C1260 (材齢14日) とデンマーク法 (91日材齢) との膨張挙動はほぼ同じであるが、デンマーク法は ASTM C1260 よりも膨張量が多少大きくなった。

ASTM C1260 では浸透した NaOH 溶液により ASR が急速に促進されているが、非反応性である石英、長石などの鉱物も NaOH 溶液により侵食されているのが、破断面の SEM-EDX により観察されている。一方、デンマーク法ではフリーデル氏塩の生成と水酸化カルシウムの分解という反応過程を経て ASR が発生するので、ASR が進行するのにある程度の時間を要することになる<sup>3)</sup>。酢酸ウラニル蛍光法による観察では、デンマーク法の場合には安山岩粒子の周囲のみに ASR ゲルが生成しており、実際の構造物における ASR の状況とも良く一致していた。これらの結果より、ASTM C1260 は短期間で判定できる点で有利であるが、各種岩種から構成される川砂利の場合にはデンマーク法による判定がより適切であると考えられた<sup>5)</sup>。

#### 4. 結論

本研究で得られた主要な結果をまとめると、

以下のものである。

- (1) セメント、高炉スラグ微粉末と反応性骨材との相互の関係により、3種類の促進養生法におけるモルタルの膨張挙動が大きく相違した。
- (2) 3種類の促進養生試験法のいずれの条件下でも、高炉スラグ置換率50%のものは、水セメント比および高炉スラグ微粉末の粉末度に関係なく、長期にわたり膨張を効果的に抑制できた。
- (3) JIS A1146 では、高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果を検討する際には初期における自己収縮の影響を考慮する必要があった。
- (4) デンマーク法 (91日材齢)、ASTM C1260 (14日材齢) と JIS A1146 (6ヶ月材齢) の膨張量には、一定の相関性があり、促進養生法は短期間で判定できる点で有利であった。

謝辞：本研究の実施にあたり、ご協力いただいた BSPC 研究会並びに金沢大学大学院自然科学研究科松村将充氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 川村満紀：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 (1)，コンクリート工学，Vol.32，No.4，pp.74-79，1994.
- 2) 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コンクリート構造物の開発，1998.
- 3) 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.
- 4) 自己収縮研究委員会：自己収縮研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.7-79，1996.
- 5) 鳥居和之，野村昌弘，山戸博晃，本田貴子：促進養生試験によるアルカリシリカ反応性の評価，コンクリート工学論文集，Vol.26，No.1，pp.945-950，2004.