

# 論文 高炉スラグ細骨材及び微粉末がアルカリ骨材反応の膨張抑制効果について

羽原 俊祐\*1・二戸 信和\*2・小山田 哲也\*3・鈴木 隆文\*4

**要旨：**高炉スラグ微粉末はアルカリ骨材反応による膨張抑制に効果がある。本研究では、ブレーン比表面積 4000cm<sup>2</sup>/g の微粉末から 2.5-5mm の細骨材の粒度の範囲までの各種高炉スラグを調整し、これらを使用して、反応性骨材を用いたモルタルバー試験を行なった。高炉スラグの粒度毎に、セメントと置換又は、骨材と置換を行い、アルカリ骨材反応による膨張に及ぼす高炉スラグの粒度の効果を把握した。単位モルタル当りの高炉スラグの比表面積(S<sub>BL</sub>)が大きいほど、アルカリ骨材反応の抑制効果が大きい。細骨材粒度、0.15mm 以下の高炉スラグ粉末、混合材としての高炉スラグ微粉末の幅広い粒度においても、高い相関を示した。

**キーワード：**アルカリ骨材反応, 高炉スラグ, 高炉スラグ細骨材, 膨張, 抑制効果

## 1. はじめに

高炉スラグ微粉末は、そのポゾラン反応による水酸化カルシウムの消費, Ca/Si 比の低い C-S-H の生成による、空隙水中の Na, K イオンの水和物に固定される割合の増加の効果などにより、アルカリ骨材反応の進行が低減され、膨張が抑制されることが知られている<sup>1) 2) 3)</sup>。高炉スラグそのものを細骨材とした場合、アルカリ骨材反応の抑制効果ならびに、その低減効果の程度などについての報告は少ない<sup>4)</sup>。本研究では、JIS A1146:2001 (骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (モルタルバー法)) に従い、反応性骨材、ケイ石骨材 (ケイ砂)、高炉スラグを粒度分けし、それぞれの粒度に応じて、所定量を置換し、高炉スラグ細骨材の置換による抑制効果について検討した。さらに、0.15mm 以下のスラグ粉末を細骨材として使用した場合、及びブレーン比表面積の異なる 2 種類の高炉スラグ微粉末をセメントに置換した場合の抑制効果についても調べた。また、モルタルバー試験の細骨材の粒度ごとに、反応性骨材を置き換えた場合に、反応性骨材の膨張に及ぼす反応性骨材の粒度の影響についても検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料と水準

セメントは混合材が添加されていない研究用セメントを使用した。骨材は、反応性骨材 (山砂)、比較用骨材としてケイ砂 (ケイ石砕砂)、高炉スラグ (水滓) を使用し、ジョークラッシャー、ディスククラッシャーを用いて、粉碎し、0.15-0.3, 0.3-0.6, 0.6-1.2, 1.2-2.5, 2.5-5mm の粒度に篩分けを所定量の骨材が得られるまで、繰り返

し行なった。反応性骨材の化学法 (JIS A1145) の試験結果を表-1 に示す。いずれの粒度も「無害でない」の判定である。また、100%反応性骨材を使用した普通セメントを使用したモルタルバー試験の 6 ヶ月の膨張量は 0.43% であり、比較的大きな膨張量を示す反応性骨材である。

表-1 反応性骨材の化学法試験結果

表-1 反応性骨材の化学法結果				
	アルカリ減少量 Rc (mmol/l)	可溶性シリカ Sc (mmol/l)	判定	モルタルバー 構成比
全粒度	45	109	無害でない	
0.15-0.3	49	110	無害でない	15%
0.3-0.6	45	77	無害でない	25%
0.6-1.2	45	107	無害でない	25%
1.2-2.5	44	133	無害でない	25%
2.5-5	46	130	無害でない	10%

### 2.2 実験方法

骨材は、JIS A1146 に従い、各粒度の骨材を表-1 に示す構成比になるよう調整した。全アルカリ量は Na<sub>2</sub>O 換算で 1.2% になるように、NaOH を添加し、水、セメント、骨材の配合比は 0.5 : 1 : 2.25 とした。測定プラグを設置した 4 x 4 x 16cm の型枠にモルタルを成型し、20℃で 24 時間養生後、脱型し、専用密封容器に設置して、40℃の恒温槽にて保管し、所定の材齢毎にダイヤルゲージ法により長さを測定した。

高炉スラグ細骨材の置換効果を把握するため、水準 1 では 0.15-5mm の全粒度について、0, 25, 50, 75, 100% を反応骨材と置き換えた。なお比較に、ケイ砂を反応性骨材で置き換えた水準も加えた。

水準 2 では、全粒度の半分について、反応性骨材を使用し、残りの半分のケイ砂とした。表-2 の水準における

\*1 岩手大学 工学部建設環境工学科准教授 工博 (正会員)

\*2 (株) デイ・シー 開発企画室 工修 (正会員)

\*3 岩手大学 工学部建設環境工学科助教 工博 (正会員)

\*4 岩手大学 工学部建設環境工学科

○ (印) はそのケイ砂に該当する粒度の部分で、高炉スラグ細骨材で置換したことを示す。水準 2-1 では、高炉スラグ細骨材の各粒度における抑制効果が、水準 2-2 では、5mm からの粗い粒度の累積置換の効果が、水準 2-3 では、0.15mm からの細かい粒度の累積置換の効果が把握できる。

水準 3 では、スラグ微粉末製造用粉砕機 (ミル) の中間生成物であるミル戻り粉 (0.15mm 平均粒径 80 μm (0.08mm)) の高炉スラグを用い、水準 2 と同様に、全粒度の半分を反応性骨材とし、残りをケイ砂細骨材とする。50% のケイ砂細骨材の 2.25% から 45% を 0.15mm 以下の高炉スラグ粉末で置換えた。

表-2 水準ごとの反応性骨材の置換割合

水準1						
全粒度	0%	25%	50%	75%	100%	
水準2						
2-1						
粒度(mm)	水準					構成
0.15-0.3	○					15%
0.3-0.6		○				25%
0.6-1.2			○			25%
1.2-2.5				○		25%
2.5-5					○	10%
2-2						
0.15-0.3	○					15%
0.3-0.6	○	○				25%
0.6-1.2	○	○	○			25%
1.2-2.5	○	○	○	○		25%
2.5-5	○	○	○	○	○	10%
2-3						
0.15-0.3	○	○	○	○	○	15%
0.3-0.6		○	○	○	○	25%
0.6-1.2			○	○	○	25%
1.2-2.5				○	○	25%
2.5-5					○	10%

○: 置換水準

水準3							
細骨材	0%	2.25%	4.50%	9%	18%	27%	45%

水準 4 として、高炉スラグ微粉末のセメント置換については、全粒度において反応性骨材、ケイ砂細骨材は 50%、50% の骨材を用い、研究用普通ポルトランドセメントに、ブレン比表面積が 3300 及び 3890 cm<sup>2</sup>/g の高炉スラグ微粉末を用い、高炉 A 種、B 種、C 種に相当する 15%、40%、65% を高炉スラグ微粉末に置換した。高炉セメントでの抑制効果と対比した。

水準 5 として、水準 2 の配合に類似して、全量ケイ砂細骨材とした配合から、各粒度をアルカリ反応性骨材に置換した。反応性骨材の粒度がアルカリ骨材反応の膨張に及ぼす影響について把握した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 高炉スラグ細骨材の全粒度置換効果

図-1 に、反応性骨材の全粒度を 0, 25, 50, 75, 100% をケ

イ砂細骨材で置換 (水準 1) した結果を示す。ケイ砂細骨材で置換した場合、全骨材が反応性骨材の場合の 180 日の膨張量が 0.43% であり、無害とする判定値の 0.10% を大きく上回る。25% 及び 50% をケイ砂細骨材で置換した場合には、90 日までの膨張量は置換 0% の場合を下回るが、180 日では置換 0% より大きな膨張量を示す。むしろ、ケイ砂で置換したほうが膨張は大きくなるというアルカリ骨材反応特有のペシマム現象が認められる。ケイ石骨材で 75% 置換した場合でも 0.33% の膨張量を示す。100% 置換のみ、膨張を示さない結果となった。

高炉スラグを細骨材として用いた場合には、25% 置換した場合でも、モルタルの膨張量は 0.28% となり、膨張量が無添加を上回ることはない。置換量が増すに連れて、膨張量は小さくなる。50% では 0.1% の「無害でない」の判定になるが、75% 置換では 0.05% 以下になり「無害」判定となる。ただし、細骨材の 75% を高炉スラグ細骨材に置換するというは実際に即した抑制方法としては適当ではないが、高炉スラグを細骨材として利用することは、アルカリ骨材反応による膨張を軽減させる効果は認められる。

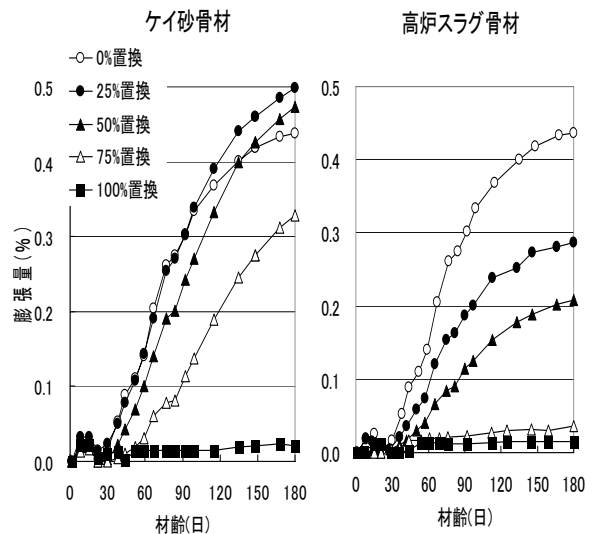


図-1 ケイ砂及び高炉スラグを置換した置換の効果

#### 3.2 高炉スラグ細骨材の粒度効果

反応性骨材、ケイ砂細骨材をそれぞれ、全粒度で 50% ずつとし、ケイ砂細骨材の粒度ごとに高炉スラグ細骨材で置換した水準 2-1 の結果を図-2 に示す。

2.5-5mm の粒度のケイ砂細骨材を高炉スラグ細骨材で置換しても膨張量抑制効果は期待できない。そのほかの粒度については、粒度が細くなるにつれて、膨張量の低減効果が認められるが、とりわけ、0.15-0.3mm の高炉スラグ細骨材の低減効果が著しい。ただし、全細骨材の 7.5% を置換しても、低減効果は 30% 程度である。したがって、実用的な抑制効果とは考えにくい。大径

からの高炉スラグ細骨材の累積置換（水準2-2）、小径から累積置換（水準2-3）の場合の高炉スラグ細骨材の効果を図-3に示す。

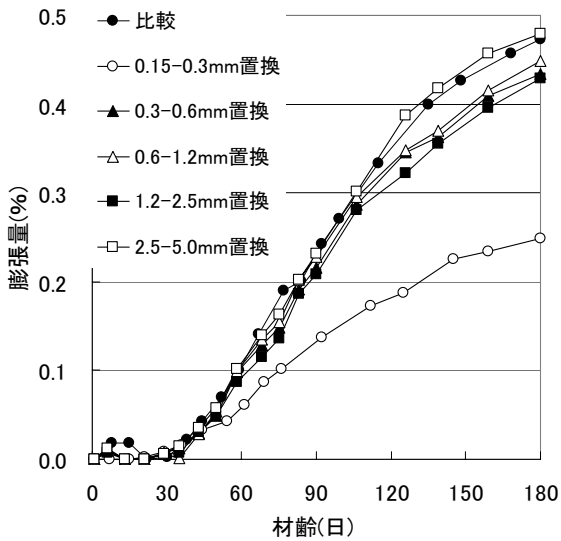


図-2 高炉スラグ細骨材の粒度の効果（粒群置換）

大径からの累積置換の場合、2.5mm までの置換では、膨張抑制効果は小さく、その後、小径を累積して置換するごとに、膨張抑制効果を発揮する。ここでも0.15-0.3mmの最小粒度の高炉スラグ細骨材の抑制効果が大きいことがわかる。0.3-2.5mmの間では、高炉スラグによる膨張抑制効果は粒度の違いほどあきらかではなく、小径ほど、抑制効果は大きい。

小径からの高炉スラグ細骨材の累積置換では、0.15-0.3mmの最小粒度のスラグを置換することにより、モルタル膨張量は半減することがわかるが、全粒度を置換し、細骨材の50%を高炉スラグとしても、膨張量が40%程度である。ここでも最小粒径の0.15-0.3mmの高炉スラグ細骨材の効果は大きいことから、さらに小さい0.15mm以下の高炉スラグ粉末の膨張抑制効果は期待される。

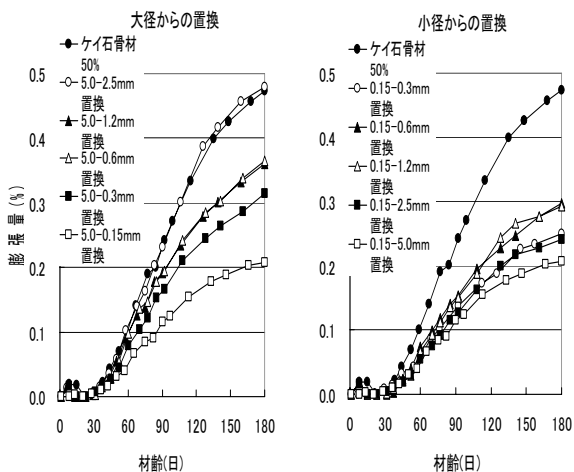


図-3 高炉スラグ細骨材の粒度の効果（累積粒度置換）

### 3.3 0.15mm以下の高炉スラグ粉末の影響

これまでの高炉スラグを細骨材とした場合のアルカリ骨材反応抑制効果については、2.5mm以上の高炉スラグ細骨材の抑制効果は小さく、粒度が小さくなればなるほどその効果は大きくなる。とりわけ0.15-0.3mmの粒度の影響は大きい。高炉スラグ粉末を細骨材のケイ砂粒度から置換し、膨張抑制効果を検討した（水準3）。結果を図-4に示す。全細骨材の2.25%を0.15mm以下の高炉スラグ粉末で置換えると、膨張量は0.35%と、無混合に比べて、膨張量は低下する、4.5%、9%と増加するに従い、膨張量は減少するが、7.5%置換した0.15-0.3mmの粒度を高炉スラグ細骨材で置換した場合とほぼ膨張量は等しく、微粉末の膨張抑制効果は必ずしも大きくない。9、18、36、54%と置換量が増すに連れて、膨張量は減少する。45%置換では、モルタル膨張量は0.1%を下回る。ただし、このモルタルでは、細骨材の54%以上が0.15mm以下の微粉末としたため、モルタルの流動性は著しく低下し、成型が困難であった。実用を考えると、細骨材の精々10%以下程度の0.15mm以下の高炉スラグ粉末の使用が実用的であり、この場合のアルカリ骨材反応による膨張抑制効果は約50%程度を成る。

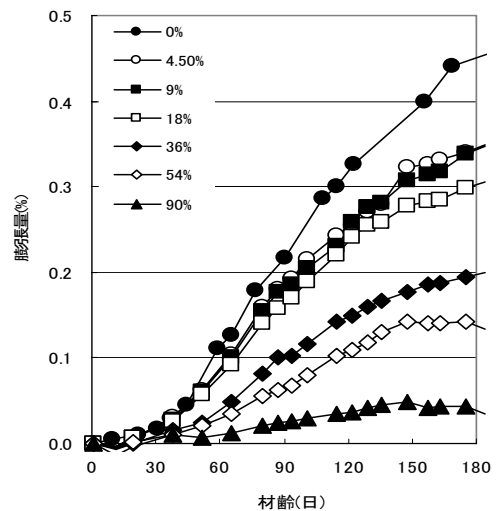


図-4 0.15mm以下の高炉スラグ粉末の効果

### 3.4 高炉スラグ微粉末の影響

水準4として、2種類の高炉スラグ微粉末（ブレン比表面積 3300及び3890 cm<sup>2</sup>/g）を、JIS R5211:2003に区分される高炉セメントの品質に対応するA種15%、B種40%、C種65%の普通ポルトランドセメントと置換え、高炉セメントを製造した。骨材は全粒度についてケイ砂細骨材及び反応性骨材を50%ずつとした骨材を用いてモルタルバー試験を行なった。結果を図-5に示す。混合セメントに占める高炉スラグ微粉末の量が多くなるにつれて、膨張抑制効果は大きくなり、また、ブレー

比表面積が大きいほど、その抑制効果が大きい。混合量が 15% の場合には、膨張量の低減効果は 30% 程度であり、26 週 (182 日) での膨張量は 0.25% 以上を示す。高炉スラグ微粉末の混合量が 40% 以上で、膨張量は、比表面積が粗い高炉スラグ微粉末でも 0.1% を下回り、アルカリ骨材反応の抑制に効力を発することが理解できる。材齢 182 日のモルタルバーの膨張量を 0.1% 以下にするには、高炉スラグ微粉末の 40% 以上の添加が必要となる。JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) の附属書 2 (規定) のアルカリシリカ反応抑制対策の方法に規定されている 40% 以上の高炉スラグを含む高炉 B 種セメントを使用することの規定と、本実験の結果はよく符合する。

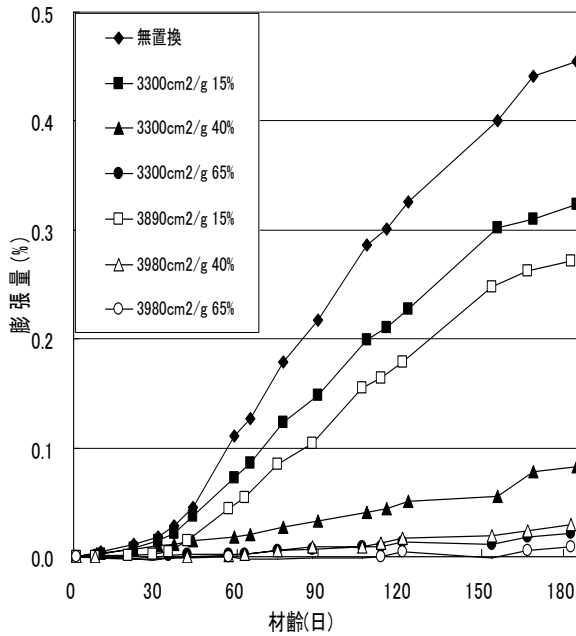


図-5 水準 4 (高炉スラグ微粉末の影響)

### 3.5 全粒度の影響

5mm 以下の細骨材粒度から混和材料としての高炉セメント微粉末 (平均粒径 5 μm) までの粒度の範囲は 1000 倍の範囲に及ぶ。この全レンジの高炉スラグのアルカリ骨材反応 (アルカリシリカ反応) の抑制効果について検討を行なった。ここで、粒度、比表面積を一つの数値に置換えるため、単位モルタル (ドライベース) 当りの高炉スラグ比表面積  $S_{SL}$  を計算することとした。高炉スラグ微粉末についてはブレーン比表面積を使用し、粒度については、篩間の中間径を求め、粒子を球と仮定して表面積を求めた。モルタル単位体積 (1cm<sup>3</sup>) 当りに含まれるスラグの表面積 (cm<sup>2</sup>) は、半径  $r_1$  (mm) とし、スラグの密度を 2.9(g/cm<sup>3</sup>)、モルタル単位体積当りに含まれるスラグの質量を  $x$  (g/cm<sup>3</sup>) とすると、下式より高炉

スラグ比表面積  $S_{SL}$  (cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>) が求められる。

$$r_1 = \frac{A + B}{2} \text{ (mm)}$$

(ただし、粒度範囲の最大値を A、最小値を B とする)

$$S_{SL} = 4\pi r_1^2 \times \frac{x}{\frac{4}{3}\pi r_1^3}$$

$$= 4\pi r_1^2 \text{ (mm}^2) \times \frac{x}{\frac{4}{3}\pi r_1^3 \text{ (mm}^3)}$$

$$= \frac{3 \times x \times 10^3}{2.9 \times r_1 \times 10^2} \text{ (cm}^2 / \text{cm}^3)$$

$$= \frac{3 \times x \times 10}{2.9 \times r_1} \text{ (cm}^2 / \text{cm}^3)$$

x 軸にこの値 (モルタルの単位体積当たりのスラグ比表面積) を、y 軸に材齢 182 日 (26 週) のモルタルバーの膨張量をとった結果を図-6 に示す。細骨材粒度、0.15mm 以下の高炉スラグ粉末、混合材としての高炉スラグ微粉末とおのおのにおいて良い相関を示す。全粒度においても、単位モルタル当りの高炉スラグ比表面積 ( $S_{SL}$ ) が大きいほど、アルカリ骨材反応の抑制効果が大きいことがわかる。

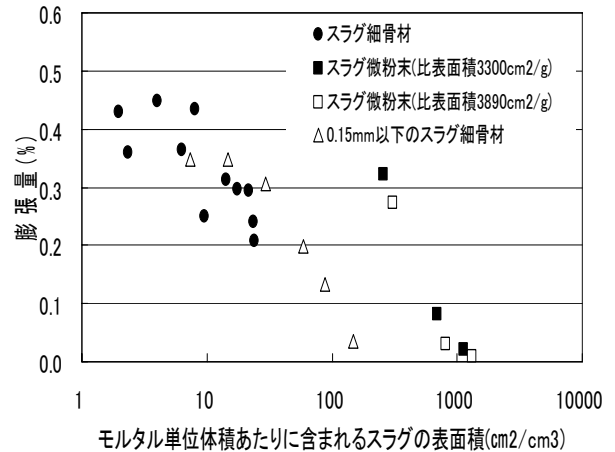


図-6 比表面積と膨張量

### 3.6 アルカリ反応性骨材の粒度の影響

反応性骨材の粒度が膨張に及ぼす影響を検討することを目的に、全量ケイ砂細骨材から、おのおのの粒度 (0.15-0.3, 0.3-0.6, 0.6-1.2, 1.2-2.5, 2.5-5mm) の部分を反応性骨材に置換えた場合のモルタルバーの膨張を調べた。結果を図-7 に示す。同一の反応性骨材であるにも関わらず粒度の細かい 0.15-0.3mm のみを置換したモルタルでは、182 日の膨張量は 0.1% 以下となり、この部分だ

けを置換しても、「無害でない」の判定にはならない。2.5-5mmの最大粒の反応性骨材のみを置換しても膨張量は、26週で0.05%であり、無害となる。粒度の最も細かいもの、最も粗いもののみを置換しても、全細骨材に占める構成比が15%及び10%と他の粒度よりも少ないことはあるが、モルタルは膨張を示さない。反応性骨材は0.3mm以下に粉砕して利用することなどが提案できる可能性がある。一方、0.6-1.2mm、1.2-2.5mmの反応性骨材のみを置換した場合の膨張量は大きく、0.3-0.6mmの反応性骨材のみを置換した場合は大よそ半分になる。0.6-2.5mmの範囲の粒径がアルカリ骨材反応による膨張に寄与したと考えられる。したがって、反応性骨材は0.6-2.5mmを取り除き0.3mm以下に粉砕して利用することなどがアルカリ骨材反応抑制方法のひとつとして提案できる。この結果は、福島らの報告<sup>5)</sup>に一致する。反応性骨材の粒径が膨張に及ぼす影響などについては、今後の検討課題であり、アルカリ骨材反応の詳細を検討する上でも有効な研究分野である。

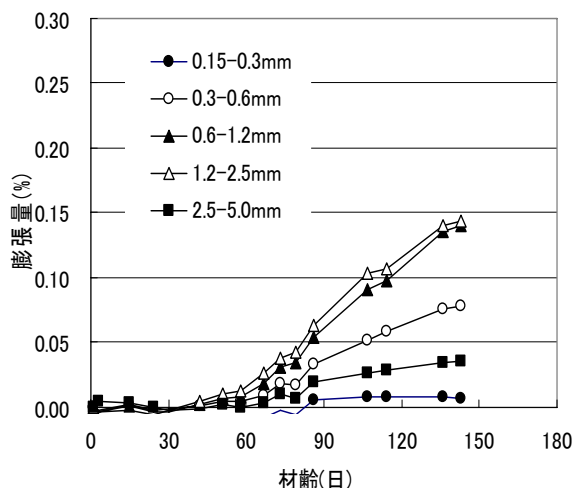


図-7 反応性骨材の粒度がモルタルバーの膨張に及ぼす影響

#### 4. まとめ

5mm以下の細骨材粒度、0.15mm以下の高炉スラグ粉末、混合材としての高炉スラグ微粉末までの広い粒度範囲の高炉スラグを用いて、反応性骨材を用いたモルタルバー法による高炉スラグの抑制効果について検討を行った。得られた結果は次の通りである。

1) 比較のケイ砂細骨材を反応性骨材と置換した場合、50%までの置換では0%置換の場合より、膨張量が大きくなるペシマム現象が発生するが、高炉スラグ細骨材の

場合には、少量置換の場合でも置換量に応じて膨張量は減少し、膨張抑制効果を示す。50%で膨張量を半減、75%置換で、膨張量を0.1%以下にすることができる。

2) 細骨材(0.15mm-5mm)の範囲では、2.5-5mmの粒度の高炉スラグ細骨材のアルカリ骨材反応によるモルタル膨張抑制効果は小さく、粒度が小さいものほど抑制効果は大きく、0.15-0.3mmの細骨材の抑制効果は大きく、膨張量を半減させる。累積置換の水準においても、0.15-0.3mmの粒度の抑制効果が確認された。

3) 0.15mm以下の高炉スラグ粉末のモルタルバーの膨張抑制効果は、大きいですが、0.15-0.3mmの高炉スラグの細かい細骨材と同程度であるが、添加量が多くなると、膨張量を0.1%以下に低減できる。

4) 2種類の高炉スラグ微粉末(ブレーン比表面積3300及び3890 cm<sup>2</sup>/g)をセメントに置換して高炉セメントとした場合の抑制効果については、比表面積が大きいものほど効果が高いが、置換量が高炉A種の15%では膨張量を0.1%以下にすることは出来ない。40%以上の高炉スラグ微粉末が必要である。

5) 細骨材、0.15mm以下の高炉スラグ粉末、混合材としての高炉スラグ微粉末の範囲での、アルカリ骨材反応によるモルタルバーの膨張抑制効果について検討すると、単位モルタルあたりのスラグ表面積( $S_{SL}$ )と膨張量には相関関係があり、 $S_{SL}$ が大きいほど、モルタルバーの膨張量が小さい。この数値により、大よその抑制効果を判定できる。

6) アルカリ反応性骨材の粒度を調整して、モルタルバーの膨張を調べたところ、0.15-0.3mmの反応性骨材ではモルタルバーの膨張が現れず、また2.5-5mmの反応性骨材での膨張量も小さい。0.3-2.5mmとりわけ、0.6-2.5mmの反応性骨材による膨張効果が大きい。

#### 参考文献

- 1) L.Pepper and B.Mather: Proceeding of ASTM, Vol.59, pp.1178-1203, (1959)
- 2) H.G. Smolczyk: Proceeding of 6<sup>th</sup> International Conference on the Chemistry of Cement (Moscow), pp.183-188, (1984)
- 3) 内川浩: アルカリ骨材反応, コンクリート技術者のためのセメント化学雑論(増補/アルカリ骨材反応)、セメント協会、pp.109-123, (1983)
- 4) A.Leshinsky: Slag sand in ready-mix concrete, Concrete (Australia), March, pp.38-39 (2004)
- 5) 福島正人、二村誠二: コンクリート用砕石のアルカリ骨材反応、セメント・コンクリート、No.438, pp.8-15, (1983)

