

# [55] 高炉スラグ粉末、フライアッシュによる ASR 膨張抑制効果に関する実験的検討

正会員 ○石井良美 (建設省土木研究所)  
 蒔田 実 (建設省土木研究所)  
 正会員 小林茂敏 (建設省土木研究所)  
 正会員 小野金造 (㈱東京ソイルリサーチ)

## 1. まえがき

アルカリシリカ反応 (以下、ASR) によるコンクリート構造物の劣化が、関西地方を中心に報告されており<sup>1)</sup>、ASR の調査や試験方法が確立すれば ASR を生じている構造物や反応性骨材はさらに広い範囲で見つかることが予想される。この ASR を抑制する方法としては、すでに低アルカリセメントの使用、ボゾランの添加、総アルカリ量の規制などが考えられているが、我が国ではこれらの抑制効果を確認した試験例がまだ少ない。このため、ASR 試験で有害となる骨材を例にフライアッシュ、高炉スラグ粉末による ASR の膨張抑制の効果について実験をおこなったのでここに報告する。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料

反応性骨材として九州地方で産出する輝石安山岩を試験に用いた。この骨材は ASTM 化学法で有害の域に位置し、モルタルバー法では 6ヶ月の膨脹量が 0.2% 以上を示すものである。非反応性骨材としては細骨材に富士川産川砂、粗骨材に笠間産碎石を用いた。セメントは普通ポルトランドセメントで Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> 0.93% のものを用いた。使用したセメント、フライアッシュ、高炉スラグ粉末の物理試験及び化学分析試験結果を表-1 に示すが、本文では特にことわらないかぎり混和材の Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> は ASR の膨張には関与しないものとして扱う。

### 2.2 試験方法

#### (1) モルタル試験

表-2 に示す試験条件について、ASTM モルタルバー法に準じた方法により試験を行った。但し、供試体は 4×4×16cm とし、1 配合につき 3本とした。この時の配合は重量比でセメント 1 に対して骨材 2.25 としフライアッシュおよび高炉スラグ粉末はセメント重量の内割として使用した。なお、アルカリの添加は Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> を NaOH 水溶液を用いて、ポルトランドセメントの 0.5, 1.0wt% と添加した。したがってセメントの Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> は各々 0.93, 1.43, 1.93% となるが本文では便宜的に各々 1.0, 1.5, 2.0 % として用いる。

#### (2) コンクリート試験

表-3 に示す試験条件について W/C=55%、スランプ=8±1cm でコンクリートを製作した。アルカリ量はモルタル同様に NaOH 水溶液により Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> 量の調節を行った。供試体は 10×10×40cm とし、材令 28日ま

表-1 物理試験および化学分析試験結果

	比重	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> (%)
セメント	3.15	3380	21.5	5.2	3.1	64.9	1.4	2.1	0.53	0.61	0.93
フライアッシュ	2.35	3440	49.1	-	-	-	-	-	2.28	1.45	3.28
スラグ	2.90	3750	34.1	15.1	0.6	42.1	5.2	-	0.25	0.36	0.49

表-2 モルタルの試験条件

	反応性骨材	非反応骨材
アルカリ量	1.0, 1.5, 2.0 %	
フライアッシュ	0, 10, 20, 25, 30 %	0 %
スラグ	0, 30, 40, 50, 60 %	0 %

表-3 コンクリートの試験条件

	反応性骨材	非反応骨材
アルカリ量	1.0, 1.5, 2.0 %	
フライアッシュ	0, 10, 20, 30 %	0 %
スラグ	0, 30, 50, 60 %	0 %

では水中養生を行い、その後38°Cの恒温室で湿気箱に立てて貯蔵した。なお、供試体の乾燥を防ぐために供試体に湿布を巻いた。測定は20°Cの恒温室で温度を低下させたのちに長さ変化、動弾性係数、重量等の諸測定を行った。

### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 モルタル試験

各アルカリ量におけるフライアッシュ、高炉スラグ粉末の置換率と膨張量の関係を図-1 に示す。

フライアッシュを置換したモルタルはNa<sub>2</sub>Oeq 1%の場合すべての置換率において膨張は抑制されている。また、Na<sub>2</sub>Oeq 1.5%及び2.0 %の場合でも抑制されているものの、膨張量が0.1 %を上回るものが多少見られる。仮に0.1 %以下の膨張量であれば十分に抑制効果があると判断した場合、Na<sub>2</sub>Oeq 1.0%では10%、1.5 %では20%、2.0 %では25%のフライアッシュの置換が必要となる。一方、高炉スラグ粉末ではNa<sub>2</sub>Oeq 1%ですべての置換率、1.5、2.0%では置換率40%以上で膨張の抑制を有する。

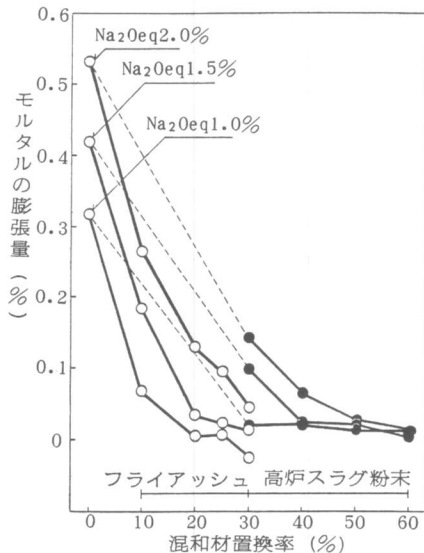


図-1 混和材置換率と膨張量

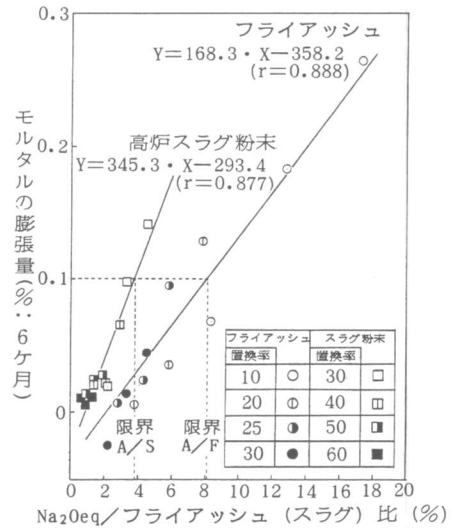


図-2 A/F, A/Sと膨張量

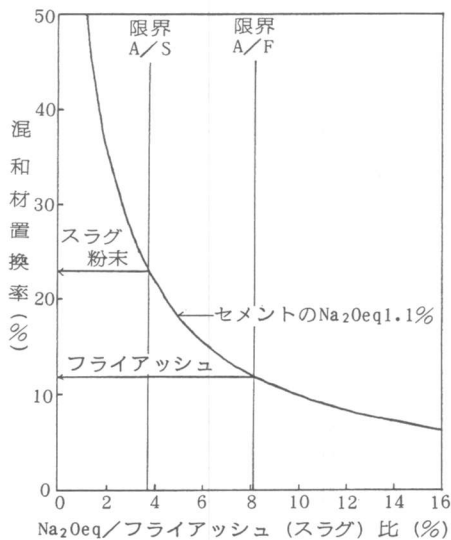


図-3 膨張抑制に必要な混和材置換率

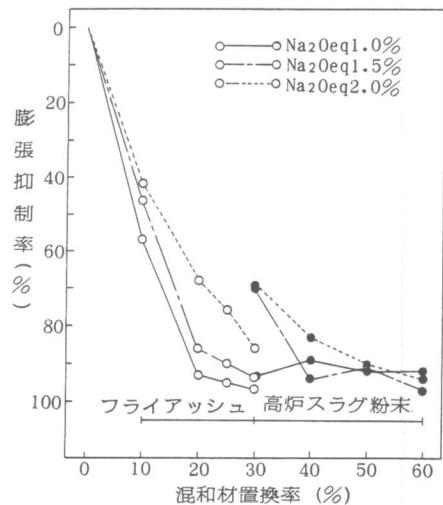


図-4 混和材置換率と膨張抑制率

このように混和材とアルカリ量との関係は、アルカリ量によって反応を抑制するのに必要な混和材量は異なる。図-2は混和材量当たりのアルカリ量(A/F, A/S)と膨張量との関係を示したものであり、フライアッシュではA/F=8.1%、スラグ粉末ではA/S=3.7%以下でモルタルの膨張量は0.1%以下となることがわかる。これよりASRの膨張抑制は混和材量とアルカリ量との比で決定され、その抑制効果が現れるA/F, A/S(本文では限界A/S, 限界A/Fと呼ぶこととする)は混和材の種類や性質によって違うものと考えられる。

図-3は通常市販されているセメントの $\text{Na}_2\text{Oeq}$ の最大値1.1%<sup>2)</sup>を想定して描いたA/S, A/Fと混和材置換率との関係を表したものであり、図-2から示される限界A/S, 限界A/Fも合わせて示している。これによればモルタルの膨張量を0.1%以下にするにはフライアッシュで12%の置換が必要であることがわかる。また高炉スラグ粉末では21%の置換が必要であるといえ、ASRを抑制するには高炉セメントB種(スラグ量30~60%)でよいことがこの結果より推察される。

図-4はフライアッシュ、高炉スラグ粉末の膨張抑制効果を百分率で表したものである。フライアッシュの場合は、10%の置換で1/2

以下に膨張を抑制し、25%の置換で1/5以下にする。スラグ粉末では30%の置換で1/4以下となるがその効果はフライアッシュに比べ劣る。ただし、使用量の多いB種では最大混合量はフライアッシュ20%、高炉スラグ粉末は60%であるためフライアッシュの方が不利といえよう。

図-5(a), 6(a)はモルタル1バッチ中でのセメントと添加 $\text{NaOH}$ の $\text{Na}_2\text{Oeq}$ (g)と膨張量との関係を示したものである。フライアッシュや高炉スラグ粉末を置換していないモルタル(図中○印)では $\text{Na}_2\text{Oeq}$ の減少にともなって膨張量が減少しているが、混和材置換モルタルではそれ以上に膨張量が減少することが○や○を結ぶ線が○を結ぶ線よりも下にあることから、同程度のアルカリ量を有していても混和材を置換することによって膨張量は減少することがわかる。

(b)図は混和材に含まれる $\text{Na}_2\text{Oeq}$ も含めて膨張量との関係を示したものであり、本実験で用いたフライアッシュのアルカリ量がセメントのアルカリ量より多いため $\text{Na}_2\text{Oeq}$ 量は置換することによってさらに増加することとなる。一般にアルカリ量の増加は膨張量の増加につながるが、本実験では逆に膨張量は減少している。

以上のことより、混和材の抑制

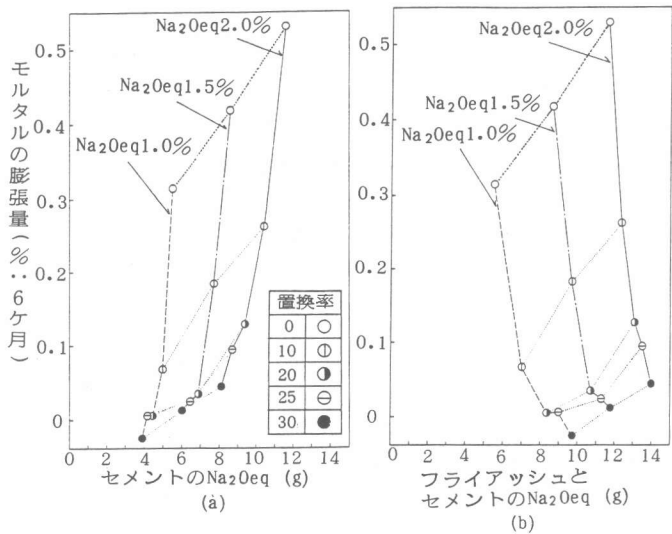


図-5  $\text{Na}_2\text{Oeq}$ 量と膨張量(フライアッシュ)

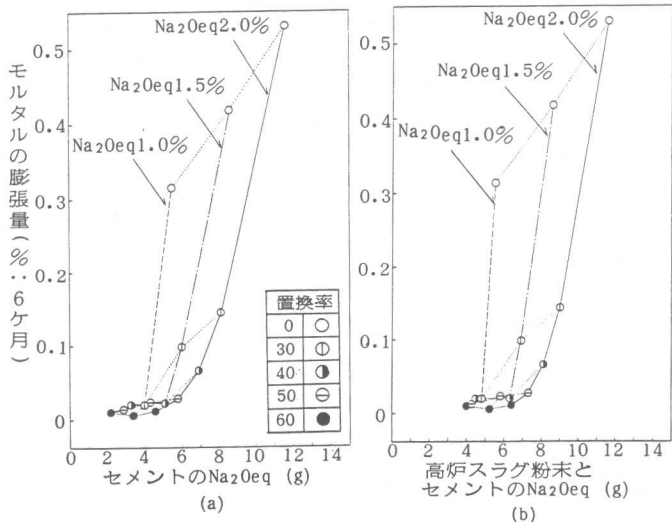


図-6  $\text{Na}_2\text{Oeq}$ 量と膨張量(スラグ粉末)

効果とは単なる置換することによるアルカリの稀釈効果でなく、他の効果により膨張が抑制されることが推察される。また、混和材に含まれるアルカリはASRの膨張に関与しないものと思われる。

### 3.2 コンクリート試験

反応性骨材を用いたコンクリートでは $\text{Na}_2\text{Oeq} 1.0\%$  (総アルカリ量 $3.4\text{Kg/m}^3$ ),  $1.5\%$  ( $5.0\text{Kg/m}^3$ ) 双方において材令12ヶ月の時点では膨張は示していない。しかし、 $\text{Na}_2\text{Oeq} 2.0\%$  ( $6.6\text{Kg/m}^3$ ) のものが材令10週から過大な膨張を示し始め、12ヶ月では約  $0.3\%$  の膨張を示した。一方、非反応骨材として用いたものは $\text{Na}_2\text{Oeq} 2.0\%$  ( $6.4\text{Kg/m}^3$ ) で膨張した。膨張し始めたのは反応性骨材に比べ 2ヶ月近く遅れた材令 4ヶ月からであり、膨張量も反応性骨材の約  $1/2$ 程度である。従って、ASRの判定については膨張速度等も考慮しておこなわなければならないと考えられる。いずれにせよセメント重量の  $2\%$  の $\text{Na}_2\text{O}$  ( $6.4\text{Kg/m}^3$ ) は普通一般に使用されている骨材もかなり異常な挙動を示すことを示唆している。

図一 7にこれらコンクリートの膨張量と動弾性係数比の関係を示す。膨張量が  $0.1\%$ 程度までは動弾性係数の低下と膨張量が比例していることを示している。

図一 8 に各アルカリ量におけるフライアッシュ、スラグ粉末の置換率と膨張量の関係を示す。B種以上のフライアッシュ、スラグを置換したコンクリートでは $2.0\%$  のアルカリ量でも膨張を示していない。これは混和材の効果と考えられるが、さらに長期の観測をする必要がある。

### 4. まとめ

反応性骨材について、フライアッシュ、高炉スラグ粉末を用いてASRの膨張抑制の効果を検討した。その結果本実験で使用した材料の範囲内において次のことが明らかとなった。

モルタル試験 ①混和材によって膨張は抑制されるが抑制効果は混和材とアルカリ量との比 (A/F, A/S) に関係する

②また、その抑制力は混和材の種類によって異なる。

コンクリート試験 ③動弾性係数の減少はASRの進行に関係し、膨張量と動弾性係数の関係はある程度までは比例関係にある ④フライアッシュ、高炉スラグ粉末の抑制効果はコンクリートにおいても確認された ⑤ $6.4\text{Kg/m}^3$ のアルカリは一般に使用されている骨材でも異常な挙動を示す。

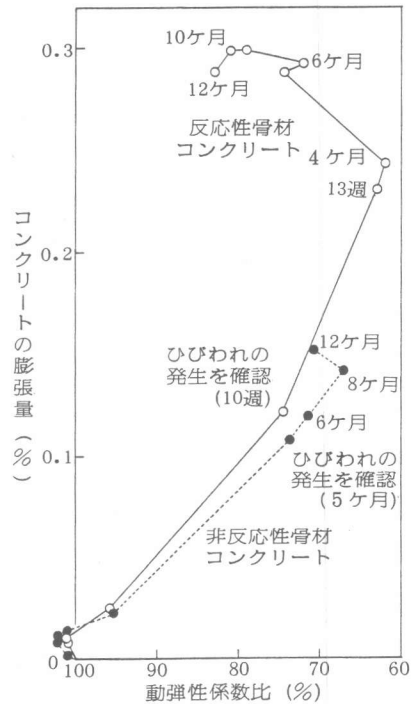
### 5. あとがき

ここで得られた結果は本実験で用いた材料の範囲内及び比較的少ない実験ケースにおける結果であり、一般的なASRの膨張抑制効果や関係を示したものではない。そのため、今後実験を重ねていくことによりさらに異なった結果となるおそれがあることをこたわっておく。

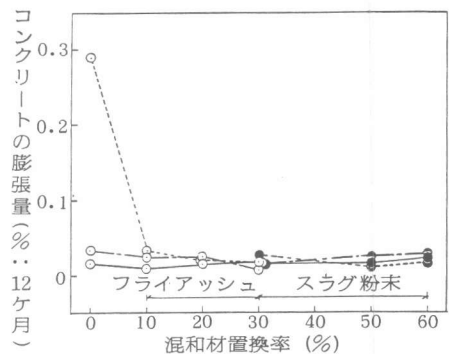
最後に、本試験を行うにあたり(財)土木研究センター柳田 力氏の助力を得た。ここに深く感謝いたします。

### 【参考文献】

- 1)例えば、幸左ら「反応性骨材コンクリート調査と実験の概要」土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第 5部 1984年10月
- 2)セメント協会「アルカリ骨材反応についての見解」1983年10月



図一 7 コンクリートの膨張量と動弾性係数比



図一 8 混和材置換率と膨張量