

[1015] シリカフェーム，高炉スラグ粉末の AAR 膨張抑制効果について

正会員 ○森野奎二 (愛知工業大学 工学部)  
 正会員 柴田国久 (愛知工業大学 工学部)  
 岩月栄治 (愛知工業大学 大学院)

1. まえがき

ポゾラン質混和材には、アルカリ骨材反応(以下、AARと記す)によるコンクリートの膨張を抑制する効果のあることが知られている。抑制効果の認められている混和材は、シリカフェーム、高炉水砕スラグ粉末、フライアッシュなどであるが、その他の鉱物質微粉末が有効な場合もある[1]。混和材の抑制効果が現われるためには、一定量以上の混入が必要で、不適切な混入では十分な効果が発揮されず、逆効果になる例さえある[2]。最適な混和材の使用量は、骨材の種類によって異なる。これは骨材中に含まれている反応性鉱物の種類と量が骨材の種類によって異なるからで、AARの反応自体が異なるものである。膨張抑制は反応性鉱物とアルカリとの反応に混和材が加わることによって生じるものであるから、これら3つの材料の性質を相互に関連付けて検討する必要がある。

わが国の各地で被害を起こしている骨材に含まれる反応性鉱物は、二つのグループに分かれる。一つは、安山岩で代表される火山ガラス、クリストバライト、トリジマイトの火山岩系の反応性鉱物グループである。もう一方はチャートで代表される潜晶質石英、玉髄質石英、歪のある石英および非晶質シリカ(オパール)の堆積岩系の反応性鉱物グループである。前者をガラス系、後者を石英系とまとめることができる。本研究では、このように反応性鉱物の異なる骨材に対して、各種混和材の膨張抑制効果は、どのような相違を示すかを調べたものである。本報告では、主としてシリカフェームの実験結果について記し、その他の混和材については考察に必要な結果のみを記した。

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメント：アルカリ量、Na<sub>2</sub>O換算0.65% (Na<sub>2</sub>O,0.19 ,K<sub>2</sub>O,0.70 %)の普通ポルトランドセメント。NaOH試薬を添加して全アルカリ量をNa<sub>2</sub>O換算で、0.8~2.0%とした。

混和材：シリカフェーム(国産A、外国産B)、高炉水砕スラグ粉末(以下、スラグ粉末と略す)、安山岩石粉、チャート石粉の5種。それぞれの物理化学的性質を表1に、X線回折図を図1に示す。安山岩石粉およびチャート石粉は本論文で骨材として使用している岩石の微粉末である。各混和材の形状を写真1に示す。各混和材はセメントと置換して内割で用いた。混和量は、シリカフェームと石粉については5,10,15,20%,一部25,30%とし、スラグ粉末は、左記の他に70,80,90%とした。セメントの減少に伴うアルカリ量の減少はNaOHを添加することによって補正した。従って、モルタル中のアルカリ量は混和材の多少に拘らず一定であ

表1 各種混和材の物理化学的性質

混和材	比重	比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	化 学 成 分 (%)							
			lg. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
シリカフェーム A	2.21	20.0x10 <sup>4</sup> *	4.69	82.36	1.55	8.51	0.94	0.09	0.14	1.46
シリカフェーム B	2.18	21.5x10 <sup>4</sup> *	1.42	94.47	1.42	0.85	0.64	0.01	0.15	0.88
高炉スラグ	2.90	3750	—	33.9	14.0	0.75	42.4	5.6	0.31	0.35
チャート石粉	2.56	2010	0.80	95.71	2.30	0.44	0.14	—	—	0.46
安山岩石粉	2.62	3170	1.24	61.62	16.86	5.26	5.47	3.99	2.65	1.65

(\*:カタログによる)

る。混和材から溶出するアルカリ量は無視した。  
 骨材 : 安山岩砕石、チャート山砂利およびシリカ鉱物。シリカ鉱物は、反応性鉱物だけから成るもので実際に骨材として使われている物ではない。骨材の構成鉱物を表2に示す。なお、図1のX線回折図に現われていない石英系の反応性鉱物の同定は偏光顕微鏡観察によるものである。非反応性骨材としては珪砂 (S c, 11.7mmol/l, R c, 27mmol/l) を用いた。

2. 2 試験方法: 偏光顕微鏡観察、走査電子顕微鏡観察、X線回折分析、ASTMC289化学法およびASTMC227モルタルパー法によった。ただし、モルタルパー供試体の寸法は28×28×285mmとした。

### 3. 結果および考察

#### 3. 1 使用骨材の反応特性

使用した3種の骨材のASTMC289化学試験結果を、表3に示す。その規格による評価では、安山岩とシリカ鉱物は潜在的有害骨材で、チャートは有害骨材と分類される。

各骨材のASTMC227モルタルパー試験結果を、図2～図4に示す。図2は安山岩の膨張挙動の特徴を示す。ペシマム現象が見られ、反応性骨材と非反応性骨材との混合比が、極めて重要である。安山岩100%のNa<sub>2</sub>O当量1.2%よりは安山岩20%、Na<sub>2</sub>O当量0.8%のペシマム配合の方が膨張が大きいなどはよい例である。一方、図3のチャートには、ペシマム現象は見られず、膨張はアル

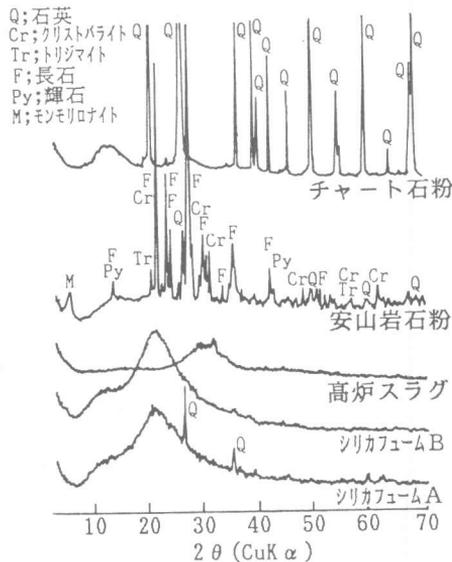


図1 各種混和材のX線回折図

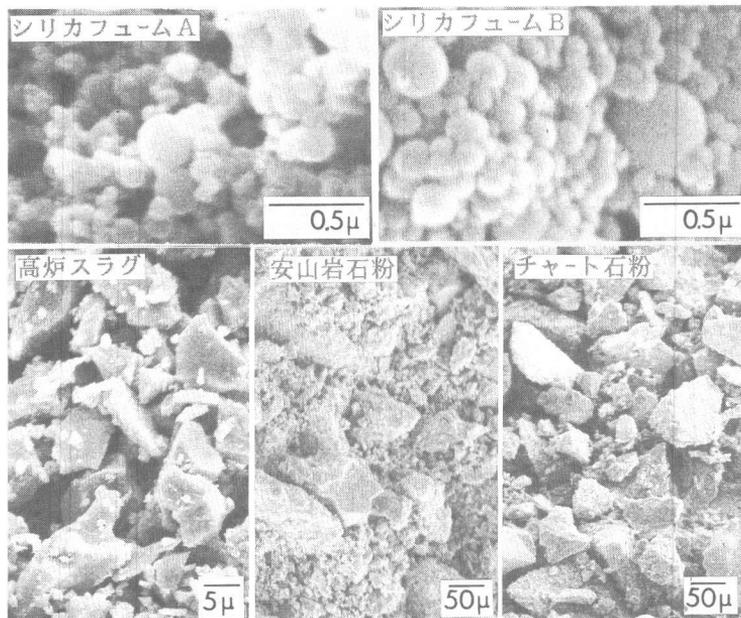


写真1 各種混和材の走査電子顕微鏡写真

表2 骨材の構成鉱物

骨材	造岩鉱物及び粘土鉱物	反応性鉱物及びガラス
安山岩	長石、輝石、石英、モンモリロナイト	クリストバライト、トリジマイト、火山ガラス
チャート	石英	潜晶質石英、玉髄質石英、歪のある石英、オパール
シリカ鉱物	—	クリストバライト、トリジマイト、オパール

カリ量によって決まる。ただし、チャートの種類あるいはアルカリ量によってはペシマム現象が見られる場合もある[3]。図4のシリカ鉱物は、安山岩よりも顕著なペシマム現象を示す。3種の骨材ともペシマム条件は、アルカリ量によって変動するものであり、アルカリ量の増加と共に、ペシマムとなる反応性骨材の混合割合は多くなる。反応性骨材100%のときに最高の膨脹を示すようなアルカリ量であれば、ペシマム現象は見られない訳である。一般に通常のアルカリ量でチャートにはペシマム現象が現われにくいのは、チャートに含まれている石英系の反応性鉱物の反応挙動がガラス系とは異なるからであろう。

表3 骨材のASTM C289 化学試験結果

骨材	化学法試験結果			判定
	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Sc/Rc	
安山岩	658	178	3.70	潜在
チャート	148	62	2.39	有害
シリカ鉱物	1202	336	3.58	潜在

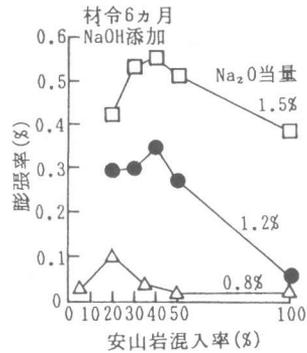


図2 安山岩の混入量とモルタルパー膨脹率との関係

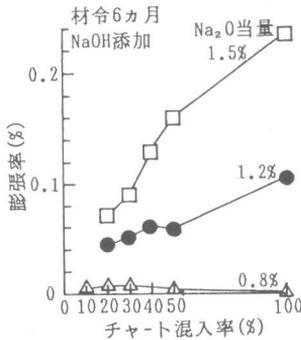


図3 チャートの混入量とモルタルパー膨脹率との関係

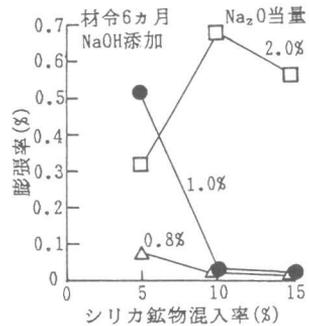


図4 シリカ鉱物の混入量とモルタルパー膨脹率との関係

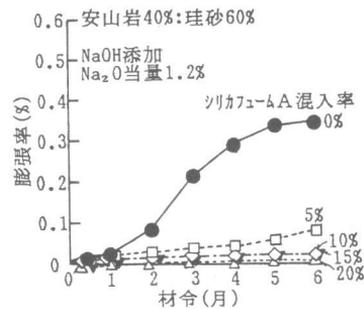


図5 安山岩モルタルの膨脹のシリカフュームAによる抑制

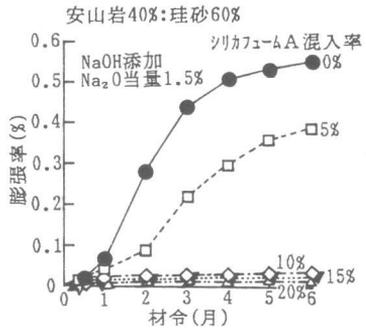


図6 安山岩モルタルの膨脹のシリカフュームAによる抑制

### 3.2 シリカフュームの膨脹抑制効果

安山岩のペシマム配合(安山岩40:珪砂60)にシリカフューム(A)を5~20%混和したモルタルパー膨脹試験結果を図5(Na<sub>2</sub>O当量1.2%)と図6(同、1.5%)に示す。チャート骨材はチャート100%使用のときに最大膨脹を示すので、その時のモルタルパー試験結果を図7、図8に示す。図9は安山岩のペシマム条件における材令6ヵ月での膨脹抑制効果を示したもので、同じ比率のチャートの

効果をも併記した。アルカリ量1.2%のとき、シリカフェウム10%以上の混入でよく抑制効果が現われている。図10はチャートの材令6ヵ月での膨張抑制効果を示したもので、図10には安山岩の100%使用のときの膨張抑制効果をも併記した。両骨材とも5%の混入で抑制効果が現われている。安山岩はペシマム配合では10%以上の混入が必要であるが、安山岩だけの場合は混入量は少なくてよい。

シリカ鉱物の場合は、図11 (Na<sub>2</sub>O当量1.0%、ペシマム配合、シリカ鉱物5:珪砂95)、図12 (Na<sub>2</sub>O当量2.0%、ペシマム配合、シリカ鉱物10:珪砂90)、図13 (6ヵ月での膨張抑制効果) に示すように膨張量が極めて大きいので、シリカフェウムの少量の混入では抑制効果は現われない。図13では、シリカフェウムを5%混入することによって、かえって膨張が増加する。シリカフェウム20%の混入でさえ不十分である。図11はアルカリ量がNa<sub>2</sub>O当量1.0%であって、決して多いものではないが、膨張率を0.1%以下にするには、シリカフェウム20%の混入が必要である。このように極めて反応性の高い骨材

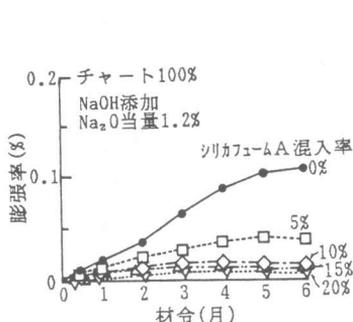


図7 チャートモルタルの膨張のシリカフェウムAによる抑制

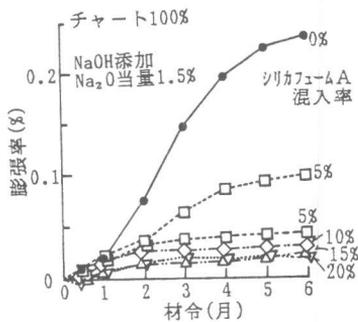


図8 チャートモルタルの膨張のシリカフェウムAによる抑制

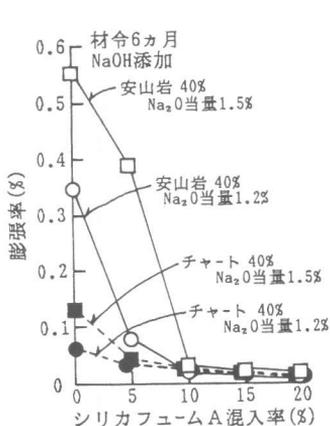


図9 安山岩およびチャートモルタルのシリカフェウムAによる膨張抑制効果 (反応性骨材40:非反応性骨材60)

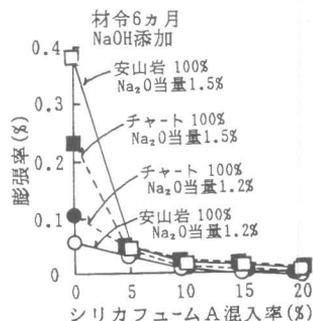


図10 安山岩およびチャートモルタルのシリカフェウムAによる膨張抑制効果 (反応性骨材100%使用)

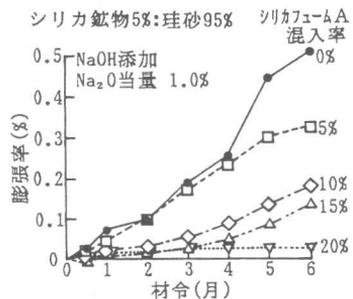


図11 シリカ鉱物モルタルの膨張のシリカフェウムAによる抑制

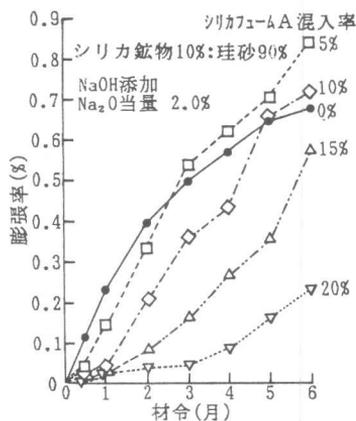


図12 シリカ鉱物モルタルの膨張のシリカフェウムAによる抑制

の場合には、抑制効果のあるシリカフェームといえども、大量に混入しないと抑制効果が現われない。以上の結果から、混和材の膨張抑制効果は、骨材自体の反応性に支配され、最適な混入量は骨材岩種毎に異なると言える。

### 3.3 各種混和材の膨張抑制効果

チャート骨材に対する各種混和材の膨張抑制効果を図14に示す。シリカフェーム(A)、(B)で膨張抑制効果が異なる。特に、特徴のある状態を示すのは、混和材混入率5%のときである。シリカフェーム(A)以外は、すべての混和材において、混和材を混入することによって、膨張が増加している。なお、図14には参考までに、フライアッシュの実験結果(別途整理中)も、全く同じ傾向を示したので併記した。スラグ粉末は50%以上混入しないと抑制効果は発揮しないと

言われているが、このチャートに関しては、30%の混入でかなりの抑制効果が現われている。しかし、石粉と比べると、やはりスラグ粉末の抑制効果は少ない。石粉の混入によって、ペシマム比率(この場合100%)が移動する、あるいはアルカリが消費される、あるいはアルカリ・シリカ比が異なるなどの理由で抑制効果が現われたのであろう。

### 3.4 過剰に混入した高炉水砕スラグ粉末の膨張抑制効果

スラグ粉末の混入量は、実際の使用量を考えて、一般に70%以下で実験が行なわれている。ここでは基本的な、性質を把握するため90%まで混入した。その結果を図15(安山岩)、図16(チャート)に示す。

また、図17にみるように、膨張量の大きい安山岩もやや少ないチャートもスラグ粉末70%の混入ではほぼ同じ膨張量まで低下している。更にいずれの骨材においてもスラグ粉末の混入量が多ければ多いほど膨張抑制効果は大きい。なお、モルタル中のアルカリ量はスラグ粉末から溶出するアルカリが加味されるから、

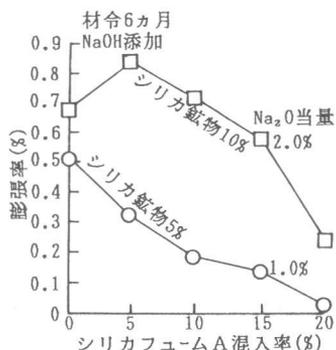


図13 シリカ鉱物モルタルのシリカフェームAによる膨張抑制効果

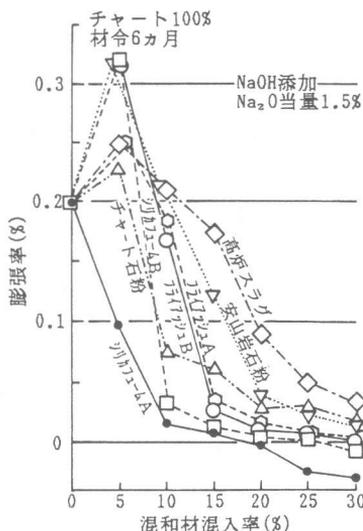


図14 チャートモルタルの各種混和材による膨張抑制効果

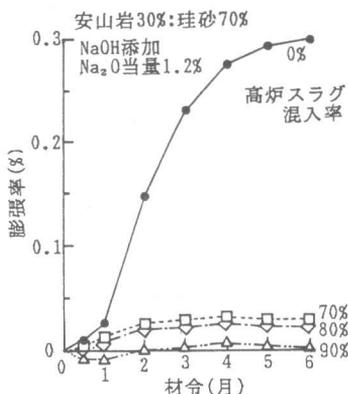


図15 安山岩モルタルの膨張の高炉スラグによる抑制

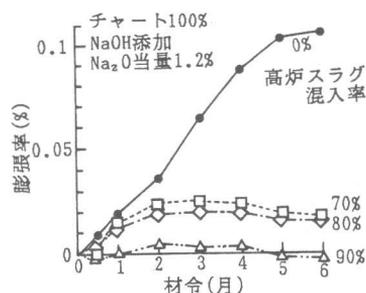


図16 チャートモルタルの膨張の高炉スラグによる抑制

スラグ粉末90%の場合が最も多いものであるが、膨張は最も少ない。既往の結果[4]と同じようにスラグ自体に抑制能力があるといえる。

### 3.5 AAR膨張抑制に対する考察

AARの反応は、基本的には骨材中の反応性鉱物の量とその鉱物のアルカリに対する反応性と、加えられたアルカリ量、そのアルカリがどの程度反応性鉱物に作用するかにかかっている。従って、①混和材が、アルカリを吸着したり、アルカリによって溶解されるなどアルカリを消費すれば、反応性鉱物に作用するアルカリは減少する[4]。アルカリ量が減少すると反応生成物の生成が少なくなる。②混和材によって、AARゲルのアルカリ/シリカ比が異なり、膨張性でないゲルができる。③AARとは別個のポズラン反応生成物が生成することによって、コンクリートの組織が緻密になり、アルカリイオンの拡散が抑制される[5]。④ポズラン反応生成物がAAR生成物の化学組成に影響を及ぼし膨張能力の少ないゲルに変える。などの理由が考えられる。最も影響の大きい要因は何かを今後検討したい。

### 4. まとめ

反応性鉱物の異なる骨材—安山岩、チャート、シリカ鉱物—に対する各種混和材の膨張抑制効果をモルタルバー法によって調べた結果は、次のようである。

1. 安山岩（ガラス系反応性鉱物）とチャート（石英系反応性鉱物）とで、AAR自体の膨張挙動が異なるため、この反応性の相違が、抑制効果に反映する。
2. 混和材の膨張抑制効果は、同一骨材であっても、ペシマム配合比がどうかで異なる。従って、抑制効果の評価は、ペシマム条件下で行なう必要がある。
3. 有効な混和材混入量の最少限度は骨材の種類とアルカリ量によって変化する。
4. 使用した殆どどの混和材において、5%程度の混入では、モルタルバー膨張がかえって増加した。ただし、これはアルカリ量1.5% ( $\text{Na}_2\text{O}$ 当量)で、チャート骨材使用時の試験結果である。

### 参考文献

- [1]Tang,M,S.,Ye,Yu.f.,Yuan,M.Q. and Shi,S.H.:The Preventive Effect of Mineral Admixtures on Alkali-Silica Reaction and Its Mechanism, Cement and Con. Res. Vol.13,p.p.171-176, 1983.
- [2]川村満紀、竹本邦夫、加場重正：シリカフェームのアルカリ・シリカ膨張に及ぼす影響、セメント・コンクリート、No.469、p.p.29-35、1986.
- [3]森野奎二、柴田国久：安山岩およびチャート質骨材のアルカリ反応性、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、p.p.165-168、1986.
- [4]Yamamoto,C., Moriyama,Y., Numata,S. and Makita,M :Effects of Ground Granulated Blast Furnace Admixture, and Granulated or Air-Cooled Blast Furnace Slag Aggregate on Alkali Aggregate Reaction and Their Mechanisms, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa, 1986.8
- [5]内川 浩：硬化セメントペースト中のアルカリイオンの拡散に及ぼす高炉水砕スラグおよびフライアッシュ混合の効果、セメント・コンクリート、No.460、p.p.20-27、1985.6

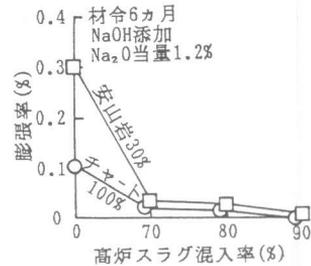


図17 安山岩およびチャートモルタルの高炉スラグによる膨張抑制効果