

論文

[1158] コンクリート用化学混和剤としてのアルカリ骨材反応抑制剤の開発

大濱嘉彦\*1・出村克宣\*2・堀江 一\*3

1. はじめに

近年、コンクリートの中性化、塩化物イオンの浸透による鉄筋の腐食及びアルカリ骨材反応によるひび割れなどに起因する、鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が顕在化し、大きな社会問題として取り上げられるようになり、早急に有効な対応策の確立が望まれている。その中でも、アルカリ骨材反応は、骨材使用量の増加に伴う優良骨材の枯渇から、使用実績のない砕石などの使用により、今後、更に増えるものと思われる。現在行われている抑制措置としては、低アルカリ形セメントの使用、ポゾランの混入、化学混和剤の添加が試みられているものの、低アルカリ条件下でもアルカリ骨材反応は起こり、又、ポゾランは、その混入率によってはアルカリ骨材反応を助長するなどの報告もある[1]。それに比べて、化学混和剤は、その添加率が少ないことから経済的であるなどの利点がある。著者らは、反応性骨材を含むモルタルへの化学混和剤としてのアルキルアルコキシシランの添加によって、その膨張量を反応性骨材未混入のそれと同程度まで低減することに成功しているが、空気量の増大が問題点として指摘される[2], [3]。

本研究では、上述のモルタルによる試験結果を踏まえた上で、他の混和剤との併用による空気連行の抑制を試み、アルカリ骨材反応抑制効果のあるアルキルアルコキシシランのコンクリート用化学混和剤としての利用の可能性を検討するため、JIS に従ってコンクリートによる試験を行い、その性能を評価する。

2. 使用材料

2.1 セメント

セメントとしては、普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの性質を表-1に示す。アルカリ量調整剤としては、JIS K 8576 (水酸化ナトリウム) に規定する試薬特級を用いた。

表-1 セメントの物理的・化学的性質

Specific Gravity	Blaine's Specific Surface Area (cm <sup>2</sup> /g)	Setting Time (h-min)		Compressive Strength of Mortar (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		Initial Set	Final Set	3 d	7 d	28 d
3.16	3320	2-33	3-33	166	261	424

Chemical Compositions (%)			Total Alkali Content (%)		
MgO	SO <sub>3</sub>	ig. loss	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O*
1.6	2.1	1.5	0.29	0.55	0.65

Note, \* : R<sub>2</sub>O = Na<sub>2</sub>O + 0.658K<sub>2</sub>O

\*1 日本大学教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

\*2 日本大学講師 工学部建築学科, 工博 (正会員)

\*3 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

## 2.2 骨材

非反応性骨材としては、阿武隈川産川砂利（粒径：5～20mm）及び川砂（粒径：2.5mm以下）を、反応性骨材としては、鹿児島県硫黄島産オパール（粒径：5～20mm）を使用した。JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）の附属書8〔骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）〕によるオパールの性質を表-2に示す。

## 2.3 化学混和剤

化学混和剤としては、ヘキシルトリメトキシシラン [C<sub>6</sub>H<sub>13</sub>Si(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>] 及び市販のポリアルキルアリルスルホン酸塩系高性能減水剤を使用した。

表-2 モルタルバー法によるオパールの性質

Expansion by Mortar-Bar Method (%)		Interpretation of Results
3 Months	6 Months	
0.517	0.542	Deleterious

## 3. 試験方法

### 3.1 基本調査の検討

JIS A 6204（コンクリート用化学混和剤）に規定されているように、単位セメント量を280kg/m<sup>3</sup>一定とし、スランプが8.0±1.0cmとなるように水セメント比を調整したコンクリートにアルキルアルコキシシランを1.0%添加し、JIS A 1128〔まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）〕に従って、空気量試験を行い、空気量が3.0%以下となるような減水剤添加率を決定した。

### 3.2 アルキルアルコキシシランのコンクリート用化学混和剤としての性能評価

基本調査の検討において決定した高性能減水剤添加率で、単位セメント量を280及び300kg/m<sup>3</sup>、スランプを8.0及び18.0cmとし、空気量を2.0%以下としたアルキルアルコキシシラン未添加コンクリート（基準コンクリート）及び空気量を3.0%以下としたアルキルアルコキシシラン添加コンクリート（試験コンクリート）を表-3に示す調査で調製し、それぞれのコンクリートについて、JIS A 6204に従って、減水率、ブリージング量、凝結時間の測定、圧縮強度、長さ変化及び凍結融解に対する抵抗性の試験を行い、アルキルアルコキシシランのコンクリート用化学混和剤としての性能評価を行った。なお、アルキルアルコキシシランは空気連行作用を有することから、本研究においては、JIS A 6204のAE剤の規定により、アルキルアルコキシシランのコンクリート用化学混和剤としての評価を行っている。

### 3.3 アルキルアルコキシシランのアルカリ骨材反応抑制効果の確認

基準及び試験コンクリートについて、全アルカリ量を8kg/m<sup>3</sup>（Na<sub>2</sub>O当量）に調整すると共に、試験コンクリートについては、粗骨材の10%を反応性骨材で置換し、アルキルアルコキシシラン添加率を0及び1.0%としてコンクリートを練混ぜ、JIS A 1129（モルタル及びコンクリートの長

表-3 基準及び試験コンクリートの調査

Type of Concrete	Water-Cement Ratio (%)	Sand-Aggregate Ratio (%)	AAS Content (wt% of Cement)	WRA Content (wt% of Cement)	Mix Proportions (kg/m <sup>3</sup> )				Slump (cm)	Air Content (%)
					Cement	Water	Sand	Gravel		
S-8	65.8	40.0	0	0	280	184	732	1085	8.0	2.0
T-8	59.0		1.0	1.0		165	727	1091	8.5	2.8
S-18	71.0		0	0	300	213	695	1032	18.0	2.0
T-18	63.9		1.0	1.0		192	714	1071	18.5	2.9

Notes. S-8 : Standard concrete with a slump of 8.0cm.  
 T-8 : Test concrete with a slump of 8.0cm.  
 S-18 : Standard concrete with a slump of 18.0cm.  
 T-18 : Test concrete with a slump of 18.0cm.

さ変化試験方法) に準じて、寸法10x10x40cmに成形した。成形した供試体については、オートクレーブ処理(128℃, 2.0kgf/cm<sup>2</sup>)を行って、供試体の長さ変化を測定し[3], アルキルアルコキシシランと高性能減水剤を併用しても、アルキルアルコキシシランの持つアルカリ骨材反応抑制効果が失われないか否かについて検討した。

### 3. 試験結果及び考察

図-1には、スランブを8.0cmとし、アルキルアルコキシシランを1.0%添加したコンクリートの空気量と高性能減水剤添加率の関係を示す。高性能減水剤未添加で、アルキルアルコキシシラン1.0%添加コンクリートの空気量は10.0%以上であり、本試験においては、その空気量を測定できなかった。これは、アルキルアルコキシシランの界面活性作用により、連行空気量が著しく増大するためと推察される。しかし、高性能減水剤を添加すると、その添加率の増加に伴って、アルキルアルコキシシラン添加コンクリートの空気量は減少する。これは、高性能減水剤を使用することにより、気泡発生の一要因であるコンクリートの単位水量が減少し、気泡の絶対量が減少するためと思われる。以上のことから、アルキルアルコキシシランのコンクリート用化学混和剤としての性能評価を行うに当たっては、アルキルアルコキシシラン及び高性能減水剤をそれぞれ1.0%添加することを基本として、各種試験に供した。

図-2には、基準及び試験コンクリートのブリージング量と経過時間の関係を示す。スランブ8.0及び18.0cmの試験コンクリートのブリージング量は、それぞれ、基準コンクリートのその約1/5及び約1/2の量である。これは、高性能減水剤の添加により、単位水量がスランブ8.0cmの場合で11.5%, スランブ18.0cmの場合で10.9%とそれぞれ減少したためと考えられる。

図-3には、基準及び試験コンクリートの貫入抵抗と経過時間の関係を示す。いずれのスランブのコンクリートにおいても、経過時間に伴って、貫入抵抗は大きくなる。特に、経過時間

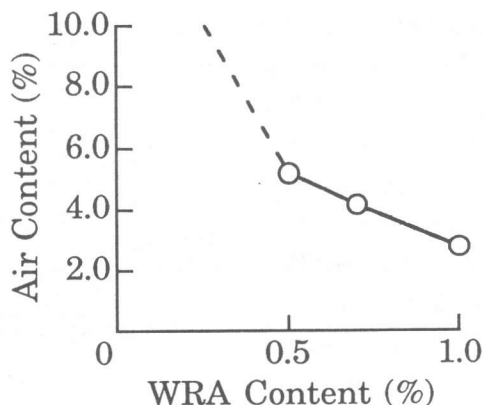


図-1 アルキルアルコキシシランを1.0%添加したコンクリートの空気量と高性能減水剤添加率の関係

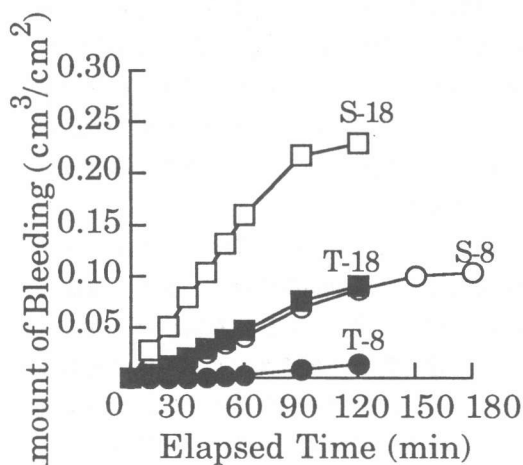


図-2 基準及び試験コンクリートのブリージング量と経過時間の関係

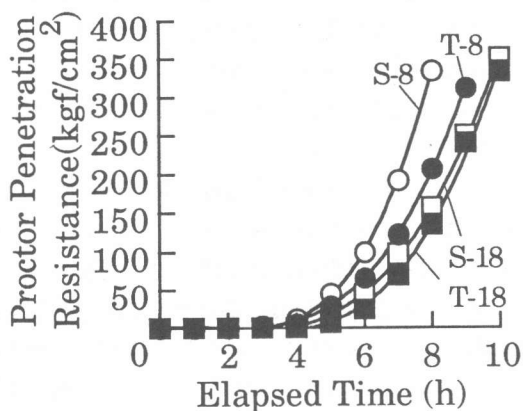


図-3 基準及び試験コンクリートのプロクター貫入抵抗と経過時間の関係

5時間以降、その傾向は著しくなる。又、試験コンクリートの貫入抵抗は、基準コンクリートのそれに比べて小さい傾向にある。特に、スランプ 8.0cmの場合、経過時間に伴って、この傾向は著しくなる。

これらのことから、アルキルアルコキシシラン及び高性能減水剤の添加によって、セメントの水和が遅延していることがうかがえる。

表-4には、スランプを8.0及び18.0cmとした試験コンクリートの減水率、ブリージング量の比及び凝結時間の差とJISの規定値を示す。いずれのスランプにおいても、試験コンクリートの減水率、ブリージング量の比及び凝結時間の差はすべてJISの規定を満足するものである。

図-4には、基準及び試験コンクリートの圧縮強度と材令の関係を示す。スランプにかかわらず、材令3日における試験コンクリートの圧縮強度は、基準コンクリートのそれよりも大きい。材令28日における試験コンクリートの圧縮強度は、基準コンクリートのそれよりも小さい。これは、初期材令においては、高性能減水剤の添加による減水効果によって、試験コンクリートの強度が大きくなるものの、材令が進むに従って、コンクリートに付与されるアルキルアルコキシシランのはっ水性に起因して、セメントの水和が若干遅れるためと考えられる。

図-5には、基準及び試験コンクリートの圧縮強度比と材令の関係を示す。スランプにかかわらず、材令の経過に伴って、試験コンクリートの圧縮強度比は減少する傾向にある。又、スランプ18.0cmの試験コンクリートの圧縮強度比は、スランプ8.0cmの試験コンクリートのそれよりも大きい。これは、高性能減水剤の添加による単位水量の減少量が、スランプ8.0cmのものよりもスランプ18.0cmの方が大きいためと考えられる。なお、いずれのスランプの試験コンクリートも、JISの規定(圧縮強度比90%以上)を満足している。

表-4 試験コンクリートのフレッシュ時における性能評価

Quality Item	JIS Requirement*	Test Results	
		Slump, 8.0cm	Slump, 18.0cm
Water-Reducing Rate (%)	≥ 6	10.3	9.9
Relative Bleeding Rate (%)	≤ 75	20.0	39.1
Difference of Setting Time (min)	Initial Set	-60 to +60	+35
	Final Set	-60 to +60	+55

Note, \*: Requirements for air-entraining agent.

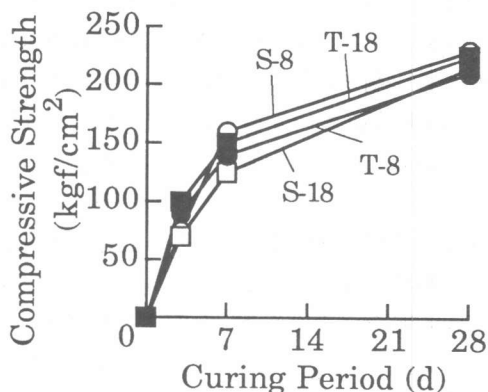


図-4 基準及び試験コンクリートの圧縮強度と材令の関係

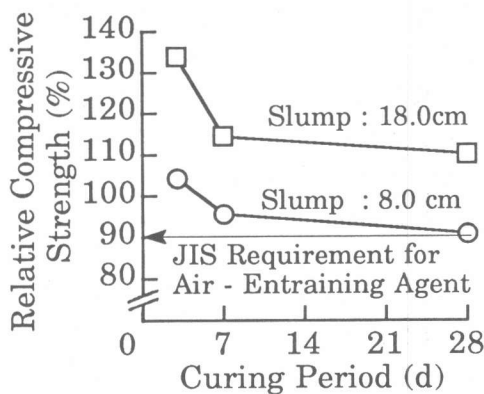


図-5 基準及び試験コンクリートの圧縮強度比と材令の関係

図-6には、基準及び試験コンクリートの長さ変化と材令の関係を示す。いずれのコンクリートも、材令に伴って収縮している。

図-7には、基準及び試験コンクリートの長さ変化比と材令の関係を示す。スランプ8.0cmの試験コンクリートの長さ変化比は、材令初期において大きく変化している。しかしながら、材令28日以降の長さ変化比は、いずれのスランプにおいても約90%であり、JISの規定値を満足している。

図-8には、スランプ8.0cmの基準及び試験コンクリートの相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係を示す。基準コンクリートの相対動弾性係数は、凍結融解サイクル数の増加に伴って著しく減少する。しかしながら、試験コンクリートの凍結融解サイクル数の増加に伴う相対動弾性係数の減少は小さく、凍結融解210サイクルにおけるそれは82%であり、JISの規定（200サイクルにおいて80%以上）を満足するものである。試験コンクリートは、アルキルアルコキシシランの添加によってコンクリート組織には水性が付与されるため、外部からの水分の浸透が抑制されると共に、アルキルアルコキシシランの界面活性作用による微細な空気泡が増加することによって、凍結融解に対する抵抗性が向上するものと考えられる。

図-9には、スランプ8.0及び18.0cmの反応性骨材未混入コンクリート及びアルキルアルコキシシラン添加率を0及び1.0%とし、高性能減水剤添加率を1.0%として併用した反応性骨材混入コンクリートのオートクレーブ処理後の膨張量を示す。アルキルアルコキシシラン未添加の反応性骨材混入コンクリートのオートクレーブ処理後の膨張量は、反応性骨材未混入コンクリートのその約8倍から10倍となる。これに比べて、アルキルアルコキシシランを1.0%添加した反応性骨材混入コンクリートのオートクレーブ処理後の膨張量は、反応性骨材未混入コンクリートのその

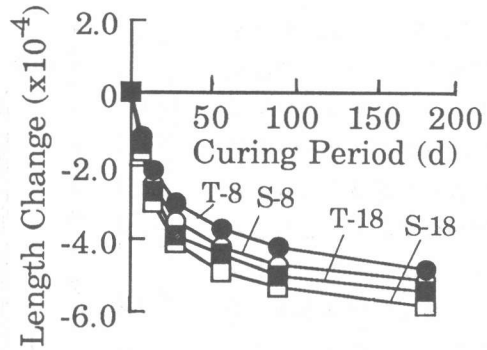


図-6 基準及び試験コンクリートの長さ変化と材令の関係

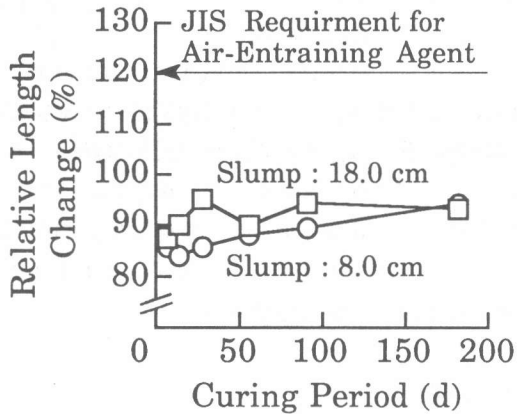


図-7 基準及び試験コンクリートの長さ変化比と材令の関係

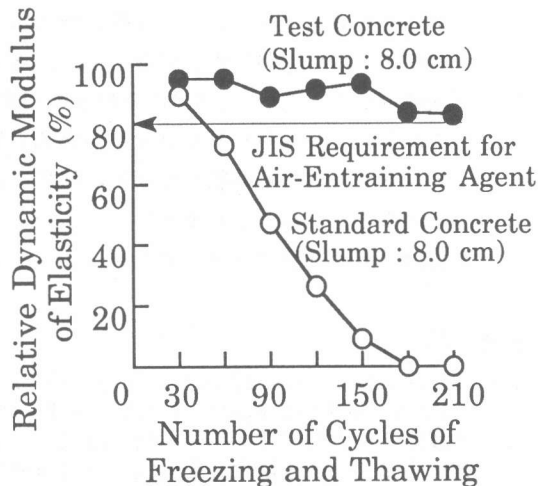


図-8 スランプを8.0cmとした基準及び試験コンクリートの相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係

約2倍程度であり、アルキルアルコキシシランの添加によって、アルカリ骨材反応に伴うコンクリートの膨張が著しく低減されることが明らかである。このことから、アルキルアルコキシシランを高性能減水剤と併用しても、アルキルアルコキシシランの持つアルカリ骨材反応抑制効果は失われていないといえる。

これまでの研究成果から、

アルキルアルコキシシランの添加によるこのようなアルカリ骨材反応抑制機構は、コンクリートへのはっ水性付与、アルカリ骨材反応による反応生成物へのはっ水性の付与及び連行空気泡による生成物の吸水に伴う膨張圧力の緩和に起因するものと推察されている[2], [3]。前述したように、アルキルアルコキシシランの添加によって、コンクリート中に大量の空気が連行されるため、これを低減し、且つ、アルカリ骨材反応抑制作用を阻害することのない他の混和剤との併用によって、アルキルアルコキシシランは、アルカリ骨材反応抑制効果を有するコンクリート用化学混和剤としての利用が可能である。

#### 4. 結論

以上の結果を結論づければ、次の通りである。

- (1) アルキルアルコキシシラン添加コンクリートの空気量は、未添加コンクリートのそれに比べて著しく増大するが、高性能減水剤の1.0%添加によって低減される。
- (2) アルキルアルコキシシランは高性能減水剤を併用することによって、減水率、ブリージング量の比、凝結時間の差、圧縮強さ比、長さ変化比及び凍結融解に対する抵抗性のいずれの試験項目においても、JISによるAE剤の規定を満足する。
- (3) アルキルアルコキシシランを高性能減水剤と併用しても、アルキルアルコキシシランの持つアルカリ骨材反応抑制効果は失われない。
- (4) 以上のことから、アルキルアルコキシシランは、高性能減水剤との併用によって、アルカリ骨材反応抑制効果を有するコンクリート用化学混和剤として利用できるものとする。

#### 参考文献

- 1) E.R. Dunstan, :The Effect of Fly Ash on Concrete Alkali-Aggregate Reaction, Cement, Concrete and Aggregate, Vol. 3, No. 2, pp.101-104, 1981
- 2) 大濱嘉彦・出村克宣・和田一朗・堀江 一：化学混和剤添加によるアルカリ骨材反応の抑制, 第46回セメント技術大会講演集, pp.574-579, 1992. 4
- 3) Ohama, Y., Demura, K., Wada, I. :Inhibiting Alkali-Aggregate Reaction with Alkyl Alkoxy Silanes, Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, The Concrete Society, London, pp.750-757, July 1992

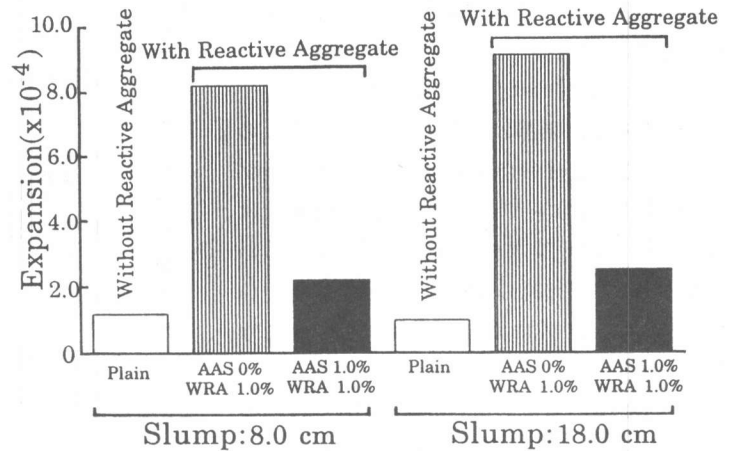


図-9 反応性骨材未混入及び混入コンクリートのオートクレーブ処理後の膨張量