

# An experimental study on evaluation of suppression effect against ASR in steam-cured fly ash concrete

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/26278">http://hdl.handle.net/2297/26278</a>

# 蒸気養生したフライアッシュコンクリートにおける ASR 抑制効果の評価方法に関する実験的検討<sup>†</sup>

宮野 暢 絃\* 久保 善 司\*\* 鳥居 和 之\*\*

## An Experimental Study on Evaluation of Suppression Effect Against ASR in Steam-Cured Fly Ash Concrete

by

Nobuhiro MIYANO\*, Yoshimori KUBO\*\* and Kazuyuki TORII\*\*

It has been pointed out that the use of fly ash in concrete is effective in controlling the expansion due to ASR (alkali silica reaction). In Japan, the total amounts of alkalis in concrete has been kept up to 3.0kg/m<sup>3</sup> as one of the major countermeasures for ASR suppression. Recently, it is reported that ASR may be accelerated by the steam curing of PCa concrete even in the case of low alkalis content of less than 3.0kg/m<sup>3</sup>. On the other hand, the effectiveness of fly ash on the suppression of ASR in concrete is often evaluated by means of the mortar bar method according to JIS A1146, however there are some problems that it takes the long time of 3 or 6 months in assessment, and that it can't take the pessimum content of reactive aggregate in mix proportions of mortar into considerations. In this study, the effectiveness of fly ash in steam-cured concrete was experimentally investigated. For this purpose, the steam-cured fly ash concrete with the replacement percentages by fly ashes was exposed to the accelerated test conditions which were selected as the factor, the temperature, the water supply, the immersion in saturated NaCl solution and so on. As the result of tests, it has been found that the accelerated condition exposed to the saturated NaCl solution at 50°C is most suitable as the rapid test method for the steam-cured fly ash concrete.

**Key words:** Fly ash, Pozzolan reaction, Steam curing, ASR, Chemical method, Mortar bar method, Concrete bar method

### 1 緒 言

我が国においては、アルカリシリカ反応（以下、ASRと略記）による劣化が発生したコンクリート構造物の事例が数多く報告され、その範囲は幅広い地域に分布している。1989年のJIS改定によりASR抑制対策が講じられ、その後の新設構造物において一定の成果が得られたものの、ごく一部の構造物において早期にASR劣化を生じたものも報告されている。また、蒸気養生やオートクレーブ養生などを実施したコンクリート二次製品においては、高温養生がASRを促進した事例が報告されている。<sup>1)</sup>

ASR抑制対策の一つとして、フライアッシュの混和による方法が挙げられる。フライアッシュのASR抑制効果については、従来、モルタルバー法を用いた検討が中心であったため、コンクリート配合における反応性骨材が有するペシマム現象に対して十分に対応できない場合があること、さらには、骨材に含まれる反応鉱物の種類やその構成割合によって反応速度および反応量が異なるため、これまで実施されたモルタルバー法での結果から抑制効果が得られる配合を決定することが困難な場合もある。また、我が国においては鉱物質混和材によるASR抑制効果に関する評価方法が確立されていないことも、実

用上の問題点として挙げられる。さらに骨材の反応性を評価するモルタルバー法(JIS A 1146)やコンクリート法(JCI AAR3)を適用した場合には、その判定には、材齢3ヶ月、6ヶ月と長期になるため、現場での迅速な対応が難しいことが懸念される。一方、フライアッシュの品質によってASR抑制効果が異なり、品質（化学成分や物理的性質）を考慮し、抑制可能な置換率を決定するべきであるとの指摘もある。<sup>2)</sup>

一方、養生条件がASRに与える影響については、骨材のアルカリシリカ反応性試験を念頭においた検討はされているものの、高温養生の実構造物におけるASR発生の有無やASR促進の観点からの検討が少ないのが実状である。また、高温養生されたフライアッシュ含有コンクリートの性状に関する検討が少ない。そのため、フライアッシュによるASR抑制を念頭においた蒸気養生が与える影響は明らかにされていないのが現状である。

そこで本研究では、各種反応性骨材のアルカリシリカ反応性の評価を行うとともに、反応性骨材を用いたフライアッシュ含有コンクリートにおいて、蒸気養生が与える影響、また、その影響を受けたコンクリートのASR抑制効果の評価方法に関する検討を行った。

<sup>†</sup> 原稿受理 平成22年2月10日 Received Feb. 10, 2010 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

\* 正会員 住友大阪セメント(株) 〒920-0849 金沢市堀川新町, Sumitomo Osaka Cement Co., LTD., Horikawashin-machi, Kanazawa, 920-0849

\*\* 正会員 金沢大学理工研究域 〒920-1192 金沢市角間町, College of Sci. and Eng., Kanazawa Univ., Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192

Table 1 Physical properties of reactive aggregates used in study.

	Andesite I (R)	Andesite II (R)	Andesite III (R)	Chert (R)	River gravel (R)	Non-reactive coarse (N)	River sand (n)
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.66	2.58	2.56	2.69	2.66	2.6	2.56
Absorption (%)	2.65	2.76	2.66	0.9	1.67	2.18	2.88
F.M.	6.81	6.72	7.01	7.18	7.12	6.77	3.08

\* R: Reactive coarse aggregate, N: Non-reactive coarse aggregate, n: non-reactive fine aggregate

## 2 骨材のアルカリシリカ骨材反応性の評価

### 2・1 実験概要

**2・1・1 使用材料および配合** 反応性粗骨材は、既往の研究を参考にして反応性の異なるとされている3箇所の産地から採取した安山岩碎石（以下、安山岩Ⅰ、安山岩Ⅱおよび安山岩Ⅲと略記）、チャート碎石および川砂利を使用した<sup>3)</sup>また、比較として非反応性の川砂利を用いた。セメントには、普通ポルトランドセメント（密度：3.14g/cm<sup>3</sup>）を、細骨材には、非反応の川砂利を使用した。使用骨材の物性を Table 1 に示す。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能減水剤および AE 剤を用いた。コンクリートの示方配合を Table 2 に示す。コンクリートの水セメント比は、コンクリート二次製品を想定し 45% に設定した。また、骨材自身の反応性を評価するため、単位粗骨材量の絶対容積は一定 (= 0.382m<sup>3</sup>) とした。粗骨材に占める反応性骨材の割合は、コンクリート中における骨材のベシマム現象を考慮し、安山岩Ⅰについては 100%、安山岩Ⅱについては 60%、安山岩Ⅲについては 50%、チャートについては 80%、川砂利については 100% とした。コンクリートのアルカリ総量は、Na<sub>2</sub>O 等価量で 8kg/m<sup>3</sup> となるように塩化ナトリウム (NaCl) を用いて調整した。

**2・1・2 実験方法** 粗骨材の鉱物組成を把握するため粉末 X 線回折分析 (XRD) を実施するとともに、化学法 (JIS A 1145) およびモルタルバー法 (JIS A 1146) による骨材のアルカリシリカ反応性試験を行った。また、コンクリートにおける骨材の反応性を評価するために、φ10 × 20cm の供試体を各 2 本作製し、促進環境下 (40°C, 100% R.H.) において膨張量を測定した。なお、膨張量測定においては、供試体に取り付けたステンレスバンドの標点

Table 2 Mix proportions of concrete.

W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )					Admixture (kg/m <sup>3</sup> )	
		W	C	S	S	G	Ad1	Ad2
45	44	160	356	757	757	1016	0.856	0.712

\* Ad1: Superplasticizer, Ad2: Air entraining agent

(ステンレス球埋込み) 間距離をコンタクトゲージ (基長 100mm) を用いて測定した。

### 2・2 実験結果および考察

**2・2・1 骨材の鉱物組成** 各種反応性骨材の鉱物組成、化学法、モルタルバー法およびコンクリートの膨張量の試験結果およびそれらの判定結果を Table 3 に示す。安山岩Ⅰ、安山岩Ⅱおよび安山岩Ⅲでは、長石および石英の構成鉱物の他に、反応性鉱物であるクリストバライトが確認された。チャートでは、石英の他にはピークはほとんど認められなかった。川砂利では、安山岩において同定されたものと同様な構成鉱物以外に、雲母および角閃岩が認められた。

**2・2・2 化学法およびモルタルバー法の判定結果** 化学法による各種骨材の判定結果は、反応性骨材として用いた骨材は、すべて「無害でない」と判定された。また、モルタルバー法による判定結果においても反応性骨材として用いた骨材は、チャート以外全て「無害でない」と判定された。チャート質骨材は、アルカリ量が 1.2% および 1.5% においても JIS A 1146 のモルタル配合にて膨張しない場合もあり、ベシマムを十分考慮する必要があると報告されている<sup>4)</sup>

**2・2・3 コンクリートの膨張挙動** 促進環境下の各種反応性骨材を用いたコンクリートの膨張量 (材齢約 8 カ月) を Fig. 1 に示す。安山岩Ⅰおよび安山岩Ⅱは、早期に大きな膨張が発生しており、他の骨材と比較して、高い反応性を有するものと考えられる。また、川砂利およびチャートは膨張開始時期が若干遅れるが、反応性を有するものと判断された。

**2・2・4 骨材の反応性評価** 各種検討結果から、いずれの骨材もアルカリシリカ反応性を有することが確認された。安山岩Ⅰおよび安山岩Ⅱは、他の骨材と比較して早期に膨張しており、高いアルカリ反応性を有するものと考えられる。一方、安山岩Ⅲは、主な鉱物組成は安山岩Ⅰおよび安山岩Ⅱと同じであるが、コンクリートの膨張挙動は緩やかとなり、同じ安山岩系でも反応性が異

Table 3 Assessment of alkali-silica reactivity of aggregates by various ASR test methods.

Coarse aggregate	Chemical method			mortar bar method		Composite of mineral	Concrete expansion (242days) (%)	Alkali silica reactivity
	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Judge	(%)	Judge			
Andesite I	196	111	×	0.456	×	Feldspar, Quartz, Cristobalite	0.364	◎
Andesite II	649	105	×	0.163	×	Feldspar, Quartz, Cristobalite	0.341	◎
Andesite III	229	131	×	0.445	×	Feldspar, Quartz, Cristobalite	0.137	△
Chert	403	63	×	0.058	○	Quartz	0.103	△
River gravel	184	83	×	0.461	×	Feldspar, Quartz, Cristobalite, Mica	0.283	○
Non-reactive	67	118	○	—	—	Feldspar, Quartz, montmorillonite	0.002	-

\*1 ○: Innocuous ×: Deleterious \*2 ◎: High reactivity ○: Moderate reactivity △: Low reactivity

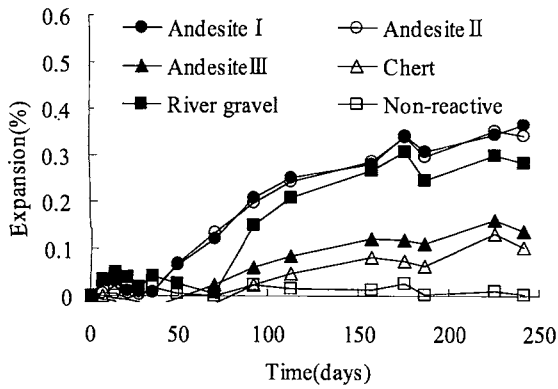


Fig. 1 Expansion behavior of concretes.

なることが明らかとなった。川砂利については、X線回折分析や化学法、モルタルバー法の結果から反応性を有するものと予想された。一方、チャートについては、鉱物組成や化学法、コンクリートの膨張量の結果から反応性は認められたが、モルタルバー法において「無害」と判定され、判定方法による相違が認められた。骨材の有害性を判定する際は、各判定結果を総合的に判断する必要があり、特にモルタルバー法やコンクリートの膨張量についてはペシマムによる影響を十分に考慮する必要があった。

以上の検討結果から、短期間で大きな膨張が期待できる安山岩 I を試験に使用する反応性骨材として選定した。

### 3 蒸気養生がフライアッシュ含有コンクリートの初期性状に与える影響

蒸気養生がフライアッシュ含有コンクリートの初期性状（圧縮強度、ポゾラン反応性）に与える影響の検討を行った。

#### 3.1 実験概要

**3.1.1 使用材料および配合** セメント、細骨材は 2.1.1 項と同じとした。また、粗骨材は非反応性の骨材を使用した。フライアッシュは、JIS 規格 II 種（以下、FA2 と略記）と、活性度指数が JIS 規格 II 種の下限值内となるものの、通常出荷時は JIS 規格 IV 種に相当する原粉のもの（以下、FA4 と略記）の 2 種類を用いた。フライアッシュの物理的性質を Table 5 に示す（JIS 規格 I 種（以下、FA1）含む）。ASR 抑制効果が期待できるフライアッシュの置換率は、JIS A 5308（付属書 2）では 15% 以上とされている。また、既往の研究結果より、国内で出荷されるフライアッシュは、低品位のものであっても 30% の置換率であれば抑制効果が確認されている。<sup>5)</sup> そこで厳しい条件においても品質に応じた十分な抑制効果が見込まれる置換率を設定し、FA2 で 20%、FA4 で 30% とした。

コンクリートの示方配合を Table 4 に示す。

**3.1.2 実験方法** 蒸気養生および初期養生期間中におけるフライアッシュのポゾラン反応の進行を把握するため、フライアッシュ含有コンクリートを用いて φ10 × 20cm の供試体を作製し、蒸気養生または標準養生を行った。蒸気養生は、1 時間前置きを行った後、最高温度

Table 4 Physical properties of fly ashes used.

	FA1	FA2	FA4
SiO <sub>2</sub> content(%)	60.4	60.99	49.6
Moisture content(%)	0.15	0.04	0.1
Ig.Loss(%)	2.5	2.2	2.1
Density(g/cm <sup>3</sup> )	2.4	2.31	2.23
Specific surface(cm <sup>2</sup> /g)	5300	3710	3320
Flow value ratio(%)	109	104	106
Pozzolanic-activity(%)	28days	90	93
	91days	103	101

Table 5 Mix proportions of concrete with and without fly ash.

	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit content(kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	FA	S	G	Ad1	Ad2
Control	45	45	44	356	-	765	993	0.86	0.71	
FA2 (20%)		56	43	160	285	71				744
FA4 (30%)		64	43	160	249	107				727

\*Ad1: Superplasticizer, Ad2: Air entraining agent

50℃、養生時間 4 時間の蒸気養生を行った。その後 20℃ の室内にて湿布養生を材齢 14 日まで行った後、圧縮強度試験に供した。なお、蒸気養生の温度条件は、高温では DEF 生成が懸念されるため最高温度を 50℃ と設定した。一方、標準養生は、打設 1 日後に脱型し、水中養生を材齢 28 日、91 日まで実施し、圧縮強度試験を行った。さらに、ポゾラン反応を水酸化カルシウムの消費量の観点から検討するため、強度試験後、供試体中心部より採取した試料を用い、示差走査熱量分析 (DSC) を実施し、水酸化カルシウムの生成量を把握した。なお、試料は同一配合の供試体 2 本からそれぞれ採取し、生成量はその平均とした。また、水酸化カルシウムの生成量は吸熱ピークの面積を用いて評価した。

#### 3.2 実験結果および考察

**3.2.1 蒸気養生が圧縮強度に与える影響** 標準養生（材齢 28 日、91 日）および蒸気養生（材齢 14 日）を実施したコンクリートの圧縮強度を Fig. 2 に示す。標準養生を実施したものでは、材齢 28 日においてフライアッシュを混和したものの圧縮強度は無混和のものより小さい圧縮強度となった。また、置換率の大きい FA4 を混和したものは、FA2 を混和したものより小さい圧縮強度を示した。FA4 を混和したものでは、フライアッシュ

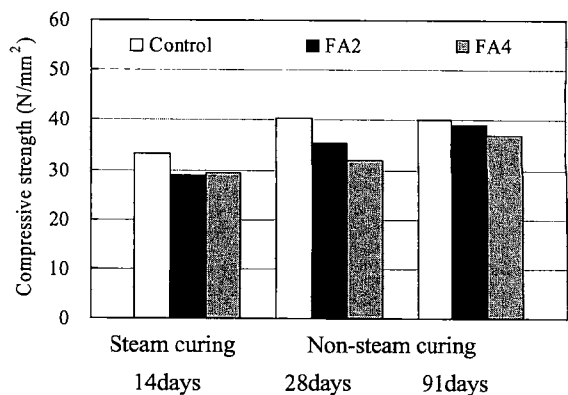


Fig. 2 Compressive strength of concrete.

の置換率が大きいため、セメントの水和物の生成量が小さくなり、他のものより圧縮強度が小さくなったものと考えられる。また、材齢91日においては、フライアッシュを混和したものは概ね無混和のものと同程度の強度を示し、置換率の大きいFA4のもの強度は若干小さくなった。通常、フライアッシュのポズラン反応は28日材齢以降に活発になり、長期強度の発現に貢献することが知られている。

一方、蒸気養生を実施したものにおいては、フライアッシュを混和したものは、混和していないものより圧縮強度は小さくなったものの、その差は標準養生を実施したものより小さくなった。フライアッシュのポズラン反応率は、養生温度に影響され、蒸気養生のものでは蒸気養生中の高温下においてポズラン反応が促進され、圧縮強度へ寄与したことにより、圧縮強度の差が小さくなったものと考えられる。また、標準養生を施したものと蒸気養生を施したものととの圧縮強度を比較すると、標準養生を施したものの方が、大きい傾向を示した。これは、蒸気養生の養生期間が14日間であったのに対し、標準養生は28日間、91日間と長かったことによりセメントの水和よりが進んだものと考えられる。

強度試験の結果から、本研究の条件においては、蒸気養生を実施することにより、フライアッシュのポズラン反応が促進されることが確認された。

**3・2・2 ポズラン反応に与える影響** DSCにより求めた水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>) の生成量を Fig. 3 に示す。標準養生のものでは、材齢にかかわらず、フライアッシュを混和したものの Ca(OH)<sub>2</sub> 生成量は少なく、材齢91日においてはその傾向が顕著となった。前述したように、28日以後においてフライアッシュのポズラン反応が活発に進行したものと考えられる。

蒸気養生においては、フライアッシュを混和したものでは無混和のものよりも Ca(OH)<sub>2</sub> の生成量は少なくなった。また、無混和との生成量の差は材齢14日の比較的短期間であるのに対して、水中養生における材齢91日と同程度となった。セメント置換によるセメント量の減少に加えて、蒸気養生に伴うフライアッシュのポズラン反応の促進によって、このような生成量の差が生じたものと考えられる。今回採用した蒸気養生の条件でもフラ

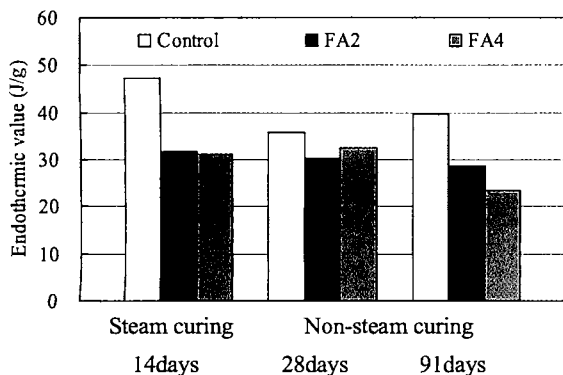


Fig. 3 Amounts of Ca(OH)<sub>2</sub> measured by DSC.

イアッシュのポズラン反応を効果的に促進することが可能であり、この結果はASR抑制に対して有利に働くものと考えられる。

**4 フライアッシュ含有コンクリートの ASR 抑制効果の評価方法の検討**

モルタルバーと種々の促進環境下におけるコンクリートバーのASRによる膨張挙動を把握し、蒸気養生を実施したフライアッシュ含有コンクリートのASR抑制効果の評価方法に関する検討を行った。また、フライアッシュの品質が与える影響についても検討を行った。

**4・1 実験概要**

**4・1・1 使用材料および配合** モルタルに使用するセメントには普通ポルトランドセメント (密度: 3.14g/cm<sup>3</sup>) を、細骨材には2・2・4項で反応性が高いとされた安山岩Iを粉砕したものを使用した。フライアッシュは、FA1, FA2 およびFA4の3種類を用いた。フライアッシュの置換率は、3・2・1項と同様にFA2で20%、FA4で30%とし、FA1については、高活性度によるASR抑制効果に期待して10%とした。モルタルの配合をTable 6に示す。

一方、コンクリートに使用するセメント、細骨材は2・1・1項で使用したものと同じとした。粗骨材は、2・2・4項で反応性が高いとされた安山岩Iを使用した。フライアッシュは、FA1, FA2 およびFA4の3種類を用い、置換率は、フライアッシュの品質による影響を把握するために15% (FA2のみ15%, 20%)とした。コンクリートの示方配合をTable 7に示す。コンクリートのアルカリ総量は、反応性骨材を迅速に膨張させるためNaCl (またはNaOH) を用いてNa<sub>2</sub>O等価量で8kg/m<sup>3</sup>に調整した。

**4・1・2 実験方法** モルタルを用いた評価方法は、モルタルバー法 (JIS A 1146) に準じて40℃, 100%R.H.の促進環境下にて6カ月間、膨張量の測定を行った。一方、コンクリートについては、蒸気養生の有無および促進条件 (40℃, 100% R.H.または飽和 NaCl 浸漬 (40℃, 50℃)) を要因とし、各種条件の膨張挙動を測定し、その膨張開始時期および膨張速度についてフライアッシュ

Table 6 Mix proportion of mortar with reactive aggregate.

	W/B (%)	W/C (%)	Content (g)				
			W	C	FA	S	NaOH
Control	50	50	300	600	0	1350	5.19
FA1 (10%)		56		540	60		
FA2 (20%)		63		480	120		
FA4 (30%)		71		420	180		

Table 7 Mix proportions of concrete.

	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit content(kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	FA	S	G	Ad1	Ad2
Control	45	45	44	160	356	-	750	1016	0.86	0.71
FA1 (15%)		53	44		302	53	747			
FA2 (15%)		53	44		302	53	744			
FA2 (20%)		56	43		284	71	738			
FA4 (15%)		53	44		302	53	741			

\*Ad1: Superplasticizer, Ad2: Air entraining agent

Table 8 Experiment factors for concrete specimen.

Accelerate condition	Alkali content	Curing condition	Fly ash	Replacing ratio (%)
40°C 100%R.H.	NaCl	Non-steam	Control	0
			Control	0
		steam	FA1	10
			FA2	20
40°CNaCl	NaCl	Non-steam	Control	0
			Control	0
		steam	FA1	15
			FA2	20
50°CNaCl	NaOH	Non-steam	Control	0
			Control	0
		steam	FA1	15
			FA2	20
			FA4	15

の ASR 抑制効果を検討した。供試体作製方法は 3・1・2 項と同様とした。実験要因表を Table 8 に示す。

4・2 実験結果および考察

4・2・1 蒸気養生および促進条件の影響 各種促進環境下におけるコンクリートの膨張量の経時変化を Fig. 4 に示す。なお、蒸気養生の有無にかかわらず、供試体は材齢 2 日（脱型後）から各促進環境下の暴露を開始した。

蒸気養生の有無が与える影響については、湿気環境下（40°C, 100% R.H.）のものを比較した。膨張開始時期については概ね同時期であったものの、蒸気養生されたものは、蒸気養生されなかったものより、その後の膨張速度は大きく、また、膨張収束時の膨張も 2 割程度大きくなった。この結果は蒸気養生によって ASR が促進されたことを示している。

一方、環境条件が与える影響については、蒸気養生履歴の無い 40°C の温度条件のものを比較した。膨張開始時期については概ね同時期であったものの、飽和 NaCl 浸漬環境のものは、湿気環境（40°C, 100% R.H.）のものより、その膨張速度は大きく、6 ヶ月後における膨張量も 2 倍程度となった。さらに、湿気環境のものが 6 ヶ月時点で膨張がほぼ収束しているのに対して、NaCl 浸漬環境のものでは膨張は継続していた。外来塩が ASR に与える影響のメカニズムについては解明されていないものの、デンマーク法などの促進養生試験の結果や凍結防止剤を受けた実構造物での被害状況から ASR を促進することが指摘されている。本検討における結果も同様に、外来塩によって ASR 膨張が促進されたものと考えられる。

一方、上記の条件のいずれも満足する条件のものとして、蒸気養生された 50°C の飽和 NaCl 浸漬条件の膨張挙動については、膨張開始時期もきわめて早く、その膨張速度および膨張量も大きかった。

したがって、蒸気養生されたフライアッシュ含有コンクリートの ASR 抑制効果を迅速に評価するため条件として、蒸気養生と 50°C の飽和 NaCl 浸漬条件の組合せは有効であるものと考えられる。

4・2・2 湿気環境下での ASR 抑制評価 湿気環境下（40°C, 100% R.H.）におけるフライアッシュを混和したモルタル（蒸気養生なし）およびコンクリート（蒸気養生あり）の膨張量と ASR 判定結果との関係を Table 9 に示す。なお、モルタルはモルタルバー法（3 ヶ月にて 0.05%, 6 ヶ月にて 0.1% 以上）に準拠し、コンクリートはコンクリートバー法（6 ヶ月にて 0.1% 以上）に準拠して ASR 抑制効果の有無を判定した。また、フライアッシュの置換率は、外来からのアルカリ供給など厳しい環境条件下でも十分な抑制が発揮されるよう、品質に応じて置換率を設定し、FA1 は 10%, FA2 は 20%, また FA4 は 30% と設定した。

モルタルにおける無混和のものの膨張量は、材齢 3 ヶ月で 0.3% 以上、材齢 6 ヶ月で 0.4% 以上の膨張量を示した。一方、フライアッシュを混和したものは、FA1（10%）において若干の膨張傾向が見られるものの、いずれのものもモルタルバー法に準拠した判定では「抑制効果あり」と判断された。フライアッシュによるセメントの希釈効果とポゾラン反応によって細孔溶液中の OH<sup>-</sup>濃度が低減し、ASR が抑制されたものと考えられる。

蒸気養生したフライアッシュ含有コンクリートについては、無混和のものは膨張し、その膨張率は材齢 6 カ月で約 0.4% であった。一方、フライアッシュを混和したもののにおいては、FA1 を除き、いずれも膨張挙動を示さず、コンクリートバー法に準拠した判定結果からは「抑制効果あり」と判定された。FA1 は、材齢 6 カ月で約 0.2% の膨張量となり、無混和のものと比較して膨張量は半減しているものの、「抑制効果なし」と判定された。同一環境下（40°C, 100% R.H.）で、モルタルおよびコンクリートの判定結果が異なった原因として、コンクリートにおいては、蒸気養生により初期の ASR 膨張が促進されたこと、また骨材のペシマム現象により ASR による膨張が増大したことによるものと考えられる。蒸気養生のように ASR を促進する場合や、フライアッシュの品質の相違を明確に

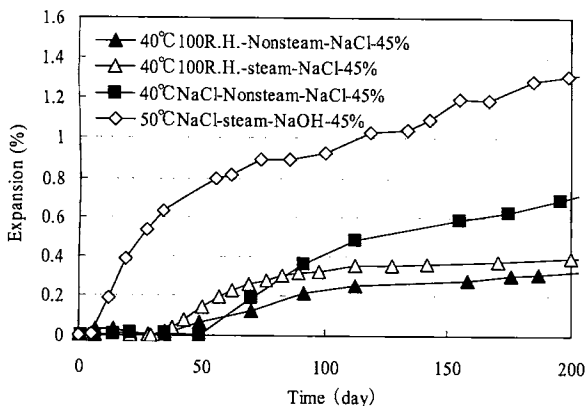


Fig. 4 Expansion of concrete specimen (control).

Table 9 Comparison in evaluation between mortar bar and concrete bar.

Fly ash	Replacing ratio (%)	Expansion (%)			
		Mortarbar method		Concrete method	
		3 months	6 months	3 months	6 months
Control	0	0.385 (×)	0.456 (×)	0.315	0.389 (×)
FA1	10	0.029 (○)	0.055 (○)	0.00	0.207 (×)
FA2	20	0.006 (○)	0.016 (○)	0.00	0.00 (○)
FA4	30	0.003 (○)	0.012 (○)	0.00	0.00 (○)
Criteria		0.05%	0.10%	—	0.10%

○ : Effective for against ASR × : Ineffective for against ASR

識別する場合において、フライアッシュのASR抑制評価をより確実に行うためには、厳しいアルカリ供給環境下にて膨張挙動を把握するのが望ましいと考えられる。

4・2・3 飽和NaCl浸漬でのASR抑制評価方法 蒸気養生されたフライアッシュ含有コンクリートのASR抑制効果を迅速に評価するため、蒸気養生と50℃、飽和NaCl浸漬の組合せの条件において、各材齢での膨張量を比較検討した。コンクリートの膨張量の比較をFig. 5に示す。フライアッシュを混和したものの膨張量は、無混和のものと比較して小さく、ASR膨張が効果的に抑制された。また、いずれのものにおいても、材齢経過に伴いその膨張量は増大し、無混和のものに対する抑制の割合は小さくなった。外来塩によってASR膨張が促進されたものと考えられる。置換率15%では、FA4、FA2、FA1の順に大きな膨張傾向を示し、フライアッシュの品質(活性度)による抑制効果への影響が認められた。FA2においては、置換率20%の方が15%と比較して膨張が抑制され、FA1(15%)と同程度の膨張量を示した。この結果は、品質が低いフライアッシュでもその置換率を増加させることで抑制効果を補うことが可能であることを示唆している。

ここで、50℃の、飽和NaCl浸漬条件下におけるフライアッシュの抑制効果の判定基準について検討を行った。本来、骨材の判定方法であるデンマーク法(飽和NaCl浸漬)に踏襲し、判定基準(3ヶ月にて0.4%)にて50℃、飽和NaCl浸漬における各種フライアッシュのASR抑制評価を行った。判定結果をTable 10に示す。フライアッシュの種類にかかわらず、いずれも「抑制効果なし」と判定された。本条件においては、蒸気養生や外来からのアルカリ供給に加え、フライアッシュの抑制効果を迅速に評価するため、アルカリ総量を $8\text{kg/m}^3$ としており、デンマーク法の条件に比べてより厳しい判定結果になったものと考えられる。また、総プロの成果から、フライアッシュの置換率は、一般的には15%以上であれば効果的であるとされており、本条件では非常に安全側の判定基準であったと考えられる。参納らによると、デンマーク法に準拠したコンクリートバーの膨張挙動において膨張率0.05%で微細なひび割れが発生し、0.1%程度で供試体全体にひび割れが進展したと報告されている。<sup>6)</sup>本条件

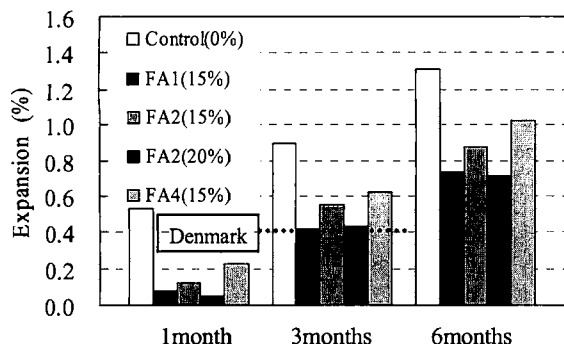


Fig. 5 Comparisons expansion of concrete. (Danish method)

Table 10 Assessment of suppression effect against ASR in fly ash concrete.

Fly ash	Replacing ratio (%)	Expansion (%)	Assessment
Control	0	0.893	×
FA1	15	0.416	×
FA2	15	0.548	×
	20	0.430	×
FA4	15	0.621	×

○: Effective of against ASR ×: Ineffective of against ASR

における判定基準を、明確なひび割れ発生時の膨張率とすると、より早期に判定することが可能であると考えられる。

## 5 結 言

本研究の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 反応性骨材において同一の安山岩でもその組成によりアルカリ骨材反応性が異なった。
- (2) 蒸気養生を施すことでフライアッシュのポゾラン反応は促進した。ASR抑制効果に期待される。
- (3) 50℃、飽和NaCl浸漬条件においては、他の骨材や配合において閾値を検討する必要はあるものの、迅速にフライアッシュのASR抑制効果を評価する方法の1つとして有用性を確認することができた。

## 参 考 文 献

- 1) Y. Obana and K. Torii, "Case studies on Deterioration of ASR affected PC and PCa Members", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.30, No.1, pp.1065-1070 (2008).
- 2) Y. Kawabata and H. Matsushita, "Evaluation of character of fly ash related to suppressing effect on alkali-silica reaction", Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, Vol.63, No.3, pp.379-395 (2007).
- 3) N. Miyano, Y. Kubo, M. Tubokura and I. Kanise, "Investigation on the properties of concrete at early age and ASR suppression of fly ash concrete cured at steam condition", Cement and Concrete, Vol.62, pp.342-350 (2008) Japan Cement Association.
- 4) K. Morino, E. Iwatsuki and K. Gotou, "Microstructure of Cherty Aggregate and expansion behavior of mortar bar", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.10, No.2, pp.717-722 (1988).
- 5) S. Nishibayashi, K. Kotani, S. Takami and T. Kuroda, "Study of low-grade fly ash in controlling expansion due to alkali-aggregate reaction", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.25, No.1, pp.53-58 (2003).
- 6) C. Sannoh, K. Torii, T. Saito and H. Tomotake, "Evaluation of alkali-silica reactivity of concrete using various pozzolanic additives", Proceedings Cement and Concrete Institute, No.59, pp.317-324 (2005).