

# 論文 フライアッシュの置換率を変えたコンクリートの ASR 抑制効果及び硬化特性

古賀 誠<sup>\*1</sup>・小林 将志<sup>\*2</sup>・大庭 光商<sup>\*3</sup>

要旨：実施工を計画している地区の「無害でない」骨材の ASR 反応性についてモルタルバー法による ASR 確認試験を行うとともに、またその膨張の発生要因について岩種分析を行い考察した。さらに、反応性が認められた骨材に対して、ASR 抑制対策として FA を混和材として使用した試験体を製作して ASR 抑制効果の確認試験及び硬化特性試験を実施した。試験の結果、FA の種類及び置換率に関わらず大幅に膨張率が低減し、1 種相当品で 10%、2 級品で 15%の低置換率での抑制効果が確認できた。さらに岩種分析を行い、モルタルバー法と組み合わせることにより効果的な骨材成分の膨張傾向を把握できることが分かった。

キーワード：アルカリシリカ反応、フライアッシュ、置換率、岩種分析、圧縮強度、引張強度

## 1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下 ASR とよぶ)による骨材の膨張は、構造物にひび割れを発生させるため耐久性に影響を及ぼす。実施工を計画している地区の一部水系の骨材は、砂利を使用しており、中には反応性骨材を含んだものも散見される(写真-1参照)。骨材の産地、また骨材を構成する岩種によっては ASR による膨張量に差が出てくることから、実施工の適用を踏まえた適切な ASR 抑制対策が求められている。

火力発電所での石炭火力発電により副産物として生成する石炭灰の大部分を占めるフライアッシュ(以下FAとよぶ)は、ASR抑制対策としても効果があることは既知の見解より明らかになっている<sup>1)2)</sup>。当該地区近隣には発電所が点在しており、安定的にFAを供給することが可能であること、また過去に当該地区の生コン工場ではFAを使用した実績もあることから、ASR対策用の混和材としてはFAの使用が有効と考えられる<sup>3)</sup>。

よって、FAの有効性を確認するために、当該産地の骨材とあわせて他産地の骨材を用いてASR反応性の有無を確

認するとともに、さらにその骨材の岩種を分析することによりASRによる骨材の膨張について関連性を推定した。さらに、反応性が認められた骨材に対して、ASR抑制対策としてFAを混和材として使用した試験体を製作してASR抑制効果の確認試験及び硬化特性試験を実施した。なお、今回の置換率は10~25%の範囲における抑制効果の確認を目的としており、従来実施されてきた試験の置換率が5%、20%、および30%が多いのに比べると<sup>4)</sup>中間的な領域に着目したものである。

## 2. 骨材の ASR 反応性と FA 置換による ASR 抑制効果

当該地区で入手可能な FA と骨材を使用して、FA の種類及び置換率をパラメータとした ASR 抑制効果確認試験を行い、当該地区の骨材に対して最適な FA の種類及び置換率を検討した。さらに、骨材の岩種を分析することにより、ASR による骨材の膨張傾向との関係を推定した。

表 - 1 ASR 抑制効果確認試験に用いた材料

種類	品質		
普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積3280cm <sup>2</sup> /g		
フライアッシュ	FA1	1種相当品 密度2.34g/cm <sup>3</sup> 比表面積5590cm <sup>2</sup> /g	
	FA2	2種品 密度2.23g/cm <sup>3</sup> 比表面積3880cm <sup>2</sup> /g	
骨材	S1	無害でない	陸砂(A産地) 密度2.65g/cm <sup>3</sup>
	S2-1	無害でない	陸砂(B水系C産地) 密度2.58g/cm <sup>3</sup>
	S2-2	無害でない	陸砂(B水系D産地) 密度2.58g/cm <sup>3</sup>
	S3	無害	陸砂(E水系F産地) 密度2.58g/cm <sup>3</sup>



写真 - 1 ASR によるひび割れが発生した橋台

\*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター 課員 工修 (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所工事管理室 副課長 工修(正会員)

\*3 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター 課長 (正会員)

表 - 2 ASR 抑制効果確認試験の試験水準一覧

供試体名	骨材	フライアッシュ	置換率 (%)	全アルカリ量 (%)	セメント中の全アルカリ量 (%)	計量値(g)				
						水	NaOH	セメント	フライアッシュ	細骨材
S1	S1	-	0	1.2	0.49	294.50	5.50	600	0	1350
S2-1	S2-1	-	0			294.50	5.50	600	0	
FA1-10%/S2-1		FA1 (1種相当)	10			295.05	4.95	540	60	
FA1-15%/S2-1			15			295.33	4.67	510	90	
FA1-20%/S2-1			20			295.60	4.40	480	120	
FA2-15%/S2-1		FA2(2種)	15			295.33	4.67	510	90	
FA2-20%/S2-1			20			295.60	4.40	480	120	
FA2-25%/S2-1			25			295.88	4.12	450	150	
S2-2		S2-2	-			0	294.50	5.50	600	
FA1-10%/S2-2	FA1 (1種相当)		10			295.05	4.95	540	60	
FA1-15%/S2-2			15			295.33	4.67	510	90	
FA2-15%/S2-2			FA2(2種)			15	295.33	4.67	510	
FA2-20%/S2-2	20					295.60	4.40	480	120	
S3	S3		-			0	294.50	5.50	600	

2.1 骨材の ASR 反応性試験 (モルタルバー法)

骨材の ASR 抑制効果確認試験は、JISA1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (モルタルバー法)」に準拠した。試験に用いた材料を表 - 1 に示す。当該地区の骨材は過去の骨材試験で化学法により「無害でない」と判定されている 2 種類 (S2-1 及び S2-2) と「無害」と判定されている 1 種類 (S3) とし、比較用に「無害でない」と判定されている別地区産の骨材 1 種類 (S1) も使用した。使用した FA は 1 種相当に分級した商品 (FA1) と 2 種 FA (FA2) との 2 種類である。試験水準を表 - 2 に示す。本試験では細骨材の量は一定とし、FA の置換方法は内割りとした。さらに FA のアルカリ量を考慮せず、セメントの全アルカリ量は 1.2% となるように設定した。FA の置換量は、1 種相当 FA である FA1 は従来にはない少量の 10% の他に 15 及び 20%、2 種である FA2 が 15~25% とした。試験結果を図 - 1~3 に示す。

図 - 1 は FA 未置換でのモルタルバー法の結果である。「無害でない」とされている骨材 (S2-1 及び S2-2) については膨張傾向を示し、26 週経過後での膨張率は 0.25~0.33% となった。S2-1 及び S2-2 でのモルタルバー試験状況を写真 - 1 に示す。また「無害」とされている骨材 (S3) については最大で 0.04% 程度と膨張傾向を示さなかった。よって、今回試験した S2-1 及び S2-2 骨材を使用する場合は、ASR による膨張現象が生じる可能性が高く、適切な ASR 抑制対策を実施する必要がある。なお、比較用に準備した S1 については 6 ヶ月の試験期間において最大で 0.05% 程度と膨張傾向を示さなかった。

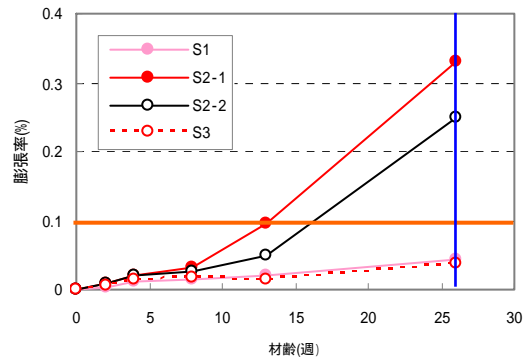


図 - 1 FA 未置換での試験結果の比較



写真 - 1 モルタルバー試験状況 (左:S2-1, 右:S2-2)

図 - 2 及び図 - 3 に S2-1 及び S2-2 骨材に FA を置換した場合の材齢と膨張率との関係を示す。なお、比較用に FA の置換前の結果も併せて示す。S2-1, S2-2 とともに FA 置換の結果膨張率が大幅に低減する結果となった。また

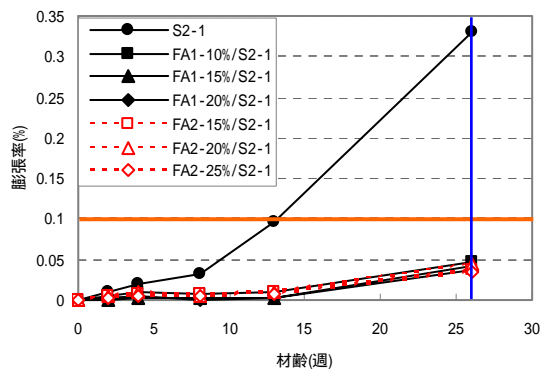


図 - 2 FA 置換前後の試験結果の比較(S2-1)

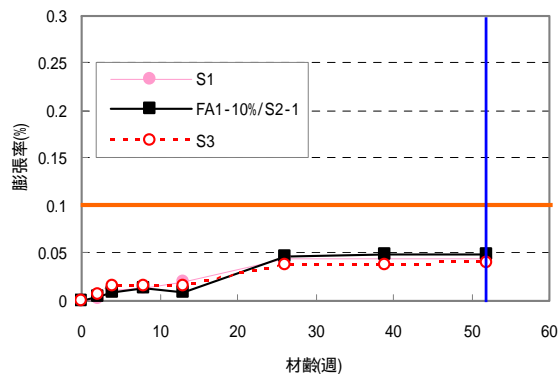


図 - 4 52 週までの継続試験結果の比較

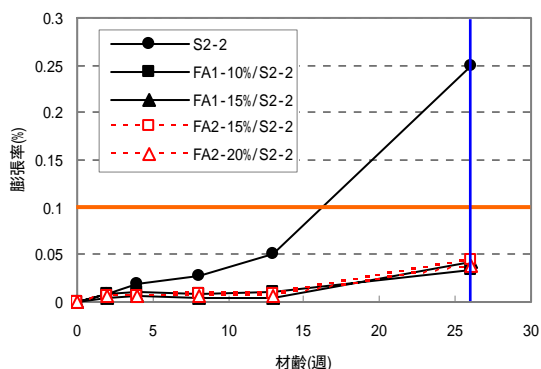


図 - 3 FA 置換前後の試験結果の比較 (S2-2)

FA の種類及び置換率を変化させても膨張率に差はあまり見られず、S2-1、S2-2 とともに FA1 については低置換率である 10%、FA2 では 15%でも膨張率低減の効果が顕著

に見られた。

また、図 - 1~3 を通して、13~26 週の膨張の増加割合が、8~13 週の膨張の増加割合より若干ではあるが大きくなっており、今回の試験水準の一部において、26 週以降もモルタルパー法試験を継続して実施した。継続試験は、FA 未置換の S1 及び S3、FA1 で 10%置換した S2-1 の 3 水準について実施した。試験結果の比較を図 - 4 に示す。

いずれの場合においても、26~52 週の膨張の増加割合が、13~26 週の膨張の増加割合よりも小さくなっており、膨張率も最大 0.05%程度に収束する傾向が認められた。

## 2.2 岩種分析

今回の試験で使用した 4 種類の骨材に対して、各骨材の中で膨張原因となる反応性の岩石種を明らかにする目的で、岩種分析を実施した。分析は、JCI-DD3「骨材

表 - 3 岩種分析結果 (S1~S3)

種別	岩石種	S1		S2-1		S2-2		S3	
		細骨材(%)	粗骨材(%)	細骨材(%)	粗骨材(%)	細骨材(%)	粗骨材(%)	細骨材(%)	粗骨材(%)
岩片	チャート	51.0	6.0	0.4	5.0	5.0	1.0	-	
	砂岩	13.0	2.0	27.6	6.0	29.2	9.0	8.6	
	頁岩	3.0	1.0	5.3	2.0	10.2	12.0	8.4	
	礫岩	-	-	-	-	4.5	-	-	
	珪質片岩	7.0	14.0	16.1	22.0	25.0	14.0	26.7	
	泥質片岩	1.0	4.0	18.1	9.0	5.9	23.0	40.2	
	珪質頁岩	-	5.0	-	-	-	-	-	
	斑レイ岩系	-	4.0	2.6	-	2.7	-	-	
	花崗岩系	-	14.0	15.8	11.0	8.8	14.0	8.8	
	安山岩	-	2.0	4.7	8.0	1.2	0.6	-	
	凝灰岩	-	-	6.5	-	7.5	-	-	
	閃緑岩系	-	-	2.9	-	-	-	7.3	
	その他	7.0	7.0	-	10.0	-	4.4	-	
結晶片	石英	12.0	13.0	-	9.0	-	8.0	-	
	カリ長石	5.0	17.0	-	10.0	-	10.0	-	
	斜長石	-	6.0	-	3.0	-	1.0	-	
	黒雲母	-	2.0	-	2.0	-	2.0	-	
	その他	1.0	3.0	-	3.0	-	1.0	-	

一般に、チャート中の隠微晶質な石英や、安山岩に含まれるクリストバライト等は ASR 反応性を示すとされている<sup>2)</sup>。

に含まれる有害鉱物の判定（同定）方法（案）」及び JCI-DD4「有害鉱物の定量方法（案）」に準拠した。骨材については、砂に加え同じ産地の砂利についても実施した。骨材の岩種分析は、試料を縮分採取し、樹脂に埋め込み作成した厚さ 20 $\mu$ m 程度の薄片試料を作成し、それぞれの骨材を構成する岩片及び結晶片を偏光顕微鏡下で観察し、その構成割合を求めた。岩種分析の結果を表 - 3 に示す。

S1 は多種の岩片と結晶片からなっており、その中でチャートの占める割合が全体の 50% 強と非常に高いのが特徴的である。チャートの大部分は隠微晶質な石英からなり、ASR 反応性鉱物である石英の脈やカルセドニーを多量に含んでいるため<sup>5)</sup>、S1 は ASR による膨張の可能性を必ずしも否定できないが、今回継続して 52 週まで行ったモルタルバー法試験の結果では膨張率が 0.1% 以下であった（図 - 1 参照）。

S2-1 及び S2-2 は、S1 同様多種の岩片と結晶片からなっている。S1 と比較してチャートの割合は小さい一方で、安山岩の含まれる割合が他骨材に比べて高いことが分かる。この安山岩を偏光顕微鏡で観察すると ASR 反応性鉱物のうち反応性が顕著なクリストパライトを含むものが存在している<sup>2)</sup>（写真 - 2 参照、円内の屋根瓦状に見える部分にクリストパライトが含まれている）。モルタルバー法の結果（図 - 1 参照）では 6 ヶ月でどちらも膨張率 0.25% 以上の高い膨張傾向を示しており、クリスト

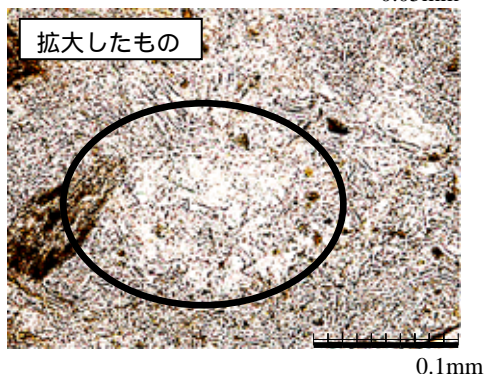
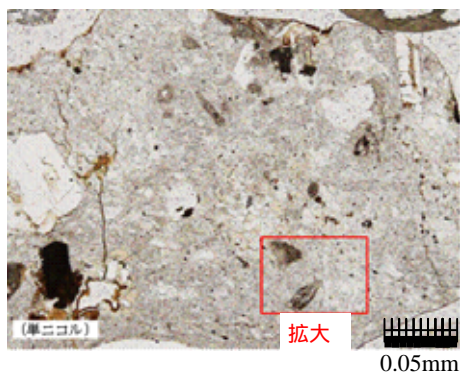


写真 - 2 偏光顕微鏡による観察  
（S2-1, 安山岩, 単ニコル）

パライトが反応速度の大きな膨張を発生させたものと推察される。

次に「無害」骨材と言われている S3 であるが、他骨材同様岩片及び結晶片は多種である。しかし、他の骨材と比較してチャート及び安山岩を含む割合が低く、含有量がわずかであることから、膨張傾向を示さなかったと考えられる。

以上のように、S1 ~ S3 の 4 種類の骨材について、モルタルバー法に加えて岩種分析を実施した結果、S1 には ASR 反応性を示す物質含有量が多いことがわかったが、52 週までのモルタルバー法試験の結果とは必ずしも一致しなかった。一方、S3 は ASR 反応性を示す物質の割合は少なく、ASR による膨張反応の可能性が低いことが推察された。また S2-1 及び S2-2 では、反応速度の大きな鉱物の存在が確認され、モルタルバー法の結果高い膨張率を示す理由の一つとして考察できた。このように岩種分析をモルタルバー法と合わせて実施することは、当該地区の骨材成分の傾向を知ることができ、より効果的な ASR 抑制対策の検討が可能になると考えられる。

### 3. 硬化特性

FA を混和材として使用したコンクリートについては、使用時の諸特性に対する影響の研究も進んでおり<sup>6)7)</sup>、硬化時の諸特性に影響を及ぼすことが指摘されている<sup>8)</sup>。そこで FA を混和材として用いたコンクリートの硬化時の諸特性を把握することを目的に、FA の種類、置換率及び置換方法をパラメータとした試験を実施した。

硬化特性試験に使用した主な材料を表 - 4 に、配合一覧を表 - 5 に示す。硬化特性試験は、収縮率を JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化率試験方法（第 2 部）」で、圧縮強度を JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」で、引張強度を JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」で、9 ケースの配合に対して実施した。材料の試験材齢は 1, 4, (9), 13, 26 週とし、同条件で養生を行った供試体を用いて実施した。

基準となる S2 (27-12) は、ASR の反応性試験において

表 - 4 硬化特性試験に用いた材料

種類	品質	
普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3280cm <sup>2</sup> /g	
フライアッシュ	FA1	1種相当品 密度 2.34g/cm <sup>3</sup> 比表面積 5590cm <sup>2</sup> /g
	FA2	2種品 密度 2.23g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3880cm <sup>2</sup> /g
骨材	S2	無害でない 陸砂・陸砂利 (B水系C産地) 密度 2.58g/cm <sup>3</sup>

表 - 5 硬化特性試験の配合一覧

	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							試し練り結果		f'c (N/mm <sup>2</sup> )	F/(C+F) (%)	W/C (%)	W/(C+F) (%)	s/a (%)
	W	C	FA	S <sub>1</sub> (細)	S <sub>2</sub> (粗)	G	AD <sup>1</sup>	SL	Air					
								(cm)	(%)					
S2(27-12)	146	298	-	140	560	1159	0.931	14.0	4.6	36.3	-	49.0	49.0	37.7
S2-FA1-10	142	269	30	139	556	1165	0.934	15.0	4.7	35.4	10.0	52.8	47.5	37.4
S2-FA1-15	138	252	45	139	556	1172	0.928	15.5	4.6	35.0	15.2	54.8	46.5	37.2
S2-FA2-15	146	267	48	136	543	1152	0.981	14.5	4.3	37.4	15.2	54.7	46.3	37.1
S2-FA2-20	146	260	65	134	535	1146	1.016	15.0	4.2	35.8	20.0	56.2	44.9	36.9
S2-FA2-15外	146	298	45	130	518	1159	1.072	15.5	4.1	38.9	13.1	49.0	42.6	37.4 <sup>2</sup>
S2-FA2-20外	146	298	60	126	504	1159	1.119	14.5	3.8	39.4	16.8	49.0	40.8	37.3 <sup>2</sup>

AD<sup>1</sup>: AE減水剤

<sup>2</sup>: S2-FA2-15外, S2-FA2-20外は(s+f)/(a+f)

「無害でない」とされる陸砂利を骨材として使用し、呼び強度 27N/mm<sup>2</sup>、スランプ 12cm、空気量 4.5%を目標配合とした。その他配合の記号は、使用骨材、FA種別、FA置換率を示しており、「外」と記入したものは、外割りにてFAを置換したものである。なお、各配合はFAの種別や置換方法(内割り、外割り)の別を考慮して決定した。

以下に、今回設定したFA置換量の範囲内におけるコンクリートの硬化時の各特性値における影響について概説する。

### 3.1 収縮率

各配合の乾燥収縮による材齢と長さ変化率(収縮率)の関係を図-5に、S2(27-12)を基準とした長さ変化率の比を図-6に示す。図より基準配合との差異はほとんどみられず、今回試験した範囲内では、FAの種類、置換率及び置換方法がコンクリートの収縮率に及ぼす影響は小さい。

### 3.2 圧縮強度

各配合の材齢と圧縮強度との関係を図-7に、S2(27-12)を基準とした値を図-8に示す。硬化初期1週のS2を基準とした圧縮強度の比は、内割り配合において最小で0.91程度となった。しかし4週強度では普通コンクリートとほぼ同等の強度が得られ、さらに長期材齢ではFAの種類、置換率及び置換方法にかかわらず圧縮強度比が最小でも1.06程度と普通コンクリートよりも増進する傾向を示した。

### 3.3 引張強度

各配合の材齢と引張強度との関係を図-9に、S2(27-12)を基準とした値を図-10に示す。幾分ばつづくが、圧縮強度と同様FA内割り置換の場合は材齢初期の引張強度が小さな傾向となっている。またFAの種類、置換率及び置換方法による大きな差は見られなかった。

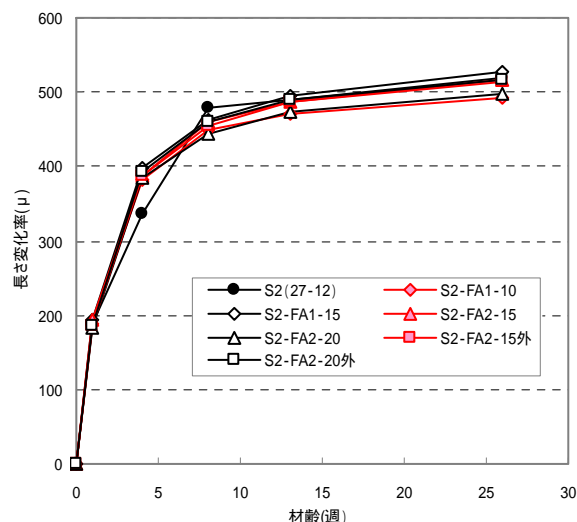


図 - 5 各配合の乾燥収縮による材齢と長さ変化率の関係

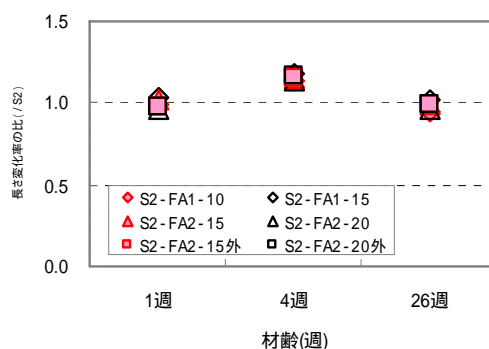


図 - 6 材齢と基準化した長さ変化率の関係

## 4. まとめ

「無害でない」骨材を用いたコンクリートに対するASR抑制対策として、FAを混和材として用いたコンクリートの適用に向けた試験の結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 「無害でない」と判定された骨材にFAを混和材として使用したコンクリートの膨張率は、FAの種類及

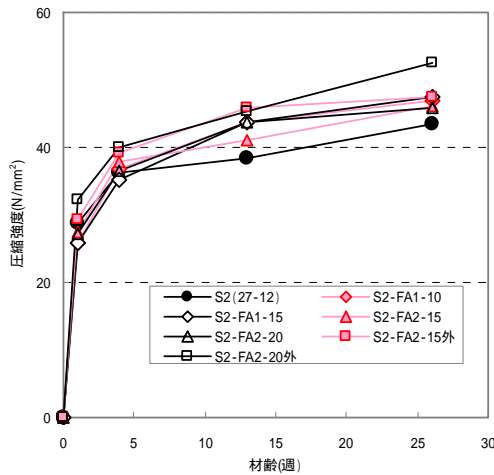


図 - 7 各配合の材齢と圧縮強度の関係

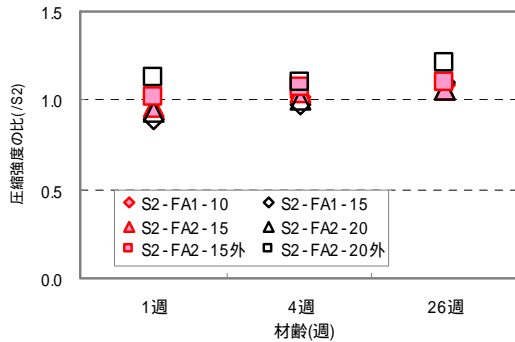


図 - 8 材齢と基準化した圧縮強度の関係

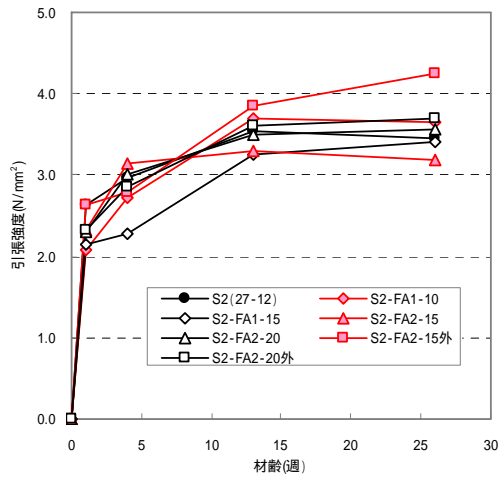


図 - 9 各配合の材齢と引張強度の関係

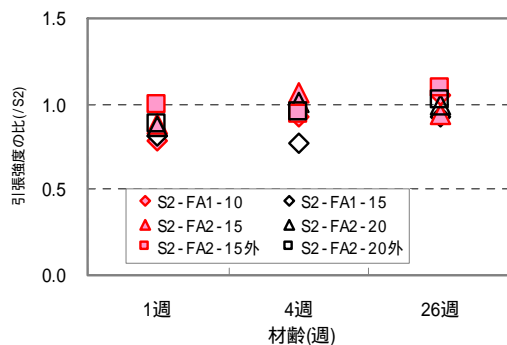


図 - 10 材齢と基準化した引張強度の関係

び置換率にかかわらず大幅に低減し、抑制効果が認められた。今回の骨材に関しては、FA1の場合10%、FA2では15%の低置換率でも膨張率低減の効果を確認できた。

- (2) 岩種分析の結果、モルタルバー法の結果高い膨張率を示した骨材には反応速度の大きな鉱物の存在が確認され、モルタルバー法の結果を示す理由の一つとして考察できた。このようにモルタルバー法と岩種分析を合わせて実施することにより、当該地区の骨材成分の傾向を知ることができ、より効果的なASR抑制対策の検討が可能になると考えられる。
- (3) 圧縮強度は、置換率10%~20%の範囲で試験を行った結果、初期材齢では低下する傾向を示したものの、長期材齢の場合は普通コンクリート以上となる。引張強度においても同様の傾向が得られた。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), コンクリートライブラリー94, 1999
- 2) 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, 2008
- 3) 古賀誠, 小林将志, 小林和行, 大庭光商：骨材のアルカリシリカ反応性分析及びその抑制効果確認に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 5-103, pp203-204, 2009
- 4) 土木学会：循環化社会に適したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, 2009
- 5) 川村満紀, 榎場重正：アルカリ・シリカ反応とその防止対策, 土木学会論文集, No.348, pp13-26, 1984
- 6) 松崎裕亮, 下村匠, 田中泰司, 安保知紀：フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状及び耐久性の系統的試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp171-176, 2008
- 7) 楠貞則, 添田政司, 大和竹史, 芦田広喜：フライアッシュコンクリートの配合設計に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp189-194, 2008
- 8) 小林将志, 古賀誠, 小林和行：ASR抑制を目的としたフライアッシュコンクリートの硬化特性試験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 5-107, pp211-212, 2009