

論文 RC試験体の長期屋外暴露試験におけるフライアッシュのASR抑制効果

参納千夏男*1・橋本徹*2・稲垣崇秀*3・鳥居和之*4

要旨: 本研究では、海洋環境下に暴露した RC 試験体より暴露 6 年が経過した時点でコアを採取し、偏光顕微鏡によりコンクリート断片の微視的構造の観察を行い、フライアッシュによる ASR 抑制のメカニズムに関して検討した。その結果、フライアッシュを混和した RC 試験体内部では、ASR の進行が抑えられることにより、コンクリートのひび割れの発生やその膨張が抑制されていたことが明らかとなった。また、RC 試験体の膨張挙動とフライアッシュによる ASR 抑制効果は、モルタルバー法による促進試験結果と相関性が高かった。

キーワード: フライアッシュ, ASR 抑制効果, 屋外暴露試験, 偏光顕微鏡観察, モルタルバー法 (JIS A1146)

1. はじめに

フライアッシュには ASR 抑制効果があり、JIS A5308 付属書 2 においては、ASR 抑制対策の一つとしてフライアッシュセメントを使用するか、効果の確認されたフライアッシュを使用することが規定されている¹⁾。フライアッシュによる ASR 抑制効果の確認方法としては、近年、JASS 5 T-405「アルカリシリカ反応抑制対策に用いるフライアッシュの性能判定基準」にモルタルバー法 (JIA A1146) によるものが規定されているが²⁾、骨材種類によっては適切に判定できない場合があることも指摘されている³⁾。この際に、実環境での ASR 抑制効果の検証が望まれるが、ASR の膨張挙動を実環境で検証した事例が少なく⁴⁾、またフライアッシュによる ASR 抑制効果に関して、試験室レベルとコンクリートでの実環境における対応を明らかにした事例はほとんどないのが実情である。一方、フライアッシュがもたらす ASR 抑制効果の主要因は、フライアッシュのボゾラン反応に伴う、細孔溶液の pH 低下による ASR 自体の抑制であると言われている^{5,6)}。同様に、このことが実環境で実証された事例も少なく、ボゾラン反応による長期間の ASR 抑制効果を実環境において検証することは重要である。

筆者らは、実構造物規模での長期間のフライアッシュによる ASR 抑制効果を検証することを目的とし、反応性骨材を含有する大型 RC 試験体を海洋環境下に暴露し、ASR による膨張挙動を定期的にモニタリングしてきた⁷⁾。本稿では、RC 試験体からコアを採取し、コアの力学的性質に関する試験と偏光顕微鏡によるコアの微視的構造の観察を行い、フライアッシュによる ASR 抑制効果に関して 2, 3 の検討を行った。また、暴露後 6 年までの長

期的なモニタリングの結果を整理し、モルタルバー法 (JIA A1146) による膨張挙動との対応関係を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/m³, 比表面積: 3330 cm²/g, アルカリ量: 0.68%) を使用した。コンクリートは短期間に ASR による膨張を促進させるため、アルカリ (NaCl) を等価 Na₂O 量で 10 kg/m³ (塩化物イオン量: 11.5 kg/m³) 添加した。使用した骨材は化学法の結果より「無害でない」と判定された富山県常願寺川産の川砂川砂利と「無害」と判定された富山県早月川産の川砂川砂利である。フライアッシュは北陸地方の火力発電所 (石川県七尾産 (FA-N), 福井県敦賀産 (FA-T), 富山県新港産 (FA-S)) から産出したものであり、いずれも JIS A 6201 の II 種フライアッシュに相当するものである。フライアッシュの物理的性質および化学成分を表-2 および表-3 に示す。RC 試験体においては、フライアッシュの置換率は JIS A 5308 で規定されている最低値の 15% (内割) とした。

2.2 試験方法

(1) 屋内促進養生試験

モルタルバー法 (JIS A1146-2001, 試験体の大きさ:

表-1 RC 試験体のコンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	NaCl
20	50	40	175	350	749	1106	11.5

*1 北陸電力 (株) 土木部 土木技術チーム 博 (工) (正会員)

*2 北陸電力 (株) 土木部 土木技術チーム 統括

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系教授 工博 (正会員)

表-2 フライアッシュの物理的性質および化学成分（モルタルバー法に使用したフライアッシュ）

	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分(Wt%)									
			lg.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
FA-N	2.32	4070	1.8	62.16	23.45	0.80	4.28	0.58	1.25	0.25	0.23	1.10
FA-T	2.16	4310	4.2	67.40	19.50	1.00	3.50	0.70	0.90	0.18	0.38	1.08
FA-S	2.05	2950	3.2	46.80	32.00	3.40	7.60	1.00	-	-	0.23	0.63

表-3 フライアッシュの物理的性質および化学成分（RC 試験体に使用したフライアッシュ）

	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分(Wt%)									
			lg.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
FA-N	2.33	3550	1.5	59.64	26.50	0.80	4.89	0.61	1.50	0.36	0.24	1.39
FA-T	2.21	3990	2.8	70.41	18.43	1.07	4.62	0.60	0.86	0.05	0.47	0.76
FA-S	2.15	2920	3.2	48.45	31.83	3.93	6.27	0.75	2.68	0.65	0.25	0.59

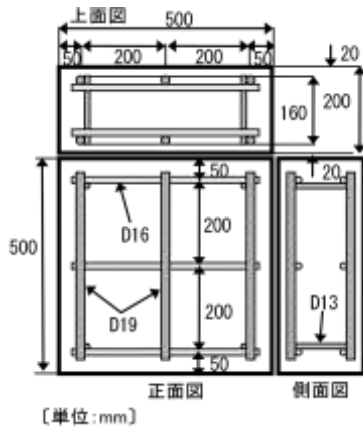


図-1 RC 試験体の概要

40×40×160mm) により、フライアッシュによる ASR 抑制効果を判定した。使用したフライアッシュは、表-2 に示すものであり、当試験は屋外暴露試験に先立ち実施したものである⁸⁾。

(2) 屋外暴露試験

RC 試験体の概要を図-1 に示す。使用したフライアッシュは、表-3 に示すものである。RC 試験体は、2004 年 9 月に飛来塩分の影響を受ける富山県富山新港の岸壁上に暴露し、コンクリートの膨張量の測定を定期的に行った。RC 試験体（無害でない骨材使用、フライアッシュ混和無）の状況を写真-1 に示す。試験体には、NaCl を添加したため、暴露開始から 1 ヶ月後には鋼材に沿ったひび割れが発生した。膨張量の測定では、ASR による影響を評価するため、鋼材(SD295A)位置を挟まない位置の膨張量のデータで整理した。

(3) コアの力学的性質

コアの力学的性質を把握する目的で、RC 試験体から貫通コア（直径 100mm、長さ 200mm）を採取し、コアの両端間（測定長 200mm）で超音波伝播速度を測定した後に、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠

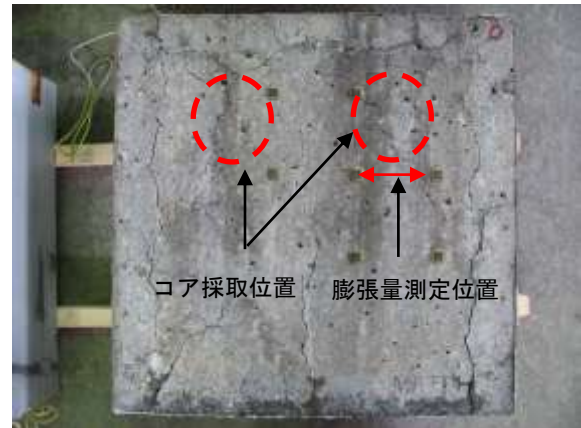


写真-1 RC 試験体のひび割れ状況（暴露期間 6 年）

し、圧縮強度および静弾性係数を測定した。

(4) コアの内部組織観察

ASR の進行状況を調べることを目的として、コア（直径 100mm、長さ 200mm）の表面部と中央部より、研磨薄片（縦約 20mm×横約 40mm、厚さ約 20μm）を作製し、内部組織の偏光顕微鏡観察を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 モルタルバーと RC 試験体の膨張挙動の比較

(1) モルタルバーの膨張挙動

JIS A1146 法におけるモルタルバーの膨張率の経時変化を図-2 に示す。セメントのみのもの(OPC)に比較してフライアッシュを混和したものは、いずれも膨張が大きく抑制されており、七尾産(FA-N)および敦賀産(FA-T)フライアッシュを混和したものでは、置換率 10%で膨張率 0.1%以下、置換率 20%で、膨張がゼロになった。JASS 5 T-405³⁾の判定基準によれば、「促進養生後の膨張率が 0.100%未満となるモルタルの配合のうち、最も小さいフライアッシュの置換率をアルカリシリカ反応の抑制を考慮した際のフライアッシュの最低置換率とする」ことから、これに従えば、II 種フライアッシュの中でも良質

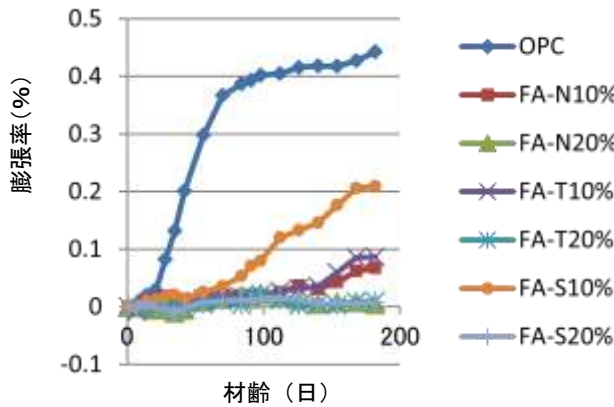


図-2 モルタルバーの膨張率の経時変化

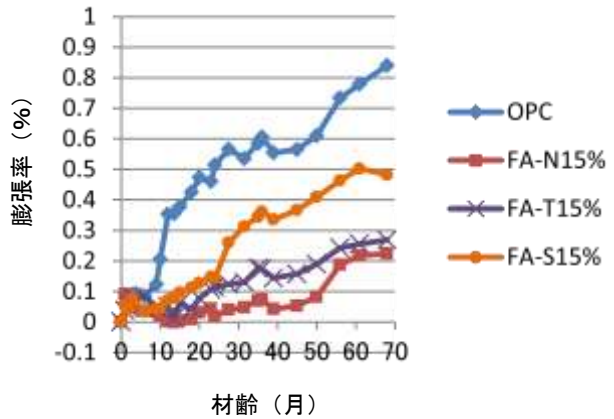


図-3 RC試験体の膨張率の経時変化

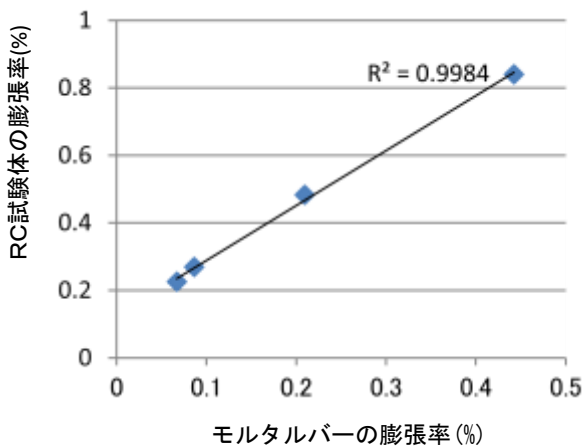


図-4 モルタルバーと RC 試験体の膨張率の関係

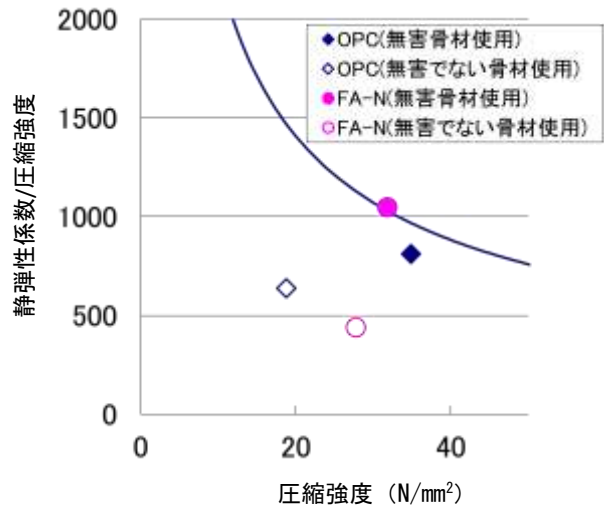


図-5 コアの圧縮強度と静弾性係数の関係

な七尾産(FA-N)および敦賀産(FA-T)フライアッシュについては、最低置換率が 10%、また、新港産 (FA-S)については、最低置換率が 20%となる。

(2) RC 試験体の膨張挙動

RC 試験体の膨張挙動の経時変化を図-3 に示す。OPC(フライアッシュ無混和)試験体では、6年間で膨張率が約 0.9%に達する、顕著な膨張挙動を示した。それに対して、フライアッシュを 15%混和した FA-N(七尾産)試験体および FA-T(敦賀産)試験体では、膨張率は約 0.2%~0.3%であり、OPC 試験体の 1/4~1/3 の膨張率に抑制されており、実環境下においてもフライアッシュによる ASR 抑制効果が長期的に確認できたとと言える。

(3) モルタルバーと RC 試験体の膨張率の関係

モルタルバーと RC 試験体の膨張率は図-2 および図-3 に示す通り、両者は非常に似た傾向を示している。図-4にモルタルバー法における OPC とフライアッシュを 10%混和した供試体の膨張率(182日)と RC 試験体における OPC とフライアッシュを 15%混和した試験体の膨張率(68 箇月)との関係を示す。同様に、両者は非常に高

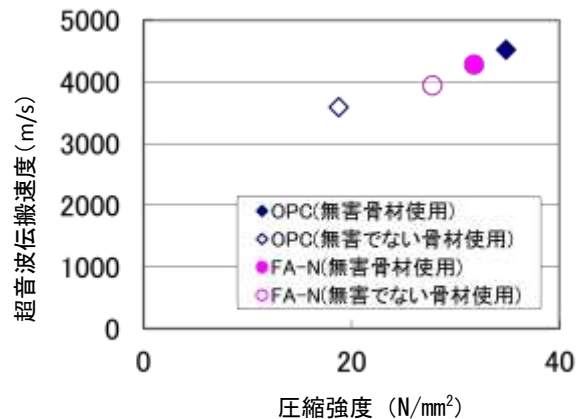


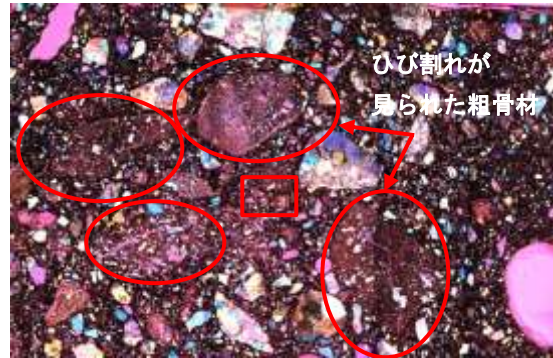
図-6 コアの圧縮強度と超音波伝播速度の関係

い相関性を示した。このことから、短期間(6カ月)で判定したモルタルバーにおけるフライアッシュによる ASR 抑制効果が、長期間(6年)における実環境下においても実証されたとと言える。今回使用した河川産骨材はベシマム混合率をもつと言われる川砂、川砂利であり、細骨材を使用するモルタルバー法と細骨材および粗骨



(: 写真-6 で示した範囲) 10mm

写真-2 薄片全体の状況 (OPC 表面部)
(直交ニコル下: 鋭敏色検板使用)



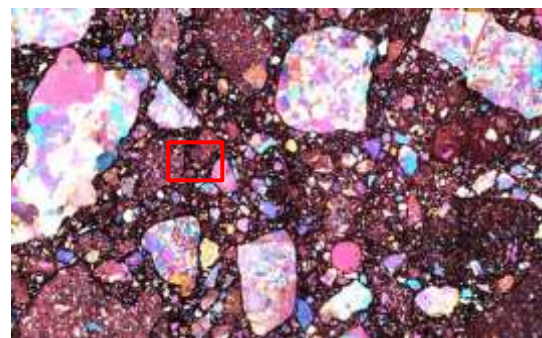
(: 写真-7 で示した範囲) 10mm

写真-3 薄片全体の状況 (OPC 中央部)
(直交ニコル下: 鋭敏色検板使用)



(: 写真-8 で示した範囲) 10mm

写真-4 薄片の状況 (FA15%表面部)
(直交ニコル下: 鋭敏色検板使用)



(: 写真-9 で示した範囲) 10mm

写真-5 薄片の状況 (FA15%中央部)
(直交ニコル下: 鋭敏色検板使用)

表-1 偏光顕微鏡によるコンクリートの内部組織の観察結果

種類	場所	粗骨材の状況	細骨材の状況	セメントペースト部の状況
OPC	表面 (0~20mm)	少数にひび割れ有り ひび割れ幅:0.2mm 程度	少数にひび割れ有り ひび割れ幅:0.2mm 程度	ひび割れは少ないが幅は大きい。 ひび割れ幅:0.2mm 程度
	中央部 (80~120mm)	多数にひび割れ有り ひび割れ幅:0.1mm 程度	多数にひび割れ有り ひび割れ幅:0.2mm 程度	ひび割れは多いが幅は小さい。 ひび割れ幅:0.01~0.02mm 程度
FA 15%	表面 (0~20mm)	少数にひび割れ有り ひび割れ幅:0.2mm 程度	あまりひび割れがない	ひび割れは少ないが幅は大きい。 ひび割れ幅:0.1mm 程度
	中央部 (80~120mm)	あまりひび割れがない	少数にひび割れ有り ひび割れ幅:0.03mm 程度	ひび割れは比較的少なく幅は小さい。 ひび割れ幅:0.01~0.03mm 程度

材を使用した RC 試験体とでは、フライアッシュによる ASR 抑制挙動が異なることも考えられた。しかし、河川産骨材の起源が同じであったことから、骨材の粒径に違いはあるが、反応性の岩種構成率もほぼ同一であったために、両者での膨張挙動が類似したものと考えられる。このことより、使用する骨材が同じであれば、モルタルバー法による試験結果は、実構造物の膨張挙動との対応性が高く、とくに今回使用した河川産骨材に関しては、フライアッシュによる ASR 抑制効果の結果に妥当性があることを示唆している。

3.2 コアの力学的性質

(1) コアの圧縮強度と静弾性係数の関係

図-5 にコアの圧縮強度と静弾性係数の測定結果を示す。なお、図中の曲線は、健全なコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示したものである⁹⁾。無害骨材を使用した RC 試験体から採取したコアについては、フライアッシュ混和の有無によらず、圧縮強度と静弾性係数は通常値を示した。一方、無害でない骨材を使用した RC 試験体から採取したコアについては、フライアッシュ混和の有無によらず、圧縮強度と比較して静弾性係数は小さかった。今回使用した無害でない骨材が産出さ

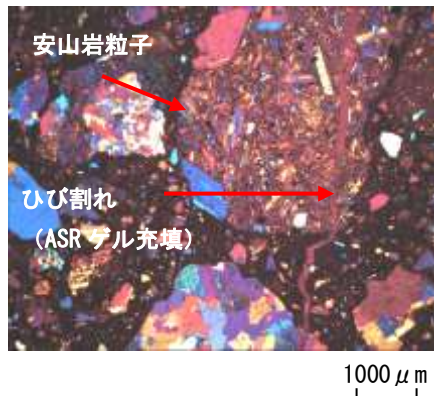


写真-6 ひび割れの発生状況 (OPC 表面部)
(直交ニコル下, 鋭敏色検板使用: 20 倍)

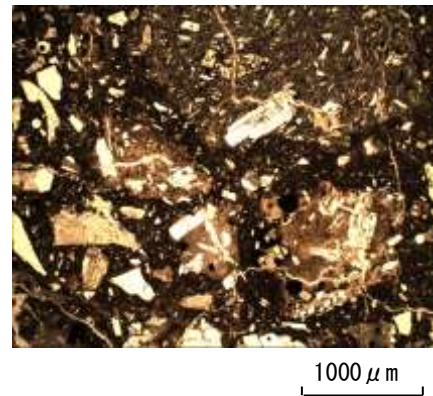


写真-7 ひび割れの発生状況 (OPC 中央部)
(オープンニコル下: 40 倍)

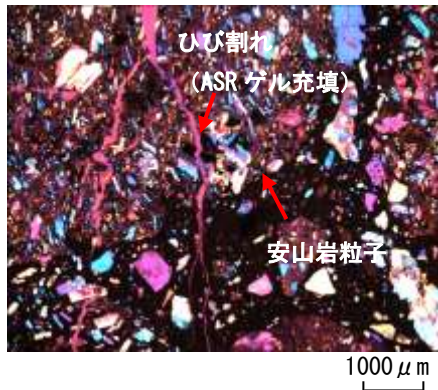


写真-8 ひび割れの発生状況 (FA 表面部)
(直交ニコル下, 鋭敏色検板使用 20 倍)

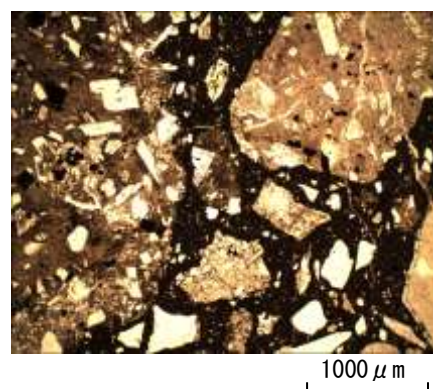


写真-9 ひび割れの発生状況 (FA 中央部)
(オープンニコル下: 40 倍)

れる地方において同種の川砂川砂利を用いた実構造物においては, ASR の進行により静弾性係数が低下したことが報告されており¹⁰⁾, 今回のコアにおいても ASR の進行によりひび割れが進展しているものと判断できた。

(2) コアの圧縮強度と超音波伝播速度の関係

図-6 にコアの圧縮強度と超音波伝播速度の測定結果を示す。超音波伝播速度は, 静弾性係数と同様に, 無害骨材を使用した試験体から採取したコアについては, フライアッシュ混和の有無によらず, 高い値を示した。それに対して, 無害でない骨材を使用した試験体から採取したコアについては, フライアッシュ混和の有無によらず, 小さかった。とくにフライアッシュを混和しなかった試験体の超音波伝播速度の低下は大きく, ASR により微細なひび割れがコンクリートに多数発生していることが予測された。

3.3 コアの内部組織の観察結果

(1) コンクリート切断面の目視観察

フライアッシュ無混和試験体の場合, 目視により, 粗骨材の多くに割れが見られ, セメントペースト部分には白色の ASR ゲルと思われる物質が生成していた。一方, フライアッシュ混和試験体の場合, 目視により, 粗骨材の割れは一部であったが, セメントペースト部分には白色の ASR ゲルと思われる物質が生成していた。このこと

より, フライアッシュ無混和試験体においては, かなり ASR が進展しており, フライアッシュ混和試験体においても, ASR は発生しているが, ASR 発生 の程度が異なることが予測された。

(2) 偏光顕微鏡による薄片観察

コアから作製した薄片の偏光顕微鏡による観察結果を写真-2~9 に示す。写真-2~5 は低倍率 (20 倍) にて撮影した画像をつなぎ合わせて, 薄片全体を 1 枚にしたものである。写真中にひび割れの見られた粗骨材に赤丸を記した。写真-6~9 は, 骨材の反応の状況やひび割れの状況が典型的な箇所を倍率 20 倍または 40 倍で撮影した画像である。また, 表-1 はコンクリート内部の状況を骨材とセメントペースト部分に分けて, ひび割れの発生状況をまとめたものである。

OPC 試験体の表面部では, 細骨材, 粗骨材は各々, 安山岩粒子にひび割れが発生していることが確認できたが, ひび割れの発生していない安山岩粒子もあった。全体的にひび割れは少ないが, 発生しているひび割れのひび割れ幅が, 一様に 0.2mm 程度と大きいことが特徴的であった。写真-6 に, OPC 試験体の表面部の粗骨材とセメントペースト部のひび割れ発生状況を示す。一方, OPC 試験体の中央部では, 細骨材, 粗骨材の安山岩粒子の多くにひび割れが発生していることが確認され, 骨材の内

部に発生しているひび割れ（ひび割れ幅：0.1～0.2mm）と比較して、セメントペースト部のひび割れ幅は0.01～0.02mm程度と小さいことが、表面部と異なっていた。ASR膨張は、鋼材の拘束により影響を受けることが知られており^{11,12)}、中央部では鋼材の拘束の影響により、ASR膨張が抑制されているのに対して、表面部のかぶりの外側では鋼材の拘束が解放されることによりひび割れが大きくなっていることが考えられる。写真-7に、OPC試験体の中央部の細骨材とセメントペースト部のひび割れ発生状況を示す。

一方、フライアッシュを混和した試験体においては、表面部では全体的にひび割れは少なかったが、粗骨材の一部にひび割れが見られ、OPCの表面部と同様にセメントペースト部のひび割れも大きくなっていた。写真-8に、フライアッシュを混和した試験体の表面部の粗骨材とセメントペースト部のひび割れ発生状況を示す。一方、中央部では、粗骨材のひび割れは少ないが、一部の細骨材では、ひび割れが確認された。これは、フライアッシュを混和することにより、ASRが全体的に抑制されたが、粒子が細かく反応しやすい細骨材はASRが発生したが、粗骨材のASRの発生までには、至っていないためと考えられる。写真-9に、フライアッシュを混和した試験体の中央部の細骨材とセメントペースト部のひび割れ発生状況を示す。

偏光顕微鏡による内部組織の観察結果より、OPC試験体とFA試験体とのASRの発生度合には大きな差があることが明らかとなった。すなわち、今回の試験では、NaClを10kg/m³(Na₂O当量)添加してRC試験体を作製するという、非常に厳しい促進条件下であったことから、フライアッシュを混和した試験体においてもASRの発生が確認されたが、フライアッシュを混和することによって、ASR発生を効果的に抑制することができた。また、このことがコアの弾性係数や超音波伝播速度の測定結果にも表れていたと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた主な結果は以下に示す通りである。

- (1) モルタルバー法の結果より、シリカ量が比較的多く、比表面積も大きいJIS II種に適合するフライアッシュではASR抑制効果が期待できる最低置換率が10%であった。
- (2) 屋外暴露環境下のRC試験体の結果より、コンクリートにフライアッシュを15%置換したものはASR抑制効果を長期的に発揮することが確認できた。
- (3) RC試験体の膨張挙動およびフライアッシュによるASR抑制挙動は、モルタルバー法による挙動と相関性が高かった。このため、今回使用した河川

産骨材に関しては、モルタルバー法によるASR抑制効果の早期判定が可能であると判断できた。

- (4) 偏光顕微鏡による内部組織の観察結果より、フライアッシュを混和したRC試験体の内部組織では、ASRの発生が抑えられることにより、コンクリートのひび割れや膨張量が低減されていた。

参考文献

- 1) JIS A5308：付属書2（規定）アルカリシリカ反応抑制対策の方法，2003
- 2) JASS 5 T-405：アルカリシリカ反応抑制対策に用いるフライアッシュ性能判定基準，2007
- 3) 鳥居和之，野村昌弘，本田貴子：北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.185-197，2004
- 4) 竹内勝信，川村満紀，鳥居和之，谷川伸：自然環境に曝露したコンクリートのアルカリシリカ反応による膨張とひび割れ，コンクリート工学論文集，Vol.6，No.1，pp.11-19，1995
- 5) 川村満紀，竹本邦夫，加場重正：フライアッシュ及び高炉スラグのアルカリ・シリカ膨張抑制効果，セメント技術年報，No.40，pp.344-347，1986
- 6) 山本武志，金津努：API法によるフライアッシュのアルカリシリカ反応抑制効果の評価，土木学会論文集E，Vol.62，No.4，pp.657-671，2006
- 7) 平野貴宣，参納千夏男，橋本徹，鳥居和之：富山県海岸部における反応性骨材含有RC試験体の長期暴露性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008
- 8) 参納千夏男，鳥居和之，山戸博晃，野口陽輔：北陸地方産のフライアッシュによるアルカリシリカ反応の抑制効果，セメント・コンクリート論文集，No.58，2005
- 9) 小林和輔，森弥広，野村謙二：圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法，土木学会論文集，No.460，pp.151-154，1993
- 10) 大代武志，鳥居和之：富山県のASR劣化橋梁の実態調査に基づくASR抑制対策および維持管理手法の提案，コンクリート工学論文集，Vol.20，No.1，pp.45-57，2009
- 11) 土木学会，アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，II-116-II-119，2005
- 12) 久保善司，渡邊悠輔，森寛晃，小川彰一：ASR膨張が内部コンクリートの強度特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008