

論文 蒸気養生を施したフライアッシュ含有コンクリートの ASR 抑制効果の検討

宮野 暢紘^{*1}・久保 善司^{*2}・坪倉 幹浩^{*3}

要旨：近年、PC および PCa において ASR による劣化が確認され、これらは蒸気養生やオートクレーブ養生により促進されると指摘されている。ASR 抑制対策としてフライアッシュを混和する方法が挙げられる。本研究では、蒸気養生がフライアッシュ含有コンクリートの ASR 抑制効果に与える影響について検討を行った。その結果、蒸気養生（50℃,4 時間）がポゾラン反応および初期材齢の ASR に与える影響は顕著でなかった。また、蒸気養生の実施を含めて、厳しい条件下において、より確実性の高い ASR 抑制対策を実施する場合には、JIS 規格Ⅱ種相当品であれば置換率 20%程度で対応が可能であることが明らかになった。

キーワード：フライアッシュ、ポゾラン反応、ASR、蒸気養生

1. はじめに

わが国では、アルカリシリカ反応（以下、ASR）によるコンクリート構造物の劣化が報告され、近年ではプレストレストコンクリート（以下、PC）およびプレキャストコンクリート（以下、PCa）においてASRによる劣化事例が発見されている¹⁾。PCおよびPCaは、蒸気養生やオートクレーブ養生を行う場合が多く、これらがASRを促進する要因となることが指摘されている²⁾。ASRを抑制する対策としては、2002年に国土交通省から通達された「アルカリ骨材反応抑制対策」より、コンクリート中のアルカリ総量の抑制、抑制効果のある混合セメント等の使用、安全と認められる骨材の使用が挙げられる。アルカリ総量の規制については、飛来塩分や凍結防止剤など外部環境からのアルカリの侵入や骨材自身のアルカリ溶出を考慮すると、実環境下での構造物では規制値が妥当であるか必ずしも完全ではないことが指摘されている²⁾。また、安全と認められた骨材を使用することについては、骨材の正確な判定や安定的な供給の面から困難な場合もある。こうした状況では、循環型社会の構築に向けフライアッシュの有効利用を促進する上でも、ASR抑制対策用に低品位のものを含めたフライアッシュを混和材として用いることが一つの方法として挙げられる。

我が国においてフライアッシュの品質によるASR抑制効果の検討はモルタルバーによるものが多く報告されている^{3)~7)}。しかし、これらは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り、既往の実験結果から抑制効果が得られるコンクリート配合を決定することが困難な場合もある。また、既往の研究におい

ては、モルタルバー法（JIS A 1146）やASTM法（ASTM C 1260）により評価しており、水酸化ナトリウム（NaOH）を用いて等価アルカリ量を調整することが多く行われている。実構造物においては海洋環境に暴露されることおよび凍結防止剤の使用により塩化ナトリウム（NaCl）の供給が想定され、これらがASR抑制効果に与える影響も検討が必要とされる。

本研究では、フライアッシュの有効利用を念頭に置き、比較的品質の低いものを含む4種類のフライアッシュを用いて、蒸気養生がフライアッシュ含有コンクリートのASR抑制効果に与える影響を検討することとした。検討においては、コンクリート配合を用い、促進環境下における膨張挙動からASR抑制効果を把握することとした。また、初期材齢（14日、91日）における強度特性およびポゾラン反応性についても各種検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントとして普通ポルトランドセメント（密度＝3.14g/cm³，全アルカリ量＝0.47%）を用いた。細骨材には非反応の川砂（表乾密度＝2.56g/cm³）を使用した。また、粗骨材には既往の研究実績から反応性が認められた安山岩（表乾密度＝2.66g/cm³，アルカリ濃度減少量（Rc）＝111mmol/l，溶解シリカ量（Sc）＝196mmol/l，モルタルバー法による材齢6カ月時の膨張率＝0.46%）を使用した⁸⁾。安山岩のX線回折結果を図-1に示す。長石および石英の構成鉱物のほかに反応性鉱物であるクリストバライトが確認された。フライアッシュは、それぞれ産出場所の異なるJIS規格Ⅰ種品（以下、FA1），比表面積の

*1 住友大阪セメント（株） 北陸支店 工修（正会員）

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 准教授 工博（正会員）

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻（非会員）

表－１ フライアッシュの品質

種類	FA1 (JIS I 種)	FA2L (JIS II 種)	FA2S (JIS II 種)	FA4 (JIS II 種)
SiO ₂ (%)	60.4	61.0	56.4	49.6
湿分(%)	0.15	0.04	0.21	0.10
強熱減量(%)	2.50	2.20	2.05	2.10
密度(g/cm ³)	2.40	2.31	2.29	2.23
ブレーン比表面積(cm ² /g)	5300	3710	2820	3320
フロー値比(%)	109	104	103	106
活性度指数(%)	28day	90	93	82
	91day	103	101	100

表－２ 実験要因

NaClの調整による等価アルカリ量(kg/m ³)	4, 6, 8			
フライアッシュの品質	FA1 (JIS I 種)	FA2L (JIS II 種)	FA2S (JIS II 種)	FA4 (JIS II 種)
置換率(%)	10	20	20	30

表－３ コンクリート示方配合

W/B(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位量 (kg/m ³)								混和材 (FA)	空気量 (%)
			W	C	FA	S	G	NaCl	Ad1	Ad2		
45	45	44	160	356	－	765	1016	3.450	0.856	0.712	無混和	5.1
	50	44		320	36	756		3.865			FA1	2.2
	56	43		285	71	744		4.268			FA2L	1.8
	56	43		285	71	744		4.268			FA2S	2.3
	64	43		249	107	727		4.682			FA4	1.8

*Ad1：高性能減水剤

Ad2：AE剤

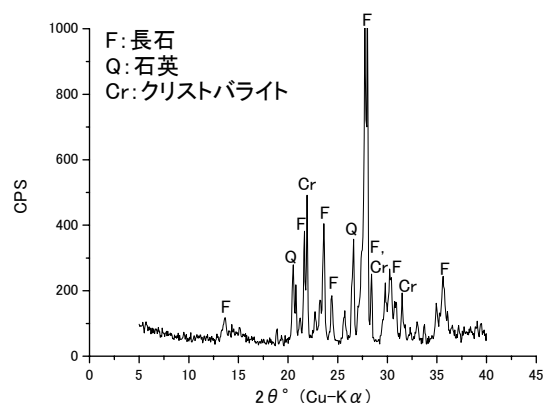
異なる２種類の JIS 規格Ⅱ種品(以下, FA2L および FA2S), また, 活性度指数が JIS 規格Ⅱ種の下限值内となるものの, 通常出荷時は JIS 規格Ⅳ種に相当する原粉のもの(以下, FA4) の４種類を用いた。フライアッシュの品質を表－１に示す。また, コンクリート中の等価アルカリ量を調整する NaCl には, 市販の食塩を用いた。

2.2 実験要因およびコンクリート配合

(1) 実験要因

コンクリートのアルカリ量は現状 3kg/m³以下であるが, 飛来塩分や凍結防止剤など外部環境からのアルカリの供給(NaCl)や骨材自身のアルカリ溶出などを想定し, 本研究では等価アルカリ量(Na₂O等量)を4kg/m³, 6kg/m³および8kg/m³と設定した。なお, アルカリ量はセメントと調整用に添加するNaClの総和とした。

ASR抑制効果を期待するフライアッシュの置換率は, JIS A 5308(付属書2)より15%以上とされている。一方, 低品位フライアッシュのASR抑制効果については, JIS規格Ⅲ種品および規格外であってもセメント内割り置換30%でASR抑制効果が発揮されたと報告されている⁶⁾。本研究では, 厳しい環境下においても品質に応じて



図－１ 安山岩の X 線回折図

十分な効果が見込める置換率を把握するために, 各種フライアッシュの置換率を以下のように定めた。JIS 規格Ⅰ種品のフライアッシュ(FA1)の置換率を高活性度による ASR 抑制効果に期待し10%とした。JIS 規格Ⅱ種品のフライアッシュ(FA2L, FA2S)の置換率は, 確実に ASR を抑制するよう20%とした。また, JIS 規格Ⅳ種品に近いⅡ種品のフライアッシュ(FA4)の置換率は, 活性度の低さを置換量によって補うこととし, 30%とした。実験要因を表－２に示す。

(2) コンクリート配合

モルタルバーでのASR抑制効果の検討では骨材のペシマ現象を再現できない場合もあるため、コンクリート配合にて検討を行った。コンクリートの水粉体比は、コンクリート二次製品を想定し、45%と設定した。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ペシマ現象を考慮し、既往の実績から100%とした⁸⁾。コンクリート配合を表-3に示す。

2.3 実験方法

(1) 供試体作製および養生条件

供試体寸法はφ100×200mmとした。フライアッシュ含有コンクリートを打設後、前置き1時間とし養生時間4時間の蒸気養生を行った。蒸気養生の温度条件は、高温下ではDEF生成が懸念されるため最高温度50℃と設定した。その後、20℃の室内にて静置し、翌日脱型を行った。脱型した供試体は、所定の期間まで密封養生を行った。

供試体は、蒸気養生を行う二次製品の出荷時を想定し、材齢14日まで密封養生を行い、フライアッシュによるASR抑制効果を評価するために、促進環境(40℃, 100%R.H.)下にて静置し、膨張量を測定した。

また、蒸気養生がフライアッシュ含有コンクリートにおけるASRおよびその抑制効果に与える影響を把握するために、初期材齢(14日、91日)において、圧縮強度試験および静弾性係数測定を実施するとともに、示差走査熱量分析(以下、DSC)も実施した。フライアッシュのASR抑制メカニズムにおいてポゾラン反応は大きな要因であるため、強度発現性およびDSCによる水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)生成量から、ポゾラン反応性を把握することとした。なお、DSCについては、等価アルカリ量6kg/m³を中心として実施し、他の要因については一部のもののみに実施した。実験のフローチャートを図-2に示す。

(2) 測定方法

圧縮強度試験は、JIS A 1108に準じて行い、圧縮強度は1要因につき3本の平均とした。また、静弾性係数測定は、JSCE 1988に準じて行い、静弾性係数は1要因につき2本の平均とした。DSCは、強度試験後の供試体中心部より採取した試料を用い、水和生成物(Ca(OH)₂)生成量を把握した。なお、Ca(OH)₂生成量は吸熱ピーク面積(J/g)を用いて評価した。試料は同一配合の供試体2本からそれぞれ採取し、Ca(OH)₂生成量はその平均とした。膨張量の測定方法は、供試体に取り付けたステンレスバンドの標点(ステンレス球埋込み)間距離をコンタクトゲージ(基長100mm)にて測定した。なお、膨張量の測定に用いる供試体は2本とし、膨張量はその平均とした。

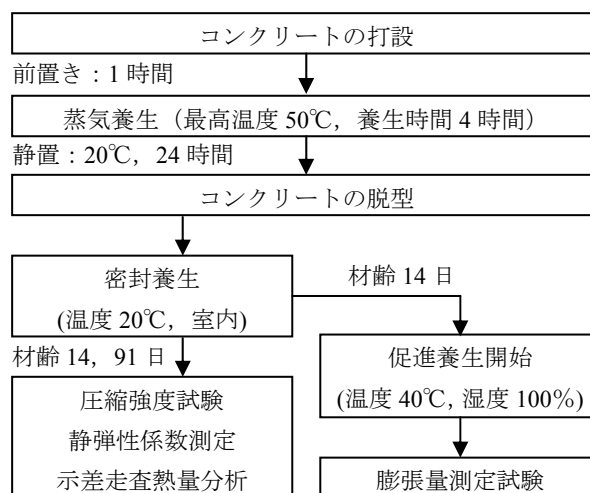


図-2 実験フローチャート

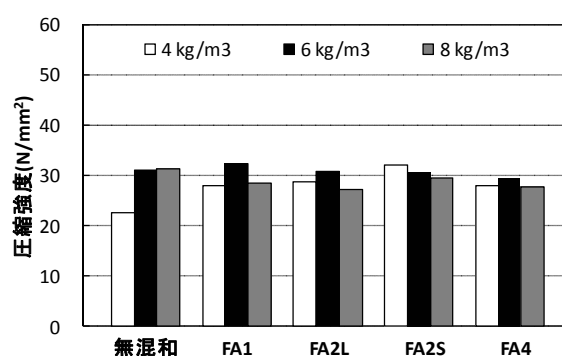


図-3 フライアッシュ含有コンクリートの圧縮強度（材齢 14 日）

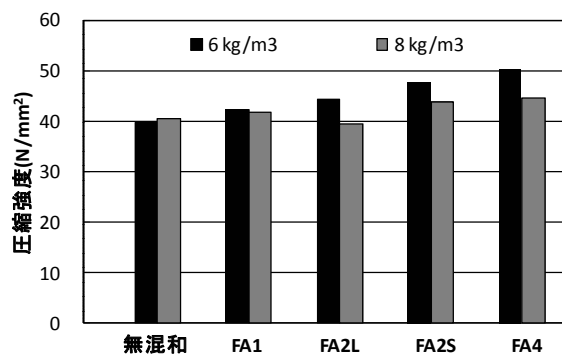


図-4 フライアッシュ含有コンクリートの圧縮強度（材齢 91 日）

3. 実験結果および考察

3.1 蒸気養生後の初期性状

(1) 強度発現

等価アルカリ量4kg/m³、6kg/m³および8kg/m³における、材齢14日でのフライアッシュ含有コンクリートの圧縮強度を図-3に示す。フライアッシュの混和、無混和および品質にかかわらず、同程度の圧縮強度を示した。これは、フライアッシュを混和したものにおいてフライアッシュによりセメントが置換された分の強度低下と、フライアッシュの未燃炭素の影響によって空気量が小さくなった（空気量は、フライアッシュを混和したもの約

2%, 無混和のもの約 5%) ことによる強度増加が影響したものと考えられる⁹⁾。

等価アルカリ量 6kg/m^3 および 8kg/m^3 における材齢 91 日での圧縮強度を図-4 に示す。フライアッシュの混和、無混和にかかわらず、材齢 14 日と比較して強度が増大し、フライアッシュの品質にかかわらず、置換率の大きいものほど若干強度が大きい傾向を示した。材齢 14 日時点では、フライアッシュの混和の有無にかかわらず、同程度の強度であり、材齢 91 日において混和したものの強度が若干大きくなったことから、材齢 14 日においては、フライアッシュのポズラン反応による強度への寄与はそれほど大きくなく、空気量の減少によって無混和のものと同程度となり、その後のポズラン反応の進行による強度寄与の影響が材齢 91 日強度に現れ、無混和のものよりも強度が大きくなる傾向を示したものと考えられる。したがって、強度発現性からは、今回の蒸気養生条件において蒸気養生がポズラン反応の進行に大きな影響を与えることはなかったものと考えられる。

(2) ASR 抑制効果

初期材齢における ASR 進行の有無を圧縮強度と静弾性係数の関係から検討することとした。等価アルカリ量 4kg/m^3 , 6kg/m^3 および 8kg/m^3 は同様な傾向を示したため、等価アルカリ量を区別せずフライアッシュの品質ごとに整理した。材齢 14 日における圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5 に示す。なお、図中の線は、土木学会標準示方書〔構造性能照査編〕の値を示す。ASR が進行した場合、圧縮強度に比して静弾性係数の低下が大きいことが知られている^{10),11)}。フライアッシュの混和、無混和にかかわらず、圧縮強度と静弾性係数をプロットした点は健全なコンクリートが示す曲線の近傍に位置し、静弾性係数の顕著な低下は認められなかった。

材齢 91 日における圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6 に示す。材齢 14 日同様、圧縮強度と静弾性係数をプロットした点は健全なコンクリートが示す曲線の近傍に位置し、静弾性係数の顕著な低下は認められなかった。

したがって、今回の蒸気養生条件においては、等価アルカリ量およびフライアッシュの混和の有無にかかわらず、蒸気養生による初期材齢の ASR の進行はなかったものと考えられる。

(3) ポズラン反応

初期材齢におけるフライアッシュのポズラン反応性を $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量によって把握することとした。等価アルカリ量 4kg/m^3 , 6kg/m^3 および 8kg/m^3 における、材齢 14 日でのフライアッシュ含有コンクリートの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量を図-7 に示す。等価アルカリ量にかかわらず、フライアッシュ置換率が大きいものほど $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量が

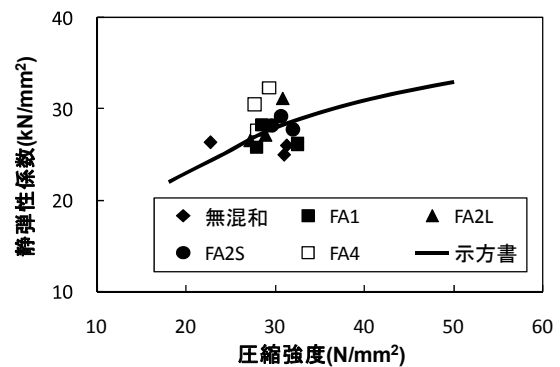


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係 (材齢 14 日)

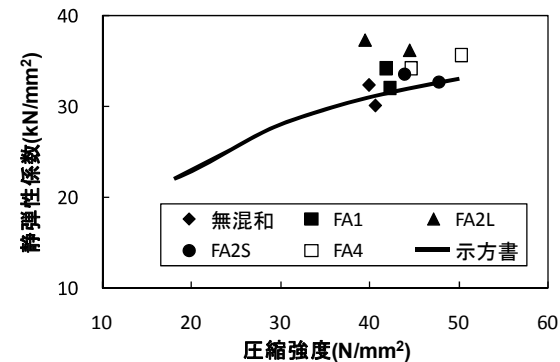


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係 (材齢 91 日)

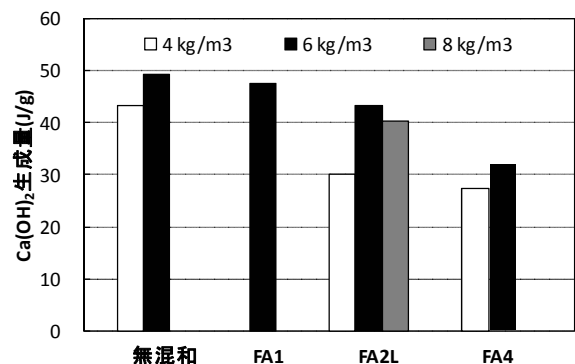


図-7 フライアッシュ含有コンクリートの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量 (材齢 14 日)

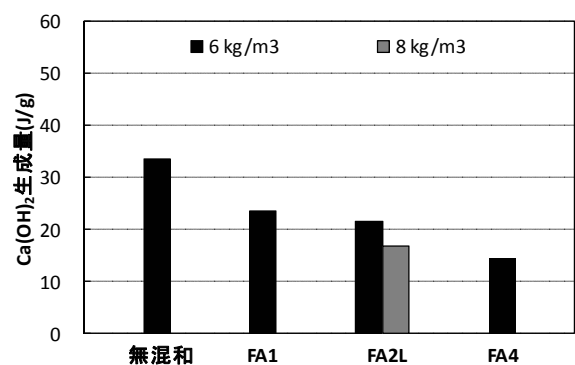


図-8 フライアッシュ含有コンクリートの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量 (材齢 91 日)

小さくなる傾向が確認された。フライアッシュ置換によるセメント量の減少およびフライアッシュのポズラン反応によって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が減少したものと考えられる。また、 NaCl 添加による影響は顕著でないものと考えられる。

等価アルカリ量 6kg/m^3 および 8kg/m^3 における、材齢 91 日でのフライアッシュ含有コンクリートの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量を図-8に示す。材齢 14 日同様、フライアッシュ置換率が大きいものほど $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量が小さくなる傾向を示した。材齢 14 日以降にボズラン反応が進行し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費が進行したものによるものと考えられる。3.1(1)における材齢 91 日でのフライアッシュ混和のものの強度増大は、その証左と考えられる。強度発現および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量の結果から、蒸気養生がボズラン反応の進行に大きな影響はなかったものと考えられる。

なお、フライアッシュ無混和のものにおいて、材齢経過にともない $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量が減少しているが、その原因については今後更なる検討を行う必要がある。

3.2 フライアッシュの品質が ASR 抑制効果に与える影響

(1) 等価アルカリ量 4kg/m^3

現状の等価アルカリ量規制の 3kg/m^3 に外部からのアルカリ供給を想定し、実環境での危険側として等価アルカリ量 4kg/m^3 でのフライアッシュによる ASR 抑制効果を検討した。促進環境 (40°C 、 $100\%\text{R. H.}$) 下での等価アルカリ量 4kg/m^3 のコンクリートの膨張量測定結果を図-9に示す。等価アルカリ量 4kg/m^3 のものの膨張量は、フライアッシュの混和、無混和にかかわらず、材齢 300 日における膨張率が 0.05% 以下となり ASR による膨張は確認されなかった。本研究においては、 NaCl により等価アルカリ量を調整したため、既往の研究で実績のある NaOH と比較すると、コンクリートの OH^- 濃度が低かったため、アルカリシリカゲルの生成が顕著に起きなかったもの推察される。一般的に、同一の等価アルカリ量においては、 NaOH で調整したものの方が膨張量が大きくなる傾向にある¹²⁾。

(2) 等価アルカリ量 6kg/m^3

外部からのアルカリ供給や内在するアルカリ量など、実環境において考え得る厳しい条件を想定し、等価アルカリ量 6kg/m^3 でのフライアッシュによる ASR 抑制効果を検討した。等価アルカリ量 6kg/m^3 のコンクリートの膨張量測定結果を図-10に示す。無混和のものの膨張量は、材齢 220 日において 0.1% に達し ASR による膨張が確認された。一方、フライアッシュを混和したものは品質にかかわらず、膨張傾向が確認されなかった。フライアッシュによる ASR の抑制効果が確認された。フライアッシュによるセメント置換およびボズラン反応によって OH^- 濃度が低減され、ASR が抑制されたものと考えられる。

(3) 等価アルカリ量 8kg/m^3

フライアッシュの品質による ASR 抑制効果を評価するため、確実に ASR を起こることを期待し等価アルカリ量 8kg/m^3 とし、フライアッシュによる ASR 抑制効果を

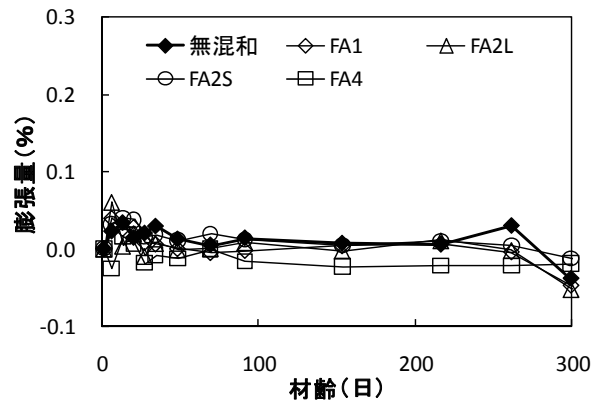


図-9 フライアッシュ含有コンクリートの膨張率の経時変化（等価アルカリ量： 4kg/m^3 ）

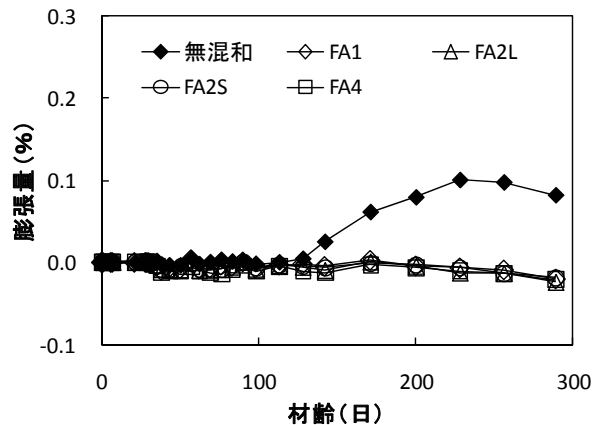


図-10 フライアッシュ含有コンクリートの膨張率の経時変化（等価アルカリ量： 6kg/m^3 ）

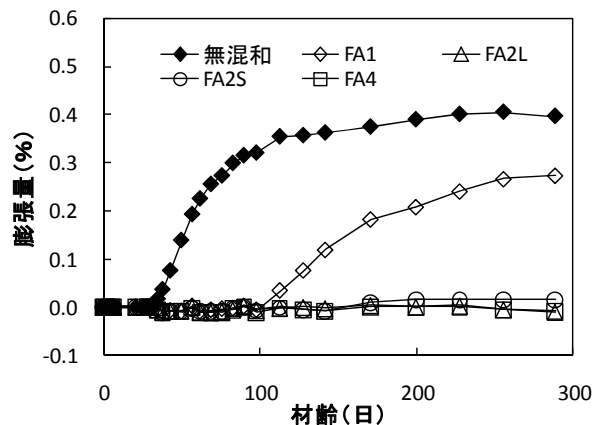


図-11 フライアッシュ含有コンクリートの膨張率の経時変化（等価アルカリ量： 8kg/m^3 ）

検討した。等価アルカリ量 8kg/m^3 におけるコンクリートの膨張量測定結果を図-11に示す。無混和のものの膨張量は、材齢 30 日経過時点で膨張傾向を示し、材齢 200 日にて 0.4% と大きな膨張を示した。供試体表面には複数のひび割れが確認され、ASR による膨張が確認された。

FA1 を混和したものにおいては、無混和のものと比較して、膨張開始時期や膨張量は抑制されたものの、材齢 300 日にて 0.3% の大きな膨張を生じた。ボズラン反応性

が高いほどASRを抑制する効果が高まるとされており⁴⁾、その効果を期待し置換率を10%としたが、十分な抑制効果が発揮されなかった。厳しい条件下においては、高品質なフライアッシュにおいても通常推奨される置換率（15%以上）が必要であるものと考えられる。

FA1 以外のフライアッシュについては、いずれの品質のものも良好な抑制効果が発揮されており、厳しい条件下において確実な抑制が期待できる置換率としてⅡ種品相当のものであれば、置換率20%で対応が可能であるものと考えられる。なお、FA4 については、置換率を30%としたが、品質としてⅡ種品の範囲内であり、活性度も高いことから、20%程度でも効果が得られた可能性があり、より低品位のフライアッシュの置換率については今後の検討が必要である。

(4) フライアッシュの適用性

現状の等価アルカリ量規制 3kg/m^3 より厳しい条件を想定し、フライアッシュによるASR抑制効果を検討した。反応性骨材が含有する可能性が高く、かつ等価アルカリ量 3kg/m^3 を超える場合や、反応性骨材が含有する可能性が高く、かつ蒸気養生・オートクレーブなどの高温下の履歴を受ける場合などの厳しい条件において、より確実性の高いASR抑制対策を実施する場合には、JIS規格Ⅱ種相当品であれば、本研究で設定した置換率20%程度で対応が可能であるものと考えられる。

一方、より低品位のものであれば置換率をさらに上げることで対応が可能であるものと考えられる。骨材の多様化や厳しい環境条件などにおいては、フライアッシュの品質に応じた置換率を設定し、対応することもフライアッシュの有効利用および骨材供給において有効な対策の一つであろう。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 蒸気養生（最高温度 50°C 、養生4時間）を施したコンクリートにおいて、初期材齢14日および91日時点では顕著なASRは確認されなかった。
- (2) 本研究で設定した蒸気養生条件においては、養生後のポズラン反応の進行に顕著な影響は与えなかった。
- (3) 等価アルカリ量 8kg/m^3 においては、JIS規格Ⅰ種品の置換率10%の使用では十分な抑制効果は発揮されなかった。厳しい環境条件においては高品質なフライアッシュにおいても通常推奨される置換率（15%）が必要である。

- (4) 厳しい条件において、より確実性の高いASR抑制

対策を実施する場合、JIS 規格Ⅱ種相当品であれば、置換率20%程度で対応が可能である。

参考文献

- 1) 尾花祥隆，鳥居和之：プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材におけるASR劣化の事例検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1065-1070，2008.6
- 2) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するかー試験，診断と対策の課題，セメント・コンクリート，No.696，pp.1-9，2005.2
- 3) 井上毅，大賀宏行，丸山修，長滝重義：フライアッシュのキャラクタリゼーションがアルカリ骨材反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.11，No.1，pp.93-98，1989.6
- 4) 川村満紀，竹本邦夫，榑場重正：フライアッシュおよ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.344-347，1986.2
- 5) 伊東尚子，二村誠二：種類の異なるフライアッシュのASR防止対策に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1233-1238，2006.6
- 6) 西林新蔵，小谷憲司，高見新一，黒田保：低品位フライアッシュのASR抑制に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.53-58，2003.6
- 7) 小林茂敏，中野毅弘，柳田力，穂積豊：我が国産フライアッシュのASR抑制効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.10，No.2，pp.815-820，1988.6
- 8) 川崎文義，久保善司，横山広，山田卓司：剥離強さ試験を用いた剥離防止性能の評価について，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，Vol.14，pp.445-446，2007.3
- 9) 小澤国大，久保善司：種々の反応性骨材を用いたフライアッシュ含有コンクリートの初期性状に関する検討，土木学会中部支部，Vol.22，No.2，pp.67-72，2000.3
- 10) 小林一輔，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，Vol.18，No.460，pp.151-854，1993.2
- 11) 小林一輔編：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ2 アルカリ骨材反応の診断，森北出版，1991
- 12) 松元淳一，武若耕司，山口明伸，梅木真理：塩害とASRの複合劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.639-644，2008.6