

フライアッシュを混入したプレストレストコンクリートの諸特性に関する検討

徳島大学大学院	修 (工)	○山田 悠二
福岡大学工学部	博 (工)	橋本 紳一郎
(株)富士ピー・エス 正会員	博 (工)	徳光 卓
(株)富士ピー・エス 正会員	修 (工)	正木 守

Abstract : In this paper, fly ash (FA) mixed concrete which were assumed as prestressed concrete were studied about properties of fresh and compressive strength in the condition of hot weather. Also, as the examinations in durability, we studied about suppressions of chloride penetrations and ASR. In the result, target slump, slump flow and target air were satisfied though hot weather. Also, some mix proportions achieved target strength which was required in 7days. About durability, chloride penetrations and expansions caused by ASR decreased in FA mixed concrete which replaced to cement by 10%.

Key words: Fly ash, Hot weather concrete, Compressive strength, Chloride permeability, ASR

1. はじめに

フライアッシュ (以降, FAと称す) をコンクリートに混和することで各種性状の向上を図れるが, 早期強度発現の遅延による工場サイクルへの影響や, エントレインドエアの確保などの品質管理への懸念からプレストレストコンクリート (以降, PCと称す) に適用された事例は少ない。

これに対し著者らは, 凍害の恐れが少なく, 比較的に空気量の確保に冗長性を持たせることができる九州地方での使用を目標に, FAのPCへの適用性について検討してきた^{1,2)}。その結果, FAを質量置換で内割10%までならプレテンション部材に適用できる可能性を示唆し, 既報で報告した。

今後, 実用化を図るうえでは, コンクリートの練混ぜ時期 (打設時期) による影響を受けずに所要のワーカビリティや強度を確保できるかということや, 九州地方での適用を鑑みると塩化物イオンの浸透やASRに対する抑制効果を把握しておくことは有効である。

本実験ではPCを想定し, 高粉体としたFA混和コンクリートの強度水準を変化させて, 練混ぜ時期がフレッシュ性状や強度性状に与える影響と, 塩化物イオンの浸透とASRに対する抑制効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し, FAはJIS II種灰を使用した。廃ガラス細骨材はASRの促進を目的としたもので, 福岡市内で入手可能な廃ガラスを破碎,

表-1 使用材料

種類:記号	物性
早強ポルトランドセメント: C	密度3.14g/cm ³ ,比表面積4680cm ² /g,強熱減量1.02%*Na ₂ O換算値0.46%
フライアッシュ: FA (JIS II種灰)	密度2.28g/cm ³ ,比表面積4030cm ² /g,強熱減量1.6%
砕砂: S1	密度2.75g/cm ³ ,吸水率0.64%
海砂: S2	密度2.60g/cm ³ ,吸水率0.63%
廃ガラス細骨材: S3	密度2.61g/cm ³ (廃ガラスの平均密度)
砕石: G	密度2.66g/cm ³
高性能減水剤: Ad	密度1.06g/cm ³ ,ポリカルボン酸エーテル系

*Na₂O換算値は直近6ヶ月間における全アルカリ量の最大値の最大



写真-1 廃ガラス細骨材

粒度整, 混合したものである(写真-1)。そのため材質にはばらつきを有するが, 試験体間の相対比較には使用可能と判断した。

2.2 コンクリートおよびモルタルの配合条件

コンクリート配合を表-2, モルタル配合を表-3に示す。コンクリートは材齢7日での目標圧縮強度を, 40, 50, 70N/mm² (以降, Fc40, Fc50, Fc70と称す) の3水準とし, いずれもプレテンション部材を想定した。FAはセメントに対して質量置換し, 置換率は0%, 10%, 20% (以降, FA0, FA10, FA20と称す) の3水準とした。フレッシュ性状は, Fc40, Fc50 配合の目標スランプを18±2.5cm, Fc70配合は目標スランプフローを50±7.5cm, 目標空気量は凍結融解が生じないことを前提に2.0±1.5%とした。

表-3のモルタル配合は, 表-2に示すコンクリートの配合と同じ水結合材比とし, 細骨材の一部に廃ガラス細骨材を100kg/m³質量置換した。

2.3 養生方法

コンクリートには図-1に示すプログラムで蒸気養生を行った。図示するように, 前養生(20℃)を4時間とし, 15℃/hで昇温, 最高温度50℃で3時間保持し, 3.75℃/hで20℃まで降温した。また, 養生条件の違いによる強度への影響を検討するため, 水中養生(水温 20±1℃)のみを行った場合と, 蒸気養生後に水中養生を行った場合, 蒸気養生後に恒温室内(室温 20±1℃)で気中養生を行った場合の3水準の養生条件を設けた。モルタルバーは水中養生を28日間行った後, 促進モルタルバー法による骨材のアルカリシリカ反応性試験(デンマーク法)に供した。表-4に養生条件をまとめたものを示す。

2.4 実験方法

(1) フレッシュ性状試験

コンクリートに対し, スランプ試験を JIS A 1101, スランプフロー試験を JIS A 1150, 空気量試験を JIS A 1128 に準拠して行った³⁾。また, 外気温とコンクリートの練上がり温度も測定した。

(2) 強度試験

コンクリートの圧縮強度試験をJIS A 1108に準拠して実施した³⁾。

(3) 塩水浸せき試験

試験体は, 蒸気養生後に材齢28日まで水中養生した角柱(100×100×400mm)を四分割(100×100

表-2 コンクリート配合 (フレッシュ性状, 強度, 塩分浸透の検討)

配合	FA 置換率 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad (B×%)	
				W	C	FA	S1	S2		G
Fc40	0				367	0	451	426	984	B×1.1
	10	45	47	165	330	37	448	424	979	B×1.1
	20				294	73	446	421	971	B×1.1
Fc50	0				434	0	418	395	990	B×1.0
	10	38	45	165	391	43	415	393	984	B×1.0
	20				347	87	413	390	974	B×1.0
Fc70	0				567	0	399	377	904	B×1.3
	10	30	46	170	510	57	393	372	894	B×1.25
	20				454	113	391	369	886	B×1.15

表-3 モルタル配合 (ASRの抑制に関する検討)

配合	FA 置換率 (%)	W/B (%)	単位量(kg/m ³)					セメント アルカリ量	
			W	C	FA	S1	S2		S3
Fc40	0		261	579	0	658	619	2.7	
	10	45	260	520	58	651	613	100	2.4
	20		259	461	115	644	607		2.1
Fc50	0		262	688	0	609	573		3.2
	10	38	261	618	69	602	566	100	2.8
	20		259	546	136	593	558		2.5
Fc70	0		256	855	0	546	513		3.9
	10	30	255	766	85	537	505	100	3.5
	20		254	677	169	527	495		3.1

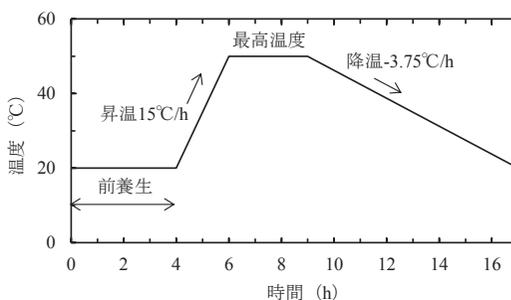


図-1 蒸気養生プログラム

表-4 養生条件

対象	表記	養生条件
コンクリート試験体	水中	水中養生のみ
	蒸気→水中	蒸気養生後に水中養生
	蒸気→気中	蒸気養生後に気中養生
モルタルバー	水中	水中養生のみ

×100mm) し、浸せき面以外をエポキシ系樹脂で被覆したものとした。浸せきは、JSCE-G572 に準拠し、水温 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ に保ったNaCl 濃度10%の水溶液に浸せきさせた³⁾。ドリル削孔により深さ0~0.5cm, 1.0~1.5cm, 2.0~2.5cm, 3.0~3.5cmで試料を採取した。測定は電位差滴定法により、全塩化物イオン量を浸せき日数7, 14, 28, 91日の時に測定した。

また、塩分供給方法による影響を検討するため、浸せきのみを行った場合（以降、連続浸せきと称す）と、4日間の浸せき後、試験体を塩水から取り出して室温 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ で3日間の気中養生を行う工程を1サイクルとし、この工程を繰り返した場合（以降、乾湿繰り返しと称す）の2水準で試験を実施した。

(4) 促進モルタルバー法（デンマーク法）による膨張率の測定

コンタクトチップを貼付したモルタルバー（ $40\times 40\times 160\text{mm}$ ）を 50°C の養生槽内で10%濃度のNaCl溶液に浸せきしてASRを促進させ、コンタクトゲージ法（JIS A 1129-2）により膨張率を14日間隔で測定した。試験期間に関しては、通常のデンマーク法では促進材齢91日までで評価するが、本実験では91日以降の膨張率も測定し、長期の膨張挙動も確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 練混ぜ時期によるフレッシュ性状への影響の検討

表-5に夏期と標準期におけるフレッシュ性状試験結果を示す。コンクリートの練り混ぜは夏期・標準期ともに風通しの良い屋内で行ったため、日光がコンクリートに直射することはなかった。外気温は夏期で $30.4\sim 31.4^{\circ}\text{C}$ で、標準期では $20.7\sim 22.8^{\circ}\text{C}$ であり、夏期と標準期で平均 8.9°C 程度の気温差が生じた。コンクリート温度は夏期で $28.2\sim 29.5^{\circ}\text{C}$ 、標準期で $18.8\sim 20.5^{\circ}\text{C}$ となり、平均で約 9.4°C の温度差が生じた。この範囲では時期によらず、どの配合も混和剤の添加量は一定のまま、所要のスランブ・スランブフロー、空気量が得られた。このことから、練混ぜ時期の違いによるフレッシュ性状の変動は小さく、次節に示す強度試験結果にはこれらフレッシュ性状による影響はないと思われる。

また、本配合の対象はプレテンション部材であり、工場内での練混ぜ・打設を想定している。よって練混ぜから打設までの時間が短いため、工場で打設される範囲では、夏期の高い外気温・コンクリート温度の中でも本配合は所要のワーカビリティを得られると考えられる。

3.2 打設時期と強度特性に関する検討

図-2に夏期と標準期における蒸気養生を行った場合の材齢7日での圧縮強度を示す。なお、コンクリートの練上がり温度は表-5に示す通りである。標準期ではいずれの配合、養生条件においても所要の圧縮強度を満たすことができた。一方、夏期においては、Fc70はFA混和の有無や養生条件によらずいずれも所要の強度を満たせなかった。この要因は今後追及すべき課題であるが、夏期においてもFA混和によりFA0と比べて強度が大幅に低下するといったことはなかった。

表-5 フレッシュ性状

配合	FA 置換	スランブ * (cm)		空気量 (%)		気温 ($^{\circ}\text{C}$)		湿度 (%)		練上り 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	
		夏	標準	夏	標準	夏	標準	夏	標準	夏	標準
Fc40	FA0	19.5	17.0	2.4	3.2	31.4	22.8	52.0	41.0	29.5	19.4
	FA10	19.5	19.0	2.7	2.5			52.0	40.0	29.5	19.3
Fc50	FA0	18.5	15.5	2.1	2.5	30.4	22.8	67.0	50.0	28.2	19.8
	FA10	19.0	18.0	3.0	1.6			67.0	50.0	28.4	20.5
Fc70	FA0	43.5	43.0	3.0	1.7	31.1	20.7	67.0	44.0	28.9	18.8
	FA10	58.0	50.0	3.1	1.3			67.0	45.0	28.8	19.3

*Fc70はスランブフロー

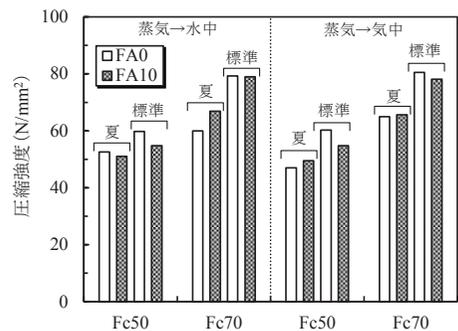


図-2 夏期および冬期における材齢7日の圧縮強度

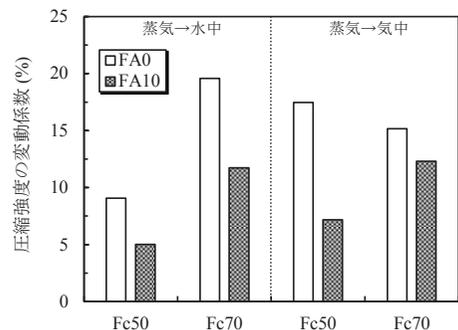


図-3 標準期に対する夏期の圧縮強度の変動係数

図-3に、標準期に対する夏期の圧縮強度の変動係数を示す。いずれの配合・養生条件でもFA0よりFA10の方が時期の違いによる強度の変動は小さくなった。

図-4に夏期に打設したコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示す。材齢56日では、蒸気養生を行った場合はどの配合においても、水中養生のみを行った場合と比較して圧縮強度は小さくなった。また、この傾向はFc70で顕著に表れ、水中養生のみを行ったものと蒸気養生を行ったものでは、30N/mm²程度もの差が見られた。既往の研究では、セメント中のC₃Sの含有量が多い場合、60℃以上の温度履歴を受けることにより細孔量が増大して強度増進は低下するとしている⁴⁾。本実験では蒸気養生槽内の最高温度は50℃としたが、高い外気温の中で打設したために練上がり温度が高くなったことが、コンクリートの温度履歴に影響した可能性が示唆される。このために細孔径が増大して材齢28日以降の強度増進は低下傾向を示し、特に単位セメント量が多いため、C₃Sの含有量が相当に多いであろうFc70で影響が大きかったのではないかと考えられる。

FA混和の影響に着目すると、Fc40およびFc50では蒸気養生後に水中養生を行った場合、FA0よりもFA10の方が材齢28日から56日の強度増進は大きくなった。

著者らは既報で蒸気養生後に水中養生することで早期のポズラン反応により早期強度の発現が良好になる可能性を示唆した¹⁾。今回の結果は28日以降もポズラン反応による強度増進を期待できる可能性を示すものとなった。一方、蒸気養生後に気中養生を行った場合ではFA0とFA10の強度増進にあまり差が生じなかった。

3.3 塩化物イオンの浸透抑制に関する検討

図-5に各塩分供給方法での単位面積あたりの塩化物イオン量と浸せき日数の関係を示す。塩化物イオン量は各深さの塩化物イオン濃度を深さ方向に積分し求めた。

連続浸せきの場合にはいずれの配合も浸せき日数が経つに従って塩化物イオン量は大きくなる傾向にあった。一方、乾湿繰り返しではFAを置換したFc50とFc70において、浸せき14日または28日以降で塩化物イオン量がほとんど増加しなかった。既往の研究では、FA混和コンクリートを用いた護岸構造物の飛沫帯における塩化物イオンの浸透を経年的に測定しており、その結果、浸透は長期的に停滞していたと報告している⁵⁾。このような傾向は乾湿繰り返しを行って塩分を供給させた本実験結果でも同様であった。Fc50、Fc70に比べてFc40の塩

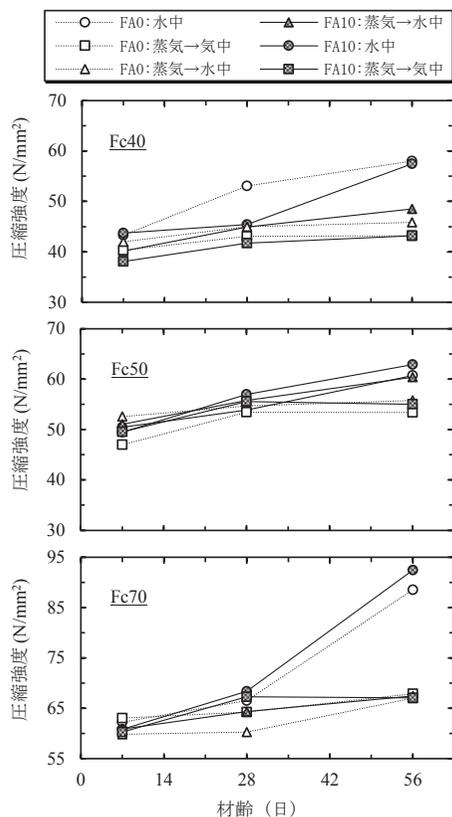


図-4 材齢と圧縮強度の関係 (夏期)

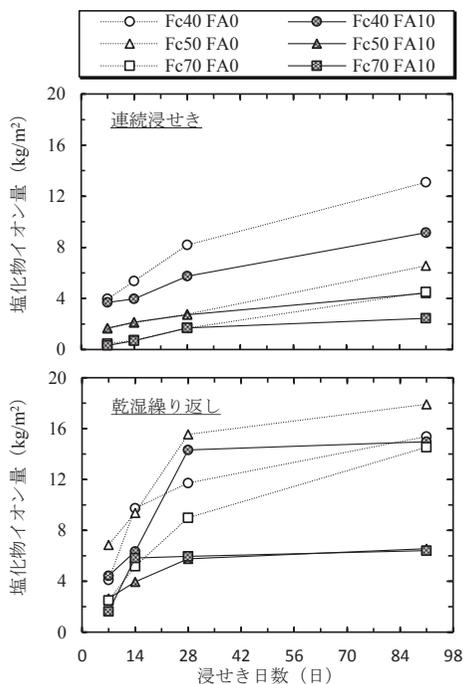
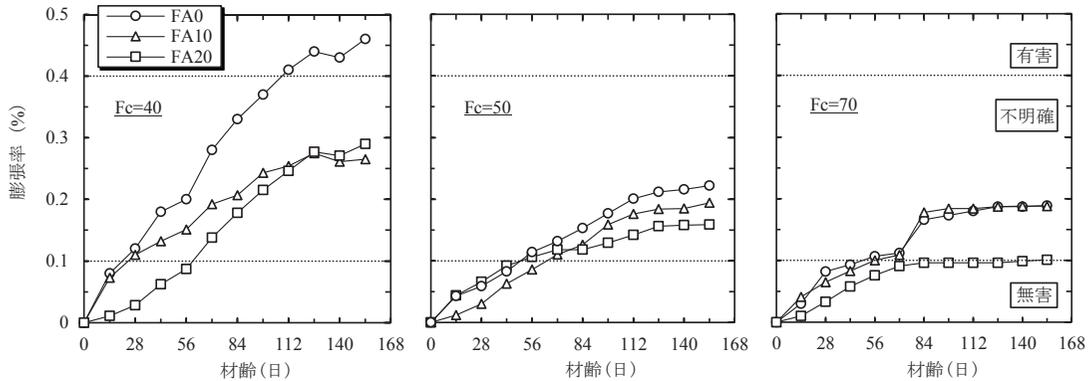


図-5 単位面積あたりの塩化物イオン量と浸せき日数の関係



図－6 膨張率と促進材齢の関係

化物イオン量が大きいの、水結合材比が大きいのほど細孔径が大きいためと考えられるが、28日以降の塩化物イオン量が増加していないため、いずれの配合もFA混和によりコンクリートが緻密化したと考えられる。

以上から、単位面積あたりの塩化物イオン量では、FAを混和したものでは塩分浸透の停滞が認められ、高い塩分浸透抵抗性を有することが確認された。

3.4 ASRの抑制に関する検討

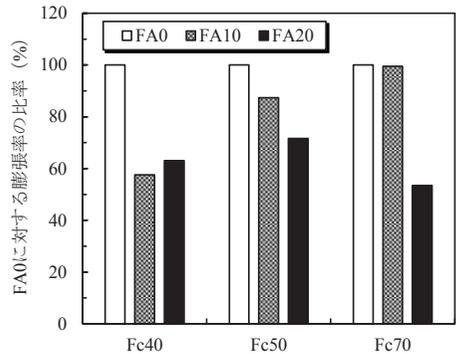
図－6に促進材齢と膨張率の関係を示す。図中の破線は、デンマーク法における判定基準であり、膨張率0.1%未満が「無害」、0.1～0.4%未満が「不明確」、0.4%以上は「有害」と判断される。

今回、もっとも膨張率が增大したのはFc40のFA0で、膨張率の増進は他の目標強度のものよりも大きく、促進材齢98日から112日にかけて0.4%を超え「有害」となった。一方、FA0のFc50やFc70ではそれぞれ促進材齢128日と84日から膨張率の増加は頭打ちとなり、今回の期間では「有害」には至らなかった。このように、配合によっては「有害」と判断されるほど膨張しているため、本試験条件は配合間で相対比較を行う分には十分なものであると思われる。また、目視確認では、シリカゲルの滲出やひび割れはどの試験体にも見られなかった。

一般には単位セメント量が多いほどアルカリ当量が多くなるため、ASRが発生しやすいと考えられているが、本試験では、単位セメント量が最も少ないFc40の膨張率ももっとも大きくなった。文献では⁹⁾、生成されたシリカゲルの膨張は外部から供給された水を吸水することの影響が大きいとされる。Fc40はFc50やFc70に比べて水セメント比が大きいため、モルタル中の細孔径はFc50やFc70よりも大きいと推定される。このため、外部からの水がモルタル内部に供給されやすくなり、膨張率が大きくなったと推察される。一方で、Fc50やFc70のようにPCを想定した単位セメント量が多い配合の中でも、強度水準が高い場合にはコンクリートの緻密性により膨張率を抑えられる可能性が示唆される。

FA混和による膨張率の抑制効果について着目すると、Fc40ではFA10でも効果がよく発揮され、FA0よりも膨張率の増加は緩和されて今回の範囲では「不明確」に収まった。Fc50ではFAの置換率が大きいほど膨張率は小さくなり、FA10でも促進材齢70日以降では膨張率がFA0よりも低下したが、Fc40と比べると効果は小さかった。Fc70ではFA0とFA10でそれほど膨張挙動に相違は生じなかったが、FA20では促進材齢70日以降の膨張率がFA0の半分程度にまで抑制され、ほぼ「無害」の範囲に収まった。以上より、Fc40およびFc50ではFA内割り10%でも膨張率の抑制を図ることができた。

図－7は各種配合における促進材齢154日での膨張率をFA0の膨張率に対する比率として示したも



図－7 FA0に対する膨張比率

のである。FA10に着目すると、Fc40ではFA0の6割程度、Fc50では9割程度、Fc70ではFA0とほぼ同程度であり、強度水準が高いほど抑制効果は小さいことがわかる。一方、FA20の場合ではFA0の5割～7割程度の範囲に膨張率を抑制できた。

JIS A 5308では、FA (JIS II種灰) の混和によりASR対策を行う場合、FAをセメントに対して15%以上質量置換することで効果を期待できるとされる³⁾。今回はFc40とFc50において、置換率10%でも膨張率の低減が確認されたが、あくまでも本試験は配合間で相対評価を行うことを目的としたため、今後は粗骨材としても反応性骨材を用いるなど、さらに厳しい条件のもと詳細な検討を継続したい。

4. まとめ

本実験では、PCへの適用を想定して高粉体とし、さらに強度水準を変化させたFA混和コンクリートを用いて、夏期と標準期におけるフレッシュ性状および強度性状、塩分浸透抵抗性やASRに対する抑制効果などの耐久性に関する検討を行った。本実験の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 本実験で使用した配合では、外気温が30℃を超える夏期においても所要のスランプ・スランプフロー、空気量を得られた。これより、本配合はコンクリートの練混ぜから打設までの時間が短い工場内での製造を行う分には、夏期でも十分なワーカビリティを確保できると思われる。
- (2) FA混和の有無によらず、夏期に打設したコンクリートは材齢7日での圧縮強度は標準期に打設したもののよりも低下したが、FA混和コンクリートは早強単味よりも打設時期の違いによる強度の変動は小さかった。また、蒸気養生後に水中養生を行ったFA混和コンクリートでは、材齢28日以降にもポゾラン反応による強度増進を期待できる可能性が示唆された。
- (3) FAを内割10%置換したコンクリートでは、単位面積あたりの塩化物イオンの浸透は浸せき日数14日もしくは28日以降で停滞が見られたため、高い塩分浸透抵抗性を有することが認められた。
- (4) 廃ガラス細骨材を混和したモルタルバーによりASRに対する抵抗性を検討した。その結果、強度水準が高い配合ではASRによる膨張は小さくなった。また、FAを混和した場合は、ある強度水準まではFAを内割10%置換でも膨張を抑制できた。

本来であれば適切な環境下でコンクリート打設を行うことが前提ではあるが、外気温30℃を超える夏期においても所要の品質をある程度は確保できたことを踏まえると、FA混和コンクリートの品質管理への懸念が緩和されることが期待される。また、FAをセメントに対して内割10%置換でも塩分浸透抵抗性やASRの抑制を期待できる可能性が示唆され、その有用性が認められた。

参考文献

- 1) 山田悠二, 橋本紳一郎, 徳光卓, 山田雅彦: フライアッシュのプレストレストコンクリートへの適用に関する基礎的研究, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.521-526, 2013
- 2) 山田悠二, 橋本紳一郎, 徳光卓, 正木守: プレストレストコンクリートにおけるフライアッシュの適用性に関する検討, 第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.263-268, 2014
- 3) 土木学会: 2013年制定 コンクリート標準示方書 [規準編], 2013
- 4) 森本丈太郎, 魚本健人: 初期高温養生したポルトランドセメントの水和に関する研究, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.17, No.1, pp.651-654, 1995
- 5) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治: 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010
- 6) セメント協会: コンクリート技術者のためのセメント化学雑論, pp.114-115, 1985