

# 論文 舗装コンクリートの力学的性状および極初期性状に及ぼす改質フライアッシュの影響に関する実験的検討

石田 征男<sup>\*1</sup>・佐藤 嘉昭<sup>\*2</sup>・大谷 俊浩<sup>\*3</sup>・梶尾 聡<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本検討では、改質フライアッシュを用いた舗装コンクリートの実用化を目的として、力学的性状および極初期材齢におけるコンクリート性状について検討した。その結果、改質フライアッシュを使用した舗装コンクリートは、ブリーディングの発生挙動および凝結時間が改質フライアッシュ未使用の場合と異なり、プラスチック収縮ひび割れの発生の抑制に寄与する可能性があることを示した。また、改質フライアッシュを用いた舗装コンクリートの材齢 28 日における曲げ強度は、既往の研究で提案されているフライアッシュの圧縮強度に対する強度寄与率を用いて推定できることが明らかになった。

**キーワード:** 改質フライアッシュ, コンクリート舗装, プラスティック収縮ひび割れ, 曲げ強度, 強度寄与率

## 1. はじめに

コンクリート舗装は、耐久性が高く、環境負荷軽減への効果が高いことを特長としているため、利用拡大の機運が高まっている。今後はコンクリート舗装の長所をさらに高め、社会的価値を一層向上することが必要である。

近年、地球環境への影響や副産物の有効利用の観点から、各種混和材料の利用拡大の動きが拡大している。フライアッシュは、コンクリートの品質向上に多くの利点を有するが、品質変動が大きいことが普及の阻害要因となっている。このような中、強熱減量を 1%以下に低減した改質フライアッシュ（以下、CfFA）が開発され、実構造物への適用が図られている。

筆者らは、舗装コンクリートのさらなる耐久性向上を目的として、CfFA を用いた舗装コンクリートの実用化に向けた検討を開始した。本検討では、CfFA を用いた舗装コンクリートの曲げ強度を中心とした力学的性状を明らかにするとともに、CfFA の強度寄与率を用いた強度推定の可能性について検討した。また、舗装コンクリートの極初期材齢における性状についても検討した。

## 2. 実験手順

本検討では、室内実験とともに実際に自動車が通行する道路において試験施工を実施した。室内実験では、CfFA を使用した舗装コンクリートの基本物性として、スランプ、空気量、コンクリート温度、圧縮強度および曲げ強度の各試験を実施した。また、コンクリート舗装の極初期材齢における性状として、ブリーディング、凝結時間およびプラスチック収縮ひび割れについて実験を行った。

試験施工では、室内実験結果の検証を目的として、CfFA を使用した舗装コンクリートを生コン工場で製造し、実際の舗装工事に適用した。ここでは、生コン工場で製造した CfFA を使用した舗装コンクリートの基本性状を確認するとともに、舗装版体の性状を確認した。

## 3. 室内実験

### 3.1 実験概要

#### (1) 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-1 に示す。本検討では、品質が JIS A 6201 の II 種に適合し、かつ強熱減量が 1%以下の CfFA を使用した。

コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-2 に示す。舗装コンクリートの標準的な設計基準曲げ強度は 4.5 N/mm<sup>2</sup> であり、配合曲げ強度はこれに割増係数 1.15 を乗じた値 (≒5.18N/mm<sup>2</sup>≒5.2N/mm<sup>2</sup>) を設定することが多い。本検討では、CfFA を使用しないコンクリートの配合において、曲げ強度が 5.2N/mm<sup>2</sup> となる水セメント

表-1 使用材料

種類	概要
水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>
混和材料	改質フライアッシュ(JIS A6201 II種相当) 密度: 2.19 g/cm <sup>3</sup> , 強熱減量: 0.7%, SiO <sub>2</sub> : 65%, プレーン比表面積: 4460cm <sup>2</sup> /g
細骨材	大分県大分市産山砂 表乾密度: 2.60g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	大分県大分市産碎石 2005 表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> , 実積率: 58.9%
化学混和剤	AE 減水剤標準型(I種)高機能タイプ 空気量調整剤

\*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 工修 (正会員)

\*2 大分大学 工学部福祉環境工学科教授 工博 (正会員)

\*3 大分大学 工学部福祉環境工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

\*4 太平洋セメント (株) 中央研究所 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

配合名	W/C (%)	W/B (%)	W/C* (%)	強度寄与率 k	粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					Ad (P×%)	AE (P×%)	フレッシュ性状		
						W	C	CfFA	S	G			スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
42-FA0	42.0	42.0	42.0	—	0.75	150	357	0	651	1166	1.0	0.004	5.7	4.9	15.0
45-FA75	45.2	37.1	42.0	0.35	0.75	155	343	75	559	1166	1.0	0.006	6.1	4.9	17.0
49-FA75	49.1	39.5	42.0	0.70	0.75	152	310	75	595	1166	1.0	0.006	6.7	4.5	16.5

\*C'=C+k×CfFA

比を選定し、42%に設定した。

CfFA を使用したコンクリートの配合は、CfFA の単位量を 75kg/m<sup>3</sup> とし、CfFA の強度寄与率を考慮して定めた。CfFA の強度寄与率については、過去にコンクリートの曲げ強度を対象とした検討事例がなかったため、既往の研究<sup>1)</sup>に示される推定式(1)で算出した値 (0.38) を参考に 0.35 とした。また、本検討では、異なる強度寄与率を設定したときの強度発現性を確認する目的で強度寄与率を 0.70 とした場合についても実施した。

$$k'(t, S) = (0.0861 \cdot \log_e t - 0.2025) \cdot S \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここに、t：材齢 (日)、S：FA の比表面積

コンクリートの粗骨材量は、日本道路協会「舗装設計施工指針」に示される配合設計例を参考に選定し、全ての配合で単位粗骨材かさ容積を 0.75m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> とした。コンクリートの目標スランブは 6.5±1.0cm、目標空気量は 4.5±1.0% とし、単位水量および空気量調整剤量を調整した。なお、コンクリートの製造は、水平 2 軸形の強制練りミキサーを用いて行った。

## (2) 試験方法

実験項目は、ブリーディング、凝結時間、初期ひび割れ、圧縮強度および曲げ強度とした。

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠し、φ100×200mm の円柱供試体を用いて行った。曲げ強度試験は、JIS A 1106 に準拠し、100×100×400mm の角柱供試体を用いて行った。試験材齢は、圧縮強度および曲げ強度ともに 3、7、28 および 91 日とし、養生方法はいずれの場合も所定の材齢まで 20°C 水中養生とした。

ブリーディングおよび凝結時間の測定は、JIS A 1123 および JIS A 1147 に準拠して、気温が 20°C の恒温室内で行った。

コンクリートの初期ひび割れは、図-1 に示す鋼製拘束型枠を用いてプラスチック収縮ひび割れを測定した。また、試験は、既往の研究<sup>2)</sup>を参考に、ひび割れが発生しやすい環境条件で実施した。すなわち、気温 40°C、湿度 30%R.H. の恒温恒湿室内に供試体を設置し、風速約 4m/sec の風と日射を模擬した白熱電球による照射を行った (写真-1)。試験では、コンクリートの打込み後材齢

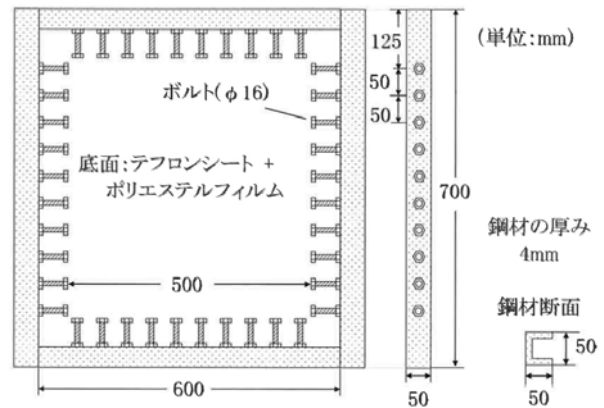


図-1 鋼製拘束型枠

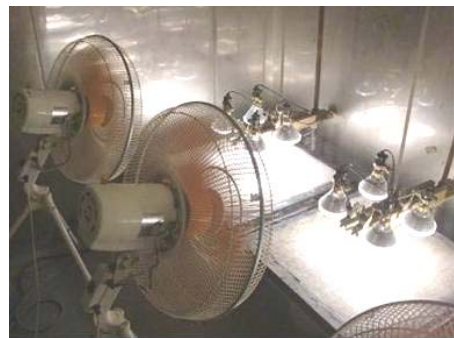


写真-1 プラスチック収縮ひび割れ試験状況

24 時間経過時におけるひび割れ幅とひび割れ長さを目視で測定し、この積の総和から単位面積当たりのひび割れ総面積を算出し、評価を行った。

## 3.2 実験結果

### (1) 力学的性状

圧縮強度と材齢の関係を図-2 に示す。CfFA の強度寄与率を 0.35 とした 45-FA75 の圧縮強度を 42-FA0 と比較すると、材齢 3 日から 28 日までは同等であり、材齢 91 日では高くなった。また、強度寄与率を 0.70 とした 49-FA75 では、材齢 28 日以前は 42-FA0 よりも低く、材齢 91 日では同等以上であった。

実験に使用した CfFA の材齢 28 日および 91 日における強度寄与率を式(1)により算出すると、それぞれ 0.38 および 0.83 となり、材齢 28 日では 45-FA75 で設定した値と同等であり、材齢 91 日は 49-FA75 で設定した値よりやや高くなった。これは、45-FA75 の材齢 28 日圧縮強度が 42-FA0 と同等となり、49-FA75 の材齢 91 日圧縮強

度は 42-FA0 よりもやや高い値となることを示唆するものである。この傾向は、既往の研究<sup>1)</sup>で提案されたフライアッシュの強度寄与率の推定式の妥当性を改めて示す結果となった。

曲げ強度試験結果を図-3 に示す。45-FA75 の曲げ強度は、材齢 7 日では 42-FA0 よりも低く、材齢 28 日において同等となり、材齢 91 日では 42-FA0 よりも高くなった。49-FA75 の曲げ強度は、材齢 28 日までは 42-FA0 よりも低く、材齢 91 日では同等となった。これらの結果より、コンクリートの曲げ強度に対する CfFA の強度寄与率は、材齢 28 日が 0.35 程度、材齢 91 日が 0.70 程度と推定することができる。また、これらの値を式(1)で算出した強度寄与率(材齢 28 日:0.38, 材齢 91 日:0.83)と比較すると、材齢 28 日は同等であるものの、材齢 91 日はやや低い値となった。すなわち、曲げ強度に対する CfFA の強度寄与率を式(1)により推定すると、材齢 28 日ではほぼ適切な値を示すが、材齢 91 日では過大評価となる。この結果より、CfFA を用いた舗装コンクリートの曲げ強度を推定するには、長期材齢における強度寄与率を適切に推定可能な式の確立が必要と考える。

以上の結果を踏まえ、極初期材齢の性状に関する実験では 45-FA75 と 42-FA0 の 2 水準を対象として実施した。

### (2) ブリーディングおよび凝結時間

ブリーディング試験結果を表-3 および図-4 に示す。45-FA75 のブリーディング率およびブリーディング量は、42-FA0 と同等であった。ただし、45-FA75 のブリーディング率の経時変化は、3 時間以降において 42-FA0 よりもわずかに多くなることを確認した。

凝結時間を表-3 に示す。45-FA75 の凝結時間は、始発および終結ともに 42-FA0 よりもやや長く、その差は 40 分程度であった。

### (3) プラスティック収縮ひび割れ

プラスチック収縮ひび割れの試験結果を表-4 に示す。45-FA75 のひび割れ面積は、42-FA0 よりも小さく、CfFA を使用することによってプラスチック収縮ひび割れを大幅に抑制することができた。

一般に、コンクリートのプラスチック収縮ひび割れは、気温、湿度、風速などの影響を受け、コンクリート表面の乾燥が急速に起こることによって生じると考えられている<sup>3)</sup>。また、これらのひび割れは、コンクリート表面からの蒸発水量が、コンクリート中の自由水やブリーディングによって供給される水の量よりも多い場合や、コンクリートの流動性が低下し、硬化が開始される段階で発生しやすいと考えられている<sup>4)</sup>。外気温が高い場合は、コンクリートの打込み後 4~8 時間においてプラスチック収縮ひび割れが発生しやすく、風速および湿度によってひび割れ発生の危険度が異なるとされている<sup>3)</sup>。

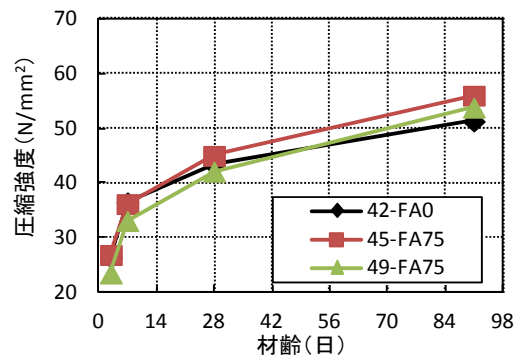


図-2 圧縮強度

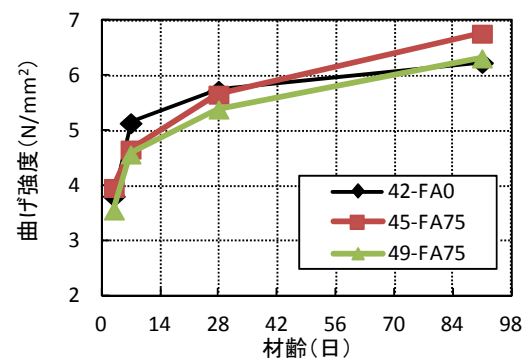


図-3 曲げ強度

表-3 ブリーディングおよび凝結時間

	ブリーディング		凝結時間(h : m)	
	量(cm³/cm²)	率(%)	始発	終結
42-FA0	0.08	2.08	6:40	8:55
45-FA75	0.09	2.17	7:20	9:25

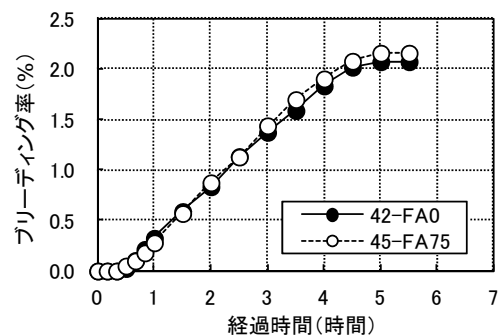


図-4 ブリーディング率の経時変化

表-4 プラスティック収縮ひび割れ

	最大ひび割れ幅 (mm)	単位面積当たりのひび割れ総面積 (mm²/m²)
42-FA0	1.20	2317
45-FA75	0.50	570

前述のように、気温 20℃ の環境におけるブリーディング特性および凝結時間は、CfFA 使用の有無によって若干の差が認められていることから、コンクリートの打込みから数時間後におけるコンクリート中の水分移動や組織の硬化状態などが異なっている可能性があり、プラスティ

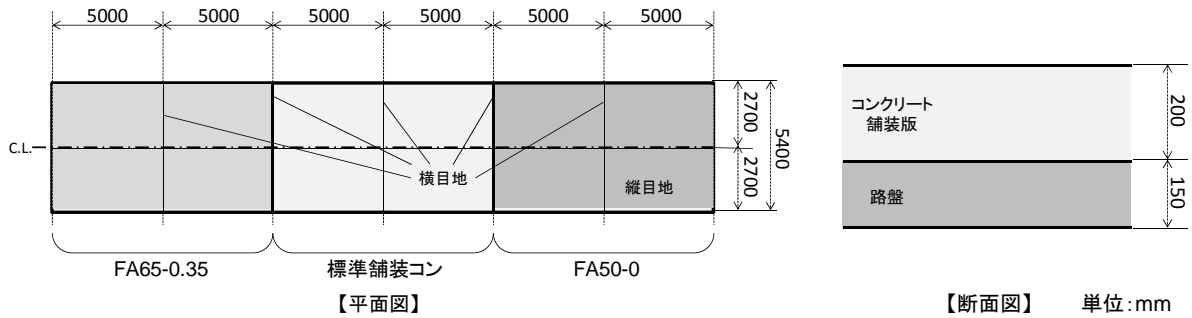


図-5 舗装版体の平面図および断面図

ック収縮ひび割れの発生に影響を及ぼしたと推察する。

#### 4. 試験施工

##### 4.1 試験施工の目的

試験施工では、CfFA を使用した舗装コンクリートの実機レベルでの性状を把握するとともに、室内実験結果の検証を目的として実施した。

##### 4.2 試験施工および実験の概要

###### (1) 試験施工の概要およびコンクリートの製造

試験施工は、2014年9月3日に大分県大分市の大分大学構内道路において実施した。舗装版体の平面図および断面図を図-5に示す。試験施工では、幅員5.4m×延長30mの道路を延長方向に10mごと3区画に分け、それぞれ配合が異なるコンクリートを施工した。舗装版体の厚さは20cmとした。また、舗装版体には5m間隔で横断方向にカッター目地を、縦断方向にはセンターライン上に縦目地を設置した。

コンクリートの製造は、生コン工場において、公称容量が1.75m<sup>3</sup>の強制練りミキサ水平二軸形を用いて行った。1バッチの練混ぜ量は約1.3m<sup>3</sup>とし、各コンクリートの製造量は12m<sup>3</sup>とした。

###### (2) 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-5に、コンクリートの配合を表-6に示す。試験施工に用いたコンクリートは、コンクリート製造工場において製造実績がある舗装コンクリート（以下、標準舗装コン）およびCfFAを使用した2種類の舗装コンクリートの計3配合とした。また、CfFAを使用した舗装コンクリートは、CfFAの曲げ強度への強度寄与率を設定した配合、およびCfFAの強度寄与率を0と仮定し、細骨材に置換して使用した配合の2種類とした。CfFAの曲げ強度への強度寄与率を設定した配合では、CfFAの単位量を65kg/m<sup>3</sup>とし、強度寄与率は室内実験の結果をも

とに0.35とした（以下、FA65-0.35）。また、CfFAの強度寄与率を0と仮定した水準では、CfFAの単位量を50kg/m<sup>3</sup>とした（以下、FA50-0）。コンクリートの単位粗骨材かさ容積は、すべての配合で0.69m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>とした。

コンクリートの現場到着時における目標スランプおよび目標空気量は、それぞれ6.5±1.5cmおよび4.5±1.5%とし、事前の試験練りにおいて単位水量および空気量調整剤量を調整した。また、コンクリートの強度は、一般的な舗装コンクリートと同様に、材齢28日における設計基準曲げ強度を4.5N/mm<sup>2</sup>とした。

###### (3) 試験方法

試験項目は、コンクリートのフレッシュ性状、ブリーディング、凝結時間、力学的性状および舗装版体の性状確認とした。

フレッシュ性状としては、スランプおよび空気量の測定を、それぞれJIS A 1101およびJIS A 1128に準拠して行った。試験は、コンクリートを運搬した全てのトラックアジテータについて、出荷時および現場到着時に行い、コンクリートの品質安定性を評価した。

表-5 使用材料

種類	概要
水	工業用水
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
混和材料	改質フライアッシュ(JIS A6201 II種相当) 密度：2.27 g/cm <sup>3</sup> , 強熱減量：0.7%, SiO <sub>2</sub> ：66%, プレーン比表面積：4040cm <sup>2</sup> /g
細骨材	大分県大分市産山砂 表乾密度：2.59g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	大分県豊後大野市産砕石 2005 表乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup> , 実積率：60.0%
化学混和剤	AE減水剤標準型(I種) 空気量調整剤(記号：AE)

表-6 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	W/B (%)	W/C* (%)	強度寄与率 k	粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					Ad (P×%)	AE (P×%)
						W	C	CfFA	S	G		
標準舗装コン	42.4	42.4	42.4	—	0.69	156	368	0	694	1098	1.0	0.006
FA65-0.35	45.1	38.2	42.4	0.35	0.69	162	359	65	613	1098	1.0	0.021
FA50-0	42.4	37.5	42.4	0	0.69	162	382	50	612	1098	1.0	0.021

\*C' = C + k × CfFA

ブリーディングおよび凝結時間の測定は、それぞれ JIS A 1123 および JIS A 1147 に準拠し、屋外環境で実施した。

力学的性状としては、曲げ強度試験を JIS A 1106 に準拠して行った。供試体寸法は、室内実験と同一とし、施工現場で作製した。供試体作製後は、材齢 1 日で脱型し、所定の材齢まで 20℃水中養生および屋外曝露を行った。

舗装版体の性状については、施工後の状況を目視で確認し、ひび割れ等の不具合の有無を確認した。

### 4.3 結果

#### (1) 試験施工時の気象環境

施工現場における気温および相対湿度の経時変化を図-6 に示す。試験施工は、2014 年 9 月 3 日 11 時から 17 時にかけて行い、施工中の気温は 25～32℃、湿度は 66～92%であった。風速は平均が 1m/sec 未満、瞬間最大風速は 4m/sec であった。

#### (2) フレッシュ性状

CfFA を使用したコンクリートにおける、所定のスランブおよび空気量を得るために必要な単位水量および空気量調整剤量は、いずれも標準舗装コンよりも多くなった。スランブおよび空気量の測定結果を図-7 に示す。スランブおよび空気量は、全ての配合において運搬トラックごとの変動が小さく、いずれも目標値を満足した。また、今回の試験施工は、気温が約 30℃の夏季環境下で行われ、生コン工場から現場までの運搬は 30～40 分であったが、その間のスランブおよび空気量の低下量は小さく、配合の違いによる明確な差は認められなかった。

#### (3) ブリーディングおよび凝結時間

ブリーディング試験結果を表-7 および図-8 に示す。FA65-0.35 および FA50-0 のブリーディング率は、いずれも標準舗装コンよりもやや高かった。また、ブリーディング率の経時変化において、1.5 時間以前では FA65-0.35 および FA50-0 とともに標準舗装コンと同等であったが 1.5 時間以降のブリーディング率の増加量は標準舗装コンよりも大きく、室内実験よりもその差が顕著に表れた。

凝結時間を表-7 に示す。CfFA を使用した FA65-0.35 と FA50-0 の凝結時間は、始発および終結ともに同等であり、いずれも標準舗装コンよりも 30 分程度長かった。

今回の実験は、平均気温が約 28℃と比較的気温が高い環境で行い、CfFA 使用の有無によってコンクリートのブリーディングおよび凝結時間が異なった。3.2 で述べたように、コンクリートのプラスチック収縮ひび割れは、ブリーディングや凝結時間の影響を受けるため、今回の結果は、CfFA を使用したコンクリートが、未使用の場合よりもプラスチック収縮ひび割れの発生を抑制できる可能性があることを示唆するものである。

#### (4) 力学的性状

20℃水中養生を行ったコンクリートの曲げ強度を図-9

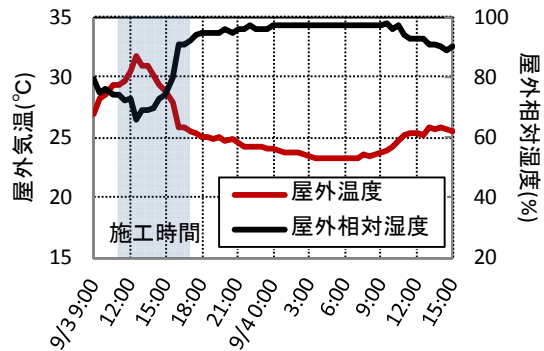


図-6 施工現場における気温および相対湿度

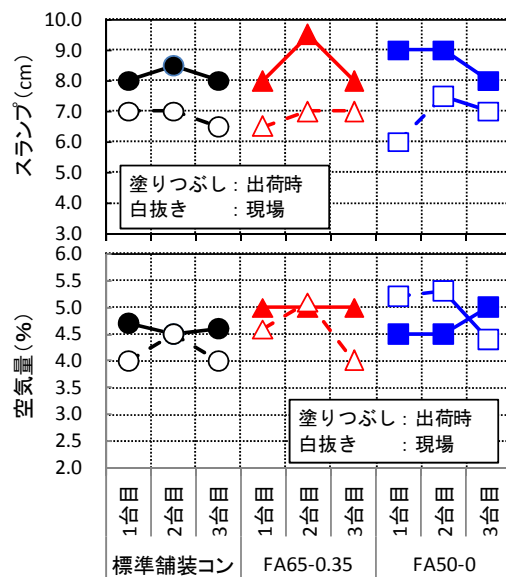


図-7 コンクリートのフレッシュ性状

表-7 ブリーディングおよび凝結時間 (試験施工)

	ブリーディング		凝結時間(h : m)	
	量(cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	率(%)	始発	終結
標準舗装コン	0.04	1.12	4:10	5:05
FA65-0.35	0.05	1.30	4:45	5:35
FA50-0	0.07	1.63	4:55	5:40

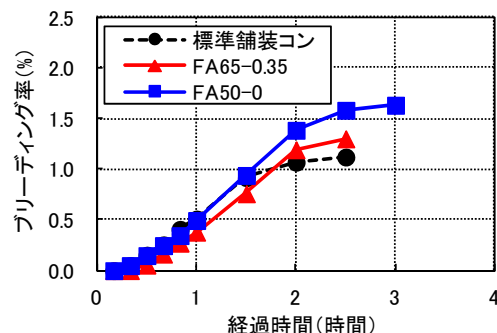


図-8 ブリーディング率の経時変化 (試験施工)

に示す。材齢 28 日における曲げ強度は、すべての水準で設計基準曲げ強度 4.5N/mm<sup>2</sup> 以上を満足しており、舗装用途に適用可能な力学的性能を有していると考えられる。20℃水中養生を行った場合における FA65-0.35 の結果は

室内実験と同様の傾向を示し、材齢 28 日までは標準舗装コンと同等であり、材齢 91 日では標準舗装コンよりも高くなった。しかし、FA50-0 は全ての材齢で標準舗装コンと同等であり、CfFA の曲げ強度への寄与は認められなかった。この結果より、CfFA の材齢 28 日における曲げ強度に対する強度寄与率は式(1)を用いて概ね推定可能といえるが、配合条件や材齢などを考慮した強度寄与率の推定式の確立が必要と考えられる。

屋外曝露を行ったコンクリートの曲げ強度を図-10 示す。CfFA を使用したコンクリートの曲げ強度は、材齢 7 日までは標準舗装コンより低いものの、材齢 28 日以降はいずれも標準舗装コンと同等以上の値となった。また、すべての水準で材齢 28 日以降の強度発現性は良好であり、実供用環境下においても十分な強度発現性を有することを確認した。

### (5) 舗装版体の性状

舗装版体の状況を写真-2 に示す。コンクリート舗装版体の教養開始後 3 箇月までの性状を確認したところ、ひび割れ等の発生は認められず良好であった。ブリーディングおよび凝結時間の結果から、標準舗装コンは CfFA を使用したコンクリートよりもプラスチック収縮ひび割れが発生しやすいと考えられたが、施工中から施工後 1 日程度までの湿度が比較的高く、風速も低かったため、ひび割れが発生しなかったと考えられる。

## 5. まとめ

改質フライアッシュを用いた舗装コンクリートの極初期材齢における性状および力学的性状を明らかにした。また、改質フライアッシュの強度寄与率を用いた強度推定の可能性についても検討を行った。本検討によって得られた結果を以下に示す。

- (1) CfFA を用いた舗装コンクリートは、施工において良好なフレッシュ性状を確保することができた。
- (2) CfFA を用いた舗装コンクリートは、未使用の場合よりも数時間経過後のブリーディング発生量がやや少なくなった。
- (3) CfFA を用いた舗装コンクリートの凝結時間は、未使用の場合よりもやや長くなった。
- (4) CfFA を用いた舗装コンクリートは、未使用の場合よりもプラスチック収縮ひび割れを抑制できた。
- (5) CfFA を用いた舗装コンクリートの圧縮強度は、既往の研究で提案されているフライアッシュの強度寄与率を用いて推定できる。
- (6) CfFA を用いた舗装コンクリートの材齢 28 日曲げ強度は、既往の研究で提案されているフライアッシュの圧縮強度に対する強度寄与率を用いて推定できる。

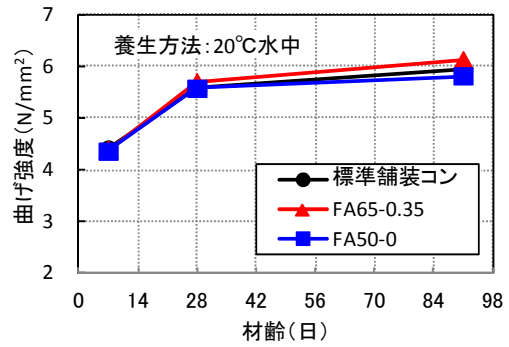


図-9 曲げ強度 (20°C水中養生)

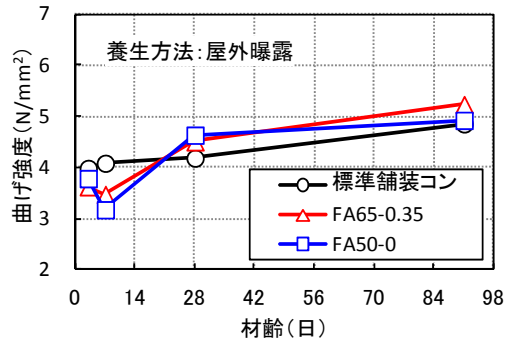


図-10 曲げ強度 (屋外曝露)



写真-2 舗装版体の状況

## 参考文献

- 1) 伊藤七恵, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 大谷俊浩: 高品質フライアッシュを用いたコンクリートの調査設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.167-172, 2011.7
- 2) 高木亮一, 石田征男, 岸良 竜, 郭 度連: 養生剤の使用によるコンクリート舗装のプラスチック収縮ひび割れ抑制効果の検討, セメント技術大会講演要旨, Vol.67, pp.94-95, 2013.4
- 3) 関田徹志: 現場技術者のための RC 造のひび割れ防止対策 8.施工部位別におけるひび割れ防止対策デッキプレート系スラブ/コンクリート系合成スラブ/土間床スラブ, 建築技術, No.677, pp.144-147, 2006.6
- 4) Ziad, B. and Marc, M.: Application of Fibrillated Polypropylene Fibers for Restraint of Plastic Shrinkage Cracking in Silica Fume Concrete, ACI Materials Journal, Vol.99, No.4, pp.337-344, Jul./Aug.2002