

# 論文 フライアッシュの品質が高流動コンクリートの諸性状に及ぼす影響

本田 悟\*1・椎葉大和\*2

要旨：水結合材比、フライアッシュ置換率および品質の相違が高流動コンクリートの諸性状に及ぼす影響について検討した。その結果、置換率50%では分離抵抗性が不足ぎみとなり、水結合材比40%では流動性の保持能力が低いため、本研究の範囲内では、水結合材比35%、置換率40%の調合が最適であった。また、フロー値比が大きいフライアッシュほど間げき通過性は良好となるが、分離抵抗性は低下傾向を示し、強熱減量が大きいフライアッシュでは間げき通過性の低下が顕著となり、流動性の保持能力も低くなることが判明した。  
 キーワード：フライアッシュ、高流動コンクリート、間げき通過性、分離抵抗性、圧縮強度

## 1. はじめに

高流動コンクリートは所要の材料分離抵抗性と流動性を確保するために、分離低減剤や多量の高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を使用する。高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材の多くは産業副産物であり、特にフライアッシュにおいては炭種や燃焼方法の相違により品質が大幅に変動することはよく知られている。しかしながら、フライアッシュ置換率や水結合材比などの調合条件の相違が高流動コンクリートの諸性状に及ぼす影響に関する報告例<sup>1)</sup>は比較的多いが、フライアッシュの品質の相違による影響に関する研究例は少ない。

そこで本研究では、フライアッシュの品質の相違が高流動コンクリートの流動性、間げき通過性、分離抵抗性および硬化後の諸性状に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験概要

シリーズIでフライアッシュ置換率および水結合材比の相違による影響を検討し、フライアッシュ置換率および水結合材比を決定した後、シリーズIIでフライアッシュの品質の相違が高流動コンクリートの諸性状に及ぼす影響について検討した。

## 2.1 使用材料

使用材料は表-1に示す通りで、フライアッシュには表-2に示す22種類を用い、フライアッシュの流動性改善効果の指標であるフロー値比が大きいものからF1～F22とした。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント, 比重: 3.15
細骨材	除塩海砂, 比重: 2.58, F.M.: 2.59
粗骨材	花こう岩系砕石, 比重: 2.78, 実積率: 57.8%
混和材	フライアッシュ, 22種類 (表-2参照)
混和剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系) AE助剤 (フライアッシュ用)

表-2 フライアッシュの品質

項目 試料	二酸化 けい素 (%)	湿分 (%)	強熱 減量 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表 面積 (cm <sup>2</sup> /g)	フロー 値比 (%)	活性度指数(%)		JIS 区分
							28日	91日	
F1	62.6	0.1	1.6	2.25	4520	119	85	108	II
F2	56.0	0.1	0.9	2.45	3370	112	85	95	II
F3	62.3	0.3	1.3	2.31	3360	111	86	99	II
F4	61.7	0.1	1.4	2.28	4080	109	91	102	II
F5	68.4	0.1	1.4	2.25	4150	109	86	100	II
F6	70.3	0.1	1.1	2.25	3950	109	89	100	II
F7	59.8	0.2	3.2	2.34	3250	108	86	98	II
F8	60.7	0.1	1.7	2.30	4090	108	96	110	II
F9	59.6	0.2	1.5	2.26	3990	107	91	103	II
F10	67.5	0.1	1.6	2.25	4120	107	95	104	II
F11	68.2	0.1	1.2	2.24	3900	107	89	102	II
F12	77.1	0.2	1.9	2.23	3690	105	87	94	II
F13	66.1	0.1	1.2	2.23	3840	105	88	103	II
F14	56.1	0.1	2.7	2.13	3330	104	89	102	II
F15	69.5	0.1	3.0	2.23	3830	103	84	93	II
F16	47.2	0.2	4.9	2.33	6100	102	89	100	II
F17	69.5	0.1	2.7	2.22	3520	102	86	94	II
F18	71.4	0.2	2.6	2.09	3310	100	87	98	II
F19	55.5	0.1	2.8	2.31	3430	99	89	104	II
F20	75.1	0.2	2.6	2.21	4160	97	84	99	II
F21	48.2	0.2	6.1	2.28	4800	93	87	101	III
F22	62.8	0.2	6.1	2.27	2780	93	79	88	※

※ JIS 規格外

\*1 福岡大学助手 工学部建築学科 (正会員)

\*2 福岡大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

## 2.2 調合および練混ぜ

コンクリートの調合は表-3に示す通りで、フライアッシュの品質の相違による影響を明確にするために、単位水量および単位粗骨材かさ容積は一定とし、試験練りにより高性能A E減水剤およびA E助剤の添加率を決定した。また、練混ぜには2軸強制練りミキサ（容量：50ℓ）を使用し、粗骨材以外の材料を一括投入し2分間練り混ぜた後、粗骨材を投入し1分間練り混ぜた。

## 2.3 試験項目

試験項目は表-4に示す通りである。また、経時変化の測定はらせん羽根付きアジテータ（容量：100ℓ）で低速攪拌（4r.p.m.）を継続し、120分間行った。なお、各試験項目で検討の対象としたフライアッシュは表-5に示す通りである。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 置換率および水結合材比の影響

#### (1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を図-1に示す。高性能A E減水剤添加率はフライアッシュの種類および水結合材比を問わず置換率の増加に伴い減少傾向を示し、減少割合は置換率10%に対して0.1%程度である。スランブフロー試験によるフロー50cm時間は置換率の増加に伴い短くなり、粘性の低下傾向が認められるが、置換率30%以上では比較的变化は少ない。Vロート試験による流下時間は置換率の増加に伴い短くなり、間げき通過性は良好となる。円筒貫入試験による流入モルタル値は全般に置換率の増加に伴い増大傾向を示し、置換率50%では流入モルタル値が40cmを超える調合もある。

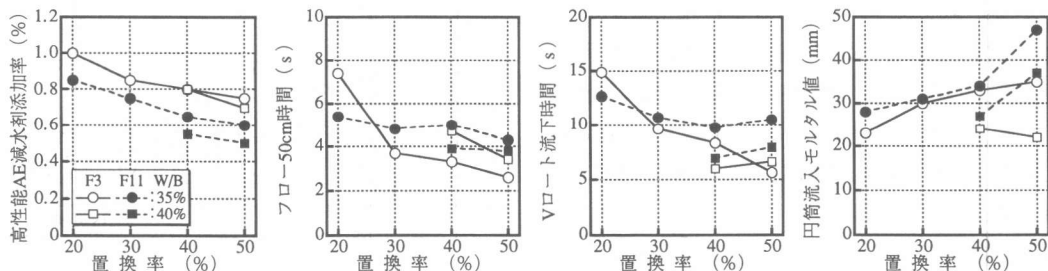


図-1 フレッシュコンクリートの性状（シリーズI）

表-3 調合条件

条件	水結合材比 (%)	置換率** (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	スランブフロー (cm)	空気量 (%)
シリーズ	(%)	20 <sup>*</sup> 30 <sup>*</sup> 40, 50	170	0.50	65±5	4.5±1
I	35, 40					
II	35	40				

\*水結合材比35%のみ実施, \*\*結合材容積に対して内割り

表-4 試験方法および関連規格

試験項目	試験方法および関連規格
スランブフロー	JASS 5T-503に準じ、スランブフローおよびフロー50cm時間（フロー値が50cmに達する時間）を測定
Lフロー	文献 <sup>2)</sup> に準じ、Lフロー30cm速度を測定
Vロート	文献 <sup>2)</sup> に準じ、流下時間を測定
リング貫入	文献 <sup>2)</sup> に準じ、初回沈下速度および沈下速度比を測定
U型充填	文献 <sup>3)</sup> に準じ、充填高低差を測定
円筒貫入	文献 <sup>2)</sup> に準じ、流入モルタル値を測定
空気量	JIS A 1128に準拠
ブリーディング	JIS A 1123に準拠
凝結	JIS A 6204 附属書 1に準拠
圧縮強度 静弾性係数 引張強度 曲げ強度	各関連JISおよびJIS原案に準じ、標準養生後、材齢7, 28, 91, 182 <sup>*</sup> 日に測定
乾燥収縮	JIS A 1129に準じ、材齢7日まで標準養生後、温度20℃、湿度60%の環境下で材齢182日まで測定
促進中性化	文献 <sup>4)</sup> に準拠

\*シリーズIIの圧縮強度および静弾性係数のみ測定

表-5 対象としたフライアッシュ

試験項目	シリーズ	
	I	II
フレッシュコンクリートの性状	F3, F11	F1 ~ F22
フレッシュ性状の経時変化		F1, F3, F9, F11, F13, F15, F21
ブリーディング・凝結		
硬化コンクリートの性状		

以上の結果より判断すると、置換率の増加に伴い粘性は低下し、間げき通過性は良好となる。しかしその反面、分離抵抗性は低下し、置換率50%では分離抵抗性が不足ぎみな調合も認められることから、本研究の範囲内ではフライアッシュ置換率は40%程度が最適と考えられる。また、水結合材比の相違がフレッシュコンクリートの粘性、間げき通過性および分離抵抗性に及ぼす影響は明確には認められなかった。

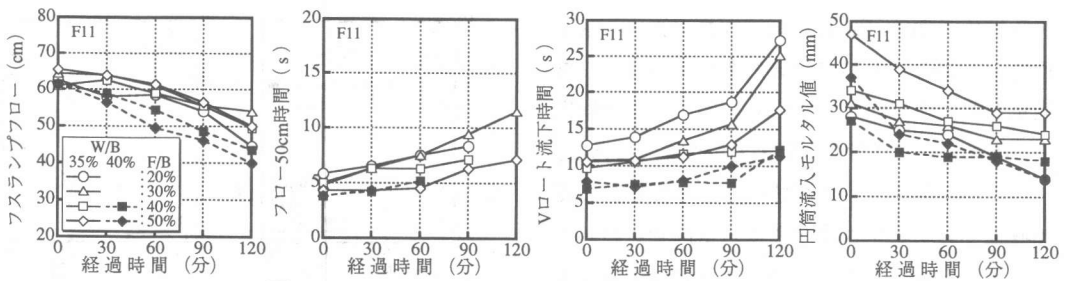


図-2 フレッシュ性状の経時変化 (シリーズ I)

(2) フレッシュ性状の経時変化

フレッシュ性状の経時変化を図-2に示す。スランプフローの経時変化に関しては、水結合材比35%では経過時間90分においてもスランプフローは55cm以上であるが、水結合材比40%では経過時間60分で55cm以下となり、フローロスは大い。フロー50cm時間に関しては、置換率の増加に伴い経時変化は小さくなり、粘性の増大傾向は緩やかとなる。Vロート流下時間に関しては、置換率40%以上では経時変化は緩やかで、間げき通過性の急激な低下は生じていない。円筒流入モルタル値に関しては、置換率および水結合材比を問わず経時変化は同程度である。

以上の結果より判断すると、水結合材比40%では高性能A E減水剤使用量の減少に起因して流動性の保持能力は水結合材比35%の場合に比べて劣る。また、粘性および間げき通過性の経時変化は、置換率40%以上では比較的緩やかなことから、本研究の範囲内では水結合材比35%で置換率40~50%程度が最適と考えられる。

(3) ブリーディングおよび凝結

ブリーディング量および凝結時間の試験結果を図-3に示す。ブリーディング量はフライアッシュの種類により大幅に相違するものの、置換率および水結合材比の増加に伴い増加傾向を示している。しかし、水結合材比40%、置換率50%の場合でも $0.22\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と通常のコンクリートと比べると全般に少ない。凝結時間に関しては置換率の増加に伴い若干遅延傾向が認められるものの、その程度は1時間以内と比較的小さい。また、水結合材比の相違が凝結時間に及ぼす影響は明確には認められない。

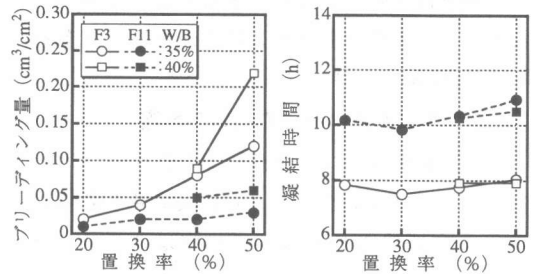


図-3 ブリーディング量および凝結時間 (シリーズ I)

(4) 硬化コンクリートの性状

圧縮強度の試験結果を図-4に示す。材齢28日の各置換率での圧縮強度は水結合材比40%で $37\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、水結合材比35%で $45\text{N}/\text{mm}^2$ 以上と日本建築学会の規準 ( $25\text{N}/\text{mm}^2$ 以上) をすべて満足している。しかし、材齢91日においても置換率40%以上では置換率の増加に伴う圧縮強度の低下傾向は顕著である。また、静弾性係数に関しては全調合で学会規準 ( $2 \times 10^4\text{N}/\text{mm}^2$ 以上) を満足しており、置換率増加に伴う静弾性係数の低下傾向は比較的緩やかであった。

乾燥収縮率および中性化深さの試験結果を図-5に示す。全調合において試験材齢182日での乾燥収縮率は $6.8 \sim 7.5 \times 10^{-4}$ と学会規準 ( $8 \times 10^{-4}$ 以下) を満足しており、置換率の増加に伴い若干の低下傾向が認められる。また、促進試験に

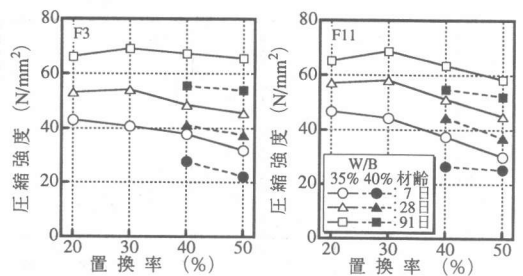


図-4 圧縮強度 (シリーズ I)

よる中性化深さは試験材齢182日で最大17mm程度と全調合において学会規準(25mm以下)を満足しているものの、置換率40%以上では置換率の増加に伴う中性化の促進傾向が顕著である。

以上の結果より、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮率および中性化深さは、全調合において学会規準を満足しているが、置換率40%以上では圧縮強度の低下および中性化の進行が顕著となるため、強度および耐久性面からは置換率30~40%程度が適切である。

### 3.2 フライアッシュの品質の影響

#### (1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を図-6に示す。高性能AE減水剤添加率はフライアッシュの品質により0.5~1.0%と大幅に相違し、フロー値比の増大および強熱減量の減少に伴い低下傾向を示している。Lフロー試験による30cm速度はフロー値比の増大および強熱減量の減少に伴い増大傾向を示し、フロー値比が110%以上のフライアッシュ(F1, F2)では粘性の低下が著しい。また、強熱減量が4%以上のフライアッシュ(F16, F21, F22)では非球形の粒子の増加に起因して粘性の増大が著しい。Vロート試験による流下時間はF16, F22を除くとフロー値比の増大に伴い短くなり、間げき通過性は良好となる。また、Lフ

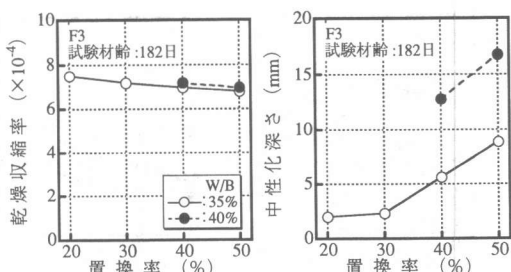


図-5 乾燥収縮率および中性化深さ(シリーズI)

ロー30cm速度とVロート流下時間の関係より、Lフロー30cm速度が著しく遅いフライアッシュ(F16, F22)ではVロート流下時間も遅くなり、間げき通過性の低下が顕著である。リング貫入試験による沈下速度比および円筒貫入試験による流入モルタル値はフロー値比の増大に伴い増大傾向を示し、フロー値比が110%以上のフライアッシュ(F1, F2)では流入モルタル値は50mm以上と分離抵抗性が不足気みである。

以上の結果より、フロー値比が大きいフライアッシュほどコンクリートの粘性は低下し、それに伴い間げき通過性は良好となる反面、分離抵抗性は低下し、フロー値比が110%以上のフライアッシュでは分離抵抗性は不足気みとなる。また、強熱減量が4%以上のフライアッシュでは粘性が著しく増大し、それに伴い間げき通過性の低下が顕著となる。

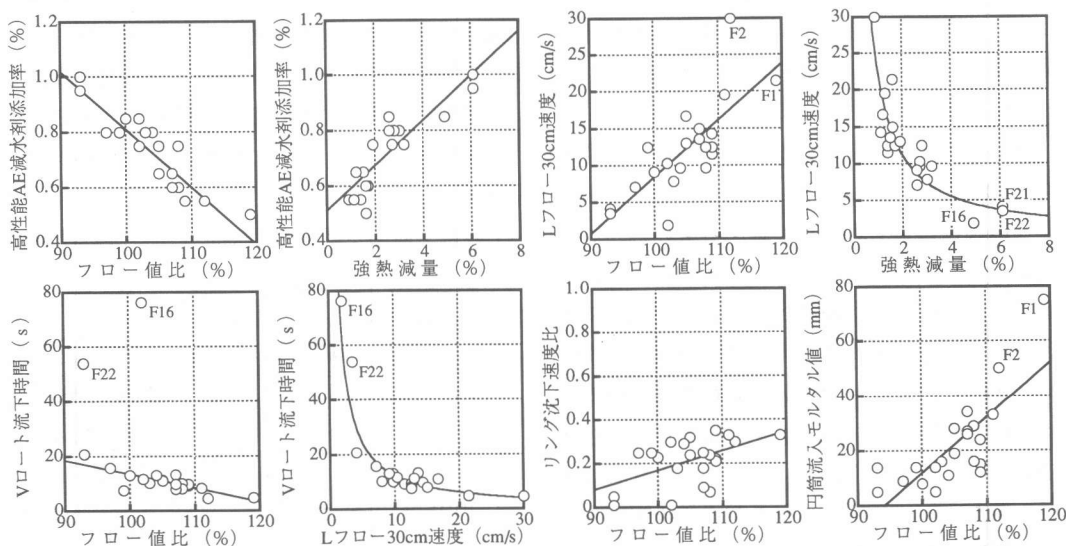


図-6 フレッシュコンクリートの性状(シリーズII)

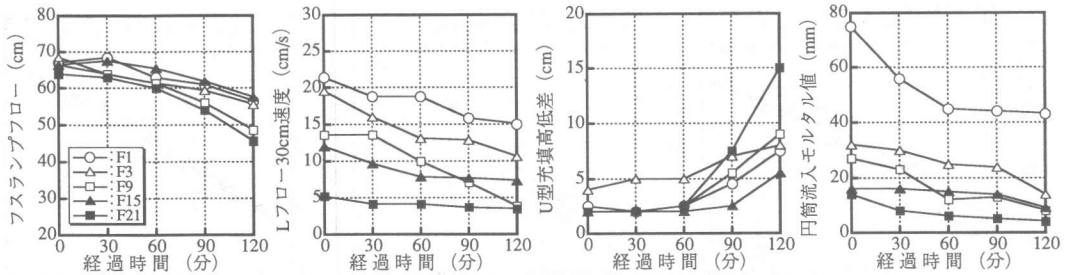


図-7 フレッシュ性状の経時変化 (シリーズII)

(2) フレッシュ性状の経時変化

フレッシュ性状の経時変化を図-7に示す。スランプフローの経時変化に関しては、経過時間90分においてF21を除くフライアッシュではスランプフローは55cm以上を有しているが、F21の場合は55cm以下となり、フローロスと比較的大きい。Lフロー30cm速度に関しては、全般に緩やかな低下傾向を示し粘性の急激な増大は認められない。U型充填試験による高低差に関しては、F21の場合は経過時間60分以後に急激な増加が認められ、間げき通過性の低下が顕著である。円筒流入モルタル値に関しては、練上り直後の流入値が70mm以上と著しく大きいF1の場合を除くと経時変化は比較的緩やかで、分離抵抗性の急激な増大は認められない。

以上の結果より、F21のように強熱減量が大きいフライアッシュでは急激な粘性の増大は認められないものの、練上り直後の粘性が著しく高いため、流動性の保持能力は比較的低く、間げき通過性の急激な低下が認められる。

(3) ブリーディングおよび凝結

ブリーディング量および凝結時間の試験結果を図-8に示す。ブリーディング量はフライアッシュの品質により0.004~0.082cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>と大幅に相違し、フロー値比が大きいものほど粘性の低下に起因してブリーディング量は増大傾向を示している。しかし、通常のコングリートと比べると著しく少ない。凝結時間に関してはフライアッシュの品質により始発で2.5時間程度、終結で3時間程度相違しており、全般にフロー値比が大きいフライアッシュ(F1, F3)の場合ほど凝結時間は遅延している。

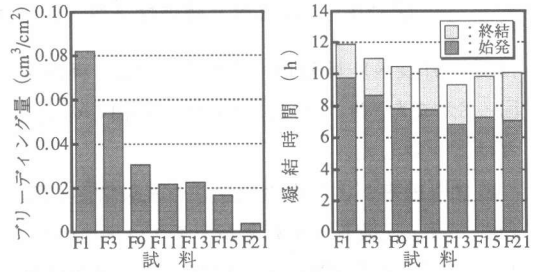


図-8 ブリーディング量および凝結時間 (シリーズII)

(4) 硬化コンクリートの性状

圧縮強度および曲げ強度の試験結果を図-9に示す。圧縮強度に関しては、材齢28日で45.6~52.4N/mm<sup>2</sup>、材齢182日で67.1~76.3N/mm<sup>2</sup>とフライアッシュの品質により最大で13%程度相違しており、特にF21の場合は強度低下が大きい。このことは、F21は比較的二酸化けい素含有量が少ないためと考えられ、F21を除くフライアッシュの場合の強度差は最大で6%程度と小さい。また、曲げ強度の場合も同様にF21を除く強度差は最大で4%程度と小さい。

圧縮強度と静弾性係数、引張強度および曲げ強度の関係を図-10に示す。圧縮強度と静弾性係数、引張強度および曲げ強度の係数にフライアッシュの品質による影響はほとんど認められず、静弾性係数はNew RC式を $0.4 \times 10^4$ N/mm<sup>2</sup>

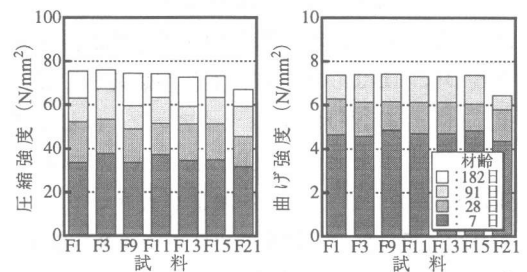


図-9 圧縮強度および曲げ強度 (シリーズII)

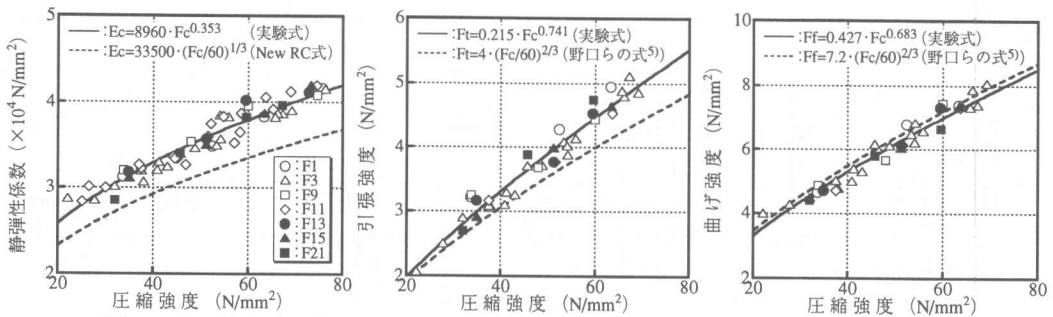


図-10 圧縮強度と静弾性係数、引張強度および曲げ強度の関係 (シリーズII)

程度、引張強度は野口らの式<sup>5)</sup>を10%程度上回った。また、曲げ強度に関しては野口らの式<sup>5)</sup>とほぼ一致した。

乾燥収縮率および中性化深さの試験結果を図-11に示す。乾燥収縮率は試験材齢182日で $6.4 \sim 7.1 \times 10^{-4}$ 、促進試験による中性化深さは試験材齢182日で5.4~6.6mmとフライアッシュの品質により若干相違し、強度低下が認められたF21の場合は乾燥収縮率および中性化深さとも他のフライアッシュの場合より全般に大きい。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- (1) フライアッシュ置換率の増加に伴い間げき通過性は良好となるが、置換率50%では分離抵抗性が不足みな調合も認められた。また、水結合材比40%では流動性の保持能力が低いため、本研究の範囲内では、水結合材比35%、置換率40%の調合が最適であった。
- (2) ブリーディング量はフライアッシュ置換率および水結合材比の増加に伴い増加傾向を示す。また、凝結時間は置換率の増加に伴い遅延傾向を示すが、その程度は比較的小さい。
- (3) フライアッシュ置換率40%以上では、圧縮強度の低下および中性化の進行が顕著となる。
- (4) フロー値比が大きいフライアッシュほど間げき通過性は良好となる反面、分離抵抗性は低下傾向を示す。また、強熱減量が大きいフライアッシュでは間げき通過性の低下が顕著となり、流動性の保持能力も低くなる。

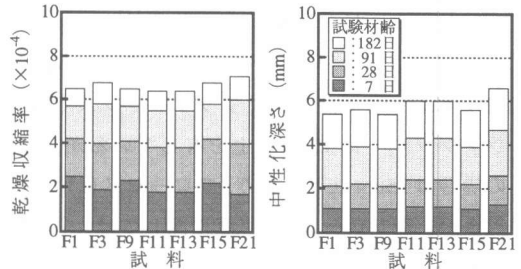


図-11 乾燥収縮率および中性化深さ (シリーズII)

(5) フロー値比が大きいフライアッシュほどブリーディング量は増大傾向を示すが、通常のコンクリートと比べると著しく少ない。また、フロー値比が大きいフライアッシュほど凝結時間は遅延傾向を示す。

(6) 二酸化けい素含有量が少ないフライアッシュでは圧縮強度は低下し、乾燥収縮率および中性化深さは全般に大きくなる。また、圧縮強度と静弾性係数、引張強度および曲げ強度の関係にフライアッシュの品質による影響はほとんど認められなかった。

#### 参考文献

- 1) 三岩敬孝・平岡伸哉・水口裕之・橋本親典：フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートに関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.391-396，1998.6
- 2) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針（案）・同解説，pp.135-144，1997
- 3) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（II），pp.85-89，1994.5
- 4) 日本建築学会：高耐久鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，pp.179-184，1991
- 5) 野口貴文・友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，No.472，pp.11-16，1995.6