

論文 フライアッシュを大量に使用したコンクリートの諸性状

本田 悟*1・椎葉大和*2

要旨:フライアッシュ置換率,水結合材比およびフライアッシュ品質の相違がフライアッシュを大量に使用した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,材齢91日で強度管理を行えば,水結合材比を40%以下にすることで置換率60%程度までは設計基準強度21N/mm²を満足するが,中性化の進行が顕著となるため,かぶり厚さを大きくするなど設計に考慮する必要がある。また,フライアッシュを大量に使用したコンクリートではフライアッシュの活性度が長期強度,乾燥収縮率および中性化の進行に及ぼす影響が比較的大きく,その活性度は二酸化けい素含有量と比表面積の積により判断できることが判明した。

キーワード:フライアッシュ,大量使用,ブリーディング,凝結,圧縮強度,中性化

1. はじめに

近年,電力の安定供給の観点から燃料の多様化が図られ,石炭火力発電は1996年度末において発電設備構成比で10%を占めている。また,石炭灰の発生量は一般産業を含めると石炭使用量の13.5%を占める年間約710万トンに達しており,建設・着工準備中の発電施設を考慮すると,2010年には約1300万トンに達すると予想される¹⁾。

この様な現状の中,日本建築学会により「フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説」が作成された。しかしながら,この指針では資料の蓄積が十分でないという理由で基本的な仕様のコンクリートでは置換率の上限を30%としている。

そこで,本論文ではフライアッシュ(以下,FA)をセメントの内割で大量に使用した際のコンクリートの諸性状について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料は表-1に示す通りで,FAには表-2に示す12種類を用い,FA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~F12とした。

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,水結合材比は35,40,45%,FA置換率はセメント質量の内割りで50,60,70%とし,FA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た。また,比較の対象として,水結合材比50,55,60%の普通コンクリート(P50,55,60)も同様の条件で打設した。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.15g/cm ³
細骨材	除塩海砂, 比重:2.56, F.M.:2.31
粗骨材	花こう岩系砕石, 比重:2.80, 実積率:57.1%
混和材	フライアッシュ, 12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 (%)	水分 (%)	強熱 減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /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	57.5	0.1	1.4	2.25	3500	110	88	101	II
F3	68.4	0.1	1.4	2.25	4150	109	86	100	II
F4	61.7	0.1	1.4	2.28	4080	109	91	102	II
F5	60.7	0.1	1.7	2.30	4090	108	96	110	II
F6	59.8	0.2	3.2	2.24	3250	108	86	98	II
F7	59.6	0.2	1.5	2.26	3990	107	91	103	II
F8	66.1	0.1	1.2	2.23	3840	105	88	103	II
F9	77.1	0.2	1.9	2.23	3690	105	87	94	II
F10	69.5	0.1	3.0	2.23	3830	103	84	93	II
F11	47.2	0.2	4.9	2.33	6100	102	89	100	II
F12	71.7	0.2	5.4	2.19	4940	95	92	100	III

*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)

練混ぜには強制練りミキサ（容量：50ℓ）を使用し、練混ぜ時間は空練り後2分としたが、F7～F12の場合はコンクリートの粘性が高く、時間内では練混ぜが不十分であったため、黙視により判断し練混ぜ時間を延長した。

2.3 試験項目

試験項目は表-4に示す9水準とした。なお、スランプおよび空気量は練上がり直後にコンクリートをらせん羽根付きアジテータ（容量：100ℓ、回転数：2 r.p.m.）に移行し、30分毎に90分間測定した。

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) 混和材添加率

FA置換率とスランプを一定とするのに要したSP添加率の関係を図-1に示す。SP添加率はF2のようなフロー値が110%程度の比較的良質なFAではFA添加率の増大に伴い減少している。しかし、減少の割合はFA置換率10%に対して0.05%程度と比較的小さい。また、SP添加率は水結合材比の増大に伴い減少しているが、その割合も水結合材比5%に対して0.05%程度と比較的小さい。

(2) ブリーディングおよび凝結

ブリーディングおよび凝結試験結果を図-2に示す。ブリーディング量はFA置換率および水結合材比の増大に伴いコンクリートの粘性低下に起因して増大しているが、最大でも $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であり、通常のコンクリートと比較するとかなり少ない。

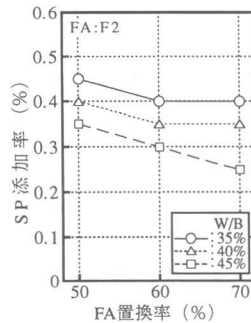


図-1 SP添加率

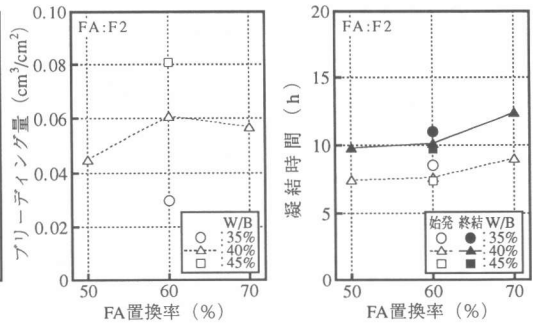


図-2 ブリーディングおよび凝結試験結果

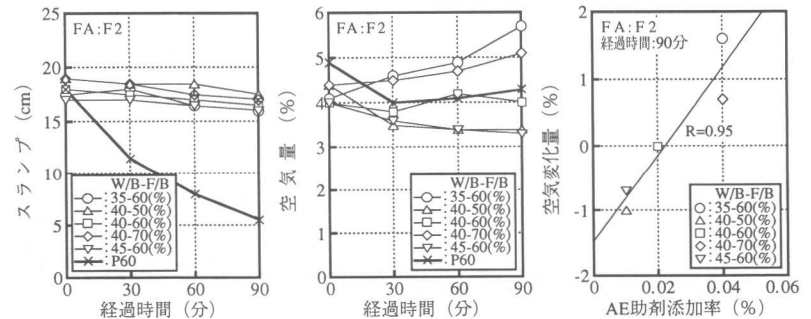


図-3 スランプおよび空気量の経時変化

表-3 調合条件

水結合材比 (%)	FA置換率 (%)	単位水量 (kg/m³)	単位粗骨材かさ容積 (m³/m³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
50, 55, 60	0	170	0.58	18 ± 1.5	4.5 ± 0.5
35, 40, 45	50, 60, 70				

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
スランプ	JIS A 1101に準拠
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	JIS A 1108, JIS原案およびJIS A 1113に準じ、標準養生後、材齢7, 28, 91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91日まで測定
促進中性化	文献 ²⁾ に準じ、前養生（標準養生：28日、温度20℃、湿度60%：28日）後、温度20℃、湿度60%、CO ₂ 濃度5%の環境下で6ヶ月間測定

凝結時間はFA置換率50%および60%では大差は認められないが、置換率70%では60%以下の場合と比べて始発および終結ともに2時間程度遅延している。また、水結合材比35%の場合にはSP添加率増大に起因して40%以上の場合と比べて1時間程度凝結は遅延する傾向が認められた。

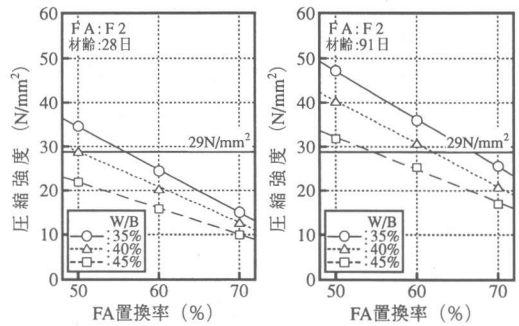
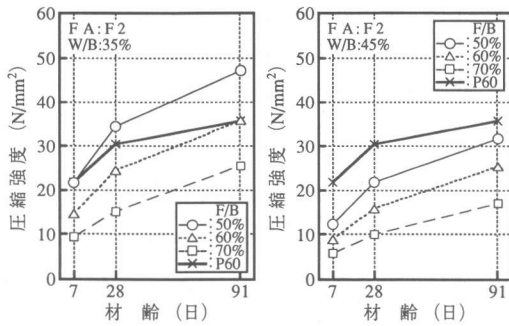


図-4 圧縮強度試験結果

(3) スランプおよび空気量の経時変化

スランプおよび空気量の経時変化を図-3に示す。F2のように比較的良質のFAの場合ではFA置換率および水結合材比がスランプの経時変化に及ぼす影響は小さく、90分間でのスランプロスが1~2cmと普通コンクリートと比べても著しく小さい。

空気量の経時変化に関しては、FA置換率および水結合材比の相違により空気量の経時変化は異なっている。このことは、FA置換率および水結合材比の直接的影響ではなく、AE助剤添加率の相違に起因していると考えられ、練上がり直後の空気量は同程度であっても、AE助剤添加率が大きい場合は経過時間に伴い空気量は増大する傾向が認められるため、AE助剤の過剰添加には注意が必要である。

(4) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-4に示す。FAを大量に使用したコンクリートの初期強度発現性は低いが、材齢28日を基準とした材齢91日での圧縮強度はP60が117%に対して、FA置換率50%では133~154%、置換率60%では145~167%、置換率70%では160~167%と置換率の増大に伴い長期材齢での強度発現が大きくなる。また、FA置換率の増大にはほぼ比例して圧縮強度は低下傾向を示すが、設計基準強度を21N/mm²と想定した場合の調合強度(29N/mm²)を満足するには、材齢28日ではFA置換率を50%以下にする必要があるが、材齢91日で強度管理を行えば水結合材比を40%以下にすることで置換率60%程度までFAをセメントの内割として使用可能である。

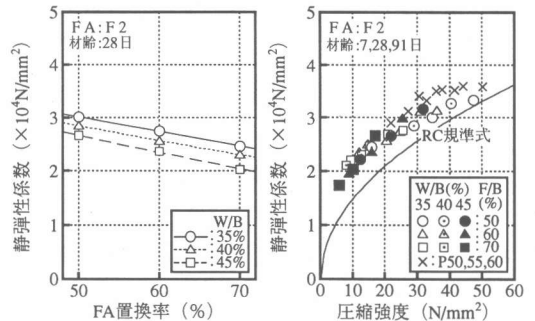


図-5 静弾性係数試験結果

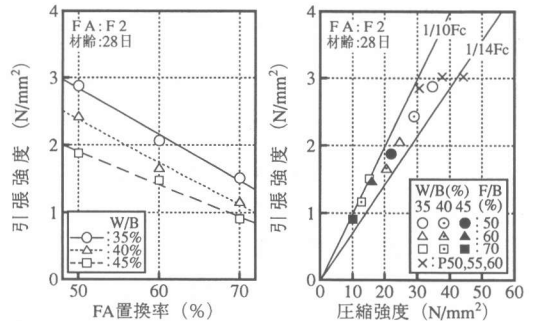


図-6 引張強度試験結果

(5) 静弾性係数および引張強度

静弾性係数試験結果を図-5に、引張強度試験結果を図-6に示す。静弾性係数はFA置換率の増大にほぼ比例して低下傾向を示すが、FA置換率の増大に伴う低下の割合は圧縮強度の場合の1/2程度であり、フライアッシュ置換率の影響は圧縮強度の場合より小さい。また、FA置換率および水結合材比が圧縮強度と静弾性係数の関係に及ぼす影響は認められない。

引張強度は圧縮強度の場合と同様にFA置換率の増大にほぼ比例して低下傾向を示し、FA置換率の増大に伴う低下の割合は圧縮強度の場合

と同程度である。また、圧縮強度と引張強度の関係は、引張強度は圧縮強度の1/10～1/14に分布し、置換率および水結合材比が両者の関係に及ぼす影響は認められない。

(6) 乾燥収縮および中性化

乾燥収縮および中性化試験結果を図-7に示す。乾燥収縮率はFA置換率および水結合材比の増大に伴い減少し、全般に普通コンクリートより小さい。このことは、FA置換率および水結合材比の増大に伴い単位セメント量が減少していることに起因すると考えられる。

中性化速度係数は水結合材比35%、FA置換率50%の調合では普通コンクリートと同等であるが、FA置換率および水結合材比の増大に伴い増大し、置換率60%以上では特に顕著となるため、かぶり厚さを大きくするなど設計に考慮する必要がある。

3.2 フライアッシュの品質の影響

(1) 混和材添加率

FAの種類およびフロー値比とスランプを一定とするのに要したSP添加率の関係を図-8に示す。FAの相違によりSP添加率は0.20～0.95%大幅に相違するが、SP添加率はフロー値比と相関が高く、置換率60%程度の場合でもフロー値比により管理可能である。

(2) ブリーディングおよび凝結

ブリーディングおよび凝結試験結果を図-9に示す。ブリーディング量はFAの相違により最大で10倍以上相違し、強熱減量が多いFAほどコンクリートの粘性の増大に起因して減少し、Ⅲ種FAであるF12では $0.01\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下と極端に少ない。

凝結時間はF6を除くFAではFAの相違により若干相違するが、その差は始発および終結とも最大で1時間程度と小さい。しかし、F6は他のFAの場合より始発で6時間、終結で7時間程度遅延している。F6の物理性状は他のFAと大差ないため、FA中に凝結遅延を引き起こす何らかの成分が含まれると推測されるが、現時点では特定できない。

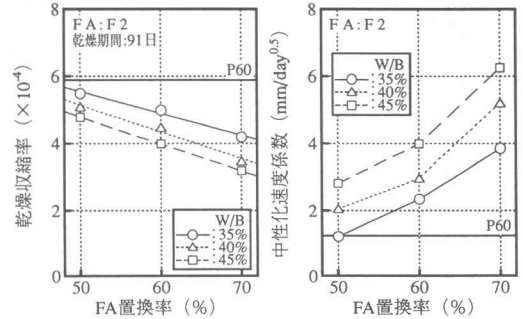


図-7 乾燥収縮および中性化試験結果

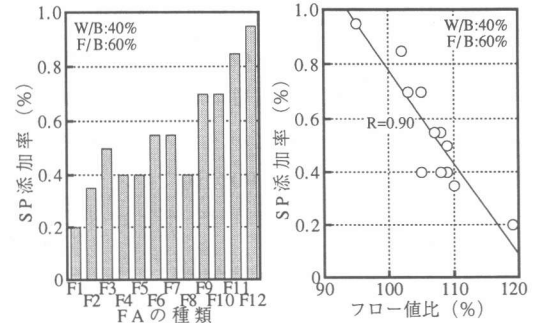


図-8 SP添加率

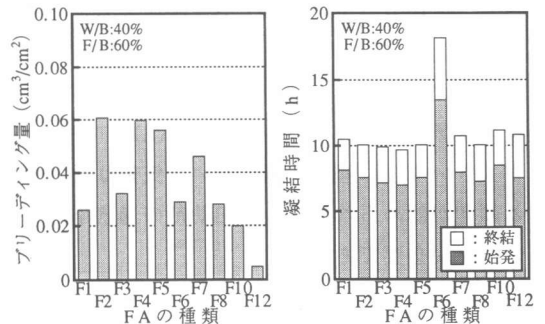


図-9 ブリーディングおよび凝結試験結果

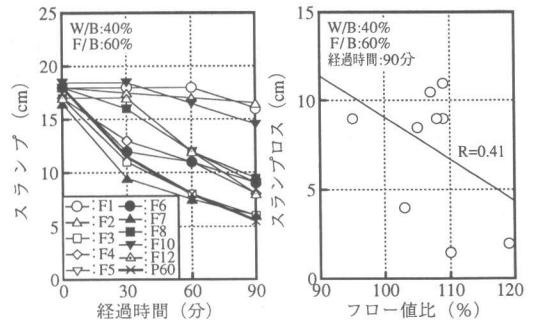


図-10 スランプの経時変化

(3) スランプおよび空気量の経時変化

スランプおよび空気量の経時変化を図-10および図-11に示す。スランプの経時変化は全般に

普通コンクリートより小さいが、90分間でのスランプロスは1～11cmとFAの相違により大幅に異なり、全般にフロー値比が大きい粒形が良いFAほどスランプロスも小さい。

空気量の経時変化はFAの相違により若干相違するが、90分間での空気変化量は-1～0.6%と比較的小さい。また、強熱減量が大きいFAほど空気量の減少が大きくなる傾向が認められた。

(4) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-12に示す。圧縮強度はFAの相違により最大で27%程度相違している。このように圧縮強度が大幅に相違する要因としては、ポゾラン反応を支配するガラス相の比表面積が影響していると考えられ、ガラス相の比表面積を表す指標として二酸化けい素含有量と比表面積の積³⁾を取り上げて検討した。結果は初期材齢では圧縮強度との相関性は低いですが、材齢91日では比較的良好な相関を示した。よって、FAを大量に使用したコンクリートではFAの活性度が長期強度に及ぼす影響が大きく、その活性度は二酸化けい素含有量と比表面積の積により判断できると考えられる。また、凝結遅延傾向が顕著に認められたF6を除くと、材齢91日では設計基準強度を21N/mm²と想定した場合の調合強度(29N/mm²)を満足している。

(5) 静弾性係数および引張強度

静弾性係数試験結果を図-13に、引張強度試験結果を図-14に示す。静弾性係数はFAの相違により最大で17%程度相違しているものの、圧縮強度の場合より変動は小さい。また、FAの相違が圧縮強度と静弾性係数の関係に及ぼす影響は認められない。

引張強度はFAの相違により最大で35%程度相違し、圧縮強度の場合より変動は大きい。また、圧縮強度と引張強度の関係は、引張強度は圧縮強度の1/10～1/14に分布し、FAの相違が圧縮強度と引張強度の関係に及ぼす影響は認められない。

(6) 乾燥収縮および中性化

乾燥収縮試験結果を図-15に、中性化試験結果を図-16に示す。乾燥収縮率はFAの相違により

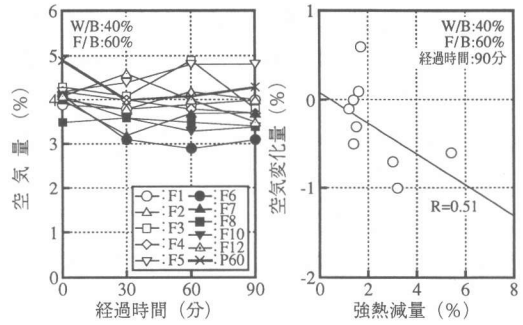


図-11 空気量の経時変化

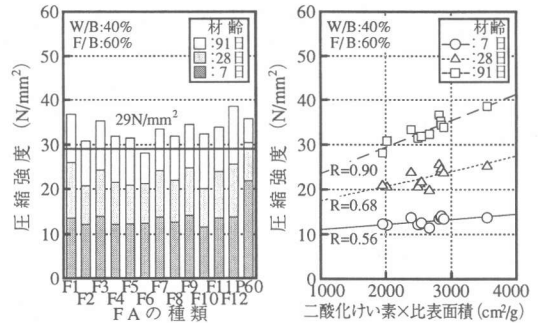


図-12 圧縮強度試験結果

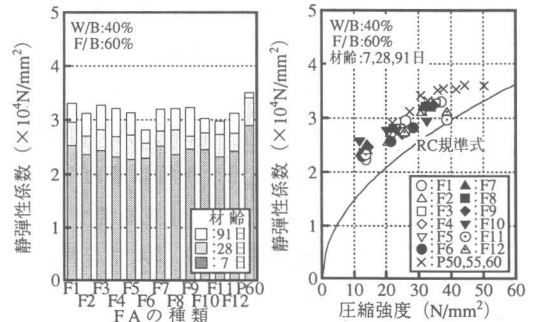


図-13 静弾性係数試験結果

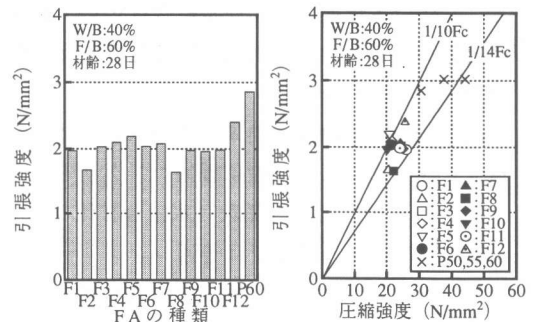


図-14 引張強度試験結果

最大で25%程度相違し、二酸化けい素含有量と比表面積の積が大きいものほど乾燥収縮率は大きくなる傾向が認められた。このことは、二酸化

化けい素含有量と比表面積の積が大きいFAほど活性度が高く、圧縮強度は増大する反面、体積減少率が増大するためと推測される。また、全般に乾燥収縮率は普通コンクリートより小さくなる傾向が認められた。

中性化速度係数はFAの相違により最大で17%程度相違し、二酸化けい素含有量と比表面積の積が大きいものほど中性化速度係数は小さくなる傾向が認められた。このことは、二酸化けい素含有量と比表面積の積が大きいFAほど活性度が高く、コンクリート内部組織が密実となり、CO₂の拡散を抑制するためと考えられる。また、普通コンクリートと比較すると中性化速度係数は3倍程度と全般に大きい。

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) 良質なFAでは置換率の増大に伴いSP添加率は減少、ブリーディング量は増加し、FA置換率60%以上では凝結の遅延傾向が顕著となる。また、スランプおよび空気量の経時変化にFA置換率および水結合材比が及ぼす影響は認められないが、AE助剤の過剰添加には注意を要する。
- (2) 材齢91日で強度管理を行えば水結合材比を40%以下にすることで置換率60%程度までは設計基準強度21N/mm²を満足する強度が得られる。また、FA置換率および水結合材比が圧縮強度と静弾性係数および引張強度の関係に及ぼす影響は認められない。
- (3) 乾燥収縮率はFA置換率および水結合材比の増大に伴い減少し、全般に普通コンクリートより小さい。中性化速度係数は水結合材比35%、FA置換率50%の割合では普通コンクリートと同等であるが、FA置換率および水結合材比の増大に伴い増大し、置換率60%以上では特に顕著となるため、かぶり厚さを大きくするなど設計に考慮する必要がある。
- (4) SP添加率はフロー値比と相関が高く、置換率60%程度の場合でもフロー値比により管理可

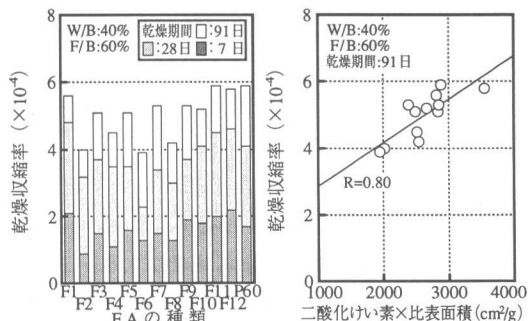


図-15 乾燥収縮試験結果

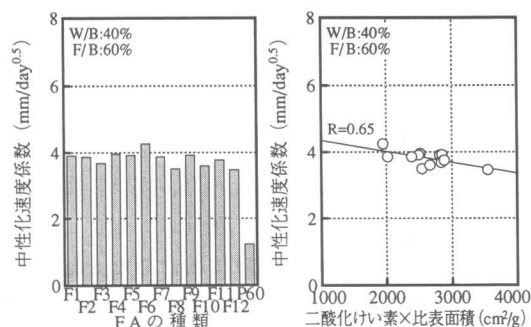


図-16 中性化試験結果

能である。また、FAの相違によりブリーディング量は最大で10倍以上相違し、凝結時間は6~7時間程度遅延するFAも存在する。

(5) FAを大量に使用したコンクリートではFAの活性度が長期強度に及ぼす影響が大きく、その活性度は二酸化けい素含有量と比表面積の積により判断できると考えられる。また、FAの相違が圧縮強度と静弾性係数および引張強度の関係に及ぼす影響は認められない。

(6) 二酸化けい素含有量と比表面積の積が大きいFAほど、活性度の増大に起因して乾燥収縮率は大きくなり、中性化速度係数は小さくなる傾向が認められた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針(案)・同解説, pp.116-148, 1999.2
- 2) 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, 1991.7
- 3) 本田 悟, 椎葉大和：各種フライアッシュがコンクリートの諸特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.351-356, 1996.6