

論文 フライアッシュを使用するコンクリートの諸性能について

木村正彦*1・愛甲安富*2・市之瀬敏勝*3・吉田彌智*4

要旨: 本研究は、粉末度が細かいフライアッシュをコンクリートに混入することでコンクリートの単位水量、圧縮強度などの諸性能が、通常の粉末度のフライアッシュを用いたコンクリートに比べて、どの程度改善できるかを実験で確かめたので、その結果を報告するものである。

キーワード: フライアッシュ, 単位粉体量, 普通コンクリート, 単位水量, 比表面積

1. はじめに

石炭資源は、世界各地に幅広く分布し、また市場価格も安定して埋蔵量も多い石油代替エネルギーである。その副産物である「石炭灰」の有望な有効利用先は、『コンクリートの混和材』としての活用が考えられる。

現状では細かいものと粗いものを混ぜて出荷しているが、別々に出荷すれば、付加価値が高まる。しかし、その中で粉末度の細かいフライアッシュを混入したコンクリートの性状を示すデータは少ない。今回、火力発電所の電気集塵機から段別採取したものや分級したフライアッシュで、同じ灰で細かいものから粗いものまでを対象とし、粉末度が細かいフライアッシュがコンクリートに用いられた時、通常の粉末度のフライアッシュとどの程度性状が違うかを調べた。

そこで、本研究は、粉末度を中心としたフライアッシュの品質とフライアッシュを混入したコンクリートの各種性能との関係を調べるため、種々のコンクリート試験を実施したので、その結果を報告するものである。

2 使用材料

(1)フライアッシュ

試験に用いたフライアッシュは、中部電力(株)碧南火力発電所の電気集塵機から段別採取された2炭種(炭種A・炭種B)・6種類と原粉サイロより採取した原粉および細粉・粗粉に分級した1炭種(炭種C)・3種類、合計3炭種・9種類である。

表-1にフライアッシュの主な品質を示す。フライアッシュの粉末度の区分の記号として、細粉(S)、原粉(A)、粗粉(B)をそれぞれ用いる。

表-1 採取したフライアッシュの区分と主な品質

炭種	品質	種類 (JIS)	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)	45μ残分 (%)	70-値比 (%)	活性度指数 (%)		平均粒径 (μm)	強熱減量 (%)	SiO ₂ (%)	好リンフォル吸着量 (%)	未燃カーボン (%)
							28日	91日					
A	S	II	2.32	6880	14.0	111	91	98	7.1	1.0	54.1	0.17	0.79
	A	II	2.18	4400	21.2	105	86	98	19.5	1.1	54.9	0.17	0.86
	B	IV	2.04	2640	56.7	97	82	96	46.9	1.0	53.5	0.16	0.79
B	S	I	2.32	5810	5.0	117	100	110	5.0	1.2	64.1	0.19	0.83
	A	II	2.12	3410	16.7	109	93	102	14.4	0.8	60.4	0.13	0.49
	B	規格外	1.89	1920	68.0	93	81	103	53.8	0.6	60.8	0.09	0.32
C	S	II	2.38	5420	0.0	112	92	100	5.2	3.3	50.4	0.56	2.71
	A	II	2.22	3600	31.7	107	86	91	24.9	2.5	52.6	0.39	1.72
	B	IV	2.13	2060	61.2	98	75	79	40.5	1.9	52.9	0.31	1.53

*1 中部電力(株)電力技術研究所研究主査 工修 (正会員)

*2 東海コンクリート工業(株)コンテックグループ係長

*3 名古屋工業大学システムマネジメント工学科教授 工博 (正会員)

*4 中部電力(株)技術顧問・名古屋工業大学名誉教授 工博 (正会員)

[A灰]

産炭地は、南屯（中国）50%、チボリ（オーストラリア）50%の混炭である。最も細かい灰は、ブレン値、フロー値比で十分I種に相当する品質となっているが、45 μ m篩い残分と活性度指数の91日で規格値を満足せず、II種となった。最も粗い灰は、ブレン値はII種の範囲であるが、45 μ m篩い残分が大きいため、IV種の範囲にとどまった。また、全体として強熱減量も小さく、JIS規格を十分満足する。

[B灰]

産炭地は、エベネザ（オーストラリア）100%である。最も粗い灰は、密度が1.89で規格の1.95以上を満足していないため、規格外となった。後の値は、JIS規格を満足する。

[C灰]

産炭地は、ドレイトン（オーストラリア）70%、パンアプレミアム（インドネシア）30%の混炭である。最も細かい灰は、強熱減量が3.0%をやや越えているが、品質的にはI種とほとんど変わらないものと考えることができる。

(2)セメント・骨材・混和剤 セメントは、3社の普通ポルトランドセメントを等量混合したものを用いた。等量混合したセメントの密度は3.16g/cm³、比表面積は3280cm²/gである。

骨材は、三重県北勢地区産の硬質砂岩碎石・砕砂を用いた。

化学混和剤は、リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体のものを、AE補助剤として高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤をそれぞれ用いた。

3. 試験方法

(1) 試験ケースおよび配合

採取した石炭灰9種類について、石炭灰の混入率を、0%・15%・30%・45%とそれぞれ変えてコンクリート試験を実施した。表-2に、コンクリートの配合表を示す。スランブは12cmを、空気量は5%を、細骨材率は44%を、AE減水剤の量は3500cc/m³をそれぞれ標準とした。フライアッシュを混入することによって、同一のスランブを得るために必要な単位水量を低減させることができ、これがフライアッシュの流動性付与効果として評価できる。

(2) 試験項目

①フレッシュコンクリート試験

スランブ、空気量（いずれも経時変化を含む）、練り上り温度、ブリーディングをそれぞれ測定した。

②硬化コンクリート試験

単位体積質量、静弾性係数、動弾性係数、圧縮度、凍結融解試験、乾燥収縮試験、断熱温度上昇試験をそれぞれ行った。

(3) 試験要因

フライアッシュの種類（3種類）および置換率（4種類）を試験要因として実験を行った。

①フライアッシュの種類

中部電力(株)碧南火力発電所では、年間50種類程度石炭を燃焼させているが、本実験では、5産炭地の石炭を燃焼させて得られた3種類の石炭灰を使用した。

②フライアッシュの置換率

フライアッシュセメントでも、置換率は最大30%で用いられるのが一般的であるが、できる限り大量使用する場合を想定して、置換率を0%、15%、30%、45%として実験を行った。置換率45%は、普通コンクリートとしては、ほとんど実績のない値である。

4. 試験結果および考察

フライアッシュの混入によるコンクリートの性能向上とフライアッシュの品質の関係を把握するため、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートに分けて実験的な検討を行った。

(1)フレッシュコンクリートの性状

①スランブ・空気量

図-1・図-2にスランブ・空気量の経時変化の一例を示す。

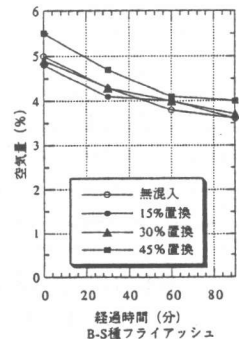
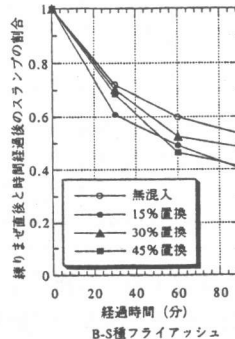


図-1 スランブの経時変化 図-2 空気量の経時変化

スランブは、フライアッシュの混入により低下する傾向が見られる。空気量は、フライアッシュ混入

による大きな変化は見られなかった。

②単位水量

図-3および図-4に、配合条件としてスランプ 12±2 cm とした時、同一単位結合材量、同一細骨材比でこの条件が達成される各配合の単位水量と使用したフライアッシュのブレン値およびフロー値比の関係を示す。

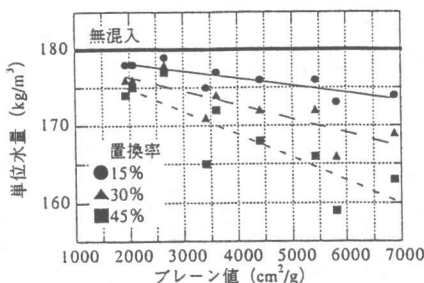


図-3 単位水量とブレン値

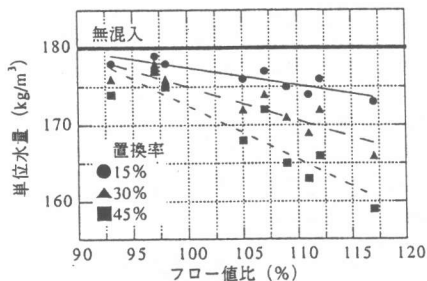


図-4 単位水量とフロー値比

今回使用したフライアッシュは、最も品質がよくないものでもフロー値比は92%以上あるため、たとえブレン値が2000cm²/g程度であっても単位水量は低減できる。

単位水量低減効果は、フライアッシュのブレン値が大きいほど、フロー値比が大きいほど、また、置換率が大きいほど大きくなる。ブレン値に比較してフロー値比の方が、単位水量低減効果と良好な相関関係が認められる。これは、フライアッシュの流動性付与効果が、粒径のみならず粒度分布に関係することを意味している。

細かく適切な粒度分布を持つフライアッシュが品質のよいものと判断され、モルタルやコンクリートへ混入した場合の流動性付与効果は、フライアッシュの密度にも影響を受ける。

表-2 コンクリートの配合

配合記号	FA/C+FA (%)	W/C+FA (%)	単位量(kg/m ³)					A E補助剤 (cc/m ³)
			C	FA	W	S	G	
350-0	0	51.4	350	0	180	766	989	28.0
AS350-15	15	49.7	297.5	52.5	174	760	981	59.5
AS350-30	30	48.3	245.0	105.0	169	758	980	87.5
AS350-45	45	46.6	192.5	157.5	163	758	979	94.5
AA350-15	15	50.3	297.5	52.5	176	756	970	45.5
AA350-30	30	49.1	245.0	105.0	172	751	971	70.0
AA350-45	45	48.0	192.5	157.5	168	747	965	77.0
AB350-15	15	51.1	297.5	52.5	179	751	970	28.0
AB350-30	30	50.9	245.0	105.0	178	741	958	35.0
AB350-45	45	50.6	192.5	157.5	177	732	946	70.0
BS350-15	15	49.4	297.5	52.5	173	761	984	59.5
BS350-30	30	47.4	245.0	105.0	166	762	985	87.5
BS350-45	45	45.4	192.5	157.5	159	763	987	105.0
BA350-15	15	50.0	297.5	52.5	175	756	978	49.0
BA350-30	30	48.9	245.0	105.0	171	752	971	59.5
BA350-45	45	47.1	192.5	157.5	165	749	968	70.0
BB350-15	15	50.9	297.5	52.5	178	749	969	42.0
BB350-30	30	50.3	245.0	105.0	176	739	955	56.0
BB350-45	45	49.7	192.5	157.5	174	728	941	56.0
CS350-15	15	50.3	297.5	52.5	176	758	980	87.5
CS350-30	30	49.1	245.0	105.0	172	757	977	150.5
CS350-45	45	47.4	192.5	157.5	166	757	973	175.0
CA350-15	15	50.6	297.5	52.5	177	755	976	52.5
CA350-30	30	49.7	245.0	105.0	174	751	970	80.5
CA350-45	45	49.1	192.5	157.5	172	745	962	105.0
CB350-15	15	50.9	297.5	52.5	178	753	973	42.0
CB350-30	30	50.3	245.0	105.0	176	746	964	56.0
CB350-45	45	50.0	192.5	157.5	175	738	954	70.0

③ブリーディング量

フライアッシュが球形であることから、フライアッシュ自体が流動するために必要な水量はセメントに比較して少なくてもよいので、フライアッシュを混入したコンクリートのブリーディング量は、フライアッシュ無混入の場合に比較して多くなるのが普通である。しかし、同一コンシステンシーで考えると、良質なフライアッシュを用いる場合には単位水量を減らすことができるので、ブリーディング量は小さくなる。ここでいう良質とは、形の不良な粒を含む割合の小さいもの、粒度分布が(モルタル・コンクリートの流動性向上の観点から)適切なもので、直接的にはフロー値比が大きいものである。一般には、粒度が細かい方がフロー値比は大きくなる。

図-5および図-6に、本実験におけるフライアッシュのブレン値およびフロー値比とブリーディング率との関係をそれぞれ示す。

置換率15%の相関性はよくないが、30%以上混入の場合には両指標（ブレン値・フロー値比）とブリーディング率との相関性は非常に強い。傾向として、粒度が細かい（ブレン値の高い）フライアッシュのブリーディング率は小さい。ブレン値の高い(5000cm²/g以上)フライアッシュを用いたコンクリートでは、無混入と比較して単位水量が20kg程度少ないことが大きな理由と考えられる。本実験では、すべての配合において単位水量をフライアッシュ無混入に比較して減ずることができたが、ブリーディング率で無混入の場合と同等か下回ったのは、ブレン値が5000cm²/gを越える品質のもののみであった。

それ以外のフライアッシュを用いたコンクリートでは、単位水量を減ずることができたにも拘わらずブリーディング率が無混入よりも大きい。さらに、置換率が大きいほど単位水量の低減率も大きい、ブリーディング率も大きくなる傾向にある。

本実験に用いたフライアッシュの範囲では、ブレン値が5000cm²/g以下、フロー値比が110%以下の場合には、ブリーディング量は無混入に比較して大きくなることが判断できる。

(2)硬化コンクリートの性状

①圧縮強度

図-7に材齢と圧縮強度の関係を示す。フライアッシュの比表面積が大きいほど圧縮強度が大きく発現することがわかる。このことは、比表面積が大きいほど単位水量が小さいことに起因していると考えられる。

フライアッシュ置換率が少ないほど、比表面積が大きいほど、圧縮強度が大きくなる傾向は、フライアッシュが強度発現に大きく寄与しているといえる。特に、比表面積が大きい、グレードSでは、無混入のものを強度的に上回る結果

②圧縮強度と弾性係数

図-8に圧縮強度と弾性係数との関係を示す。

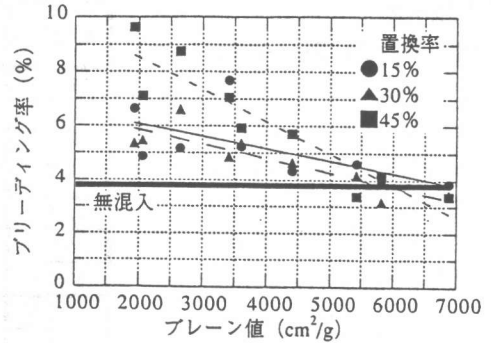


図-5 ブレン値とブリーディング率

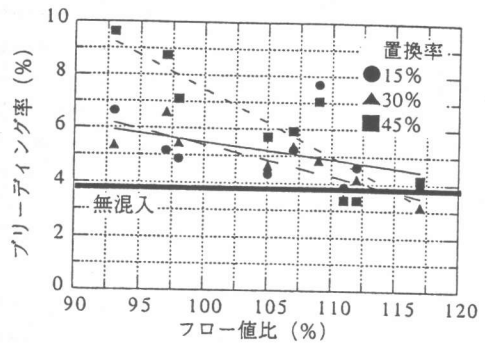


図-6 フロー値比とブリーディング率

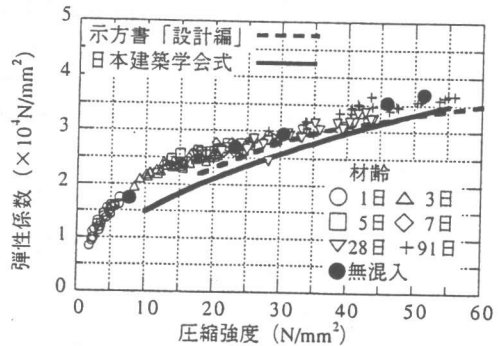


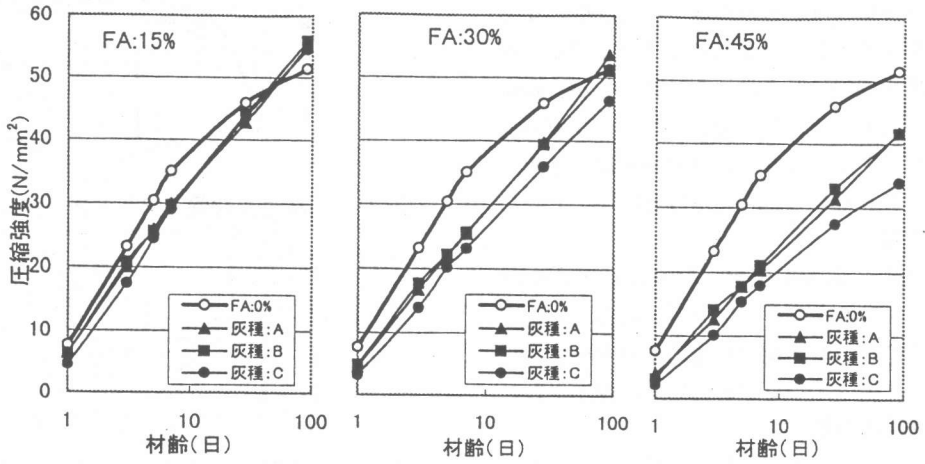
図-8 圧縮強度と弾性係数

フライアッシュの置換率、材齢に拘わらず、圧縮強度と弾性係数は一定の関係で表されることが明らかになった。特に、無混入の場合も一本の曲線上（一定の関係）に乗っており、フライアッシュを混入することが弾性係数に関係ないことがわかる。

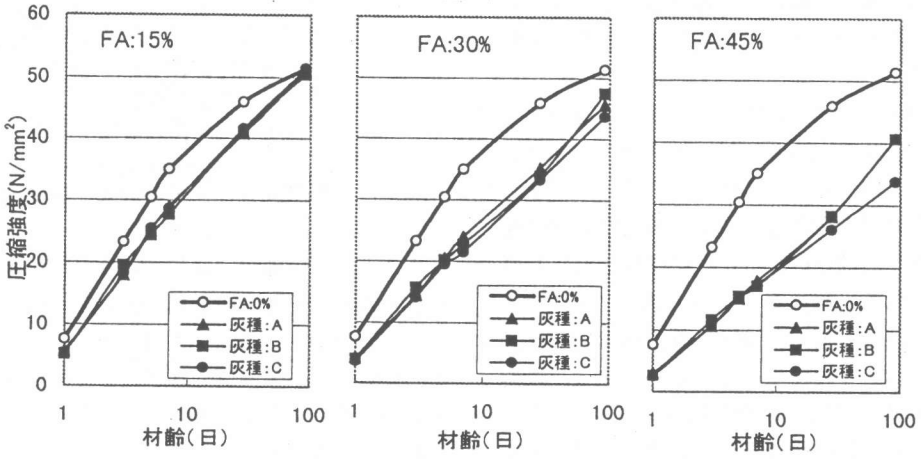
③温度上昇特性

図-9に、各配合の温度上昇曲線（比表面積）を

品質 S



品質 A



品質 B

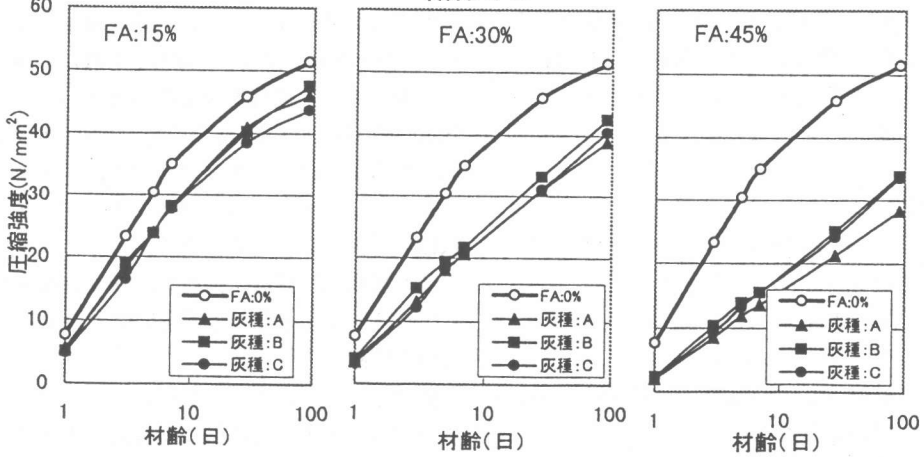


図-7 材齢と圧縮強度

示す。同じ置換率であれば、比表面積が小さいフライアッシュほど最終温度上昇量は低くなる。細粒フライアッシュと普通粒度フライアッシュは、温度上昇量はほとんど同じであるが、細粒の方が初期の温度上昇が速い。ブレン値の大きいフライアッシュを用いた配合では、水和反応が早く進んだものと考えられる。

④乾燥収縮

図-10に、置換率45%の乾燥収縮ひずみの経時変化を示した。フライアッシュを混入した方が無混入に比較して乾燥収縮ひずみが小さくなっており、フライアッシュの効果が確認された。

⑤凍結融解抵抗性

コンクリートの凍結融解抵抗性は、基本的にコンクリートの所定空気量を確保することにより満たされる。一般には、確保された空気泡の径とコンクリートの圧縮強度に依存すると言われている。

図-11に、種類Aのフライアッシュを用いた置換率45%とした配合のコンクリートの凍結融解抵抗性を示した。全てのコンクリートが $5 \pm 1\%$ の空気量を確保しており、所定空気量の観点からは、耐凍結融解抵抗性は確保されるものと考えられる。置換率15%・30%では300サイクル終了時でも相対動弾性係数は90%（60%以上で耐久的）が確保されている。しかし、置換率45%の場合には、粒度の粗いフライアッシュほど、相対動弾性係数の低下が著しく、耐久性が低下している。

このことは、試験時の供試体の圧縮強度による。AB350-45の配合では、材齢14日の推定圧縮強度が、他の試験体に比べて小さいことに起因していると考えられる。

5. まとめ

本研究から得られた成果を、フレッシュ性状と硬化後の性状に分けて記述する。

(1) フレッシュ性状

- ①フライアッシュの混入により、コンクリートのスランプは低下し、空気量はあまり変わらないという結果が得られた。
- ②同一のスランプを得るための単位水量は、フ

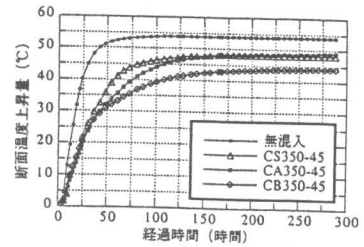


図-9 温度上昇曲線（フライアッシュの相違）

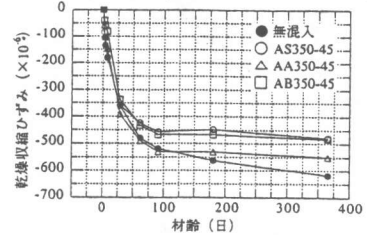


図-10 乾燥収縮ひずみ（置換率45%）

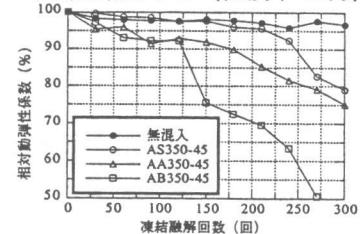


図-11 相対動弾性係数の変化（置換率45%）

ライアッシュが細かいほど、置換率が大きいほど、低減できる。45%置換率で、最大 20kg/m^3 である。

③フライアッシュを混入することにより、コンクリートのブリーディング量が大きくなる傾向が確認された。しかし細粉は、あまり変わらない。

(2) 硬化コンクリートの性状

①フライアッシュの比表面積が大きいほど圧縮強度が大きく発現する。特に、粉末度が細かいフライアッシュでは、置換率15%であれば、無混入のコンクリートと同程度以上の強度を示した。

②コンクリートの温度上昇は、フライアッシュを混入することにより小さくできる。

③フライアッシュを混入することによって、乾燥収縮を低減することができる。

④凍結融解抵抗性は、強度発現が十分なされれば、フライアッシュを混入しても確保できる。

【参考文献】

- 1) 金津努・木村正彦：フライアッシュの品質とコンクリートの性能に関する検討，電力中央研究所報告，平成12年4月