

論文

[1152] フライアッシュを混入したダムコンクリートの諸特性に関する
実験的考察

山口温朗 (財団法人ダム技術センター)

正会員 原 稔明 (水資源開発公団 試験所)

正会員 自閑茂治 (水資源開発公団川上ダム建設所)

正会員○加藤宏基 (水資源開発公団徳山ダム建設所)

1. はじめに

ダムコンクリートの設計基準強度は、標準養生を行った材令91日の圧縮強度を用いる。また、ダムのように長年にわたって十分安定を保たなければならない構造物においては基準材令時に所要強度を満足するだけでなく、その強度が相当長期にわたり漸増するようなコンクリートであることが望ましいとされている。¹⁾ このため最近のダムコンクリートにはポゾラン混和材であるフライアッシュを利用している例が多い。

一方、フライアッシュの供給については、本材料が石炭を用いる火力発電所の副産物であるところから、品質の優れたものの供給には一定の限界があり、近い将来においては必要量の供給が得られない可能性もある。

本論文は、以上の観点から従来のスランプを有するコンクリート（以下「有スランプコンクリート」という）、RCD用コンクリートの双方を対象に、フライアッシュ置換率を変えた場合および品質の異なるフライアッシュを用いた場合のフライアッシュ混入コンクリートについて、フレッシュコンクリートのコンシステンシーおよび硬化コンクリートの圧縮強度特性を実験的に検討し、フライアッシュのダムコンクリートへの適用の有効性を確認したものである。

2. 試験内容

2. 1 試験項目

2. 1. 1 フライアッシュ置換率の違いによるコンクリートの特性の検討

有スランプコンクリートは、硬化コンクリートについて $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の標準供試体（フルサイズ $G_{\text{max}}=150\text{mm}$ で練り混ぜ後、ふるい目40mmのふるいでウェットスクリーニングした試料で作成）による圧縮強度試験（JIS A 1108）を材令7日、28日、91日、182日、365日で実施した。

RCD用コンクリートは、フレッシュコンクリートについて振動台式コンシステンシー試験（VC試験）を実施し、大型VC値1回、小型VC値2回を測定し、圧縮強度試験を実施した。

2. 1. 2 フライアッシュの品質の違いによるコンクリートの特性の検討

品質の異なる5種類のフライアッシュを混入した有スランプコンクリートおよびRCD用コンクリートについて単位水量の検討を行い、さらに標準供試体による圧縮強度試験を実施した。

2. 2 使用材料および配合

2. 2. 1 フライアッシュ置換率の違いによるコンクリートの特性の検討に使用した材料および配合

(1) 有スランプコンクリート

セメントは中庸熟ポルトランドセメント（比重=3.20、比表面積=3,270 cm^2/g ）を、フライアッシュはA社製フライアッシュ（比重=2.22、比表面積=3,930 cm^2/g 、強熱減量=2.60%、単位水量比=98%）を、骨材は実在するダムの原石山（花崗岩）より採取し、破碎工場にて所定の粒度構成に調整した細骨材（FM=2.50、比重=2.69、吸水率=0.97%）、粗骨材（ $G_{\text{max}}=150\text{mm}$ 、比重=2.72、吸水率=

0.44%, 3分級)を使用した。

配合ケースは表-1に示すように、Aシリーズでは単位セメント量を一定にしてフライアッシュ置換率を変えた場合、Bシリーズはフライアッシュ置換率を一定にして単位セメント量を変えた場合である。いずれのケースもコンシステンシー(スランプ=3cm)および空気量(フルサイズG_{max}=150mm換算で3%)を一定とするように練り混ぜ試験により配合を決定した。

表-1 配合ケース一覧表 (1)

実験 シリーズ	配合		最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C+F	F/C+F	s/a	単位量(kg/m ³)			
	名称	記号							W	C+F	S	G
A	A-1	○	150	3±1	3±1	84	0	26	117	140	562	1620
	A-2	●	150	3±1	3±1	81	30	26	113	140	562	1617
	A-3	◐	150	3±1	3±1	79	35	26	111	140	563	1620
	A-4	◑	150	3±1	3±1	76	40	26	107	140	565	1627
	A-5	◎	150	3±1	3±1	72 (56)	30 (46)	26	101	140 (181)	559	1643
	A-6	◉	150	3±1	3±1	69 (45)	30 (54)	26	96	140 (212)	555	1653
B	B-1	■	150	3±1	3±1	85	35	26	111	130	565	1627
	B-2	△	150	3±1	3±1	62	35	25	111	180	532	1614
	B-3	○	150	3±1	3±1	56	35	25	111	200	527	1600

- (注) 1. A-5 配合は、細骨材の微粒分(0.15mm未満)の50%をフライアッシュで置換したものである。
 2. A-6 配合は、細骨材の微粒分(0.15mm未満)の100%をフライアッシュで置換したものである。
 3. A-5、A-6 配合の()内の数字は、フライアッシュの置換分をセメントの一部とみなした場合の値である。

(2) RCD用コンクリート

セメントは中庸熱ポルトランドセメント(比重=3.23、比表面積=3,100cm²/g)を、フライアッシュはA社製フライアッシュ(比重=2.28、比表面積=3,650cm²/g、強熱減量=2.29%、単位水量比=100%)を、骨材は実在するダムの原石山(花崗岩)より採取し、破碎工場にて所定の粒度構成に調整した細骨材(FM=2.63, 比重=2.69, 吸水率=0.77%)および粗骨材(G_{max}=150mm, 比重=2.70, 吸水率=0.58%, 3分級)を使用した。

配合ケースは表-2に示すように、単位水量、単位結合材量、細骨材率を一定とした。

表-2 配合ケース一覧表 (2)

実験 シリーズ	配合 名称	最大寸法 (mm)	W/C+F (%)	F/C+F (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)			
						W	C+F	S	G
C	C-1	150	77	0	27	100	130	609	1657
	C-2	150	77	20	27	100	130	606	1654
	C-3	150	77	35	27	100	130	608	1661
	C-4	150	77	50	27	100	130	602	1648

2. 2. 2 フライアッシュの品質の違いによるコンクリートの特性の検討に使用した材料および配合

セメントは中庸熱ポルトランドセメント(比重=3.21、比表面積=3,260cm²/g)を、品質の異なる5種類のフライアッシュは、表-3に示す物性のものを使用した。また骨材は実在するダムの原石山(砂岩)より採取し、破碎工場にて所定の粒度構成に調整した細骨材(FM=2.66, 比重=2.65, 吸水率=0.78%)および粗骨材(G_{max}=150mm, 比重=2.66, 吸水率=0.39%, 4分級)を使用した。

配合仕様については有スランプコンクリートは、G_{max}=150mm, スランプ3±1cm, 空気量3±1%, F/C+F=30%, S/a=26%, C+F=200および160kg/m³で実施した。またRCD用コンクリー

表-3 フライアッシュの主要物性

フライアッシュ	比重	比表面積 (cm ² /g)	網ふるい残分		モルタル※ 単位水量比 (%)	湿分 (%)	引張熱収量 (%)	メチレンブルー 吸着量 (mg/g)
			88μm(%)	44μm(%)				
a	2.22	2,680	6.9	20.2	97	0.1	0.9	0.2
b	2.09	3,350	2.2	12.4	101	< 0.1	1.8	0.3
c	2.18	3,690	3.8	15.2	102	0.2	3.3	0.5
d	2.29	5,010	0.4	2.8	98	0.2	5.0	0.8
e	2.20	3,320	9.5	24.5	103	0.1	5.5	0.5
JIS 規格	>1.95	>2,400			< 102	< 1.0	< 5.0	

※ JIS A 6201の「フライアッシュ」に規定されている単位水量比試験では、フライアッシュ置換率を25%としているが、今回は30%に変更し試験を実施した。

トは、Gmax=150mm, 空気量1.5±0.5%, F/C+F=30%, S/a=30%, C+F=130kg/m³で実施した。

3. 試験結果および考察

3. 1 フライアッシュ置換率の違いによるコンクリートのコンシステンシーおよび圧縮強度

3. 1. 1 コンシステンシー

(1) 有スランプコンクリート²⁾

練混ぜ試験の結果決定した配合(表-1)および図-1に示すフライアッシュ置換率と単位水量比の関係より次のことがいえる。

- ① セメントの一部をフライアッシュで置換することによって目標スランプを得るために必要な単位水量を低減することができる。単位セメント量C+F=140kg/m³の場合、セメント単体のケースでは単位水量W=117kg/m³であるのに対して、フライアッシュ置換率F/C+F=30, 35, 40%のケースでは、それぞれW=113kg/m³(3%減)、W=111kg/m³(5%減)、W=107kg/m³(9%減)となる。

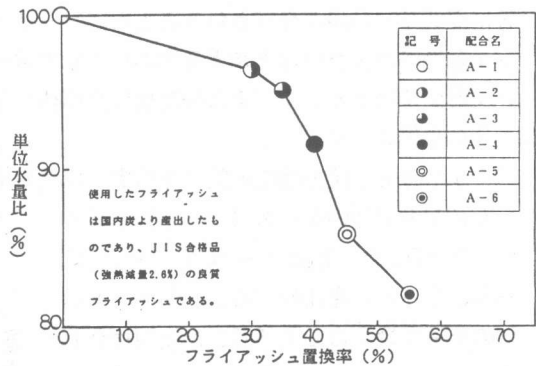


図-1 フライアッシュ置換率と単位水量比の関係

- ② 図-1によれば、フライアッシュ置換率を増加することによって、所要の単位水量は直線的に減少するがこの傾向は特に置換率30%以上で著しく、良質なフライアッシュの混入によるコンシステンシーの改善効果が確認された。

(2) RCD用コンクリート

図-2に示すフライアッシュ置換率とVC値の関係より次のことがいえる。

- ① 大型VC値、小型VC値は、双方ともにフライアッシュ置換率の増加にともなって減少しており、特に大型VC値の減少率が著しく、有スランプコンクリートと同様に良質なフライアッシュの混入によるコンシステンシーの改善効果が確認された。

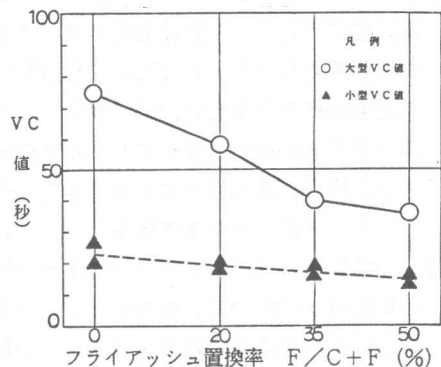


図-2 フライアッシュ置換率とVC値の関係

3. 1. 2 圧縮強度

(1) 有スランプコンクリート²⁾

図-3に材令と圧縮強度の関係を示す。以上より、次のことがいえる。

- ① セメント単体のケース (A-1) と $F/C+F=30, 35, 40\%$ のケース (A-2, A-3, A-4) を比較すると、セメント単体のケースは、7日および28日の初期材令では、フライアッシュを混入したケースに比べて、1.8~1.6倍の圧縮強度を有するが、材令91日以降では強度の伸びがほとんどない。これに対してフライアッシュを混入したケースでは、材令28日以降の強度の伸びが著しいため、材令91日での強度はセメント単体のケースに比べ20%程度下回るものの、材令182日では置換率40%のケースを除いてセメント単体の強度を上回り、材令365日で3ケースともセメント単体のケースを上回る結果となった。
- ② ①の結果は、材令91日以降の長期材令において顕著にポズラン効果が発揮されるとともにフライアッシュ置換率が大きいほど相当長期の材令までポズラン反応が持続することによる強度増加が期待できることを示す。

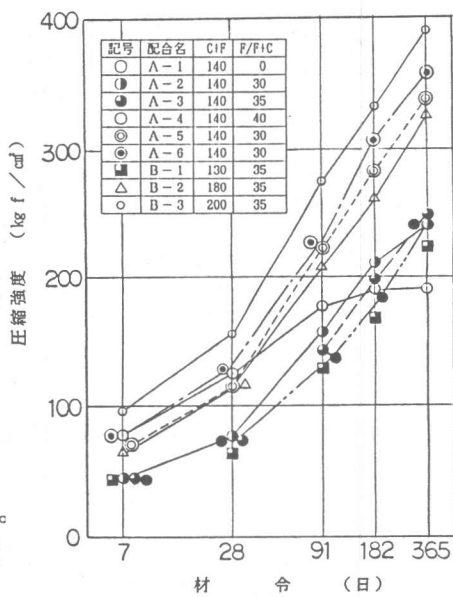


図-3 材令と圧縮強度の関係

(2) RCD用コンクリート

図-4に材令と圧縮強度の関係を示す。以上の結果より次のことがいえる。

- ① セメント単体のケース (C-1) と $F/C+F=20, 35, 50\%$ のケース (C-2, C-3, C-4) を比較すると、セメント単体のケースは7日および28日の初期材令でほぼフライアッシュを混入したケースに比べて1.4~2.6倍の圧縮強度を有するが、材令91日以降の強度の伸びがほとんどない。これは有スランプコンクリートの結果と同様の傾向である。これに対してフライアッシュを混入したケースでは、材令28日以降の強度の伸びが著しいため、材令91日での置換率20%のケースがセメント単体のケースを上回り、さらに材令1年では置換率35%のケースがセメント単体を上回り、材令2年程度まで明らかに強度が伸びている。
- ② ①の結果は有スランプコンクリート同様、RCD用コンクリートについても、材令91日以降の長期材令において、顕著にポズラン効果が発揮されるとともに、フライアッシュ置換率が大きいほど相当長期の材令までポズラン反応が持続することによる強度増加が期待できることを示す。

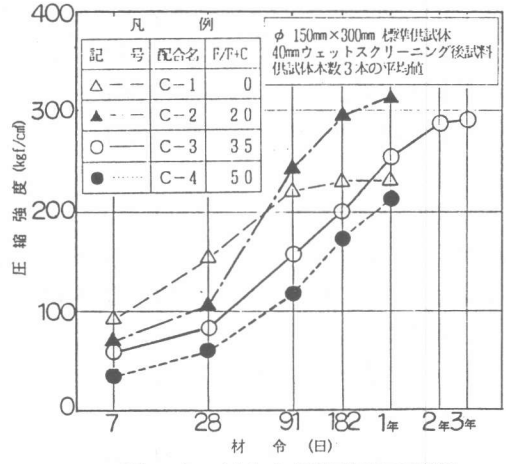


図-4 材令と圧縮強度の関係

3. 2 フライアッシュの品質の違いによるコンクリートのコンシステンシーおよび圧縮強度
 3. 2. 1 コンシステンシー

(1) 有スランプコンクリート

コンクリートのスランプと単位水量の関係を求める以前にAE剤量と空気量の関係を単位水量 $W=100\text{kg/m}^3$ で練り混ぜ試験により求めた。またここで決定した最適（空気量3%時）AE剤量を採用し、5種類のフライアッシュを混入したコンクリートの最適（スランプ3cm時）単位水量を同じく練り混ぜ試験により求めた。最適AE剤量および最適単位水量とフライアッシュの主要物性を表-4に示す。これらより次のことがいえる。

- ① 一般に強熱減量あるいはメチレンブルー吸着量が大きいフライアッシュは未燃カーボンが多く、その結果このカーボンがAE剤を吸着し、所定の空気量を出すための所要AE剤量が増加するといわれている。今回の試験結果をみると、バラツキはあるものの、概ね上述したような傾向が認められる。
- ② 所要スランプを得るための最適単位水量は、フライアッシュのモルタル単位水量比と密接な関係にある。
- ③ このようにフライアッシュの強熱減量およびモルタル単位水量比が有スランプコンクリートのコンシステンシーに与える影響は大きく、同一のコンシステンシーを得るためには、単位水量やAE剤の使用量が異なることが確認された。

(2) RCD用コンクリート

図-5に単位水量とVC値の関係、表-5に目標コンシステンシー（大型VC値60秒、小型VC値20秒）の単位水量を示す。これらより次のことがいえる。

- ① VC試験におけるコンクリートに換算した単位水量の最大値と最小値の差は大型VC試験で 4kg/m^3 、小型VC試験で 5kg/m^3 であるのに対して、有スランプコンクリートでは 10kg/m^3 程度の差がある。
- ② ①の結果より有スランプコンクリートに比べてRCD用コンクリートは、フレッシュコンクリートの性状に関し、フライアッシュの品質の差にあまり敏感でないといえる。

3. 2. 2 圧縮強度

(1) 有スランプコンクリート

図-6にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。これらの結果よりいえることは、材令91日で比較するとa, b, c, eフライアッシュの強度差はほとんどないが、dフライアッシュが他のフライアッシュに比べて若干大きくなっている。これは粉末度の差によるものと推定され、フライアッシュの品質すなわち強熱減量の違いによる明確な差は認められない。

(2) RCD用コンクリート

表-4 最適AE剤量および最適単位水量とフライアッシュの主要物性

フライアッシュ名		a	b	c	d	e
最適AE剤量(A)		4	12	9	14	8
最適単位水量(kg/m ³) (スランプ3cm)		100	110	106	100	107
フライアッシュの主要物性	強熱減量 (%)	0.9	1.8	3.3	5.0	5.5
	メチレンブルー吸着量 (mg/g)	0.2	0.3	0.5	0.8	0.5
	モルタル単位水量比 (%)	97	101	102	98	103

※ 1A：単位結合材（セメント+フライアッシュ）量の0.0025%。ただし、この割合は銘柄によって多少の差がある。

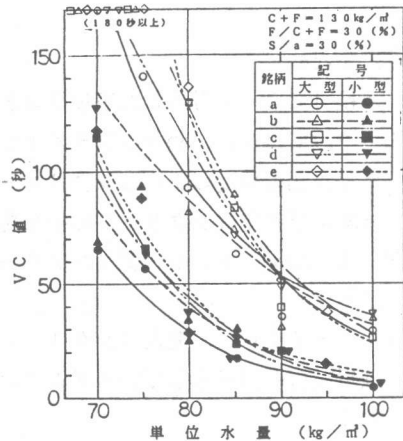


図-5 単位水量とVC値の関係

表-5 最適単位水量 (kg/m³)

フライアッシュ名 試験名	a	b	c	d	e
大型 VC	87	87	89	91	89
小型 VC	84	88	88	87	89

図-7に単位水量と圧縮強度(材令91日)の関係を示す。一般に、RCD用コンクリートの圧縮強度は単位水量が多い場合にはセメント水比により強度が低下し、単位水量が少ない場合には所定の締

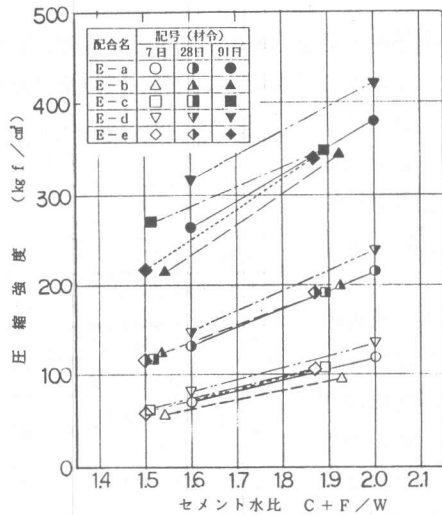


図-6 セメント水比と圧縮強度の関係

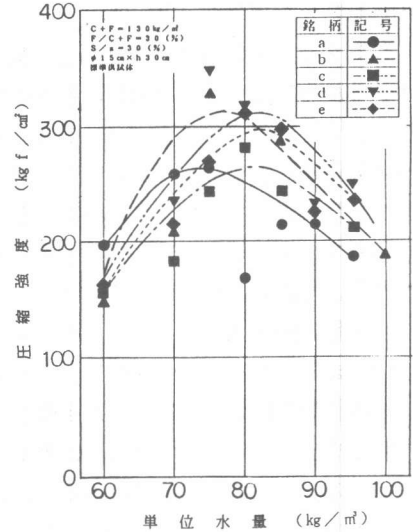


図-7 単位水量と圧縮強度の関係

固めエネルギーのもとでは締固め不十分となり強度が低下することにより、圧縮強度が最大となる単位水量が存在する。今回の結果よりいえることは、各フライアッシュの最大圧縮強度時の単位水量はほぼ75~80 kg/m³の間に集中しており、フライアッシュ間の差はみられない。また圧縮強度についても若干の差がみられるがフライアッシュの品質の違いによる明確な差は認められない。

5. まとめ

本検討によって得られた事項をまとめると以下のとおりである。

- (1) 一般に良質といわれるフライアッシュを混入したコンクリートに関して、フライアッシュ置換率が50%程度以下のコンクリートはフレッシュコンクリートにおけるコンシステンシーの改善および硬化コンクリートの相当長期にわたる強度増進に顕著な効果がある。
- (2) (1)の結果は有スランプコンクリートのみならずRCD用コンクリートにおいても顕著な効果がある。
- (3) フライアッシュ混入コンクリートについては、材令91日以降の強度の伸びが著しいので、今後は現在材令91日としているダムコンクリートの基準材令に関して検討する必要があると考えられる。
- (4) フライアッシュの強熱減量およびモルタル単位水量が、有スランプコンクリートのコンシステンシーに与える影響は大きい。これに対して、RCD用コンクリートのコンシステンシーに与える影響は有スランプコンクリートに比べると小さい。
- (5) フライアッシュの強熱減量の違いによるコンクリートの圧縮強度に関しては、同一のセメント水比で比較するかぎり有スランプコンクリート、RCD用コンクリートの両者とも明確な差は認められない。

参考文献

- 1) 土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書ダム編
- 2) 山口温朗，自閑茂治，解良一夫：フライアッシュを混入したダムコンクリートの長期強度に関する実験的考察、セメント技術年報，41，昭和62年