

## [24] ローラーコンパクテッドコンクリートへのフライアッシュの適用に関する研究

正会員 ○青柳 征夫 (電力中央研究所 耐震構造部)

正会員 笠原 清 (電力中央研究所 耐震構造部)

正会員 栗田 守朗 (清水建設 技術研究所)

正会員 金森 洋史 (清水建設 土木本部技術部)

### 1. まえがき

ローラーコンパクテッドコンクリート(以下RCCと呼ぶ)は、単位セメント量が  $120 \text{ kg/m}^3$  程度と少なく、超硬練りのコンクリートを振動ローラで締固めて造るコンクリートであり、重力式コンクリートダムの合理化施工を対象として建設省を中心に研究開発が進められている。我国では、3ダムにおける施工実績をもとに、その施工法はほぼ体系化されたと言える。しかし、RCCの配合特性および物性に関する基礎的なデータは充分でないのが現状である。また、材料面における改善およびダム以外の構造物へのRCCを適用する研究など、今後検討を要する課題も残されている。

本報告は、フライアッシュ等の産業副産物を各種の電力マスコンクリート構造物に有効に利用することを目的として、フライアッシュの混入率および微粒分の混入率がRCCの物性に及ぼす影響を明らかにするとともに、石炭灰の適用性についても検討した結果をまとめたものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

- (1) セメント; N社製の中庸熱ポルトランドセメント 比重3.20, 比表面積  $3240 \text{ cm}^2/\text{g}$
- (2) フライアッシュ; D社製フライアッシュ 比重2.17, 比表面積  $2990 \text{ cm}^2/\text{g}$
- (3) 細骨材・粗骨材; 細骨材は天然砂で比重2.62, 吸水率2.12%, 粗粒率2.72であり、粗骨材は碎石で比重2.65, 吸水率0.68%であった。粗骨材の最大寸法は80mmとした。
- (4) 石粉; T社製の炭酸カルシウム 比重2.70, 比表面積  $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 炭酸カルシウムの含有率98.5%
- (5) 混和剤; N社製遅延型減水剤 結合材量×0.25%使用
- (6) 石炭灰; N社より提供されたもので、比重2.16, 比表面積  $2880 \text{ cm}^2/\text{g}$  (石炭灰の分類で入手したため、ここでは石炭灰と呼んでフライアッシュと区別する)

#### 2.2 実験方法

##### (1) 配合選定実験

本実験で使用する材料に適したRCC用配合を選定するために「RCC工法技術指針(案)<sup>1)</sup>」に準じて以下の手順で配合選定実験を実施した。

- ① モルタルの単位容積重量試験; モルタルの単位容積重量が最大、空けきが最少となる水量を求めてRCCの単位水量を推定する試験である。砂結合材比を6とし、単位水量を  $125 \sim 250 \text{ kg/m}^3$  まで  $25 \text{ kg/m}^3$  間隔で変化させた。
- ② 単位水量選定試験; ①で推定されたRCCの単位水量をもとにして、細骨材率  $(s/a) = 34\%$ , 結合材量  $(C+F) = 120 \text{ kg/m}^3$  と一定にし、VC試験および圧縮強度試験の結果等からRCC用配合の単位水量を選定する。単位水量は  $90 \sim 108 \text{ kg/m}^3$  まで  $6 \text{ kg/m}^3$  間隔で変化させた。
- ③ 最適細骨材率試験; ②で得られた単位水量をもとに、 $C+F = 120 \text{ kg/m}^3$  と一定にして、細骨材率  $(s/a)$  および単位水量を要因として試験を行い、締固めエネルギーが最少となる細骨材率を選定する。細骨材率  $(s/a)$  は  $28 \sim 37\%$  まで  $3\%$  間隔で変化させ、単位水量  $(W)$  は  $96$  および  $100 \text{ kg/m}^3$  とした。

##### (2) RCC物性確認実験

① フライアッシュの混入率に関する実験

(1)で選定した配合を基本配合として、フライアッシュの混入率を変えて実施した。試験は結合材量を  $120 \text{ kg/m}^3$  と一定にして、結合材の一部をフライアッシュで置きかえた。フライアッシュの置きかえ率 ( $F/C+F$ ) は、0, 15, 30, 45 および 60 百分とした。

② 微粒分の影響に関する実験

結合材量 ( $C+F$ ) を一定にして、細骨材の一部を微粒分で置きかえて実施した。微粒分は、基本配合に含まれている  $0.15 \text{ mm}$  以下の細骨材に増量材として加え、両者の合計を細骨材中の微粒分とした。微粒分率は、2, 6, 10 百分とし、配合は、 $F/C+F=30$  百分および 60 百分のものについて検討した。なお、 $F/C+F=60$  百分については、「コンクリートダム標準示方書」の標準粒度範囲の上限 (10 百分) を超えた 18 百分についても試験した。基本配合に含まれる  $0.15 \text{ mm}$  以下の細骨材は 2 百分であるため、微粒分率 2 百分は増量材を加えない配合である。

③ 石炭灰の適用性検討実験

モルタルの単位水量比および圧縮強度試験を行い、その物性を試験した。試験は JIS R5201 に準じて実施した。

2.3 使用機器

(1) ミキサ：パグミルタイプの二軸強制練りミキサ (練りませ容量  $1.5 \text{ m}^3$ ) を用い、 $300 \text{ l}$  のコンクリートを 3 分間練りませた。

(2) VC 試験機：RCC のコンシステンシーを測定するもので、小型 VC 試験 ( $40 \text{ mm}$  以下のコンクリート使用)、大型 VC 試験 (フルミックスのコンクリート使用) を実施した。なお、本実験においては、目標小型 VC 値 8~15 秒程度、材合 91 日圧縮強度  $80 \text{ kgf/cm}^2$  以上、密度  $2.3 \text{ t/m}^3$  以上とした。本実験の結果、密度は全て  $2.3 \text{ t/m}^3$  を満たしていたため以下強度等について検討を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 配合選定実験結果

モルタルの単位容積重量試験結果 (図-1) から、単位水量  $200 \sim 225 \text{ kg/m}^3$  の範囲で空げきが最少となり、コンクリートとしての単位水量は  $85 \sim 105 \text{ kg/m}^3$  と推定された。コンクリートの単位水量試験結果を図-2 および図-3 に示す。目標値 VC 値 8~15 秒を満足する単位水量として  $96 \sim 102 \text{ kg/m}^3$  が得られた。また、RCC の圧縮強度は水セメント比 ( $W/C$ ) が大きくなるにしたがい減少するが、単位水量  $108 \text{ kg/m}^3$  ( $W/C=90$  百分) においても目標強度  $80 \text{ kgf/cm}^2$  を満足していた。最適細骨材率試験結果 (図-4) から、締固めエネルギーが最少となる細骨材率は 31 百分付近であると考えられるが、目標 VC 値の範囲および既往の実績によれば細骨材率を若干多くしていることを配慮し、本実験で用いる材料に適した RCC 用配合として細骨材率 ( $s/a$ ) 32 百分

単位水量 ( $W$ )  $100 \text{ kg/m}^3$ 、単位結合材量  $120$

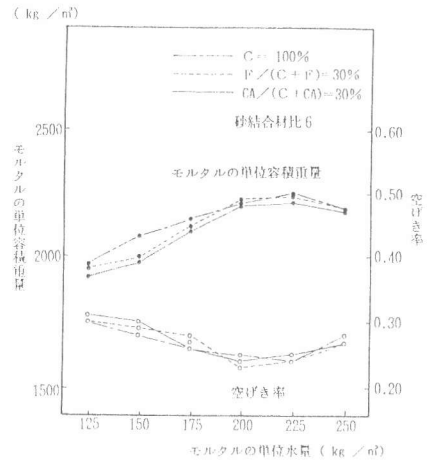


図-1 モルタルの単位容積重量試験結果

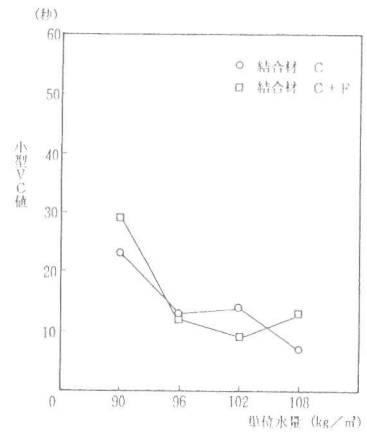


図-2 単位水量と小型 VC 値の関係

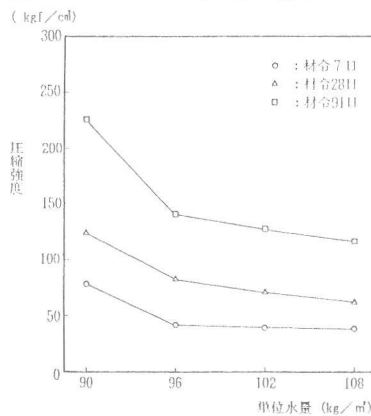


図-3 圧縮強度と単位水量の関係 ( $F/(C+F)=30$  百分)

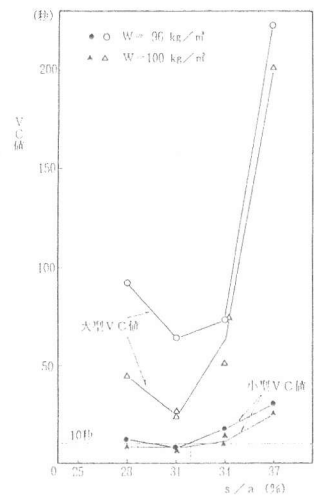


図-4 VC 値と  $s/a$  の関係

kg/m<sup>3</sup> (F/C+F=30%)を選定した。得られたRCC用基本配合を表-1に示す。

### 3.2 RCC物性確認実験結果

#### (1) フライアッシュの混入率の影響

単位結合材量を一定にして、その一部をフライアッシュで置きかえて試験した結果を表-2に示す。フライアッシュの混入率とVC値の関係は、混入率60%で少し小さいがほとんど差はみられないと思われる。圧縮強度とフライアッシュ混入率の関係を図-5に示す。混入率が増加するに従い、圧縮強度は減少することが明らかになり、RCCとして一般に用いられている混入率30%を基準とすると、混入率45および60%の材合91日の圧縮強度はそれぞれ88および34%程度であった。また、コア供試体(フルミックスのコンクリート)においても同様の傾向が見られており、フライアッシュの混入率60%の圧縮強度は、混入率30%のその40%程度となっている。以上のように、フライアッシュ混入率60%を除く配合においては、材合91日の目標圧縮強度80kgf/cm<sup>2</sup>を満足する結果が得られた。引張および曲げ強度試験結果は表-2のようであり、圧縮強度と同様にフライアッシュ混入率が増加するに従って減少している。引張強度および曲げ強度と圧縮強度の関係は、それぞれ1/8~1/9, 1/5~1/6であることから、RCCにおいても一般のコンクリートと同様の比率であるものと考えられる。圧縮強度と静弾性係数の関係は図-6のようで、両者の間には良好な相関が見られた。なお、ポアソン比は0.14~0.21程度であった。また、透水係数(アウトプット法、供試体寸法φ20×h10cm)は10~340×10<sup>-10</sup>cm/secであり、混入率60%で大きくなる傾向を示したもののダムの内部コンクリートとしては水密性に関して問題はないと考えられる。

#### (2) 微粒分混入率の影響

単位結合材量を一定にして、細骨材の一部を微粒分で置きかえて試験した。微粒分率とVC値の関係を図-7に示す。石粉を混入した場合は混入率が増加するに従いVC値が大きくなる傾向を示し、フライアッシュを混入した場合は、微粒分率10%の際には強度発現から他の配合よりも水量が多く混入した結果VC値が小さくなったものと考えられ、明瞭な差は見られなかった。また、VC値のバッチ間のバラツキ等を考慮すると微粒分混入がVC値に及ぼす影響は少ないと考えられる。微粒分率と圧縮強度の関係を図-8に示す。微粒分として石粉を混入した場合は、混入率が増加するにつれて圧縮強度は増加し、微粒分率6および10%における強度の増加量は、微粒分率2%の強度(材合91日)の116および146%となり、石粉混入による強度改善の効果が確かめられた。フライアッシュを増量材として用いた場合は、石粉ほどの効果は見られなかった。フライアッシュの混入率60%の配合の場合は微粒分の増加に従って、圧縮強度の増加が得られ、フライアッシュ混入率30%の配合と同様の傾向があることが明らかとなった。微粒分率10%における圧縮強度は100kgf/cm<sup>2</sup>

表-1 RCC基本配合

粗粒骨材 材寸の法 (mm)	W		F		S/a	配合 (kg/m <sup>3</sup> )						
	C+F	(%)	C+F	(%)		W	C	F	C+F	S	G	混和剤
80	83.3	30	32		100	84	36	120	706	1518	0.3	

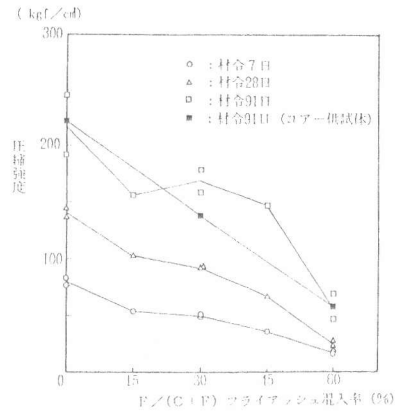


図-5 圧縮強度とフライアッシュ混入率の関係

表-2 物性試験結果

	F/C+F (%)				
	0	15	30	45	60
VC値(秒)	14	8	10	15	6
圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	191	156	158	147	46.7
引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	21.5	19.2	17.6	16.9	5.33
曲げ強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	33.7	27.6	24.6	22.6	10.3
透水係数(×10 <sup>-10</sup> cm/sec)	—	13.2	11.9	15.1	336

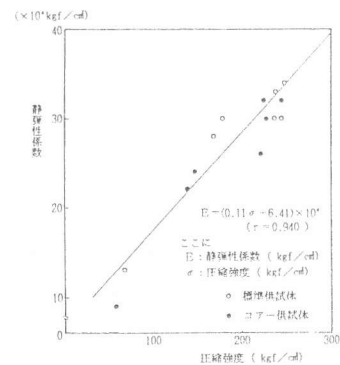


図-6 弾性係数と圧縮強度の関係(材合91日)

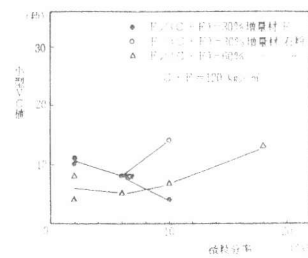


図-7 微粒分率と小形VC値の関係

程度となり、微粒分率2%のその50%の増加が得られた。また、「ダムコンクリート標準示方書」における0.15mmふるい通過量の上限である10%を超えて18%まで混入した場合は150 kgf/cm<sup>2</sup>程度の圧縮強度が得られた。これらの結果から、山崎が示したように、RCCにおいても微粒分を混入することによって強度の改善に効果があることが確認された。

(3) 石炭灰の適用性について

本実験で使用した石炭灰について、モルタルの単位水量比試験および圧縮強度試験を行った結果を表-3、図-9に示す。この結果から、石炭灰はフライアッシュのJIS規格を満足する品質を有していることが明らかとなったが、本実験で使用したフライアッシュと同じ混入率で比較すると、単位水量比、圧縮強度比ともに石炭灰のほうが若干適性が劣る結果となっている。次に、石炭灰を用いてモルタルの単位容積重量試験を行った結果(図-1, CA/C+CA)、モルタルの単位水量に変化は見られなかった。したがって、本石炭灰は、RCC基本配合の混和材としてフライアッシュと同等に使用できると考えられ、今後、さらに低品質石炭灰のRCCへの適用性について詳細に検討してゆきたい。

4. まとめ

本実験において用いた材料に適したRCCの配合選定を行い、その配合を基に、フライアッシュ混入率および微粒分がRCCの物性等に及ぼす影響について検討した結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 本実験で選定したRCC基本配合は、細骨材率32%、単位水量100 kgf/m<sup>3</sup>、結合材量120 kgf/m<sup>3</sup>(F/C+F=30%)であり、既往のダムにおいて実績のあるRCC用配合と同様であった。

(2) 結合材量を一定にし結合材の一部をフライアッシュで置きかえた場合の圧縮強度とフライアッシュ混入率の関係が得られた。本実験の目標強度80 kgf/cm<sup>2</sup>を満足するには混入率45%程度までは可能であり、また、混入率60%程度でも人工岩盤等の高い強度が要求されない構造物には十分に適用が可能であると思われる。

(3) 結合材量を一定にして、細骨材の一部を微粒分で置きかえた場合は、微粒分として石粉を用いると強度改善の効果が顕著に現われることが明らかになった。フライアッシュ混入率60%においては、石粉を混入することによって強度が改善され、目標値を満足する結果が得られた。

今後は、RCCの基本物性についてさらに詳細な検討を進めるとともに、振動ローラによる締め機構について究明を図ってゆきたい。

最後に、本実験に御協力いただいた関係者に心から謝意を表します。

<参考文献>

- (財)国土開発技術研究センター「RCD工法技術指針(案)」昭和56.7
- 山崎寛司「鉱物微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎的研究」土木学会論文集第85号、昭和37.9

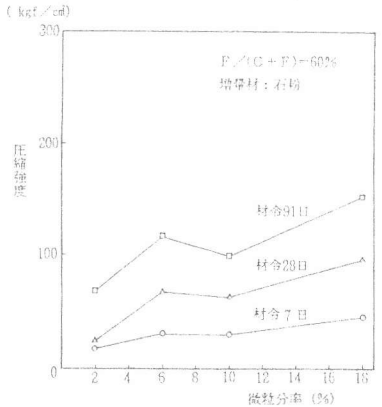
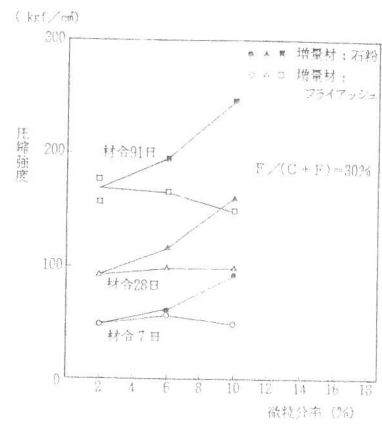


図-8 圧縮強度と微粒分率の関係

表-3 モルタルの単位水量比および強度試験結果

配合の種類	石炭灰混入率 (%)	単位水量比 (%)	圧縮強度比 (%)		
			7日	28日	91日
M-0	0	100	100	100	100
M-1	10	99.7	93	97	96
M-2	15	99.6	87	95	94
M-3	20	99.5	79	88	89
M-4	25	99.0	73	80	86
M-5*	25	95.7	80	85	92
JIS規格	—	102%以下	—	60以上	70以上

\*石炭灰のかわりに本実験で用いたフライアッシュを使用。

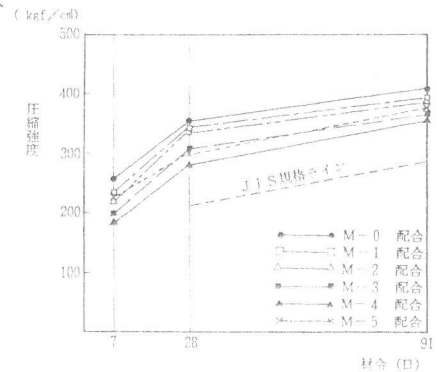


図-9 材齢と圧縮強度の関係