

## RCC ダムにおけるフライアッシュの選定について

関西電力株式会社 正会員 ○青坂 優志  
 関西電力株式会社 正会員 三鼓 晃

### 1. はじめに

ラオス国ナムニアップ1水力発電プロジェクト（以下、NNP1）の主ダムは、高さ167m、堤体積236万 $m^3$ の重力式コンクリートダムで、Roller Compacted Concrete（RCC）工法を採用した。RCCの主要な材料のうち骨材は、主ダム近傍の原石山より採取し、セメント、フライアッシュ及び混和剤は、タイ国から調達した。フライアッシュは、長期強度の増進、水和熱を低下、ワーカビリティの改善などに優れた特性を有しているが、強度、断熱温度上昇の各特性及び施工性への影響が大きく、産地による品質のばらつきが大きいため、品質や経済性についての事前検討が重要となる。本稿では、その中でもコンクリート強度及び断熱温度上昇特性に関して、フライアッシュが及ぼす影響について、タイ産（Mea Moh 石炭火力）とベトナム産（Pha Lai 石炭火力）のフライアッシュ（以下それぞれ、MMFA, PLFA）の各特性を踏まえて比較することで、最適なフライアッシュの選定手法について報告する。

### 2. フライアッシュの特性

#### (1) フライアッシュの産地、成分、組織及び形態

着工当時、ラオス産のフライアッシュ調達は、困難な状況であり、隣国のMMFA及びPLFAを調達先として検討した。産地及び成分結果は、表-1に示す。また、電子線マイクロアナライザー分析（EPMA）による表面の組織及び形態の観察結果を図-1に示す。図-1は、左からMMFA, PLFA, そして、最近稼働したラオス国内のHongsa石炭火力発電所のフライアッシュである。MMFAは他と比べ、粒形が比較的均一で細かいことが分かる。

#### (2) RCCの強度及び断熱温度上昇特性

材齢1年の圧縮強度試験結果（MMFA配合は12種類、PLFA配合は3種類）を図-2に示す。また、断熱温度上昇試験結果を図-3に示す。同様な置換率ではMMFAが3割程度高い強度が発現している。一方で、断熱温度上昇特性については両産地に設計・施工面で影響を及ぼす差は認められなかった。

### 3. フライアッシュの選定手法および考察

フライアッシュは、以下の通り、フライアッシュ、及びフライアッシュコンクリートの特徴を評価した結果、MMFAを採用することとした。

- ① フライアッシュの供給量は、両産地共に必要量の10倍以上の供給量があり、安定的な供給が可能である。
- ② フライアッシュの単価は、両産地共に大きな差がない。NNP1では、運搬費が支配的となるが、両産地共に運搬距離が約650～700kmで、価格差はない。
- ③ 成分比較では、MMFAはClass C、PLFAはClass Fに分類され、ASTMの基準に満足する仕様である。また、数年の化学・物理試験結果も安定した品質が確認された。
- ④ 材齢1年強度は、MMFAは、PLFAより3割程度高い強度が確認された。また、MMFAの長期強度の伸び率（365/28日材齢）は、約2.5倍となりRCC一般値（FA置換率50%）より大きくなることが確認された。なお、材齢3日の強度は、2MPa以上で十分な初期強度発現が期待できる。MMFAは、長期及び初期強度は、PLFA及びRCC一般値（FA置換率50%）と比較し優れている。

キーワード フライアッシュ選定、圧縮特性、断熱温度上昇特性、EPMA

連絡先 〒553-0003 大阪市福島区福島5丁目1番7号 (株)関西電力 水力事業本部 TEL06-4796-8867

- ① MMFA は材齢 5 日後に最高温度に達成し、温度上昇が約 14 度となる。一方、PLFA は材齢 4 日後に最高温度に達成し、温度上昇が約 12.5 度となる。両者には、設計・施工面で問題のない結果となった。また、最終断熱温度上昇量 (K 値) は 20 度以下となり、水和熱は小さい結果となった。
- ② 一般的に Class C である MMFA は、酸化カルシウムとフリーライムの数値が高いため、ポズラン反応が活性化され、断熱温度上昇が高くなり、短期強度が大きくなる特性がある。一方、NNP1 の MMFA では、Class F の PLFA と断熱温度上昇が同等で、短期強度に加えて、長期強度も PLFA より大きい結果となり、長期強度も期待できることが分かった。
- ③ EPMA 観察の結果、両産地共に形状が真球に近く、滑らかなであり、ワーカビリティの向上に繋がった。
- ④ 両配合のフライアッシュの置換率は 60%以上も強度があり、より高い置換率での強度が確保できたことから、セメント量を大幅に減じ、乾燥収縮の減少に繋がった。
- ⑤ MMFA は、モルタルバー試験の結果、アルカリ骨材反応は、無害である。また、PLFA は無試験であるが、フライアッシュの置換率が 50%以上に上げることで、アルカリ総量を減じることができる。
- ⑥ MMFA は、透水試験の結果、 $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-9}$  m/s となり、一般値より水密性が非常に高い結果となった。一方、PLFA も長期強度が MMFA と同様であり、ポズラン反応が促進されたことによりコンクリート組織がより密実化し、水密性が向上したと考えられる。
- ⑦ 配合設計は、既往事例を参考に C100F100 (C: 100 kg/m<sup>3</sup>, F: 100 kg/m<sup>3</sup>) を標準的な配合として設定した。しかし、高標高部ではコンクリート強度に応じた、経済的な配合を検討し、C60F60 の超貧配合を実現した。これは超貧配合下においても MMFA の水和熱を低下、長期強度の増進、水密性が高く、また良好なワーカビリティといった特性も失われなかったためである。代表的な配合は表-2 の通りである。

表-1 フライアッシュの産地・成分結果

項目	単位	MMFA	PLFA
産地及びフライアッシュの種類	-	揮発, Class C	無揮発, Class F
揮発分	kg/t	1.9	0.0
灰分	kg/t	2.1	0.2-0.6
シリカ	kg/t	2,650	5,035-5,080
空孔率 (V <sub>v</sub> )	%	0.1	2.1
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	61.12	66.62
酸化カルシウム (CaO)	%	24.3	1.82
フリーライム (Free CaO)	%	0.6	0
粉末度 (75μm以下の割合)	%	28.1	19.6
活性化指数 (28日)	%	84, 93	79, 94

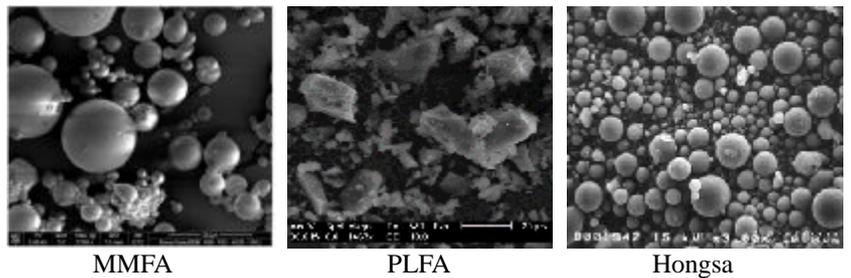


図-1 表面の組織及び形態の観察

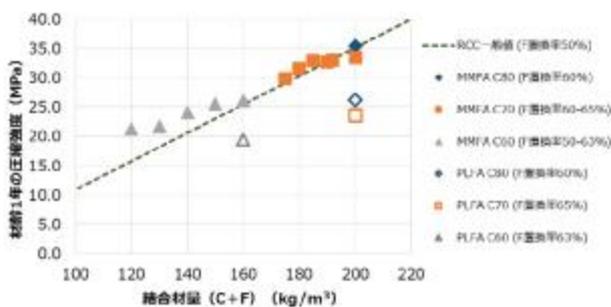


図-2 圧縮強度試験結果

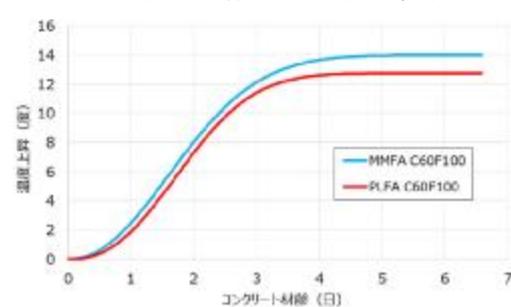


図-3 断熱温度上昇試験結果

表-2 代表的な RCC 示方配合

配合	G <sub>max</sub> (mm)	Vebe値 (sec)	空気量 (%)	W/(C+F) (%)	FA/a (%)	単位容積質量(kg)							湿和剤 (%)
						W	C	F	G1	G2	G3	FA	
No.1	50	12-20	1.5	60.5	37.7	112	70	115	761	402	131	757	(C+F)*0.3%
No.2	50	12-20	1.5	76.0	41.5	114	70	90	586	393	253	850	(C+F)*0.3%
No.3	50	12-20	1.5	89.2	40.0	116	60	70	606	406	266	826	(C+F)*0.3%

(備考)  
a: 骨材 (G1+G2+G3+FA)  
W: 水  
G1/G2/G3: 粗骨材 (G1:50-25mm, G2:25-12.5mm, G3:12.5-5mm)  
FA: 細骨材 (5mm以下)  
湿和剤: RCC打設計画及び天候等に応じて調整

#### 4. おわりに

本稿では、NNP1 で検討したフライアッシュの選定の概要について報告したが、著者らは、フライアッシュの温度応力への寄与などについて解明すべく更なる研究を続けており、知見がまとまり次第、別途報告したい。