

# インドネシア国揚水発電事業における高Ca系フライアッシュの RCC ダムへの適用性に関する研究

(株) ニュージェック ○ 樋口 良典  
(株) ニュージェック 筒井 勝治  
UCPSP Bassam Egailat  
関西電力(株) 青坂 優志  
(一財) 電力中央研究所 山本 武志

## 論文要旨

インドネシア国アッパーチソカン揚水発電プロジェクト(当プロジェクト)では、上部ダムおよび下部ダムに世界的に主流であるRCC(Roller-compacted Concrete)ダムを採用して、現在ダム建設を進めているところである。上部ダムおよび下部ダムはともに約100mの高さを有しており、最大加速度0.8gの地震に耐えられる強度を持たせる必要がある。高強度RCCを得るために結合材量を増やすこと、富配合RCCはワーカビリティの確保に寄与するが、温度応力の影響を受けるため、フライアッシュ(FA)を混合することで短期的な水和熱を低減し、ポゾラン反応の促進により長期的な強度を発現させることがRCC配合設計の鍵となる。ところが、ジャワ島で唯一調達できるスララヤ石炭火力発電所のFAは品質が安定せず、RCCに適さないクラスCが混在することが報告されている。そこで、当プロジェクトで使用するRCC材料(FA、セメント、骨材)について、FAの置換率を変更しながらRCCの配合設計を開始した。電界放出型電子線マイクロアナライザ(FE-EPMA)を用いて水和反応やポゾラン反応、RCCのワーカビリティの向上、強度発現、および温度上昇への寄与を把握し、RCCダム・配合設計の基礎資料として活用する。

キーワード: RCC, フライアッシュ, 水和反応, ポゾラン反応, 温度上昇

## まえがき

当プロジェクトは、2023年7月に本格着工したインドネシア国で初となる揚水発電プロジェクトである。チソカン川とその支流チルミス川の高差を利用して発電するものであり、上部ダム(高さ75.5m)と下部ダム(高さ98m)をRCC工法で建設し、出力1,040MWの地下発電所を建設する。上部ダムおよび下部ダムに採用されたRCCダムの建設工程は、2023~2024年に上部ダム基礎掘削、2025年に上部ダムRCC打設、2024~2025年に下部ダム基礎掘削、2026年に下部ダムRCC打設を予定しており、現在、上部ダム基礎掘削を進めながら、RCC配合設計を進めているところである。図-1に当プロジェクトの設備配置、表-1に主要設備の諸元を示す。

一般的に海外産のFAは、ASTM C618によって $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ の含有率によりクラスFとクラスCの2種類に分類される。クラスFはそれらの含有率が70%以上、クラスCは70%未満50%以上である。通常、クラスFは無煙炭または瀝青炭を、クラスCは瀝青炭、亜瀝青炭または褐炭を石炭火力発電所で燃焼した場合に産出される。東南アジア諸国ではエネルギーセキュリティや外貨獲得の手段として、石炭が貴重な資

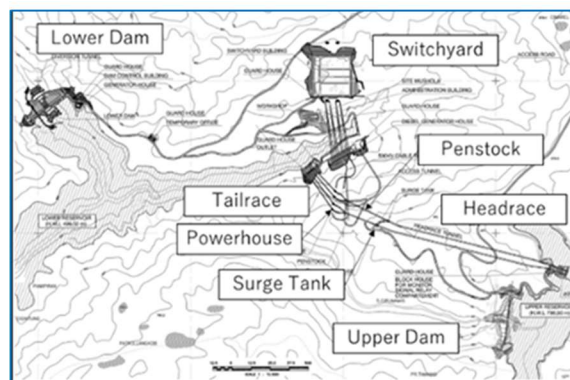


図-1 当プロジェクトの設備配置

表-1 主要設備の諸元

Output	1,040MW (260MW × 4, 2 is variable speed machine)
Maximum Head	301.5 m
Dam	Upper H=76 m RCC Lower H=98 m RCC
Underground Powerhouse	W=26m, H=52 m, L=270m
Waterway	Apx.2,000 m × 2 lines

源として活用が期待されており、その中でも埋蔵量の多い褐炭の石炭火力発電への利用と、そこで産出されるクラス C-FA の利用が促進されるものと考えられる。

RCC の混和材となる FA は、現地生産先の都合により、通常使用するクラス F に、低品質のクラス C が混在することが免れない。クラス C は、インドネシア国では RCC 配合に使用した実績がなく、その性状も明らかになっていない。クラス C が混入することで、コンクリート強度、発熱やワーカビリティにどのような影響を及ぼすのかを検討し、必要に応じて対策を要することになる。

ラオス国ナムニアップ1水力発電事業(NNP1)のRCCダム  
のRCC配合においても、タイ国Mae Moh石炭火力から調達されるクラスC-FA(MMFA)の適用性が水和反応による発熱抑制の観点から課題となった。NNP1では、試験練り段階で実施されるコンクリートの断熱温度上昇試験や強度試験に加えて、FA粒子やコンクリート内部を観察できる電界放出型電子線マイクロアナライザ(FE-EPMA)、走査電子顕微鏡(SEM)、X線回析装置(XRF)ならびに蛍光X線分光装置(XRD)等による分析を行い、FAの特性やコンクリートの水和反応やポゾラン反応のメカニズムを把握し、MMFAの適用性を確認している<sup>1)</sup>。

水和・ポゾラン反応に関連する混和材の化学組成を図-2に示すが、本研究においても、当プロジェクトで現地調達されるクラスCが混在するFAについて、NNP1と同様の手法などを用いて、FAの特性とRCCの強度発現メカニズムを把握したうえで、RCCダムへの適用性を評価する<sup>2)</sup>。

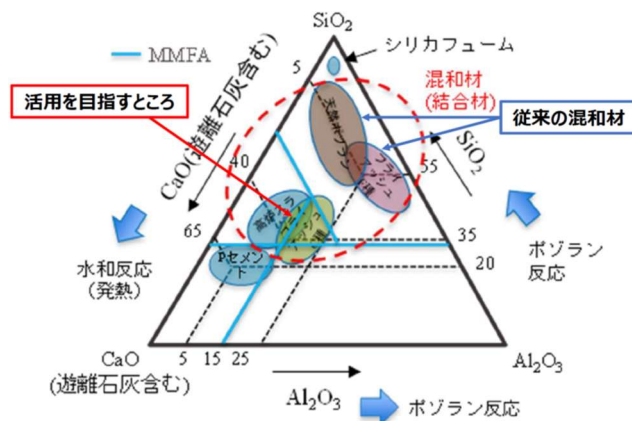


図-2 水和・ポゾラン反応に関連する混和材の化学組成

## 1. RCC 材料試験

### (1) 結合材

材料試験に使用した現地セメント(普通ポルトランドセメント)と現地FAの化学組成を表-2に示す。現地セメントは、アルカリ成分( $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \times \text{K}_2\text{O}$ )が1.5%と高いのが特徴的である。また、現地FAは、有効酸化物( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ )の含有量が80.4%であり、ASTMによるクラスFの規定値

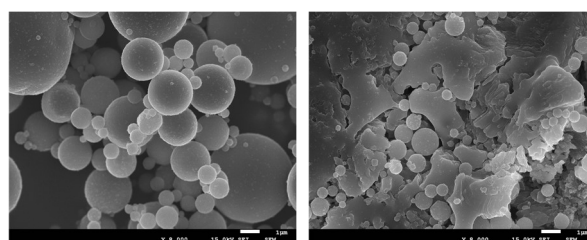
(70%以上)を満たすが、CaO含有量が12.2%であり、日本国内でJIS相当品として流通しているFAのCaO含有量(平均値:約5%)に比べて高含有量となることが特徴的である。しかし、遊離石灰の含有量は測定下限値を下回っていることから、化学組成としてのCaOのほぼ全てが非晶質相(図-3に示すFA粒子のうち球状の粒子)に含まれていると考えられる。EN450-2003によると、低Ca型FAの定義としてCaO含有量の最大が11%として規定されていることから、今回使用した現地FAは、Ca含有量が高いクラスFとして分類される。

現地FAをSEMで観察した画像(図-3)からは、直径10 $\mu\text{m}$ 以下の球状微粒子が非常に多く、ポゾラン反応性が高いと予想される(ACI 2004)。また、JIS A 6201に示すモルタルフロー試験を行い、フロー値比が120%(表-3)となることを確認した。これは、球状粒子が多いことによるものと考えられる。なお、多くのFA粒子が球状であることから残存する非晶質相の割合が高いと考えられ、ポゾラン反応が長期間継続すると推測する。

また、現地FAは2,630 $\text{kg}/\text{m}^3$ という高い比重(表-3)を有することが注目される。これは、化学組成中の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の含有量が高いためである。RCCの配合設計では、現場での性能を保証するために、十分な量のモルタルとペーストを含むようにすることが重要である。

表-2 セメントとFAの化学組成

Items	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	L.O.I
OPC	20.1	5.56	3.14	63.9	1.44	1.96	1.21	0.45	1.74
FA	44.0	25.2	11.2	12.2	3.51	0.40	0.85	0.58	0.23



(a) 球状粒子の凝集点 (b) クリンカー粒子

図-3 FA粒子の電子顕微鏡観察

表-3 結合材の物性値

Items	OPC	FA
Manufacturer	Naragong cement Plant	Suralaya Power Plant
Specific gravity, $\text{kg}/\text{m}^3$	3,160	2,630
Blaine fineness, $\text{cm}^2/\text{g}$	3,230	3,070
Fineness < 45 $\mu\text{m}$ , %	-	22%
Activity index 28 days, %	(100)	85%
Activity index 91 days, %	(100)	98%
Flow value ratio, %	(100)	120%

さらに、現地FAのポズラン反応の程度を評価するため、28日間養生したモルタルを対象としてFA粒子近傍の元素濃度分布をFE-EPMA(島津EPMA 8050G)によって分析した。図-4に示すように、直径6.5μmのFA粒子の周囲に厚さ約1μmの水和物(C-S-H相)が放射状に形成されている。粒子の一部は反応性が高く、28日および91日でそれぞれ85%、98%の活性指数が得られ、比較的高いポズラン反応を示している。

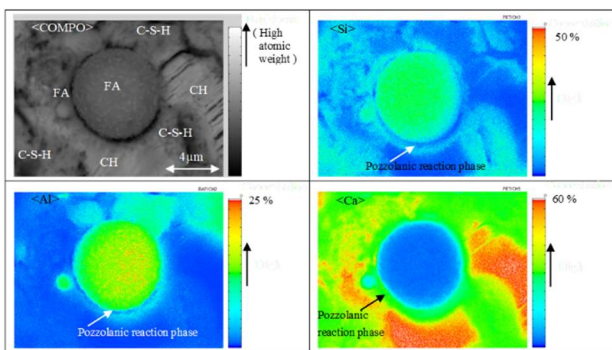


図-4 FE-EPMAによる元素定量分析

(2) 骨材

当プロジェクトから約30km離れたグルンカラン原石山から骨材(安山岩)が調達される。図-5に示すとおり、骨材は3つサイズのグループ(G2:19~37.5mm, G1:4.75~19mm, 砂:4.75~19mm)に粉砕され、現場の試験室で骨材の物理特性を調べた。この骨材は、乾燥単位重量が2,700kg/m<sup>3</sup>と非常に高く、吸収率が約1%と低いため、一般的にコンクリートの用途、特にダムコンクリートの用途に適していると考えられる。

一方、粗骨材は視覚的に非常に悪い形状であることが判明した。残念ながら、不適合の粗骨材のかかなりの部分が除去された後でも、BS 812-105に基づいて扁平率試験した場合、両方の粗骨材グループのF1+E1指数が50%を超える非常に悪い形状のままであった。



図-5 RCC配合試験練りに使用した骨材

2. RCC 配合試験練り

配合設計では、安全率を含む必要な引張強度は材齢365日で1.75MPaである。したがって、建設中の変動係数を考慮し、割り増し率を1.17とすると、RCCの直接引張強度は最低2.05MPaを目標にする必要がある。一般的に直接引張強度が圧縮強度の約7%であることを考慮すると、RCC配合試験練り

における目標とする圧縮強度は29MPaとなる。

RCC配合試験練りでは、結合材としてのセメントとFAを異なる比率で混合する。RCC配合試験練りの配合を表-4に、RCC配合試験結果とUSACE 2006の基準強度との比較を図-6~図-8に示す。

材齢28日ではすべての配合強度が基準強度より低いが、70kg/m<sup>3</sup>および80kg/m<sup>3</sup>の配合では、材齢91日で基準強度を超え、十分なセメントの存在下で現地FAの高いポズラン活性が示された。一方、60kg/m<sup>3</sup>の配合では、基準強度よりも低いままであり、FAの反応を活性化するのに十分ではない配合と考えられる。

さらに、カテゴリー1 (Total 結合材 220kg/m<sup>3</sup>)、カテゴリー2 (Total 結合材 200kg/m<sup>3</sup>)、およびカテゴリー3 (Total 結合材 180kg/m<sup>3</sup>)の配合において、材齢91日の圧縮強度は材齢28日の平均圧縮強度のそれぞれ200%、180%、および160%になった。これに対し、USACE 2006の場合の強度増加率は約140%である。材齢28日から91日までの圧縮強度の増加は、ポズラン反応の結果と考えられ、USACE 2006の基準値と比較して、現地FAはポズラン反応に関して優位性を示していると言える。

表-4 RCC配合試験練りの配合カテゴリー

Mix ID	Category	Total Cementitious (kg/m <sup>3</sup> )	FA replacement (%)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	w/(C+FA)
M1	Category 1	220	72%	60	160	110	0.50
M2			68%	70	150		
M3			64%	80	140		
M10	Category 2	200	0%	220	0	115	0.58
M4			70%	60	140		
M5			65%	70	130		
M6	Category 3	180	60%	80	120	110	0.61
M11			0%	200	0		
M7			67%	60	120		
M8	Category 3	180	61%	70	110	110	0.61
M9			55%	80	100		
M12			0%	180	0		

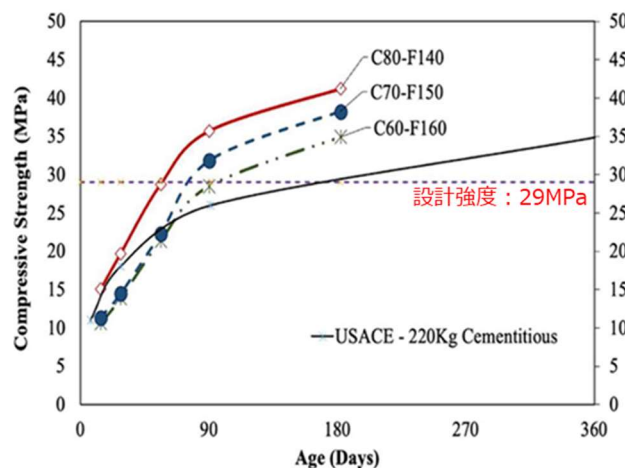


図-6 カテゴリー1の強度曲線

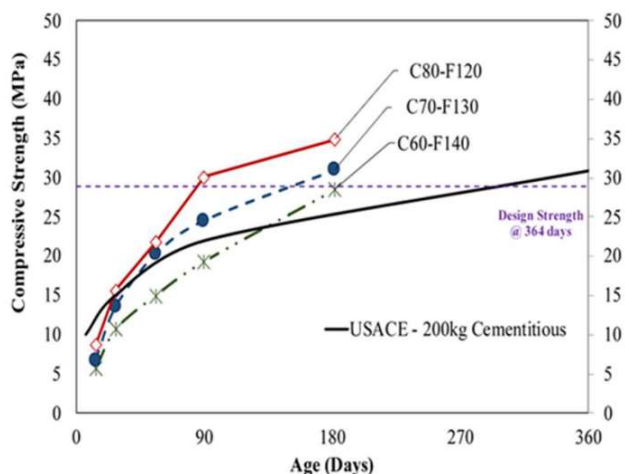


図-7 カテゴリー2の強度曲線

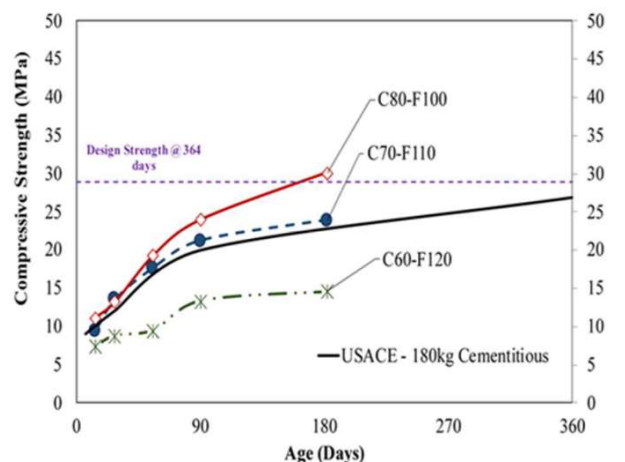


図-8 カテゴリー3の強度曲線

材齢 91 日での極限強度に対する圧縮強度の比率を図-9 に示す。セメント含有量が増加するにつれて、圧縮強度が増加する(セメント 100%の極限強度に近づく)ことを示している。80kg/m<sup>3</sup>のセメントを含む場合に、FA および W/(C+F) 比に関係なく、材齢 91 日で極限強度の約 65%に達する。十分な量のセメントが利用可能な場合、FA が完全にポズラン反応することを示す。つまり、FA はそれ自身がセメント質材料ではなく、むしろポズラン材料であり、水分含有量の存在下で水酸化カルシウム(セメントの水和生成物)と反応して、セメント質の特性を持つ化合物(C-S-H 相)を形成する。逆に、セメント含有量が 80kg/m<sup>3</sup>を下回ると、十分な水酸化カルシウムが生成されず、一部の FA は水和反応をせずに混合物中に充填剤として残ることになる。

材齢 91 日での配合と圧縮強度の関係(図-10)を見ると、所定のセメント含有量に対して FA 置換率が 5%増加するごとに圧縮強度が 4MPa ずつ低下している。

表-3 に示す 12 配合ごとに 10 個の RCC 供試体(高さ 300mm × φ150mm)、合計 120 個を製造し、CRD C164-92 規格に基づ

いて直接引張強度試験を実施した。圧縮強度と直接引張強度の関係を図-11 に示す。カテゴリー1およびカテゴリー2のすべての配合において、直接引張強度が材齢 365 日の設計閾値 2.05MPa を十分超えると想定される。また、直接引張強度が圧縮強度の 8%に達しており、これは設計の前提条件である 7%よりも高く、カテゴリー1およびカテゴリー2の配合は、材齢 91 日で設計要件を達成している。

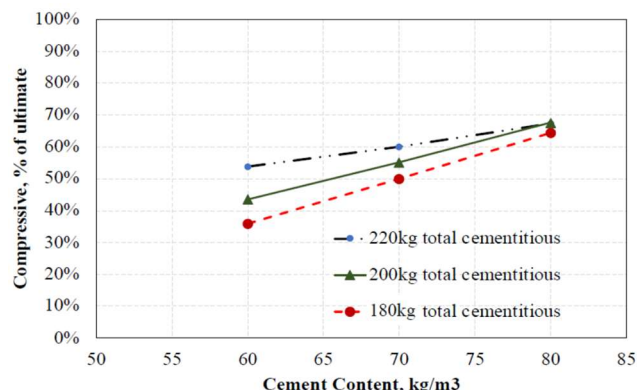


図-9 材齢 91 日での極限強度に対する圧縮強度の比率

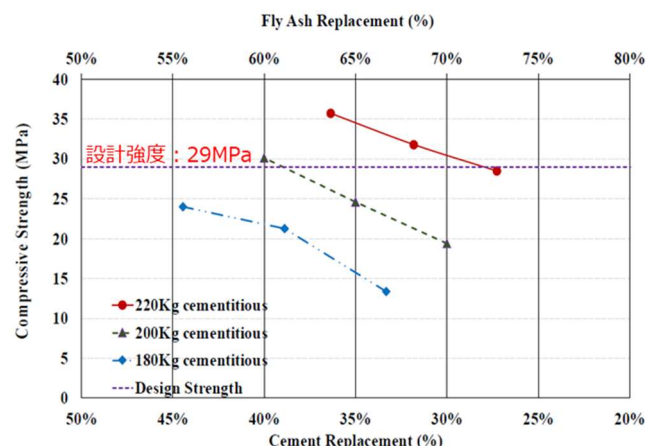


図-10 材齢 91 日での配合と圧縮強度の関係

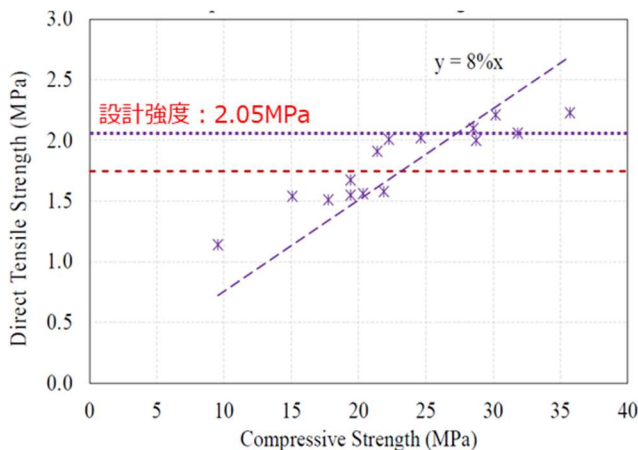


図-11 圧縮強度と直接引張強度の関係

### 3. 結論

ジャワ島で唯一調達できるスララヤ石炭火力発電所からのFAは品質が安定せず、RCCに適さないクラスCが混在することが報告されている。現地FAは、Caを多く含むクラスCまたはクラスFに分類されて変動するが、遊離石灰の含有量は定量下限値以下であり、Caのほとんどが非晶質相に含まれていることを示している。分級機で粗粒成分を除去していないため、シンダーアッシュ(クリンカーアッシュの細粒成分)が含まれており、ブレン粉末度は約 $3,070\text{cm}^2/\text{g}$ 程度しかない。しかし、SEM観察からは、直径数十 $\mu\text{m}$ 以下の粒子が大部分を占めており、直径 $1\mu\text{m}$ 以下の球形の粒子が非常に多く含まれていることが分かった。これらの物性を有する現地FAを用いて、基本物性とRCC配合試験および物性評価試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) モルタル流動試験を実施した結果、流動値比は120%であり、現地FAはコンクリートの流動性向上と減水効果に優れた混和材であることがわかった。
- 2) 材齢28日での活性指数は85%であり、現地FAが高いポゾラン反応を有することを示している。このことは、RCCの混和材として使用する場合、単位セメント量を低減できることを示している。
- 3) 現地FAは、高CaによりクラスCまたはクラスFに変化する場合でも、水和反応の制御や中長期の強度発現の点で、RCC材料として利用可能であることが、FA粒子に対してはSEM観察により、モルタル試験片に対してはFE-EPMA分析により検証された。

### あ と が き

今後は、インドネシア国では実施が難しい水和熱試験(断熱温度上昇試験)を日本国内で実施して、セメントとFA混合の温度応力への寄与を評価する。

本研究の遂行にあたり、アッパーチソカンRCCダム技術検討委員会(京都大学岸田潔教授、神戸大学三木朋広准教授、電力中央研究所山本氏他)の方々にご指導いただきました。ここに深謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 青坂優志, 山本武志, 筒井勝治, 三木朋広: ラオス国ナムニアップ1水力発電事業におけるClass CフライアッシュのRCCダムへの適用性に関する研究, コンクリート工学論文集 第34巻, pp.25-36, 2023.
- 2) 筒井勝治, Bassam Egailat, 青坂優志, 山本武志: 高Ca系クラスFフライアッシュを用いたRCCの配合試験と基本性状の評価 報告, 大ダム No.268, 2024-7.