特集≫≫ 解体，3R，建設発生土・廃棄物処理

JIS 規格外フライアッシュを用いた CSG 配合検討とダム本体への適用

大 井 篤

石炭火力発電所から発生するフライアッシュは，再生資源として有効利用が進まず，その多くは産業廃棄物として処理されている。この状況を踏まえ，成瀬ダムがある秋田県や，国土交通省では，フライアッシュの有効活用を推進している。こうしたことから，成瀬ダムではフライアッシュを有効活用すべく検討を行うこととした。フライアッシュは，ダムコンクリートに使用している JIS 規格Ⅱ種品ではなく，現状産業廃棄物として処理されている JIS 規格外品を対象とした。本稿では，JIS 規格外フライアッシュを入れた CSG の配合検討および台形 CSG ダム本体に適用した実績について報告する。

キーワード：台形 CSG ダム，JIS 規格外フライアッシュ，CSG，強度，経時変化，環境，コスト縮減

1. はじめに

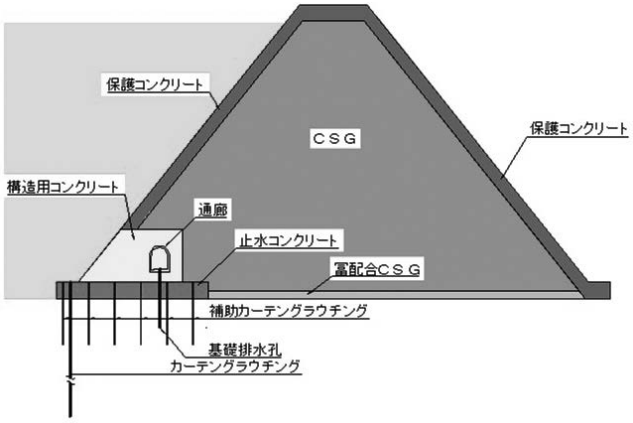
石炭火力発電所から発生する石炭灰（フライアッシュ）は，再生資源として有効利用が進まず，その多くは産業廃棄物として処理されている。この状況を踏まえ，成瀬ダムがある秋田県では県の方針として，コンクリート製品に対しフライアッシュの有効活用が推進されている。また，「環境物品等の調達の推進を図るための方針，国土交通省」においてもフライアッシュの活用について，「フライアッシュセメントについては，供給状況に地域格差があることに留意しつつ，ダム本体工などのマスコンクリートで，早期強度を必要としない場合に，その使用を推進する。」としている。このような背景から，成瀬ダムではフライアッシュを有効活用すべく検討を行うこととした。**表―1** にフライアッシュの品質一覧表を示す。検討に使用するフライアッシュは，ダムコンクリートなどの混和材として広く使用されている JIS 規格Ⅱ種品ではなく，その多くが産業廃棄物として処理されている JIS 規格外品（**表―1** の項目で規格が 1 つ以上外れたもの）を対象とした。本報では，JIS 規格外フライアッシュを添加した CSG の配合検討およびダム堤体に適用した実績について報告する。

2. 台形 CSG ダムの概要

台形 CSG ダムは，台形ダムと CSG（Cemented Sand and Gravel）工法の両方の特徴をあわせ持つ新型式のダム（**図―1**）であり，ダム建設における「材料の合理化」，「設計の合理化」，「施工の合理化」の 3

表―1 フライアッシュの品質一覧

項目			フライアッシュⅠ種	フライアッシュⅡ種	フライアッシュⅢ種	フライアッシュⅣ種
二酸化けい素含有量 %			45.0 以上			
湿分 %			1.0 以下			
強熱減量 %			3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密度 g/cm^3			1.95 以上			
粉末度	網ふるい方法（45 μm ふるい残分） %		10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	ブレーン方法（比表面積） cm^2/g		5,000 以上	2,500 以上	2,500 以上	1,500 以上
フロー値比 %			105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 %		材齢 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
		材齢 91 日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上



図―１　台形 CSG ダムの標準断面図

つの合理化を可能とするダムである[1)]。CSG とは建設現場周辺で手近に得られる材料を分級，粒度調整，洗浄を行うことなく，セメント，水を混合設備にて混合したものであり，CSG 工法とはこの CSG をブルドーザで撒き出し，その後振動ローラで転圧することによって構造物を造成する工法である。

成瀬ダムは，この台形 CSG ダムとして全国で 5 番目に着工したダムであり，高さ 114.5 m，堤頂長 755 m，堤体積 485 万 m^3 と同型式のダムでは日本最大である。

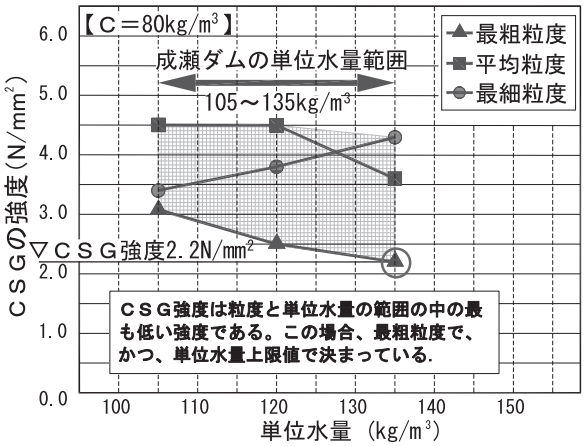
3. JIS 規格外フライアッシュを用いた CSG の配合検討

(1) JIS 規格外フライアッシュの効果の確認

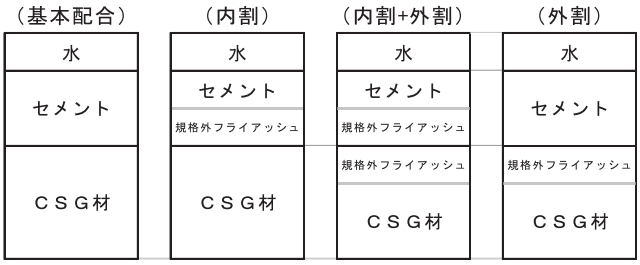
はじめに，JIS 規格外フライアッシュ（以下，規格外フライアッシュ）の効果を確認するため，**表―２**に示すように規格外フライアッシュの添加量を変え，ϕ300 × h600 mm の大型供試体にて供試体密度および CSG の強度を確認し，ϕ150 × h300 mm の標準供試体にて経時変化（経過時間ごとの締固め度）を確認することとした。CSG は先に述べたように CSG 材の粒度調整を行わないことから，粒度のばらつきを許容しており，その使用材料によって粒度範囲が定められている。成瀬ダムのひし形で定められた CSG 強度は，殆どの配合において最粗粒度で決定されていた（**図―2**）。このことから，試験時の材料粒度は最粗粒度を採用し，規格外フライアッシュを外割で入れる試験ケースとした（**図―3**）。なお，セメントの内割で規格外フライアッシュを置き換えた場合，材齢 91 日では CSG の強度が低下し CSG 強度を満足することができない可能性が高いことから，室内試験での試験ケースは全て外割とした。また，成瀬ダムの CSG では，スメクタイト系混合層鉱物の影響により過早凝結が確

表―２　配合検討の試験ケース①

ケース	単位粉体量（kg /m^3）		単位水量（kg /m^3）	超遅延剤添加率 C ×％	CSG 材粒度
	普通セメント C	規格外フライアッシュ FA（外割）			
1	100	－	125	0%	最粗粒度
2	100	－		2%	
3	100	100		0%	
4	100	100		2%	
5	100	200		0%	
6	100	200		2%	
7	100	300		0%	
8	100	300		2%	



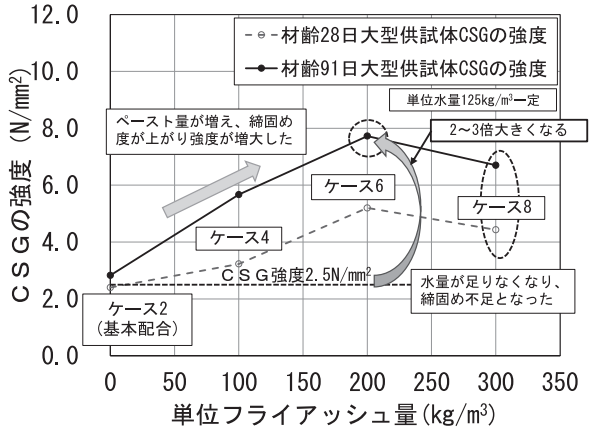
図―２　成瀬ダムのひし形



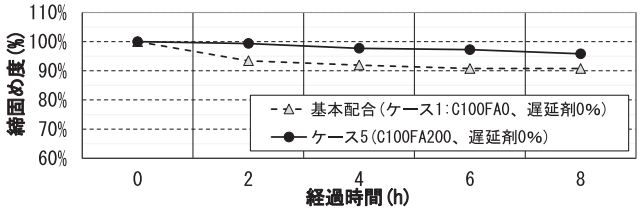
図―３　内割と外割の考え方の模式図

認されており，その対策として超遅延剤を使用しているため，超遅延剤の有無による性状の確認試験も行った[2)]。

室内試験の結果，CSG の強度は規格外フライアッシュ量 200 kg/m^3 の配合で最も大きくなった(**図―4**)。これは，粉体が多くなることによってペースト量が増え，CSG 材の空隙を埋め供試体が密実になったものと考えられる。一方で，規格外フライアッシュ量が 300 kg/m^3 の配合になると，粉体量が多く，ワーカビリティーが低下した影響によって CSG が締固め不足となったため，CSG の強度が小さくなったものと考えられる。また，超遅延剤を添加しない 200 kg/m^3 の配合



図―４　規格外フライアッシュ添加量と強度の関係①



図―５　経時変化比較（超遅延剤なし）



ケース１（６ｈ後）　　ケース５（６ｈ後）

写真―１　６時間後の供試体締固め状況の比較

において，過早凝結による経時変化が小さくなることも確認できた（**図―５，写真―１**）。

以上のことから，規格外フライアッシュを CSG に添加することで，強度の増大や，経時変化が小さくなる効果があることを確認した。また，単位セメント量 100 kg/m^3 の CSG 強度は 2.5 N/mm^2 であり，フライアッシュを外割で入れた配合は，その CSG 強度の 2～3 倍程度強度が大きい。このことから，セメント量を幾分か減じることが可能であると判断した。

(2) 実施工に向けたフライアッシュ CSG 配合の検討

つぎに，実施工を見据えた規格外フライアッシュの添加量を検討することとした。先の室内試験において規格外フライアッシュを外割で添加すると，強度の増加や経時変化の改善などが見られたことを踏まえ，基本配合と同等以上の強度を確保できる配合を選定することとした。堤体に打設する予定の CSG の単位セメント量が 60 kg/m^3 であるため，この配合を基本配合とし，単位セメント量を減らし，規格外フライアッシュの添加量を増やしたケースで，検討することにした（**表―３**）[3]。

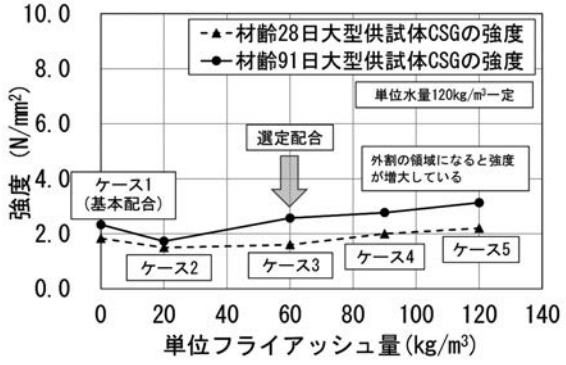
表―３　配合検討の試験ケース②

ケース	単位粉体量（kg /m^3）			単位水量 (kg /m^3)	超遅延剤添加率 C ×％	CSG 材粒度
	セメント C	規格外フライアッシュ				
		FA（内割）	FA（外割）			
1	60	－	－	120	2.0％	平均粒度
2	40	20	0			
3	40	20	40			
4	40	20	70			
5	40	20	100			
6	40	20	40		2.5％	
7	40	20	40		3.0％	

配合設定の考え方としては，ダムコンクリートで一般的に使用されている中庸熱フライアッシュセメント（フライアッシュ置換率 30％）と同程度に規格外フライアッシュに置き換え（内割）強度発現を期待しつつ，外割で CSG 材の一部を規格外フライアッシュにして，CSG を密実にすることにより強度増進を図り，ベース配合の CSG 強度と同等以上の性能を得る。さらに，CSG の性状や経時変化の改善に伴い，超遅延剤添加率の低減を図ることとした。

確認項目は，先の室内試験と同様に供試体密度と CSG の強度，経時変化とした。なお，成瀬ダムにおいて施工仕様が確認できている単位セメント量は 60 kg/m^3 ～ 160 kg/m^3 の範囲であることから，セメントと規格外フライアッシュの総和の粉体量上限値を 160 kg/m^3 と設定した。

強度試験結果から，添加量が外割の領域になると，先の室内試験と同様に，基本配合よりも強度が増加する傾向となった（**図―６**）。規格外フライアッシュが増加すると，基本配合に比べ CSG のペースト分が増え，CSG のワーカビリティーが良くなり，供試体の表面が密実となった。さらに経時変化試験の結果では，規格外フライアッシュ量を 60 kg/m^3 以上添加すると経時変化の改善効果も見られた。そこで，規格外フライアッシュ量 60 kg/m^3 配合にて，超遅延剤の添加率を変えて経時変化を比較した。実施工では，CSG 温度が 20℃ の場合，超遅延剤添加率が 3％必要であったが，規格外フライアッシュを入れると添加率 2.5％



図―６　規格外フライアッシュ添加量と強度の関係②

表―４　選定配合

	単位粉体量（kg/m³）			単位水量（kg/m³）
	普通セメントC	規格外フライアッシュ		
		FA（内割）	FA（外割）	
基本配合	60	－	－	120
選定配合	40	20	40	

※規格外フライアッシュを使用する配合は，超遅延剤添加率を基本配合の添加率から 0.5％下げることとする

とした場合でも 3％と同程度の性状を維持でき，超遅延剤添加量を低減できることを確認した。以上のことから，経済性も考慮し，規格外フライアッシュ量を 60 kg/m³（ケース 3）の配合を選定した（**表―４**）。

4. フライアッシュ CSG の施工実績

室内試験で選定した配合にて，フライアッシュ CSG をダム堤体の一部に打設した（**写真―２**）。フライアッシュ CSG の製造は，現プラントに規格外フライアッシュを添加する機能がなかったことから，CSG プラント 3 ラインのうち，2 ラインを使用して CSG 製造を実施した（**図―７**）。1 ライン目で CSG 材（段丘堆積物，原石山破砕材の 2 種類）と規格外フライアッシュを混合し，その材料をプラント内で 2 ライン目に重ダンプで小運搬，そこで規格外フライアッシュ CSG 材，セメント，水，超遅延剤を混合し，フライアッシュ CSG として，堤体に出荷した。フライアッシュ CSG の打設は，CSG を打設する最終 2 リフトの 150LF と 151LF（EL529.5 ～ 531.0 m）で行った。令和 6 年 11 月 8 日より開始し，その後 2 週間程度で 7,250 m³ 打設した。

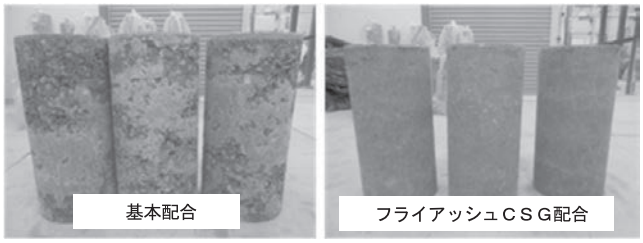
プラントで製造した CSG について，同時期に打設している単位セメント量 60 kg/m³ のベース配合と比較した。フライアッシュ CSG の配合は，粉体総量が



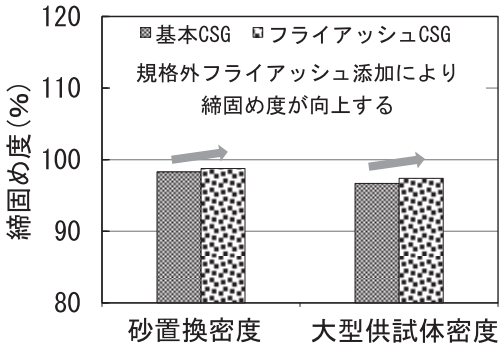
写真―２　フライアッシュ CSG 打設状況



図―７　CSG プラントのフライアッシュ CSG 製造の流れ

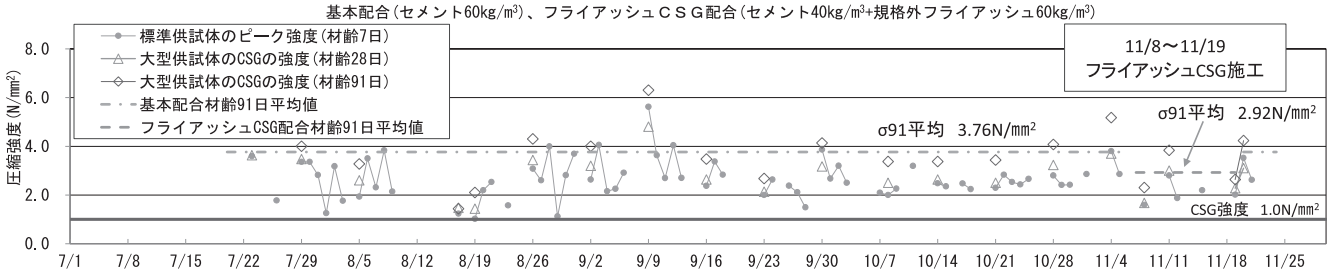


写真―３　大型供試体の締固め外観

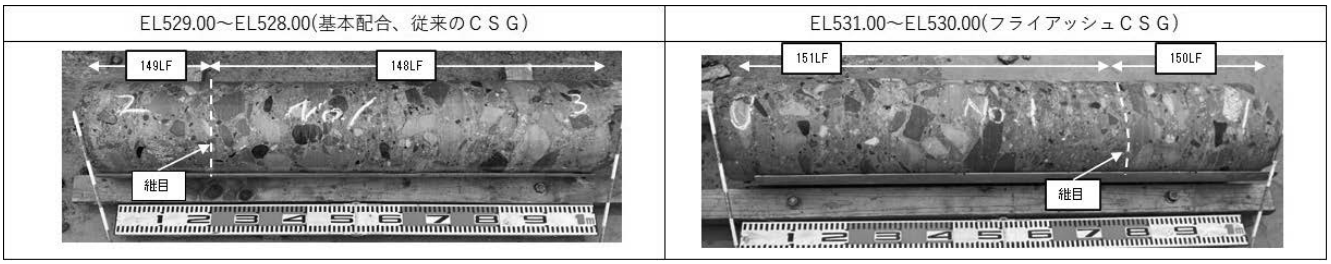


図―８　締固め度の比較

40 kg/m³ 増えたことにより，モルタル量（ペースト量）が増え，モルタルの流動性（充填性）が向上しているように見受けられた。また，大型供試体の外観（**写真―３**）から，ベース配合に比べ，フライアッシュ CSG 配合の方が密実であり，粗骨材の隙間に細粒分が充填



図―９　CSG 標準供試体のピーク強度（材齢７日）および大型供試体の CSG の強度（材齢 28 日，91 日）



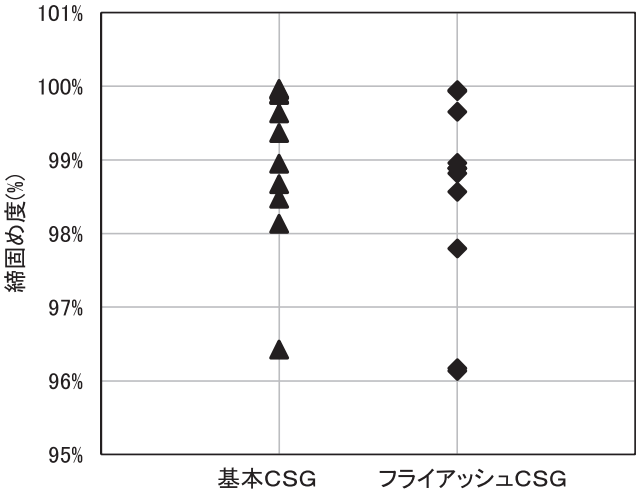
図―10　CSGφ200 mm コアの外観比較

されていることが確認できた。供試体密度および現場密度について，締固め度（密度 / 理論密度）で比較すると，フライアッシュ CSG 配合の方が基本配合よりも大きい値となり，密実になっていることが確認できた（**図―８**）。超遅延剤の添加率は，室内試験の結果から，フライアッシュ CSG 配合のみ添加率を 0.5％小さくすることとし，フライアッシュ CSG の堤体打設を実施したが，フレッシュ性状は良好であった。CSG の強度は，打設時期が 11 月だったことにより，CSG 温度が低く，セメント量の少ないフライアッシュ CSG 配合の方が従来の配合よりも初期強度は小さくなっているが，材齢 91 日では CSG 強度を満足している（**図―９**）。

フライアッシュ CSG および従来の CSG 配合について，越冬後の堤体上からφ200 mm のコアを採取した。両配合とも CSG のコアは密実であり，外観の違いは認められなかった（**図―10**）。

また，採取した基本配合 CSG とフライアッシュ CSG のコアを 25 cm 程度に切断し，コア密度を締固め度で整理した（**図―11**）。

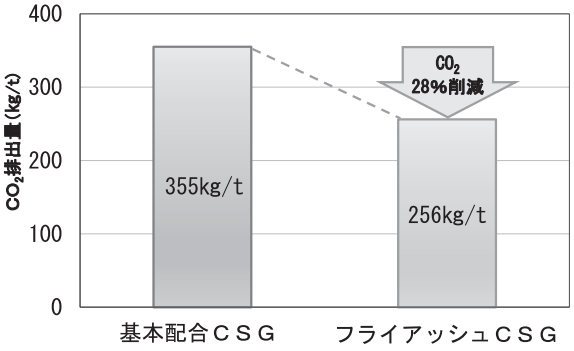
フライアッシュ CSG と基本配合 CSG の締固め度は同程度で 96％以上の値を示し，これまでに堤体へ打設した CSG とも差異はなかった。



図―11　基本 CSG とフライアッシュ CSG の締固め度

5. おわりに

成瀬ダムでは，今回，産業廃棄物として処理される規格外フライアッシュ 435 t を有効利用し，フライアッシュ CSG をダム堤体の一部に打設した。フライアッシュ CSG は，従来の CSG と同等の強度特性が得られるだけでなく，経時変化による密実性が従来の CSG よりも向上し，また同等以上の品質を確保できることを確認した。さらに，産業廃棄物の有効利用による環境負荷低減や CO_2 削減効果もあった。規格外フライアッシュを使用することで，使用するセメント量を 145 t 分低減し，CO_2 排出量が 28％削減となった（**図―12**）。また，公共工事を行う事業者だけではなく，フライアッシュ排出事業者のコスト縮減にも寄与した。今後は，CSG だけではなく，規格外フライアッシュを有効利用したコンクリートを開発し，ダム等のさまざまな構造物へ積極的に展開することで，ゼロエミッションおよび環境負荷の少ない持続可能な循環型社会の実現に貢献していきたい。



図―12　製造時の CO_2 排出量の比較

《参考文献》
1）（財）ダム技術センター：台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料，pp.1.1-1.2, 2012.
2）石田哲也，安部剛，安田成夫，鈴木孝雄：規格外フライアッシュの台形 CSG ダムへの活用に関する確認試験，ダム技術，NO.451，pp.18-27，2024 年 4 月.
3）大井篤，松本孝矢，小倉精太，大木洋和，藤田祐作，貝塚勇介，菅原崇之，佐藤尚司，阿部恵也，浅利太陽：JIS 規格外フライアッシュを用いた CSG 配合検討と施工，土木学会第 80 回学術講演会，Ⅵ-831，2025.

［筆者紹介］
大井　篤（おおい　あつし）
鹿島建設㈱
東北支店
成瀬ダム堤体打設 JV 工事事務所



