

CSG混合装置の開発

廣中哲也* 木全克夫** 米田安夫***
満田守雄*** 堀 保夫*** 中山隆義****

1. まえがき

近年の公共事業費の削減、自然環境の保護・保全を背景に建設事業には、今まで以上のコスト削減と環境保全への配慮が望まれている。このような背景から、ダム事業においては河床砂礫や掘削ズリなどの現地発生材を有効に活用するCSG工法（Cemented Sand and Gravel Method）に期待が高まっている。

CSG工法は、河床砂礫や掘削ズリなどのダムサイト近傍で容易に入手できる岩石質材料（以後、母材と称す）のオーバーサイズを取り除いた材料（以後、CSG材と称す）に、セメント、水を添加し、簡易な混合装置により連続製造した材料（以後、CSGと称す）を運搬、ブルドーザーで敷き均し、振動ローラで転圧することにより構造物を築造するものである。そのため、CSGの製造に用いる混合装置には、多様な現地発生材への適用性と施工数量が多い場合の連続・大量製造性能が求められている¹⁾。また、CSG工法をダム建設に採用した場合、採取した母材には極力手を加えずにオーバーサイズだけを取り除いたCSG材を利用するため、廃棄率が低く、骨材製造設備などが簡略化され、汎用機械を用いた急速施工が可能となることから環境負荷の低減、工期短縮およびコスト削減を図ることができる²⁾。

そこで、重力による揺動混合とパドルによる攪拌混合を併用した小型・軽量の連続式混合装置を開発し、幅広い粒度の現地発生材を用いて良好な品質のCSGを製造可能なことを確認した。また、本装置を用いて、福島県発注のこまちダム建設（本体）工事における上流仮締切堤に適用し、安定した混合性能と良好な品質が得られた。

本報告では、混合装置の概要と性能確認試験の結果およびダム工事での上流仮締切堤への適用事例を中心に記述する。

2. 混合装置の開発

2.1 混合装置の概要

a. 混合の仕組み

混合装置は、適用現場、採取箇所、採取時期等により粒度および含水率等が変動する多様な現地発生材での混合が可能となるように開発した。図-1に混合の仕組みを示す。傾斜させた矩形筒の上部からCSG材、セメント、水を投入し、重力による流下時の揺動混合とパドルの回転による攪拌混合を組み合わせた重力・動力併用型の混合装置である。

b. 仕様および特徴

重力・動力併用型CSG混合装置を写真-1、主な仕様を表-1に示す。また、その特徴を以下に示す。

- i. CSG材への適用範囲が広く、混合性能が良い。
装置の傾斜角度とパドルの回転数を変化させるこ

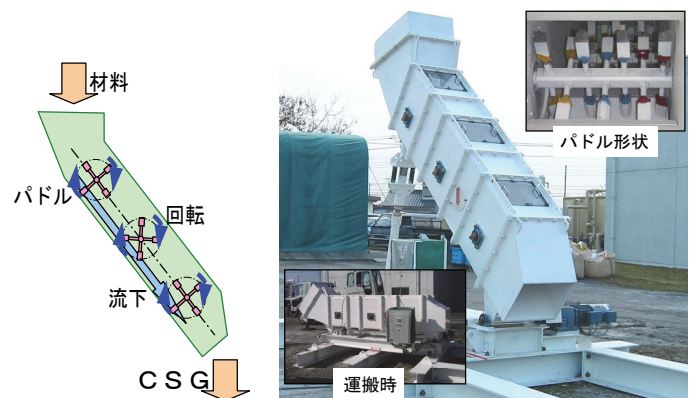


図-1 混合の仕組み

写真-1 CSG混合装置

表-1 混合装置の主な仕様

項目	内容
寸法	L=4,000mm W=560mm H=750mm
重量	2.8t
対象最大粒径	80mm
製造能力	80m ³ /h
回転軸数	3軸
パドル回転数	8.7~110回毎分
装置傾斜角度	40~65°（可変式）
モーター出力	3.7Kw × 1台

*技術研究所 **技術本部土木部 ***関西支社土木部 ****関西支社機械部

とでCSG材の特性に合った混合が可能となり、良好な混合性能が得られる。

ii. 回転用モーター出力が小さい。

重力による流下混合と併用しているため、パドル回転用のモーター出力が小さい。

iii. 小型軽量設備である。

4tトラックで運搬可能な重量と寸法であり、設置・撤去も容易である。

2.2 性能確認試験

混合装置の性能を確認するために、現場発生材を用いた傾胴式ミキサーによる室内および実機による混合試験を実施した。

a. 試験概要

(a) 使用材料および基本物性

表-2に使用材料および基本物性、図-2にCSG材の粒度分布を示す。母材にIダム建設工事発生材を用い、80mmふるい通過分をCSG材とした。今回は幅広い粒度のCSG材への適用性を確認するために、CSG材の細粒分(5mmふるい通過分)の含有率を20~50%の4種類に調整した。

(b) 混合方法

混合方法は、室内試験では容量120ℓ傾胴型混合ミキサーを用いて、1バッチ60ℓ当たりのセメント、CSG材、水を投入し3分間混合した。実機試験では、材料投入用ベルトコンベア1本(幅60cm、長さ8m)と混合装置を用い、混合量はベルトコンベア1m当たりの各材料の計量値を変えることで0.2、0.3、0.4 m^3 とした。なお、混合量0.2 m^3 は連続運転時の製造能力の40 m^3/h 、0.4 m^3 で80 m^3/h に相当する。

(c) 試験ケース

表-3に室内試験および実機試験の試験ケースを示す。室内試験では、単位水量、CSG材の細粒分含有率をパラメータとした。特に、前述のように実機の幅広い粒度変動に対する適用性を確認するために、CSG材の細粒分含有率を20~50%となるように調整した。

実機試験では、混合装置の傾斜角度、攪拌羽根の回転数、混合量およびCSG材の細粒分含有率をパラメータとした。なお、単位セメント量は、これまでのCSGの施工実績でもっとも事例が多い80 kg/m^3 のみとした。

(d) 試験項目および方法

試験項目および方法は、台形CSGダム技術資料³⁾

に準拠した。混合後のCSGは、40mmのふるいでウェットスクリーニングを行った後に試験体に用いた。試験体寸法はφ15cm×30cmの標準試験体とし、3層に分けてCSGを型枠に詰め、各層を回転数3000回/分で起振力140~150kgの振動タンパーにより30秒間締固めた。単位容積質量試験および一軸圧縮強度試験を実施した。圧縮試験では応力-ひずみ曲線を測定し、応力の最大値をピーク強度、応力-ひずみ曲線の直線区間を弾性領域、弾性領域中の応力が最大となる点をCSG強度と定義した。

b. 試験結果

図-3に細粒分含有率を変化させた場合の単位水量とCSG強度の関係を示す。材齢28日のCSG強度は、室内試験で2.9~3.9 N/mm^2 、実機試験で2.4~2.7 N/mm^2 となり、室内試験のCSG強度に対する実機試験のCSG強度の比率(以後、CSG強度率と称す)は74~86%であった。実機混合装置の性能は、今

表-2 使用材料および基本物性 (性能確認試験)

区分	仕様	
CSG材	・ Iダム建設工事発生材 ・ 片麻岩、粒径 0~80mm	
	細粒分率 20%	表乾密度 2.62 t/m^3 、吸水率 1.61% 単位容積質量 1.98 t/m^3
	30%	表乾密度 2.61 t/m^3 、吸水率 1.83% 単位容積質量 2.01 t/m^3
	40%	表乾密度 2.61 t/m^3 、吸水率 2.05% 単位容積質量 1.97 t/m^3
	50%	表乾密度 2.60 t/m^3 、吸水率 2.27% 単位容積質量 1.98 t/m^3
セメント	・ 普通ポルトランドセメント ・ 密度 3.16 t/m^3	
水	・ 水道水	

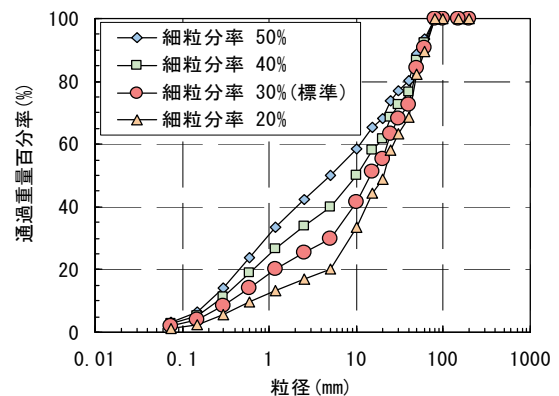


図-2 CSG材の粒度分布 (性能確認試験)

表-3 試験ケース (性能確認試験)

要因		水準
室内 と 実機	単位セメント量	3水準 (80~100 kg/m^3)
	単位水量	5水準 (100~150 kg/m^3)
	細粒分率	4水準 (20~50%)
実機	傾斜角	3水準 (40~60度)
	パドル回転数	4水準 (45~90回毎分)
	混合量	3水準 (0.2~0.4 m^3 /回) (連続運転時 40~80 m^3/h 相当)

回の使用材料では傾斜型ミキサー3分間の混合に対して8割程度であると考えられる。

図-4に単位水量 120kg/m³ を一定にした場合のCSG材の細粒分率とCSG強度の関係を示す。室内試験および実機試験のCSG強度は、CSG材の細粒分率が20~50%に増加することで20%程度低下している。これは、細粒分の増加に伴って所要の混合エネルギーも増加したためと考えられる。また、実機試験ではパドルの回転数と1回当たりの混合量が多いほどCSG強度が大きくなっており、細粒分率30%のCSG強度率は87%と良好な値を示している。

図-5に混合装置のパドル回転数とCSG強度の関係、図-6に混合装置の傾斜角度とCSG強度の関係を示す。パドル回転数の増加によりCSG強度は1.8~2.9N/mm²に増加しており、75回毎分以上で安定したCSG強度が得られている。次に、今回使用したCSG材では、傾斜角度50°のCSG強度が40°と60°に比べて大きくなっている。以上より、混合装置の回転数および傾斜角度を変化させることで効果的な混合性能が得られると考えられる。

3. 上流仮締切への適用例

3.1 施工概要

a. 工事概要

こまちダムは福島県発注の堤高 37.0m、堤体長 150.0m、堤体積 30,000m³の重力式コンクリートダムである。本ダムにおいて、転流工の上流仮締切堤に今回開発した混合装置を用いたCSG工法を適用した。

表-4に上流仮締切堤の工事概要、図-7に上流仮締切堤の断面図を示す。CSG工法の適用により上下流面勾配を当初設計の1:2から1:1に変更し、堤体積の削減を実現した。なお、CSGの必要強度は、上下流面勾配1:1の安定性の検討結果より2.0N/mm²となった。

b. 混合設備

図-8に本施工に用いた混合設備の配置図を示す。混合設備は、CSG材投入ホッパー、ベルトフィーダー、混合装置、セメントサイロ、セメント供給設備、給水設備、ベルトスケール、積込用ベルトコンベア等からなっている。

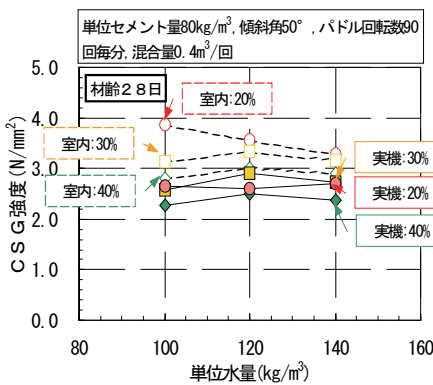


図-3 単位水量とCSG強度

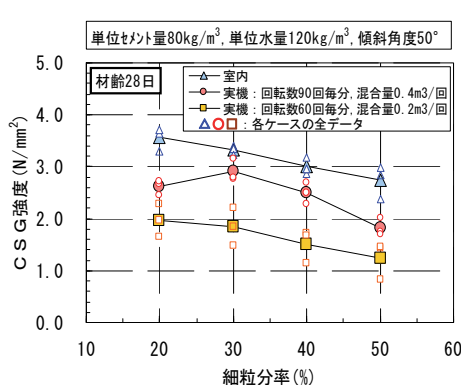


図-4 細粒分率とCSG強度

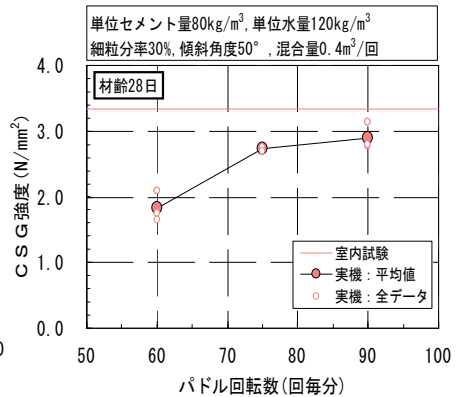


図-5 パドル回転数とCSG強度

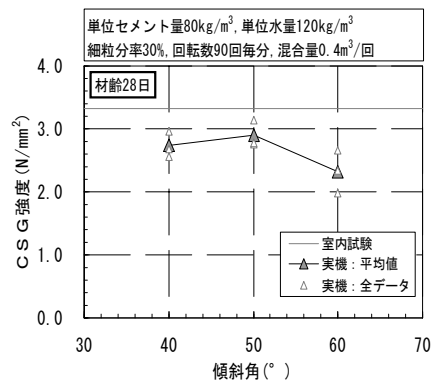


図-6 傾斜角度とCSG強度

表-4 上流仮締切堤の工事概要

項目	内容
堤高	5.9m
堤長	27.0m
天端幅	4.0m
堤体積	808m ³
上下流面勾配	1:1
保護・遮水工	上流面+天端 吹付けモルタル (t=50mm)
放流工	コルゲートパイプ I型-φ1500

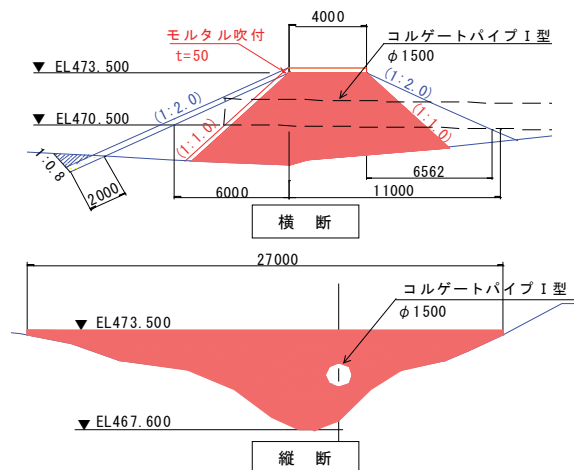


図-7 上流仮締切堤の断面図

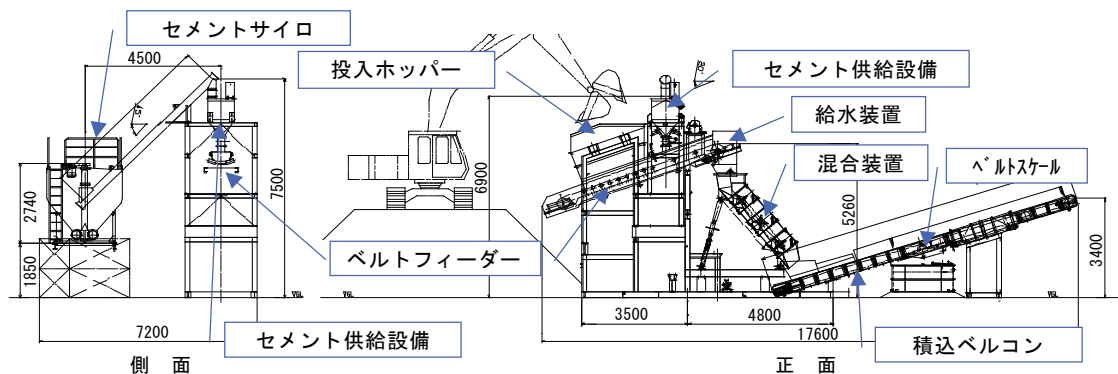


図-8 混合設備の配置図

表-5 上流仮締切堤の使用材料

区分		基本物性
CSG材	真砂	現場発生材、風化花崗岩 表乾密度 2.55t/m ³ 、吸水率 4.50% 実積率 57.7%
	粗粒材	郡山産碎石、かんらん岩 粒径 0-80mm、表乾密度 2.82t/m ³ 吸水率 1.13%、細粒分率 13% 実積率 70.2%
セメント		普通ポルトランドセメント 密度 3.16t/m ³
水		河川水

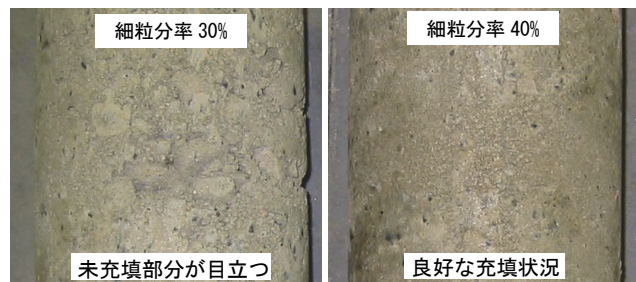


写真-2 細粒分率 30%と 40%時の標準試験体

c. 使用材料

表-5に上流仮締切堤の使用材料を示す。使用材料は、上流仮締切堤施工時に工事区域内から粗粒分の掘削ズリが発生しなかったため、粗粒材(0~80mm)を近傍の採石場より入手し、不足細粒分はダムサイトで発生する真砂(風化花崗岩)を混合して使用した。なお、真砂の混合量は、事前の配合選定試験により決定した。

3.2 配合選定試験

a. 試験概要

実施工で使用する配合を決定するために、事前の傾胴式ミキサーによる室内試験および実機試験を実施した。なお、適用決定から施工までの準備期間が短かく、材齢 28 日の養生期間が確保できなかったため、配合は混合状況および材齢 7 日のピーク強度の結果をもとに選定した。

使用材料は、表-5に示す実施工と同様のものを用いた。混合方法は、室内試験では容量 120ℓ傾胴型混合ミキサー、実機試験では、材料投入用ベルトコンベア 1 本(幅 60cm、長さ 8m)と混合装置を用いた。混合量は室内試験で 1 バッチ 60ℓ、実機試験で 0.4m³(80m³/h 相当)とした。

試験ケースは、単位セメント量 60kg/m³と 80kg/m³の 2 水準、単位水量 110~150kg/m³の 5 水準、粗粒材に現場発生真砂を混合して CSG 材の細粒分含有率が 30%と 40%の 2 水準とした。

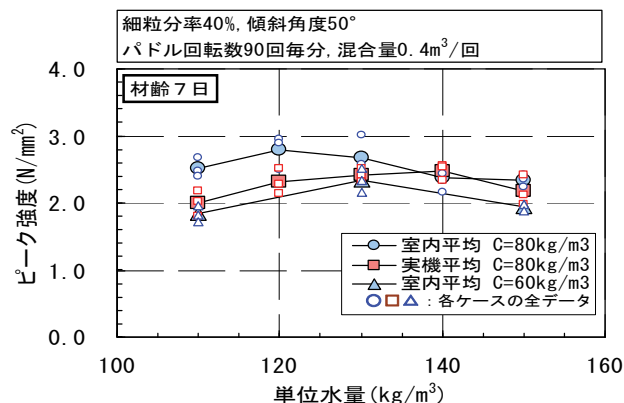


図-9 単位水量とピーク強度(配合選定試験)

b. 試験結果

写真-2に細粒分率 30%と 40%時の標準試験体を示す。細粒分率 30%では表面に粗粒分および未充填部分が目立っており、細粒分率 40%では良好な充填状況であった。したがって、これ以降の配合選定試験および実施工の細粒分率を 40%とした。

図-9に室内試験および実機試験での材齢 7 日のピーク強度と単位水量の関係を示す。室内試験および実機試験ともに単位セメント量 80kg/m³の場合に必要な強度 2.0N/mm²を満足した。また、単位セメント量 80kg/m³の場合、室内試験では単位水量 120kg/m³でピーク強度の最大を示し、実機試験では、単位水量 120~140kg/m³までピーク強度は増加傾向にある。なお、標準試験体への充填状況は単位水量 120~

150kg/m³で良好であった。一方、CSGの強度特性以外にも施工性の観点からフレッシュ性状を考慮すると、単位水量 140kg/m³ 以上では粘性が生じ、振動締固め時に表面に水分が浮き、ミキサーや振動タンパにCSGが付着するため、施工性に問題があるのもと考えられた⁴⁾。

したがって、施工性を優先して、今回の施工に使用するCSGの配合を単位セメント量 80kg/m³、単位水量 120kg/m³ に決定した。表-6に決定配合の試験結果を示す。決定配合のCSG強度率は材齢 28 日で 83%であり、良好な混合結果が得られた。

3.3 施工状況

a. CSG材のストックとブレンド

CSG材のストックは、表-5に示す粗粒材と現地発生真砂を容積比 2 : 1 (細粒分率で約 40%) となるようにサンドイッチ状にストックした。混合設備に運搬する前にスケルトン付きバックホウにて切り崩しながら十分に混合した。

b. 混合

写真-3に混合設備を示す。ベルトコンベアと混合機を組み合わせ、ベルトコンベアを通過する単位時間当たりのCSG材重量が一定となるようにリアルタイムでベルトコンベアの搬送速度を調節し、一定量の水とセメントを加えるシステムとなっている。CSG混合状況は、フェノールフタレイン溶液の噴霧による発色状況から良好であった。

c. 打設

写真-4に転圧状況を示す。混合設備で製造されたCSGは、ダンプトラックで打設現場に運搬され、バックホウで1層 25cm にまき出し、振動ローラで層厚 50 cm 毎に無振動1回と振動8回の締固めを実施した。法面は振動機付きバックホウ、岩着部や狭隘部はハンドローラとタンピングランマーにより締固めた³⁾。また、打設後の養生方法は寒冷期のため、養生マット、シートおよびネットを重ねたものとした。なお、打設完了後の上流法面と天端面へは、表面保護および遮水を目的に厚さ 50mm の吹付けモルタルを施工した。

d. 製造実績

写真-5に上流仮締切堤の施工完了状況を示す。今回の施工では、混合装置の傾斜角度は 45°、パドル回転数は 100 回毎分、製造量は施工量が少なかったため、40m³/h で製造した。

表-6 決定配合の試験結果

区分	強度 (N/mm ²)			強度率 (実機/室内) (%)		密度 (t/m ³)
	材齢 7 日		材齢 28 日	ピーク	CSG	
	ピーク	CSG	CSG			
室内試験	2.78	4.29	3.41	-	-	2.28
実機試験	2.31	3.73	2.85	87	83	2.25

【条件】
 ・単位セメント量 80kg/m³、単位水量 120kg/m³
 ・パドル回転数 90 回毎分、傾斜角 50°
 試験時の混合量 0.4m³/回 (連続運転 80m³/h 相当)



写真-3 CSG混合設備



写真-4 転圧状況



写真-5 施工完了状況

製造体積は、設計堤体積の 808m³ に対して 872m³ であり、1日当たりの最大製造量は、打設ヤードが狭く、施工サイクルに制約されたため、約 150m³ であった。途中、オーバーサイズの粗粒材の混入によりパドルの一部が破損したことを除いて順調に製造できた。

3.4 施工および品質管理

a. 管理方法と基準値

表-7に今回実施した主なCSGの管理方法と基準値を示す。品質管理項目は、CSG材の表面水率、CSG材の粒度分布およびCSGの圧縮強度とした。圧縮強度には標準試験体を用い、混合のバラツキを評価するために材齢 28 日の採取本数を 6 本とした。圧縮強度の管理基準値は、仮締切堤体の内的・外的安定性を検討した解析結果より 2.0N/mm² とした。施工管理としてラジオアイソトープ法 (RI) を用いた現場密度試験による密度管理を行い、管理基準値を 2.05t/m³ とした。密度の管理基準値は、事前の配合選定試験結果をもとにピーク強度が強度管理基準値の 2.0N/mm² 以上となるように決定した。

表-7 主なCSG管理方法と基準値

区分	試験項目	内容	基準値
施工管理	現場密度	R1 ラジオアイソープ法 各層毎(50cm毎) 突き砂法	2.05t/m ³
	CSGの粒度分布	JIS A 1102 週1回	
品質管理	CSG材の表面水率	JIS A 1112 当日作業開始前 細骨材相当分のみ	—
	圧縮強度 (ピーク強度) (CSG強度)	JIS A 1108 施工日毎 標準試験体(φ150×300) 材齢7日(3本) 材齢28日(6本)	2.0N/mm ²

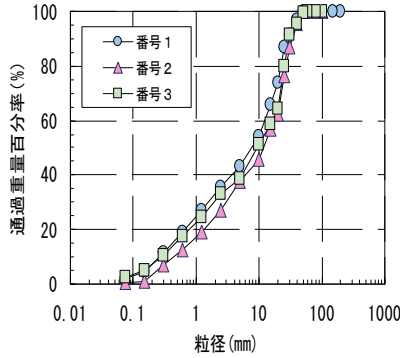


図-10 CSG材の粒度分布

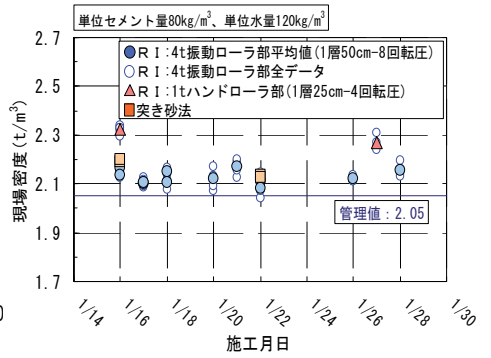


図-11 現場密度試験結果

b. 管理結果

図-10 に粗粒材に現場発生真砂を混合したCSG材の粒度分布を示す。細粒分率 40%を目標に粗粒材と現地発生真砂をサンドイッチ状にストックし、スケルトン付きバックホウにて切り崩しながら混合することで、細粒分率の変動範囲は 38~43%と比較的小さなものとなった。

図-11 に現場密度試験結果を示す。現場密度は基準値の 2.05t/m³ を満足しており、締固め機種と締固め方法の組み合わせ(締固めエネルギー)により密度が異なることが分かる。

図-12 に材齢 28 日のCSG強度を示す。施工時の材齢 28 日平均CSG強度は 2.74N/mm² であり、管理基準値の 2.0N/mm² を満足した。なお、CSG強度率は 80%であり、材齢 28 日のCSG強度はピーク強度の 79%であった。また、ピーク強度およびCSG強度ともに試験体間のバラツキは比較的小さく、細粒分率 38~43%の変動による強度への影響も小さいことが分かる。

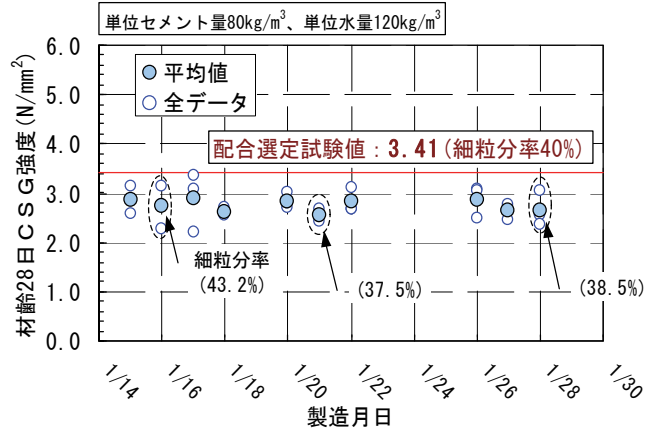


図-12 材齢 28 日のCSG強度試験結果

て「DK-VIミキサ」として認定された。

最後に、本開発にあたりご指導いただいた(財)国土技術研究センターの廣瀬利雄顧問、(財)ダム技術センターの藤澤侃彦理事、貴重な施工機会を与えていただいた福島県、ならびに協力いただいた関係各位に感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 川崎秀明・平山大輔、「CSGを用いたダム技術に関する最新動向」、土木技術資料、Vol. 45、No. 6、pp. 34~39、2003. 6
- 2) 藤澤侃彦・吉田等・平山大輔・佐々木隆、「台形CSGダムの特徴と現在までの検討状況」、ダム技術、No. 19、pp. 2~23、2002. 8
- 3) 台形CSGダム技術資料作成委員会編、「台形CSGダム技術資料」、pp. 3-5~3-19、pp. 5-14~5-19、2003. 8
- 4) 廣瀬利雄・藤澤侃彦・吉田等・川崎秀明・平山大輔・佐々木隆、「台形CSGダムの設計理念とCSGの材料特性」、大ダム、No. 187、pp. 33~41、2004. 4

4. あとがき

本報告では、重力・動力併用型CSG混合装置の性能確認試験結果、上流仮締切堤への適用結果を述べた。開発したCSG混合装置は良好な混合性能を示し、実施工でも安定した製造と良好な品質を確認できた。

今後は、現場展開をさらに進め、CSGのより効率的な施工管理、品質管理、現地発生材の特性を考慮した混合・打設方法について知見を深めたい。なお、この装置は、平成 16 年 3 月 15 日に(財)日本ダム協会「第6回CSG工法用混合設備検討小委員会」におい