

◆ 報 文 ◆

母材の微粒分がCSGの強度に与える影響

中村洋祐* 佐々木晋** 佐々木隆*** 山口嘉一****

1. はじめに

台形CSG (Cemented Sand and Gravel) ダムは堤体内の発生応力が全体的に小さく、特に地震時に発生する引張応力を大幅に低減できる台形ダムの設計手法と、従来のダムコンクリートでは使用することができなかった低品質な材料を利用するCSG工法を組み合わせることにより「設計の合理化」、「材料の合理化」、「施工の合理化」の3つの合理化を同時に達成する新形式のダムである¹⁾。

台形CSGダムの堤体材料であるCSGは現地発生材に必要最小限の処理を施すことで作製したセメント硬化体であるため、従来のダムコンクリートに比較して品質のばらつきが大きく、かつCSG母材の違いによりそのばらつき特性が大きく異なるという特徴を有している。いま、CSGの強度に着目すると、CSG母材の粒度、その中でもセメントの均一な混合を阻害する可能性の高い粒径0.075mm以下の微粒分の影響が大きいと推察される。特にCSGは母材の粒度調整を基本的に行わないことで合理化を達成することから、母材粒径0.075mm以下の微粒分がCSGの強度に与える影響について把握しておくことは、今後の台形CSGダムの設計に有用な基礎資料になるものと考えられる。

本論文では、実際の台形CSGダムサイトにおける現場材料そのものや他材料を混合して調整した材料を用いて室内試験を実施し、CSG母材の粒径0.075mm以下の微粒分含有率やその性質がCSGの強度に与える影響について分析した結果を報告する。

2. 母材の微粒分含有量の影響²⁾

2.1 使用材料および試験方法

本章では、母材の粒径0.075mm以下の微粒分含有量がCSGの強度に与える影響について検討する。

試験材料には、Aダムの母材をそのまま用いた

「原粒度試料」と、Aダムの母材を水洗いし粒径0.075mm以下の微粒分を除去した「水洗試料」を用いた。これらの材料にセメント (80kg/m³) を混合してφ150mm×H300mmのCSGの標準供試体を作製し、一軸圧縮強度と静弾性係数を測定した。試験に用いた材料の物性値等を表-1に示す。なお、水洗いにより粒度構成が変化する粒径5mm以下については原粒度、水洗後の粒度(以後、水洗粒度という)の試料それぞれについて表乾密度、吸水率を示した。また、表-2に試料のs/a、微粒分含有率を、図-1に原粒度および、水洗粒度を示す。

表-1 使用材料および基本物性値

使用材料	種類および物性
セメント	普通ポルトランドセメント
混和材	無し
母 材	千枚岩原石山材料
	80～40mm (表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率3.1%)
	40～20mm (表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率3.6%)
	20～10mm (表乾密度2.59g/cm ³ , 吸水率3.8%)
	10～05mm (表乾密度2.56g/cm ³ , 吸水率4.5%)
	原粒度5mm以下 (表乾密度2.52g/cm ³ , 吸水率5.4%) 水洗後5mm以下 (表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率3.0%)

表-2 試料の諸元

粒 度	原粒度	水洗粒度
s/a (%)	40.4	33.0
微粒分含有率 (%)	9.8	0.7

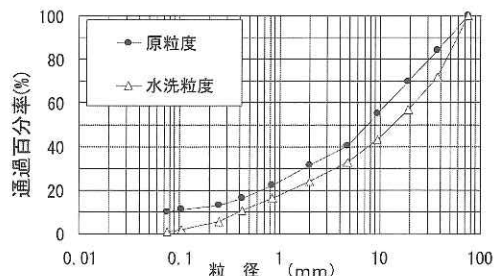


図-1 試料の粒度分布

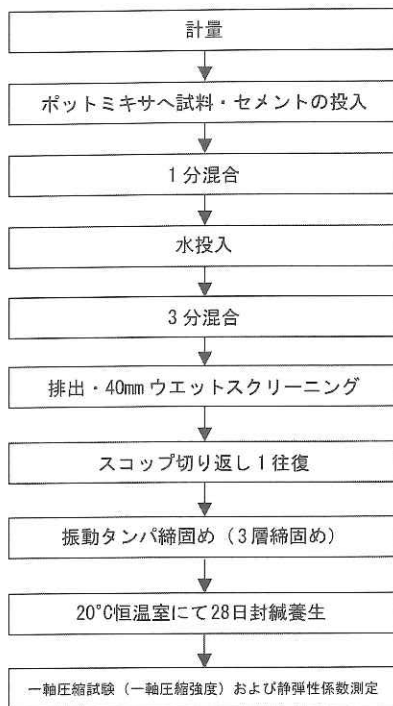


図-2 試験のフロー

表-3 試験ケース

粒 度	原粒度	水洗粒度
1層あたり締固め時間 (s)	5, 10, 30	10, 30
単位水量ケース数	5	5
試験時材齢 (日)	28	
供試体数 (本)	5	3

図-2に試験フローを、表-3に試験ケースを示す。なお、一軸圧縮試験時には、外部ゲージ式変位計により荷重増加に対する軸方向の変位計測を行った。

2.2 配合条件

表-4に本試験で設定した単位水量の範囲を示す。一般的にCSGの施工管理がしやすいと考えられている強度が最大となる単位水量³⁾を超える単位水量の範囲においても試験を実施するように設定した。

図-3に各粒度の単位水量と締固め時の密度の関係を示す。また、図-4に各配合で締固め時の供試体密度を、同じ試料がゼロ間隙状態に締め固まった際の密度で除した密度比と、単位水量との関係を示す。今回の設計条件においては、最大の締固め時間である30秒締固め時に密度が最大となる単位水量は、原粒度試料で160kg/m³程度、水

表-4 試験に用いた単位水量の範囲

粒 度	原粒度	水洗粒度
単位水量 (kg/m ³)	140～180	80～140

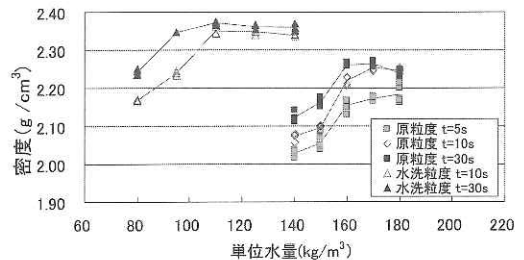


図-3 単位水量と密度の関係

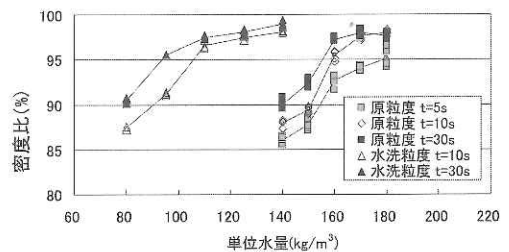


図-4 単位水量と密度比の関係

洗粒度試料で110kg/m³程度となった。また、密度比は両試料ともピーク密度前では、単位水量の増加に伴い増加する傾向にあり、概ねピーク密度付近で98%程度となり頭打ちとなった。水洗粒度試料ではピーク密度以降も微増傾向が続き最大値は99%程度であった。

原粒度試料に着目すると、締固め時間が短くなると、同じ単位水量に対する密度が小さく、また密度が最大となる単位水量が大きくなっている。よって、短い締固め時間で相対的に大きな密度を得るためには、相対的に多めの単位水量が必要となると考えられる。なお、水洗粒度試料では、ピーク密度を得る単位水量より小さい単位水量では締固め時間が密度に影響しているが、それより多い水量では、締固め時間の影響が相対的に小さくなっている。

2.3 一軸圧縮強度および静弾性係数

一軸圧縮試験の結果として得られた一軸圧縮強度と静弾性係数について考察する。図-5に単位水量と弾性領域強度の関係を、図-6に単位水量とピーク強度の関係を示す。弾性領域強度とは、一軸圧縮試験から得られる応力～ひずみ曲線のなかで、応力とひずみが直線関係である範囲での最大圧縮強度⁴⁾のことをいい、台形CSGダムの設

計における重要な指標となる。図-5、6よりいずれの強度についても、原粒度試料よりも、水洗粒度試料の方が大きいことがわかる。また、水洗粒度試料を用いたCSGは、単位水量の変化に対して強度の絶対量の変化が大きく、特にピーク密度付近以降の単位水量の増加に対して減少傾向が顕著である。原粒度試料を用いたCSGの強度は、単位水量の上昇に対して緩やかな右肩上がりの曲線となり、ピーク密度付近より大きい単位水量領域における強度の減少が小さく横ばいに近い曲線となった。これは、水洗により小さい単位水量で高い密度が得られる粒度となったため、ペーストのW/Cが小さくCSGのマトリックスとなるモルタル分に、より高いセメンテーション効果が得られたことによる可能性がある。また、細粒分が多いとセメントの均一な混合が阻害され、強度が発現しにくいということも合わさって、原粒度試料と水洗粒度試料のCSGの強度特性に差が生じたと考えられる。

図-7に単位水量と外部変位計計測により求めた弾性係数の関係を示す。原粒度試料の弾性係数の分布形状は概ね弾性領域強度の分布形状に似た形で弾性係数が変化しているが、水洗粒度試料の弾性係数は弾性領域強度の変化が比較的大きいにも関わらず弾性係数の変化が小さい結果となった。

図-8、9に粒度ごとの密度と弾性領域強度の関係を示す。原粒度試料を用いたCSGでは、密度上昇に伴い弾性領域強度が線形的に増加しており、ピーク密度付近以降も単位水量の増加による大きな強度の低下は見られない。一方、水洗粒度試料を用いたCSGでは、締固め時間10秒のデータのばらつきがやや大きい、ピーク密度より小さい密度で最大強度を発現し、ピーク密度よりも湿潤側の状態では弾性領域強度が小さくなっている。この材料ではピーク密度時の単位水量より大きい単位水量において、大きな粒径の母材の間隙をW/Cの大きい良質なペーストが埋め切れず、間隙を埋める水が相対的に多くなりながら密度が上昇したことが原因ではないかと推察している。

図-10に密度比と弾性領域強度の関係を示す。原粒度試料を用いたCSGでは、密度比の上昇に比例して弾性領域強度が上昇し続ける傾向があるのに対して、水洗試料を用いたCSGでは、密度比95%をピークに弾性領域強度が低下する傾向が見られる。これは、水洗試料を用いたCSGにおいて、密度比が95%を超えるのは、図-3および図-4か

らわかるように、密度が最大値となる単位水量より単位水量が多い領域であり、単位水量の増加に対応して密度比が上昇している。この領域では、十分に締固められれば、ペースト分の水セメント比が強度に強く影響を及ぼすと考えられ、単位水

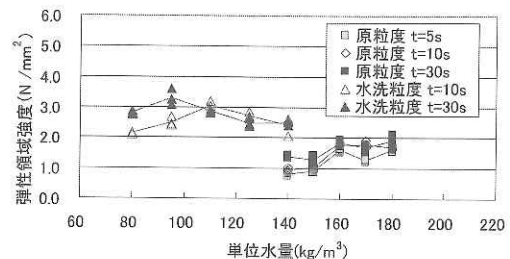


図-5 単位水量と弾性領域強度の関係

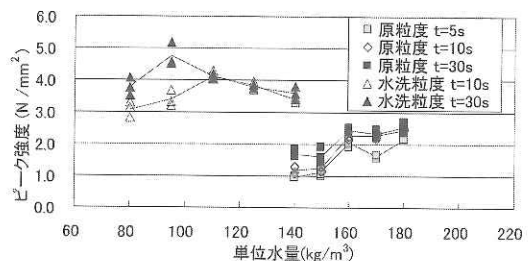


図-6 単位水量とピーク強度の関係

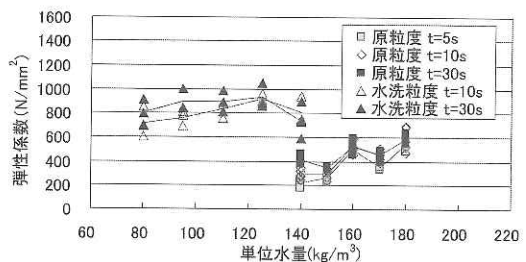


図-7 単位水量と弾性係数（変位計）の関係

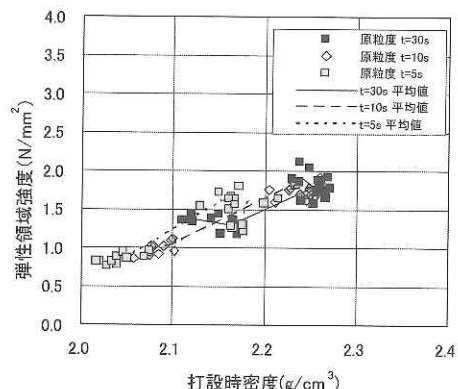


図-8 原粒度試料の打設時密度と弾性領域強度の関係

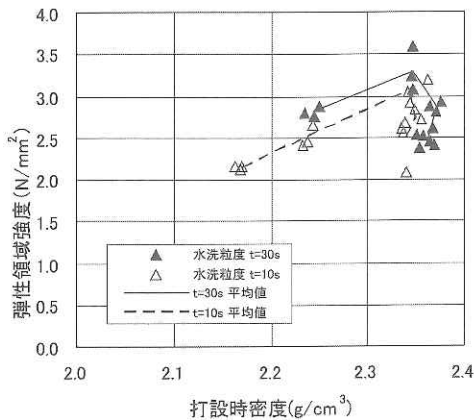


図-9 水洗試料の打設時密度と弾性領域強度の関係

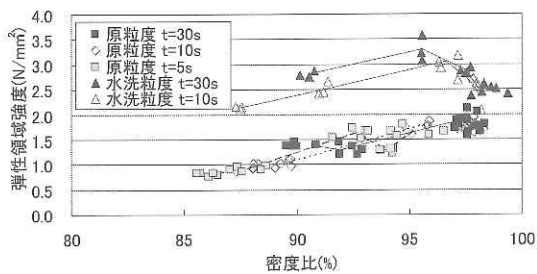


図-10 密度比と弾性領域強度の関係

量の増加、つまり水セメント比の増加に伴って強度が減少する。一方、原粒度試料を用いたCSGでは、前述したように、細粒分が多いとセメントの均一な混合が阻害されることもあり⁵⁾、空隙をベーストが満たしたとしても、水セメントによる強度への影響が明瞭には現れてこないことが考えられる。

3. 母材の微粒分の質の影響²⁾

3.1 使用材料および試験方法

本章では、微粒分含有率とその性質がCSGの強度に与える影響を検討する。そのため、碎石を粗粒材料として、これと珪砂、碎石と粘土を混合したものを細粒材料としたモデルCSG母材を作製し、その母材を用いて作製した供試体による一軸圧縮試験を実施し、その強度と変形性を測定した。

使用材料とその物性値を表-5に示す。ここで粗粒材料として採用した砂岩碎石は微粒分の質が強度に与える影響を明確にするため、堅固なコンクリート骨材を用いた。全母材量に対する細粒材料(5mm以下粒径の材料)の割合を前述したAダムの平均値程度である40%とした。モデル化した母材の粒度を図-11に示す。試験に供したモデ

表-5 使用材料および基本物性値

使用材料	種類および物性
セメント	普通ポルトランドセメント
混和材	無し
砂岩碎石	80～40mm (表乾密度2.68g/cm³、吸水率0.26%) 40～20mm (表乾密度2.68g/cm³、吸水率0.33%) 20～10mm (表乾密度2.68g/cm³、吸水率0.44%)
モデル母材	10～05mm (表乾密度2.68g/cm³、吸水率0.76%) 砂岩細砂5mm以下 (表乾密度2.53g/cm³、吸水率1.48%) 珪砂(塑性指数NP)(土粒子密度2.66g/cm³、吸水率0.18%) 藤の森粘土(塑性指数31.0)(土粒子密度2.68g/cm³、吸水率19.18%)

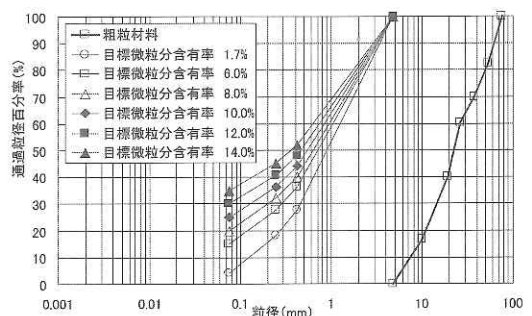


図-11 モデル試料の粒度分布

表-6 細粒材料の混合比率(乾燥質量比)

材 料	微粒分含有率	細 砂	珪 砂	粘 土
碎 砂	1.7%	100%	—	—
碎砂 + 珪砂	6.0%	89%	11%	—
	8.0%	83%	17%	—
	10.0%	78%	22%	—
	12.0%	73%	27%	—
	14.0%	68%	32%	—
碎砂 + 粘土	6.0%	88%	—	12%
	8.0%	82%	—	18%
	10.0%	77%	—	23%
	12.0%	71%	—	29%
	14.0%	66%	—	34%

ル母材の粒度は砂岩碎石を用いてモデル化した粗粒材料(80mm-5mm)を全母材料の60%定量とし、砂岩碎砂、砂岩碎砂+珪砂、砂岩碎砂+粘土を混合し作製した細粒材料を80mm以下粒度中の微粒分含有率が1.7、6.0、8.0、10.0、12.0、14.0となるように配合した。なお、単位セメント量は前章と同様80kg/m³とした。

表-6に試験に使用した細粒材料の乾燥質量比率を示す。試験方法は、前章と同様の方法とし、

表-7 配合条件

粒 度	砕 砂	砕砂+珪砂	砕砂+粘土	
微粒分含有率 (%)	1.7	6, 8, 10, 12, 14	6, 8, 10	12, 14
s/a (%)	40			
単位水量 (kg/m ³)	110		130	150
供試体本数 (本)	3			
試験時材齢 (日)	28			
一層あたりの 締固め時間 (s)	10, 30			

表-7に示す配合条件について試験を実施した。

3.2 配合条件

表-7に配合条件を示す。試験で用いた単位水量は予備試験として締固め試験を実施し、締固め密度が最大となる単位水量を採用した。

3.3 一軸圧縮強度および静弾性係数

締固め時間30秒の供試体の一部で締固めの際に供試体作製用のモールドの脇よりペースト分が漏れ出し、供試体中の材料の粒度が変化した。そのためここでは、締固め時間10秒の結果について記述する。

図-12に微粒分含有率と密度の関係を示す。最も密度が高くなるのは砕砂+珪砂においては、微粒分含有率8%程度、砕砂+粘土においては6%程度となっている。一方、図-13に示す微粒分含有率と密度比の関係からも、砕砂+珪砂においては、微粒分含有率8%程度、砕砂+粘土においては6%程度において最も密度比が高くなっており、締固めに適した粒度となるのは、砕砂+珪砂においては、微粒分含有率8%程度、砕砂+粘土においては6%程度と考えられる。

図-14に微粒分含有率と各配合の弾性領域強度の関係を、図-15に微粒分含有率とピーク強度の関係を示す。いずれの強度についても、砕砂+珪砂の配合では微粒分含有率12%で最も大きな強度を発現しており、砕砂+粘土の配合では8%で最も大きな強度を発現した。両者を比べると同一の微粒分含有率の場合、砕砂+珪砂の配合において強度が高く発現している。また、砕砂+珪砂の配合において微粒分が増加するに従い強度増加する傾向にあり、微粒分含有率12%程度で頭打ちになっている。砕砂+粘土の配合では微粒分含有率6~8%を境に微粒分が増加すると強度が落ちる傾向が見られる。

しかし、図-13と図-14を比較すると砕砂+粘土の配合では微粒分含有率8%以上の配合におい

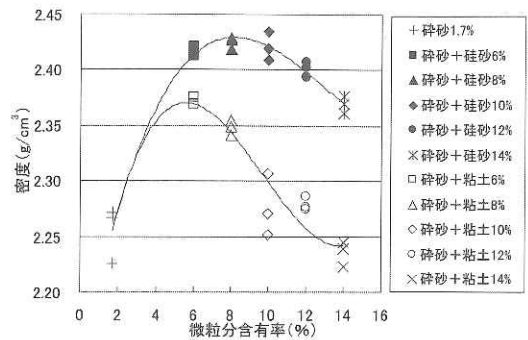


図-12 微粒分含有率と密度の関係

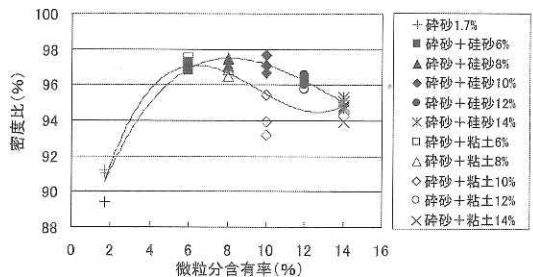


図-13 微粒分含有率と密度比の関係

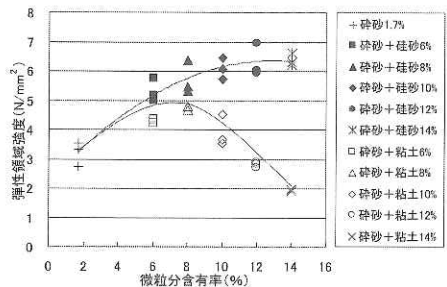


図-14 微粒分含有率と弾性領域強度の関係

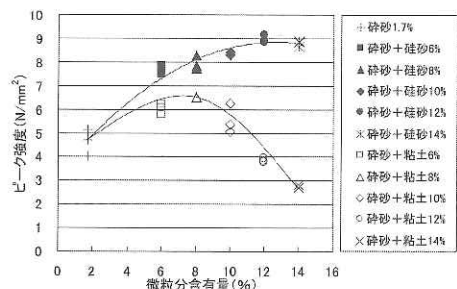


図-15 微粒分含有率とピーク強度の関係

て、密度が最大となる微粒分含有率を超えて密度が減少してくると強度も落ちてくるのに対し、砕砂+珪砂の配合では、密度が最大となる微粒分含有率8%よりも微粒分含有率が多くなっても強度

が伸びる傾向が現れている。密度減少の状況から、微粒分含有率8%以上の供試体では十分なペーストが含有されていることが予想されるので、この強度分布の傾向はマトリックス部分の強度に起因していると考えられる。

4. まとめ

2章の母材の微粒分含有量の影響についての検討および3章の母材の微粒分の質の影響についての検討より、以下の結果を得た。

- ①微粒分を多量に含むCSG母材を用いたCSGは、水洗いによる微粒分除去により、単位水量の減少を図ることができ、弾性領域強度の最大値を上昇させることができる。
- ②微粒分を多く含むCSG母材を用いたCSGは、単位水量が圧縮強度に与える影響が小さい。一方、水洗いにより微粒分を除去した材料によるCSGでは、単位水量が圧縮強度に与える影響が大きい。
- ③微粒分の影響を分析するにあたり、最も極端な水洗いにより微粒分を完全に除去した材料によるCSGでは、密度が最大となる単位水量以下の単位水量の領域では、単位水量の増加とともに強度が増加する。一方、それ以上の単位水量の領域では、単位水量の増加とともに圧縮強度が減少する。
- ④微粒分の質に関係なくCSGの母材中に6~8%程度の微粒分が含まれることによりCSGの圧縮強度が上昇する。
- ⑤CSG母材中に粘性を持つ微粒分が多量に混入する場合、圧縮強度が低下する傾向がある。また、粘性を持つ微粒分の量の変化が大きい場合、配合に適する単位水量が大幅に変化する。

- ⑥粘性の無い良質な微粒分を含む母材では微粒分含有率がかなり大きい範囲まで一定の単位水量で安定した圧縮強度を期待できる。

CSGに関しては、母材の微粒分を除去するような粒度調整は実施しない。そのため、母材に含有される微粒分の量や質が、CSGの強度に与える影響については、各ダム設計において細心の注意を払う必要がある。このような主旨から、本研究ではその基礎的な実験を実施した。今後は、建設が予定されている各台形CSGダムの母材の微粒分の特徴を踏まえつつ、本研究を発展させていく必要があると考えている。本研究の成果は、その際の重要な基礎資料になるものと考えている。

参考文献

- 1) CSGダム研究会：CSG材料を用いたダムの解析と設計法の提案、ダム技術, No.166, pp.27-52, 2000
- 2) 山口嘉一、佐々木隆、中村洋祐：強度が不均一な堤体材料の設計法と品質管理法に関する研究：土木研究所成果報告書【平成17年度】、pp.865-880, 2006
- 3) 藤沢侃彦：台形CSGダムの発展、ダム技術, No.216, pp.3-24, 2004
- 4) 台形CSGダム技術資料作成委員会：台形CSGダム技術資料, 157p, 2003
- 5) 川崎秀明、平山大輔、中村 昭、金銅将史、佐藤耕治：現地発生材を用いたCSGによる減水混合試験、ダム技術, No.216, pp.35-42, 2004

中村洋祐*



国土交通省北海道開発局帯広開発建設部帯広河川事務所開発専門職(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員)
Yousuke NAKAMURA

佐々木晋**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員
Susumu SASAKI

佐々木隆***



国土交通省東北地方整備局胆沢工事事務所長(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム総括主任研究員)
Takashi SASAKI

山口嘉一****



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム上席研究員, 工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI