

◆ リサイクル特集 ◆

掘削残土、河床堆積物を用いた CSG 構造物

豊田光雄* 有銘伸予** 今井裕一***

1. はじめに

CSG(Cemented Sand and Gravel)¹⁾ は、フィルダム建設現場などで発生する廃棄材料に手を加えず、少量のセメントを添加混合して用いる改良盛立材料である。筆者らは現在、設計・施工法について調査研究を行っている。この方法が確立されればリサイクル、ひいては環境保全およびコスト削減に大いに貢献できる。ちなみに、筆者らは劣悪な土にセメントを混合して良質な土を製造するソイルセメントと CSG は異なると考えている。

本工法は、1992 年、長島ダム仮締切堤の築造にあたって、初めて仮設構造物に採用され、近年、砂防ダムなどへの利用が増加している。これまでに築造された CSG 構造物は、最長で 7 年経過しているが、現在のところ、なんら変状をきたすことなく所期の目的を達成している。

本報文は、これまでダムの仮設構造物として築造してきた CSG 構造物について、CSG の主な工学特性のひとつであるせん断強度と施工法および経時変化などについて述べるものである。

2. CSG 工法とは

CSG 工法は次のような特徴を有している。

- 1) 現地発生材(母材)の有効利用ができる。

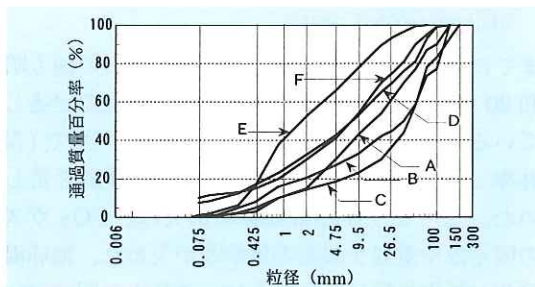


図-1 CSG に用いられる母材の平均粒度

2) セメントを添加することにより、通常の土質材料に比べ材料の強度を増加させることができるため、コンパクトな断面設計が可能である。

3) セメントを添加する以外は、通常の土質材料の施工法と変わらず、降雨時の盛立規制が緩和される可能性があり工期の短縮ができる。

これまでに、表-1 に示すように仮締切堤などの仮設構造物へ採用されている。以降、略称で呼ぶことにする。図-1 に仮設構造物に用いた母材の粒度分布を示す。A,B,C,E の構造物の母材である河床堆積物は細粒分を含有しないが、D,F 構造物の母材である掘削残土は十数パーセントの細粒分を含有している。しかしながら、永久構造物としての設計手法に関しては、強度のとり方、長期的安定性の評価などいくつかの課題が残されている。

表-1 CSG 工法による構造物の実績

構造物の名称	略称	竣工年	堤高 (m)	堤頂長 (m)	堤体積 (m ³)	母材	施工 含水比	添加セメ ント量 (kg/m ³)	混合法
長島ダム二次仮締切堤	A	1992	14.9	86.5	30,000	河床堆積物 砂礫 A	Ga=2.6 Q=1.0% Wn=5~7%	80	スケルトン
忠別ダム一次仮締切堤	B	1994	4.0	60.0	2,500	河床堆積物 砂礫 B	Ga=2.5 Q=1.0% Wn=5~8%	60	スケルトン
久婦須川ダム二次仮締切堤	C	1994	12.0	87.5	13,650	河床堆積物 砂礫 C	Ga=2.6 Q=0.9% Wn=4~7%	60	簡易 プラント
摺上川ダム転流工擁壁堤	D	1996	21.0	120.0	14,500	掘削残土 凝灰岩	Ga=2.4 Q=10% Wn=15~18%	60	スケルトン
徳山ダム上流護岸 ²⁾	E	1998	7.0	446.0	15,000	河床堆積物 砂礫	Ga=2.6 Q=1.8% Wn=5~9%	60	スケルトン
川辺川ダム二次締切堤	F	計画中	15.0	80.0	43,000	掘削残土 粘板岩	Ga=2.6 Q=1~3% Wn=7~14%	60	簡易 プラント

Ga: 表乾比重 Q: 吸水率 Wn: 自然含水比 スケルトン: スケルトンバケット付きバックホウ

3. CSG の工学的性質

3.1 セン断強度

CSG の工学的性質の主なものとして、密度、せん断強度、変形性があげられる。密度は、セメントの添加量が比較的小さいため母材の粒度分布と含水比によって決まる。CSG の施工密度は、ほとんど自然含水比または、最適含水比のときの密度である。せん断強度はセメンテーションの効果により、粘着力がかなり大きくなる。これがフィル材料のような粗粒材料と大きく異なっている。盛土構造物の設計はせん断強度が重要であるため、ここではせん断強度の性質にだけ触れる。

図-2³⁾は、三軸圧縮試験から得られる応力-ひずみ関係を母材(砂礫、単位セメント量 $C=0\text{kg/m}^3$)、 $C=10\sim 100\text{kg/m}^3$ で比較したものである。母材の場合、あるひずみ以降で応力はほぼ一定値を示すが、セメントを添加することによってピークが明瞭な応力-ひずみ関係となる。ピークに達するまでの挙動は単位セメント量が多いほど弾性的な性質を示す。これに対して単位セメント量が多くなりすぎれば、塑性的な性質が残り、粗粒材料の性質に近くなる。なお図示はしていないが、単位セメント量 60kg/m^3 においてくり返し載荷を行った結果によれば塑性ひずみの累積を生じており、塑性体として評価できると考えられる³⁾。すなわち、セメント添加量 (60kg/m^3 程度) においては塑性的な性質を示しており粗粒材料と同様なせん断強度による評価を行える。

図-3、図-4 は側圧 $49\sim 196\text{kN/m}^2$ の試験範囲から求めたせん断強度を粘着力 c と内部摩擦角 ϕ 成分に分けて示したものである。横軸は、室内で作成した供試体の試験値で、縦軸は原位置コアを用いた試験値である。原位置コアは、コンクリート

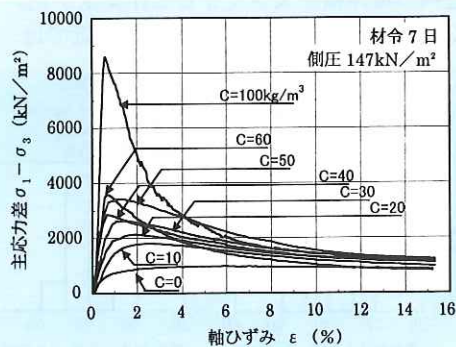


図-2 母材、単位セメント量の違いによる応力-ひずみ曲線 (砂礫 A)

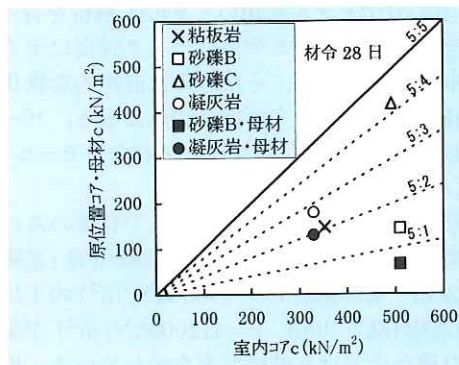


図-3 原位置コアと室内 CSG の粘着力の比較

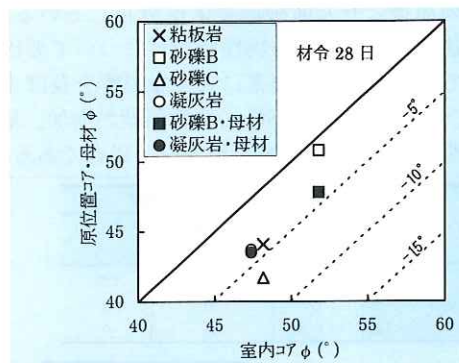


図-4 原位置コアと室内 CSG の内部摩擦角の比較

より固結度が低いために気泡式ボーリングによって転圧面より切り出した。両試験とも材令 28 日である。図中には母材の見掛けの粘着力および内部摩擦角もプロット (■, ●) している。原位置の c は、室内の c の約 3~8 割の範囲に分布している。原位置コアの ϕ は、室内比で最大約 7 度低下しているが 40 度以上の値を保持している。この要因には、セメントの混合状態、締固め方法の違いなどが影響していると考えられる。

3.2 設計法の一例

これまで築造されてきた CSG 構造物は、さきほど述べたように粘着力を有する盛土材料として、試験値から割引いた設計値を用いて、フィルダム材料と同様のすべり安定解析により安定性の評価を行っている。

図-5(D 構造物)⁴⁾ に転流工に用いた CSG 構造物の設計値と最小安全率のすべり円弧を示す。この事例では堤体に加わる外荷重として水圧、地震力 (ゾーン型フィルダムの設計震度の 50%) を与えて計算しており、最小すべり面は CSG の底面に接して背面ロック部を横切っており、CSG 自体はより高い安定性が確保されている。

一方、CSG 構造物の内部応力を検討するため、

図-6 に示す力学モデルを用いて FEM 解析を行った事例を述べる。力学モデルはピーク強度に至るまでは単純な線形とし、それ以降は直線的な軟化過程を経て、強度が一定の完全塑性に至る。ピーク強度および残留強度は拘束圧に依存し、モール・クーロンの破壊基準を適用する。

2 次元平面ひずみ、一括载荷方式で自重のみの計算結果の一例⁵⁾を図-7 に示す。砂礫基礎(基礎の厚さ 20m、変形係数 $E=147000\text{kN/m}^2$)の上に CSG 構造物(高さ 30m、 $E=412000\text{kN/m}^2$)が築造された場合における破壊要素を示している。堤体中央の基礎との境界付近に引張破壊要素が発生し、その周辺にせん断破壊要素が分布している。形状、基礎および堤体の物性値などについて要因分析してみると、破壊要素に大きな影響を及ぼす要因は、堤高の増加、CSG の弾性係数の増加、基礎の弾性係数の減少、基礎地盤が厚い場合である。

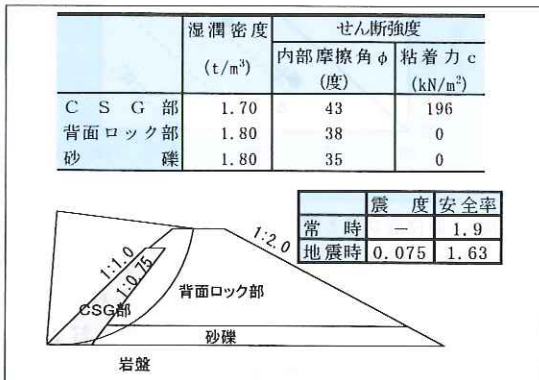


図-5 円弧すべりによる安定計算

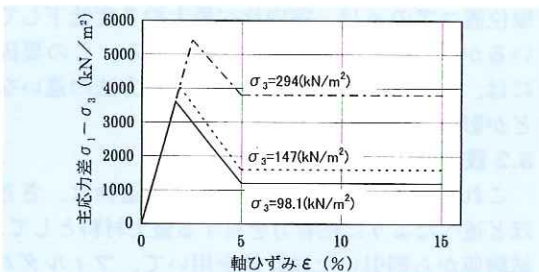


図-6 応力ひずみ関係のモデル化

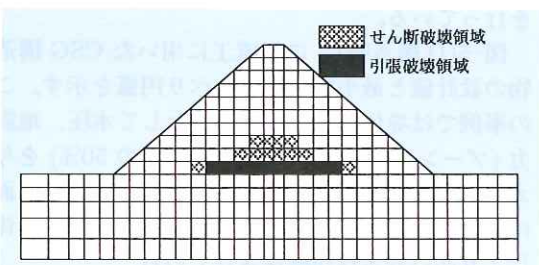


図-7 破壊領域図

なお、外荷重を与えた場合では、結果は若干異なると考えられるが、CSG 構造物においては破壊要素が生じないようにするか、あるいは、極力小さくなる設計を行うことが重要であるといえる。

4. 施工

4.1.1 施工フロー

これまでに築造された CSG の施工フローの一例を図-8 に示す。各工法の詳細は次項で述べていくが CSG の母材を 150mm 以上の粒径を除いて、セメントを添加混合する以外は通常の土質材料の施工とほとんど同じである。



図-8 施工フローの一例

4.1.2 混合法

CSG の現地混合は、主に、スケルトンバケット付きバックホウ(以降、スケルトンという)を用いて行われている。しかし、オペレータの技量により混合状態の良し悪しに左右されることや、CSG 構造物の堤体積が大きくなると作業量が追いつかなくなるなどの問題を有している。最近では、簡易

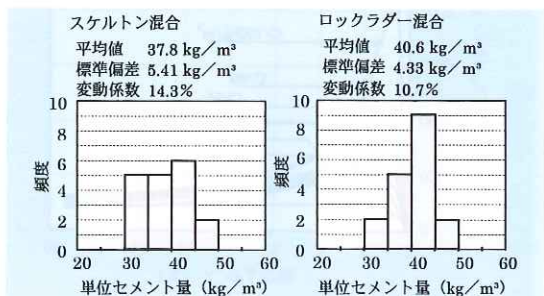


図-9 混合法の違いによる単位セメント量の比較 (F 構造物の CSG)

プラントとして採石運搬に用いられるロックラダーに着目した混合プラントもある。図-9は、母材が掘削残土であるCSGにおいて単位セメント量 $40\text{kg}/\text{m}^3$ を目標にしたときの混合後の単位セメント量のばらつきを比較したものである⁶⁾。両混合方法とも約 100m^3 のCSGを対象とし混合後に18試料のサンプリングを行った。単位セメント量の測定は中和滴定試験によっている。ロックラダー混合は、スケルトン混合より目標値を中心にかたよりの少ないCSGを製造することができる。なお、ロックラダーの呑口の大きさとベルトコンベアの運搬スピードによりCSGの製造量が決まるため、大量製造ではロックラダーはかなり経済的と考えられる。

4.1.3 転圧

CSG構造物は、ブルドーザによってCSGをまき出し、振動ローラで締固めて築造する。これまでのいくつかの現場転圧試験によって、1回当たりのまき出し厚さを約25cmとし、2回まき出しごとに転圧することが好ましいという結果を得ている³⁾。図-10⁷⁾に、転圧面より気泡式ボーリングによって採取したコアのスケッチとそのコアをラジオアイソトープ(RI)法によって測定した転圧層内部の密度分布を示す。母材が粘板岩で細粒分を含む場合である。転圧層の上部で密度が大きく、下部が小さいという結果を示している。この傾向は、粗粒材料(フィルダムのロックおよびフィルタ材料)を締固めて得られる密度分布とほぼ同様の傾向を示している。なお、転圧厚さを50cmから40cmに薄くした場合においても転圧層の上部と下部で密度差を生じている。

4.1.4 品質管理

CSGの重要な施工管理項目は、表-2に示すように母材の粒度、単位セメント量および現場密度

表-2 品質管理試験項目

施工種別	試験項目
材料採取	粒度、含水比
混合	セメント量(中和滴定法)、一軸圧縮試験
盛立	密度、含水比(RI密度測定)

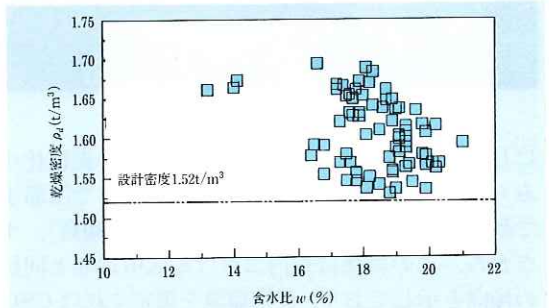


図-11 D 構造物の現場密度

などである。なお、設計に必要なせん断強度の確認は、現場における簡便な測定法がないことや、せん断強度が締固め密度に依存していることから、現場密度によって評価している。

図-11⁴⁾に、D構造物の盛立中に得られた現場密度の品質管理データを示す。これらの値はRI法によって測定している。含水比と乾燥密度の分布範囲が広く、密度の最大、最小値の差は約10%である。すなわち、設計密度はこえているものの施工密度の幅があることを示している。

5. 耐久性および越流抵抗性

5.1 耐久性

CSGは、通常のコンクリートに比べ緻密でないため、耐久性については劣ると考えられている。図-12⁸⁾に、CSG供試体の凍結融解試験を2個づつ行なった結果を示す。供試体を水中に置くと、数サイクルで供試体は破壊するが、供試体に水の供給がなければ供試体の破壊は進まないことを示している。一方、下流法面においてCSGをむき出し

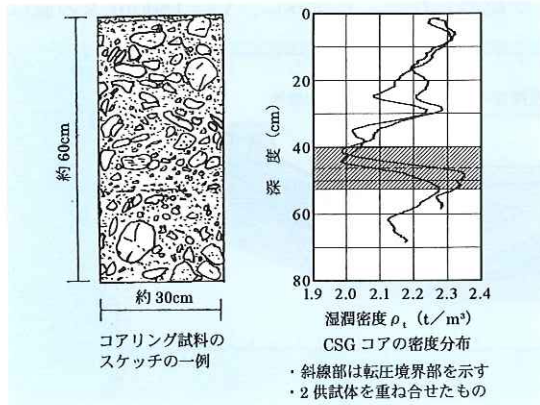


図-10 転圧面より取り出したコアの密度分布図 (F構造物の盛立試験場より採取)

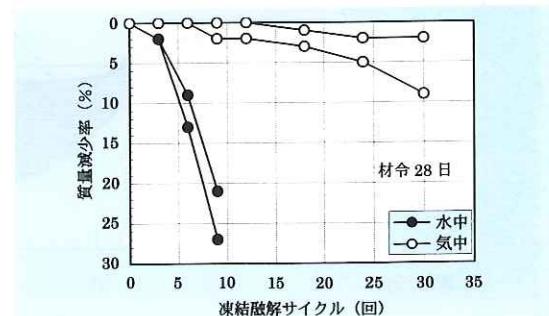


図-12 凍結融解試験における質量減少率 (F構造物のCSG)



写真-1 越流状況 (C 構造物)

にした C 構造物においては、表層部分の細粒化がみられるものの、その部分は約 1~2cm で深部まで到達していない (築造後 5 年経過後の観察)。すなわち、この結果は室内における気中試験と同様の傾向を示しており、使用環境を限定すれば CSG の耐久性に問題はないといえる。ちなみに、細粒化している部分では以降に述べる植生がみられる。

5.2 越流抵抗性

仮締切堤に用いた C 構造物の越流状況を写真-1 に示す。最大流量 $170\text{m}^3/\text{s}$ で約 5 時間、CSG 部の天端を越流した。越流後の浸食をうけた部分は、下流法面の転圧層の境界部で筋状にみられた。その最大洗掘深さは 20 数 cm であった。それ以外のところでは細粒分が洗い流されただけで損傷はなかった。このことは、当構造物で築造前に圧力水 (最大 $294\text{kN}/\text{m}^2$) を用いた洗掘試験において、細粒分や浮いた岩石が洗い流された後には破壊が進行しないという結果³⁾と同じであった。すなわち、CSG 構造物は通常の土構造物に比べ十分な越流抵抗性を有していると考えられる。また、E 構造物では護岸として施工されているが、最大流量 $866\text{m}^3/\text{s}$ をうけても法面における転圧境界層の部分的な浸食のみで、十分な越流抵抗性を有していることが確認されている²⁾。

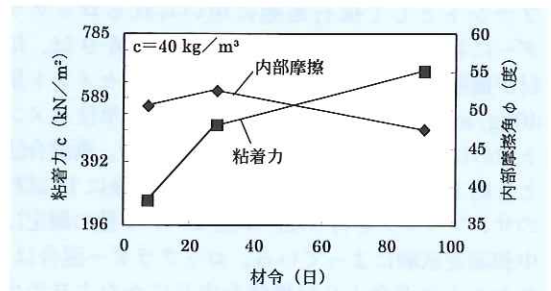


図-13 材令と粘着力、内部摩擦角の関係 (D 構造物の CSG)

6. 築造後の構造物の変化

6.1 経時変化

CSG は、材令の増加によりせん断強度などが増加することがわかっている。

図-13 は⁴⁾、室内試験における材令と粘着力 c および内部摩擦角 φ の関係である。c の増加が著しく、長期的安定性にも優れていると考えられる。しかし、現場においてはセメントの混合状態にばらつきが生じるため検証する必要がある。

図-14 は⁹⁾、築造後 4 年経過した C 構造物で得られた S 波速度 V_s の分布である。図中には、表面波を利用して求めた V_s の分布に弾性波探査より求めた V_s の分布を重ね合わせて示している。弾性波探査によれば、表層から約 1m 付近を境界とし、浅いところでは $V_s=800\text{m}/\text{s}$ 以下でそれより深いところでは $V_s=1800\text{m}/\text{s}$ 以上となっている。表面波による V_s でもほぼ同様の値が得られているが、必ずしも構造物下部になるに従い大きな値とはなっていない。この構造物においては、盛立直後の値を測定していないが、同様の河床砂礫を用いた CSG 構造物の築造直後の V_s は約 $800\text{m}/\text{s}$ を示し、これからみると約 2 倍以上の剛性の増加が認められる。ちなみに、 $V_s=1800\text{m}/\text{s}$ の値は、

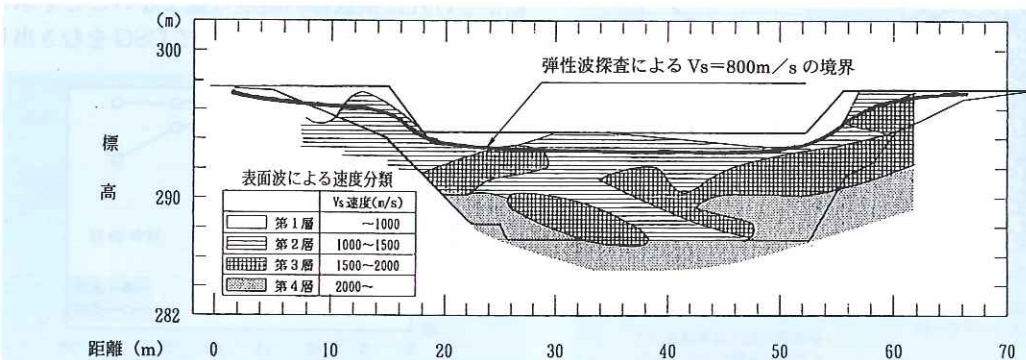


図-14 C 構造物の堤軸方向の速度分布 (弾性波探査と表面波探査による重ね合わせ)

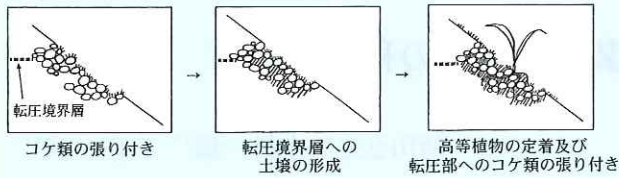


図-15 転圧境界層への植物進入推定図 (C 構造物)

一般的な軟岩の S 波速度と同程度を示している。

6.2 植生

CSG 構造物は、むき出しのままでは表層部が風化により劣化が予想されるためにそのほとんどがコンクリートなどでカバーされている。しかし、CSG 構造物において下流側がむき出しのまま築造された C 構造物がある。この構造物では下流法面の表層部がやや細粒化し、コケ、草などの植生が確認されている¹⁰⁾。

植生は堤体下流法面の右岸部と堤体中央下部の転圧境界層部に多く見られた。この部分にはコケ類が厚く張りついており、高等植物が進入し、その根茎が土壌を抱き込むように盛り上がる状態となっている。図-15 は、転圧境界層への植物進入の過程を推定したものである。また、ススキなどの草本類やオノエヤナギなどの木本類がみられ、これらの植物は、同構造物周辺で普通にみられる植物である。なお、植生している土壌の PH 濃度は、約 8 を示し植生しないところと違いはない。すなわち、CSG 構造物はコンクリート構造物と違ってある程度の緑化を見込んだ構造物の築造が可能であることを示している。

7. おわりに

現地発生材のリサイクル技術のひとつとして CSG 構造物の主な材料特性、設計・施工法、経時変化について述べた。

CSG は、ソイルセメントに用いられる材料より

礫などを多く含み粒度分布が良いために少量のセメントで所要のせん断強度の増加が期待でき、施工法についても特殊な方法を用いず、通常の土質材料と同様な扱いで築造が可能である。また、経時変化においても劣化するというよりも安定性が増すと考えられる。また、むき出しになったところは、細粒化するが、これが植生させる要因となり、周囲の環境とマッチする構造物となる。

しかしながら、構造物設計法においては強度評価とその設計手法にまだ課題が残されているので、今後、さらに研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 例えば藤沢侃彦ほか 4 名：CSG の材料試験および施工、ダム技術 No.83, pp41~51, 1993.8.
- 2) 薬師寺公文ほか 4 名：徳山ダムにおける CSG 工法の設計・施工および品質管理手法について、ダム技術 No.155, pp19~32, 1999.8.
- 3) 中村 昭、豊田光雄、佐藤小次郎：CSG の工学的性質に関する実験的検討、ダム技術 No.96, pp35~46, 1994.9.
- 4) 渡辺秀之ほか 5 名：CSG 工法による締切堤の築造、日本応用地質学会東北支部第 5 回研究発表会講演集、pp21~26, 1997.2.
- 5) 川口昌尚ほか 3 名：軟化過程を考慮した CSG の力学的モデルと基礎解析、土木学会第 51 回年次学術講演会概要集 pp718~719, 1996.9.
- 6) 山本重樹、豊田光雄：CSG の現地混合に関する検討、土木学会第 54 回年次学術講演会概要集 pp672~673, 1999.9.
- 7) 豊田光雄、楠 貞則：CSG の転圧厚さと転圧層内の密度分布、土木学会第 54 回年次学術講演会概要集 pp674~675, 1999.9.
- 8) 楠 貞則、豊田光雄：CSG の耐凍害性評価、第 26 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 pp510~511, 1999.3.
- 9) 豊田光雄、楠 貞則、山本重樹：CSG 構造物の弾性波探査などによる変形特性、平成 10 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集 pp345~346, 1999.
- 10) 豊田光雄、山内可奈子、篠 文明：CSG 構造物の植生に関する一考察、土木学会第 54 回年次学術講演会概要集 pp446~447, 1999.9.

豊田光雄*



建設省土木研究所ダム部
フィルダム研究室
主任研究員
Mitsuo TOYODA

有銘伸予**



同 フィルダム研究室
Nobuyo ARUME

今井裕一***



同 フィルダム研究室
交流研究員
Yuichi IMAI