

### Ⅲ-14 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

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 15～平 17

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口 嘉一、佐々木 隆、  
中村 洋祐

#### 【要旨】

本研究では、コンクリートに比較して品質のばらつきが極めて大きいという特徴を有している CSG について、配合設計法と品質管理法を提案するために「材料特性の異なる CSG の物理性状の把握」、「CSG の配合強度に関する確率・統計的な検討」について検討を行った。

「材料特性の異なる CSG の物理性状の把握」では、CSG 母材の粒度の変化や微粒分の性質を変化させた際の CSG の室内試験を実施し、材料の特性に合わせた配合設計を行うことにより、より合理的な CSG の配合設計や品質管理が可能であることがわかった。「CSG の配合強度に関する確率・統計的な検討」では、統計確率学的な概念を用いて CSG 母材の粒度の変動、CSG 中の単位水量の変動と材料安全係数の関係を求め、CSG 母材の粒度と単位水量のばらつきと CSG の材料安全率の関係について検討し強度が安定して低い材料よりも、平均値が高強度でばらつきが生じる材料の方が材料安全率が高いことがわかった。これら検討から得られた結果を受けて、合理的な CSG の配合設計および品質管理を行うための方法を提案した。

キーワード：ダム、CSG、微粒分、強度、変形性、確率統計学

#### 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。

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。このため、コンクリートに対して用いてきた従来の手法に代わって、品質の変動が大きい材料である CSG の配合設計法、品質管理法の確立が求められている。

本研究においては、ダムの構造的安定性を評価するために必要な CSG の配合設計法と品質管理法を提案するために、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た CSG 特性に関する室内実験的な検討、および確率・統計的手法による配合強度の検討を行っ

た。

#### 2. 現場材料を用いた CSG の物性の把握

##### 2.1 試験目的

台形 CSG ダムの堤体設計に用いる CSG の強度は一軸圧縮試験における弾性領域内での最大応力を採用しており、この強度を弾性領域強度としている。これまで、台形 CSG ダムについては、ダムの上流仮締切として実績を積み重ねるとともに、本設のダムとしての設計、試験施工が進められてきている<sup>1-4)</sup>。しかし、各サイトにおいて CSG の母材の特性が大きく異なるとともに、個々のサイトにおいても、粒度、密度、吸水率などの品質の変動の大きい低品質材料を用いることにより、材料強度のばらつきが大きくなるが、その詳細なメカニズムについては未知な部分も多い。しかし、各サイトの CSG の発現強度と CSG 母材の物性の関係に着目すると、CSG の母材の粒度、さらにその中でも粒径 0.075mm 以下の微粒分の含有率の強度に与える影響が大きいと推察される。

本章における試験では2種類の台形 CSG ダムサイトの CSG 母材を使用し、CSG 供試体に対する一軸圧縮試験を実施し、全体的な粒度構成や粒径 0.075mm 以下微粒分含有率が CSG の物性に与える影響について分析した。

## 2.2 全体的な粒度構成と CSG 物性

### 2.2.1 使用材料および試験方法

全体的な粒度構成と CSG の物性の対応を確認するため、A ダムの現場材料を用いて作製したφ150mm×H300mm の CSG 標準供試体に対して一軸圧縮試験を行い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-2.2.1 に示す。A ダム材料の安山岩河床砂礫は 5mm 以下の粒径の材料の中に少量の軽石状の粒子を含むが、粗粒な材料は強いハンマー打撃でもほとんど破碎しない堅固な岩片である。ここでは、A ダムの設計粒度範囲を考慮し、その範囲よりも粗粒側および細粒側の粒度も含め、図-2.2.1、表-2.2.2 に示す 4 つの粒度の試料を作製した。なお、図中の粒度 3 は、A ダムの設計平均粒度にほぼ一致する。

一軸圧縮試験の CSG 供試体は、図-2.2.2 の手順で表-2.2.3 のケースについて作製した。

一軸圧縮試験では図-2.2.3 に示すように試験器の厚盤間変位をひずみゲージ式変位計により計測することで、静弾性係数を算定した。

表-2.2.1 使用材料及び基本物性値

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 A	安山岩河床砂礫 80-40mm (表乾密度 2.52g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 3.6%) 40-20mm (表乾密度 2.41g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 6.5%) 20-10mm (表乾密度 2.41g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 6.7%) 10-05mm (表乾密度 2.39g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 7.4%) 5mm 以下 (表乾密度 2.49g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 4.25%)

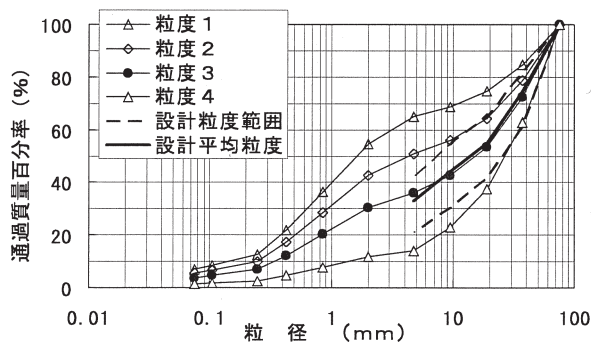


図-2.2.1 A ダム材料を用いた試料の粒度分布

表-2.2.2 試料の粒度諸元

粒度	粒度 1	粒度 2	粒度 3	粒度 4
s/a (%)	62.7	47.0	30.5	15.6
微粒分含有率 (%)	8	6	4	2

表-2.2.3 試験ケース

粒度	粒度 1	粒度 2	粒度 3	粒度 4
1層あたり 締固め時間 (s)	10, 30	10, 30	10, 30	10, 30
単位水量 ケース数	5	5	5	5
供試体数 (本)	3	3	3	3

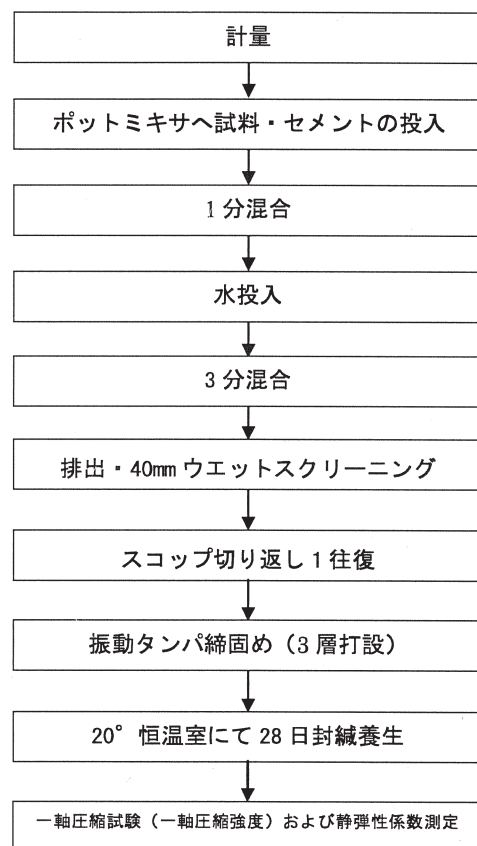


図-2.2.2 試験手順フロー

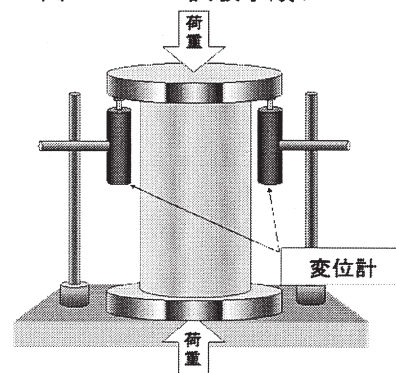


図-2.2.3 静弾性係数の測定方法

### 2.2.2 配合条件

本試験では、使用する材料の粒度の分布範囲が比較的広いこと、セメント量を  $80\text{kg/m}^3$  と固定し、表-2.2.4 に示すように各粒度において個別に単位水量を設定し、供試体を作製した。その際、各粒度の最大の単位水量は、CSG については密度と強度の相関が比較的高いことが既知である<sup>4)</sup> ため、密度が概ね最大となる状態、施工性を考慮し 10 秒締固め時に振動タンパの脇からペーストが漏れ出す状態が確認出来る程度、ミキサ混合後の排出が困難とならない程度までを目安とした。比較的粗粒な材料を用いた粒度 4 ではペーストが比較的少ない状態となり、供試体締固め時にペーストが表面に漏れ出すことはなかったが、材料分離を起こさないようにするため供試体表面に配合水が浮き出す程度までの単位水量とした。

図-2.2.4 に各粒度の単位水量と打設時の密度の関係を示す。また、図-2.2.5 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割返した密度比と、単位水量との関係を示した。密度の最大値は、粗粒な配合が高く、細粒な配合になると低くなる傾向にある。また、細粒な配合ほど最大密度を出すための単位水量が大きい。一方、密度比は、粒度と締固め時間にかかわらず 95% 程度の値で頭打ちになるような傾向が読みとれる。

表-2.2.4 試験に用いた単位水量の範囲

粒度	粒度 1	粒度 2	粒度 3	粒度 4
単位水量 ( $\text{kg/m}^3$ )	80~120	80~140	100~175	120~195

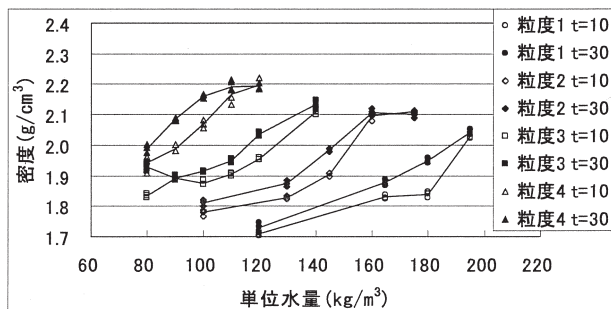


図-2.2.4 単位水量と打設時の密度の関係

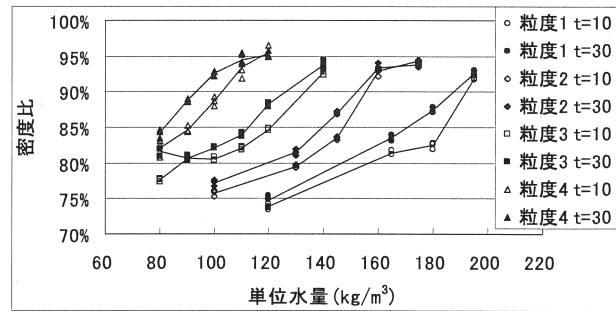


図-2.2.5 単位水量と打設時の密度比の関係

### 2.2.3 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測定について考察する。図-2.2.6 に単位水量と弾性領域強度の関係を、図-2.2.7 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を示す範囲での最大圧縮応力であり、これが台形 CSG ダムの設計で用いる基本強度となっている<sup>1)</sup>。いずれの強度についても、最大値は粗粒側の粒度の材料の方が高くなる結果となった。また、粗粒側の粒度の材料は単位水量の変化に対して強度の変化が大きく出る傾向がある。これは図-2.2.4 に示したように粗粒材料の方が小さい単位水量で高い密度が得られるため、ペースト量は少な目ではあるものの、ペーストの W/C が小さいために、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が一因と考えられる。図-2.2.8 に単位水量と弾性係数の関係を、図-2.2.9 に弾性領域強度と弾性係数の関係を示す。粒度が粗粒なものほど弾性係数が高くなる結果となった。また、粒度に関係なく弾性領域強度と弾性係数の高い相関が見られる結果であった。図-2.2.10~2.2.13 に粒度ごとの密度と弾性領域強度の関係を示す。各粒度とも密度と弾性領域強度の相関係数が 0.9 以上あり相関が高い。図-2.2.14 に W/C と弾性領域強度の関係を示す。図中の□で囲っているシンボルは締固め時の密度比が 90% 以上となった供試体である。◇で囲っているシンボルは密度比が 85-90% の範囲に入った供試体である。両者の関係を比較すると、密度比が 90% 以上のものは W/C に対して右肩下がりの傾きが大きく、密度比が 85-90% のものは傾きが小さい。図-2.2.15 に s/a と密度比 90% 以上を得るために必要な単位水量の関係を示す。s/a が大きなものほど、密度比 90% 以上を得るために多くの単位水量を必要とし

ていることが分かる。また、図-2.2.16に密度比と弾性領域強度の関係を、図-2.2.17に密度比85-90%と90%以上の2つの領域での弾性領域強度の平均値と粒度の関係を示す、密度比が90%以下の範囲ではCSGは粒度によらず密度比と強度は高い相関関係を示す。しかし、密度比が90%以上の範囲では、細粒な粒度のCSG母材を用いた粒度1、2の密度-強度の関係には大きな変化が無いが、粒度が粗粒側の粒度3、4では密度比の増加と共に弾性領域強度が大きく増加している。

#### 2.2.4 まとめ

CSG母材の全体的粒度構成がCSGの物性に与える影響について検討し、以下の結果を得た。

- ①弾性領域強度、ピーク強度とも、最大値は粗粒側の粒度の方が高い。
- ②粒度に関係なく、弾性領域強度と弾性係数の間には線形の相関関係が見られる。
- ③粒度毎に密度と弾性領域強度には線形の相関関係が見られる。しかし、粒度が異なると、密度と弾性領域強度の関係式は異なってくる。
- ④密度比が90%以下では、粒度と強度の関係に粒度の影響が小さい。しかし、粗粒側の粒度では、密度比が高い領域において強度が大幅に増加する。

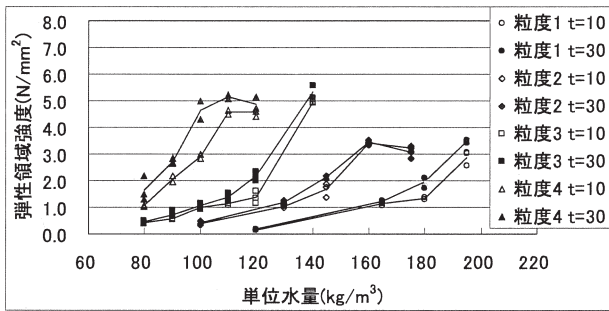


図-2.2.6 単位水量と弾性領域強度の関係

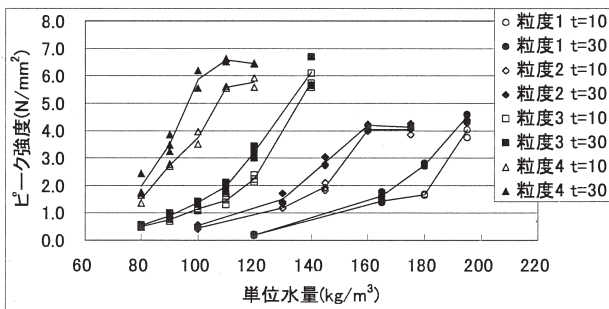


図-2.2.7 単位水量とピーク強度の関係

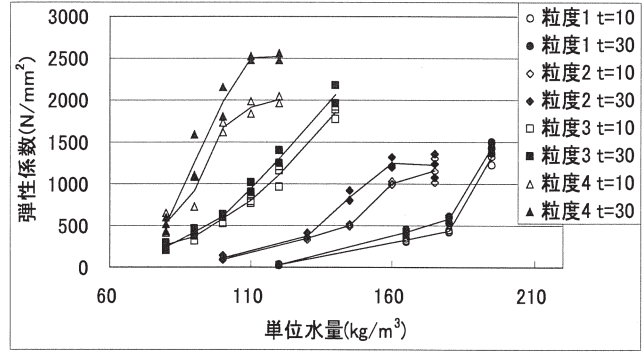


図-2.2.8 単位水量と弾性係数の関係

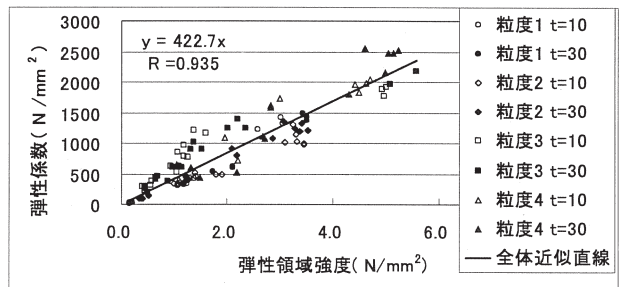


図-2.2.9 弾性領域強度と弾性係数の関係

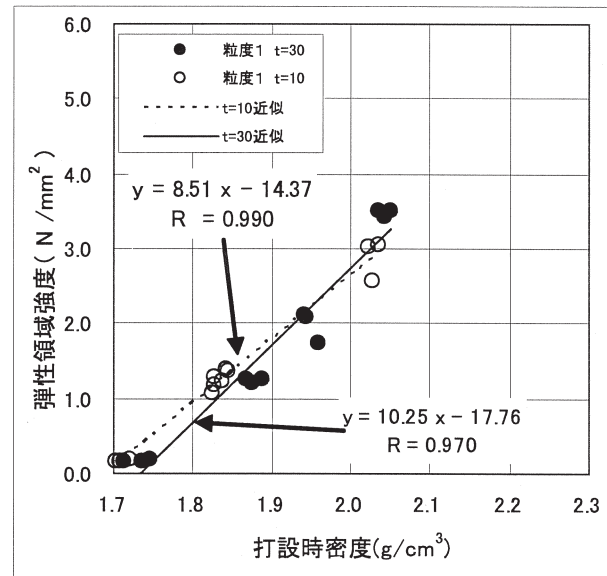


図-2.2.10 密度と弾性領域強度の関係 (粒度1)

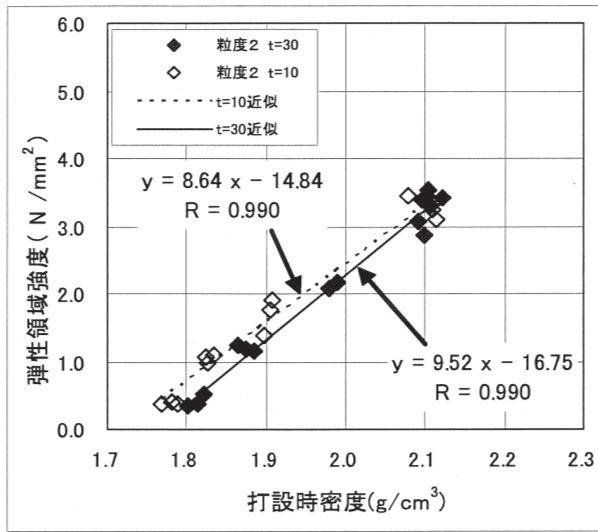


図-2.2.11 密度と弾性領域強度の関係（粒度2）

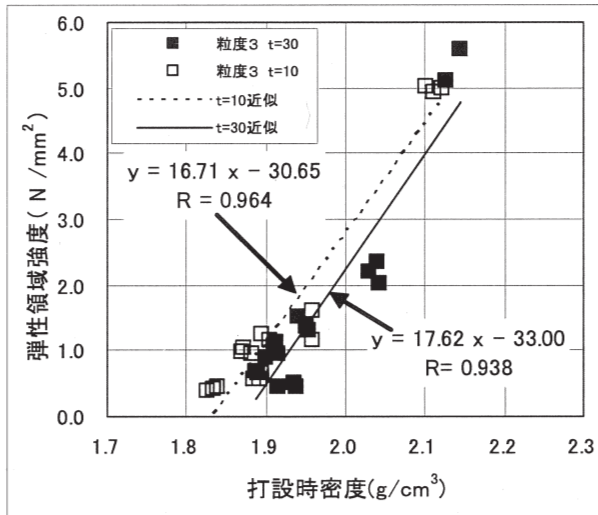


図-2.2.12 密度と弾性領域強度の関係（粒度3）

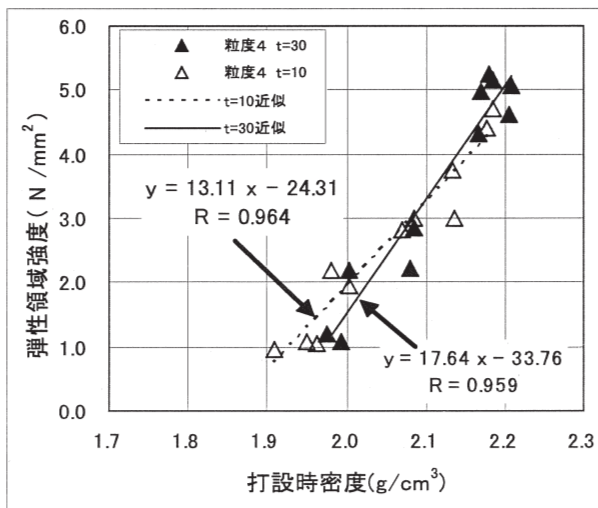


図-2.2.13 密度と弾性領域強度の関係（粒度4）

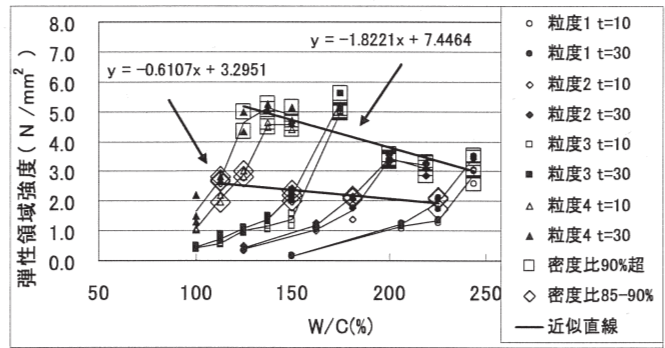


図-2.2.14 W/Cと弾性領域強度の関係

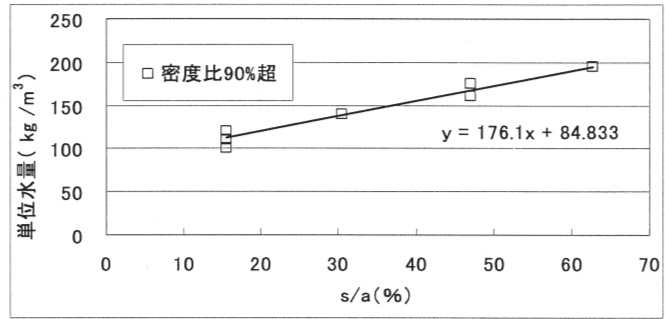


図-2.2.15 s/aと密度比90%以上を得るために必要な単位水量の関係

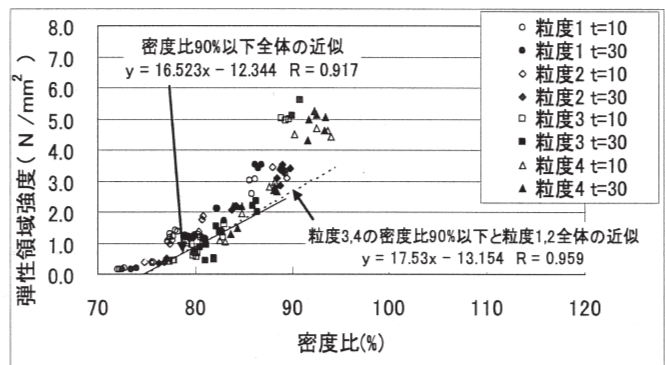


図-2.2.16 密度比と弾性領域強度の関係

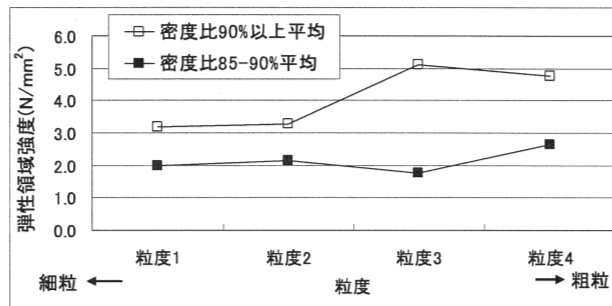


図-2.2.17 粒度の変化と強度に対する密度比の影響の変化

## 2.3 微粒分を含有するCSGの物性

### 2.3.1 使用材料および試験方法

2.2節では、CSG母材の全体的な粒度構成がCSGの物性、特に強度に与える影響について検討した。本節では、粒度のうち、粒径0.075mm以下の微粒分に焦点をあてて、それがCSG物性に与える影響について検討する。Bダム現場母材をそのまま用いた「原粒度材料」とBダム現場材料を水洗し0.075mm以下の粒径の微粒分を除去した「水洗材料」を用い、φ150mm×H300mmのCSGの標準供試体に対して一軸強度試験を実施し、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-2.3.1に示す。材料とした千枚岩は薄い層理状の構造を持ち平たい長方形の形状ものが多い。また、ハンマーによる打撃で層理沿いに岩片が剥離することがあり、Aダム材料と比較すると岩片が軟らかいものであった。なお、水洗により粒度が変化する5mm以下のコンクリートの細骨材相当の母材については原粒度、水洗後粒度の試料それぞれについて表乾密度、吸水率を示した。表-2.3.2に試料のs/a、微粒分含有率を示した。図-2.3.1に原粒度および、水洗後の粒度（以後、水洗粒度という）を示した。また、同図にBダムの現場において実際に使用した材料の粒度分布の平均と分布範囲を示した。

試験方法は、前述した図-2.2.2のフロー図と同様の方法により実施した。表-2.3.3に試験ケースを示した。なお、原粒度材料の供試体については、図-2.3.2に示すように供試体側面にLDT（Local Deformation Transducer）を設置して供試体ひずみを測定することにより、変位計計測の際に生じる供試体の端面処理の影響や、供試体端面と試験機のアムスラーに生じるせん断応力等が原因によるベディングエラーの影響を排除するという測定方法も併用した。

表-2.3.1 使用材料及び基本物性値

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 B	千枚岩原石山材料
	80-40mm (表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 3.1%)
	40-20mm (表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 3.6%)
	20-10mm (表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 3.8%)
	10-05mm (表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 4.5%)
原粒度 5mm 以下 (表乾密度 2.52g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 5.35%)	
水洗後 5mm 以下 (表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 3.0%)	

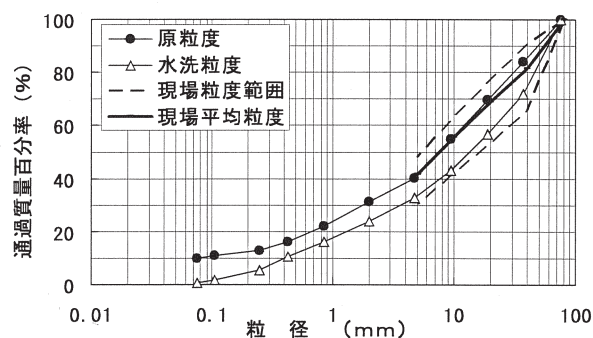


図-2.3.1 Bダム試料の粒度分布

表-2.3.2 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

表-2.3.3 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
供試体数(本)	5	3

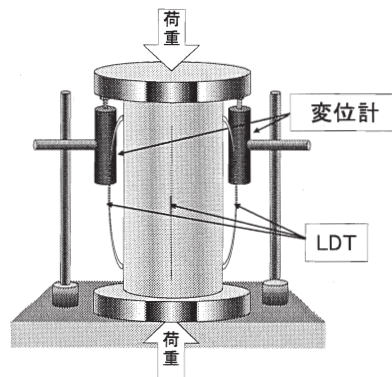


図-2.3.2 LDTの設置概要

### 2.3.2 配合条件

表-2.3.4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-2.3.3に各粒度の単位水量と打設時の密度の関係を示す。また、図-2.3.4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割返した密度比と、単位水量との関

係を示した。30秒締固め時に密度が最大となる単位水量は、原粒度の材料で  $160\text{kg/m}^3$ 、水洗粒度の材料で単位水量  $110\text{kg/m}^3$  程度となった。密度比は両試料とも密度ピーク前では、単位水量の増加に伴い増加する傾向にあり、概ね密度ピーク付近で98%程度となり頭打ちとなった。水洗粒度試料では密度ピーク以降も微増傾向が続く状態となり最大値は99%程度であった。原粒度の材料でみた場合、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、短い締固め時間で密度を出すためには、多めの単位水量が必要となると考えられる。なお、水洗粒度の材料では、密度ピークを得る単位水量より少ない範囲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小さくなっている。

表-2.3.4 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 ( $\text{kg/m}^3$ )	80~140	140~180

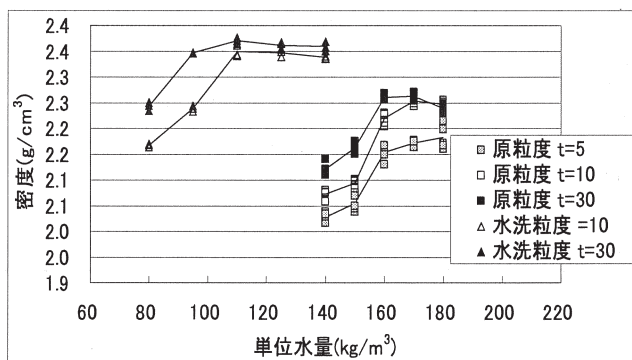


図-2.3.3 単位水量と打設時の密度の関係

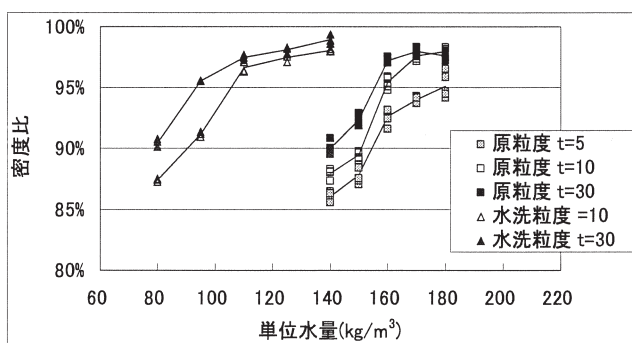


図-2.3.4 単位水量と打設時の密度比の関係

度と静弾性係数について考察する。図-2.3.5に単位水量と弾性領域強度の関係を、図-2.3.6に単位水量とピーク強度の関係を示す。いずれの強度も、原粒度の材料よりも、水洗粒度の材料の方が強度の最大値が高く出る結果となった。また、水洗を実施した材料を用いたCSGは単位水量の変化に対して強度の変化が大きく出る傾向となり密度ピーク付近以降の単位水量の増加に対して直線的な強度の減少が発生する結果となった。原粒度の材料を用いた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、密度ピーク付近以降の強度の現象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可能性がある。また、細粒径が多いとセメントの均一な混合が阻害され、強度が出にくいということも合わさって、原粒度と水洗粒度の材料のCSGの強度特性に差が生じたと考えられる。図-2.3.7に単位水量と変位計計測により求めた弾性係数の関係を示す。原粒度材料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、水洗い粒度の材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かかわらず弾性係数の変化が小さい結果となった。図-2.3.8に単位水量と、LDT計測により求めた弾性係数の値を、図-2.3.9に変位計による弾性係数と、LDT計測による弾性係数の相関を示す。本試験で実施したLDTによる弾性係数測定では数値のばらつきが大きく明確な相関が得られなかった。しかし、変位計計測による弾性係数と比較するとその数値は2倍程度の値となっており、ベディングエラーの影響が生じていることがわかった。

図-2.3.10、2.3.11に粒度ごとの密度と弾性領域強度の関係を示す。原粒度の材料を用いた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。水洗粒度の材料を用いたCSGは、密度ピークより前に最大強度を発現し、密度ピーク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。この材料では大きな粒径の母材の間隙を良質なペースト（セメント水比が大きいペースト）が埋め切れず、間隙を水が埋めることにより密度が上昇したためと考えられる。

図-2.3.12に密度比と弾性領域強度の関係を示

す。原粒度材料を用いた 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、水洗材料を用いた CSG 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、水洗材料を用いた CSG において、密度比が 95% を超えるのは、図-2.3.3 および図-2.3.4 からわかるように、密度が最大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、単位水量の増加、つまり水セメント比の減少に伴って強度が減少する。一方、原粒度材料を用いた CSG では、先に述べたように、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、空隙をペ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確には現れてこないことが考えられる。

#### 2.3.4 まとめ

母材の水洗いが CSG の物性に与える影響について検討し、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、単位水量が強度に与える影響が大きい。
- ③ 水洗いにより微粒分を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獵期では、単位水量の増加と共に強度が増加する。それ以上の単位水量の領域では、単位水量の増加と共に強度が減少する。

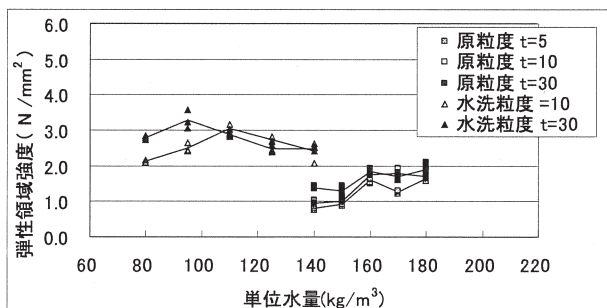


図-2.3.5 単位水量と弾性領域強度の関係

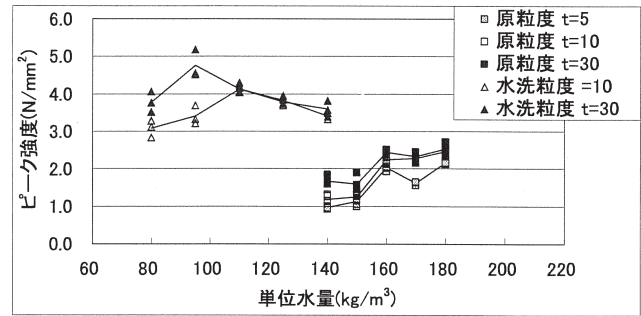


図-2.3.6 単位水量とピーク強度の関係

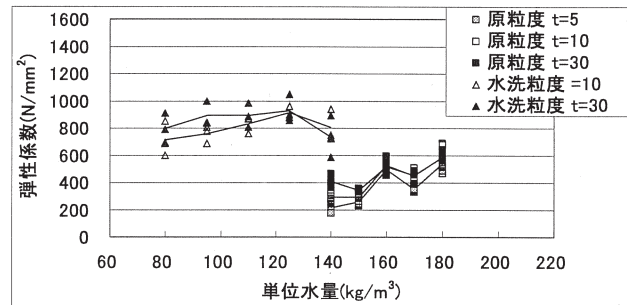


図-2.3.7 単位水量と弾性係数（変位計）の関係

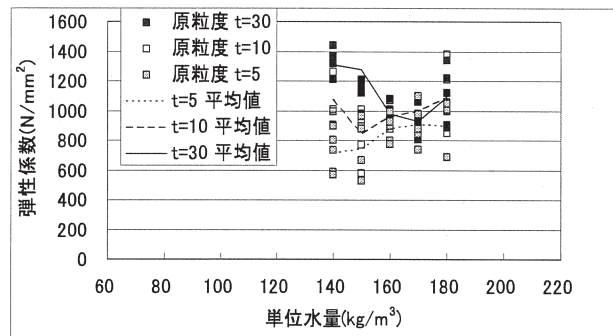


図-2.3.8 単位水量と弾性係数（LDT）の関係

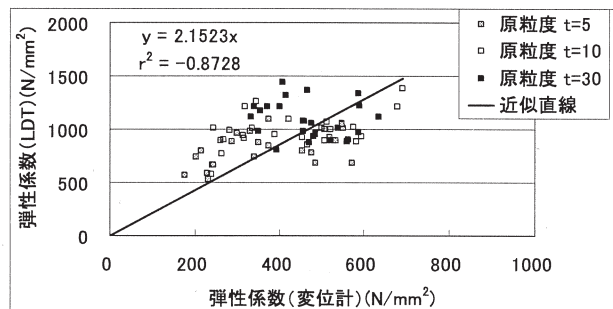


図-2.3.9 弾性係数（変位計）と弾性係数（LDT）の関係



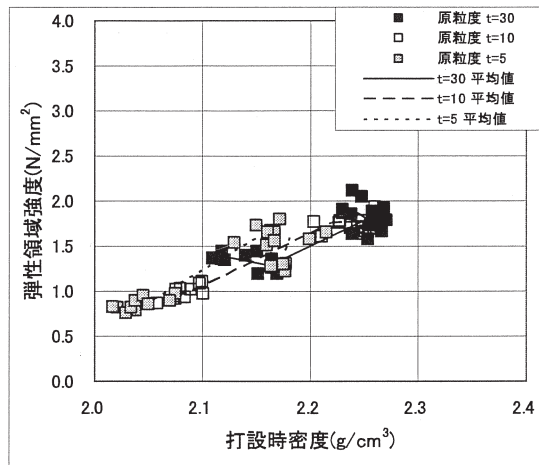


図-2.3.10 原粒度試料の打設時密度と弾性領域強度の関係

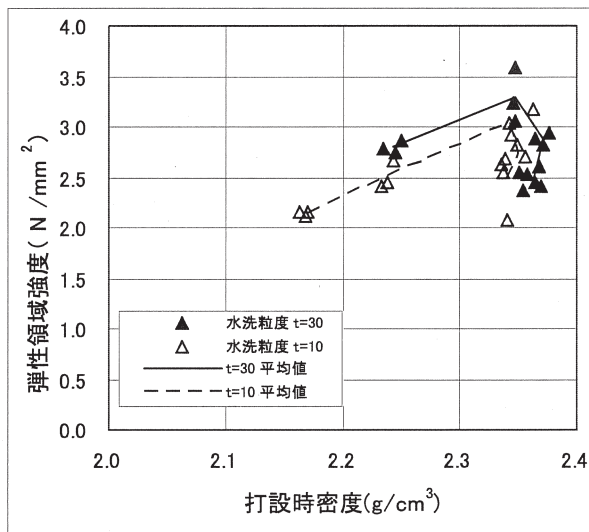


図-2.3.11 水洗試料の打設時密度と弾性領域強度の関係

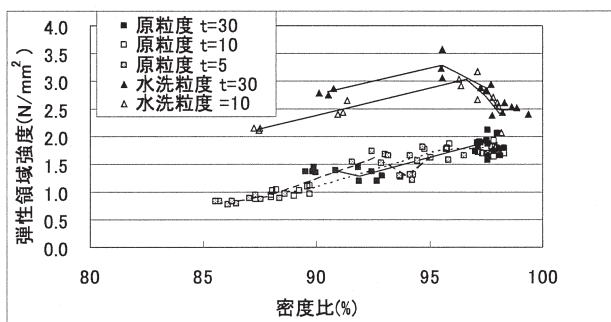


図-2.3.12 密度比と弾性領域強度の関係

### 3. 母材に含有される微粒分の質とCSG強度の関係

#### 3.1 試験目的

2章における検討により、CSGの物性を決めるひとつの要因としてCSG母材に含まれる微粒分の影響が大きいということがわかった。そこで、次に、微粒分(0.075mm以下の粒径の母材)の含有率とその性質がCSGの強度に与える影響を検討した。そのために、碎石と珪砂、碎石と粘土を混合したものを細粒材料とし粒度調整を行ったCSG母材を用いモデルCSG母材を作成し、一軸圧縮試験を行いその強度と変形性の分析を行った。

#### 3.2 使用材料および試験方法

使用材料を表-3.1に示す。ここで材料と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、コンクリート骨材として使用できる堅固な工場製品を用いた。全母材量に対する細粒材料(5mm以下粒径の材料)の割合をB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-3.1に示す。また、同図にBダム施工管理データの平均粒度を示す。試験に供したモデ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)を全母材量の60%定量とし、砂岩砕砂、砂岩砕砂+珪砂、砂岩砕砂+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用いた。

試験方法は、前述した図-2.2.2のフロー図と同様の方法により実施した。

表-3.1 使用材料及び基本物性値

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
モデル母材	砂岩碎石 80-40mm(表乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.26%) 40-20mm(表乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.33%) 20-10mm(表乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.44%) 10-05mm(表乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.76%) 砂岩細砂 5mm以下 (表乾密度 2.53g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 1.48%) 珪砂(塑性指数 NP) (土粒子密度 2.66g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.18%) 藤の森粘土(塑性指数 31.0) (土粒子密度 2.68g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 19.18%)

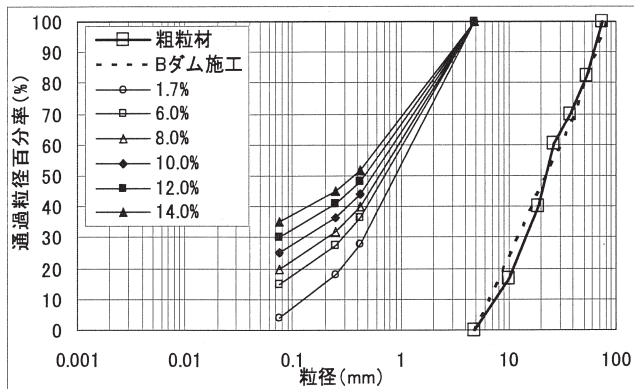


図-3.1 モデル試料の粒度分布

### 3.3 配合条件

表-3.2 に試験ケースを示す。供試体を作製した単位水量は練混ぜ時の排出のしやすさ、締固め時の材料分離がないことを前提に、同一の単位水量で供試体作製が可能な試験ケースをひとつのグループとし、グループ中で一番強度が低くなる配合の強度が最大となる程度の単位水量を設定した。また、表-3.3 に細粒材料の乾燥重量比率を、図-3.2 に微粒分含有率と打設時密度の関係を示す。表-3.2 に示したように、砕砂+珪砂の場合には、微粒分含有量にかかわらず、砕砂単体の単位水量と同じ単位水量の試験となったが、砕砂+粘土では微粒含有量に応じて単位水量を変える必要が生じた。

表-3.2 試験ケース

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 <sup>3</sup> )	110		130	150
試験数(個)	各 3			
締め固め時間 (s)	10, 30			

表-3.3 細粒材の混合比率 (乾燥重量比)

材料	微粒分含有率	細砂	珪砂	粘土
砕砂	1.7%	100%	—	—
砕砂+珪砂	6.0%	89%	11%	—
	8.0%	83%	17%	—
	10.0%	78%	22%	—
	12.0%	73%	27%	—
砕砂+粘土	6.0%	68%	32%	—
	8.0%	82%	—	18%
	10.0%	77%	—	23%
	12.0%	71%	—	29%
	14.0%	66%	—	34%

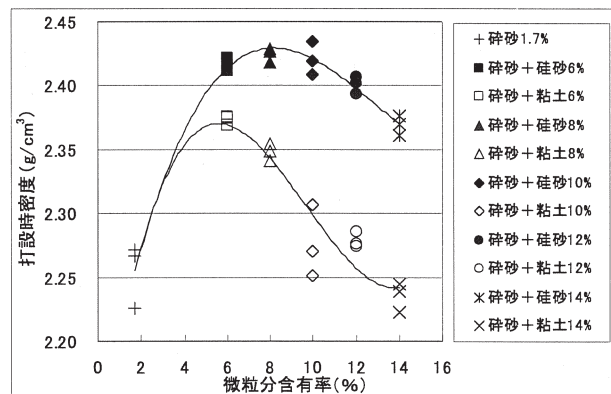


図-3.2 微粒分量と打設時密度の関係

### 3.4 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。ここでは、主に粒度に着目して検討を行う必要があるため、締固め時間 10 秒の結果について記述した。

図-3.3 に微粒分含有率と各配合の弾性領域強度の関係を、図-3.4 に微粒分含有率とピーク強度の関係を示す。いずれも、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。

微粒分含有率と密度の関係を図-3.2 に示したように、最も密度が高くなるのは微粒分含有率 8%程度となっている。一方、図-3.5 に示す微粒分含有率と密度比の関係からも、微粒分含有率が 8%程度するとき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微粒分含有率 8%程度と考えられる。しかし、図-3.3 と図-3.4 を比較すると砕砂+粘土の配合では微粒分含有率 8%以上の配合において密度と強度が概ね対応しているのに対し、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。

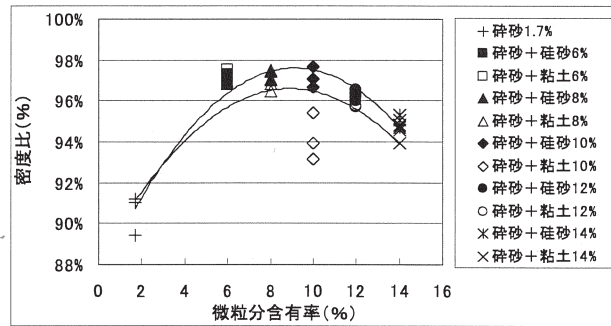


図-3.5 微粒分含有率と密度率の関係

### 3.5 まとめ

CSG 母材微粒分の含有率とその性質が、強度に与える影響について検討し、以下の結果を得た。

- ①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 の強度が上昇する。
- ②CSG 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。
- ③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。

## 4. CSG の配合強度に関する検討

### 4.1 概要

CSG は、その製造の特徴上、品質のバラツキが大きな材料であり、構造物に要求される所要の強度を満足するにはどの程度の材料安全係数を確保するのが適切であるかが大きな課題となっている。

CSG においては、材料物性について大きなバラツキの発生を許容し、これを構造設計（断面設計など）で補っていくという設計手法が考えられている。しかし、このためには、CSG の材料物性のバラツキの範囲を正確に把握するとともに、これを構造物の構造設計（断面設計など）に的確に反映させていくことが必要であり、また、そのようにして設計された構造物に対し、CSG の材料物性のバラツキを当初計画の範囲内に収めるような品質管理方法を確立することが必要である。

そこで、CSG の配合強度の決め方について、統計確率学的手法を用いて検討を加えた<sup>5)</sup>。

### 4.2 検討方法（CSG の強度分布モデル）

密実な（ジャンカの少ない）CSG を得るためには、

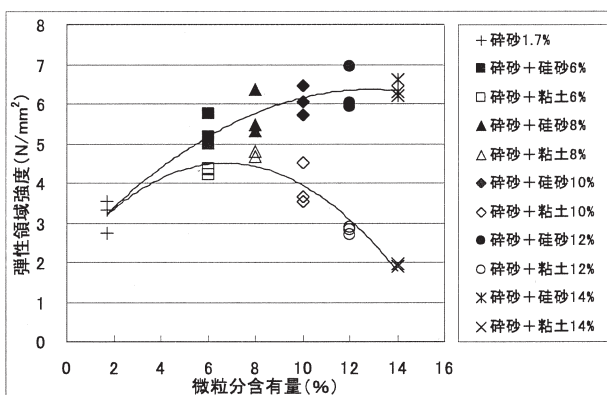


図-3.3 微粒分含有率と弾性領域強度の関係

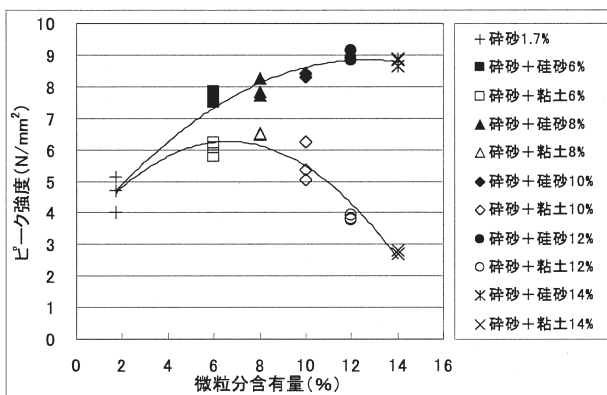


図-3.4 微粒分含有率とピーク強度の関係

その強度を最大にする単位水量より高めの領域の単位水量を用いて CSG を設計、施工することが一般的である。また、上述までの検討により、微粒分量と質が CSG 強度に影響を及ぼすが、一般的には粒度の粗い場合の方が粒度の細かい場合に比べて高い強度を有することが多い。この場合、CSG 中の単位水量と CSG の強度の関係（分布状態）を模式的に図示すると図-4.1 のようになる。図の縦軸に平行な線で表されるバラツキは、主として CSG 母材の粒度の差によるバラツキであるが、同一の粒度であっても、CSG 中のセメントの分布の偏り、また、通常のコンクリートに見られる強度のバラツキと同様に、CSG 母材の分布の不均一性、締め固めエネルギーの変動誤差などに起因したバラツキなども含まれている。

CSG においては、その確率的な強度分布を正規分布と見なすことはできない。正規分布からのずれを示す最も大きな要因は CSG 母材の粒度のバラツキによる強度変動である。これは、CSG 母材の粒度のバラツキが CSG 母材を採取する場所の特性に応じた変動を示すからである。また、相対的に高い強度を有する CSG と相対的に低い強度を有する CSG とで、その強度のバラツキ幅が異なることも正規分布からのずれを生じさせる原因となっている。そこで、本検討では、問題の簡素化を図るため、CSG の配合について次のような仮定を設ける（図-4.2 参照）。

- ① CSG 中の単位セメント量は一定とする。
- ② CSG 母材の粒度は 5 水準に変化し、それぞれの粒度の材料は同じ確率で採取される。
- ③ CSG 中の単位水量は管理目標として設定された単位水量を中心として 5 水準の単位水量からなる。また、それぞれの単位水量の CSG は同じ確率で生産される。
- ④ 各粒度、各単位水量に対応する CSG の強度の統計上の期待値（以下、“呼び強度”と呼ぶ）は図-4.2 に示す○および●印で表される。また、これらの点は縦横それぞれ等しい間隔で分布する。
- ⑤ 各粒度、各単位水量に対応する CSG の強度は、その強度に比例したバラツキ（標準偏差）を有する（すなわち、CSG の強度の変動係数は粒度や単位水量によらず一定とする）。

なお、図-4.2 の中央の点（すなわち、図中の○印）における強度を“基準強度”と呼ぶ。以下においては、この基準強度を基準点と考えて議論を進める。この際、基準強度の大きさは、正規化して 1 で表す

ものとする。

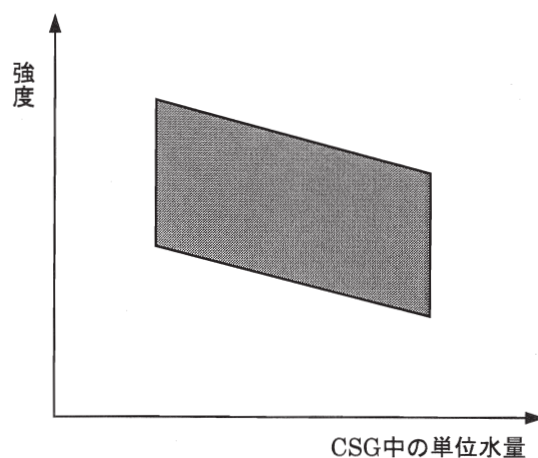


図-4.1 CSG の強度分布

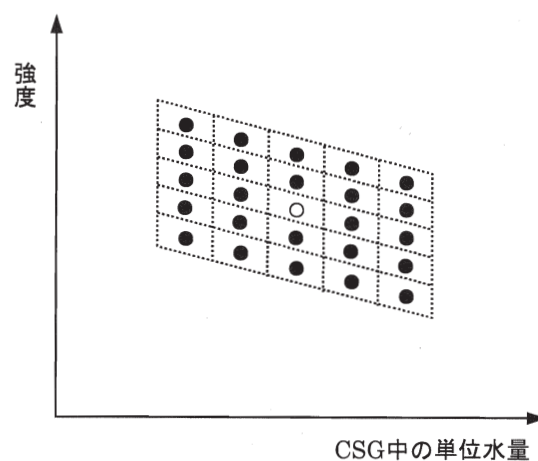


図-4.2 CSG の強度のバラツキパターン

以上の仮定を用いて、材料粒度および単位水量の変動に伴う呼び強度の変動範囲をパラメータとして、CSG の強度に関する分析を行う。

### 4.3 検討結果

#### 4.3.1 CSG の強度の確率密度分布

図-4.2 において、CSG 母材の粒度、CSG 中の単位水量に変動がなく（すなわち、図中の●印が○印に集中した状態を考え）、その強度が基準強度の周りに確率事象として正規分布をなす場合を考える（ここでは、CSG 母材の粒度、CSG 中の単位水量が一定であるから、その強度は正規分布をなすと考えてよい）。この時の強度の確率密度分布を図-4.3 に

示す。なお、ここでは、強度の変動係数を 20%と仮定している。

そして、基準強度 1 に対して、粒度の変動による呼び強度の変動を 5 水準、その変動幅を 0.667~1.333 とし (4.2 で仮定したように、その間で呼び強度は等間隔に分布するものとする)、単位水量の変動による呼び強度の変動を 5 水準、その変動幅を 0.833~1.167 と仮定した (したがって、全体として見れば、0.556~1.556 の範囲で CSG の呼び強度が分布する) 場合について、その強度の確率密度分布を図-4.4 に示す。図-4.3 に比べて図-4.4の方がバラツキ幅が大きくなるのは当然のことであるが、図-4.4においてさらに特徴的なことは、強度の最頻値は 1 よりも小さくなり、また、最頻値よりも右側 (すなわち、強度が大きい側) に膨らんだ分布形状を示すことである。これは、CSG の強度のバラツキ (標準偏差) が CSG の強度に比例する (粒度、単位水量に変動がない場合の変動係数一定) と仮定しているからである。

#### 4.3.2 材料安全係数の検討

##### (1) 母材の粒度の変動の影響

CSG で造られた構造物内に発生する応力と CSG の強度の関係を表す場合、次の二つの方法が考えられる。一つは、まず CSG の基準強度を定め、構造物内に生じる応力の大きさを規制する方法 (この時の規制値を“許容応力”と言う) であり、もう一つは、構造物内に生じる応力を求め、これに対して要求する基準強度の大きさを定める方法 (この時の基準強度を“設計強度”と言う) である。

しかし、CSG の利用においては、一般に「まず、材料ありき」という考え方が採用されているから、構造物中に生じる応力が許容応力を上回らないように断面設計することが基本となる (ただし、重力ダムのように堤高によって発生応力のオーダーが定まる場合、必ずしもこのような考え方はとれず、単位セメント量で基準強度 (設計強度) を調整することが必要となる)。

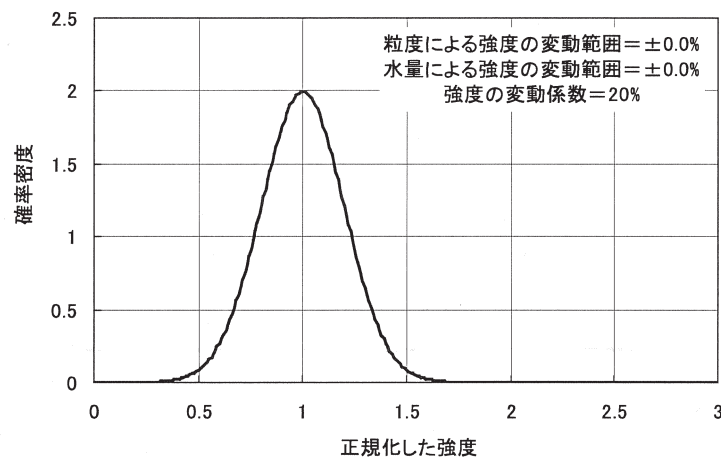


図-4.3 均一な材料粒度、均一な単位水量時における CSG の強度の確率密度分布

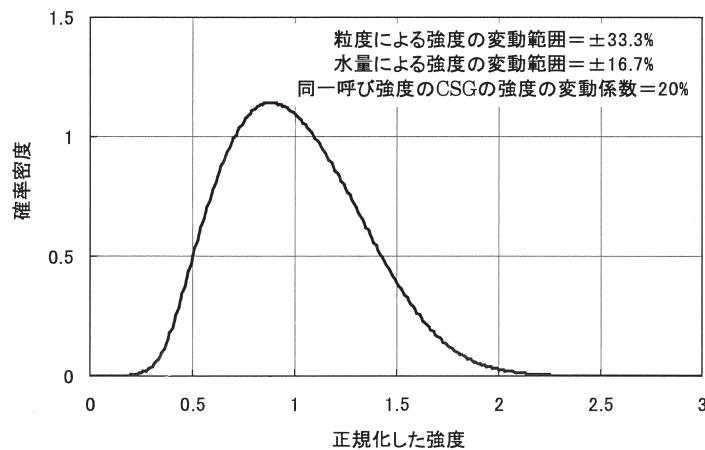


図-4.4 材料粒度、単位水量が変動する場合における CSG の強度の確率密度分布

構造物の安全性を規定する性能として、「材料の強度が許容応力を1%の確率で下回らないこと」を要求することとする。この時、粒度に起因する呼び強度の変動幅（すなわち、図-4.2の●印の間隔）を種々に変化させ、同一呼び強度のCSGにおける強度の変動係数（すなわち、同一粒度におけるCSGの強度の変動係数）と許容応力の関係を示すと図-4.5のようになる。

図に示すように、粒度の変動幅が大きくなればCSGの許容応力は小さくなり、また、同一呼び強度のCSGにおける強度の変動係数が大きくなればCSGの許容応力は小さくなる。なお、同一呼び強度のCSGにおける強度の変動係数と許容応力の関係は、ほぼ直線的な関係になっているのが特徴的である。

さて、ここで、CSGの基準強度（すなわち、図-4.2における○印）と許容応力の比を“材料安全係数”と呼ぶことにする。すなわち、

$$\text{許容応力} = \frac{\text{基準強度}}{\text{材料安全係数}} \quad (1)$$

とする。

図-4.5から、同一呼び強度のCSGにおける強度の変動係数と基準強度に対する材料安全係数の関係を求めると図-4.6のようになる。なお、図中の●印は材料の呼び強度に変動がない場合のグラフであり、材料安全率はこの値より小さくならないこと、すなわち、材料安全係数の下限値を示している。

#### (2) 母材の粒度の変動とCSG中の単位水量の変動が及ぼす影響

次に、CSG母材の粒度によって呼び強度がばらつくほか、CSG中の単位水量の変動によっても呼び強度がばらつく場合を考える。

いま、基準強度1に対し、CSG中の単位水量の変動によって生じる呼び強度の変動幅を0.833~1.167とし、基準強度1に対し、CSG母材の粒度の変動によって呼び強度が種々に（1.000~1.000、0.8333~1.167、0.667~1.333、0.500~1.500の4種類に）変化する場合を考える。この時、同様な方法で、呼び強度の変動係数と基準強度に対する材料安全係数の関係を求めると図-4.7のようになる。

図-4.6および図-4.7の結果から、同一呼び強度のCSGにおける強度の変動係数（すなわち、同一粒度、同一単位水量におけるCSGの強度の変動係数）が20%の場合について、呼び強度の最大変動比（すなわち、最大呼び強度と最小呼び強度の比）と材料

安全係数の関係を示したものが図-4.8である。図によれば、材料粒度の変動のみが存在する場合よりも、材料粒度の変動、単位水量の変動の両方が存在する方が、材料安全係数の値が低くなっていることがわかる。

#### 4.3 まとめ

ここでは、統計確率学的な概念を用いて、CSG材の粒度の変動、CSG中の単位水量の変動と材料安全係数の関係を求めた。なお、この際、同一粒度、同一単位水量におけるCSGの確率的な強度変動は正規分布をなし、また、その変動係数は粒度や単位水量によらず一定であること、さらに、材料強度に対する性能として、材料の強度が許容応力を下回る可能性を1%と仮定した。

ここで述べた検討結果をとりまとめると次のとおりである。

- ① CSGの強度の確率密度分布において、強度の最頻値は強度の平均値より小さくなり、その分布は右側（強度の大きい側）に膨らんだ形を呈する。
- ② CSG中の単位水量が一定で、CSG母材の粒度のみが変動する場合、同一粒度におけるCSGの強度の変動係数と許容応力の関係はほぼ直線で近似される。
- ③ CSG母材の粒度のバラツキが大きいほど、また、CSG中の単位水量のバラツキが大きいほど、さらに、同一配合におけるCSGの強度

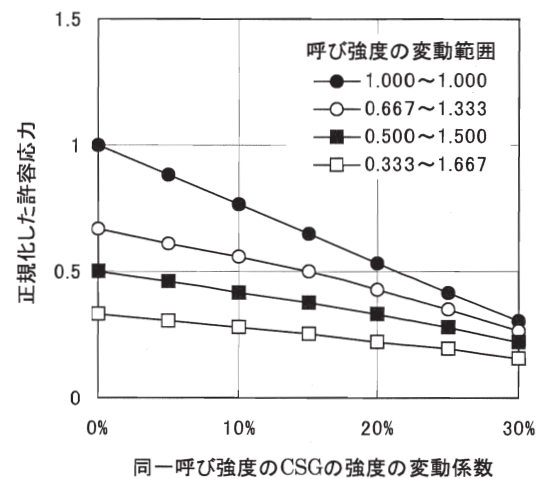


図-4.5 同一呼び強度のCSGにおける強度の変動係数と正規化した許容応力の関係（材料粒度のみが変動する場合）

の確率的なバラツキが大きいほど、CSG の材料安全率（材料安全率）は、大きくなる。

- ④ CSG の呼び強度（すなわち、CSG 母材の粒度、CSG 中の単位水量が一定の場合における CSG の強度の期待値）の最大値と最小値の比が同一の場合、CSG 母材の粒度と CSG 中の単位水量がともに変動する場合よりも、CSG 母材の粒度のみが変動する場合の方が材料安全率が大きくなる。

### 5. 全体のまとめ

以上に示したように、実験的検討から、母材の特性が CSG の物性に及ぼす影響を明らかにすることができた。また、統計確率的検討から、母材のバラツキが強度に及ぼす影響を明らかにすることができた。これらの結果から、合理的な配合設計および品質管理を行う方法として、以下のような提案することができる。

#### <配合設計について>

- 母材の粒度のバラツキの幅が CSG の強度に与える影響が大きく、ひいては構造物の安全性に影響を与えることから、配合設計にあたっては粒度のバラツキの幅を考慮に入れて、目標とすべき強度（平均的な強度）を決定することが必要となる。
- 比較的粗粒な母材による CSG には、高い強度が望めるが、一方、単位水量が強度に大きな影響を大きく与えるため、現場における水分管理の精度をあらかじめ十分想定した上で、単位水量の幅を設定する必要がある。
- CSG に求められる強度は、CSG の弾性係数によって影響を受けるため、配合設計上、弾性係数の評価が重要となる。弾性係数は粗粒な母材を用いた CSG ほど低く、細粒な母材を用いた CSG ほど高い。このことから、粒度のバラツキの幅だけでなく、粗粒と細粒の頻度傾向を考慮の上、設計上の弾性係数を決定する必要がある。
- CSG 母材中に粘性を持つ微粒分量の変化が大きい場合、配合に適する単位水量が大きく変化するため、配合設計に先立ち、微粒分量とともにその特性を調査することが、合理的な配合設計を行うことに必要である。
- 低品質な微粒分（粘性を持つ微粒分など）を多量に含む母材の場合、微粒分除去を行うことで、CSG 強度の最大値を上昇させることができる。

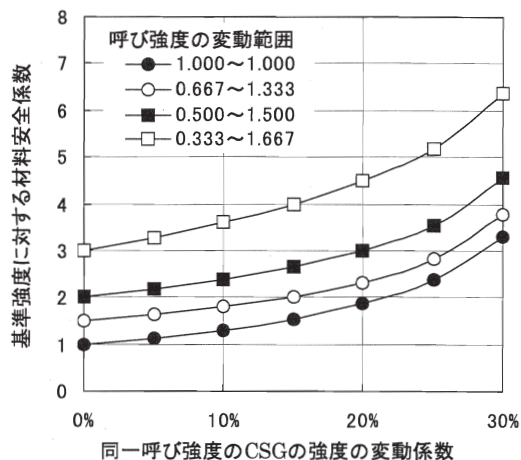


図-4.6 同一呼び強度の CSG における強度の変動係数と基準強度に対する材料安全係数の関係（材料粒度のみが変動する場合）

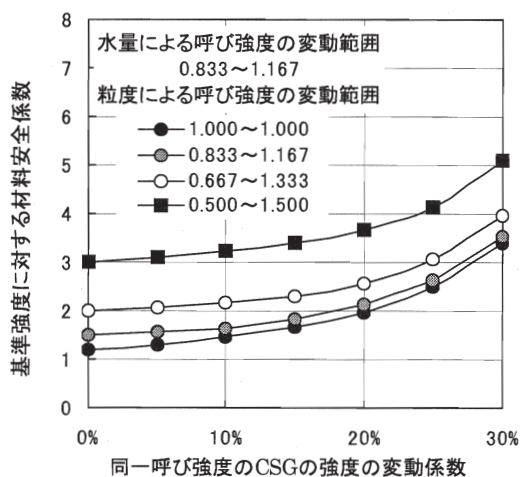


図-4.7 同一呼び強度の CSG における強度の変動係数と基準強度に対する材料安全係数の関係（材料粒度、単位水量がともに変動する場合）

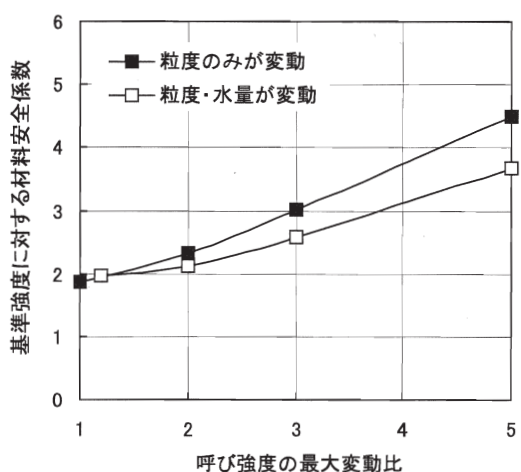


図-4.8 呼び強度の最大変動比と基準強度に対する材料安全係数の関係

また、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と CSG の強度が上昇する。よって、低品質な微粒分が多い場合には、水洗材料と、現粒度材料のブレンド等の工夫が、合理的な配合設計に結びつく可能性がある。

#### <品質管理について>

- ・ 比較的粗粒な母材を用いた場合、単位水量および締固め密度が強度に大きな影響を与えるため、施工において水分管理の精度、締固め密度の管理が重要となる。
  - ・ 低品質な微粒分（粘性が高い微粒分）を多く含む母材を用いた場合、その量と質が CSG の強度に大きな影響を有することとなる。そこで、必要な強度を有する CSG を安定して得るためには、微粒分量と質に関しても品質管理試験を行い、その結果、配合設計で想定している範囲から逸脱していないことを確認することが良い。
  - ・ 一方、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ため、微粒分についての管理の簡素化が可能である。
- 以上のように、一般的に行われるような CSG の母

材の大きかな粒度範囲だけでなく、粒度のバラツキ幅、微粒分の量と質を把握することで、合理的な配合設計および品質管理を行うことが可能である。

#### 参考文献

- 1) 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：「台形 CSG ダムの特徴と現在までの検討状況」、ダム技術、No.191、pp. 2-23、2002.8
- 2) 藤澤侃彦：「台形 CSG ダムの発展」、ダム技術、No.216、pp.3-24、2004.9
- 3) 服部 敦、安田成夫、佐々木隆、平山大輔、川崎 秀明：「台形 CSG ダムの応力特性および弾性特性に関わる考察」、ダム技術、No.216、pp. 25-34、2004.9
- 4) 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、2004.9
- 5) 永山 功、佐々木隆：「CSG に要求される材料全係数に関する考察」、ダム工学、Vol.14、No.1、2004.3