

CSG の繰返し三軸試験による変形特性

豊田光雄*

1. はじめに

筆者らは、これまでに CSG (Cemented Sand and Gravel) を用いて、ダムの二次締切堤などの盛土構造物を築造してきた¹⁾。CSG は、母材(現地発生材)にあまり手を加えず、少量のセメントを混合したものである。CSG 構造物は、粘着力を有する材料としてすべり安定解析による設計を行い、ブルドーザーで敷均し、振動ローラを用いて締固めて築造するものである。この方法による CSG は、セメント改良土のひとつであると考えている。CSG の工学的性質で重要な締固め密度、せん断強度については、数多くの室内及び現場試験によって明らかにしている²⁾⁻⁵⁾。これまで仮設構造物であったために、変形特性を考慮した設計法や、耐震性について十分な検討を加えてこなかった。しかし、永久構造物の設計においては変形特性を考慮した対応が必要である。

ここでは、CSG の変形特性に着目し、繰返し三軸試験を行って等価ヤング率、履歴減衰率などについて検討した結果を述べるものである。

2. 試験概要

2.1 検討項目

CSG の変形特性を明らかにするために次の検討を行った。

- (1) 設計応力範囲内でのひずみ量が通常の土質材料に比べてかなり小さいことから、ひずみの測定法の違いによる変形特性の比較
- (2) 等方圧密状態の変形特性における単位セメント量、母材、密度の要因
- (3) 異方圧密状態の変形特性
- (4) 原位置よりサンプリングした不攪乱試料の変形特性

2.2 試験材料

試験に用いた CSG の母材は、河床堆積物(砂

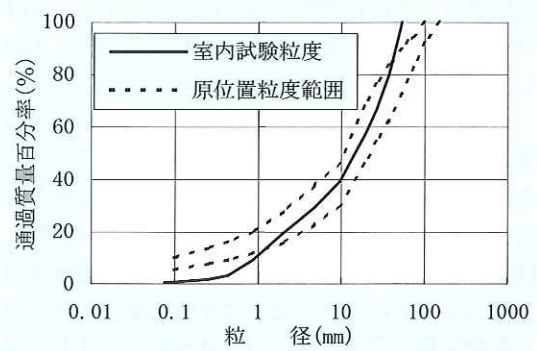


図-1 CSG 母材の粒度

礫：絶乾比重 $G_b=2.66$ 、吸水率 $Q=0.9\%$ 、以降、砂礫という)と粘板岩が主体となっているトンネルの掘削残土(粘板岩： $G_b=2.67$ $Q=1.2\%$ 、扁平状の粒子形状、以降、粘板岩という)の2種類である。

CSG の単位セメント量は、これに関する影響試験を除いて 60kg/m^3 で、セメントは普通ポルトランドセメントである。

図-1 に母材(砂礫と粘板岩)の粒度を示す。室内試験の粒度は、最大粒径が 53mm 、 4.75mm 以下の含有率が約 30% で 0.075mm 以下の細粒分を含んでいない。ただし、粘板岩は細粒分を含有しているが、細粒分のない砂礫との比較を行うために細粒分を除去した。後で述べる原位置コア(母材は粘板岩)の最大粒径は 150mm で、細粒分を 10% 程度含んでいる。

2.3 試験方法

直径 30cm 、高さ 60cm の供試体を用いた繰返し三軸試験における荷重、変位、外体積変化の測定概要を図-2 に示す。本試験では変位量の測定に着目した。従来の試験では、非接触変位計 GS を用いているが、ここでは、供試体端部付近のゆるみ層の変形や端部と载荷キャップとの不完全接触による測定誤差、いわゆるベディングエラーを除去するために、局所変位計 LDT を用いて測定した。LDT は薄い燐青銅板(長さ 540mm × 幅 49mm × 厚さ 0.85mm) にひずみゲージを張り付

Deformation Properties on Cyclic Triaxial Test for Cemented Sand and Gravel

けて、曲げひずみを軸ひずみに変換するものであり、供試体側面に供試体長の上下約 10cm を除いて 2ヶ所設置した。すなわち、LDT の測定は供試体の端面の凹凸などに左右されず、供試体の中央部での測定が可能である。

供試体は、均質なものを作製できるように供試体高さを 6 層に分けて、1 層分の母材 (自然含水比状態) に所定の単位セメント量を加え混合した材料を振動 (電気ハンマー) によって締固めた。供試体は端面の凹凸をなくするために石膏でキャッピングを行っている。この処置は後述する原位置コアについても同様である。供試体作製後は、室内においてモールド内で 7 日間の気中養生とした。

CSG 構造物の外部はコンクリートなどで保護されていることを考慮し、試験は不飽和供試体による圧密排水試験で、体積変化は外体積変化計より求めた。試験条件を表-1 に示す。等方圧密

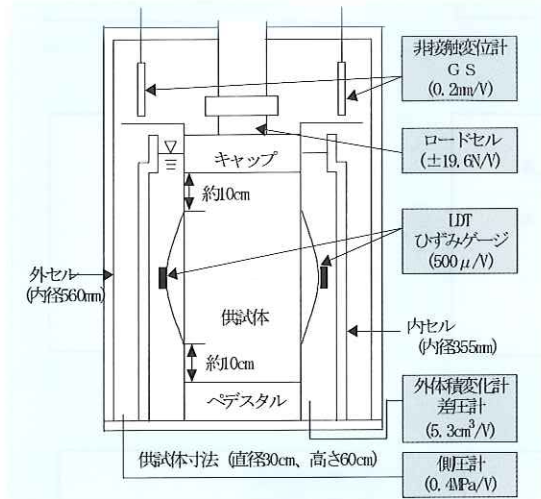


図-2 荷重、変位、外体積変化の測定位置図

表-1 試験条件

载荷方式	繰返し载荷
σ_1/σ_3	1.0, 1.5, 2.0
拘束圧 (注) σ_c' (MN/m ²)	0.1, 0.15, 0.3, 0.6
試験状態	気乾・排水
载荷条件	応力制御正弦波 (0.1Hz)

注) 異方圧密状態では平均有効応力 σ_m' として表記している。

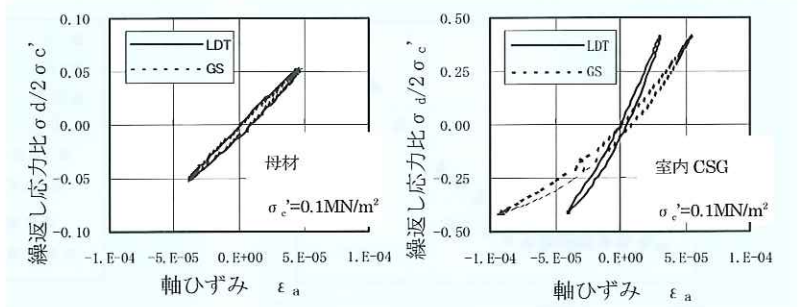


図-3 ヒステリシスループの比較

($\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$) 以外に異方圧密 ($\sigma_1/\sigma_3 = 1.5, 2.0$) でも行った。

载荷波形は正弦波で、1つの供試体に対して段階的に拘束圧を増加させていくステージ载荷とした。繰返し試験のデータサンプリングは 1 波あたり 100 点とし、全 11 波のデータを A/D 変換器によりパソコンに収録した。

3. 試験結果および考察

3.1 ひずみの測定法の違いによる試験値の比較

等方圧密状態で、LDT と非接触変位計 GS をそれぞれ用いて軸ひずみを測定した。この試験での母材は粘板岩である。

図-3 は、拘束圧 $\sigma_c' = 0.1\text{MN/m}^2$ における母材と CSG の 5×10^{-5} の軸ひずみにおける偏差応力~軸ひずみ関係 (10 波目のヒステリシスループ) の一例である。母材では軸ひずみ測定法の違いによるヒステリシスループに明瞭な差はないが、CSG では GS による軸ひずみが LDT による値より大きく、しかもヒステリシスループは原点に対して非対称を示している。なお、CSG は母材に比べ剛となっているのにこのような現象を示すのはベディングエラーによるものと考えられる。

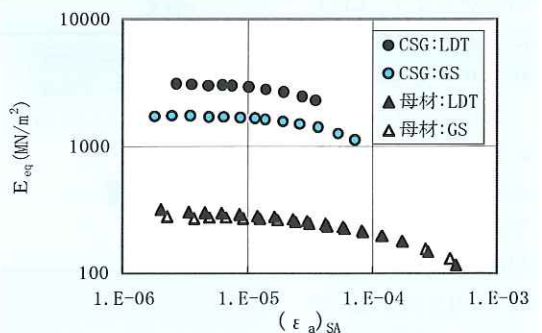


図-4 等価ヤング率と軸ひずみの関係

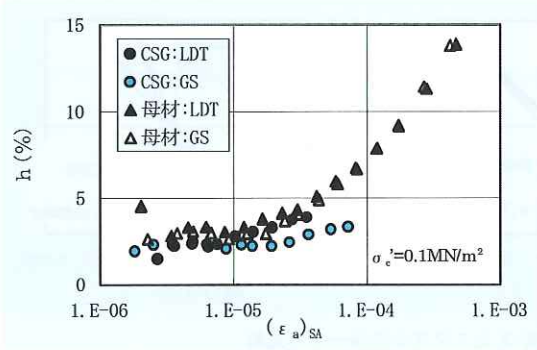


図-5 履歴減衰率と軸ひずみの関係

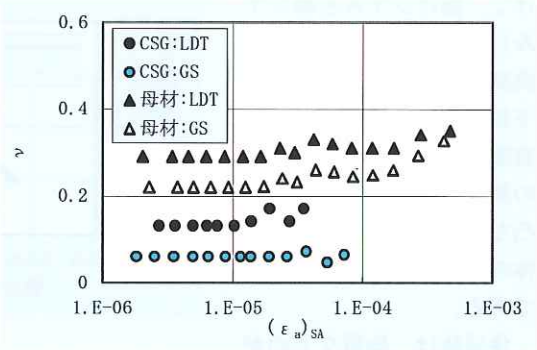


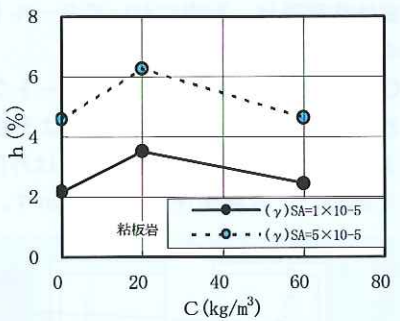
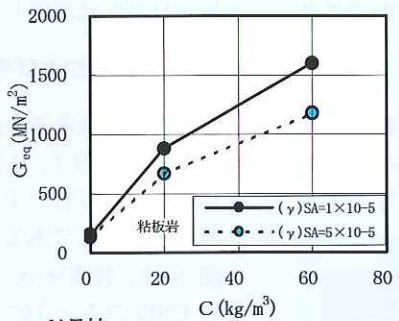
図-6 ポアソン比と軸ひずみの関係

図-4は $\sigma_c' = 0.1\text{MN/m}^2$ における等価ヤング率 E_{eq} と片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ の関係を示す。母材では LDT と GS による E_{eq} の大きさに違いはないが、CSG では LDT による E_{eq} は GS よりも約 1.2 ~ 1.7 倍大きな値を示す。すなわち、CSG ではベディングエラーの影響が大きいと考えられる。図示はしていないが、拘束圧が大きくなるとこの傾向は減少する。

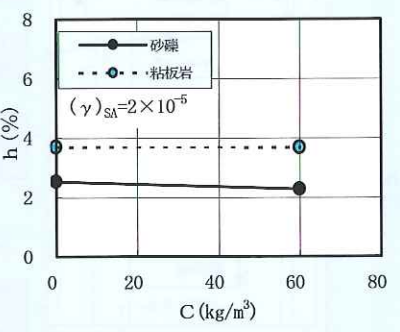
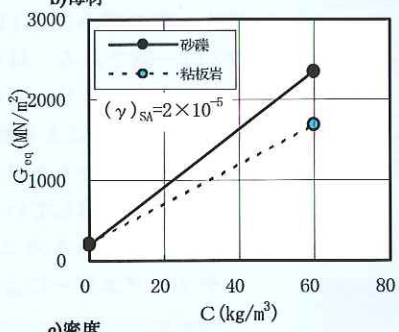
GS のそれより 20~30%程度大きく、特に CSG では 2 倍の大きさを示す。この要因として、LDT から得られる $(\epsilon_a)_{SA}$ は供試体端部を除いた値で

図-5は $\sigma_c' = 0.1\text{MN/m}^2$ における履歴減衰率 h と $(\epsilon_a)_{SA}$ の関係である。母材では、LDT と GS の測定の違いによる h の差はみられないが、CSG ではその差が明らかとなり、LDT による h が GS のそれよりも大きい。

さらにポアソン比 ν と軸ひずみの関係を図-6に示す。横ひずみは体積ひずみを利用して求めている。 $\sigma_c' = 0.1\text{MN/m}^2$ において、LDT から得られる母材の ν は、



b)母材



c)密度

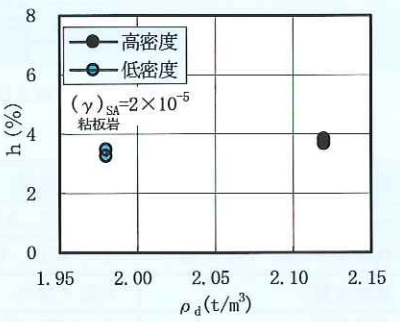
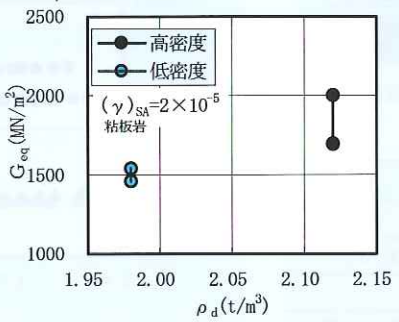


図-7 等価せん断剛性率、履歴減衰率における単位セメント量、母材及び密度の影響

あり、GSによる $(\epsilon_d)_{SA}$ は端部の影響を含み、変位量を大きめに測定しているために、差が生じると考えられる。以上、CSGではベディングエラーの影響が大きいため、以下LDTによる測定から検討を行った。

3.2 等方圧密状態の変形特性

等方圧密状態の変形特性において、①単位セメント量、②母材、③供試体密度を変化させたときの等価せん断剛性率 G_{eq} と履歴減衰率 h について検討を行った。

(1) 単位セメント量

図-7 a)は、単位セメント量 C の違いによる G_{eq} と h の変化である。母材は粘板岩で、拘束圧は $\sigma_c' = 0.15\text{MN/m}^2$ である。供試体の乾燥密度 ρ_d は、母材、 $C = 20\text{kg/m}^3$ 、 $C = 60\text{kg/m}^3$ において、それぞれ $\rho_d = 1.92\text{t/m}^3$ 、 1.94t/m^3 、 1.98t/m^3 である。図中では片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA} = 1 \times 10^{-5}$ と 5×10^{-5} のひずみレベルで C の違いによる G_{eq} 、 h の大きさを比較している。当然のことながら、同一ひずみレベルでは、 C が多いほど G_{eq} は大きい。 $C = 60\text{kg/m}^3$ の G_{eq} は $C = 20\text{kg/m}^3$ のそれの約2倍を示す。一方、 h は C が多くなっても母材とほぼ同様の値を示す。なお、 G_{eq} 及び h とも C の大きさが違ってもひずみが大きくなれば G_{eq} は減少、 h は増加する。

(2) 母材

砂礫と粘板岩をそれぞれ母材としたCSGの G_{eq} 及び h を比較して図-7 b)に示す。 $C = 0$ (母材)と $C = 60\text{kg/m}^3$ とも良く締固めた状態(乾燥密度 $\rho_d = 2.12\text{t/m}^3$)である。 G_{eq} において母材ではほぼ同じ値を示すが、CSGにすると、粘板岩は砂礫の約80%を示し母材による違いが生じる。 h については、母材及び

CSGともほぼ同じ値を示し、粘板岩の値が砂礫に比べて大きい。

(3) 密度

母材が粘板岩で、 $C = 60\text{kg/m}^3$ において密度が約7%異なる場合の G_{eq} と h を比較した。図-7 c)のプロットはそれぞれ同一密度において、2回の試験結果である。高密度($\rho_d = 2.12\text{t/m}^3$)の G_{eq} は、低密度($\rho_d = 1.98\text{t/m}^3$)のそれに比べ約20%大きい。 h は密度の違いが明瞭でない。ちなみに、乾燥密度が5%異なる条件において静的強度の比較を行った場合でも、今回の変形特性と同様な傾向を示している⁶⁾。

3.3 異方圧密状態による変形特性

母材は粘板岩で、平均有効応力 $\sigma_m' = 0.1\text{MN/m}^2$ の条件で、圧密応力比 σ_1/σ_3 を1.5、2.0と変化した時の一例を示す。図-8は、圧密応力比と G_{eq} 、 h 、 ν の関係で3種類のせん断ひずみレベル(5×10^{-6} 、 1×10^{-5} 、 2×10^{-5})をパラメータとしている。 G_{eq} は圧密応力比が大きくなると、どのひずみレベルでも増加する傾向にある。例えば $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$ の G_{eq} は、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ の値よりも約30%大きい。砂を用いた既往の事例⁷⁾でも、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1 \sim 4$ の範囲で検討した結果によると G_{eq} は等方圧密状態の値より約10%大きい。砂

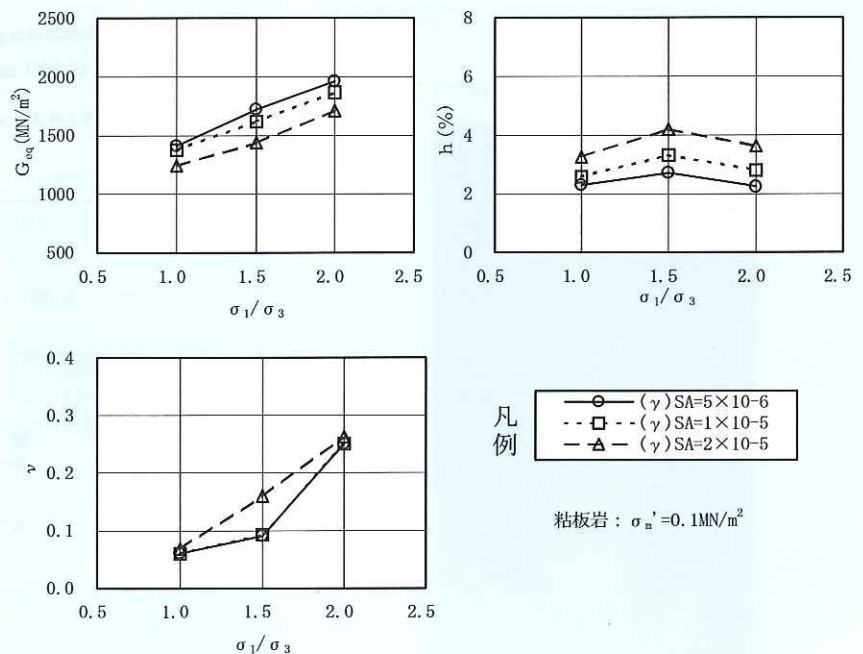


図-8 圧密応力比と等価せん断剛性率、履歴減衰定率、ポアソン比の関係

に比べて剛性が高い CSG ではこの傾向はより顕著であると言える。

h では、圧密応力比の影響は顕著でない。この結果も先ほど述べた砂の場合と同様である。

また、 ν は異方圧密の影響がより顕著に現れる。 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$ における ν は、等方圧密状態のその約 4 倍を示している。

以上、CSG の異方圧密状態は、 G_{eq} と ν に強く影響している。

3.4 原位置コアの変形特性

現場での CSG の製造はスケルトンバケットを用いて現地発生材とセメントの混合を行うため、混合状態は室内に比べあまり良くないと推定される。現場で採取したコアの静的強度においても、筆者らは CSG の粘着力が室内に比べかなり減少した結果を得ている⁴⁾。そこで変形特性についても検討を行うために、盛立後 28 日経過後の CSG 盛土 (母材: 粘板岩) より採取した不攪乱試料 (以降、原位置コアという) を用いて試験を行った⁸⁾。

採取された原位置コアの一例を写真-1 に示す。最大粒径 150mm まで許容しているために、室内で作製したもの (以降、室内 CSG という) に比べて一様ではない。なお、原位置コアはコンクリートに比べて軟らかいため気泡式ボーリングによって採取した。

表-2 に原位置コアと室内 CSG の供試体諸元を示す。

次に原位置コア、室内 CSG、母材の G_{eq} 、 h 、 ν

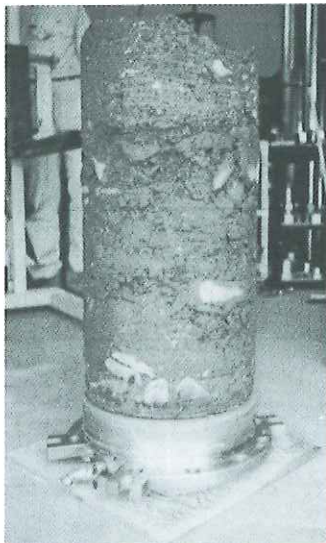


写真-1 原位置コアの状況 (試験前)

表-2 供試体の諸元

供試体区分	室内 CSG	原位置コア
供試体寸法	d30cm × H60cm	
乾燥密度	1.98 t/m ³	
最大粒径	53mm	150mm
養生日数	7日	28日
締め固め方法	電気ハンマー	振動ローラ

について三者を比較する。三者の母材はいずれも粘板岩で、原位置コアは最大粒度が大きく、細粒分を約 10% 含有している。試験は等方圧密状態である。

図-9 は、 $\sigma'_c = 0.1 \text{ MN/m}^2$ における G_{eq} と $(\gamma)_{SA}$ の関係である。原位置コアの G_{eq} は室内 CSG に比べ材令が高い割には室内 CSG の約 40% の値しか示していない。CSG のせん断強度は材令が高いと増加することがわかっており⁴⁾、この結果の要因のひとつには、セメントの混合状態が良くないことが挙げられる。

図-10 は拘束圧と初期せん断剛性率 G_0 の関係である。原位置コアの G_0 の大きさは室内 CSG のそれより小さい。ただし、拘束圧の増大に伴う G_0 の増加傾向は変わらない。

図-11 は $\sigma'_c = 0.1 \text{ MN/m}^2$ における h と $(\gamma)_{SA}$

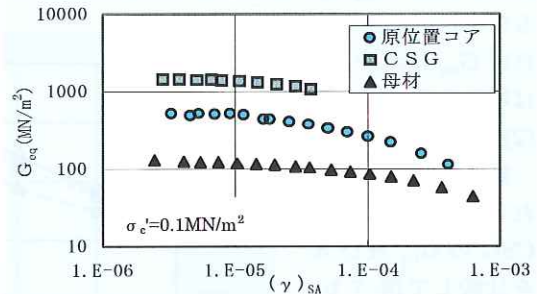


図-9 等価せん断剛性率とせん断ひずみの関係

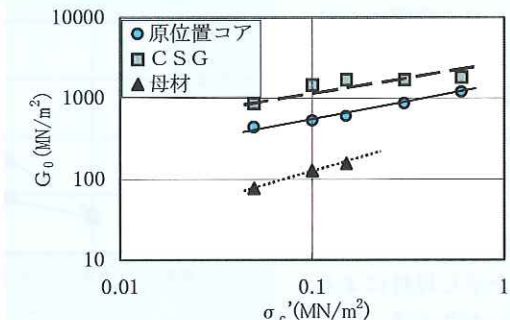


図-10 拘束圧と初期せん断剛性率の関係

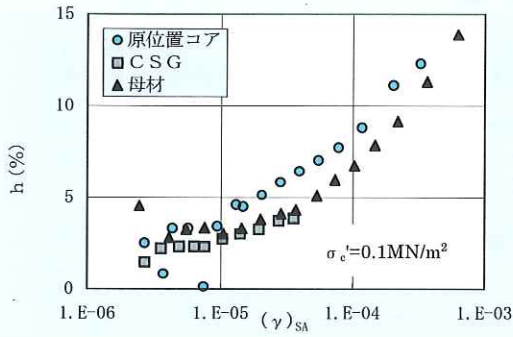


図-11 履歴減衰率とせん断ひずみの関係

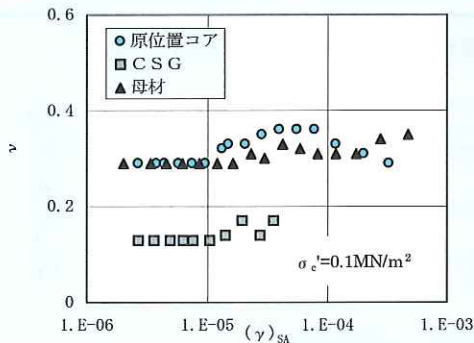


図-12 ポアソン比とせん断ひずみの関係

の関係である。 $(\gamma)_{SA} = 1 \times 10^{-5}$ 程度までは、三者とも h の大きさに違いはみられない。それ以上のひずみで、原位置コアの h は、室内 CSG 及び母材に比べ大きな値を示す。

図-12 は ν と $(\gamma)_{SA}$ の関係を示す。原位置コアの ν は室内 CSG の約 2 倍を示し、母材の ν とほぼ同じ 0.3 である。

以上、原位置コアの変形特性は参考文献 4) で示した静的強度と同様に室内試験に比べて低減している。

4. まとめ

CSG の変形特性を求めるために、繰返し三軸試験を行い、次のような結論を得た。

- (1) ひずみ量の小さい CSG においては、軸ひずみの測定法によって等価ヤング率、履歴減衰率、ポアソン比が異なる。CSG ではベディングエラーの影響が大きいため LDT による方法が望ましい。
- (2) 等方圧密状態の等価せん断剛性率と履歴減衰率において、単位セメント量、母材、密度の要因を分析すると、単位セメント量及び密度は、

等価せん断剛性率のみに影響し、母材の違いは履歴減衰率にも影響を与える。

(3) 異方圧密状態 ($\sigma_1 > \sigma_3$) を考慮すると、等方圧密状態に比べ等価せん断剛性率とポアソン比が大きくなり、履歴減衰率は変わらない。

(4) 原位置コアの等価せん断剛性率は、室内で作製した CSG に比べ約 6 割に低減する。履歴減衰率、ポアソン比は室内のものに比べて大きく、母材とほぼ同じ値を示す。

以上、CSG の基本的な変形特性について述べてきた。今後の課題として、CSG の原位置コアの変形特性がかなり低減することから、その原因について解明するとともに、繰返し強度についても検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 例えば、藤澤侃彦、中村昭、豊田光雄、石川高史、山上和彦：C・S・G の材料試験および施工，ダム技術 No.83, pp.41-51, 1993.8
- 2) 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, pp.35-46, 1994.9
- 3) 豊田光雄、吉田等、山本裕之：CSG の締固めとせん断強度，土木技術資料，Vol.30, No.10, pp.38-43, 1997.10
- 4) 豊田光雄、有銘伸予、今井裕一：掘削残土・河床堆積物を用いた CSG 構造物，土木技術資料，Vol.42, No.5, pp.22-27, 2000.5
- 5) 芳賀敏二、豊田光雄、今井裕一、有銘伸予：CSG 構造物の工学的性質の経時変化，ダム技術，No.169, pp.49-60, 2000.10
- 6) 豊田光雄、山本重樹、楠貞則：施工条件を考慮した CSG のせん断強度に関する検討，平成 10 年度土木学会西部支部研究発表会，pp.504-505, 1999.3
- 7) 例えば 時松孝次：わかりやすい土質力学原論（第 1 回改訂版）土の動的性質，地盤工学会，pp.314-315, 1992.
- 8) 村山邦彦、豊田光雄：圧密応力比の違いによる CSG の動的変形特性と単調載荷における変形特性の比較，土木学会第 55 回年次学術講演会集，pp.504-505, 2000.9

豊田光雄*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム主任研究員
Mitsuo TOYODA