

河床砂礫を母材としたCSG (Cemented Sand and Gravel) の 特性に関する実験的研究

— 動力・重力併用式CSG製造装置DK-IIによる製造と施工 —

大友 健*¹・楠見 正之*²・道場 信昌*²・小菅 憲正*³・平川 勝彦*³

Keywords : CSG (cemented sand and gravel), unit water content, compaction, structural strength, void content, river-bed sand and gravel
CSG (セメント砂礫混合物), 単位水量, 締固め, 構造体強度, 空隙量, 河床砂礫

1. はじめに

台形 CSG (セメント砂礫混合物 : Cemented Sand and Gravel) ダムは「材料の合理化」に着目した新しいダム形式である¹⁾。従来のダム構造と比較して、ダムサイト周辺で得られる材料を有効に活用することができ。また原石山・骨材製造設備の省略によるコスト縮減と環境保全が可能とされるものである。この CSG の製造では、従来からバックホウなどによる攪拌混合が行われてきた²⁾が、大規模な台形 CSG ダムの施工の要求に適応して、製造効率と品質安定性の向上を目的とした新しい CSG の製造技術が要求されるようになってきている。

著者らは、CSG 工法における製造効率向上や品質の安定化などを目的として、大量打設に対応できる CSG 連続混合装置 (重力・動力併用型 DK-II³⁾) を開発する⁴⁾とともに、CSG の自重落下による混合効率に関する研究を継続的に進めている⁵⁾。

本報告は、河床砂礫材料を母材とした CSG を対象として行なった室内実験、実機製造実験、模擬構造体施工実験の結果をまとめたものである。室内実験においては、様々な配合・材料・製造要因が CSG の密度と強度に及ぼす影響を把握した。実機製造実験では、連続混合装置実機により製造した CSG について、単位水量と川床砂礫の種類の間違を考慮した配合を選定し、これにより得られる CSG の性質を確認した。さらに、これらの CSG を打ち込んで構築した模擬構造体について密度と強度を評価することで CSG の施工性能についても考察した。

2. 室内実験による CSG の特性の評価

2.1 試験内容と使用材料、供試体の作成方法

室内実験においては、単位セメント量、単位水量、母材の粒度構成の各々の配合材料要因と、供試体作成時の締固め密度とが CSG の圧縮強度に及ぼす影響を測定した。

母材には忠別川産の河床砂礫を使用し、最大寸法が 80mm になるようにスクリーニングした自然粒度母材と、これらをふるい分けによって粒度調整したものを使用した。これらの粒度分布を図-1 に示す。母材密度は 2.46kg/m³である。

結合材として普通ポルトランドセメントを使用し、標準の単位量が 60kg/m³となるように母材に対して外割りで添加した。同じ種類の材料による実績を考慮し²⁾、母材の含水比が 10.0%となるように調整したので、単位水量としては 125kg/m³が標準となった。

練混ぜには、傾胴形の重力式ミキサ (公称容量 0.05m³, 最大内径 600mm, 回転数 27.6r.p.m.) を使用し

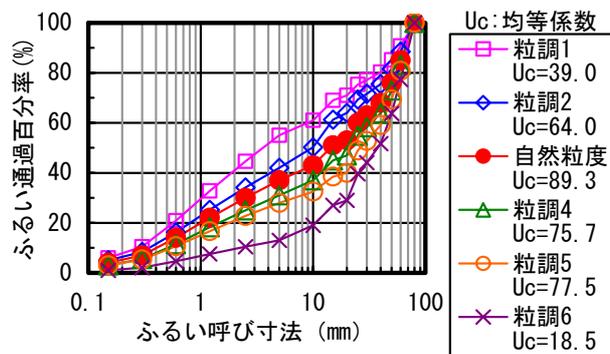


図-1 実験に使用した母材の粒度分布
Particle Distribution of Sand and Gravel

* 1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室
* 2 土木本部土木技術部
* 3 札幌支店土木工事業所

た。ミキサ内に母材 (30 リットル) を投入し、セメントをその上に載せた後、20 秒間回転してから排出し、排出した試料のうち骨材寸法が 40mm 以下のものをウェットスクリーニングによりふるい取り、 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ 供試体 3 本に成型した。

成型には外部振動機を使用し、湿潤密度が 2.0g/cm^3 程度 (現位置採取砂礫の 150mm までの粒径に換算すると湿潤密度 2.25g/cm^3 に相当する) となるように締め固めた。供試体は材齢 7 日まで 20°C で封緘養生してから圧縮強度試験に供した。

2.2 単位セメント量と単位水量、締め固め密度の影響

単位セメント量を $45 \sim 75\text{kg/m}^3$ の範囲で変化させた場合の圧縮強度の変化状態を図-2 に、単位水量を $44 \sim 209\text{kg/m}^3$ の範囲で変化させた場合の締め固め密度と圧縮強度の変化状態を図-3 に示す。

セメントを多く添加するほど、圧縮強度は増大する傾向にあるが、単位水量については、圧縮強度を最大とする単位水量が存在するようである。単位水量が一定量以下であると、締め固め時間を大きくしても所定の供試体密度が得られず圧縮強度が小さくなる。単位水量が大きくなれば密度の大きい供試体が容易に (単位水量 209kg/m^3 の場合締め固めなし) 作成されるが、単位水量が大きくなるほど圧縮強度は小さくなる傾向にあった。

単位セメント量と単位水量が同じ条件で、締め固め密度を変化させた時の圧縮強度の変化状態を図-4 に示す。単位セメント量や単位水量の影響に比較して締め固め密度の影響が非常に大きくなることが明らかであり、CSG の強度を設定する場合には、締め固め密度の設定が重要になることが明らかとなった。

2.3 母材の粒度構成の影響

図-5 および図-6 には、締め固め時間を一定とした場合に、母材の均等係数と粒形 5mm 以下の構成比率が圧縮強度および締め固め密度に及ぼす影響を示す。図-7 には同じように粒度分布定数⁶⁾が圧縮強度および締め固め密度に及ぼす影響を示す。

同じ母材であっても粒度構成が異なる場合には圧縮強度を最大とする粒度分布が存在する。粒度分布の構成要素としては、均等係数の影響は明確ではなく、微粒分量 (ここでは粒形 5mm 以下の量として区分) の影響が大きい。粒子の細かさ均質性の双方を同時に評価できる粒度分布定数 $b(=1/De^D$: ロージン・ラムラー式) により評価すれば、圧縮強度が最大となる粒度分布と締め固めの難易度が急変する粒度分布状態を独立して評価することが可能となるようである。

2.4 空隙セメント比による評価

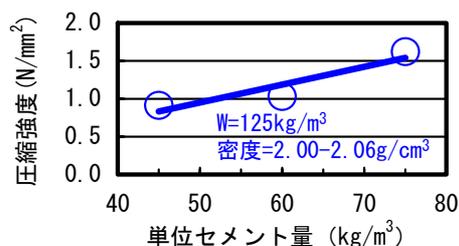


図-2 単位セメント量と圧縮強度の関係
Influence of Cement Content for Compressive Strength

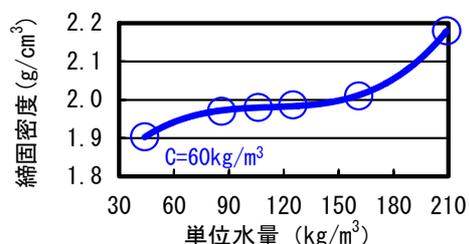
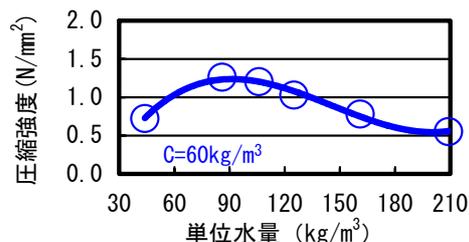


図-3 単位水量と圧縮強度の関係
Influence of Unit Water Content for Compressive Strength

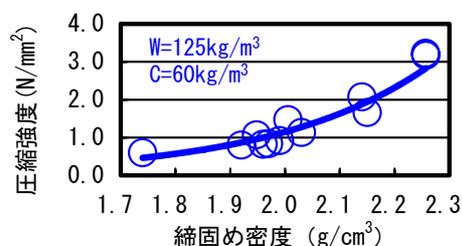


図-4 締め固め密度と圧縮強度の関係
Influence of Density for Compressive Strength

2.2 に示すように、CSG の強度の評価には水セメント比のほか供試体の密度も影響していることが明らかなので、供試体の密度から空隙率を算定し、空隙セメント比 $((A+W)/C$, A:空隙容積, W:単位水量(容積), C:単位セメント量(容積)) による圧縮強度の評価を試みた。

図-8 には、単位セメント量・単位水量・締め固め密度の異なる供試体の強度と空隙セメント比の関係を示す。図-9 は、図-8 に 2.3 において示した粒度分布の異なる母材に関する測定結果を重ねたものである。

単位水量が著しく大きい配合を除けば、単位セメント

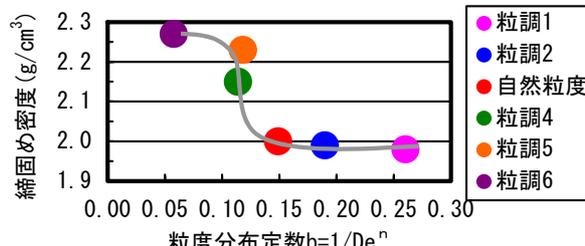
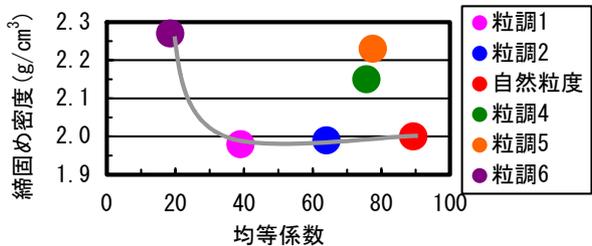
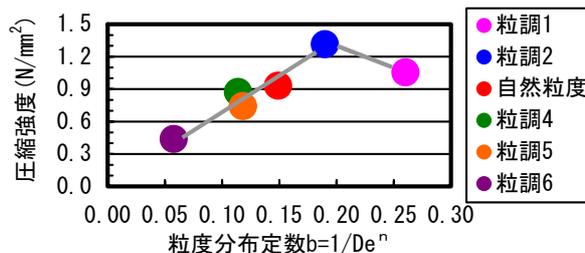
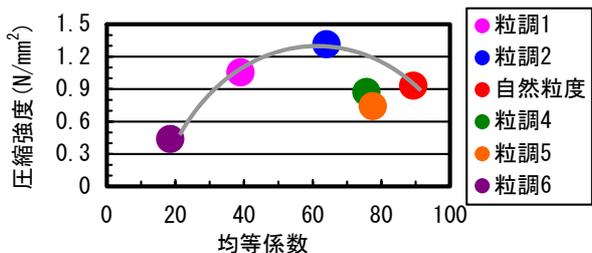


図-5 均等係数と圧縮強度，締固め密度の関係
Influence of coefficient for Strength and Density

種類	粒度特性定数 De	分布定数 n	粒度分布定数 $b=1/De^n$
粒調1	12	0.54	0.26
粒調2	19	0.56	0.19
自然粒度	30	0.56	0.15
粒調4	38	0.60	0.11
粒調5	43	0.57	0.12
粒調6	50	0.73	0.06

図-7 粒度分布定数 b と圧縮強度，締固め密度の関係
Influence of Particle Distribution Coefficient for Strength and Density

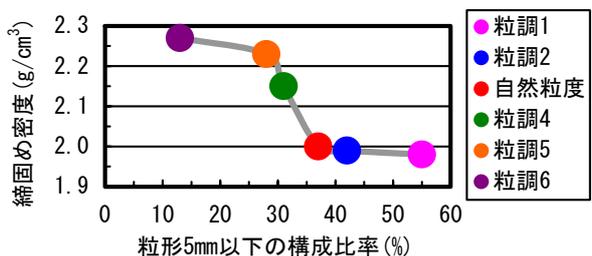
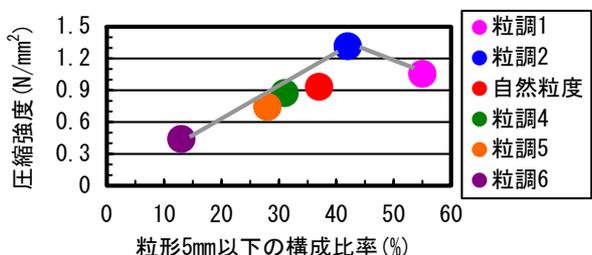


図-6 微粒分量と圧縮強度，締固め密度の関係
Influence of Fine Particle Content for Strength and Density

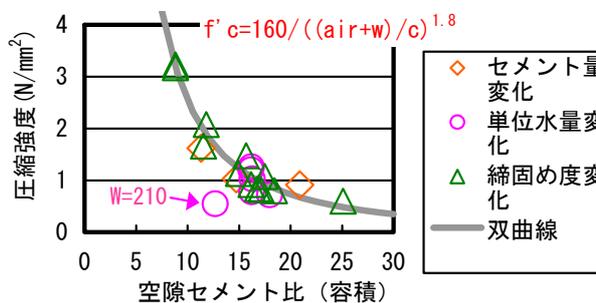


図-8 空隙セメント比と圧縮強度の関係
Influence of Void Cement Ratio for Compressive

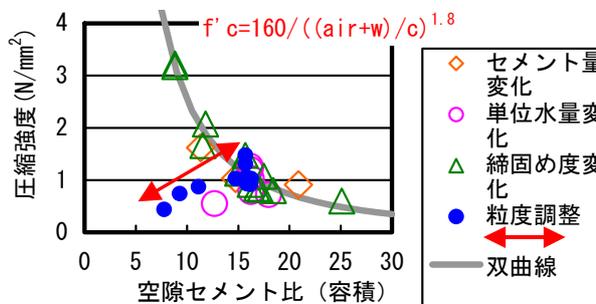


図-9 空隙セメント比と強度の関係に及ぼす粒度分布の影響
Influence of Particle Distribution for Relationship Void Cement Ratio and Strength

量・単位水量・締固め密度が圧縮強度に及ぼす影響は、空隙セメント比によって統一的に評価することができそうである。この場合、空隙セメント比と圧縮強度とは双曲線関係にあることが推察される。一方、粒度分布が異なる場合には、A, W, C による一義的な関係は当てはまらない。空隙セメント比—圧縮強度曲線は、ある粒度分布に固有に存在するものであることが考えられる。

3. 連続混合装置（重力・動力併用型 DK-II）により製造した CSG の特性

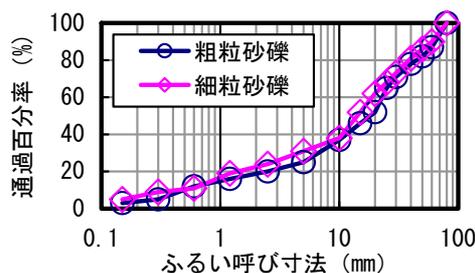
3.1 連続混合装置（重力・動力併用型 DK-II）の概要 連続混合装置（重力・動力併用型 DK-II³⁾）の概観と



写真-1 CSG連続混合装置DK-IIの全景
View of CSG Continuous Manufacturing System DK-II



図-10 連続混合装置の構成要素
Elements of CSG Continuous Manufacturing System



種別	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
粗粒砂礫	2.49	5.68
細粒砂礫	2.46	6.57

図-12 砂礫の粒度分布
Particle Distribution of Sand and Gravel

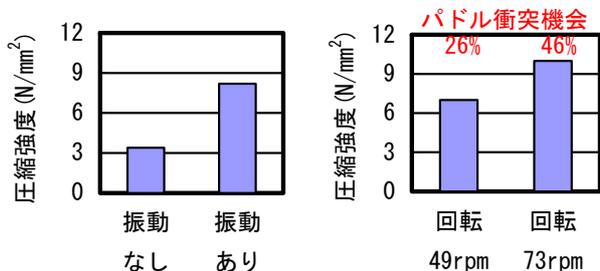


図-11 振動とパドルの回転が圧縮強度に及ぼす効果
Effects of Vibration of Equipment and Rotation of Paddle

装置の構成要素を写真-1 および図-10 に示す。ベルトコンベアによって砂礫材料を上方向に移動させる過程においてベルトスケールによって母材重量を計量し、これに応じて、散水による単位水量調整、所定量のセメント噴出吹付けを行なう。セメント吹付け過程において同時にパドルミキサによる母材の攪拌分散を行なうことで、効率の良いセメント分散を行ない、ボックス内での落下衝突過程により混合を行なうシステムである。パドルによる攪拌作用と自重落下時の衝突振動⁵⁾に電気動力によるエネルギーを与えることから「重力・動力併用型」となる。なおいずれの動力も図-11 に示すように CSG の混合

効果を高めることに寄与していると考えている。この装置を最大速度で稼働させれば、おおよそ 75m³/hr 程度の CSG が連続して製造可能である。

3.2 試験内容と使用材料、供試体の作成方法

実機製造実験は、3.1 に示した連続混合装置により、1 バッチを 3m³/hr 程度以上として CSG を製造したものである。2 種類の川床砂礫を母材として、異なった単位水量により得られる CSG の性質を確認した。

母材には、最大寸法を 80mm に調整した忠別川産の川床砂礫 2 種（粗粒：河川水面より上部分で採取，細粒：河川水面より下部分で採取）を使用した。これらの母材の粒度分布は図-12 に示すものである。両者の粒度のみかけの差は小さいが微粒分の質は異なるようである（土質試験による最適含水比は粗粒：8.6%，細粒 9.7%）。

結合材として普通ポルトランドセメントを 60kg/m³ 添加し、単位水量を 50～130kg/m³ の範囲で変化させ、フレッシュな CSG の締固め密度および、硬化 CSG の圧縮強度を測定した。

連続混合装置から排出した試料から 40mm 以下のものをウェットスクリーニングによりふるい取り、φ150×300mm の供試体に成型し、この重量から締固め密度

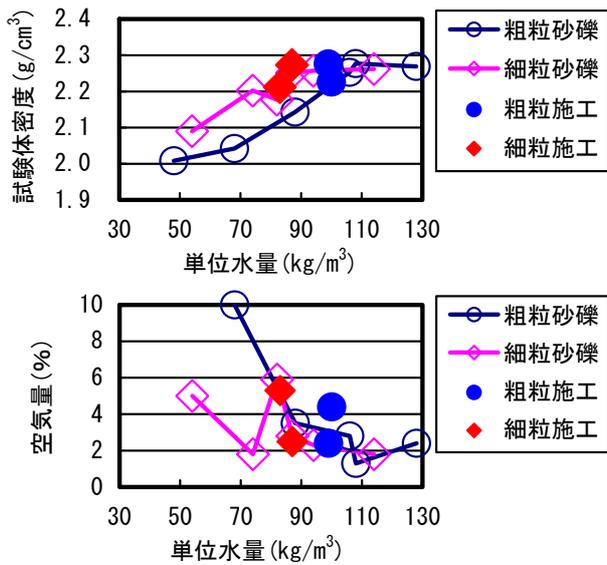


図-13 単位水量が密度と空気量に及ぼす影響
Influence of Unit Water Content for Density And Air Content

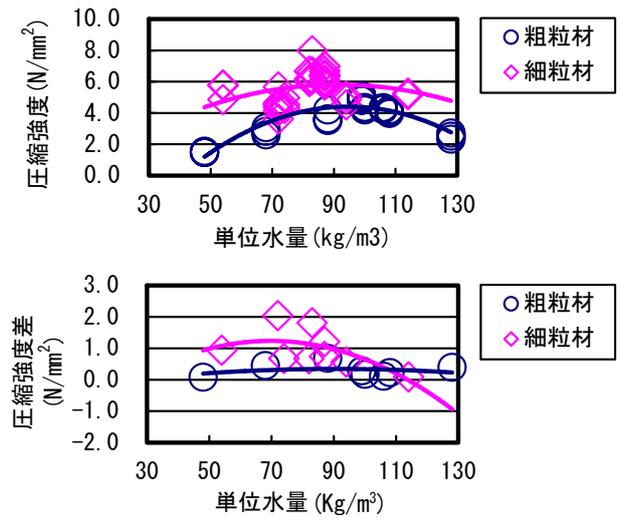


図-15 単位水量が圧縮強度とその変動に及ぼす影響
Influence of Unit Water Content for Compressive Strength and that Variation

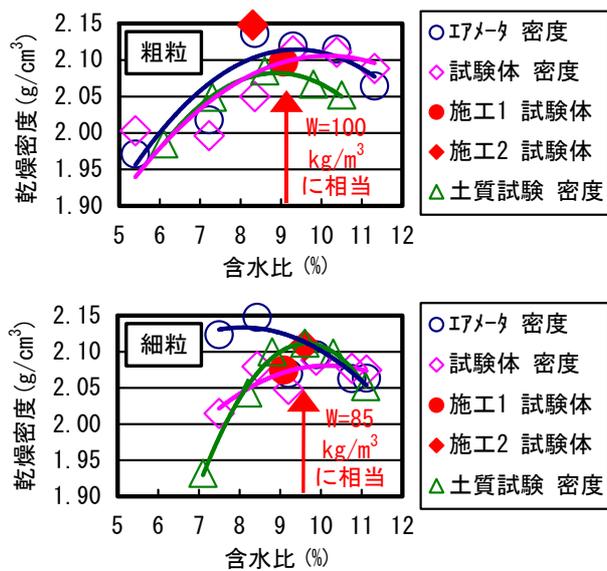


図-14 含水比と乾燥密度の関係
Relationship Moisture Ratio with Dry Density

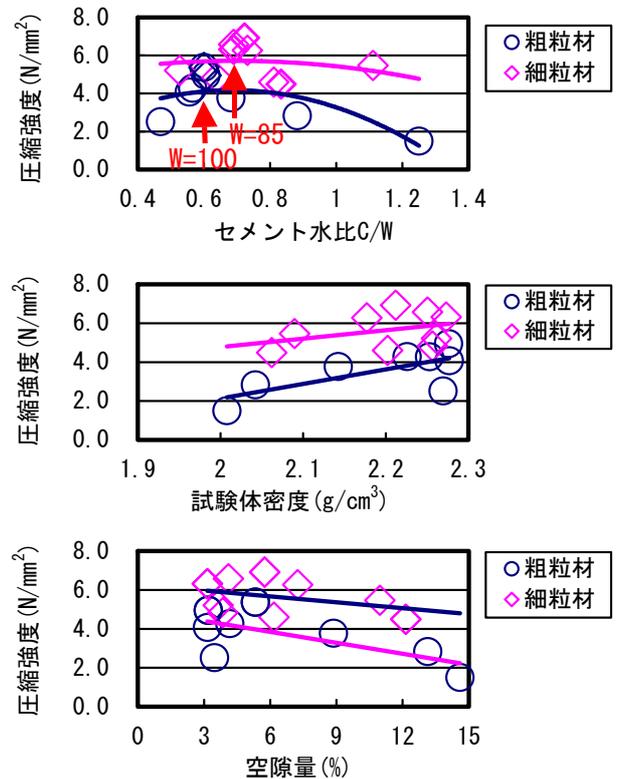


図-16 セメント水比と密度・空隙量が圧縮強度に及ぼす影響
Influence of Cement Water Ratio, Density and Void Content for Strength

を算出した。成型には RCD 用標準試験体作成装置⁷⁾を使用し(3層×40回)、最上層のみは手動タンパにて均し仕上げた。なおエアメータの手動タンパ充てでの測定も併用した。成型後は、型枠内で材齢 28 日まで封緘養生した後に圧縮強度試験に供した。

3.3 締固め密度の変化傾向

単位水量を変化させた場合の試験体密度および空気量の変化状況を図-13 に示す。単位水量が小さい場合には水量を大きくするほど密度も大きくなるが、一定の水量以上になるとおおむね最大密度となる。この下限の単

位水量は粗粒砂礫の場合には約 100kg/m³、細粒砂礫の場合には約 85kg/m³となった。空気量の測定結果からは、この水量程度以上での CSG の空隙はおおむね 2%程度で一定であることが推察されるものであった。

図-14 に示すように、母材の土質試験(突固めによる締固め試験)により得られる含水比と乾燥密度との関係

に、混合した CSG を炉乾燥して得た乾燥密度の測定値を合わせて示すと、最大締固め密度を得る下限の単位水量は、母材の種類ごとに、最適含水比となる単位水量に近いものとなっていた。

3.4 CSGの圧縮強度に及ぼす単位水量の影響

図-15には、単位水量が圧縮強度とそのばらつき（3本の供試体の最大値と最小値の差）に及ぼす影響を示す。粗粒砂礫、細粒砂礫ともに、各々の締固め密度を最大とする下限の単位水量（以下、これを仮に最適水量と呼ぶ）において圧縮強度が最大で、単位水量が大きくても小さくても強度は小さくなる傾向が認められた。

図-16に示すように、圧縮強度の変化をセメント水比との関係とした場合には、この最適水量を上回る領域においては圧縮強度の変化に対してセメント水比説が適用できるのに対して、最適水量以下ではこれが成立しない。単位水量が最適水量より小さい領域では、図-13に示すように締固め密度が小さく空気量が多くなる傾向が明らかであることから、この領域での強度の発現性はCSGの空隙量に依存していると推察される。このことは2.4において示した考察と同様である。

細粒砂礫の圧縮強度結果において単位水量の小さい領域での強度のばらつきが大きいことも、試験体成型時の締固めのばらつきによる空隙の多少の程度が影響しているように思われる。

なお、粗粒砂礫に比べて細粒砂礫の圧縮強度が大きい傾向にあるが、これは水セメント比の影響ではなく材料自体の性質に起因するものである。空隙セメント比-圧縮強度曲線は、粒度分布に対して固有であるだけでなく、ほかの何らかの母材の性質にも依存して変化することが考えられる。

4. CSGを打ち込んだ構造体の性質

4.1 模擬構造体の構築方法と調査方法

模擬構造体の構築には、表-1に示す粗粒配合および細粒配合の2種類の配合を用いた。これは、3.4における評価により圧縮強度が最大となる単位水量を選定したことによる。

連続混合装置DK-IIにより製造したCSGをダンプで運搬後、7t級ブルドーザにより25cm×2層で敷き均し、11t級振動ローラ(SD451)により、無振動2回、有振動6回、無振動2回（計5往復）により転圧した（1層目）。さらに9日後に同じ手順で積層した（2層目）。各層とも転圧終了後直ちにRI法による密度測定を行なった。敷き均し、転圧、転圧終了後の密度測定状況を写真2～

表-1 模擬構造体を構築した配合
Mix proportions of CSG for Model Structure

母材種別	水セメント比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³) (容積 (l/m ³))		
			水	セメント	母材
粗粒砂礫	167	2.0	100 (100)	60 (19)	2144 (861)
細粒砂礫	142	2.0	85 (85)	60 (19)	2155 (876)

普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm³
粗粒砂礫：密度2.49g/cm³ 吸水率：5.68%
細粒砂礫：密度2.46g/cm³ 吸水率：6.57%

*粗粒砂礫：河川水面より上の自然粒度の砂礫
*細粒砂礫：河川水面より下の自然粒度の砂礫



写真-2 打設状況 (ブルドーザによる撒出し)
Placing of Model Structure



写真-3 締固め状況 (振動ローラによる転圧)
Compaction of Model Structure



写真-4 転圧後の密度測定状況 (RI法)
Measurement of Density after Compaction

表-2 供試体密度と現場測定密度(RI)の一覧
Density of Specimens and Structure Measured by RI

測定項目	材料	粗粒砂礫		細粒砂礫		平均
		1層目	2層目	1層目	2層目	
	施工層					
	実質水量	100	99	83	87	(kg/m ³)
密度(40mm以下)	湿潤密度	2.226	2.276	2.212	2.273	(g/cm ³)
	乾燥密度	1.999	2.062	1.986	2.029	
密度(全粒度推定*)	湿潤密度	2.285	2.326	2.265	2.315	(g/cm ³)
	乾燥密度	2.097	2.141	2.075	2.109	
現場測定RI(平均)	湿潤密度	2.200	2.210	2.225	2.210	(g/cm ³)
	含水比	8.8	8.2	9.4	8.4	(%)
	乾燥密度	2.022	2.043	2.033	2.039	(g/cm ³)
試験体と現場測定との比率	湿潤密度	0.96	0.95	0.98	0.95	0.96
	乾燥密度	0.96	0.95	0.98	0.97	0.97

*粗粒8040表乾密度:2.58g/cm³,粗粒40以下表乾密度:2.45g/cm³
細粒8040表乾密度:2.52g/cm³,細粒40以下表乾密度:2.43g/cm³

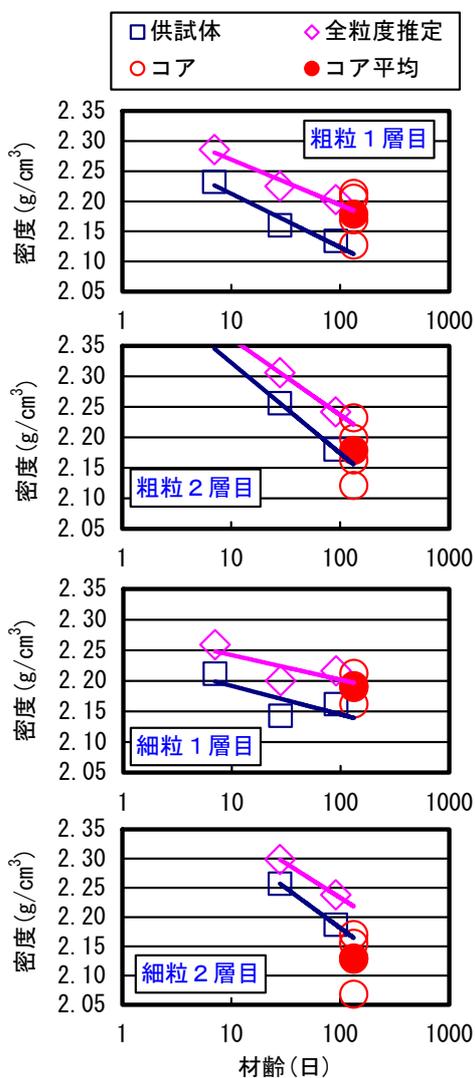


図-18 供試体密度の経時変化とコアによる密度の測定値
Time Dependent Change of Specimen Density and Density Measured by Cores

写真-4 に示す。その後材齢 100 日程度経過後からコア採取 (φ200mm,縦方向) を行ない、材齢 133 日に

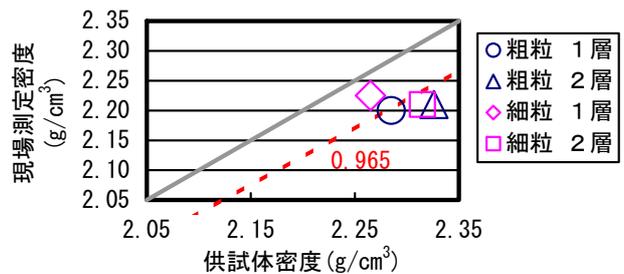


図-17 供試体密度と現場測定密度(RI)の相違
Difference of Density of Specimens from that of Structure Measured by RI

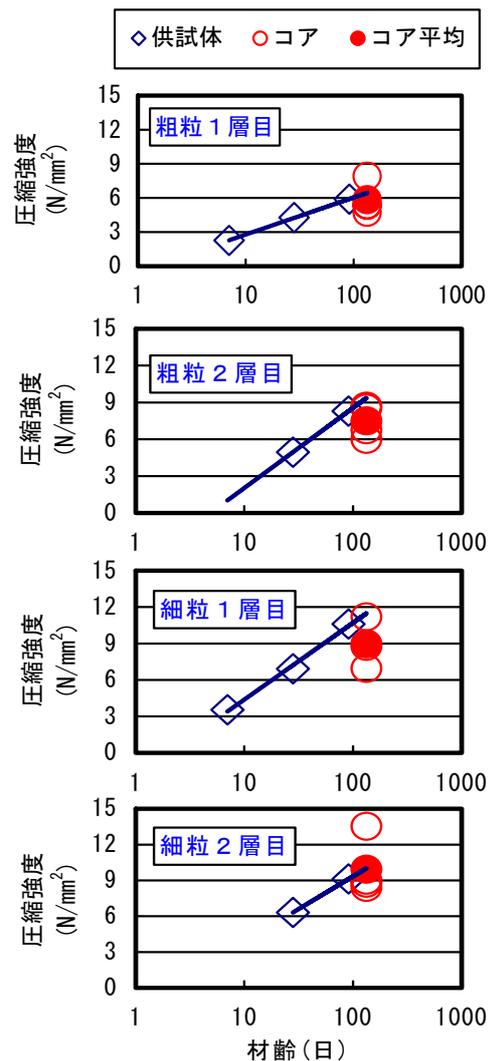


図-19 供試体強度の経時変化とコアによる強度の測定値
Time Dependent Change of Specimen Strength and Strength Measured by Cores

て圧縮試験に供した。密度は圧縮試験用のコア自体を用いて水中重量法により測定した。

4.2 構造体における密度と強度の評価

表-2 および図-17 には、打込み直後に行なった RI 法による密度測定結果を示す。供試体測定密度を 40mm～

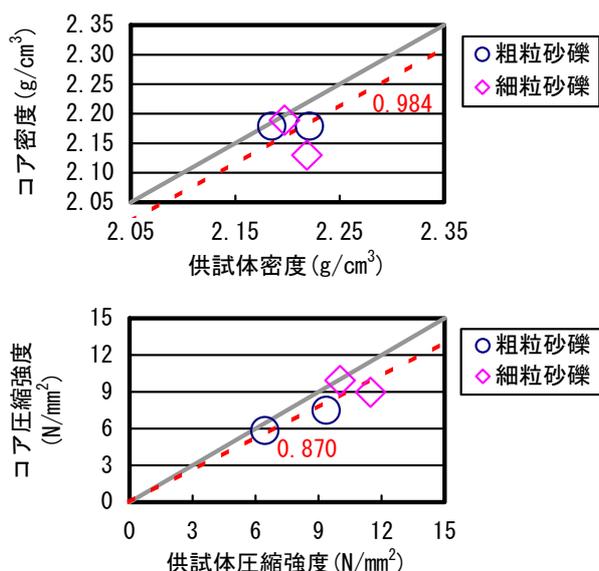


図-20 供試体密度・強度とコア密度・強度の比較
Comprehension Density and Strength of Core with those of Specimen

80mm の粒径の母材を含む全粒度に換算した締固め密度に対して、転圧した構造体の密度は 0.97 倍程度となり、現場施工としては良好な締固め状態といえるものであった。

図-18 および図-19 には、供試体密度および圧縮強度の経時変化と採取コアにより測定した密度と強度（材齢 133 日）を示す。材齢の経過にしたがい密度はやや小さくなる傾向にあるが、圧縮強度は増進している。

密度の経時変化と圧縮強度の増進を考慮して推定した材齢 133 日における供試体の密度・強度とコアの密度・強度との比率を図-20 に示す。コアの密度比は 0.98 であるので、供試体とコアではほとんど同様の密度になっていると考えて良い。

コア強度の比率は平均で 0.87 である。圧縮強度が小さい CSG のコアボーリングによるサンプリング試料であること、含まれる骨材の寸法（最大寸法 80mm）と供試体に含まれる骨材の寸法（最大寸法 40mm）が異なることを考慮すれば、構造体は、供試体とほぼ同等の強度が確保されていると評価されるものである。なお、供試体とコアとの密度比・強度比の評価においては粗粒砂礫と細粒砂礫の差異はほとんど認められなかった。

5. 結論

河床砂礫材料を母材とした CSG を対象として行なった室内実験、連続混合装置による実機製造実験および模擬構造体施工実験により、以下のことが明らかとなった。

- 1) セメントを多く添加するほど、圧縮強度は増大する傾向にあるが、単位水量については、圧縮強度を最大とする単位水量が存在する。
- 2) 単位セメント量や単位水量の影響に比較して締固め密度の影響が非常に大きくなるので、CSG の強度を設定する場合には、締固め密度の設定が重要になる。
- 3) 同じ母材であっても粒度構成が異なる場合には圧縮強度を最大とする粒度分布が存在する。粒度分布定数により圧縮強度が最大となる粒度分布と締固めの難易度が急変する粒度分布状態を独立して評価できる可能性がある。
- 4) 単位セメント量・単位水量・締固め密度が圧縮強度に及ぼす影響は、空隙セメント比によって評価でき、空隙セメント比と圧縮強度とは双曲線関係にある。
- 5) 連続混合装置 DK-II により製造した CSG においても、圧縮強度を最大にするのに最適な単位水量が存在すること、強度の発現性には CSG の空隙量が影響していることが確認された。
- 6) 河床砂礫による CSG を連続混合装置 DK-II により製造し打込んだ構造体は、密度が供試体とほぼ同等で、圧縮強度も供試体強度とおおむね同等になっていると評価できる。

謝辞

本研究のうち、CSG 連続混合装置 DK-II を用いて行なった実験は、大成建設札幌支店忠別ダムコンクリート堤体工事作業所/フィル堤体工事作業所内において行なったものである。フィールドを提供していただいた北海道開発局旭川開発建設部忠別ダム建設事業所の皆様、大成・地崎・竹中土木特定建設工事共同企業体の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤沢侃彦, 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.191, pp.2-23, 2000.
- 2) 芳賀敏二, 豊田光雄, 今井裕一, 有銘伸与: CSG材料の工学的性質の経時変化, ダム技術, No.169, pp.49-60, 2000.
- 3) 台形CSGダム技術資料作成委員会: 台形CSGダム技術資料, 2003.
- 4) 岡谷豊ほか: 砂礫とセメントの簡易混合機開発基礎実験, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集VI, 2002.
- 5) 大友健, 伊藤一教, 平川勝彦, 楠見正之, 道場信昌, 岡谷豊: 砂礫とセメントの自重落下による混合作用の評価とそのシミュレーション, 大成建設技術センター報, Vol.36, 2003.
- 6) 粉体—理論と応用—, 丸善, 1979.
- 7) RCD工法技術指針(案), 山海堂, 1998.