

論文 風化花崗岩(マサ土) を母材とした CSG の強度特性

楠 貞則^{*1}・添田 政司^{*2}・大和 竹史^{*3}

要旨：砂防・ダム分野では、コスト縮減、環境負荷軽減に対応した技術として廃棄岩などの現地発生材を有効利用した CSG (Cemented Sand and Gravel) 工法がある。本研究では、母材に低品質の風化花崗岩を用いた CSG の強度特性について検討した。この結果、CSG の強度特性に影響するものとして、単位セメント量、締固め密度、養生条件等の単独要素のみでなく、これらの組み合わせにより強度発現に違いがあることが明らかとなった。また、CSG の品質で特に重要な強度性状がフライアッシュを混合することで大幅に改善できることが分かった。

キーワード：CSG, 低品質骨材, 単位セメント量, 養生, 締固め密度, フライアッシュ

1. はじめに

近年、建設事業では、厳しい財政事情、自然環境に対する強い保護・保全の要望などから、コスト縮減、環境負荷軽減を踏まえた資源循環型社会に対応する技術が求められている。砂防・貯水ダム事業分野では、このような社会背景に適応するため、現地発生材を有効利用した CSG 工法が開発され、今後普及が期待されている^{1) 2)}。

CSG は、掘削ズリや河床砂礫など通常廃棄される現地発生材に少量のセメント、水を簡易な方法で混合し、汎用性の高い施工機械（ダンプトラック、バックホウ、振動ローラなど）のみで施工するものである。このため CSG は、良質な材料を購入することなく、土砂搬出などの作業も少ないことから、コスト縮減、環境負荷軽減が期待できる。さらに硬練りコンクリートで型枠を用いないことも可能であり、施工の簡素化、工期短縮も期待できる。また、本工法は、材料の密度、吸水率など品質面における制約が特になく、砂防ダムでは部位ごとに CSG の目標強度のみが設定され、貯水ダムでは新形式の台形 CSG ダム²⁾として CSG の強度に応じて堤体

形状が設定される。いずれも CSG の強度特性が重要となる。この CSG の強度に関して砂防ダムでは、現地発生材が低品質で所定の強度を満足できない場合、セメント量の増大や購入骨材の混合などで所定の強度を確保することもあり³⁾、これら対策の程度によっては CSG 工法でコスト縮減に寄与しないこともある。

一方、石炭火力発電所から産業廃棄物として産出されるフライアッシュは、今後も発生量が増加すると予想されており、社会全体の循環型社会への移行に沿った有効利用用途の拡大・開発が急務となっている。こうした中、フライアッシュを利用して低品質骨材を用いたコンクリートの品質改善、向上に関する研究も行われている⁴⁾。

本研究では、低品質の現地発生材として風化花崗岩を母材とした CSG について単位セメント量、養生条件、締固め密度、粒度構成などの条件を変えて強度特性を把握することで、現地発生材の品質が CSG の品質にどのような影響を及ぼすかを総合的に検討するとともに、強度性状の改善方法としてフライアッシュを用いた CSG の強度特性について実験的検討を行った。

*1 福岡大学 工学部社会デザイン工学科助手 修士(工学) (正会員)

*2 福岡大学大学院 工学研究科資源・循環工学専攻助教授 博士(工学) (正会員)

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-1 母材の基本物性

試料名	粒度区分	粒度分布		密度・吸水率試験結果		
		掘削土 (%)	試料調整 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
現地発生材 (掘削試料)	40mm未満～ 20mm以上	8.2	-	2.56	2.50	2.2
	20mm未満～ 5mm以上	26.8	35	2.54	2.47	2.9
	5mm未満	65	65	2.38	2.26	5.49
試験試料(調整試料)	(20-5mm)×0.35+(5mm以下)×0.65			2.44	2.33	4.6

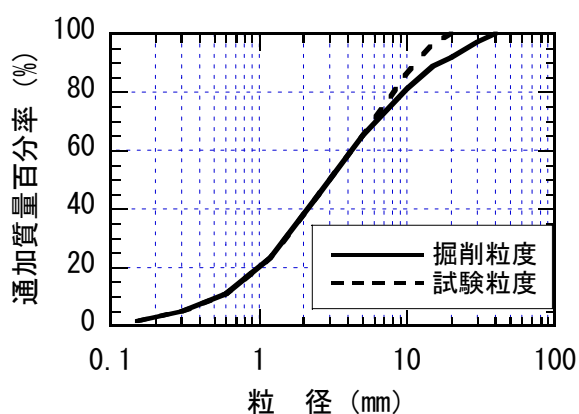


図-1 母材の粒度分布

2. 実験概要

2.1 使用材料

CSG は、セメントと現地発生材を主材料としたものであり、セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）を使用した。また、試験の中で強度性状の改善方法の検討も実施しており、これに用いたフライアッシュ（以下、FA と記す）は JIS A 6201 に適合した II 種（密度 2.33g/cm³、比表面積 4200 g/cm³）とした。

試験に使用した現地発生材（以下、母材という）の基本物性を粒径別に整理したものを表-1 に、粒度分布を図-1 に示す。母材の密度および吸水率は、5mm 以下で砕砂の規定値(JIS A 5005: 密度 2.5 以上, 吸水率 3.0% 以下)を下回っており、試料調整した母材も規定値以下の低品質の材料である。母材の試験粒度について、CSG 工法の実績では、母材の最大粒径は通常 80~150mm を想定するが、本試験に用いた母材（風化花崗岩）は風化が進行しており 20mm 以上の占める割合

が 8.2% と少ない。本試験は設定条件ごとの CSG の強度特性に関する基本的性状把握を目的としていること、20mm 以上の占める割合が 10% にも満たないことから、母材の最大粒径を 20mm とし、粒度構成を 20~5mm が 35%、5mm 以下が 65% に調整した。

2.2 検討項目

本試験は、風化花崗岩を母材に用いた CSG の強度特性について、単位セメント量・養生条件に関する検討（ケース 1）、締固め密度の影響および空隙構造に関する検討（ケース 2）、フライアッシュ利用による強度改善効果に関する検討（ケース 3）の 3 つの項目で検討した。

ケース 1: 本試験では、単位セメント量を 80, 100, 120kg/m³ と変化させ、養生条件を CSG で一般的な 20℃ の恒温室での封緘養生と、コンクリートで一般的な 20℃ の水中養生とで強度発現の違いについて検討した。

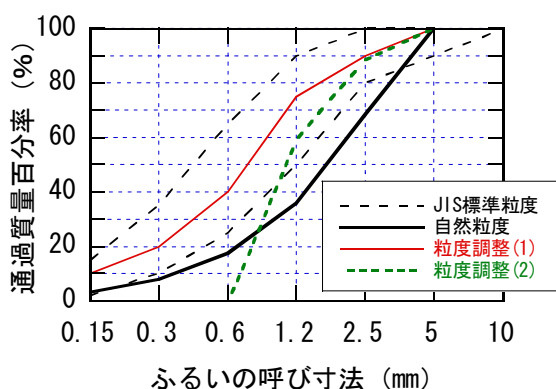
ケース 2: 本試験では、低品質な母材で特に 5mm 以下の構成比が 60% を超えるような風化の著しい材料において、締固め密度の違いが強度に及ぼす影響について検討した。また、試験体から空隙率を算出し、空隙率と強度の関係および 5mm 以下の粒度分布が強度に及ぼす影響について検討した。空隙率とは、供試体の理論密度と実密度の差を空隙容積とし、理論密度で除して算出したものである。

ケース 3: 配合計算上で母材に対して容積割合で 5, 10, 15% の FA を容積置換した配合の強

表－2 CSG の配合

検討ケース	水セメント比 (%)	5mm以下粒度	フライアッシュ置換率* (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	フライアッシュ FA	母材		
								5mm以下	20～5mm	
ケース 1	175	自然粒度	—	65	140	80	—	1883		
	140							1224	659	
	117							1866		
ケース 2	140	自然粒度	—	65	140	100	—	1213	653	
								1852		
								1204	648	
ケース 3	140	自然粒度	5	65	140	100	89	1152	621	
			10					179	1680	
			15					268	1586	588
		調整粒度 (1)	5	89	1766	618				
			—	—	1859					
			5	89	1208	651				
		調整粒度 (2)	5	89	1839	644				
			—	—	1195					
			—	—	1935	677				

*フライアッシュ置換率とは母材の容積に対する置換率



図－2 5mm 以下の粒度分布

度改善効果について検討した。また、5%置換配合については、5mm 以下の粒度構成を変えた母材での強度改善効果についても検討した。なお、5mm 以下の粒度構成は、無調整のものを自然粒度、砕砂 (JIS A 5005) の規定値を満足する範囲に調整したものを調整材料 (1)、0.6mm 以下をカットしたものを調整材料(2)と称した。これら3通りの粒度分布を図－2に示す。

2.3 CSG の配合及び試験方法

本試験で用いる配合を表－2に示す。配合の単位水量は予め予備試験として JIS A 1210 に準拠した締固め試験を実施し、母材の締固め特性 (最適含水比, 最大乾燥密度) を求め、単位水量を 140kg/m³ に設定した。

(1) 練混ぜ及び供試体作製

CSG は、一回の練混ぜ量を 30ℓとし、可傾式ミキサを用いて、母材とセメントで 30 秒空練りした後、水を加えて 3 分間練混ぜた。

供試体は、φ10×20cm の円柱供試体を用いて、CSG を型枠内に 2 層に分けて突固め作製し、供試体上面は JIS A 1132 に準拠し、キャッピングを実施した。供試体の養生は、水分の逸散防止のためにビニール袋を用いて封緘した封緘養生を基本とし、所定の材齢後に強度試験を実施した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠した。試験材齢は材齢 7 日、28 日とした。また、一部試験においてコンプレッソメータによるひずみの測定を行い、台形 CSG ダム技術資料²⁾にある弾性領域強度を測定するとともに、その勾配から静弾性係数を求めた。なお、弾性領域強度とは、応力ひずみ曲線における直線区間の最大応力である。

3. 実験結果及び考察

3.1 単位セメント量・養生条件の影響に関する検討

図－3 に養生条件ごとの単位セメント量と圧

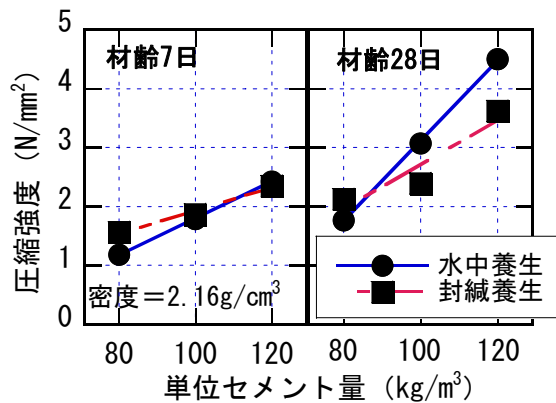


図-3 養生条件の違いによる単位セメント量と圧縮強度の関係

縮強度の関係を示す。材齢 7 日の圧縮強度は、単位セメント量の増加によって強度も大きくなっているものの、水中養生と封緘養生の間に強度発現の明瞭な差はない。材齢 28 日の圧縮強度は、材齢 7 日と同様に単位セメント量の増加で強度発現も増加傾向を示すが、単位セメント量と養生条件の組み合わせで強度発現の伸びに違いが確認された。単位セメント量 80kg/m^3 では、封緘養生の方が水中養生より若干強度が大きい。これに対して、単位セメント量が 100kg/m^3 、 120kg/m^3 と増加するに伴い、水中養生の方が強度の伸びが顕著となり、封緘養生を大きく上回った。よって、単位セメント量が少なければ、養生条件が強度に与える影響は小さく、単位セメント量が増加すれば、養生条件が強度に与える影響は大きくなるのがわかる。このことは、単位セメント量が増加するに従い水中養生の方がよりセメントの水和反応による組織の緻密化がなされるものと考えられる。CSG の養生は、一般的に封緘養生がなされているが、これは CSG の強度管理において単位セメント量次第でコンクリートよりも厳しい条件下とも考えられ、他の母材による追加検討も含めて、今後詳細に検討する必要がある。

3.2 締固め密度の影響および空隙構造に関する検討

図-4 に材齢 28 日の締固め密度と圧縮強度の関係を示す。

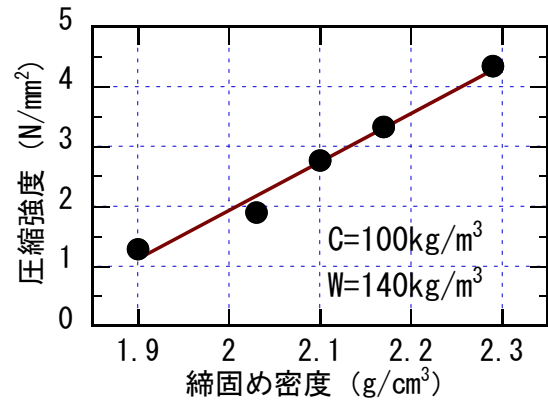


図-4 締固め密度と圧縮強度



1.90g/cm³ < 2.16 g/cm³ < 2.29 g/cm³
 密度 小 → 大
 空隙 多い → 少ない

写真-1 供試体の外観状況

圧縮強度は、締固め密度の増加に伴い、大きくなる傾向が顕著であり、強度に対する締固め密度の影響が大きいことが分かる。写真-1 に供試体の外観写真を示す。供試体の外観は、締固め度により異なっており、締固め密度が小さければ表面に細かい空隙が多くパサついた状態で、締固め密度が大きければ表面の空隙が少なくなっている。また、締固め度によって試験体の破壊形態も異なっており、 2.3g/m^3 の締固め密度の場合、5mm 以上の母材が砕けているのが確認された。このことは、風化が著しいような低品質材料を用いる上で過度な締固めを実施した場合、粒度構成が変化し品質のバラツキを起こすことも考えられ、品質管理の面で過度な締固めは避けるべきと考えられる。

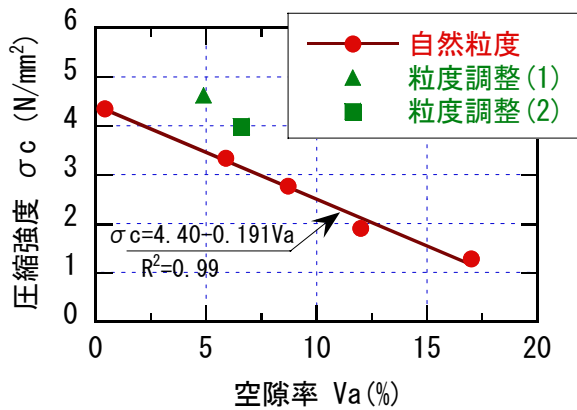


図-5 空隙率と圧縮強度の関係

図-5に材齢28日における空隙率と圧縮強度の関係を示す。空隙率は供試体の密度（締固め密度）から算出している。5mm以下の粒度分布が同一の母材（自然粒度）であれば、空隙率は強度と高い相関性を示し、空隙率が小さいほど強度が大きくなる傾向が確認された。5mm以下の粒度分布が異なる粒度調整(1)、粒度調整(2)では自然粒度に対して、同程度の空隙率であっても強度に差異が見られる。このことから、空隙率と強度の関係は、ある一定の粒度分布に対して個別に相関関係が成り立つものと考えられる。風化花崗岩のような低品質の材料をCSGの母材として適用する場合も、締固め密度や空隙率を管理することが重要であることがわかる。

3.3 フライアッシュ混合による強度改善効果に関する検討

図-6にFA混合率と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、FAが混合されていないものに対して、FAを混合したFA=5、10、15%が1.7～1.9倍と大幅な強度増加となり、FAによる強度改善効果が確認された。この強度の伸びからは、FAが単なる母材の置換材に留まらず、セメントと同様に結合材としての役割を果たしていることが考えられる。

砂防ソイルセメント活用ガイドライン¹⁾に準拠して、本試験のCSGを砂防ダム内部材(現地発生材の大量使用)として適用した場合、目標強度レベルはレベルⅢ(3.0～6.0N/mm²)となる。この配合強度は目標強度×割増係数(k=1.5)と設定

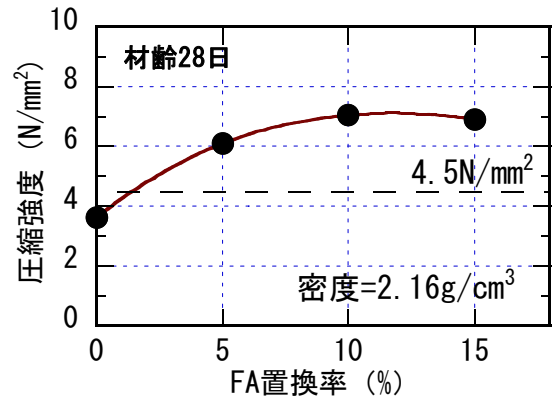


図-6 FA置換率と圧縮強度

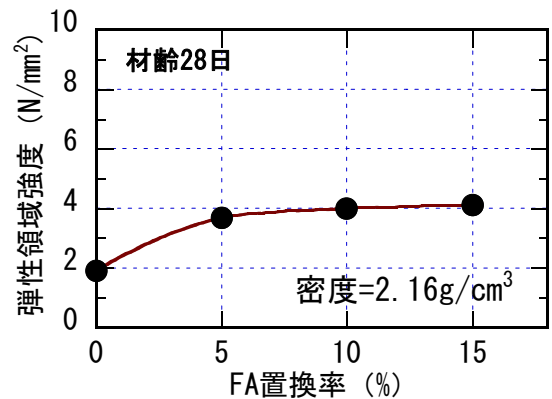
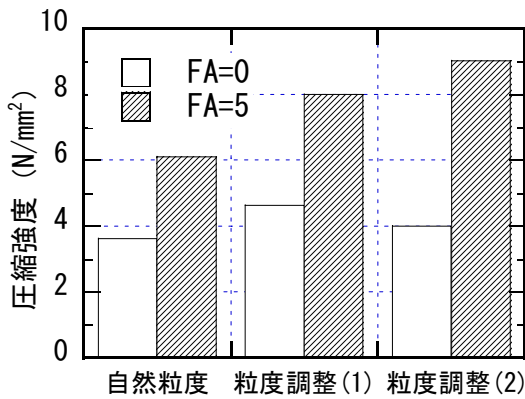


図-7 FA置換率と弾性領域強度

され、目標強度を3.0N/mm²とすると、3.0×1.5=4.5N/mm²となる。FA無混合では、この値を満足しないが、5%置換したものは大幅な強度増となり、これを満足した。通常、目標強度を満足するためには、セメント量の増大、再生クラッシュランを含め別の購入骨材との混合がなされている。FA混合方法は、使用方法が簡易で、経済性、産業廃棄物の有効利用の観点からも、他の強度改善方法と同等以上にCSGの強度改善に有効的な対策の一つと考えられる。このため、本試験で使用した風化花崗岩のような低品質な母材においても活用用途が広がるものと考えられる。また、FAの混合率と圧縮強度については、密度一定の条件のもとでFA=10%が最も大きくなったが、FA=5、15%に比べてその差は小さい。

図-7にFA混合率と弾性領域強度の結果を示す。弾性領域強度についても、圧縮強度と同様な傾向が得られた。圧縮強度（ピーク強度）に対する弾性領域強度は、FAの混合の有無およ



図一 8 5mm 以下の粒度分布と FA の圧縮強度改善効果

びFA混合率に関係なくいずれも6割程度となった。また、表記はしていないが弾性係数もFAの混合率に関係なく同程度の値を示した。

図一 8 に 5mm 以下の粒度分布を変えた母材に FA=5% を混合した材齢 28 日の圧縮強度結果を示す。本試験では、単位水量、密度などの条件を一定としているため一概に言えないが、5mm 以下の粒度分布の違いによって FA の圧縮強度改善効果に違いが見られる。圧縮強度は、FA を混合していないものでは、粒度調整(1)>粒度調整(2)>自然粒度の順であるのに対し、FA を混合した FA=5% では、粒度調整(2)>粒度調整(1)>自然粒度の順となった。また、FA を混合しないものに対する FA=5% 置換した場合の圧縮強度の増加率は、自然粒度、粒度調整(1)が 1.7 倍程度であるのに対し、粒度調整(2)は 2.3 倍程度となっている。中村らの研究⁵⁾によれば、CSG 母材に含まれる良質の微粒分(粒径 0.075mm 以下)を多く含む母材では微粒分含有率がかなり大きい範囲まで安定した強度が期待できるとともに、強度分布の傾向がモルタル部分の強度に起因することが報告されている。本試験結果でも FA が良質の微粒分と同様な役割を果たしたものと考えられる。以上のことから、最近実績が増えている CSG に風化花崗岩等のような低品質な材料を適用しても FA 混合などの対策で品質確保が容易に出来ることは、砂防、ダム分野以外への活用用途が広がるものと期待される。この

ため FA の置換率を含めた FA の有効利用については、締固め性状、母材の種類、細骨材率等を含め、今後さらに詳細に検討する必要がある。

4. 結論

本研究は、低品質の現地発生材である風化花崗岩(マサ土)を母材とした CSG の強度特性について基礎的な検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 単位セメント量と強度は相関があり、単位セメント量が増加すると強度も大きくなる。
- (2) 単位セメント量が 80kg/m^3 の場合、養生条件で強度の伸びに差は認められないが、単位セメント量が 100kg/m^3 以上では、水中養生方が強度の伸びが大きくなる。
- (3) 締固め密度の増加に伴い空隙率も減少し、強度が大きくなる。
- (4) ある一定の粒度分布に対して、空隙率と強度の間に高い相関関係が成立する。
- (5) FA 混合で大幅な強度改善効果が認められたことから、低品質な母材を用いた CSG の強度改善方法として他の改善方法と同等以上に有効な対策である。

参考文献

- 1) 水山 高久ほか:砂防ソイルセメントガイドライン, 砂防ソイルセメント活用研究会, 鹿島出版会, 2003.1
- 2) 廣瀬 利雄ほか:台形CSG技術資料, 台形CSGダム技術資料製作委員会, 2003.11
- 3) 吉田達生:CSG 工法による砂防ダム建設, 平成 17 年度九州国土交通研究会, V 部門 No.20, 2005.7
- 4) 守屋健一ほか:フライアッシュによる低品質細骨材コンクリートの品質改善に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp483-484, 2005.9
- 5) 中村 洋祐ほか:CSG 母材に含まれる微粒分と強度・変形特性に関する実験的検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会資料, pp439-440, 2005.9