

月面レゴリスの模擬砂を用いた CSG モルタルに関する研究

日大生産工(院) ○水野 翔太 日大生産工(学部) 荒井 宏太 日大生産工(学部) 石川 幸汰
 日大生産工(学部) 石崎 貴嗣 日大生産工(学部) 遠藤 隆史 日大生産工(学部) 喜多 滉介
 日大生産工(学部) 高根澤 慶太 日大生産工 杉橋 直行 日大生産工 山口 晋

1. はじめに

米国航空宇宙局(NASA)はアルテミス計画を進めており、2026年の有人月面着陸を目指している。着陸の成功後は、本格的な月面での調査フェーズに移行するとされており、長期にわたる月面での研究調査が行われる予定である¹⁾。

地球から月への輸送費用は1kgあたり約1億円かかるとされており²⁾、本格的な月面拠点基地建設に資材を輸送することは現実的ではない。そのため、月面基地の建設は、現地材料利用(以下、ISRU)の技術を用いて、調達・建設することが求められる。

資材に供する材料は主に月面を覆う細かい砂(以下、レゴリス)を使用することが現実的であり、これらは科学的手法によりアルミナセメントが生成できる³⁾ことから、月面にてセメントを用いたコンクリートの製造が可能である。一方で、練り混ぜには月に存在する水および生成水が使用できることが既往の研究で明らかにされているが、これらは極少量であることから、水の使用量は極力減らす必要がある。

そこで我々は、ダム建設時にコスト削減・環境負荷低減を目的として適用される技術である、CSG(Cemented Sand and Gravel)工法のコンクリート製造方法に着目し研究を行った。ここで、CSG工法とは建設現場周辺の砂礫や石塊を用いて少量の水とセメントを混合して敷き均したのちに振動ローラーにより転圧し構造物を造成する工法である⁴⁾この工法は月面での建設が想定されるロケット発射場の路盤材や道路床板へ技術転用が可能と考えられる。以上のことから、本報告では、月面の床板等に使用できる強度を有するCSGモルタルに関

する基礎的実験として、CSG工法に用いられる割合であるセメント:骨材の1:20を想定し、その際の最適水セメント比について検討した。

2. 実験方法

2.1. 供試体作製

実験に使用した供試体は、φ50×100mmのモルタル硬化体で、細骨材は陸砂(千葉県富津市産、密度 $\rho_s=2.60\text{g/cm}^3$)、セメントはアルミナセメント(密度 $\rho_c=3.01\text{g/cm}^3$)を使用した。月分野の研究ではアポロ計画で採取したレゴリスを模擬して作製するレゴリスシミュラント(以下、模擬砂)が用いられるが、本研究でも同様に、図-1のレゴリスの粒度分布⁵⁾に合わせ0.4mm、0.25mmにて骨材をふるい分け、模擬砂として用いた。細粒で水の発散がはげしく表乾状態の再現が困難なため、気乾状態の砂に、練り混ぜの際のみ水を添加した。当初、CSG工法の配合を参考⁶⁾に水セメント比(以下、W/C)150%で作製した供試体は固化せず脱型が困難なため、

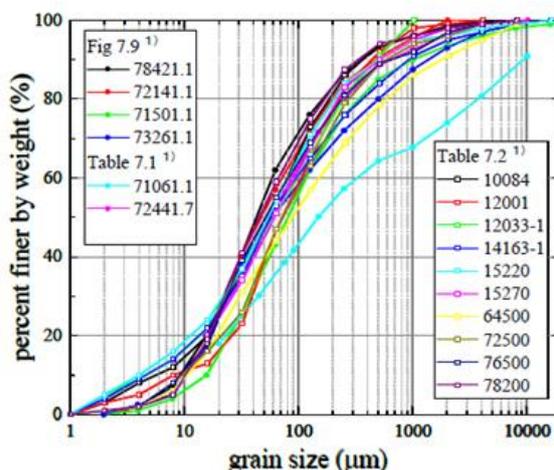


図-1 レゴリスの粒度分布

表-1 配合表

	W/C	kg/m ³		
		W	C	S
	(%)	(g)	(g)	(g)
No.1	400	320.0	80.0	1698.9
No.2	410	328.0	80.0	1678.1
No.3	420	336.0	80.0	1657.3

	W/C	kg/m ³		
		W	C	S
	(%)	(g)	(g)	(g)
No.4	430	344.0	80.0	1636.5
No.5	440	352.0	80.0	1615.7
No.6	450	360.0	80.0	1594.9

The Research on CSG mortar using simulated sand of lunar regolith
 Shota MIZUNO, Kota ARAI, Kota ISHIKAWA, Takashi ISIZAKI,
 Takashi ENDO, Kosuke KITA, Keita TAKANEZAWA,
 Naoyuki SUGIHASHI and Shin YAMAGUCHI

脱型可能となるW/C400%を基準とし、W/Cが、410%、420%、430%、440%、450%の6水準で供試体を作製し、最適W/Cの検討を後述する圧縮試験により評価した。練り混ぜはJIS A 6209に準拠し、図-2に示す木製の円柱棒を用いて転圧しながら作製した。

2.2. 強度測定試験

試験方法ならびに載荷速度は JIS A 1108 に準拠し試験を行う。供試体はφ50×100mmの円柱供試体を使用し、W/C毎に3本の平均値で評価した。

3. 実験結果および考察

材齢28日の圧縮強度試験結果を図-3に示す。この結果によれば、W/C400、410の場合は、圧縮強度が約1.9N/mm²にとどまったものの、W/C420%から増加し、W/C430%の場合で最大圧縮強度の3.1N/mm²が得られた。これは通常のセメント硬化体のW/Cの増加に伴い圧縮強度が減少する傾向とは異なるが、気乾状態の骨材が練り混ぜ時の投入水を吸水し、セメントの水和反応に必要な水を不足させることから生じたと推察した。その一方、骨材への吸水が飽和状態となり、セメントへ十分に水が供給された状態となったW/C430%以降は、水セメント比の増加に伴い強度は低下した。これは、ブリー징の現象が確認されたことによる、強度低下であると考えた。W/C450%の場合は、ブリー징の影響は更に顕著となった。この時のブリー징率をJIS A 1123 により測定した結果は3%であったことから、骨材の単一粒度による影響を大きく受けていると考察した。

得られた強度より月面での使用を鑑みると、道路橋示方書にて定められる床板のコンクリート設計基準強度⁶⁾は $\text{ock}=24\text{N/mm}^2$ とされており、月の重力は地球の1/6であることから走行する車両荷重も1/6と想定すると月面における床板の設計基準強度は $\text{ock}=4\text{N/mm}^2$ となる。現状、最も高強度であるW/C430%においても、目標基準強度に達していないものの、養生に伴う強度増進に期待すれば、長期材齢56日では、 $\text{ock}=4\text{N/mm}^2$ を満足できると推察している。

4. まとめ

- 1) 圧縮強度結果から、W/C430%が最適水セメント比である。
- 2) 供試体の作製精度均一化を図るため、締固め方法の検討を行う。
- 3) 月での路盤材および床板の設計基準強度を達成できるセメント量を調整する。



図-2 作製供試体

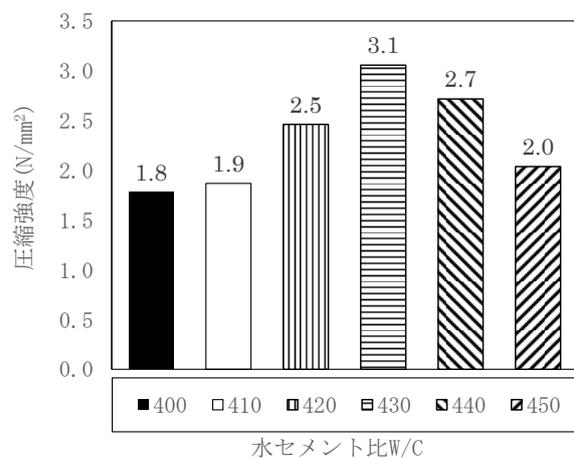


図-3 圧縮強度試験結果

参考文献

- 1) 齊藤 亮介, 鶴山 尚大, 宇宙とコンクリート～月面基地建设～, コンクリート工学, 54 巻(2016)pp.971
- 2) 金森 洋史, 地産地消(資源利用)技術, 宇宙探査イノベーションハブ, 2017, アプローチ pp.3
- 3) 畑中 菜穂子, ルナコンクリートの実現に向けて, コンクリート工学, 55 巻(2017)pp.113
- 4) 山口 嘉一, 岩下 友也, 佐々木 晋, 台形 CSG ダムの材料特性と設計方法に関する研究, 国立研究開発法人 土木研究所 論文集 14.3, (2008)pp.2
- 5) 松島 亘志, 小林 泰三, 宇宙と地盤工学, 地盤工学誌第 4 章 レゴリスの土質力学 p1-9
- 6) 川崎 秀明, 平山 大輔, CSG を用いたダム技術に関する最新動向 p34-39
- 7) 国土交通省道路局, 道路橋の繊維補強コンクリート床板の性能確認マニュアル(案), (2023), pp11 国土交通省道路局, 道路橋の繊維補強コンクリート床板の性能確認マニュアル(案), (2023), pp11