

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656265

研究課題名(和文) 月面構築物のための水の不要なコンクリートの製造とその特性に関する研究

研究課題名(英文) STUDY ON THE PROPERTIES AND PRODUCTION OF WATER-LESS LUNAR CONCRETE FOR THE MOON BASE CONSTRUCTION

研究代表者

堀口 敬 (HORIGUCHI, TAKASHI)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30094816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、将来の月面構築物の主要材料として期待される水の不要なルナコンクリートの製造法とその特性を中心に検討し、さらに、ルナコンクリートを用いた月面構築物の設計システムの構築を目指した研究である。このため、本研究では3年計画の研究計画を立案し、初年度は水を用いないルナコンクリートの製造手法とその特性に関する研究を行い、次年度では最適なルナコンクリートの物性評価を中心に実施した。最終年度では、前年度までに実施した実験の補足実験と開発したルナコンクリートを用いた月面構築物の設計システムの基本的な概念を構築したものである。

研究成果の概要(英文)：This study focused on the production of waterless lunar concrete. Sulfur concrete with the several additives such as simulated regolith and shot metallic fibres were used to improve the compressive strength and the flexural strength of the waterless lunar concrete. After the 3 years research of the waterless lunar concrete, the results showed the possibility of the waterless lunar concrete production. The optimum sulfate content and the optimum regolith addition to the waterless lunar concrete were found to improve the compressive strength and the flexural strength. It is found that the short metal fibre improves the flexural strength of the waterless lunar concrete with the addition of 2 to 6 % of the fibre.

This study propose the fundamental lunar base construction concept with applying the method of construction of Roman structure such as Roman aqueduct and dome structure using with the waterless small lunar concrete blocks.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：ルナコンクリート 宇宙開発 月面構築物 古代ローマ技術 水不要コンクリート

1. 研究開始当初の背景

本研究者は、ルナコンクリートの先駆者である T.D.Lin 博士との共同研究から DMSI 法という水の代わりに水蒸気を用いたコンクリートの製造法の提案や、ISRU を念頭にした月の資源としての灰長石から特殊セメントが製造できることを示し、得られたルナコンクリートの力学的特性や高真空下における優れた耐久性等を明らかにした。これらの研究成果は多くの研究者に引用され、月面での建設材料としての水硬性コンクリートの利用が可能であることが明らかされている。

・堀口敬、T.D.Lin：月面におけるセメントとコンクリートの製造に関する研究、宇宙利用シンポジウムプロシーディング、Vol.15、69-72、1999、
・迫井裕樹、堀口敬、志村和紀：超高真空下におけるセメント系材料の物性変化、宇宙利用シンポジウムプロシーディング、Vol.19、201-204、2003)

ところが、これらのコンクリートの製造には「水の存在」が不可欠である。月面に十分な水（氷）が存在する可能性が近年報告されているが、現在までのところ確証はなく、水は貴重であり、その確保は月面では容易ではない。そこで、本研究では新たな材料選択のオプションとして「水の不要なコンクリート」を取り上げ、それらの製造方法と特性評価を行うものである。すでに、これらのコンクリートの一種である繊維補強エポキシ樹脂コンクリートに関しては、本研究者がフランス建設中央研究所 (LCPC) で研究を行っており、短繊維で補強したエポキシ樹脂コンクリートの建設部材としての適合性を報告している。本研究ではこれらの研究成果が生かせるものと考えている。

2. 研究の目的

本研究は、将来の月面構築物における基盤材料としての『水の不要なルナコンクリート』の製造に関する様々な可能性を実験的に検証し、得られた材料の月面環境下における諸特性を把握することを目的とし、最終的には月面構築物の設計システムの確立を目指している。

3. 研究の方法

本研究は、将来の月面構築物の主要材料として考えられる『水の不要なルナコンクリート製造法』の様々な可能性を実験的に検証し、それらの材料の評価により月面構造部材の設計システムの確立に関する研究である。このため、本研究では3年計画の研究計画を立案し、初年度はルナコンクリートの製造手法に関する検討を中心に行い、次年度では月面環境下での物性評価に関する研究を中心に行い、最後の年に開発されたルナコンクリートを用いた月面構築物の設計システムの構築に関する検討を行うものである。

4. 研究成果

(1) まえがき

将来の月面構築物の建設を目的とした宇宙開発において、期待される建設材料の一つにセメント系材料が挙げられる。既に報告されているように、セメント系材料が宇宙環境下における種々の条件に対し、高い耐久性を示すこと¹⁾、さらには、月面においてセメント系材料を比較的容易に入手・製造できる可能性が高いこと²⁾等がその理由として挙げられる。

月面環境下を意識した真空環境下におけるセメントコンクリートの適用性に関する研究は1980年代に始まり、セメント製造に

関した反応論的研究やコンクリートを適用した構造物の設計論、真空環境下におけるコンクリートの物性に関する研究等が報告されている³⁾。

ところが、現在までの月面探査に関する研究成果から、両極における氷の存在が有望視されているものの、月面での水の存在は難しく水が大変貴重な存在であることは明らかである。従って、水を使用しないでコンクリートを製造することに多くの期待が注がれている⁴⁾。

そこで本研究では、月にも存在する硫黄に着目し、これを接合材として水を用いずに作製したルナコンクリートの力学的特性について詳しく検討を行ったものである。

(2) 実験概要

ルナコンクリートの配合

水が不要なルナコンクリートの供試体の代表的な配合を表1及び、表2に示す。本実験で用いる供試体として、40 x 40 x 160mmの角柱供試体を選択し、各シリーズ3本ずつ作製した。用いた材料は、純硫黄と細骨材を用意した。配合は、接合材として用いる硫黄の含有量を大きく変化させて、供試体を作製した。

加えて、粉体が与える強度への影響を調査するためにレゴリスの代替材としてフライアッシュを取り上げ、粉体の混入効果について検討した。ここでのフライアッシュの適用は、セメントコンクリートの水和反応の一つであるポゾラン反応を狙ったものではなく、単にレゴリスと同様な密粒度粉体の充填効果を意識したものである。その際に細骨材(a)とフライアッシュ(FA)を合わせた混合物に対するフライアッシュの混入率を $FA/(a+FA)$ で表示して比較を行った。

表1 ルナコンクリートの配合表(1)

硫黄含有率	30%	35%	40%	45%	50%	100%
硫黄	628.52	723.05	814.97	904.4	991.44	1748.74
細骨材	1466.56	1342.81	1222.46	1105.38	991.44	0

表2 ルナコンクリートの配合表(2)

$FA/(a+FA) = 10\%$, $FA/(a+FA) = 20\%$

	S	FA	a
質量比 (%)	35	6.5	58.5
質量 (g)	713.35	132.48	1192.31

	S	FA	a
質量比 (%)	35	13	52
質量 (g)	703.91	261.45	1045.81

さらに、月面構造物の一つである簡易舗装システムを構築するためには、圧縮強度よりもむしろ曲げ強度の改善が重要となるため、ルナコンクリートに金属短繊維を混入して、曲げ強度に関する繊維補強効果についての検討も併せて行った。

強度試験方法

本実験のルナコンクリートの圧縮・曲げ強度試験は”JIS R 5201 セメントの物理試験方法”に準じて実施した。また、本文中の圧縮・曲げ強度は全て供試体3本の平均値である。

(3) 実験結果と考察

圧縮強度試験結果

図1は、純硫黄の混入率を大きく変化させて細骨材と混合した供試体の圧縮強度試験結果をまとめたものである。この図から、硫黄含有率45%までは含有率の増加とともにほぼ直線的に圧縮強度が増加することが分かり、45%で最大値を取る。

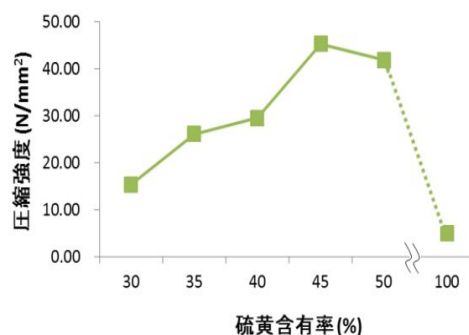


図1 圧縮強度と硫黄含有率

この時の圧縮強度は、40～50 MPa 程度であり、一般的な水硬性セメントコンクリートのものと同等の強度を示していることが分かる。また、硫黄含有率 30%の供試体は、骨材過多となり、適切なワーカビティの確保が難しく強度も低いものとなっている。一方、骨材を混入していない硫黄含有率 100%の供試体も非常に脆く、空隙量が多いポーラスな構造となり、強度がさらに低下した結果を示した。

曲げ強度試験結果

図2は曲げ強度試験結果をまとめたものである。圧縮強度試験結果と同様に硫黄含有率の増加とともに曲げ強度は増加し、含有率 45%の際に最大曲げ強度を示すことがわかる。圧縮強度と同様に、これ以上含有率を増加しても強度は逆に低下することが明らかとなった。従って、曲げ強度と圧縮強度はともに最大値が硫黄含有率 45%であり、それ以上使用しても逆に強度が低下することがわかる。

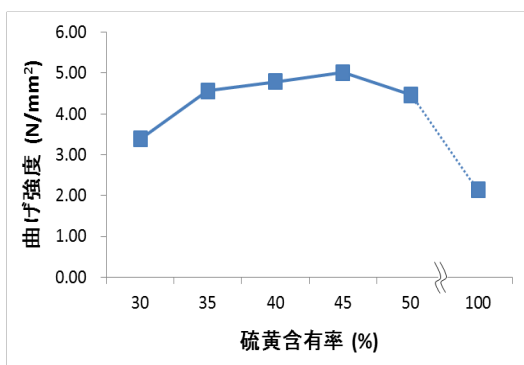


図2 曲げ強度と硫黄含有率

微粉体（レゴリス）混入効果

前項の試験結果から硫黄含有率が 45%の際に最大強度を示すことが判明したが、月面環境では硫黄の入手には大きなエネルギーが要求され実用的・経済的には、より少ない硫黄含有率で十分な強度を示す材料が望ましい。そこで、細骨材よりも粒度の小さいレ

ゴリス（フライアッシュ）を粉体として混入することによる強度改善効果に関して詳しく検討することにした。

図3および図4は、フライアッシュを混入していない供試体の圧縮強度および曲げ強度の結果を基準とした場合のフライアッシュの混入効果をまとめたものであり、それぞれ相対圧縮・相対曲げ強度で示している。

圧縮強度に関してみると、硫黄含有率が 35%および 40%では FA/(a+FA) が 10%の時に、顕著な強度改善効果が認められることが分かった。

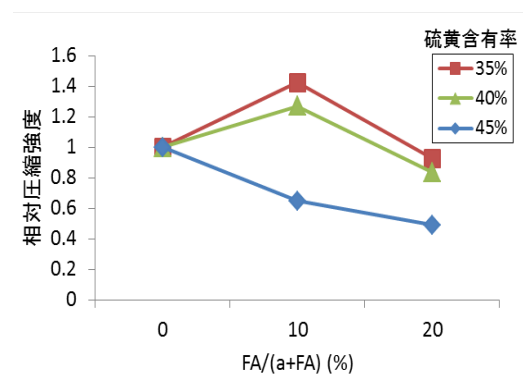


図3 微粉体混入による圧縮強度の改善

同様に、曲げ強度試験結果についても、硫黄含有率が 35%および 40%では FA/(a+FA) が 10%の時に、強度改善効果が認められることが分かった。しかしながら、レゴリス（フライアッシュ）のような微粉体による強度改善効果は曲げ強度よりも圧縮強度において顕著であることが判明した。

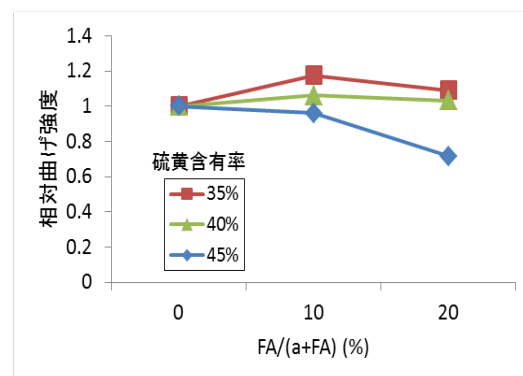


図4 微粉体混入による曲げ強度の改善

金属短繊維による曲げ補強

図5は、鋼繊維を混入していない供試体の曲げ強度を基準とした場合の、鋼繊維補強による曲げ強度の改善効果を比較したものである。硫黄混入率が35%および40%で、微粉体を10%添加した場合の曲げ強度は鋼繊維混入率の増加に伴って増加していることが分かる。すなわち、混入率2%で微増し6%で急激に増加する。このように、ルナコンクリートの曲げ強度の改善には鋼繊維などの金属短繊維による補強が有効であり、靱性が確保され、大幅な強度改善が認められることが分かった。

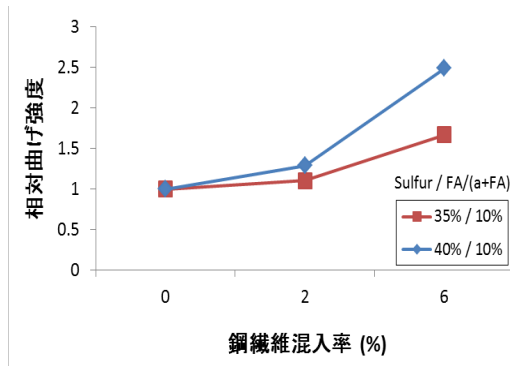


図5 鋼繊維の曲げ強度への影響

(4) まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 接合材として硫黄を用いた水不要なルナコンクリートの製造が可能であることが確認された。
- 2) 硫黄を用いた水不要なルナコンクリートの最適配合を検討した結果、圧縮・曲げ強度ともに硫黄含有率45%までは含有率の増加とともに強度が増加し、45%以降は逆に低下する傾向を示した。
- 3) レゴリスのような微粉体(粒度の小さい粉体)を骨材に対して10%程度混入することにより強度の増加を図ることができると明らかとなり、特にこの傾向は圧縮強度において顕著であることが

明らかとなった。

- 4) ルナコンクリートの曲げ強度の改善には鋼繊維などの金属短繊維による補強が有効であり、靱性が確保され、大幅な強度改善が認められることが分かった。
- 5) 水不要なルナコンクリートの製造は可能であり、月面構造物のための構造材料として有望であることが明らかとなった。

(5) ルナコンクリートブロックを用いた効果的な月面構造物の構築システム -古代ローマ構造物の施工法の月面構築物への応用-

月面構造物の施工にあたっては、地球上の構造物の施工と異なり多くの制約が生じることは容易に想像できる。

月面環境下では地球上の高度な施工機械は用いることができないものとするのが妥当であり、高真空環境下のためコンクリートの流し込み施工は不可能である。液体の水はすぐに蒸発し、練混ぜ水を用いた通常のコンクリート打設は難しい。

このような特殊環境下において有効な建設材料が水不要のルナコンクリートで作られた小型コンクリートブロックであり、大型のスラブや梁の製造は月面基地のその後の進展状況により可能となろう。従って、月面基地の初期施工においては比較的小型のブロックによる原始的な構築物の施工が現実的である。このような環境下では、特殊な製造システムが要求される。その一つが、古代ローマのインフラ群を構築した古代ローマ、あるいはエトルリア技術の応用である。以下にその概要を述べる；

- 月面の簡易舗装システムの構築: 古代ローマ街道の舗装システムを応用した施工システムであり、4層で構成される上層路盤・下層路盤・路床・路体を施工する。古

代ローマ街道では岩石が用いられたが月面基地では一辺60cm程度のルナコンクリートブロックで代用する。ブロック間は接着材を用いずフリクションで表面を保持する手法である。外力による支持力は地球上のそれに対して6倍の耐力を有するが、月面の簡易舗装システムに関する詳細な構造設計に関しては別途検討が必要であろう。本研究ではルナコンクリートブロックによる月面施工の可能性を示唆するものであり、実際の施工においては多くの課題が存在することはもちろんである。例えば、路盤・路床等の締固めは月面では多くのエネルギーを必要とし、飛来隕石に対処する工夫が必要となろう。

- 水道橋に代表される橋梁におけるアーチ施工システム
 - エトルリアのネクロポリを応用したドーム構造の施工システム
- 舗装施工における古代ローマの施工においては、小型コンクリートブロックの巧みな舗装により2000年以上の耐久性を誇る実績がある。当時の施工に用いた建設材料は石であったが、ルナコンクリートを用いればさらに容易な施工ができる。

参考文献

- 1) T. Horiguchi et al. : Study on Lunar Cement Production Using Hokkaido Anorthite and Hokkaido Space Development Activities, SPACE V, American Society of Civil Engineers, pp. 621-629 (1996)
- 2) T. Horiguchi, and N. Saeki: Production and Hardened Properties of Lunar Simulant Concrete, The 1st Joint Symposium between Korea and Japan, July (1998)
- 3) 迫井裕樹,堀口敬,志村和紀,佐伯昇: 高真空環境下におけるモルタルの物性変化に関する研究,土木学会北海道支部,論文報告集,第59号 (2005)

4) Toutanji H, Glen-Loper B, Schrayshuen B.: Strength and durability performance of waterless lunar concrete. In: Proceedings: 43rd American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Reno, NV; January (2005). P. 10-3.

5) 増山遼太、堀口敬：**水が不要なルナコンクリートの基礎的研究** The physical property of water-less lunar concrete、土木学会北海道支部論文報告集,第70号, E-26, (2014)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

1. 増山遼太、堀口敬：**水が不要なルナコンクリートの基礎的研究** The physical property of water-less lunar concrete、土木学会北海道支部論文報告集,第70号, E-26, pp.246-247, (2014) 査読無

[学会発表](計 1件)

1. 増山遼太、堀口敬：**水が不要なルナコンクリートの基礎的研究** The physical property of water-less lunar concrete、土木学会北海道支部年次技術研究発表会、札幌コンベンションホール、札幌市、2014年2月1日、(2014)

6. 研究組織

(1)研究代表者

堀口 敬 (Horiguchi Takashi)

北海道大学・大学院工学研究院・特任准教授
研究者番号：30094816

(2)研究分担者

(3)連携研究者