

月のシミュラント砂を使用した月コンクリートの開発

立命館大学 理工学部 環境都市工学科

川崎 佑磨*

1. はじめに

通常のコングリートは水とセメントが必要で、水和反応と呼ばれる化学反応をすることで凝結・硬化して強度を有する硬化体となる。水の比率は設計によって異なるが一般的にはセメントに対して 40～60%程度を必要とする。現在のところ月面には硬化体作製に必要十分な水の存在は認められていない。またセメント原料となる石灰石も存在しないため、月面で地球上と同じコンクリート構造物を建造することは非現実的である。世界的に宇宙ビジネスとして国だけではなく民間企業も月面における各種開発プロジェクトを採択・取り組んでいる。例えば、わが国の国交省では月面開発推進プロジェクトで「トータル月面建設システムのモデル構築」がスタートしている。しかし、多くのプロジェクトは、IoT や無人化施工、発電設備などの建設システムのモデル構築が主で、具体的にどのような材料で施工するのか明確になっていない。本研究では、月面上で少量の水（あるいは材料が含水していれば液体不要）のみで硬化体を作製することを目的としている。具体的には、植物の細胞壁の一種である「ヘミセルロース」を使用した硬化体作製を試みた。しかし、硬化体の化学分析など詳細な硬化メカニズムについては検討もしていない。そこで本研究では、月のシミュラント砂を使用する前に、ヘミセルロースを使用した硬化体の強度とその化学分析を行った。硬化体の材料設計、硬化体作製のための条件設計も進めつつ、月のシミュラント砂を使用した「月コンクリート」の開発を試みた。

2. ヘミセルロースを使用した硬化体の作製手順

ヘミセルロースを使用した硬化体の作製手順について図 1 に示す。図中の材料のうち、「Concrete powder」と記載されているものを「月のシミュラント砂」に置換することで、月コンクリートを作製することが可能である。また、「Binder」と記載されているものとして、本研究では「ヘミセルロース」を利用した。具体的には、コーン由来のヘミセルロース（Xylan）の粉体を使用した。



図 1. 水和反応に依存しない硬化体作製の手順

3. ヘミセルロースによる硬化メカニズムの検討実験の使用材料および施工条件

まずはヘミセルロースを使用した硬化体の硬化メカニズムについて検討するため、いくつかの材料を使用して強度試験および化学分析を行った。使用材料の配合を表 1 に示す。RCP は廃

表 1. ヘミセルロース硬化メカニズム検討に使用した硬化体の配合

Case	Materials (gr)						H (°C)	P (MPa)	t (min)
	RCP	W	C	L	H	Water =12.5%RCP			
RCP-W	12	6	-	-	-	1.5	Room temp (24)	25	10
RCP-C	12	-	6	-	-				
RCP-L	12	-	-	6	-				
RCP-H	12	-	-	-	6				
RCP-W	12	6	-	-	-	1.5	60	25	10
RCP-C	12	-	6	-	-				
RCP-L	12	-	-	6	-				
RCP-H	12	-	-	-	6				

棄コンクリート粉末、W は廃棄木材粉末、C はセルロースナノファイバー、L はリグニン、H はヘミセルロースを示している。作製する硬化体の寸法は、50mm×50mm×5mm の小型平板（図 1 にも示す）である。プレス機では、圧縮力を 25MPa、圧縮継続時間を 10 分間とした。圧縮中の温度については、24℃と 60℃にして差異を検討した。10 分間の圧縮を終了後、型枠から硬化体を取り出し、温度 25℃、湿度 50%程度の室内環境下で 3 日間気中養生した。養生後、曲げ強度試験を行い、破壊後の試料を用いフーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）を用いて分子構造などを定量的に化学分析した。

4. ヘミセルロースによる硬化メカニズムの検討実験の結果

まず曲げ強度試験結果を図 2 に示す。ここで、Reference となる M は「モルタル」の強度を示しており、セメントを使用した通常の材料である。一般的に使用されるコンクリートの主成分であるモルタル（M）の曲げ強度は約 4.2MPa である。一方で、ヘミセルロースを使用した硬化体（RCP-H）の曲げ強度は 6.0MPa 以上が得られた。圧縮時の温度が 24℃の場合でも、通常のモルタル（M）よりも 1.5 倍程度高い強度が得られ、60℃で成形した場合は曲げ強度が 8.0MPa 以上となりモルタル（M）の 2 倍以上高い強度が得られた。このことから、バインダーとしてヘミセルロースを使用した硬化体は、セメントを使用した通常の硬化体と比較して高い曲げ強度を得ることができた。この検討実験

で使用した材料は、廃棄コンクリートの粉末（RCP）であるが、本課題の通り月のシミュラント砂に置換することで異なる硬化体を作製できる可能性を示した。一方で、セメント不使用で

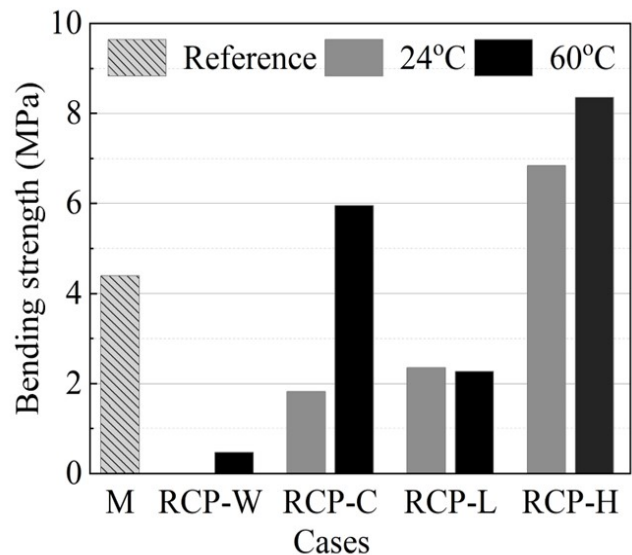


図 2. 曲げ強度試験結果

硬化するメカニズムについては不明である。そこで、フーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）を用いて硬化体内部の分子構造を詳細に分析した。

FTIR による分析結果を図 3 に示す。なお、本報告ではヘミセルロースを使用した硬化体（RCP-H）の結果のみを示すこととする。また、ヘミセルロース単体（H）、廃棄コンクリート粉末単体（RCP）も同様に分析したため結果を載せている。紙面の都合で RCP-W、RCP-C、RCP-L の FTIR 結果は掲載できていないが、ピークはいずれの供試体においても顕著な変化

はなかった。すなわち、ヘミセルロースを使用した硬化体（RCP-H）特有の化学反応は起こっていないと考えられる。ヘミセルロースと無機物である炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）、二酸化ケイ素（ SiO_2 ）との間で水素（OH）結合することが硬化する要因であると推察している。そのメカニズムの模式を図 4 に示す。

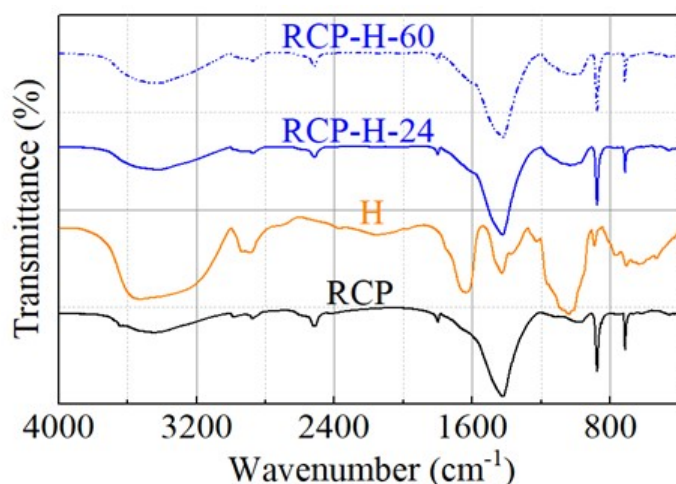


図 3．FTIR の結果

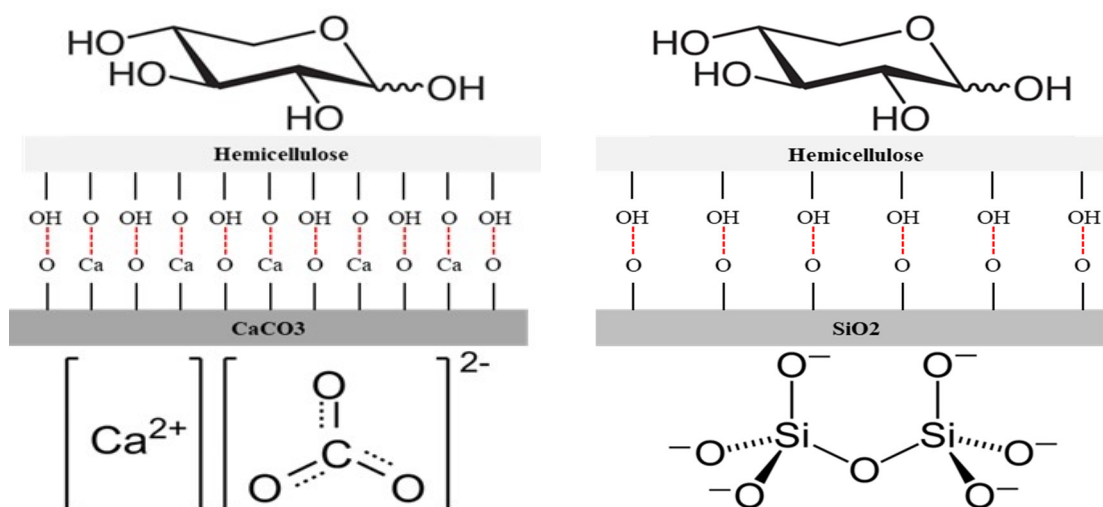


図 4．硬化メカニズムの模式図

5. ヘミセルロースを使用した月コンクリートの作製～その1～

先述してきたように、廃コンクリート粉末を月のシミュラント砂に置き換えて硬化体作製を試みた。ヘミセルロースを使用して圧縮成形することで硬化するか否か、など硬化有無、硬化した場合の強度を確認するため、いくつかの確認実験を行った。まずは、表 2 に示す配合で硬化体作製を試みた。写真 1 に示す通り、硬化体は問題なく作製できた。月の砂の粒径は $40\mu\text{m}$

表 2. ヘミセルロースを使用した月コンクリートの配合～その 1～

Case	材料					作成条件		
	月の砂 (g)	ヘミセルロース(g)	水(g)	比率(%)	含水率(%)	加熱温度	圧力 (N/mm ²)	時間(分)
A1	40	20	0.8	66.7	4.0	60℃	25	5
A2								
A3								



写真 1. 硬化体の様子

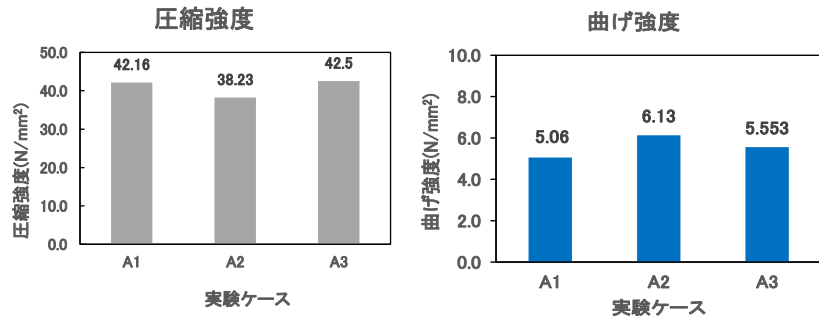


図 5. 圧縮強度と曲げ強度の結果

～1mm であり、非常に細かい微粒子も多く含んでいる。CaCO₃ はほとんど含まれていないが、SiO₂ は含まれているため、図 4 の硬化メカニズムも発揮できたものと考えられる。図 5 に圧縮強度試験と曲げ強度試験の結果を示す。建設材料として一般的に使用されるコンクリートの圧縮強度が 20～40N/mm² 程度、曲げ強度が 4.5N/mm² 程度とすると、圧縮強度および曲げ強度ともに十分な強度を得られた。

6. ヘミセルロースを使用した月コンクリートの作製～その 2～

その 1 の実験では、十分な強度をもった硬化体を作製することができた。ここでは、月のシミュラント砂とヘミセルロースの割合について、いくつか検討した。現状では、月のシミュラント砂に対して半分のヘミセルロースが必要で、非常に多くのバインダーが必要な条件となっている。そのため、月のシミュラント砂に対するヘミセルロースの割合を変化させた場合の影響について確認することとした。

表 3. ヘミセルロースを使用した月コンクリートの配合～その 2～

Case	材料					作成条件		
	月の砂 (g)	ヘミセルロース(g)	水(g)	比率(%)	含水率(%)	加熱温度	圧力 (N/mm ²)	時間(分)
A	60	6	1.2	90.9	20.0	60℃	25	5
B	54	9	1.08	85.7	12.0			
C	36	36	0.72	50.0	2.0			

響について確認することとした。

配合は表 2 に示す通りである。硬化体の写真を写真 2 に示す。A は月のシミュラント砂に対してヘミセルロースを



写真 2. 硬化体の様子 (左: A、中: B、右: C)

1/10 としたケースであるが、写真 2 左の通り、硬化体を作製することができなかった。バインダーとなるヘミセルロースの量は 1/10 以下にはできないことがわかった。B は月のシミュラント砂に対してヘミセルロースを 1/6 にしたケース、C はそれぞれを 1:1 にしたケースであるが、いずれも硬化体を作製することができた。しかし、C のケースでは写真でもわかるように硬化体表面が光沢を帯びている。これは非常に強い粘着質の物体で、ヘミセルロースの量を多くすると、このように粘着物質が多く析出して使用性が悪いことがわかった。ヘミセルロースは親水基である OH 基を持っているため、空気中の水蒸気など H_2O と結合することがわかっている。この粘着物質については、ヘミセルロース (OH 基) の量が多くなることで、空気中の水分と反応して生成されたものだと推察した。

圧縮強度試験および曲げ強度試験の結果を図 6 に示す。ケース A については上述の通り硬化しなかったため、測定値はない。ケース B およびケース C とともに圧縮強度は一定の強度を得ることがわかったが、曲げ強度は非常に低い結果を得た。しかし、圧縮強度試験においても、通常のコンクリートの挙動ではなく、少しずつ潰れるような柔らかい破壊過程を示したためこのような高い強度になったと考えられる。このことから、ヘミセルロースを使用した月コンクリートの開発においては、さらなる材料設計の必要があると思われる。

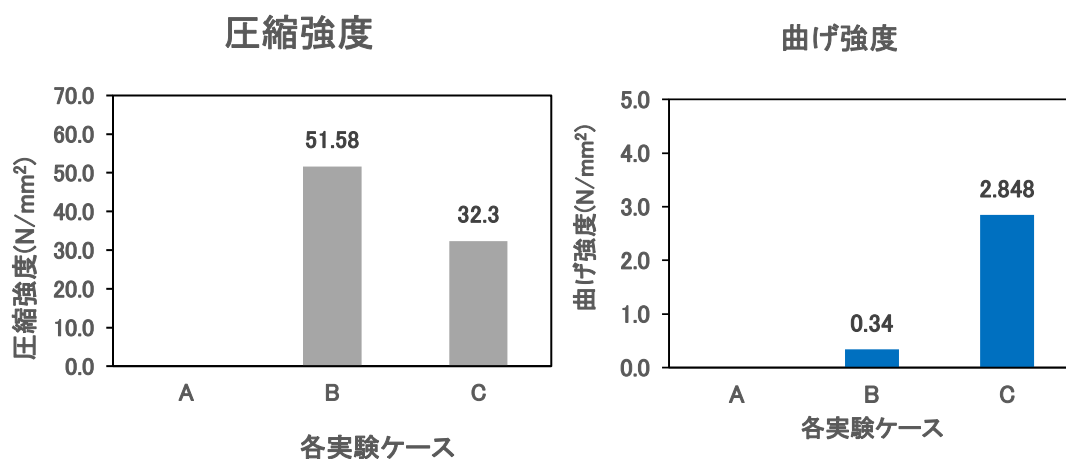


図 6. 圧縮強度と曲げ強度の結果

7. まとめ

本研究では、ヘミセルロースを使用した月コンクリートの開発に向けて、ヘミセルロースによる硬化メカニズムの解明および作製した月コンクリートの強度に関する検討を行った。ヘミセルロースを使用した硬化体は、ヘミセルロースが持つ OH 基と $CaCO_3$ や SiO_2 が結合することで硬化反応を示すことが化学的にわかった。さらに、ヘミセルロースと月のシミュラント砂を圧縮成形することで硬化体作製が可能であること、本研究で実施した特定の配合では、圧縮強度ならびに曲げ強度ともに、通常のコンクリートよりも高い結果を得た。一方で、配合によっては硬化しないケース、強度が低いケース、粘着物質が多く析出するケースが存在した。そのため、ヘミセルロースと月のシミュラント砂の割合、添加する水の量など

材料設計や、圧縮成形にかかる圧縮力と圧縮時間などの施工条件についてもさらなる検討が必要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(公財)天野工業技術研究所研究助成から2023年度研究助成金による多大なご支援を頂きました。また、本研究は申請者の研究室に配属されている学生からも実験など活動して頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Ejazulhaq Rahimi, Yuma Kawasaki, Ayane Yui, Yuta Yamachi, “Green Concrete Development: Evidence from Waste Concrete and Hemicellulose Utilization,” Open Journal of Civil Engineering, Vol.14, No.4, pp. 587-601, 2024 年、DOI: 10.4236/ojce.2024.144032
- 2) Ejazulhaq Rahimi, Yuma Kawasaki, Ayane Yui, Yuta Yamachi, “Fully recycled syntheses using recycled concrete powder, oyster shell and wood powder: Effect of combined ground treatment on mechanical strength and FTIR, XRD, and SEM characterization,” Open Journal of Composite Materials, 印刷中、2024 年