

改良型 MICP による短期固化に関する基礎的検討

高安 隼登¹⁾, 畠 俊郎²⁾, 安部 俊吾³⁾

1) 修士課程, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, m251555@hiroshima-u.ac.jp

2) 教授, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, thata@hiroshima-u.ac.jp

3) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構, abe-shungo@jogmec.go.jp

減圧法によるメタンガス産出では, 坑井内にガスと同時に砂交じりの泥が多量に入り込む出砂による生産阻害が課題とされている。この課題解決法として, 酵素機能に着目した地盤改良技術である MICP の改良について検討を進めている。ここでは, 結晶サイズおよび浸透範囲の制御を目的として Skim milk と増粘剤の併用効果に着目した。あわせて, 結晶析出時の核を増やす目的でミクロマイカの添加による強度増進効果についても検討した。その結果, ①増粘剤と Skim milk を併用した供試体では顕著な強度増進効果が期待できる, ②核形成促進効果を期待したミクロマイカの添加では一部条件効果が認められた。

キーワード : E-MICP, 増粘剤, ミクロマイカ, Skim milk (IGC : D-2, D-6, D-10)

1. はじめに

地球温暖化が懸念される中で, 燃焼時の二酸化炭素排出量が石油よりも少ない天然ガスは, 世界的にも需要が伸びているエネルギー資源である。その天然ガス資源として, メタンハイドレート（以下 MH）が注目されている。MH はガスハイドレートの一種で, カゴ状の水分子の内部にメタン分子が閉じ込められている氷のような結晶固体である¹⁾。MH は高压低温条件下でのみ安定的に存在することが可能であり, 日本近海では表層型・砂層型共に豊富に存在していることが確認されており, 今後の利活用が期待されている。ここでは, 既存のエネルギー生産手法が応用可能な砂層型 MH に着目することとした。地層内に固体として存在する MH そのものはエネルギーとして利用できず, ガスと水に分解し回収する必要がある。その生産方法として分解促進剤注入工法, 加熱法, 減圧法があるが, 分解促進剤注入工法は高価な薬剤を用いるためコストが増大することや, 薬剤による環境影響が懸念されているため, 主に加熱法と減圧法が検討されている。ここで加熱法と減圧法を比較すると, 熱水等を地下に送り込んで温度を上げる加熱法に比べ, MH を含んだ地層である MH 胚胎層を MH の安定領域外まで減圧しガスを回収する減圧法は, 設備やエネルギー効率の観点から優れていると考えられている²⁾。

しかし減圧法には, 減圧することにより MH が分解され, MH 胚胎層の骨格構造が失われることにより固結力を失い, 生産坑井内にガスと同時に砂交じりの泥が多量に入り込む「出砂」の発生とそれによる生産効率の低下, ガスとして回収することによる間隙の発生, 圧密が起こることによる海底地盤の沈下や地盤変形などの地盤災害のリスクが懸念されている³⁾。

このような背景のもと, 減圧法による MH 生産において, 出砂による生産阻害や地盤災害を防ぐ対策として, MH 胚胎層内に存在する微生物の機能を活用し, 炭酸カルシウム析出を促進させる MICP (Microbial Induced Carbonate Precipitation)⁴⁾と, 酵素機能による EICP (Enzyme Induced Carbonate Precipitation) に着目した。MICP および EICP は, 地盤の強度を向上させるバイオセメントーションや, 地盤の透水性を低下させるバイオクロッキング効果が期待される地盤改良技術の一つである。実地盤ではウレアーゼ活性を有する微生物と, 肥料として散布される尿素, pH 調整剤として散布される塩化カルシウムを注入して炭酸カルシウムを析出させ, 目的とする強度・透水性を満たす地盤改良効果が確認されている。

この技術を MH 胚胎層に適用することで, 海底地盤内の土粒子間に炭酸カルシウムを効率的に析出させ, 土粒子間の結合を強固なものにすることで出砂の抑制, 強度向上が期待できる⁵⁾。同技術の利点の一つとして CO₂排出量の削減が挙げられる。セメントによる一般的な地盤改良では添加剤であるセメント自体の製造過程において多量の CO₂を生成することで知られており, セメント産業だけで世界の総 CO₂排出量の約 5 %を占めるという試算もなされている⁶⁾。そのため, セメント使用量の低減は CO₂排出量の削減に直結する。加えて, 実地盤内に既に生息している微生物に対して MICP 技術を適用すると, 環境への負荷を低減することが可能である。

実地盤における MICP の適用可能性として, 対象とする日本海沿岸における MH 胚胎層中にウレアーゼ活性を持つ微生物を確認したほか, MH 胚胎層中の微生物を用いて MICP を行うことによる有効性が明らかになっている^{7), 8)}。一方で現状の MICP による出砂対策では, 坑

井下部の周辺地盤が集中的に固化されることから、目的とする場所のみを効率的に固化する手法の開発が求められており、目標範囲に正確に微生物と固化成分を供給して、目標範囲を効率的に固化する補助技術が必要であると考えられる。

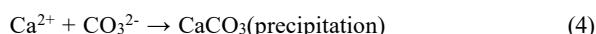
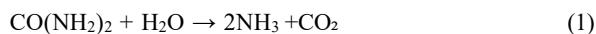
そこで、MICP を目標範囲に適用させるため、出砂が発生する範囲のみを均一に固化を行うこと、メタンガスが回収可能な一定の透水係数を維持すること、少ない処理回数で結晶生成を促進させる効果を期待し、増粘剤の適用について検討することとした。

加えて、必要最低限の MICP 処理回数とすることによるコストダウンが実用化に向けて必須となる。そこで本稿では、効率的な施工を目的とした添加剤を含む固化溶液による 1 回の処理(1 shot 固化)で供試体を作成し、実地盤を再現した条件での一軸圧縮強度を測定することで、提案する 1 shot 固化技術の適用性について検討することとした。

なお、1 shot 固化による強度発現を期待して酵素、Skim milk およびミクロマイカ(雲母)の適用性について検討することとした。酵素は植物種子(ナタマメ)由来のウレアーゼによる固化時間の短縮を、Skim milk は析出する結晶形態の制御による強度増進を、ミクロマイカには炭酸カルシウム結晶の核を増やすことによる析出効率の向上をそれぞれ期待している。

2. 微生物固化技術 (MICP, EICP) の概要

MICP および EICP は、代表的な生体触媒を利用した地盤改良技術であり、炭酸カルシウムの析出を通じて地盤の強度向上を実現するものである。以下に、これらの技術における炭酸カルシウム析出の反応機構と、各技術の特徴について示す。



このプロセスは、MICP ではウレアーゼ活性を持つ微生物、EICP では植物由来ウレアーゼ酵素を触媒として尿素を加水分解し、アンモニアと二酸化炭素を生成することから始まる(1)。次に、生成されたアンモニアは水中でアンモニウムイオンと水酸化物イオンに変化し、溶液の pH を上昇させる(2)。これにより、CO₂も水に溶解して炭酸水素イオンとなり(3)、最終的にカルシウムイオンと反応して炭酸カルシウムが析出する(4)。

このようなアルカリ環境は、CaCO₃の結晶化に最適であり、析出が促進される⁹⁾。特に MICP の場合、炭酸カルシウムが形成される際に微生物自身が結晶内に取り込まれることがあり、それによって微生物数の減少が観察される。この現象は、反応に使用される溶液成分の濃度に大きく依存することが知られている⁹⁾。

微生物を利用した地盤改良技術としては、地盤強度を向上させるバイオセメントーションが広く知られており、土壤の侵食抵抗性を高めたり¹⁰⁾、コンクリート構造物の透水性を抑制したりするなど、多面的な応用が期待されている。

さらに、炭酸カルシウムの析出形態が地盤特性に与える影響も明らかになっている¹¹⁾。例えば、炭酸カルシウムが土粒子の全周にわたって均等に析出する場合には、土の力学的特性に対する効果は限定的である。一方で、図-1 に示す粒子間の接触点に選択的に析出するケースでは、接触面積が増加し、強度や透水性といった力学的性質の改善が顕著に現れる。このように、地盤改良の効果は析出量そのものだけでなく、析出の形状や空間分布にも強く左右される。

また、MICP、EICP の利点の一つとして、追加の建設資材をほとんど必要としない点が挙げられることから、海底地盤の安定化を実現できる技術として注目されている。

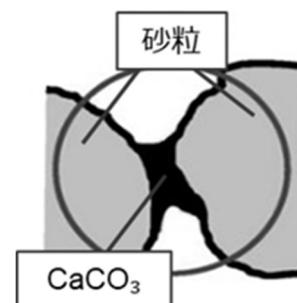
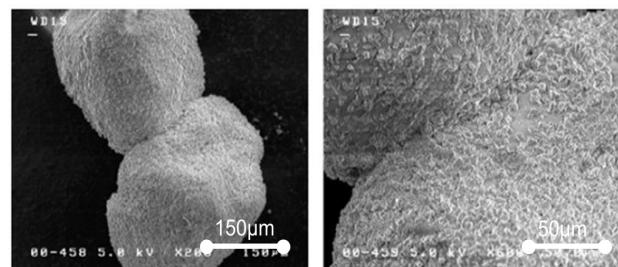


図-1 炭酸カルシウム析出の模式図¹¹⁾

3. 使用材料

3.1 使用砂と固化試薬

本研究では、石油、天然ガス、MH 等の地下資源の生産において出砂防止を目的として用いられるグラベルパック($D_{50}=0.45 \text{ mm}$)と物性値が類似している珪砂 5 号を使用することとした。珪砂 5 号の粒系加積曲線を図-2 に、グラベルパック、珪砂 5 号の最大密度、最小密度、土粒子密度表-1 にそれぞれ示す。

本研究における固化試薬には、肥料として一般に流通している尿素および、融雪剤として広く市販されている

塩化カルシウムを用いた。また、尿素、塩化カルシウム濃度はそれぞれ 1 mol/L とした。

なお、EICP 处理においては、反応触媒として市販の精製ウレアーゼ（ナタマメ由来で酵素活性値 2000~5000 U/g : 純正化学製）を用いた。

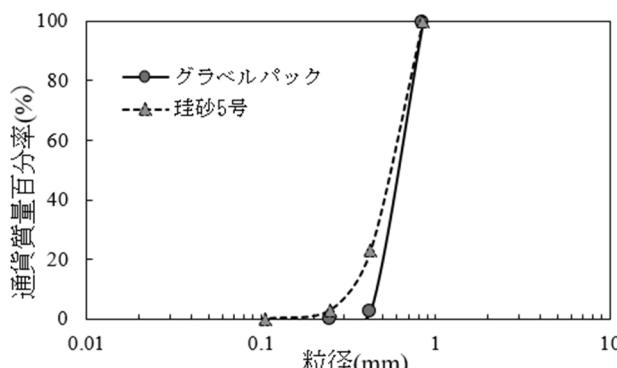


図-2 珪砂 5 号の粒径加積曲線

表-1 珪砂 5 号およびグラベルパックの物理特性

	グラベルパック	珪砂 5 号
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.73	1.57
最小乾燥密度(g/cm ³)	1.54	1.28
土粒子密度(g/cm ³)	2.66	2.65

3.1 使用した増粘剤

これまでに検討された MICP による出砂対策では、坑井下部の周辺地盤が集中的に固化されることによる効果の不均質性が課題とされ、解決に向けた検討が必要とされている。そこで、MICP を目標範囲に適用させるため、増粘剤の添加を検討した。増粘剤は、液体や半固体の食品、化粧品、医薬品、工業製品などに粘性を付与または調整するために使用される添加剤である。土木分野においても研究が盛んに行われている。具体的には、天然由来の増粘剤であるカゼインと MICP の併用により低炭酸カルシウム析出条件でも高い強度を示す地盤改良技術等が提案されている¹²⁾。

本研究では、事前検討の結果からカゼインより適用性が高いと考えられるキサンタンガムを増粘剤として用いることとした。キサンタンガムはトウモロコシ等の植物が原料の植物性由来であり、地盤改良に適用する際の環境負荷が小さいことを期待している。加えて、キサンタンガムは、その粉末を蒸留水に投入し、24 時間攪拌することで溶解することから、施工性という観点からも優れていると判断した。

増粘剤として選定したキサンタンガムと既存報告より効果が確認されているカゼインの濃度と粘度の関係を音叉振動式粘度計 (SV-10, 株式会社エー・アンド・デー社製) により測定した結果を図-3 に示す。増粘剤溶液の粘度測定時温度は、室温と同じ 20 °C程度とした。

図-3 に示すように比較的低い濃度で高粘度を示すため、少ない添加量で効果が期待できる点も優れていると判断した。

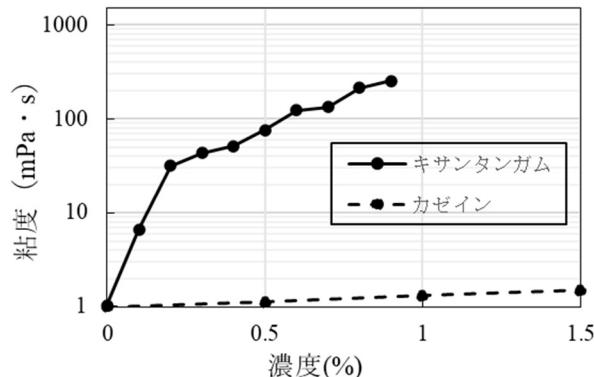


図-3 キサンタンガムの濃度と粘度の関係

3.2 微生物

本研究では、著者らが国内の海底地盤から単離したウレアーゼ活性を有する *Sporosarcina newyorkensis* を使用した^{7,8)}。本微生物のウレアーゼ活性を、尿素の加水分解反応に伴う電気伝導度 (EC : Electrical Conductivity) の変化から評価することとした。さらに増粘剤によるウレアーゼ活性への影響を把握するため、キサンタンガムを 0.5 % 添加させた条件についても測定を行った。既往研究により、カルシウムイオンが存在しない条件下では、非イオン性の尿素が加水分解されて、イオン性物質を生成し、EC が直線的に増加することが示されている¹³⁾。

ウレアーゼ活性の測定は、1.11 M の尿素溶液 54 mL に対し、菌体培養液を 6 mL 添加し、1 分間静置した後、電気伝導計を用いて 1 分ごとに 5 回（計 5 分間）EC を測定した。得られた EC 変化に基づき、ウレアーゼ活性値を式 (5) に従って算出した。

$$\text{urease activity}(\text{mM h}^{-1}) = \frac{\Delta \text{EC}(\mu\text{S cm}^{-1})}{\Delta t(\text{min})} \times \frac{10^{-3}(\text{ms})}{1(\mu\text{s})} \times \frac{60(\text{min})}{1(\text{hr})} \times 11.11 \quad (5)$$

結果を表-2 に示す。試験の結果からキサンタンガムの添加によるウレアーゼ活性への影響は少ないと明確となり、今後の検討においてもキサンタンガムを増粘剤として使用することとした。

なお表-2 には、MICP において広く用いられている *Sporosarcina pasteurii* の活性値も併せて示した。また、キサンタンガム含有量は、質量割合である。本検討で用いた微生物の酵素活性値は 1/3 程度であることから、固化期間の短縮が必要な場合には酵素製剤の併用が有効であると考えられる。

微生物の培養には、TSB (Tryptic soy broth) 培地 (BD 社製) を使用した。その調製手順は以下の通りである。

- (1) 300 mL 容量の滅菌済み三角フラスコに蒸留水を採水し、粉末のキサンタンガムを 0.1 g/L (粘度 6.65 mPa · s) を添加し溶解させる。
- (2) 培地成分として Trypticase Soy Broth を 6.0 g/L の割合で秤量し、フラスコ内に添加する。

(3) フラスコの開口部をシリコ栓とアルミホイルで覆い高压蒸気滅菌器（オートクレーブ）を用いて滅菌処理を行う。なお、オートクレーブの条件は、120 °C, 0.203 MPa, 60 分である。

(4) 滅菌後、室温までの冷却が確認されたのちにクリンベンチ内で対象微生物を植菌し、30 °Cのインキュベーターで48時間培養する。

以上の条件で作成した菌体培養液を微生物源として用いる。

表-2 ウレアーゼ活性測定結果

微生物	キサンタンガム (%)	ウレアーゼ活性 (mM/hr)
<i>S.newyorkensis</i>	0	5.6
	0.5	6.7
<i>S.pasteurii</i>	0	20.9
	0.5	16.8

3.1 ミクロマイカ及び Skim milk の添加方法

結晶の核となる物質の人為的な追加を目的としたミクロマイカ（MK-300, 片倉コーポアグリ製造）、脱脂粉乳とも呼ばれ、生乳や牛乳から脂肪分と水分を取り除き、粉状にした Skim milk（富士フィルム和光純薬製）に着目した。これらは、一度の MICP 処理で目標とする強度までの固化効果を得るためにある。

ミクロマイカは、雲母鉱物を非常に細かく粉碎し 5~50 μm 程度の粒径にしたものである¹⁴⁾。ミクロマイカを混合することにより、炭酸カルシウムがミクロマイカを核として析出・成長することで、炭酸カルシウム析出促進効果を期待している。図-4、図-5 に微生物に加えてミクロマイカが核となることで炭酸カルシウムの結晶化が促進される概念を示す。また、Skim milk は炭酸カルシウム結晶のサイズと形態へ影響することがわかっている。Abdullah ら¹⁵⁾は、固化試薬の mol 濃度は変えずに Skim milk を 4 g/L 添加し EICP による供試体を作製し一軸圧縮強度を測定した結果、Skim milk を添加しない条件と比較して 1500 kPa 以上もの強度増加が確認された。これは、Skim milk に含まれるカゼインタンパク質の作用により、Ca²⁺がキレート結合を形成する能力があり、これが Ca²⁺の即時反応を抑制し、炭酸カルシウムの析出速度を低下させる。その結果、結晶の成長速度が低下、より大きく安定した結晶が形成されたことによると考えられている。また、走査型電子顕微鏡 (SEM)による観察の結果、炭酸カルシウムが砂粒子間に多く析出しており、より強固な結合を構築していたと推測されている。さらに Yin ら¹⁶⁾は、Skim milk を添加した MICP による供試体の一軸圧縮強度も測定し、強度向上を確認している。

しかし、どちらとも乾燥状態での強度であることや、微生物と酵素を併用しての検証はされていない。

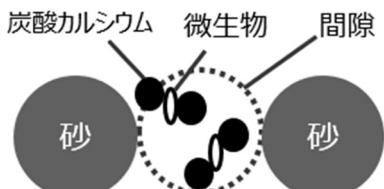


図-4 ミクロマイカ不使用の結晶生成の概念

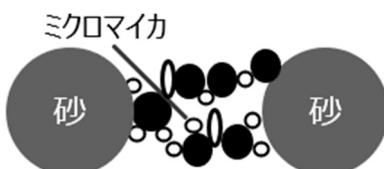


図-5 ミクロマイカによる結晶生成促進の概念

4. 試験方法

一軸圧縮試験の供試体の配合条件を表-3 に示す。

供試体サイズは $\phi 5\text{cm} \times H10\text{cm}$ を目標とし、1 本あたり珪砂 5 号 373.1 g（相対密度として約 50 %相当）を用いた。微生物培養液に尿素、塩化カルシウムそれぞれ 1 mol/L、酵素 3 g/L、ミクロマイカ（砂質量に対する質量割合）、Skim milk を表-3 に従って混合し、この溶液を砂試料に混合するプレミックス法を採用した。なお、塩化カルシウム 1 mol/L の初期 Ca²⁺濃度は 40080 ppm である。また、キサンタンガム含有量は、質量割合である。カラム（直径 $\phi=5.0\text{ cm}$ 、高さ $H=14.0\text{ cm}$ ）に混合した砂試料を投入し、室温（20 °C）の室内で 168 時間養生した。養生中は飽和状態を保つため、カラム上面をラップで蓋をした。養生後はパン切包丁で供試体を高さ 10 cm になるよう成形した後に一軸圧縮試験を行った。供試体数は各ケース一本ずつである。

表-3 供試体配合条件

ケース	キサンタンガム (%)	酵素 (g/L)	固化試料 (mol/L)	ミクロマイカ (%)	Skim milk (g/L)
A	case1	0.1	3.0	0.0	4.0
	case2			1.0	
	case3			3.0	
	case4			5.0	
	case5			7.0	
	case6			10.0	
B	case7		1.0	0.0	0.0
	case8			1.0	
	case9			3.0	
	case10			5.0	
	case11			7.0	
	case12			10.0	

また、一般的に炭酸カルシウム析出量は酸分解試験で行われるが、増粘剤やミクロマイカ、Skim milk を併用しており、正確な析出量が測定できないと考えたため、養生して 168 時間後の Ca^{2+} 濃度の測定から炭酸カルシウム析出量の評価を行った。

5. 試験結果及び考察

ミクロマイカ量と UCS の関係を図-6 に示す。Skim milk を添加しなかった B Case はミクロマイカ併用供試体においても強度発現を確認することができなかった。一方で Skim milk を併用した B Case 全ケースで 500 kPa 以上の強度発現を確認することができた。これは Skim milk により析出する炭酸カルシウムのサイズがより大きくなった効果と考えられる。このことから、提案する 1 shot 固化処理で地下水表面以下の条件で増粘剤併用による強度発現を検証することができ、Skim milk の強度発現への影響について確認できた。

Skim milk 無しの B Case では、ミクロマイカ併用の有無にかかわらず顕著な強度増進効果が認められなかつた。図-7 に示した Ca^{2+} 濃度の結果では、B Case のほうが、 Ca^{2+} 濃度が低く、炭酸カルシウム析出量そのものが多いことが示唆されている。このことは、炭酸カルシウムは砂供試体の間隙中に析出はしたもの、土粒子間を結合するまでには至っていないことが考えられる。その要因として、ミクロマイカは粒系が非常に細かいため、ミクロマイカに炭酸カルシウムが析出しても、砂粒子間を結合するだけのサイズを確保できなかつたことが考えられる。

次に、ミクロマイカの併用効果について考察する。Skim milk の併用により全体的に強度増進効果が認められるが、ミクロマイカの併用による顕著な強度増進効果が認められたのは Case 5 だけであった。実際に図-7 に示した Ca^{2+} 濃度の測定結果からも、5 % が一番低い値を示していることから、効率的な結晶生成が進んでいること示唆される。

図-7 にミクロマイカの添加率と量と Ca^{2+} 濃度の関係を示す。B Case と比較して、Skim milk を添加した A Case において、 Ca^{2+} 濃度の減少が低下することが確認できた。これは、Skim milk に含まれるカゼインタンパク質によるキレート結合により、 Ca^{2+} の即時反応を抑制し炭酸カルシウムの析出速度を低下させたためであると推測できる。この即時反応性の抑制が強度発現に寄与したと考えられる。しかし、ミクロマイカ量による Ca^{2+} の減少傾向は見られなかつた。

各供試体の乾燥密度測定の結果を図-8 に示す。なお、図中の点線は砂のみの供試体の乾燥密度 1.425 g/cm^3 を表している。全ケースにおいて養生後の乾燥密度は 1.425 g/cm^3 を上回る結果となつた。これは固化処理に伴う炭酸カルシウムの析出と、A Case についてはミクロマイカの添加による効果と考えられる。

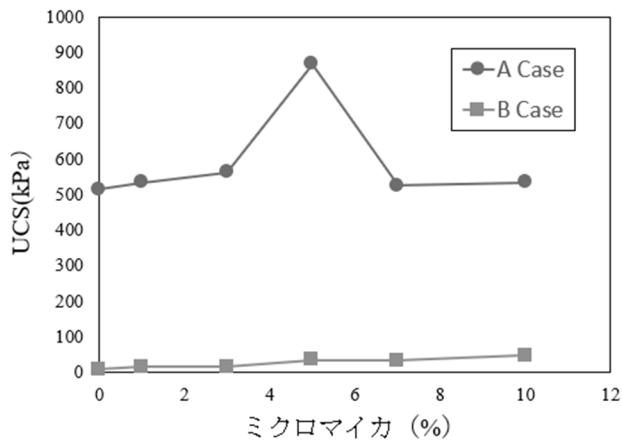


図-6 ミクロマイカ添加量と UCS の関係

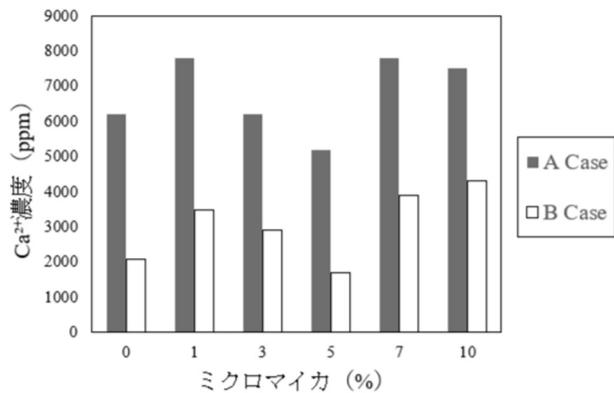


図-7 ミクロマイカ量と Ca^{2+} 濃度の関係

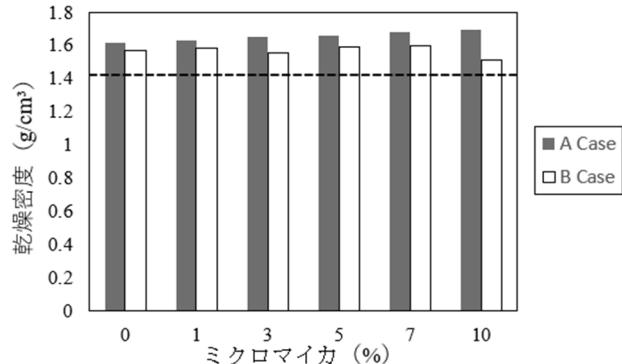


図-8 ミクロマイカ添加量と乾燥密度の関係

6. 結論

本研究では改良型 MICP 技術の提案を目的とし、酵素製剤、ミクロマイカ、Skim milk および増粘剤の併用による 1 shot 固化技術の有効性を室内試験により検証した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 原位置由来の微生物を用いた MICP 技術をベースに、酵素製剤、増粘剤、Skim milk およびミクロマイカを併用する改良型 MICP 技術を新たに提案した。
- (2) 改良範囲の制御を期待して添加する増粘剤としてキサンタンガムを提案するとともに、キサンタンガムの添加が酵素活性に与える影響はほぼないこと

を確認した。

- (3) Skim milk 有りの A Case では、酵素製剤、増粘剤および Skim milk の併用により 500 kPa 以上の強度増進効果が期待できる結果が得られた。特にミクロマイカを 5% 混合した条件では 800kPa を超える強度が確認された。
- (4) Skim milk 無しの B Case では全体的に低強度となるとともに、結晶の核形成を期待して添加したミクロマイカの効果を確認することができなかった。
- (5) B Case と比較して、Skim milk を添加した A Caseにおいて、Ca²⁺濃度の減少が低下する傾向が認められた。
- (6) Ca²⁺がより減少した B Case の強度発現が確認できなかつた要因としては、析出した結晶が砂粒子間をつなぐまでのサイズに成長しなかつたことなどが考えられる。
- (7) ミクロマイカによる核形成による強度発現を把握するには、ミクロマイカ併用条件の供試体数を増やしたさらなる実験が必要である。

今後は、SEM による表面観察により、炭酸カルシウム析出による強度発現について明らかにしていく所存である。また、溶液の粘度を高めることによる浸透範囲の制御効果等を明らかにすることで新たな出砂対策としての実用化を目指していきたい。

謝辞

本研究は経済産業省の委託により実施している MH21-S 研究開発コンソーシアム (MH21-S) の研究の一環として行ったものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Sloan Jr, E. Dendy.: Fundamental principles and applications of natural gas hydrates, *Nature*, Vol. 426, pp. 353-359, 2003.
- 2) 栗原 正典, 佐藤 明彦, 大内 久尚, 大渕 有希子, 増田 昌敬, 成田 英夫, 津金 達哉, 森田 澄人, 辻 健, 山本 浩之: 東部南海トラフメタンハイドレート資源の生産性評価, *石油技術協会誌*, Vol. 74, No. 2, pp. 311-324, 2009.
- 3) Song, X., Nian, T., Mestdagh, T., De Batist, M.: Long- and short-term dynamic stability of submarine slopes undergoing hydrate dissociation, *Gas Science and Engineering*, Vol. 111, No. 204934, 2023.
- 4) DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., Nelson, D. C.: Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. Bio- and chemo-mechanical processes in geotechnical engineering: géotechnique symposium in print 2013. Ice Publishing, Vol. 63, No. 4, pp. 287-301, 2014.
- 5) Gebru, Kbrom Alebel, Tekleweyni Gebremicael Kidanemariam, Haile Kidane Gebretinsae: Bio-cement production using microbially induced calcite precipitation (MICP) method: A review. *Chemical Engineering Science*, Vol. 238, 116610, 2021.
- 6) Mikulčić, H., Vujanović, M., Markovska, N., Wouters, R., Baleta, J., Duic, N.: CO₂ emission reduction in the cement industry, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 35, pp. 703-708, 2013.
- 7) 畠 俊郎, 高橋 裕里香, 西田 洋巳, 安田 尚登: 日本近海のメタンハイドレート胚胎層から単離した微生物を用いた土の強度増進効果に関する実験的検討, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 12, No. 1, pp. 151-160, 2017.
- 8) Hata, T., Saracho, A. C., Haigh, S. K., Yoneda, J., Yamamoto, K.: Microbial-induced carbonate precipitation applicability with the methane hydrate-bearing layer microbe, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 81, No. 103490, 2020.
- 9) Keykha, H., Huat, B., Asadi, A., Moayedi, H., Taha, M. R., Akbari, K. M.: Electrokinetic properties of *pasteurii* and *aquimarina* bacteria, *Environmental Geotechnics*, Vol. 2, No. 3, pp. 181-188, 2015.
- 10) Chen, Fei, Deng An, Li-jie Ling: Bio stabilization of desert sands using bacterially induced calcite precipitation, *Geomicrobiology Journal*, Vol. 33, No. 3-4, pp. 243-249, 2016.
- 11) DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., Nelson, D. C., Ginn, T. R., Weathers, D., Soga, K., Whiffin, V. S., Harkes, M. P.: Bio-mediated soil improvement, *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 197-210, 2010.
- 12) 三宅 正人, 畠 俊郎, 井出 一貫: EICP とカゼインの併用による新しい地盤改良技術に関する検討, 第 56 回地盤工学研究発表会, 2021.
- 13) Wiffin, V. S., van Paassen, L. A., Harkes, M. P.: Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiology Journal*, Vol. 24, No. 5, pp. 417-423, 2007.
- 14) Nakayenga, J., Inui, M., Hata, T.: Study on the effect of amorphous silica from waste granite powder on the strength development of cement-treated clay for soft ground improvement. *Sustainability*, Vol. 14, No. 7, 4073, 2022.
- 15) Almajed, A., Tirkolaei, H. K., Kavazanjian Jr, E., Hamdan, N.: Enzyme induced biocementated sand with high strength at low carbonate content. *Scientific reports*, Vol. 9, No. 1, 1135, 2019.
- 16) Yin, J., Zhang, L., Zhang, K., Zhang, C., Yang, Y., Shahin, M. A., Cheng, L.: Efficacy of milk powder additive in biocementation technique for soil stabilization. *Biogeotechnics*, Vol. 3, No. 2, 100111, 2025.

(2025 年 6 月 16 日 受付)

Fundamental study on short-term solidification using improved MICP

Hayato TAKAYASU¹, Toshiro HATA², and Shungo ABE³

1 Master's Student, Hiroshima University, Civil and Environmental Engineering

2 Professor, Hiroshima University, Civil and Environmental Engineering

3 Japan Organization for Metals and Energy Security

Abstract

The production of methane gas by the depressurization method has been hindered by the large amount of mud mixed with sand that enters the wellbore at the same time as the gas. To solve this problem, we are studying the improvement of MICP, a ground improvement technology focusing on enzyme functions. Here, we focused on the combined use of skim milk and a thickener to control crystal size and penetration area. In addition, we also studied the effect of adding micromica to increase nuclei at the time of crystal precipitation to improve strength. As a result, it was found that (1) a remarkable strength-enhancing effect could be expected for the specimens in which the thickener and skim milk were used in combination, and (2) the addition of mica, which was expected to promote nucleation, showed some conditional effects, but further investigation is needed.

Key words: E-MICP, Thickener, Micromica, Skim milk