

アンコール遺跡における現地土試料を用いた MICP 処理の有効性

岡山 桃子¹⁾, 畠 俊郎²⁾

1) 修士課程, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, m255019@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

経年劣化が懸念される歴史的構造物に対して, 歴史的価値を損ねないよう環境負荷が少なく大規模解体を伴わない修復・保全技術が求められている. このような課題に対し, 強度向上・降雨浸透抑制効果が期待できる微生物を活用した MICP (Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation) に着目した. 本研究では, カンボジアのアンコール遺跡を対象に, 原位置由来の微生物を用いた MICP 処理の有効性について検討した. 圧密排水三軸圧縮試験, 変水位透水試験, 酸分解試験の結果から, 原位置由来の微生物を用いた MICP 処理による強度向上・透水性低下が確認された.

キーワード: 現地土試料, MICP, 三軸圧縮試験

(IGC: C-6, D-6)

1. はじめに

ユネスコ世界文化遺産に登録された歴史的構造物は, 国や地域を超えて人類共通の遺産とされ, その保護と継承は国際的な責務とされている. これら構造物の多くは長い年月の経過に伴って物理的・化学的な劣化が進行している. 特に近年では, 気候変動の影響も加わり, 降雨や浸食などの自然環境による破損・変形の危険性が一層高まっている. このため, 構造物の安定性を確保し, その歴史的価値を損なうことなく, 適切な補修・保全技術確立することが課題となっている¹⁾.

その一例として, カンボジアのアンコール遺跡群が挙げられる^{2), 3)} (写真-1). アンコール遺跡は 9 世紀から 15 世紀にかけて栄えたクメール王朝時代の遺跡群であり, 観光地として有名なアンコール・ワットを含む多くの石積み構造物から構成されている. この遺跡群は, 東南アジアの歴史や文化を象徴する貴重な文化財であり, 保存が極めて重要である.



写真-1 バイヨン寺院

アンコール遺跡の構造物は石材と版築盛土からなる基壇と呼ばれる基礎構造の上に築かれており, この基壇が全体の安定性に大きな影響を及ぼしている. 特に, 盛土部分の支持力は環境条件によって大きく変化することが知られており, 降雨の浸透によって支持力が著しく低下することが問題となっている⁴⁾.

実際に, 1997 年に発生した豪雨により, プラサート・スーブラン N1 塔では構造物の傾斜が急激に進行したとの報告がある²⁾. さらに, 同構造物の基壇内部の盛土に対して行われた平板載荷試験では, 乾燥時には一定の支持力を有する一方で, 飽和に近づくほど支持力が著しく低下することが確認されている⁵⁾. カンボジアは乾季と雨季が明確に分かれる気候であるため, 季節による土壌の含水状態の変化に応じて構造物の安定性が大きく左右される. このため, アンコール遺跡の基礎構造の安定化には, 乾燥・湿潤のいずれの状態においても強度を維持できる地盤改良が必要であり, さらに降雨浸透そのものを抑制する対策も求められる. また, 遺跡構造物においては, 迫り出しアーチ構造や空石積みといったもともと安定性に乏しい構造様式が採用されていることが多く, 地盤のわずかな変位でも全体の崩壊につながる可能性がある. 加えて, 気候変動の進行によって今後降雨の強度や頻度が増すと予測される中, アンコール遺跡に限らず, 同様の構造を持つ歴史的構造物にも同様の不安定化が広がることが懸念されている.

このような課題に対し, 歴史的構造物の補修や基礎改良においては, 文化財としての価値を損なわない施工方法が求められる. すなわち, 元来の構造様式や材料を維持した上で, 必要最小限の改変で安定化を図る技術が必要である. この観点から, 本研究では微生物の代謝機能を利用して炭酸カルシウムを土粒子間に析出させ, 地盤の強度向上および透水性の低下を実現する MICP

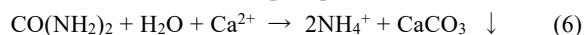
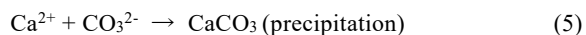
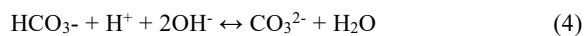
(Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation) 技術⁶⁾に着目する。MICP 技術は、微生物が生産する尿素的加水分解酵素（ウレアーゼ）の働きにより尿素を加水分解してアンモニアと炭酸イオンを生成し、この炭酸イオンと別途添加するカルシウムイオンと結合させて炭酸カルシウムを析出させる反応に基づく。この結晶は地盤の粒子間を結合し、地盤の強度を向上させるバイオセメンテーション、あるいは間隙を充填して透水性を低下させるバイオクロギングとしての効果を有する^{7), 8)}。MICP 技術は従来のセメント系改良材と比べて、使用材料が尿素や塩化カルシウムなど農業分野で広く利用され入手が容易かつ環境負荷の少ない物質である点で有利である。しかし一方で、外部から導入する微生物の環境影響や、施工対象範囲の制御、現地土壌への適用性といった課題も残されている⁹⁾。特に歴史的構造物周辺の微生物環境を乱すことなく安定的な改良効果を得るためには、現地土壌に生息する固化能力を有する微生物を用いた MICP 処理の可能性を検討する必要がある。

本研究では、現地の微生物を活用した MICP 処理によって基礎地盤の強度向上および透水性の低下を期待した室内試験を行い、カンボジア土壌に生息する微生物を用いた MICP 技術の適用性と効果を評価し、歴史的構造物の保全に寄与する新たな修復技術の提案を目的とする。

2. MICP のメカニズム

MICP 技術は微生物の代謝反応を利用して炭酸カルシウムを地盤中に析出させ、地盤の強度向上や透水性低下を実現する地盤改良技術である¹⁰⁾。特に、文化財や歴史的構造物など、構造物を解体せずに最小限の改変で保全を行う必要がある場面での適用が期待されている。

MICP はウレアーゼ活性をもつ微生物が尿素を加水分解する反応に基づく。DeJong et al.¹¹⁾によると、MICP 処理による地盤改良効果のメカニズムは以下のように結論付けられている。尿素が水中で加水分解されると、アンモニアと二酸化炭素が生成され（式 (1)）、アンモニアはさらにアンモニウムと水酸化イオンに変化することで溶液の pH が上昇し（式 (2)）、アルカリ性環境が形成される。この環境下で炭酸イオンとカルシウムイオンが反応し（式 (5)）、炭酸カルシウムが析出する（式 (6)）。



この反応によって生成された炭酸カルシウムは土粒子間に析出することで、粒子間の結合を強化し、地盤の強

度やひずみ剛性の向上、間隙率の減少、さらには透水性の低下といった効果をもたらす¹⁰⁾。この時、炭酸カルシウムの結晶の中に微生物が取り込まれるため反応が進むにつれて微生物の減少がみられる。図-1 に微生物による炭酸カルシウムの析出過程を示す。また、炭酸カルシウムは微生物表面を核として成長するため、粒子表面への均一な析出や、粒子間の接触部に集中して析出するケースがあり、後者はせん断強度や剛性の向上に寄与する。

MICP 技術は主に二つの適用形態に分類される。バイオセメンテーションは強度向上を目的とし、炭酸カルシウムが粒子間の接着剤の役割を果たすものである¹⁴⁾。一方、バイオクロギングは透水性低下を目的とし、間隙を炭酸カルシウムで充填することで水の流れを抑制する物である¹⁵⁾。

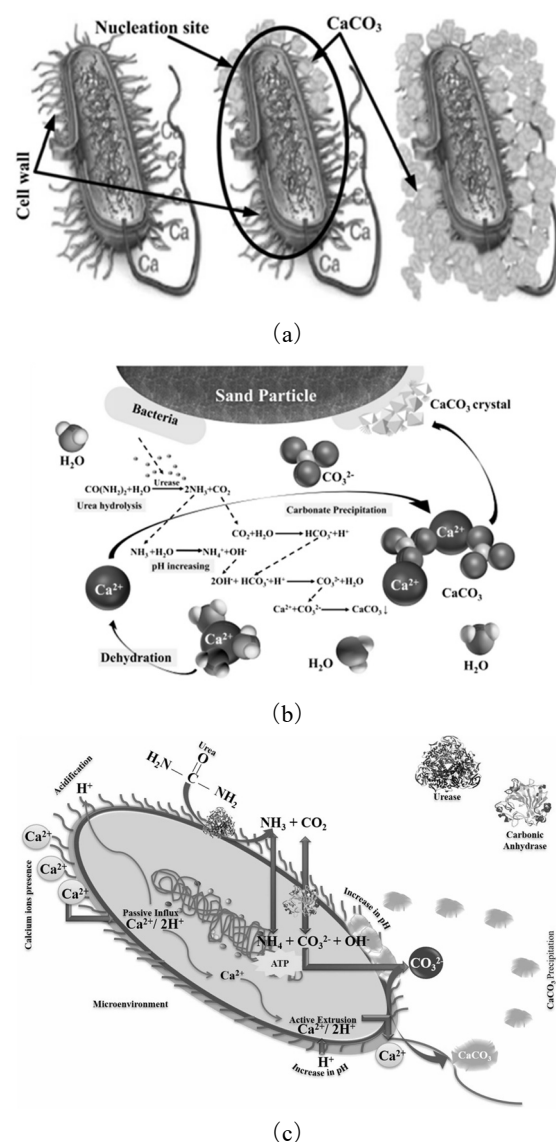


図-1 ウレアーゼ活性を有する菌による炭酸カルシウムの析出過程：(a) 炭酸カルシウム析出時の微生物表面体の模式図¹²⁾、(b) MICP の全プロセス¹³⁾、(c) ウレアーゼと炭酸脱水酵素を介した MICP 形式の模式図⁷⁾

微生物機能を用いた MICP 処理の利点としては、製造過程に二酸化炭素や六価クロムを生成する従来の地盤改良技術に比べて環境負荷が低く、構造物を大きく損わない点が挙げられる。しかし、いくつかの課題も残る。特に外来微生物の使用による生態系への影響が懸念されており、現地土試料に元来存在する微生物を活用した処理方法が検討されている。また、処理の均一性確保や、酸性雨などによる炭酸カルシウムの溶解といった長期耐久性にも課題がある。

実験的研究では、処理回数、溶液濃度、注入速度、土壌種類などの条件が炭酸カルシウムの析出量や分布、最終的な強度や透水性に大きく影響することが明らかにされている¹⁶⁾。

3. ウレアーゼ活性を有する微生物の単離

3.1 微生物の培養方法

本研究では、バイヨン寺院付近の試験盛土（写真-2）の表層部、砂層、粘土層の3種類の試料を対象に期待する微生物の単離を行った。



写真-2 バイヨン寺院付近の試験盛土

以下、各試料をそれぞれ、表層、砂、粘土と記載する。MICP 処理を実施する前に、これらの試料に対して物理特性および強度特性を把握する目的で、土粒子密度試験、含水比試験、粒度試験を実施した。

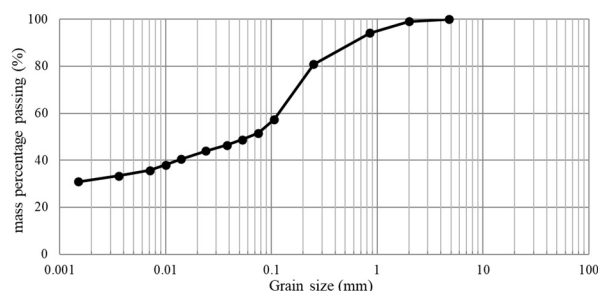
その結果、各試料の土粒子密度は、表層が 2.66 g/cm^3 、砂が 2.65 g/cm^3 、粘土が 2.67 g/cm^3 であった。また自然含水比は、表層が 7.5 %、砂が 0.1 %、粘土が 2.9 % であった。各試料の粒径加積曲線を図-2 に示す。粒度試験の結果、表層は「粘性土質砂」(SCs)、砂は「粘性土まじり砂」(S-Cs)、粘土は「砂質粘性土」(CsS) に分類された。次に、各試料を用いた微生物の分離・培養を目的として、TSB 培地を用いた微生物培養液を作製した。作製手順は以下に示す。

- 1) 300 ml 容量の三角フラスコに 100 ml の蒸留水を採取する。
- 2) それぞれに Trypticase Soy Broth を 3 g、尿素を 2 g

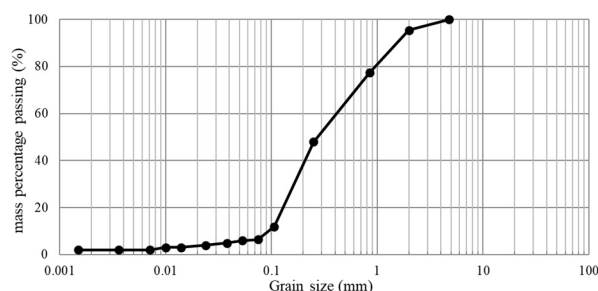
添加する。

- 3) フラスコ上部をシリコ栓で覆い、さらにアルミホイルで覆う。
- 4) これらのフラスコをオートクレーブにより高温高圧滅菌する。
- 5) 滅菌後の溶液を液体培地とする。

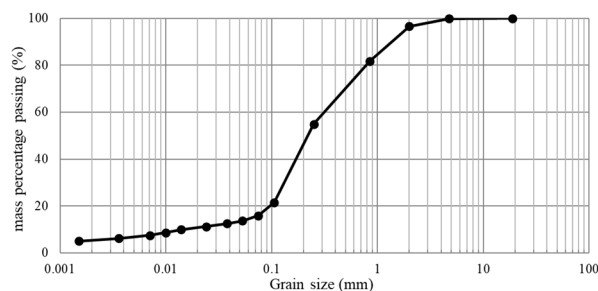
作製した液体培地はクリーンベンチ内にて無菌操作を行い、それぞれに現地土試料を 2 g ずつ添加する。添加後は、 37°C 、130 rpm で 60 時間の振とう培養を行い、得られた培養液を微生物の単離源として用いた。



(a)



(b)



(c)

図-2 粒径加積曲線：(a) 表層，(b) 砂，(c) 粘土

3.2 ウレアーゼ活性測定手順

本研究では、現地微生物および MICP 処理の代表的な微生物である *S.pasteurii* のウレアーゼ活性を対象に酵素活性の比較を行った。

尿素溶液 (1.11 mol/L, 45 ml) に微生物培養液 (5 ml) を添加し、電気伝導度 (EC) を 1 分ごとに計測し、式 (7) を用いてウレアーゼ活性を求めた。結果を表-1 に示す。

$$\text{urease activity (mM h}^{-1}\text{)} = \frac{\Delta \text{EC} (\mu\text{S cm}^{-1})}{\Delta t (\text{min})} \times \frac{10^{-3} \text{ mS}}{1 \mu\text{S}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times 11.11 \quad (7)$$

表-1 ウレアーゼ活性

	Urease activity(mM/hr)
表層	5.07
砂	58.3
粘土	20.1
<i>S.pasteurii</i>	16.5

4. 微生物固化試験

4.1 使用した試料

微生物固化試験には砂質材料で均質性が確保されている 7 号相当のシリカ砂を用いた。当試料はバイヨン寺院付近の盛土材や現地土を直接模擬したものではない。しかし、比較的品质が安定しており、MICP 処理による地盤の強度改善特性、遮水性向上効果の把握をするうえで適切であると考えた。そのため、本研究成果を現地土へ適用する際には、現地土の粒度分布や塑性特性、細粒含有率などの影響を考慮する必要がある。

同砂試料の MICP 処理を行う前の物理・強度特性を把握するために予備実験を行った。試料砂の土粒子密度試験、最大最小密度試験、変水位透水試験、有効応力での粘着力、内部摩擦角を求めるための圧密排水三軸圧縮試験を地盤工学会基準¹⁷⁾に準拠して行った。土粒子密度は 2.66 g/cm^3 、最大密度、最小密度はそれぞれ 1.73 g/cm^3 、 1.54 g/cm^3 との結果が得られた。表-2 に同砂試料の物理特性を示す。

4.2 試験方法

4.2.1 供試体作製

相対密度が 50 % となるようにプラスチック円筒容器（直径 50 mm、高さ 100 mm）にグラベルパックを敷き詰め、供試体を作製した。

表-2 シリカ砂の物理特性

土粒子密度(g/cm^3)	2.66
均等係数	1.30
曲率係数	0.93
最大密度(g/cm^3)	1.73
最小密度(g/cm^3)	1.54
透水係数(m/s)	2.78×10^{-7}
粘着力(kN/m^2)	0
内部摩擦角(deg.)	29.3

4.2.2 MICP 処理方法

作製した砂供試体に対してそれぞれ 2 種類の固化溶液濃度 (0.3 mol/L 、 0.6 mol/L) および通水回数 (1 回、2 回) の組み合わせにより、計 4 通りの MICP 処理を実施した。以降、 mol/L は M と記載する。各処理条件はそれぞれ、 0.3 M-1 shot 、 0.3 M-2 shots 、 0.6 M-1 shot 、 0.6 M-2 shots と

記載する。

処理方法は微生物培養液 80 ml と尿素、塩化カルシウムから成る固化溶液 120 ml を混合したものを、砂供試体に自重で注入する方法である(写真-3)。概略図を図-3 に示す。本試験では、既存構造物を解体せずに地盤内部へ通水により改良材を供給するケース、特にバイヨン寺院の基壇盛土のような歴史的構造物への適用を想定している。

固化溶液(表-3)は、農業用資材である尿素および塩化カルシウムを用いて各濃度に調整後、ろ過滅菌を施して使用した。注入後は、供試体内の間隙水をすべて置換した。また、供試体全体を湿潤状態に保ち均一な処理を可能にし、透水性低下効果を低水頭条件下で評価することができるよう、上部に約 1 cm の水頭を保持したまま 1 週間放置した。本試験は実現場での適用を想定しているが、1 cm の水頭については室内試験における制約条件として設定したものであり、実現場では対象構造物や環境条件に応じた適切な管理が求められる。通水後は未反応成分の洗浄のため、精製水を 2~3 回注入して洗い流した。所定の処理を 1 回通水とし、2 回通水の条件では同操作を繰り返した。各条件につき 3 本ずつ供試体を作製し、炭酸カルシウム析出量は砂重量に対して 2 % を目標とした。

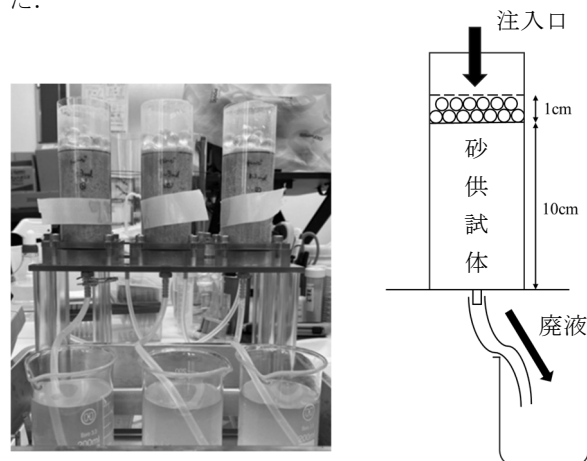


図-3 通水の様子とその概略図

表-3 固化溶液の組成

成分	分量	
Nutrient Broth	0.3 g	0.3 g
NH_4Cl	1.0 g	1.0 g
NaHCO_3	0.21 g	0.21 g
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	1.80 g	3.60 g
CaCl_2	3.33 g	6.66 g
純水	100 ml	100 ml
固化溶液濃度 ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, CaCl_2)	0.3 M	0.6 M

4.2.3 変水位透水試験

所定の MICP 処理後、MICP 未処理の供試体と同様に三軸セル内での変水位透水試験を実施した。本研究では、

MICP 処理を施した比較的透水性の低い試料の透水性を明らかにするため、透水試験の方法として変水位透水試験を選択した。なお、試験には三軸圧縮試験機を使用した。

また、透水係数 k_T (cm/s)は以下の式 (8) を用いて算出した。ここで、 a はスタンドパイプの断面積、 L は供試体の長さ(cm)、 A は供試体の断面積(cm²)、 $t_2 - t_1$ は測定時間(s)、 h_1 は時刻 t_1 における水位差(cm)、 h_2 は時刻 t_2 における水位差(cm)である。なお、スタンドパイプとは、供試体に接続された透水試験用の立て管であり、透水による変位の低下を計測する装置を示す。

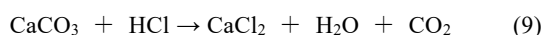
$$k_T = 2.303 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (8)$$

4.2.4 圧密排水三軸圧縮試験

変水位透水試験を行った供試体を用いてそのまま圧密排水三軸圧縮試験を行った。圧密過程で体積ひずみの計測を行い、正規圧密領域で拘束圧を決定した後、MICP 未処理の供試体と同様に圧密排水三軸圧縮試験（有効拘束圧 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa）を実施した。試験後、供試体を炉乾燥し土粒子と炭酸カルシウムを含む状態での乾燥密度を算出した。

4.2.5 酸分解試験

MICP 処理に伴い供試体内に析出した炭酸カルシウム量を把握するため酸分解試験を実施した。炉乾燥後の供試体を粉碎し、塩酸 1 mol/L を加えて溶出させ酸分解前後の質量差により析出炭酸カルシウム量を求めた。析出した炭酸カルシウムの供試体内における分布を確認するため、供試体を上部、中部、下部を三分割した状態で試験を実施した。酸分解の反応式を式(9)に示す。



5. 試験結果と考察

5.1 強度改善特性

5.1.1 圧密排水三軸圧縮試験

表-4 に各ケース、各有効拘束圧における圧縮強さを示す。全ケースにおいて MICP 処理を行った供試体は未改良の供試体に比べて大きな圧縮強さを示した。固化濃度・通水回数による強度変化は微小であり、通水回数と固化濃度の上昇に伴う明確な強度向上は確認できなかった。

表-5 に各ケースで得られた粘着力と内部摩擦角を示す。井上ら¹⁸⁾によると、*S.aquimarina* を用いて豊浦砂を対象とした圧密排水三軸圧縮試験を行い、微生物機能により砂の間隙中に炭酸カルシウムを析出させることで、析出率の増加に伴い、内部摩擦角は一定のまま粘着力が増加する傾向があることが明らかになっている。しかし、本試験では MICP 処理による粘着力増加はほとんど見ら

れず、内部摩擦角が 10 deg.程度向上した。これは MICP 処理による炭酸カルシウム析出が粒子表面や粒子間摩擦を強化する方向へ働いた一方で、炭酸カルシウムが粒子間に均一に析出しなかったことが理由として考えられる。

5.1.2 酸分解試験

図-4 に各ケースの炭酸カルシウム析出率を示す。ここでは、供試体を三分割して行った酸分解試験の平均を用いた。固化溶液濃度、通水回数の増加に伴って炭酸カルシウムが増加すると予想されたが、本試験ではこれらに正の相関は見られず、0.6 M の固化溶液より 0.3 M の炭酸カルシウム析出率が高い結果となった。また、同じモル濃度では 2 回通水での析出率が高くなったが、差は微小であった。さらに、MICP 処理の均一性を確認するため、供試体を三分割し、酸分解試験を行った。その結果、供試体上部で炭酸カルシウムの析出量が最も多くなり、下部と中部での析出は上部の 1/2 程度となった。これは、MICP 処理の際に通水溶液を供試体上部から注入するため、固化反応が供試体上部で起こり、析出が集中したことが考えられる。また、1 回目の通水時に供試体上部で反応が集中し、2 回目の通水溶液が供試体中まで浸透しなかったことが考えられる。

本試験実施後に固化反応にかかる時間を把握するため、0.3 M、0.6 M の固化溶液を用意し、微生物培養液をそれぞれに添加した後、本試験同様の 7 日間の養生を行った。1 日毎に測定したカルシウム濃度の結果を図-5 に示す。いずれも 2 日程度で 50 %以上のカルシウムが消費され、7 日間ではほとんどのカルシウムが消費された。特に 0.6 M の固化溶液では 90 %程度のカルシウム消費に 6 日程度かかったが、0.3 M は 2 日で消費した。

また、炭酸カルシウム析出量は砂重量に対して 2 %と設定し、本試験において 0.3 M の固化溶液で約 2 %の析出が確認できたことから、十分な析出量といえる。

炭酸カルシウム析出と強度向上に明確な関係が見られなかった原因として、炭酸カルシウムの不均一な析出が挙げられる。以上より、炭酸カルシウム析出量の増加に伴う強度向上が確認できず、ほとんどの供試体で同程度の強度となったと考えられる。

5.2 透水性低下効果

炭酸カルシウム析出率と透水係数の結果を表-6 に示す。

表-4 炭酸カルシウム析出に伴う強度変化

	各有効拘束圧における圧縮強さ (kN/m ²)		
	50 kPa	100 kPa	150 kPa
0.3 M-1 shot	207.1	487.6	710.2
0.3 M-2 shots	231.3	509.0	726.7
0.6 M-1 shot	235.5	486.1	720.4
0.6 M-2 shots	232.8	514.5	739.2
未処理	134.3	286.1	425.6

表-5 粘着力と内部摩擦角

	粘着力(kN/m ²)	内部摩擦角(deg.)
0.3 M-1 shot	7.80	39.7
0.3 M-2 shots	1.38	41.5
0.6 M-1 shot	0	41.1
0.6 M-2 shots	0.17	42.0
未処理	0	29.3

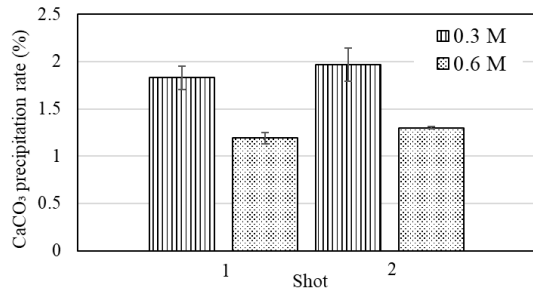


図-4 固化濃度・通水回数と炭酸カルシウム析出率

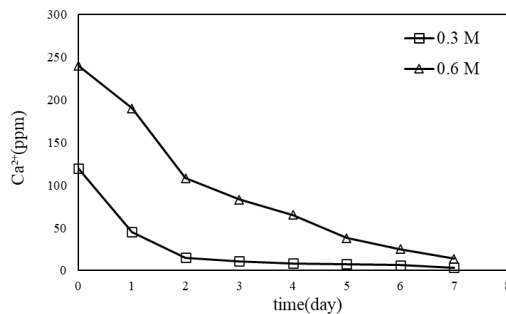


図-5 カルシウムイオン濃度消費量

MICP 処理後の供試体の透水係数は固化溶液の濃度や通水回数によってばらつきはあるものの、未改良時の透水係数と比較して低下し、現地微生物を用いた MICP 処理による透水性低下が確認できた。砂の質量に対する炭酸カルシウム析出率と透水係数の関係を比較すると、析出率が高いほど、透水係数が低下することが確認できた。よって、炭酸カルシウムが供試体内で析出され、それらが土粒子間の空隙を埋めることで、透水性が低下したと考えられる。また、炭酸カルシウムの析出が供試体上部に集中していたことから、表層の透水性が著しく低下し、未改良の供試体と比較して大幅に透水性が低下したと考えられる。

MICP 処理後の乾燥密度の結果を表-7 に示す。未改良の供試体に比べて MICP 処理後の供試体で乾燥密度が低くなった原因としては、尿素加水分解に伴って生成されるアンモニアおよび二酸化炭素の気体が土粒子間に空隙を形成したことによると考えられる。0.3 M の固化溶液 1 L あたり最大約 22 L の気体が理論的に発生しうることから、閉鎖空間における局所的な気体の滞留が供試体の緩みを引き起こす要因となる可能性が考えられる。

Chu et al.ら¹⁵⁾の研究では MICP 処理による透水性低下

のメカニズムは以下のように定義されている。微生物が砂表面に付着して結晶が析出することで架橋構造を形成し、砂粒子間の析出結晶が増えると土粒子間の流路が制限され、最終的に間隙が結晶で充填されることによって透水性の低下に至ることが明らかになっている。また、MICP 処理によって炭酸カルシウム析出率が 1 %程度で約 2 桁の透水係数が低下する結果を得ている。本研究では、砂の質量に対する炭酸カルシウム析出率は 1 %を上回っていたため、MICP 処理による気体の発生による供試体のゆるみ等が考えられる。

本研究では MICP 処理による強度特性および透水特性の改善効果を中心に評価した。圧縮強度の増加や透水係数の低下が確認され、MICP 処理が歴史的構造物基礎地盤の安定化に一定の有効性を持つことが明らかになった。一方で、炭酸カルシウム析出の不均一性により強度増加と析出率の明確な相関は得られなかった。この点は注入方法や処理均一性の改善が今後の課題である。

表-6 変水位透水試験結果

MICP 処理条件	CaCO ₃ 析出量 (%)	平均透水係数 (m/s)
0.3 M-1 shot	1.83	3.06×10^{-8}
0.3 M-2 shots	1.97	2.14×10^{-8}
0.6 M-1 shot	1.19	9.82×10^{-8}
0.6 M-2 shots	1.30	7.99×10^{-8}
未改良	—	2.51×10^{-7}

表-7 改良後の乾燥密度

	乾燥密度(g/cm ³)
0.3 M-1 shot	1.58
0.3 M-2 shots	1.56
0.6 M-1 shot	1.52
0.6 M-2 shots	1.53
未改良	1.76

6. 結論

本研究では、現地微生物を用いた MICP 処理の有効性、処理時の固化溶液の最適濃度・通水回数を検討するため、2 種類の固化溶液濃度・通水回数を用意し、MICP 処理を行い、三軸圧縮試験、透水試験、酸分解試験を実施した。

以下に本試験より得られた知見をまとめる。

- (1) 現地微生物を用いた MICP 処理による強度向上・透水性低下効果を得ることができる。
- (2) 0.3 M, 1 shot での MICP 処理で十分な炭酸カルシウム析出が得られる。
- (3) 注入法による MICP 処理では、不均一性を改善する必要がある。

以上より、現地土試料を用いた MICP 処理において、強度向上・透水性低下効果が期待できる。炭酸カルシウム析出量と透水性には正の相関があり、空隙の充填による透水性低下が示唆された、一方で、析出量と強度には明確な相関がなく、これは炭酸カルシウムが必ずしも土粒子間の結合に寄与していないためと考えられる。また、酸分解試験結果から炭酸カルシウムが供試体上部に集中して析出していることが確認でき、それにより表層の透水性が著しく低下したことが確認できた。さらに、MICP 処理の不均一性が強度向上を妨げた可能性が考えられる。

本研究では MICP 処理による直接的な安定化効果を明らかにすることに重点を置いたが、これらの知見は将来的に変形特性評価や施工手法の改良へと発展する基礎的成果である。

したがって、本研究成果は MICP 処理の有効性を「強度特性」と「透水性改善」の観点から実証したものであり、文化財基壇への適用に向けた第一段階の成果と位置づけられる。今後は、処理の均一化や変形特性の把握を進めることで、歴史的構造物の保全に寄与する持続的で低環境負荷な修復技術としての発展が期待される。

参考文献

- 1) Lan, W., Li, H., Wang, W., Katayama, Y., and Gu, J.: Microbial Community Analysis of Fresh and Old Microbial Biofilms on Bayon Temple Sandstone of Angkor Thom, Cambodia, *Microb Ecol*, Vol.60, pp.105-115, 2010.
- 2) Japanese Government Team for Safeguarding Angkor (JSA): Report on the conservation and restoration work of the Prasat Suor Prat Tower, OGAWAINSATSU Co., Ltd., 2005.
- 3) JAPAN APSARA Safeguarding Angkor (JASA): Report on the conservation research of the Bayon, Angkor Thom, Kingdom of Cambodia, Tokyo: Japan International Cooperation Center, Book II, 2005.
- 4) 岩崎好規, 福田光治: カンボディア王国アンコール遺跡における地盤の収縮と膨張特性の原位置計測結果, 地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.37, No.1, pp.943-944, 2002.
- 5) 岩崎好規, 福田光治, 松原啓充: アンコール遺跡載荷試験に及ぼす乾湿条件の影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.59, No.1, pp.3-55, 2004.
- 6) Saracho, A.C, Haigh, S.K, and Ehsan, M.: Flume study on the effects of microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) on the erosional behaviour of fine sand, *GeotechAuth.cls*, Vol.1.00, pp.1-15, 2015.
- 7) Jose, M., Ernestine, L., Alejandra, M., Rubi, M., Narayanasamy, R., and Balagurusamy, N.: Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Its Potential in Bioconcrete, *Frontiers in Materials*, Vol.6, Article 126, 2019.
- 8) Almajed, A., Lateef, M., Moghal, A., and Lemboye, K.: State-of-the-Art Review of the Applicability and Challenges of microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP) and Enzyme-Induced Calcite Precipitation (EICP) Techniques for Geotechnical and Geoenvironmental Applications, *crystals* 2021, Vol.11, No.370, pp.1-22, 2021.
- 9) Fu, T., Saracho, A.C., and Haigh, S.K.: Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: A comprehensive review, *Biogeotechnics* 1(2023) 100002, pp.1-23, 2023.
- 10) Dejong, J.T., Soga, K., Burns, S.E., and Paassen, L.: Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities, and challenges, *Geotechnique*, Vol.63, No.4, pp.287-301, 2013.
- 11) Dejong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C., and Nelson, D.C.: Bio-mediated soil improvement, *Ecological Engineering*, Vol.36, No.2, pp.197- 210, 2010.
- 12) Saquib, W., B, Mir.: Microbial geo-technology in ground improvement techniques: a comprehensive review, *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol.82, pp.1-24, 2020.
- 13) Xu, X., Guo, H., Li, M., and Deng, X.: Bio-cementation improvement via CaCO₃ cementation pattern and crystal polymorph: A review, *Construction and Building Materials* 297, pp.1-16, 2021.
- 14) Whiffin, V.S., Paassen, L.A., and Harkes, M.P.: Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiology Journal* Vol.24, pp.417-423, 2007.
- 15) Chu, J., Ivanov, V., Naeimi, M., Stabnikov, V, and Liu, H.: Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand, *Acta Geotechnica* (2014) 9, pp.277-285, 2014.
- 16) Dejong, J.T., Fritzges, M.B., and Nusselein, K.: Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.132, No.11, pp.1381-1392, 2006.
- 17) 公益社団法人地盤工学会 (2020): 地盤材料試験の方法と解説 (第一回改訂版), JGS 0311-2020 土の透水試験方法 (JIS A 1218:2020), 地盤工学会, 2020.
- 18) 井上雄太, 畠俊郎: 微生物固化処理土の力学特性に関する研究, 平成 26 年度土木学会中部支部研究発表会, pp.261-262, 2015.

(2025 年 6 月 17 日 受付)

Effectiveness of MICP Treatment Using In-Situ Soil Samples from the Angkor Ruins

Momoko OKAYAMA¹, Toshiro HATA²

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

2 Professor, Hiroshima University, Civil and Environmental Engineering

Abstract

This study investigates the effectiveness of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) using native microorganisms for the restoration of historical structures. The target site is the Angkor ruins in Cambodia, where seasonal variations between dry and rainy periods threaten the long-term stability of stone masonry foundations. To evaluate the applicability of MICP treatment using local soil microorganisms, a series of laboratory tests—including consolidated drained triaxial compression tests, falling-head permeability tests, and acid dissolution tests—were conducted. Sand specimens were treated with different MICP conditions using two solution concentrations and varying flow rates. The results showed that MICP treatment using indigenous microbes led to both strength improvement and permeability reduction. However, calcium carbonate precipitation was found to be unevenly distributed, with a higher concentration near the top of the specimens. While a clear relationship between precipitation rate and strength could not be confirmed, a strong correlation was observed between precipitation rate and reduced permeability. The study highlights the potential of MICP treatment as a low-impact, preservation-oriented ground improvement method using local microbial resources for cultural heritage conservation.

Key words: MICP, in-situ soil sample, triaxial compression test