

添加水量が炭酸カルシウム析出による固化に及ぼす影響の検討

Investigation on the Effect of Water Addition on Solidification by Calcium Carbonate Precipitation

升田 莉太¹⁾, 畠 俊郎²⁾, 橋本 涼太³⁾

1) Ritta MASUDA, 修士課程, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, m241474@hiroshima-u.ac.jp

2) Toshiro HATA, 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) Ryota HASHIMOTO, 准教授, 京都大学大学院工学研究科, hashimoto.ryota.6e@kyoto-u.ac.jp

補修・保全が必要となっている歴史的建造物の基礎部分の地盤改良を施す場合、観光資源という性質上、大きな解体等を伴わない必要最低限の改良が求められる。そのような要求に対し、現地の材料を用い、強度向上・遮水性向上が期待できる MICP (Microbial Induced Carbonate Precipitation) 及び EICP (Enzyme Induced Carbonate Precipitation) に着目した。本研究では、固化に寄与する成分量を固定した条件で水分供給量が固化特性に与える影響に関する検討を行った。改良結果を一軸圧縮試験、炭酸カルシウム析出効率を酸分解試験で確認した。試験の結果から、添加水量の増加に伴い強度増加が確認された。

キーワード : MICP, EICP, 地盤改良, 加水量

(IGC : D-1, D-3)

1. はじめに

世界にはその地域で育まれた文化を代表する歴史的建造物が多数存在している。これらのうちの一部は、人類全体の遺産として保全されることを目的として世界文化遺産として登録されており、観光資源としての役割を損なわず、保全や管理を行っていくことが重要である。しかし、それらの多くは建設後数百年経過しており、材料の劣化による破壊や変形を引き起こす可能性があり、補修や保全が必要となってきた。その中でも基礎部分において問題を有しているものは、補修・保全方法の検討が求められる。

このような問題に直面している歴史的建造物の例として、カンボジアの世界遺産であるアンコール遺跡があげられる¹⁾²⁾。アンコール遺跡はカンボジアでかつて9~15世紀に存在したクメール王朝の王都の跡であり、観光地として有名なアンコールワットをはじめとして多くの石積構造物からなる。このような世界遺産は、貴重な観光資源となっており、現在の機能を維持したまま後世に伝える新たな文化財保護技術を開発する必要がある。

アンコール遺跡の基壇の不安定化要因の一つとして盛土中への降雨浸透による浸水があげられる。アンコール遺跡のプラサート・スーブラ N1 塔では1997年に発生した豪雨の前後で塔が大きく傾いたことが報告されている¹⁾。また、同構造物の基壇の解体時に内部の盛土を対象に行われた平板載荷試験によると、乾燥状態では一定程度の支持力を発揮するのに対し、飽和状態に近づくにつれ支持力が著しく低下することが確認された³⁾。

1999年には実際に日本国政府アンコール遺跡救済チーム (Japanese Government Team for Safeguarding Angkor:

JSA) によってアンコール遺跡のバイヨン北経蔵において遺跡修復工事が行われた。この工事では部分的解体再構築の方法が採用され、新たな材料は極力使わず、同じ構造での復元が行われた⁴⁾。続いて実施されたプラサート・スーブラ N1 塔の修復事業では全面的な解体をした後、基壇部を含む再構築が行われた。基礎の再構築にあたっては基壇盛土全体に消石灰を混合した改良土が用いられた。この修復事例においては、塔が前後に大きく傾き大規模な解体が必須であったためこのような修復工程が採用された⁴⁾。しかし本来であれば、課題を有する歴史的建造物の基礎の改良を施す場合、オリジナルの建造物の維持のため、安全性を担保しつつ大きな解体等を伴わないことが求められる。加えて、一部の世界遺産では、修復において主に用いられているセメントなどの固化材の使用が受け入れられない場合もあり、できるだけ建設当時の材料を使用しながら、必要最低限の補修・保全を施すことが重要となる。

近年の急激な気候変動により、今後同様の構造様式を有する歴史的建造物においても不安定化が懸念されている。よって、必要最低限の施工により構造物の安定化が期待できる従来の修復方法に代わる新たな技術が求められている。このような要求を満たす技術として、微生物機能を活用し無機鈣物の析出により強度増進、透水性低下などの効果を得る手法に着目する。同手法は、セメントなどの人工的な固化材を用いず、対象が建設された当時から存在する材料のみでの固化が期待できるため、文化財などの遺構の修復事業における上記のような制約条件を満たす。そのため、本研究では生物機能による改良技術の中で適用可能なものがあるかどうか調べ、着目した技術への適用時を想定した室内試験を通じて適用性を

明らかにした。

2. 生物機能に着目した地盤改良技術

生物機能を活用した地盤改良技術は、無機鉱物の析出に必要な反応基質と反応の触媒となる微生物や酵素を注入することで反応を起こし析出した無機鉱物により土粒子の結合の強化や間隙補充により地盤改良効果を得る。以下に現在検討が進められている技術について述べる⁵⁾。

2.1 シリカによる固化方法⁵⁾

シリカ法とは、微生物を用いてシリカ化合物をゲル化させることで固化を引き起こし、地盤改良を行う技術のことである。多量のシリカゲルの形成は、シリカ化合物中の珪酸ナトリウムと pH 調整剤として加えた酸が中和反応を起こし、ナトリウムが除去されてシラノール基が縮合重合し、シロキサン結合が生成され高分子化することによっておこる。当技術の課題として固化において pH 調整剤を必要とする点があげられる。

2.2 炭酸カルシウムによる固化方法

生物機能を活用した地盤改良技術において最も検討事項が多い手法が、炭酸カルシウムを析出させ改良を行う技術である。具体的な技術として、尿素加水分解作用がある微生物を用いた MICP (Microbial Induced Carbonate Precipitation) や植物由来のウレアーゼ酵素を用いる EICP (Enzyme Induced Carbonate Precipitation) がある。

炭酸カルシウムの析出に必要なカルシウム分としては塩化カルシウム、硝酸カルシウム、酢酸カルシウムなどについて検討が進められている。一方、炭酸イオンについては有機物の好気・嫌氣的代謝からなるもの、尿素的加水分解反応から得るものなどが提案されている。

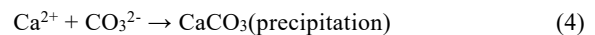
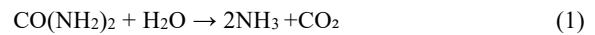
この中で、有機物の代謝反応を利用するものについては有機酸の精製などに由来する pH の低下により炭酸カルシウム析出に適した pH 条件を維持することが難しく、pH 調整機能を持つトリスヒドロキシメチルアミノメタンといった試薬を併用することが多い。一方、尿素的加水分解を利用して炭酸カルシウムを得る方法については、尿素的加水分解時にアルカリ分であるアンモニアが生成されることから pH 調整剤が不要であるといったメリットがある。ただし、生成されたアンモニアは土壤中の硝化細菌の働きにより硝酸・亜硝酸に変化する。この物質は環境基準が定められている物質であり、人の健康や生態系に与える影響が危惧されている。しかしながら、目標とする炭酸カルシウム析出量を地盤改良効果が期待できる最小限に抑えることで、発生するアンモニア量を減らすことができ、環境負荷を抑えることができる。

本研究では歴史的建造物の補修・保全方法として、できるだけ現地の材料を用い、基壇盛土の強度向上・遮水性向上の達成を期待している。好気・嫌気や pH 条件に問わず結晶の析出が期待でき、比較的安定性があること

を加味し、生物機能による炭酸カルシウム析出を活用した地盤改良技術⁶⁾に着目し、当技術の基壇への適用性について研究を行った。

3. 微生物固化技術(MICP,EICP)の概要

代表的な生体触媒を活用した地盤改良技術である MICP⁴⁾と EICP について、以下に炭酸カルシウム析出メカニズムとそれぞれの特徴について示す。



(1)は、ウレアーゼ活性を有する生体触媒による溶液中の尿素的加水分解反応であり、二酸化炭素とアンモニアに分解される過程である。続いて、式(2)(3)では、尿素的加水分解が起こり、アンモニアと二酸化炭素が生成される。生成された二酸化炭素も水に溶解し、炭酸イオンと水素イオンが生成される。このとき、放出されたアンモニアは、アンモニウムイオンとして水に溶解し、pH を上昇させる。これにより、溶液がアルカリ環境下に維持され、炭酸カルシウム析出に適した条件となり、結晶鉱物の析出が促進される⁷⁾。MICP の場合、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見られる。これは、使用する溶質の濃度に依存することが確認されている⁷⁾。

微生物機能に着目した地盤改良技術では、地盤の強度を向上させるバイオセメンテ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が知られている。このほかにも、土壌侵食耐性向上⁸⁾やコンクリートの透水性低下など様々な効果が期待できる技術である。実地盤では、ウレアーゼ活性を有する微生物と尿素、塩化カルシウムを併せて注入し、炭酸カルシウムを析出する。その結果、基壇盛土内の土粒子間に炭酸カルシウムが析出し、結合がより強固なものとなることで強度向上・透水性低下効

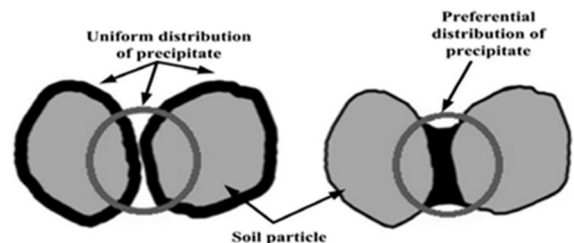


図-1 炭酸カルシウム析出分布ケース⁸⁾

表-1 豊浦砂の物理特性¹¹⁾

| | |
|----------------------------|-------|
| 最大密度(g/cm ³) | 1.675 |
| 最小密度(g/cm ³) | 1.023 |
| 土粒子の密度(g/cm ³) | 2.643 |

果⁹⁾が期待できる。これらの効果が期待できるメカニズムとしては次のように結論づけられている¹⁰⁾。微生物を核として析出した炭酸カルシウムは主に土粒子の周辺に析出し、均一な厚さで土粒子周囲に分布するケース、土粒子間の接触部のみに析出するケースの二つに分けられる(図-1)。前者の場合、土粒子間の炭酸カルシウム析出による接触面積の変化は比較的小さいため、土の力学的特性(強度や透水性)はほとんど変化しない。対して、後者の場合、粒子間の接触面積が大きくなるため、土の力学的特性(強度や透水性)の改善が期待できる。そのため、炭酸カルシウム析出による地盤改良効果は析出する炭酸カルシウム量だけではなく析出物の形状や分布形態にも依存することが示されている。また、MICP処理による地盤改良は、大規模な建設材料の追加を必要とせず、建設当時の材料のみでの修復が可能であり、歴史的建造物の地盤の改良を施すうえで適切である。

EICP技術とは、MICP技術と同様に炭酸カルシウム析出による地盤改良技術であり、尿素の加水分解反応において、微生物ではなく植物由来のウレアーゼ酵素を触媒としている。施工性においては微生物を維持し続けるために定期的に微生物の栄養源を供給する必要があるMICPに比べ、EICPでは微生物の生命の維持のための栄養塩の供給が必要ないという点において施工性が容易になるといったメリットがある。

両技術は理想的な条件下での室内試験での地盤改良効果は確認されているが、実地盤への適用性に関しては課題が多く残っている。具体的には、施工期間の長期化による施工負荷や固化の均一性、固化を効率的に行う条件の検討などがあり、実地盤への適用に関しては制限・制約がある⁸⁾。

そのため本研究では、同技術の基壇の適用に向け、加水量が生体触媒を活用した地盤改良技術の強度発現特性に与える影響について調べた。MICPを施す供試体に関しては、固化試料と微生物菌体量は変えず加水量のみを変えて作製した。MICP及び、EICP処理を施した供試体に対して一軸圧縮試験(JISA1216:2020)を行い、加水量による強度改善特性に与える影響を明らかにする。次に、酸分解試験を実施し炭酸カルシウム析出量の測定を行い、炭酸カルシウム析出効率についての検討も行った。酸分解試験は炉乾燥後の供試体をハンマーでたたいて粉砕し、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。

4. 使用材料

4.1 使用した試料

本研究では豊浦砂を用いて供試体を作製することとした。豊浦砂は、その材料物性が詳細に研究され、供試体の材料として用いられる一般的な材料である。そのため、加水量が固化特性に与える影響を調べるため、一般的な材料である豊浦砂を選出した。豊浦砂の最大密度、最小

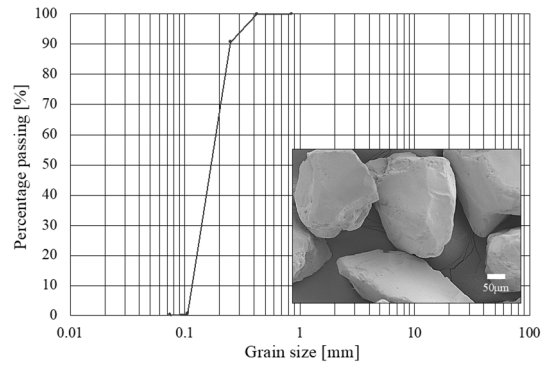


図-2 豊浦砂の粒径加積曲線¹²⁾

表-2 計測結果とウレアーゼ活性

| | ウレアーゼ活性(mM/hr) |
|--------------------|----------------|
| <i>S.pasteurii</i> | 16.5 |
| 本研究の微生物 | 5.9 |

密度、土粒子密度と粒径加積曲線を表-1、図-2に示す。固化試料には肥料として一般に市販されている尿素と、同じく融雪剤として一般に市販されている塩化カルシウムを用いることとした。本実験では、目標炭酸カルシウム析出率を砂質量に対して2%に設定し、供試体1本あたりの尿素と塩化カルシウムの添加量をそれぞれ6.4 g、7.9 gと調整した。なお、これらの目標炭酸カルシウム析出率は強度発現が期待でき、なおかつ副産物による環境景況を最小限に抑えることができるように考慮した値である。

また、EICPにおいては試薬として市販されている精製ウレアーゼを使用した。酵素活性値は製造元である純正化学株式会社のデータでは2000~5000(U/g)であった。

4.2 微生物

本研究では、著者らが国内土壌から単離したウレアーゼ活性が陽性である *Sporosarcina* 属を用いることにした。用いた微生物培養液のウレアーゼ活性を、尿素の加水分解に伴う電気伝導度(EC)の増加に着目して評価した。カルシウムイオンの存在しない条件下では、非イオン性物質である尿素からイオン性物質を生成し、ECが直線的に上昇する¹³⁾ことが分かっている。本研究では、1.11 Mの尿素溶液54 mLを用意して、菌体培養液を5 mL添加した後、1分間静置した。その後、導電率計を用いて6分間ECを毎分記録した。ウレアーゼ活性は式(5)に基づいて計算した。今回用いた微生物培養液は表-2の測定結果に示すように活性が確認された。ここで、今回用いた微生物の活性値の指標として、MICP技術において一般的に用いられる微生物である *Sporosarcina.pasteurii* についてのウレアーゼ活性値の測定結果も示す(表-2)。これより今回用いたウレアーゼ活性を有する微生物の活性値は微生物固化で一般的に検討されている微生物の1/3程度の活性を有していることを確認した。

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

微生物の培養には BBL 培地 (BD 社) を用いた。以下に作製手法の手順を示す。

- (1) 300 ml 容量の三角フラスコを用意し、蒸留水を採水する。
- (2) BLL Trypticase Soy Broth を 6.0 g/L 秤量して三角フラスコに添加する。
- (3) 三角フラスコは直接アルミホイル等を用いてふたをし、吹きこぼれやその他の雑菌混入を防止する。
- (4) ふたをした三角フラスコはオートクレーブを用いて高圧蒸気滅菌する。
- (5) 滅菌後の溶液を液体培地とする。

このように作製した後、クリーンベンチ内で白金耳等を用いて菌体をプレート培地から液体培地へ植菌した。次いで、インキュベーター内で 48 時間浸透培養したものを微生物培養液として使用した。

5. 試験方法

5.1 供試体の作製

本研究では固化処理における加水量による強度発現特性を明らかにするため、固化試料 (尿素, 塩化カルシウム), 菌体量または酵素添加量を変化させず加水量を調節し供試体を作製した。なお, 菌体量は均一にするため微生物培養液は 14.3 g で統一し, 添加する蒸留水の量で総加水量を調節した。なお, これらの加水量は式(1)~(4)が進行するうえで十分な含水比である。本研究で使用した配合条件を表-3, 表-4 に示す。

供試体作製では, 供試体 1 本あたりに豊浦砂を 285 g 用い, 相対密度は約 70% である。水または水と微生物培養液, 固化試料を混合しボルテックスミキサーで溶解するまで攪拌し, 豊浦砂に加水する。加水後は試料が均一になるように混合を継続し, 混合後に, 直径 5 cm, 高さ 10 cm のモールドに 3 層に分けて投入し, 1 層につき 25 回タッピングしながら充填した。その際, 各層のつなぎ目では上層との結合を助ける目的で表面をプラスチックで粗くしてから次の層の試料を加えた。作製後の供試体は室温 20℃ の室内で 3 日間気中養生を行い, その後 40℃ の恒温室で重さが変わらなくなるまで乾燥させた。

5.2 酸分解試験

MICP 及び EICP による固化処理に伴い供試体内部に析出した炭酸カルシウム量を把握するために酸分解試験を実施した。一軸圧縮試験終了後の供試体を乾燥炉に入れ完全に乾燥させた。炉乾燥後, 酸分解試験実施前の質量を計測し, 塩酸 1 mol/L を加えて炭酸カルシウムを溶出させた。酸分解実施後は蒸留水で塩酸を洗い流し乾燥炉で乾燥させ, 質量を計測した。以上から酸分解前後の質量差により析出した炭酸カルシウム量を求めた。酸分解反応式を式(6)に示す。

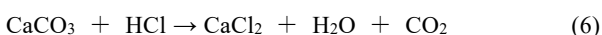


表-3 供試体配合条件 (MICP)

| ケース | 砂に対する 総加水量 (%) | 砂に対する 総加水量(g) | 添加する 蒸留水(g) | 微生物 培養液 (g) | 尿素(g) | 塩化 カルシ ウム(g) |
|-----|----------------------|------------------|----------------|-------------------|-------|--------------------|
| A | 5 | 14.3 | 0 | 14.3 | 6.4 | 7.9 |
| B | 10 | 28.5 | 14.2 | | | |
| C | 15 | 42.8 | 28.5 | | | |
| D | 20 | 57 | 42.7 | | | |

表-4 供試体配合条件 (EICP)

| ケース | 砂に対する 総加水量 (%) | 砂に対する 加水量(g) | 酵素 | 尿素(g) | 塩化 カルシ ウム(g) |
|-----|----------------------|-----------------|-----|-------|--------------------|
| E | 5 | 14.3 | 0.5 | 6.4 | 7.9 |
| F | 10 | 28.5 | | | |
| G | 15 | 42.8 | | | |
| H | 20 | 57 | | | |

6. 試験結果と考察

6.1 強度発現特性への影響の検討

(a) 一軸圧縮試験

加水量が固化処理の強度発現特性に与える影響についての検討を行うために, 固化試料と微生物菌体量または酵素添加量は変えず加水量のみを変えて作製した供試体に対して一軸圧縮試験を行った。その際, 乾燥密度についても計測を行った。結果を図-3 に示す。なお, 両固化技術において含水量 5% を基準とした強度向上率を求めた。

添加水量を増加させるにつれ強度向上する傾向が確認できた。加水量 5% から 20% に増加することで, MICP では約 1.26 倍, EICP では約 1.89 倍もの強度改善効果が確認できた。

これらの結果は, 尿素的加水分解には水が必要であるためと考えている。MICP および EICP は尿素的加水分解を利用して炭酸カルシウムを析出させ固化を行う技術である。そのため, 加水量が増えることで尿素的加水分解反応がより活発になり析出する炭酸カルシウムが増加し, より大きな強度改善効果が見られたと推測できる。

各供試体の乾燥密度測定の結果を図-4 に示す。なお, 図中の点線は砂のみの供試体 (直径 5 cm, 高さ 10 cm, 豊浦砂 285 g) の乾燥密度 1.45 g/cm³ を表している。全ケースにおいて養生後の乾燥密度は 1.45 g/cm³ を上回る結果となった。これは固化処理に伴い炭酸カルシウムが析出したため供試体の密度が増加したと考えられる。

(b) 酸分解試験

一軸圧縮試験が終了した供試体に対して酸分解試験を行い, 析出した炭酸カルシウムの量を測定した。なお, 本研究では強度改善特性に最も差があった CaseA と CaseD の供試体を対象に実施した。結果を図-5 に示す。試験結果から, CaseA, CaseD の炭酸カルシウム析出率はそれぞれ 1.37%, 1.98% となり, 添加水量が多い CaseD のほうが大きな炭酸カルシウム析出率を示した。これら

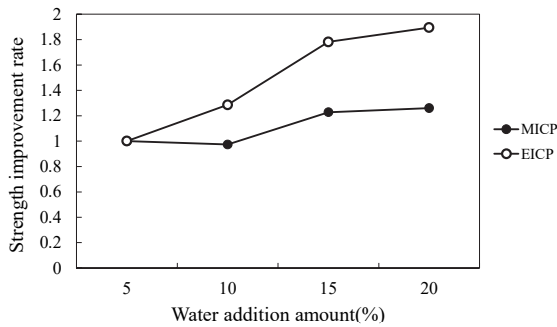


図-3 強度向上率の比較

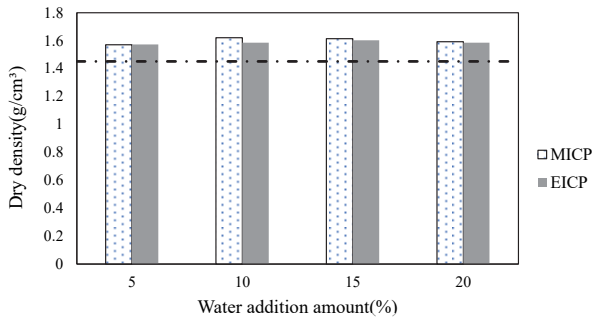


図-4 各供試体の乾燥密度

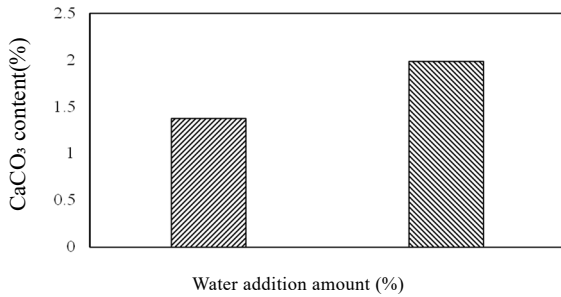


図-5 酸分解試験結果

より、一軸圧縮試験の結果で確認された添加水量の増加に伴う強度向上は析出した炭酸カルシウムに起因していると考えられる。

6.2 炭酸カルシウムが間隙比に与える影響

各ケースにおける固化処理後の供試体の間隙比を図-6に示す。なお、図中の点線は砂のみの供試体(直径 5 cm, 高さ 10 cm, 豊浦砂 285 g)の間隙比 0.82 を表している。すべてのケースにおいて固化処理により供試体の間隙比の減少が確認できた。これは、炭酸カルシウムが土粒子に接着するように析出することで土粒子体積の増加、及び間隙体積の減少が起きたためと考えられる。この結果から、析出した炭酸カルシウムによる間隙の充填が行われたため、固化により供試体の透水性の低下が示唆された。

ここで、同研究室において豊浦砂の供試体に EICP 処理を施した実験から得られた一軸圧縮試験と間隙比の関係を図-7に示す。なお、本研究と供試体作製方法、固化条件は同じであり、供試体の相対密度は 50%である。炭酸カルシウム析出量の増加に伴い間隙比が直線的に低下し、それに伴い UCS は直線的に増加することが分かった。この直線的な増加から間隙比の低下に伴う UCS の増加式が提案できる。

$$P = -43002 \times e + 35353 \quad (7)$$

ここで、 P : UCS (kPa), e : 間隙比である。この式から本研究にて得られた間隙比を用いて UCS を求め、本研究と同様含水量 5%の供試体の強度を基準とした強度向上率を求めた。一軸圧縮試験から求めた強度向上率と式(7)から求めた強度向上率を比較した結果を図-8に示す。強度向上率に関しては式(7)から求めたほうが穏やかな向上を示した。これは本研究における強度向上効果が大きかったことを示している。強度改善効果は析出する炭酸カルシウムの結晶形態や分布場所に依存することが知られており¹⁴⁾、そのため同条件にいても強度向上効果に差異が見られたと考えられる。

次に、同研究室において珪砂 8 号の供試体(直径 5 cm, 高さ 5 cm, 相対密度 70%)に同じ微生物を用いて MICP 処理を施した実験から得られた間隙比減少比と透水係数の推移を図-9に示す。ここで間隙比減少比とは改良後の間隙比を改良前の間隙比で割った値と定義した。なお、使用した試料は最小密度 1.147 g/cm³, 最大密度 1.55 g/cm³, 土粒子密度 2.641 g/cm³であり、豊浦砂と近い材料物性を有しているため比較可能と判断した。図-9 から約

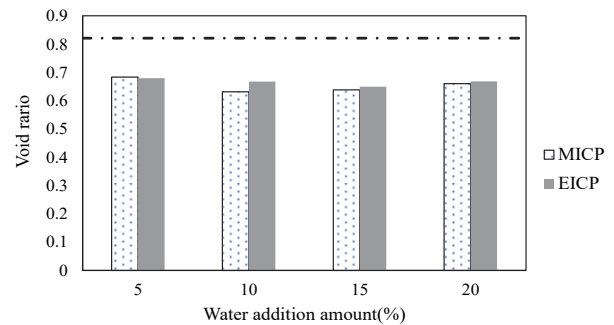


図-6 各供試体の間隙比

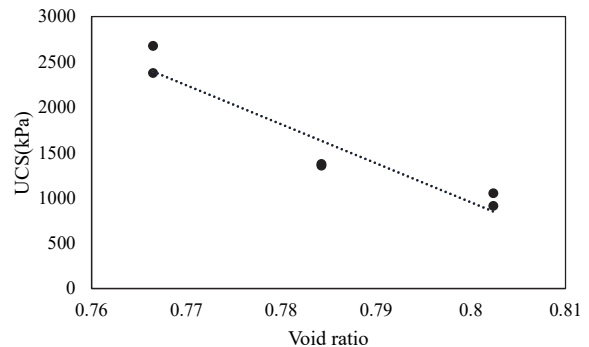


図-7 間隙比と UCS の関係 (EICP)

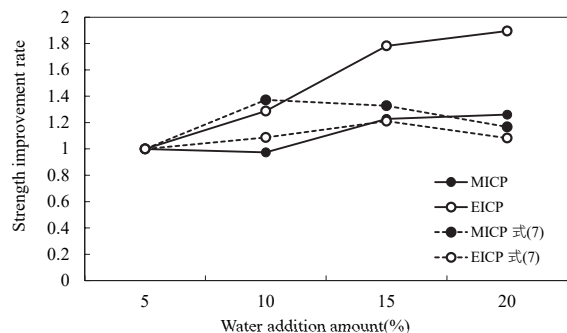


図-8 強度向上率の比較

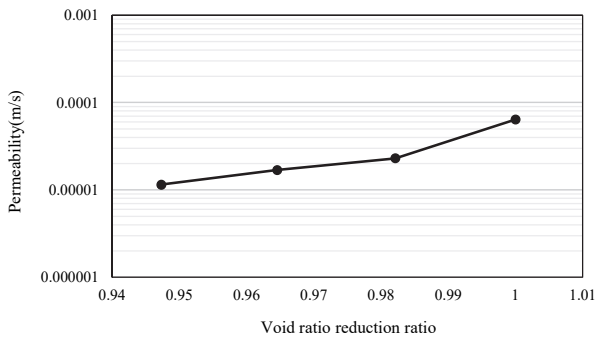


図-9 間隙比減少比と透水係数の関係

5%の間隙減少が得られた場合、約一桁の透水係数低下効果が期待できることが分かる。本研究において MICP では最大約 7%、EICP では約 4.5%の間隙減少率が確認できた。そのため、本研究において透水試験の実施は行っていないが、間隙減少率から約一桁の透水係数の低下が推測される。

7. 結論

本研究では、固化処理における加水量による強度発現特性の違いについて検討を行うために、異なる添加水量の供試体に対して一軸圧縮試験、酸分解試験を行った。以下に本実験より得られた知見をまとめる。

- (1) MICP, EICP とともに尿素の加水分解に必要な水を増加させることによって、強度を向上させることができる。
- (2) 固化処理を施すことによって、供試体の間隙中に炭酸カルシウムが析出し乾燥密度が増加する。
- (3) 添加水量が多い供試体のほうが析出する炭酸カルシウム量が多くなる。

以上より、微生物機能を活用した地盤改良技術である MICP と EICP において、添加水量を増加させることで尿素の加水分解反応を促進させより多くの炭酸カルシウム析出が期待することができる。また、析出した炭酸カルシウムの析出形態や分布は供試体の強度改善効果に直接起因するため、養生時間や使用する生体触媒のウレアーゼ活性、配合条件が結晶析出へ与える影響の検討は必須であると考えられる。これらの試験を実施して生体機能を活用した地盤改良技術である MICP や EICP の基壇への適用に向けて、当技術の技術開発を進めていく所存である。

謝辞

研究は JSPS 科研費 23H01502 の助成を受けたものです。また、本研究の実施にあたり、広島大学大学院先進理工系科学研究科社会基盤環境工学プログラムの大館侑弥さん、Nakayenga Joyce Justine Namutebi さんから貴重な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Japanese Government Team for Safeguarding Angkor (JSA): Report on the conservation and restoration work of the Prasat Suor Prat Tower, OGAWAINSATSU Co., Ltd., 2005.
- 2) JAPAN APSARA Safeguarding Angkor (JASA): Report on the conservation research of the Bayon, Angkor Thom, Kingdom of Cambodia, 2011.
- 3) 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, pp3-55, 2004.
- 4) 古部浩: カンボジアのアンコール遺跡とその修復, 地学雑誌 Journal of Geography, 基礎工, Vol.32, No.1, pp69-72, 2004.
- 5) R.Terajima, et al.: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering), 65, pp.120-130, 2009.
- 6) DeJong, et al.: Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges, Bio-and chemo-mechanical processes in geotechnical engineering: géotechnique symposium in print 2013. Ice Publishing, 2014.
- 7) Keykha H, Huat B, Asadi A, et al.: Electrokinetic properties of pasteurii and aquimarina bacteria, Environmental Geotechnics, Vol. 2, No. 3, pp.181-188, 2015.
- 8) Chen, Fei, et al.: Bio stabilization of desert sands using bacterially induced calcite precipitation, Geomicrobiology Journal 33.3-4, pp.243-249, 2016.
- 9) Gebru, et al.: Bio-cement production using microbially induced calcite precipitation (MICP) method: A review, Chemical Engineering Science 238, 116610, 2021.
- 10) DeJong JT, Mortensen BM, Martinez BC, et al.: Bio-mediated soil improvement, Ecological Engineering, Vol. 36, No. 2, pp.197-210, 2010.
- 11) 堤千花, 佐藤剛司, 古関潤一: 動的及び静的に求めた乾燥豊浦砂の弾性変形係数, 生産研究, 58 巻 6 号, pp.521-524, 2006.
- 12) 細野康代, 吉嶺允俊: 豊浦砂の粒度分布, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp335-336, 2009.
- 13) Wiffin, V.S., et al.: Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, Geomicrobiology Journal, Vol. 24, No. 5, pp. 417-423, 2007.
- 14) Ivanov, Volodymyr, et al.: Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 7, pp.139-153, 2008.

(2024 年 6 月 24 日 受付)