ビルラ工科大学（インド）　研修報告書
現地土試料を用いたMICP技術の遺跡修復への適用に関する研究

先進理工系科学研究科　社会基盤環境工学プログラム　岡山 桃子

1. はじめに

2025年8月19日から同年9月20日の間，インドのビルラ工科大学において研究を行った．以下に結果を報告する．

2. 研修/共同研究課題の決定

世界には経年劣化が危惧される歴史的構造物が多数存在する．これらの修復において，歴史的価値を損なわないよう大規模解体等は避ける必要がある．また，処理した際の周囲環境への影響を考慮した修復技術が必要となる．本研究では，これらのことを考慮して微生物機能を活用したMICP 技術を検討する．当技術は環境負荷低減が可能であると同時に，降雨浸透抑制効果や強度向上効果を得られるため，遺跡修復への適用において適切であると考える．また，本研究では対象地域を特徴的な気候である乾季・雨季を有する地域とし，乾湿繰り返しへの耐久性が高い修復方法を検討する．特に，雨季における石材の隙間からの降雨浸透を抑制するための工法を検討する．

3. 研修/共同研究スケジュール

8月18日　出国
8月19日～9月20日　研究
9月20日～9月21日　帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名：BITS Pilani（Birla Institute of Technology and Science, Pilani）,Hyderabad campus
所在地：Jawahar Nagar, Kapra Mandal, Hyderabad, Medchal-Malkajgiri District, Telangana
指導教官：Prof. Anasua Guharay

5. 研修/共同研究の内容

5.1 研究背景

現在，世界各地には建設後数百年が経過し，修復や保全を必要とする歴史的構造物が数多く存在する．その代表例の一つがカンボジアのアンコール遺跡である．同遺跡は石積み構造物から成り立っており，基壇部を支持する盛土において降雨浸透に伴う強度低下が懸念されている．特にカンボジアは乾季と雨季を有する気候下にあり，雨季の降雨浸透は長期的な構造安定性に影響を及ぼす要因となっている．したがって，歴史的構造物を対象に修復・保全を行う場合には遺跡そのものの歴史的価値を損なうことなく，周囲環境への負荷を最小限に抑えた修復技術が求められる．

この要求に対して有効と考えられる技術の一つが，微生物機能を利用した MICP（Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation）技術である．同技術は，大規模解体を伴うことなく，地盤内部に炭酸カルシウムを析出させることで強度向上・透水性低下効果を得ることができる．そのため，歴史的構造物の修復に適した環境負荷低減可能な技術として注目される．

本研究では，さらに環境負荷を低減する観点から，現地で採取した土試料を対象にMICP処理を行い，歴史的構造物に適用可能な修復方法を検討する．特にアンコール遺跡が位置するカンボジアは乾季・雨季が明確に存在するため，降雨浸透による盛土の強度低下が主要な変状要因となっている．この点に着目し，本研究では乾湿繰り返しへの耐性を有する修復方法の検討を目的とする．

本試験は，カンボジアと同様に乾季・雨季の気候条件を有するインドにおいて実施した．現地

土試料を対象に MICP 処理（bio-augmentation）を行い，乾季および雨季を模擬した条件下で供試体を養生し，その力学的特性の変化を評価する．

5.2 試験概要

初めに，MICP のプロセスについて示す．同技術は微生物の代謝機能を利用して炭酸カルシウムを析出させるプロセスである．代表的なメカニズムとして，ウレアーゼ活性を有する細菌が尿素を加水分解し，アンモニアと二酸化炭素を生成する．この反応により土中の pH が上昇し，溶存するカルシウムイオンと二酸化炭素が反応して炭酸カルシウムが生成される．析出した炭酸カルシウムは土粒子間の空隙を充填し，粒子間の結合を強化することで，地盤の強度向上や透水性低下効果が得られる．同技術は環境負荷の小さい地盤改良技術として，文化財修復や耐久性向上技術として注目される．

MICP 技術の適用手法には大きく 2 種類ある．一つは Bio-stimulation で，土中に既に存在する在来微生物の活動を刺激し，栄養源や条件を与えることで炭酸カルシウムの析出を促進する手法である．もう一つは Bio-augmentation で，特定の機能を有する微生物を外部から導入し，その代謝機能を利用して MICP 反応を発現させる手法である．Fig.1 に 2 種類の適用方法を示す．Bio-stimulation は対象とする地盤に存在する微生物を活用するため，環境負荷低減が可能である．一方で，栄養源を添加するのみで，微生物を直接添加しないため，MICP 処理に必要な微生物が十分に活性化するかの課題が残る．Bio-augmentation は Bio-stimulation に比べて環境負荷低減に課題が残るものの，固化能力が明らかである微生物種を用いて処理を行うため，一定の強度向上が期待できる．

以上のことから，本研究では，再現性と処理効果の安定性を確保するため，Bio-augmentation を採用する．すなわち，固化能力を有する微生物を培養し，それを供試体に導入することで処理を行う．

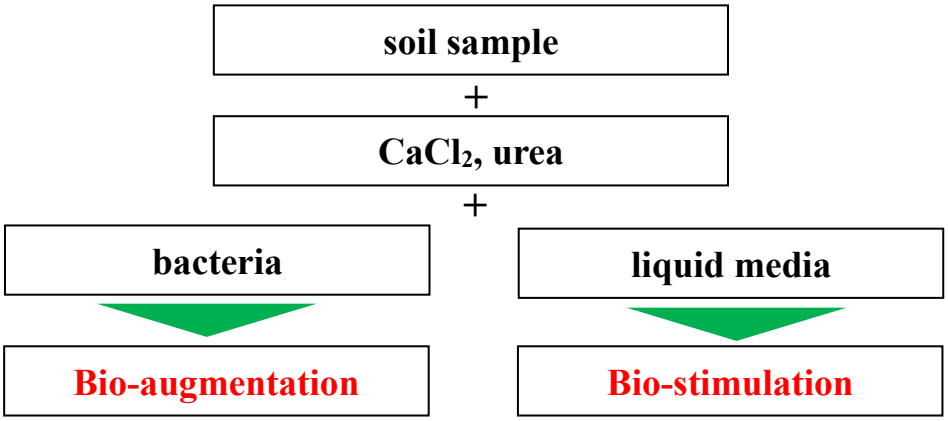


Fig.1 Two types of MICP application methods

5.3 試験条件および方法

本研究ではインドで採取された river sand と black cotton soil で供試体を突き固めによって作製し，インド由来の微生物種を用いて MICP 処理を行った．土試料は river sand 80 %，black cotton soil 20 %とし，混合させた後で，微生物培養液，固化溶液（尿素，塩化カルシウム）0.5 mol/L を添加した．養生期間は 7 日間と設定し，供試体作製から 24 時間程度は反応が十分になるようラップで包んだ状態で室温養生した（Photo 1）．その後，ラップを外し，インドの特徴的な気候である乾季・雨季を模した養生を行う．乾季養生はインキュベータ内（Photo 2），雨季養生はデシケータ内に供試体を設置し，設定した湿度・温度を維持する．特に湿度の高い雨季養生では，濡れたタオルで供試体を包み，デシケータ内に設置することで湿度を維持する（Photo 3）．所定の処理，養生期間を経て一軸圧縮試験を行い，地盤改良効果を確認する．また，本試験で用いる粘土につ

いては本試験の前に 2 種類の試料で試験を行い，black cotton soil に決定した．供試体は各条件で 3 本ずつ作製した．



Photo 1 ラップで包んだ供試体



Photo 2 乾季養生



Photo 3 雨季養生

5. 4 試験結果および考察

まず，本試験前に実施した 2 種類の土試料の一軸圧縮試験結果を Fig.2 に示す．供試体は，river sand が 80 %，red soil と black cotton soil いずれかが 20 %となるよう混合させ，含水比 8 %で作製した．一軸圧縮試験結果より，black cotton soil は red soil の約 3 倍程度の強度を示すことが確認できた．そのため，本試験では black cotton soil を適用することとした．

次に本試験の一軸圧縮試験結果を Fig.3 に示す．同条件下での 3 本の平均値をとり，結果のバラつきをエラーバーで示している．いずれの養生においても含水比 10%で最も強度が大きくなることが確認できた．また，乾季養生と比較して雨季養生した供試体の強度は大きく低下した．この原因として，供試体が炭酸カルシウム析出ではなくサクションによって強度向上している可能性や炭酸カルシウムの析出量が雨季養生で低下したことが考えられる．乾季養生では含水比が低くなることでサクションによって強度増加する一方で，雨季養生では湿潤状態となりサクションが小さくなるため，強度低下したと考えられる．しかし，本試験結果より，含水比 10 %では乾季養生で大幅に強度向上が確認でき，雨季養生でも一定の強度が確認できていることから，サクションだけでなく炭酸カルシウム析出による強度向上も考えられる．

本試験では，一軸圧縮試験後の酸分解試験を実施していないため，供試体における MICP 処理の効果が確認できていない．そのため，今後は試験後に酸分解試験を行い，炭酸カルシウム析出量を把握する必要がある．また，今後は各含水比において，MICP 処理を施さない供試体を用意し，MICP 処理による強度向上効果を確認する必要がある．さらに，本試験で用いた土試料の最適含水比，乾燥密度についても把握する必要がある．

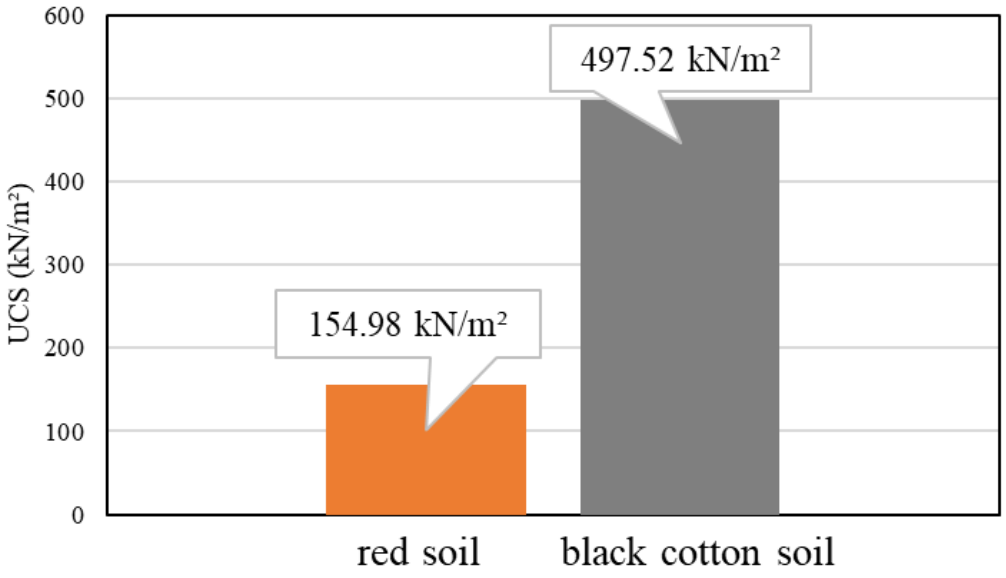


Fig.2 Result of UCS (pre-test)

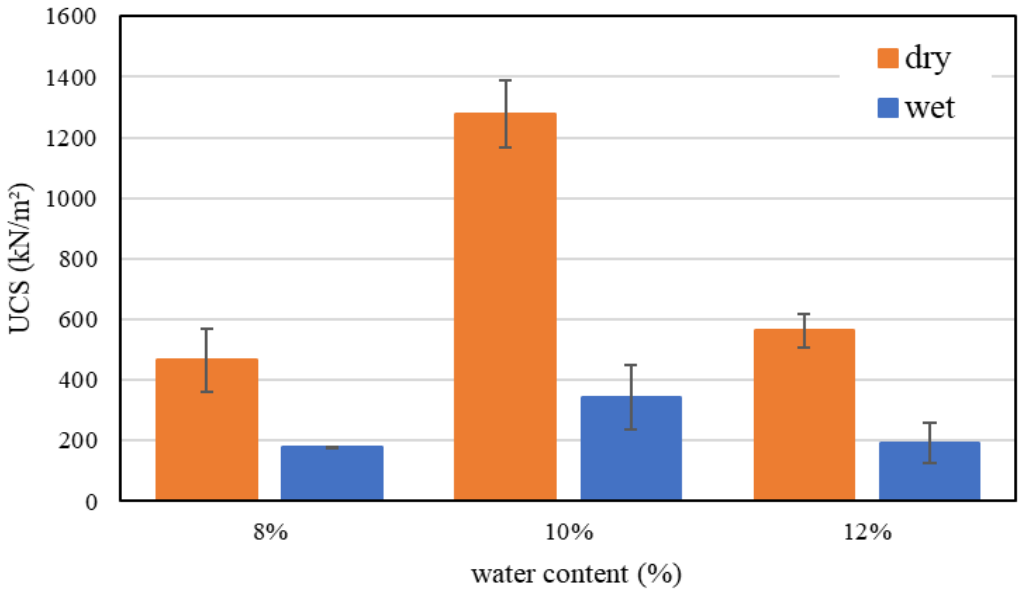


Fig.3 Result of UCS

6. まとめ

今回の海外共同研究を通して，初めて 1 人で海外で約 1 ヶ月間生活し，海外の大学と共同研究する機会を頂いた．留学当初は慣れない環境での生活に不安が大きかったが，研究室の方々の手厚いサポートのおかげで無事に 1 ヶ月間生活することができた．研究においては，様々な意見を頂いたり，研究発表の場に参加し聴講させていただいたりしたことで，今後の研究の可能性が広がったように思う．また，英語での会話にかなり苦労した．特に，インドは多言語国家ということもあり，英語と他言語が混ざることがあり，理解するのにかなり時間がかかった．しかし，ゆっくり話してくださったり，文字に書いてくださったりしたことで少しずつ会話できるようになった．今回の留学は私にとって大変貴重な機会となった．ここで得られた学びをこれからの研究に生かしていきたい．

7．謝辞

本研究を行うにあたり受け入れてくださった Anasua Guharay 准教授，受け入れ中に研究を手伝ってくださった Renuka Roy さん，現地での生活や研究を支えてくださった研究室の皆様にお礼申し上げます．また，このような貴重な機会をくださった広島大学先進理工系科学研究科 畠俊郎教授にお礼申し上げます．最後に，海外共同研究プログラムをサポートしていただきました実行委員会の諸先生をはじめとする学生支援グループ国際事業担当の皆様に心よりお礼申し上げます．