東南大学（中国）　研修報告書
（研修テーマ）生物機能を活用した地盤改良技術の遺構修復技術について

先進理工系科学研究科　社会基盤環境工学プログラム　升田 莉太

1. はじめに

2024 年 8 月 25 日から同年 9 月 25 日の間，東南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

アンコール遺跡をはじめとした遺跡の存続において課題を有している歴史的遺構の修復・保全を行う場合，建造物の建設当時の状況を可能な限り維持しながら対策工を行うことが重要である．このような技術的要求を満たす解決策として，微生物機能を活用した地盤改良技術（MICP）があげられる．同技術は大きな解体等と伴わず現場の状態を維持しながら，対象地盤の強度向上及び，遮水性向上効果を得ることができ，歴史的遺構の修復において適切であると考える．そこで，今回の研究内容である生物機能を活用した地盤改良技術に関する研究を行い，遺構修復における最適な修復方法として挙げる．

3．研修/共同研究スケジュール

8 月 25 日　出国
8 月 26 日～9 月 24 日　研究
9 月 25 日　帰国

4．研修先/共同研究派遣先の概要

大学名：Southeast University
所在地：中国　南京市
指導教官：Prof. Ning Jun Jiang

5．研修/共同研究の内容

5.1　研究背景

現在，世界中に存在する世界文化遺産のような歴史的遺構の多くは建設後数百年経過しており，補修や保全が求められている．その具体例として，カンボジアの世界文化遺産であるアンコール遺跡があげられる．同遺跡は現在，石積建造物の基壇の支持力不足が課題とされ，特に，降雨時の雨水浸透に伴う強度低下による更なる変状の進行が危惧されている．アンコール遺跡をはじめとした遺跡の存続において課題を有している歴史的遺構の修復・保全を行う場合，建造物の建設当時の状況を可能な限り維持しながら対策工を行うことが重要となってくる．このような技術的要求を満たす解決策として，微生物機能を活用した地盤改良技術（MICP）があげられる．同技術は大きな解体等と伴わず現場の状態を維持しながら，対象地盤の強度向上及び，遮水性向上効果を得ることができ，歴史的遺構の修復において適切であると考える．そこで，今回の研究内容である生物機能を活用した地盤改良技術に関する研究を行い，遺構修復における最適な修復方法として挙げる．

5.2　実験概要

まず，MICP について説明を行う．MICP（Microbial Induced Carbonate Precipitation）とは，微生物機能を介して土粒子間に炭酸カルシウムを析出させる地盤改良技術であり，ウレアーゼ活性を有する微生物を地盤中に注入することで,尿素の加水分解反応が起こり,最終的に炭酸カルシウムが析出する．その結果，各土粒子間に析出した炭酸カルシウムによって結合がより強固なものとなる．同技術によ

り期待できる効果として透水係数の減少，ひずみ剛性の増加，間隙率の増加などが確認されており，地盤改良技術としては，地盤の強度を向上させるバイオセメンテーション（Bio cementation），地盤の透水性を低下させるバイオクロギング（Bio clogging），地盤の飽和度を低下させるバイオデサチュレーション（Bio desaturation），汚染地盤を修復するバイオレメディエーション（Bio remediation）などが提案されている．上記で述べたように，大きな解体等と伴わず現場の状態を維持しながら，対象地盤の強度向上及び，遮水性向上効果を得ることができるため，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・保全が求められる遺構修復において適している．

東南大学では，日本で実施していた MICP とは異なる手法を用いて研究を行った．以下では，それぞれの手法について説明する．MICP 処理には，ウレアーゼ活性を有する微生物が不可欠である．日本で行った研究では，ウレアーゼ活性を有する微生物を培養液で増殖させ，その後，増殖させた微生物を土試料に直接添加することで MICP 処理を実施した．この手法は Bioaugmentation method（バイオオーグメンテーション法）と呼ばれる．一方，東南大学では Biostimulation method（バイオスティミュレーション法）を用いた．この手法では，微生物が生育するために必要な栄養液を土試料に添加することによって，土試料内の在来微生物のうちウレアーゼ活性を有するものを増殖させ，その増殖した微生物を用いて MICP 処理を行う．Biostimulation method には，地盤改良を行う土壌に在来する微生物を活用できるため，環境負荷が低いという利点がある．しかし，微生物を直接添加しないことから，処理に必要な微生物の総量が不足する可能性があり，MICP 処理の効果が十分に得られるかどうかが懸念される．そのため，Bioaugmentation method を採用した供試体を作製し，十分な強度が確認できる条件について検討した．

Fig.1 に研究フローを示す．本研究では中国本土で採取された Loess(黄土)で供試体を作製し，同試料に含まれる微生物を利用して MICP 処理を行った．また，より合理的な MICP 処理方法を行うため土試料，栄養液，固化試料(尿素，塩化カルシウム)を混合し供試体を作製した．まずは，Loess に在来する微生物を増殖させ，ウレアーゼ活性の有無を確認する．もし活性が確認できなければ追加で栄養液を加え，24 時間養生し菌体数の増加を促進する．その後，ウレアーゼ活性が確認できた場合，MICP 処理に必要な固化試料（尿素，塩化カルシウム）を加え，供試体を作製する．その後，1 週間，2 週間の養生期間を経て，一軸圧縮試験を行い，地盤改良効果を確認する．また，一軸圧縮試験後の供試体を対象に電子顕微鏡による析出した炭酸カルシウムの観察，酸分解試験による析出炭酸カルシウム量の把握を行った．本研究の実験条件を Table.1 に示す．本研究では析出炭酸カルシウム率を 0～5%に設定し固化試料の配合を決定した．

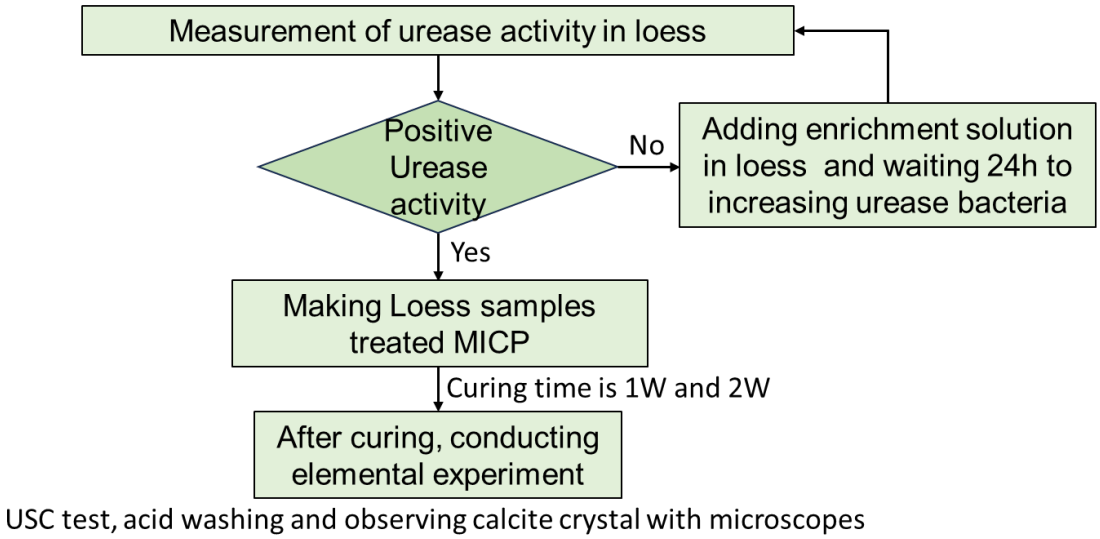

Fig.1 Flow of this research

Table.1　Experimental conditions

	Target calcium carbonate precipitation rate(%)	loess(g)	Urea(g)	$CaCl_2$(g)	Water(g)
A	0	370	0	0	44.4
B	1	370	2.22	4.10	44.4
C	2	370	4.44	8.21	44.4
D	3	370	6.66	12.31	44.4
E	4	370	8.88	16.41	44.4
F	5	370	11.10	20.51	44.4

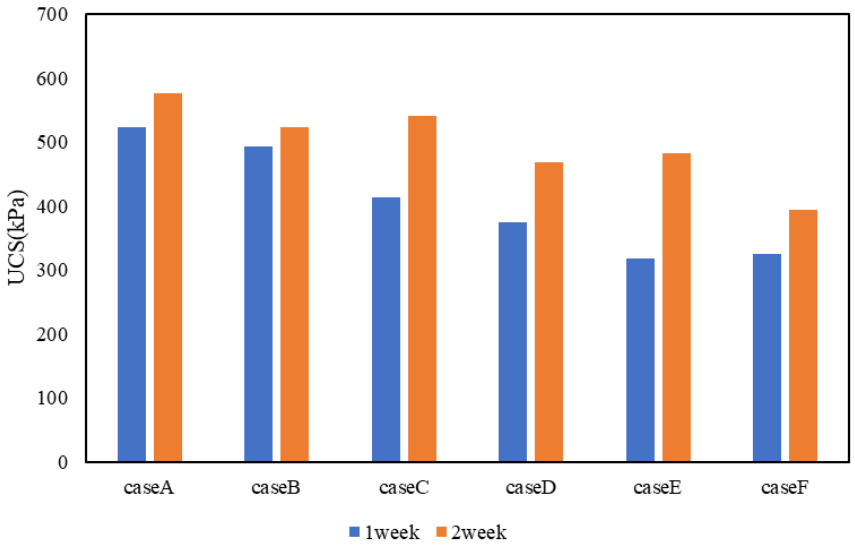

Fig.2 UCS result

5.3　結果・考察

ウレアーゼ活性値の測定の結果，Loess(黄土)に栄養液を混合し養生することで土試料中のウレアーゼ活性を有する微生物を増殖させ，活性値が向上することが分かった．そのため，当試料における在来微生物を活用した MICP による地盤改良が可能であることが分かった．

次に一軸圧縮試験の結果を Fig.2 に示す．1 週間養生の供試体は添加固化試料を増加させるにつれ強度が低下する傾向が確認された．この傾向が見られた原因として，養生期間 1 週間では十分な炭酸カルシウム析出が期待できておらず，加えて，尿素の保水特性により供試体内の水分が過剰に残留し，供試体の硬化が一時的に妨げられたと考えられる．一方，2 週間養生の供試体は各ケースにおいて 1 週間養生供試体と比較して強度が向上した．特に，添加固化試料の量が増加するほど，強度向上率が大きくなる傾向が見られた．このことから，尿素の保水特性による一時的な強度低下を経た後，長期間の養生により炭酸カルシウムの析出が進行し，供試体の強度が回復することが示唆された．ただし，2 週間養生供試体においても，添加固化試料の量が最も多いケースが必ずしも最高強度を示す結果には至らなかった．この現象は，1 週間養生時と同様に，尿素の保水特性による初期段階での反応不均一性や過剰水分の影響が完全には解消されていない可能性が考えられる．

以上の結果を踏まえ，より長期の養生試験を実施し，炭酸カルシウムの生成および強度発展の推移を詳細に評価する必要がある．また，添加固化試料の適正量および養生条件の最適化を図ることで，供試体の強度発展メカニズムをより深く解明することが期待される．

6. まとめ

今回の海外共同研究を通して，初めての海外経験と初めての英語での研究を行う機会を頂いた． 慣れない環境であったが現地の研究室の人のサポートもあり，無事に約 1 ヶ月間生活することができた．

研究に関しては，現地では日本で行っている MICP と違った手法をメインに研究を行っており，違った手法について学ぶことができ，今後の研究の可能性が広がった．また，英語で伝えることに凄く苦労した．しかし，分からないときは分かるまで何度も聞き，伝えるときは絵や図を用いてコミュニケーションを取っていた．東南大学で出会った学生は皆研究へのモチベーションが高く，良い刺激を受けた．今後もより良い研究成果が得られるように，研究を頑張りたい.

7. 謝辞

本研究を行うにあたり貴重なご意見をいただいた Ning Jun Jiang 教授, 受け入れ中にお世話をしてくださった Qin Haishan，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与えて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厚くお礼申し上げます．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.