

遺跡修復における微生物機能を活用した地盤改良技術発展のための知見獲得

広島大学大学院先進理工系科学研究科地盤工学研究室

升田 莉太

高安 隼登

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学分野

堀 温人

研究概要

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す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。その解決策として、微生物機能を活用した地盤改良技術（MICP）が挙げられる。同技術は大きな解体等を伴わず現場の状態を維持しながら、対象地盤の強度及び遮水性の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。本研究では、カンボジアをはじめとする東南アジア地域の遺跡を対象にMICPの適用可能性を評価し、技術的有用性を検討する。そして、遺構修復におけるMICPの具体的な適用方法を分析し、現場への導入に向けた課題を明らかにする。最終的には、本研究で得られた知見をもとに、遺構修復のための最適な手法を提案し、将来的な保全対策の立案を目指す。

調査日程

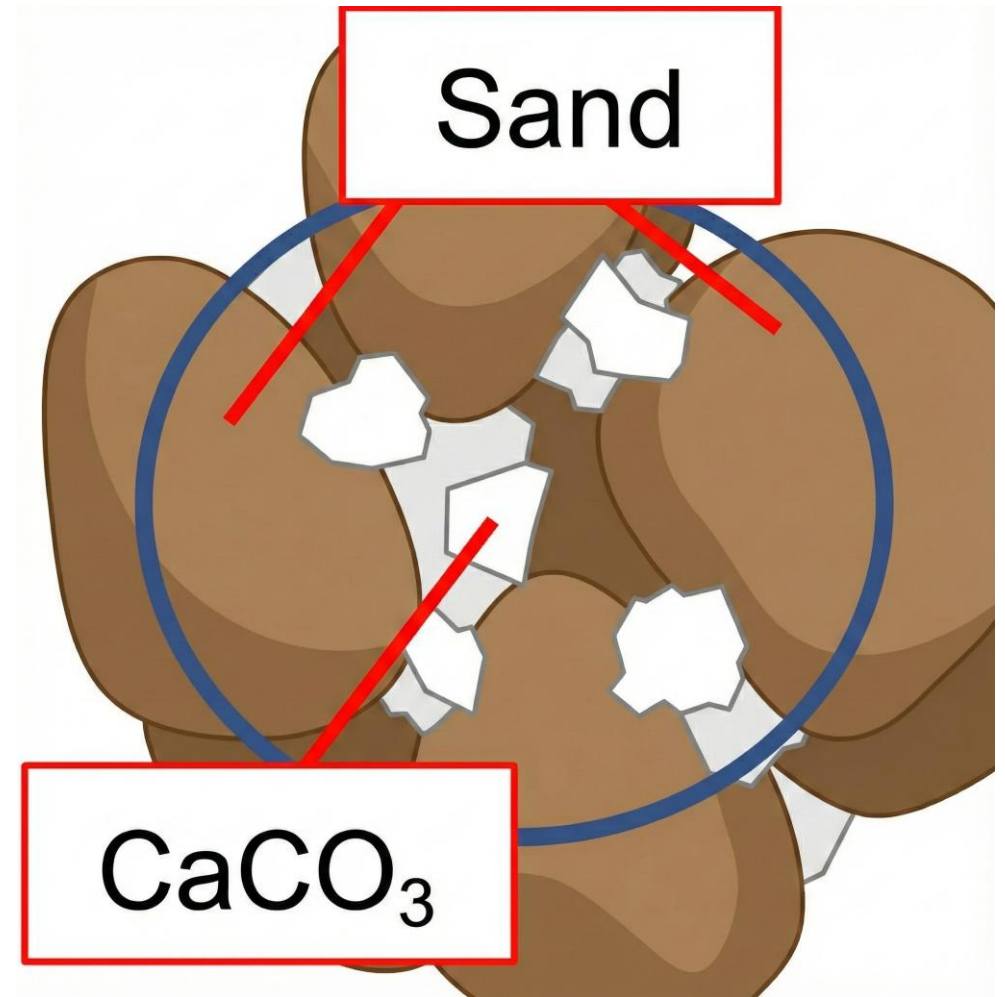
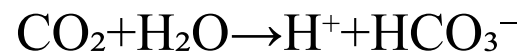
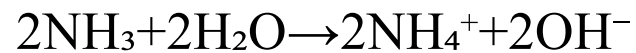
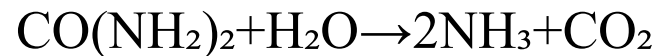
全体として8月12日から26日まで現地視察を実施した。訪問国はカンボジア、タイ、インドネシアの3か国。カンボジアをはじめとする経年劣化による修復・補修が必要となる東南アジア地域の遺跡を選定し、視察・調査を行った。



MICP技術について

MICP (Microbial Induced Carbonate Precipitation)

MICP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と固化に必要な尿素・塩化カルシウム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（反応は下記の式通り）。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。同技術によって透水係数の減少、ひずみ剛性の増加、間隙率の減少などが確認されており、上記で述べたように、大きな解体等を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。そのため、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。



バイヨン寺院

Cambodia

アンコール・トムの中央に位置し、境内に50基以上の砂岩積みの塔を有する。その中のバイヨン中央塔は高さ42mの塔状建築であり、建設からの数百年間に様々な要因と作用によって劣化・変状が進み、塔の部分的崩壊の危険性が指摘され早急かつ恒久的な対策が求められている。また、中央塔における発掘調査で掘られた、主塔直下約13mの発掘孔の埋め戻しが非常に緩いこと、基壇内部の版築盛土の雨水浸潤による強度低下が確認されており、基壇の安定性確保が重要であるとされている。

現地調査では、補修作業の影響により中央塔内部へ立ち入ることはできなかった。基壇部はラテライトおよび砂岩による石積みによって覆われているが、石積みの目地の開きや局所的な崩壊に伴い、内部の基壇盛土が露出している箇所が複数確認された。これらの露出部に対しては、注入工法および混合法のいずれの適用も理論的には可能であると考えられる。

MICPによる修復は、広範囲への一括適用には制約がある可能性があるものの、基壇盛土が露出した箇所など限定的な領域に対しては部分的な適用が可能であり、局所的な安定化手法として有効であると考えられる。



バイヨン寺院断面図



ラテライトと砂岩による石積み



石積みが崩壊し、基壇盛土が露出している

現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

サンボー・プレイ・クック遺跡 Cambodia

カンボジア中部に位置するプレ・アンコール期の古代遺跡群である。レンガ造の祠堂が森の中に点在する独特の景観を特徴とし、アンコール遺跡群に先行するクメール建築様式を今に伝えている。2017年にはカンボジアで3個目のユネスコ世界遺産に登録され、クメール文明初期の宗教・都市計画を理解する上で重要な遺跡とされている。アンコール遺跡を含むカンボジアの遺跡群は、世界各国や国際機関が修復・保存に介入している点で世界的に見ても特殊な状況であり、適用される修復手法は多岐にわたっている。しかし現地調査では、崩壊を防ぐための応急的かつ場当たりの修復が多く見受けられ、補強材を除去すれば直ちに崩壊しかねない不安定な状態に置かれている建造物も少なくないことが分かった。

このような背景から、遺跡と自然環境との調和を前提とした、より根源的で持続可能な修復手法が求められている。その一つとして、MICPによる修復は、遺跡の基礎部分から地盤・構造を安定化させることが可能であり、表層的な補修に留まらない根本的な修復手法として有用である。基礎部から安定性を確保することで、長期的な保存と修復の持続性が期待できる。



縦に入った亀裂



内側への崩壊を防ぐ突っ張り棒



建造物が外側へ広がり崩壊するのを防止するために一周はめられた鉄枠

現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

コー・ケー遺跡

Cambodia

アンコール朝時代、928~944年の短い期間に首都として機能していた。特徴として、7層のピラミッド型の遺跡がある。

コー・ケーの現状を確認したところ、石積みの崩落を防ぐための応急的な支保工や、樹根の侵入による構造の歪み、石材間の目地土の流出といった深刻な劣化が各所で確認された。特に、現状のような外部補強は景観を損なうが、MICPを地盤および石積み内部の空隙に注入することで、外観を維持したまま内部から構造を安定化させられる可能性があり、機械的な補強が難しい樹根の入り組んだ部位においても、液体状の薬剤を用いるMICPならば、複雑な空隙にも柔軟に追従して充填できるため、遺構の安定化を図る手法として極めて有効であると考えられる。



現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

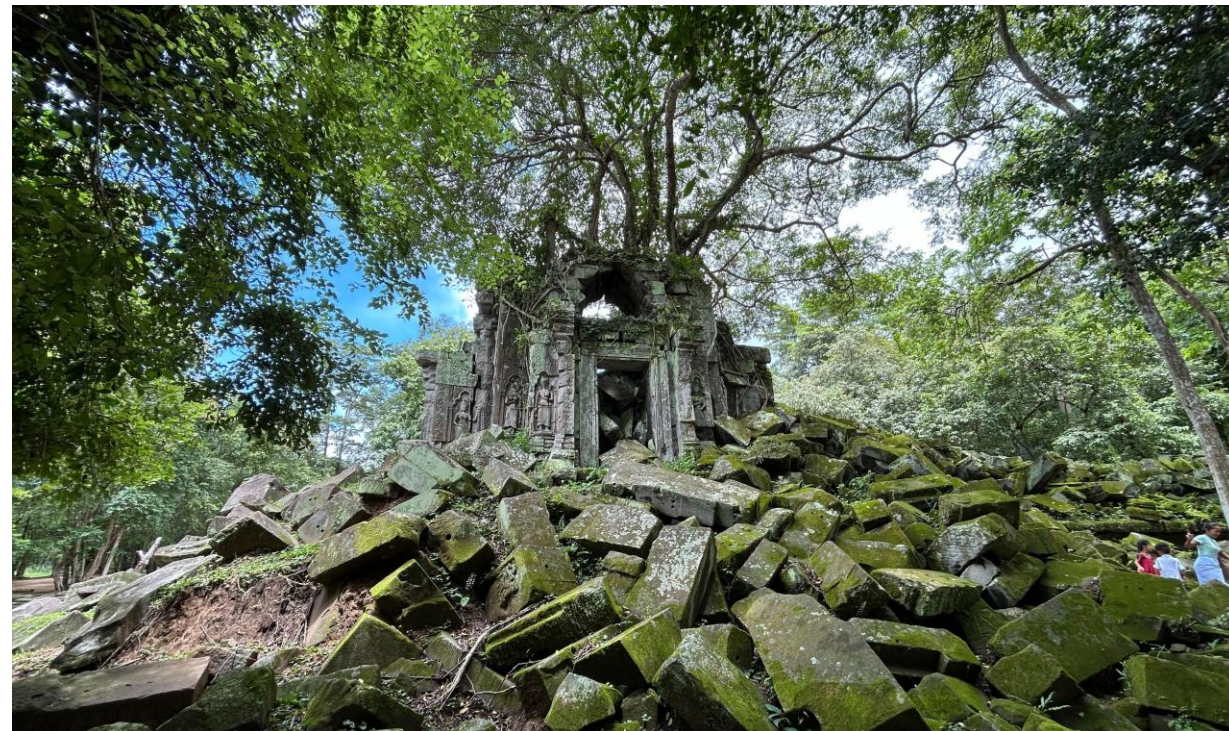
ベンメリア遺跡

Cambodia

12 世紀中頃に建てられたと言われるヒンドゥー教と仏教の混合寺院である。遺跡の崩壊が進んでいたことで、遺跡の詳細を記す碑文が欠落しており、多くの情報が未解明である。

積極的な修復が行われておらず、最小限の修復に留められている。そのため、自然に委ねられたままの荘厳な遺跡を保っており、アンコール遺跡群と並ぶ人気の観光地となっている。現在も観光利用を目的として、あえて大規模な修繕は施されていない。

至るところで石積みの崩壊や樹木による浸食が確認できる。これらの状況は、人為的な維持管理が行われない場合、遺構の劣化が進行し続けることを示しており、自然状態に置かれた文化遺産の変遷を理解する上での好例ともいえる。



現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

プラサート・スープラ Cambodia

プラサット・スープラは、カンボジアのアンコール遺跡群の一部であり、アンコール・トム内の「勝利の門」から王宮へと続く参道の東側に位置する12基の塔の総称である。12世紀末から13世紀初めにかけて、ジャヤヴァルマン7世によって建設されたと考えられている。この遺跡の最大の特徴は、南北約400メートルにわたってラテライト製の塔が1列に並んでいる点であり、それぞれの塔は東を向いる。現在、日本のアンコール遺跡救済チーム（JSA）による修復作業が行われているものの、一部の塔は崩落が進んでいる。

今回の観察から、塔体の傾斜や石材間の目地の開き等の崩壊挙動を示していることが確認でき、修復が必要であると考えられる。傾斜要因として、圧密沈下や雨水浸透に伴う基壇内砂の流亡等による盛土の変状が挙げられる。



現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

アユタヤ遺跡

Thailand

タイのアユタヤ遺跡は、1350年から417年間にわたってタイの中部に栄えたアユタヤ王朝の都の跡である。チャオプラヤー川とその支流に囲まれた島状の地形に築かれたこの都市は、国際交易の要所として繁栄を極めた。アユタヤ遺跡の大きな特徴は、煉瓦造りの巨大な仏塔（チェディ）や寺院建築の数々である。アユタヤの遺跡群は、タイの精神的な柱である仏教文化と、かつての国際都市としての栄華を現在に伝える重要な遺産である。現地調査では、木の根に取り込まれた仏頭が有名なワット・マハータート周辺において、複数の仏塔（チェディ）の傾斜が確認された。傾斜要因として、河川付近特有の地下水による地盤の軟弱化や、仏塔の自重による沈下が考えられる。こうした課題に対し、歴史的遺産への環境負荷を抑えつつ地盤を強化できるMICP技術を用いた修復を行う必要があると考える。



現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

ボロブドゥール遺跡

Indonesia

ボロブドゥール遺跡はジャワ島中部の中部ジャワ州に位置し、8~9世紀に建造された大乘仏教の寺院遺跡で、世界三大仏教遺跡の一つ。約115m四方の基壇の上に5層の方形壇、3層の円形壇を重ねた、階段ピラミッド構造。1960年代には崩壊寸前となったが、1973年から1982年にかけてユネスコによって大幅に修復された。この際、円形壇部分は修復しておらず、盛土の安定性については今後も長期的な観察が必要であることが指摘されている。

しかし今回の現地調査の結果、ボロブドゥール遺跡はその規模が極めて広大であり、本調査で想定しているMICP技術の適用は困難であると判断した。同技術は微生物を用いて均等に地盤改良を行う性質上、施工対象の巨大さゆえに均一な品質確保が難しいためである。このことから、MICP技術は小規模な遺跡や基壇への適用が、より現実的かつ有効であるという知見を再確認するに至った。



現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

技術伝達 -トレーニングプログラム- Cambodia

カンボジアにて、カンボジア工科大学の地盤工学分野の学生を対象としたトレーニングプログラムを実施した。本プログラムでは、講義・実習を通して、現地学生に遺跡修復に関する知識共有を図ることに加え、国際交流を兼ねて行われた。

講義では、EICP（Enzyme-Induced Carbonate Precipitation）の反応メカニズムや処理手順について解説した。現地学生からは、技術の適用性や化学反応の詳細について鋭い質問があり、予定時間を超えるディスカッションが行われるなど、非常に密度の高い指導を実現した。実習においては、現地学生と共同で現地の土を用いたEICP処理供試体を作製した。指導に際しては、我々が主体となってプロセスを先導し、実験の精度管理や技術的知見を直接伝授することで、地盤改良技術への深い理解を促した。今回の活動を通じて、国際的な教育・研究交流の一助となっ



現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

所感

広島大学大学院 升田莉太

本研究では、カンボジア、タイ、インドネシアの遺跡を対象にMICPの適用可能性の検討を通じて、それぞれの国が抱える保存上の課題や、地域の文化的アイデンティティを尊重した修復の在り方について深く考えるいい機会となりました。また、現地へ赴き、調査をし、地元の人々や専門家の方々と交流することにより、日本で情報収集するだけでは得られなかった新しい学びや発見を多く得ることができました。

コー・ケーやプラサット・スープラでは、石積みの崩落を防ぐための無骨な支保工や、複雑に絡み合う樹根による構造の歪みを目の当たりにし、内部から補強できるMICPの優位性を再確認することができました。一方で、ボロブドゥール遺跡のような大規模な遺跡において、均一性において課題が有しているMICPをいかにして実地へスケールアップさせるかという難しさを痛感しました。

今回の研究で通じた知見は、自分自身の研究は勿論、来春からの社会人生活においても最大限に生かせるように努めていきたいと思います。改めまして、本研究において多大なるご支援を受け賜りました前田記念工學振興財団に深く感謝申し上げます。



アンコールワットの壁画



タイのショッピングモール



ボロブドゥール遺跡



水面に反射するアンコールワット遺跡



世界遺産であるバイヨン寺院と
そこで遊ぶ現地の子供たち



カンボジアのパブストリートの様子



現地で食べた様々な料理
(右) タイ、(左上) カンボジア
(左下) インドネシア

現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術移転

所感

所感

京都大学大学院 堀温人

本研究を通じて、MICPは世界の重要文化財に対しても、条件を整えれば適用できる可能性があると感じた。特にカンボジアでは、自然との調和を大切にする価値観が根付いており、微生物を利用するMICPは思想としても親和性が高い。一方で、遺構保全の現場では、技術的に有効か否かだけでなく、景観や宗教的背景、管理体制、現地の理解と合意など、多くの要素を踏まえて進める必要があることも実感した。

また、トレーニングプログラムを通じて指導した現地学生と交流できたことも印象に残っている。学ぶ姿勢や将来への意欲に触れて、自分自身も刺激を受けた。コオログを振る舞ってもらった出来事は驚きもあったが、文化の違いを前向きに受け止める良い経験になり、今では旅の象徴のような思い出である。

意外だったのは、帰国後に、周囲が自分と同様の文化を共有している環境に、かえって困惑し、「周りの目」を必要以上に気にする空気を面倒に感じてしまったことである。海外では、最低限のマナーを守りつつも、過度に同調を求められない自由さがあり、それが居心地の良さにつながっていた。

以上のような経験から、英語に対する拒否感や、海外で生活することへの抵抗感が明確に薄れた。今後は、専門性を磨き続けながら、海外でも臆せずに関わり、学びを行動につなげられるように努力していきたい。

末筆ですが、本研究において多大なるご支援を受け賜りました前田記念工学振興財団に深く感謝申し上げます。



現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感

所感

広島大学大学院 高安隼登

本海外研究の機会をいただき、多大なるご支援を賜りました前田記念工學振興財団の関係者各位に、深く感謝の意を表する。東南アジア諸国の文化遺産を実地で調査し、現地の専門家や学生と対話を重ねた経験は、国内での文献調査のみでは得られない、多角的な視点から考察をする大切さを改めて再考する機会となった。また、今回の調査対象としたカンボジア、タイ、インドネシアの各遺跡では、保存手法や劣化要因の差異について深い洞察を得ることができた。例えば、自然との共生を優先し、人工的な修復を最小限に留めるベンメリア遺跡の在り方は、観光と遺跡崩壊リスクの均衡が保たれた修復例であった。一方で、プラサット・スープラやアユタヤの仏塔群で目にした地盤沈下や構造物の傾斜は、遺跡修復における対策の緊急性を強く想起させるものであった。特に、ボロブドゥール遺跡における現地調査は、本研究であるMICP技術の適用を再考する極めて重要な転換点となった。同遺跡の圧倒的な空間規模に直面し、微生物を用いた地盤改良を均質に施すことの技術的障壁を実感を伴って理解することができた。また、カンボジア工科大学の学生との技術伝達実習では、現地の学生と共に供試体作製を行う中で、国際交流という貴重な経験を積むことができた。単なる専門的ヒアリングに留まらず、現場での協働を通じて得られた経験は、今後の研究活動における重要な基盤になると確信している。本研究を通じて習得した技術的知見を今後に活かすとともに、対象遺跡の修復動向を注視し続け、この分野における学術的・社会的な貢献を目指していく所存である。



現地調査

カンボジア

タイ

インドネシア

技術伝達

所感