

## 文化遺産周辺の河岸侵食対策の提案に向けた 生石灰と籾殻灰を用いた改良土の力学特性に関する研究

Study on mechanical characteristics of improved soil using quick lime and rice hulk ash  
for riverbank erosion around cultural heritage

大矢綾香<sup>1</sup>・奥本龍馬<sup>2</sup>・藤本将光<sup>3</sup>・深川良一<sup>4</sup>・李徳河<sup>5</sup>

Ayaka Oya<sup>1</sup>, Ryoma Okumoto<sup>2</sup>,  
Masamitsu Fujimoto<sup>3</sup>, Ryoich Fukagawa<sup>4</sup> and Der-Her Lee<sup>5</sup>

<sup>1</sup>立命館大学 理工学研究科 博士前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Master Course student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

<sup>2</sup>元 立命館大学 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Department of Science and Engineering

<sup>3</sup>立命館大学 理工学部都市システム工学科 助教 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Department of Science and Engineering

<sup>4</sup>立命館大学 理工学部都市システム工学科 教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Department of Science and Engineering

<sup>5</sup>国立成功大学 土木工程系 教授 (No.1 University Road, Tainan 70101, Taiwan)

Professor, National Cheng Kung University, Department of Civil Engineering

Hue is located at middle of Vietnam, and famous for the ancient capital of Ngyuen Dynasty. A royal residence, temples, museums and buildings around the city are recognized as world cultural heritage sites by UNESCO. Some of them are located along Houng River, which is often suffered from flood during rainy seasons. It causes river bank erosion, and there is possibility that these historical buildings are harmed by riverbank erosion and settlement. This paper presents new ground improvement method using quick lime and rice hulk ash which are cheap and easy to obtain in developing countries like Vietnam. The mechanical characteristic of improved soil is validated by mechanical tests.

**Keywords :** Ground improvement, Quick lime, Rice hulk ash, Riverbank erosion

### 1. はじめに

フエ市はベトナム中部に位置し、ベトナム最後の王朝、グエン王朝の都として栄えた古都である。図1にその位置を示す。フエの新市街、旧市街に点在する王宮、寺院、博物館などの建造物が、ベトナム初の世界遺産として登録されている。その中でも、阮朝王宮、カイディン帝廟、ミンマン帝廟、ティエンム一寺が図2に示すようにフォーン川沿いに点在している。そのフォーン川は雨季にたびたび洪水に見舞われ、河岸侵食が発生している。そこで森實らは現地調査を行い、被害状況を把握した<sup>1)</sup>。写真2にフォーン川沿いの寺院の1つである、ティエンム一寺の概観を示す。この写真からティエンム一寺がフォーン川に面していることがわかる。ティエンム一寺はフエ市の象徴であるトゥニャン塔（高さは21.24m）を持つ寺であり、写真1に示すように塔は寺の入口部分にあり、階段の手前は道路を挟んでフォーン川が流れている。写真2に示すよう



図1 フェの位置(Google Map に加筆)



図2 フォーン川沿いの世界遺産(Google Map に加筆)



写真1 トゥニャン塔とフォーン川(Google Earth に加筆)



写真2 フォーン川河岸の変形、ブロックの欠落<sup>1)</sup>

に、河岸は侵食を防ぐためにブロックを積んだ護岸が造られている。しかしながら、何度も洪水の被害を受けているため、河岸の変形やそれによるブロックの欠落があることがわかった<sup>1)</sup>。そのまま放置すれば河岸の侵食や地盤沈下が進行し、文化財に影響を与える危険性がある。対策を施すことが緊急の課題であるが、日本などの先進国で適用されている従来の工法は、高コストゆえにベトナムをはじめとする発展途上国では採用されにくく、効果的かつ経済的な対策工の提案をすることが重要である。

そこで、河岸を補強し、変形や沈下を防ぐために、現地で安価に入手でき、自然由来で環境負荷が小さい、生石灰とイネ籾殻灰を用いた地盤改良工法について検討する。生石灰は従来地盤改良に使用されており、その効果は実証されており<sup>2)</sup>、ベトナムでも容易に手に入る材料である。また、米を脱穀した際に得られるイネ籾殻は、世界有数の米の生産国であるベトナムで大量かつ安価で入手可能な材料であり、すでにリサイクル材として発電に利用されている。そのイネ籾殻を燃焼させて生成されるイネ籾殻灰はシリカの含有率が約90%<sup>3)</sup>であり、これによりポズラン反応を促す効果があると期待され、すでにコンクリート<sup>4)</sup>やセメント系改良土のポズラン材に適用されている<sup>3)</sup>。生石灰と籾殻灰を用いた地盤改良については、李<sup>5)</sup>によってせん断強さの評価や降雨に対する耐侵食性が検証されているが、詳細な強度評価や配合比と強度の関係については把握されていない。そこで、本研究は、生石灰とイネ籾殻灰を用いた新しい地盤改良工法の開発を目指す。新しい地盤改良工法の基礎研究として、生石灰とイネ籾殻灰による地盤改良効果の検証および改良土の特性を把握するために、イネ籾殻灰の配合率および養生日数が改良土の力学特性に与える影響を実験的に明らかにする。

## 2. 生石灰と珪灰による改良土について

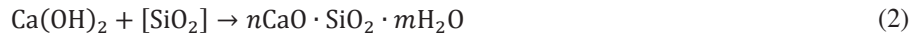
### (1) 改良土の硬化メカニズムについて

本研究で提案する地盤改良工法は、生石灰による脱水作用、および珪灰に質量比で約90%含まれるシリカによるポズラン反応の促進によって地盤を硬化させる工法である。以下にそのメカニズムを示す<sup>5)</sup>。

まず、生石灰CaOによって土中の水が蒸発し、土壌は最適含水比に近づき締固め強度が増加する。そのとき、水H<sub>2</sub>Oと生石灰CaOが反応することで消石灰Ca(OH)<sub>2</sub>が生成する。



次に、消石灰Ca(OH)<sub>2</sub>と珪灰と土壌に含まれるシリカSiO<sub>2</sub>が徐々に反応し珪酸カルシウム水和物nCaO・SiO<sub>2</sub>・mH<sub>2</sub>Oが生成され、混合土が硬化する。この反応がポズラン反応である。



ここで式(2)中のn,mは整数である。生成された珪酸カルシウム水和物はセメントと類似した化合物である。この水和物により、組織が緻密化、硬化し、改良土の耐久性や水密性が向上し、地盤の強度が増加すると考えられる。

### (2) 改良土の配合比率について

本研究において、珪灰の配合比A %、生石灰の配合比B %を以下の式(3)、(4)のように定めて供試体を作成した。

$$A = \frac{m_{ha}}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

$$B = \frac{m_{ql}}{m_s} \times 100 \quad (4)$$

ここで、m<sub>ha</sub>は珪灰の質量[g]、m<sub>s</sub>は乾燥試料の質量[g]、m<sub>ql</sub>は生石灰の質量[g]である。含水比調整前の乾燥試料の質量を基準にして、各種材料の配合比を定めた。

## 3. 石灰と珪灰による改良土の一軸圧縮試験

### (1) 試験概要

生石灰と珪灰による地盤改良の改良効果の検証を行った。具体的には、石灰と珪灰それぞれの添加量と作製した供試体の養生期間を変え、石灰と珪灰の配合率と養生期間が与える改良土の強度特性、変形特性への影響について検証を行う。本研究では、一軸圧縮試験を行い、一軸強さ、破壊ひずみ、変形係数を求めることで、それらの影響を評価した。

### (2) 試験方法・条件

まず、供試体を作成する。試料としては、文献調査より明らかにしたフーン川沿いの地質に類似した藤森粘土を用いる<sup>6)</sup>。藤森粘土の物性データは文献<sup>7)</sup>を参照されたい。試料と水を十分に練り混ぜ、含水比w=55%になるように調整した後、生石灰と珪灰を加え、ミキサーを用いて十分に練り混ぜる。材料を練り混ぜた後、試料を取り出し、直径5 cm、高さ10 cmのモールドに3層に分けて合計330 gの試料を入れ、湿潤密度ρ<sub>t</sub>=1.68 g/cm<sup>3</sup>になるように供試体を作成した。1層毎に突き棒で十分に締め固めながら、層が分断しないようにモールドを叩いた。供試体は各条件につき3個作成する。

次に、供試体の養生を行う。養生期間が3日までは空気中で養生し、3日以降は水浸養生に切り替えて養生を行う。これは、対象地が河岸であることから、水に浸した状態でも改良効果が発揮されるか検証するためである。養生後、地盤工学会基準を基に供試体の一軸圧縮試験(JGS 0511)を行う。試験で得られたデータは試験を行う3個の供試体の平均であり、得られたデータを基に各種パラメータを算出する。ただし、ひび等、供試体に不具合がみられたものに関しては試験を行わなかった。

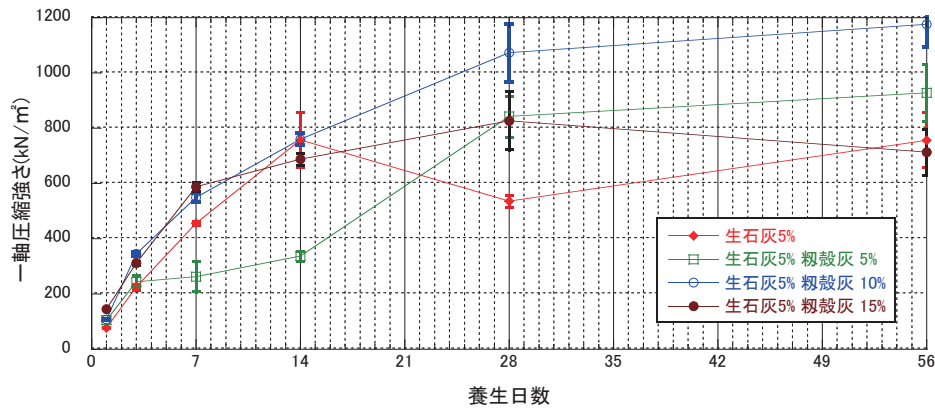


図3 養生日数と一軸圧縮強さの関係

試料の含水比は一律55%、生石灰の配合比は一律5%、粉殻灰の配合比は0、5、10、15%の4パターン、養生期間は1、3、7、14、28、56日の6パターンの合計24パターンの試験を行った。

### (3) 試験結果と考察

図3に一軸圧縮強さと養生日数を全配合比で比較したグラフを示す。それぞれのプロットに対して、標準誤差を示すエラーバーを記入している。粉殻灰配合比0%においては、養生14日までは強度が増加傾向にあり、その後養生28日では強度が減少し、その後養生56日では養生14日とほぼ同一軸圧縮強さとなり、強度が維持されていることがグラフから読み取れる。粉殻灰配合比15%においては、養生7日まで大きく一軸圧縮強さが増加し、それ以降養生28日まで緩やかに増加し、養生56日に一軸圧縮強さが減少している。一方で、粉殻灰配合比5%においては養生28日までに一軸圧縮強さが大きく増加し、それ以後もわずかに増加し、強度を維持している。なお、養生14日までの強度が他の条件の強度の1/2程度である。28日以降、他の条件と同等の強度を得られていることから、混合材が均一に混ざっておらず化学反応が遅れた可能性がある。粉殻灰配合比10%においては、養生28日までに一軸圧縮強さが大きく増加し、養生56日までは、一軸圧縮強さが緩やかに増加している。そして、養生56日での最終的な一軸圧縮強さは、粉殻灰10%、5%、0%、15%の順で大きく、適量の粉殻灰を加えることで一軸圧縮強さが向上し、粉殻灰配合比15%が最小の値をとるという結果が得られた。粉殻灰配合比15%の強度が一番小さい理由に関しては、大量の粉殻灰を入れることで土が締まりにくくなることが原因と考えられるが、詳細は他の配合比の試験を行うことで今後解明していきたい。今回の試験において、石灰5%、粉殻灰10%の配合比において最も一軸圧縮強さが大きく、この粉殻灰配合比10%が生石灰5%に対する最適な配合比であると言える。このことから、試験条件の中から最も大きい一軸圧縮強さが得られた条件は、生石灰に対する粉殻の配合比1:2である。なお、養生3日目までは全配合比においてほぼ同様に一軸圧縮強さが増加し、養生7日以降の一軸圧縮強さに差があることから、養生3日目までは、生石灰により強度が増加し、それ以後が粉殻灰に含まれるシリカによって促進されるポズラン反応による強度増加であると考えられる。また、粉殻灰を加えたパターンにおいては、養生28日以降、一軸圧縮強さの変化が養生28日以前よりも小さいことから、ポズラン反応による強度発現は養生28日までに起こると推定される。

図4に粉殻灰配合比10% 養生3日目の供試体3個(供試体①、②、③)に対する応力ひずみ曲線、図5に図4と同じ配合条件で養生56日目の供試体2個(供試体①、②)に対する応力ひずみ曲線を示す。このグラフから、養生3日目では、材料は延性を保っているが、養生56日においては脆性破壊が生じていることがわかる。

図6に破壊ひずみと養生日数を全配合比で比較したグラフを示す。破壊ひずみは圧縮応力が最大値を取る時のひずみである。すべての配合比において、養生期間が長くなるにつれて、破壊ひずみが小さくなることがグラフからわかる。

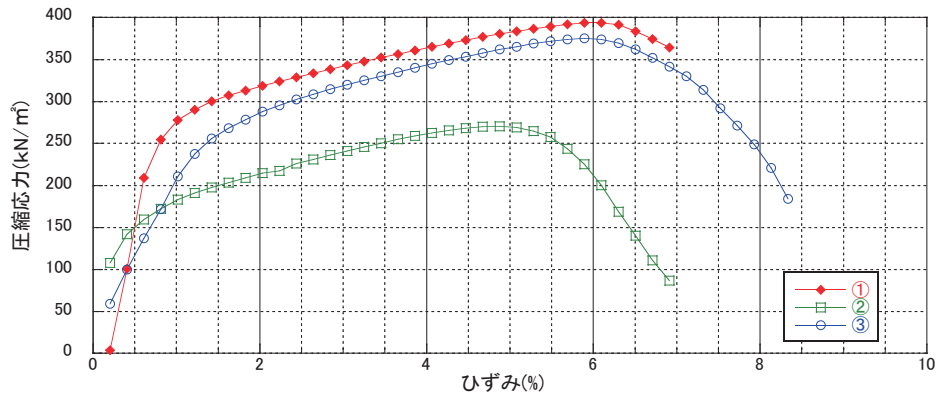


図4 粉殻灰配合比10%・養生3日目に対する応力ひずみ曲線

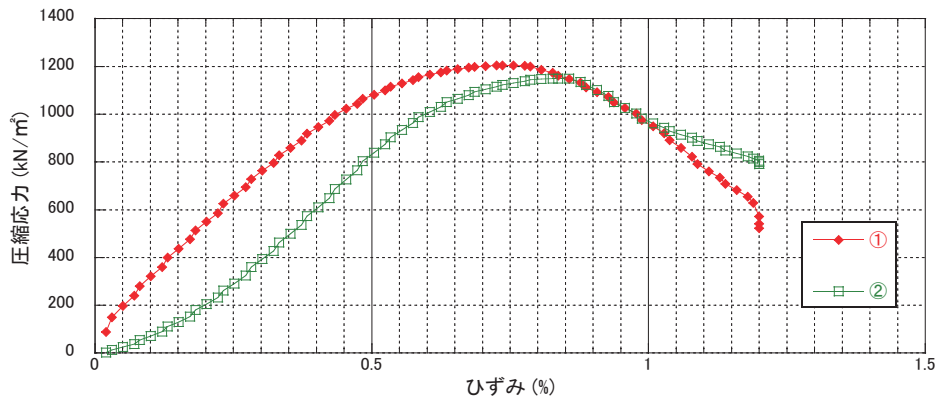


図4 粉殻灰配合比10%・養生56日目に対する応力ひずみ曲線

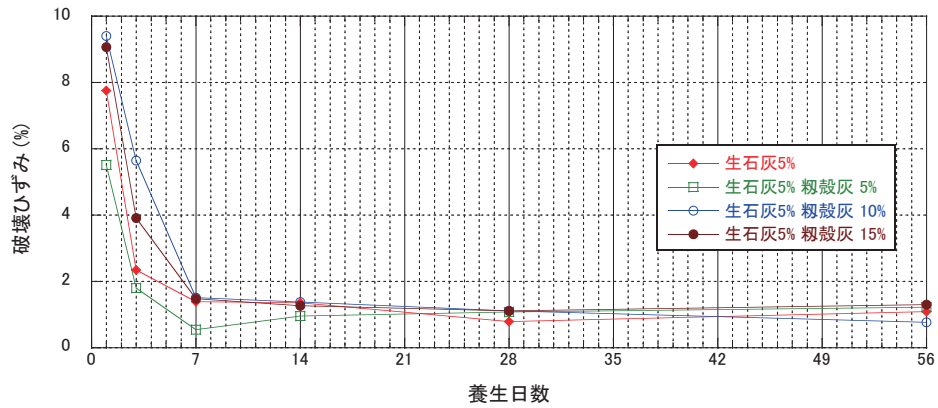


図6 養生日数と破壊ひずみの関係

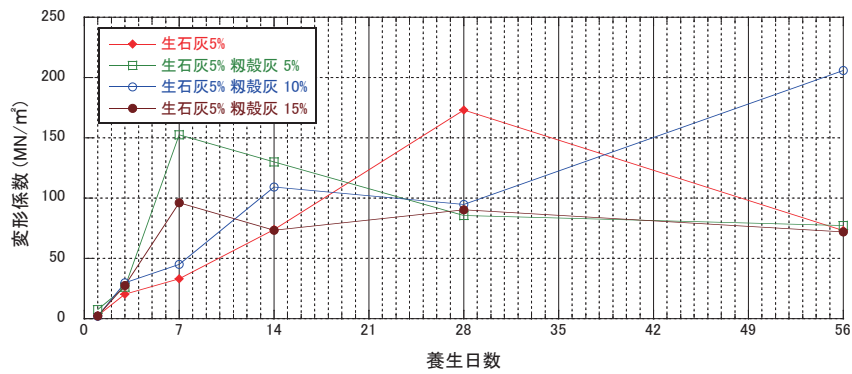


図7 養生日数と変形係数の関係

特に、全配合比において、養生7日までに大きく低下する。ここから、生石灰による脱水反応で改良土が締め固まり、延性が小さくなることが考えられる。養生14日以降は、どの配合比でもほぼ同様の値をとっている。このことから、破壊ひずみの大きさは試料または生石灰の配合比に依存すると考えられる。

図7に、変形係数と養生日数を全配合比で比較したグラフを示す。変形係数 $E_{50}[\text{MN}/\text{m}^2]$ は材料の変形しにくさを示すパラメータであり、以下のように算出される。

$$E_{50} = \frac{q_u}{\epsilon_{50}} \times \frac{1}{10} \quad (5)$$

ここに、 $q_u$ :一軸圧縮強さ $[\text{kN}/\text{m}^2]$ 、 $\epsilon_{50}$ : 圧縮応力が一軸圧縮強さの $\frac{1}{2}$ のときのひずみ $[\%]$ 、である。同じ力を与えたときに、変形係数が大きいほうがひずみ、すなわち変形が小さい。

粃殻灰配合比0%においては、養生28日までは変形係数が増加傾向にあり、養生56日で減少している。粃殻灰配合比5、15%においては養生7日までは増加し、それ以降、減少傾向にある。粃殻灰配合比10%においては、養生28日でわずかに減少するが、養生28日から56日で大きく増加している。養生56日の最終的な変形係数は粃殻灰配合比10%が最も大きく、他の配合比はほぼ同じ値をとっている。このことから、変形係数の観点からも、本試験においては生石灰5%に対して粃殻灰配合比10%が最適な配合比率であると言える。

#### 4. おわりに

本研究では、発展途上国において安価で大量に入手可能な生石灰とイネ粃殻灰を用いた地盤改良工法の開発を目的として、生石灰とイネ粃殻灰による地盤改良の可能性、イネ粃殻灰の配合率および養生日数が改良土の強度特性、変形特性に与える影響を実験的に検討し、生石灰と粃殻灰による地盤改良の有効性と、生石灰5%に対する粃殻灰配合比が与える影響について明らかにした。

具体的には、一軸圧縮試験を行い、一軸強さ、破壊ひずみ、変形係数を求めることで石灰と粃殻灰の配合率と養生期間が与える改良土の強度特性、変形特性への影響を評価した。その結果、適量の粃殻灰を加えることで一軸圧縮強さが向上し、混合土は硬化し、文化財保護のための地盤改良工法として適用できると考える。粃殻灰配合比5、10%においては、養生期間に比例して一軸圧縮強さが増加する。養生期間を56日とした場合、粃殻灰配合比10%において一軸圧縮強さが最も大きいという結果がえられた。その一方で、養生日数を重ねるごとに、破壊ひずみが減少し、脆性破壊が生じることがわかった。また、変形係数は粃殻灰配合比10%では、養生期間に比例して大きくなり、最終的に養生56日で他の配合比よりも大きな値をとり、変形係数の観点からも、生石灰5%に対して粃殻灰配合比10%が今回の試験条件の中では最適な配合比率であると言える。

今後、材料の他の配合比で試験を行うことによって最適な配合比を求める。そして、様々な配合比の改良土の土質パラメータを取得し、数値解析によって改良効果の検証を行い、具体的な目標強度の設定をする。また、脆性破壊への対策も今後の課題として挙げられる。

#### 参考文献

- 1) 森實千恵, 酒匂一成, Ha Hong Bui, 水田哲生, 深川良一, 里深好文: 河岸の侵食による文化財への被害の軽減を目指したSPH法を用いた数値シミュレーションの開発, 歴史都市防災論文集, Vol.4, pp.99-106, 2010.
- 2) 日本石灰協会石灰安定処理委員会: 石灰による軟弱地盤の安定処理工法, 鹿島出版会, 1983.
- 3) D. H. PHAN, T. A. LE and M. V. KHUC, Study on effect of blast furnace slag and rice husk ash on compressed cement-soil materials, Proceedings of the 4th Vietnam/Japan Joint Seminar on Geohazards and Environmental Issues, Paper No.S3-6, 2014.
- 4) 杉田修一, 庄谷征美: ポズラン材としてのもみ殻灰の有効利用に関する研究, 土木学会論文集, No.526, V-29, pp43-53, 1995.
- 5) 李徳河, 安定処理した土の強度とその浸蝕特性について, 国立成功大学土木工程研究所修士論文, 1976年4月.
- 6) Ministry of natural resources and environment, Ministry of foreign affairs of the Netherlands: Climate Change Impacts in Houg River and Adaptation in its Coastal Phu Vang, Thua Thien Hue province Final report, 2008.
- 7) 嘉門雅史, 乾徹, 東海林寛: セメント固化を用いた地盤改良工法における地盤環境影響の実験的検討, 京都大学防災研究所年報, 第48号B, 2005.