

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04696

研究課題名(和文) ミクロな破壊メカニズムに基づく新たな自己修復型地盤改良技術の開発

研究課題名(英文) Development of a new self-healing soil improvement technology based on failure mechanism in micro-scale

研究代表者

高野 大樹 (Takano, Daiki)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長

研究者番号：80626218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：外的要因により破壊に至った改良土はその機能を失ったとみなされ、全面的に再構築されることが一般的である。この際、破壊の初期段階から制御や修復を行い、脆性的な性質を補う延性的な材料へと補強することが効果的な検査・補修を可能とし、土構造物の長寿命化へとつながる。このような背景のもと、自己修復機能を付与させたセメント改良土の強度特性ならびに強度回復特性を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、この学術的課題を解決するための基礎的な研究として、自己修復機能を付与させたセメント改良粘土を作製し、載荷実験および室内模型実験を実施し、その強度特性および強度回復特性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は改良土が有する破壊に対する弱点を効率的に克服かつそれを修復する機能を付与する補強手法を提案し、土構造物の長寿命化に資することを目的としている。一旦、外的要因により破壊に至った改良土はその機能を失ったとみなされ、全面的に再構築されることが一般的である。この際、破壊の初期段階から制御や修復を行い、脆性的な性質を補う延性的な材料へと補強することが効果的な検査・補修を可能とし、土構造物の長寿命化へとつながる。

研究成果の概要(英文)：Improved soils that have failed due to external factors are generally considered to have lost their function and are completely rebuilt. In this case, control and repair from the early stages of failure and reinforcement with ductile materials to compensate for brittle properties enable effective inspection and repair, leading to a longer service life of the soil structure. In this context, it is necessary to clarify the strength properties and strength recovery characteristics of cement modified soil with self-healing function. In this study, as a basic research to solve this academic problem, cement modified clay with self-healing function was prepared, and loading tests and laboratory model tests were conducted to investigate its strength properties and strength recovery characteristics.

研究分野：地盤工学

キーワード：固化処理土 可視化 微生物固化 X線CT

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

臨海地帯に産業が集中する我が国において、護岸などの港湾構造物の研究は、社会基盤整備政策の中でも中心的な位置に存在してきた。これらの構造物は、臨海地域に特有の軟弱粘土や、砂がゆるく堆積する環境に建設されるため、高度な地盤改良技術が必要とされる。近年、世界的に設計思想は仕様設計から性能設計に移行しつつある。これは構造物・地盤系が、外力によりどのようなメカニズムでどれだけ被害を受けるかを正確に予測し、適切に設計・施工するという、さらに高度な技術水準の必要性を意味している。また、港湾や空港施設のような重要構造物は稼働の中断が許されず、補修が困難となる場合が多い。構造物が大規模であるほど、物理的には検査と補修が可能であってもコストや時間の面からも包括的な検査の実施は不可能となる。

セメント等の安定剤により地盤改良を受けた土(改良土)は一般に強度を増し、構造物の安定性は改善される。一方で、強度が一度ピークまで発揮されるとその後の強度は劇的に減少する、脆性を有するのも改良土の特徴である。脆性的な地盤の破壊現象のメカニズムは、進行性、すなわち破壊が局所的に生じ、それが発達して最終的な破壊メカニズムを有するものである。この過程は極めて複雑であり、古典的な解析手法で考慮することは困難である。また、改良土は安定剤混合の不均一性および対象地盤の不均質性に起因して実質的な強度のばらつきを有する地盤であり複雑な内部破壊モードを示す。一旦、外的要因により破壊に至った改良土はその機能を失ったとみなされ、全面的に再構築されることが一般的である。この際、破壊の初期段階から制御や修復を行い、脆性的な性質を補う延性的な材料へと補強することが効果的な検査・補修を可能とし、土構造物の長寿命化へとつながる。

2. 研究の目的

本研究は、改良土の長寿命化を目指し、内部破壊メカニズムを考慮した自己修復機能を有する改良土の補強方法の提案を行うことを目的とする。港湾や空港施設のような重要構造物は稼働の中断が許されず、補修が困難となる場合が多い。構造物が大規模であるほど、物理的には検査と補修が可能であってもコストや時間の面からも包括的な検査の実施は不可能となる。そこで、本研究では、セメント改良土の長寿命化を目指して、微生物の代謝活動を利用した固化技術に着目し、その技術について既往の研究を整理する。そして、自己修復機能を付与させたセメント改良土を用いて、その強度回復特性を明らかにするために、載荷試験および室内模型実験を実施し、以下の目的を達成するために研究を行う。

- 1) 自己修復機能を付与したセメント改良土の強度特性を明らかにすること
- 2) 損傷を与えた自己修復機能を付与したセメント改良土の強度回復特性を明らかにすること
- 3) 自己修復機能を付与したセメント改良土に短繊維補強技術を併用した場合の強度特性および強度回復特性を明らかにすること

3. 研究の方法

ここでは、載荷試験を実施して供試体に損傷を与えた自己修復セメント改良土に対し、自己修復過程を経た後に再度載荷試験を実施し、その強度回復率を把握するために実施した室内模型実験について、その方法を述べる。

本研究では、供試体の損傷レベルを変えてその強度回復率を明らかにするために、図-1 に示すように、3パターン(パターン I, II, III)の損傷レベルについて検討を進めた。ここで、 q_u は一軸圧縮試験で得られたピーク強度である。パターン I~III はそれぞれ異なる損傷レベルを模擬している。なお、この試験に用いた供試体は、直径 25mm × 高さ 50mm の円柱供試体である。供試体の養生期間は 14 日で統一した。自己修復環境については、微生物の活動が活発化する温度条件を満足するために、室温 30℃ の部屋で供試体を保管した。自己修復期間については、7、22、34 日の 3 期間について実施した。自己修復させるために与えた固化溶液の注入方法については、図-2 に示すように、2 通りの方法(実験 a, 実験 b)で検討した。実験 a は、供試体に固化溶液が十分に供給されるように、容器内を固化溶液で満たし、供試体を浸漬させる条件で実施した。供給の観点からすれば、自己修復にとって理想的な条件と言える。次に、実験 b は、容器内に設置した供試体の周りには砂を密な状態で配置し、さらに、供試体の上部におもりを載せることで上載圧を作用させた。この実験では、地中環境下を模擬した実験条件と位置付けている。なお、上載圧については、32.5kPa で統一した。固化溶液の交換については、既往の研究(塚本, 2023)と同様に、両試験ともに 2 日おきに実施した。

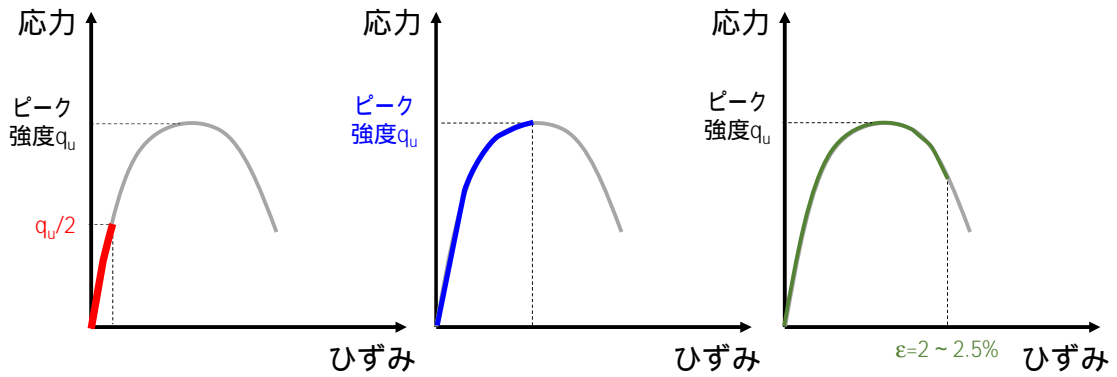


図-1 損傷レベル

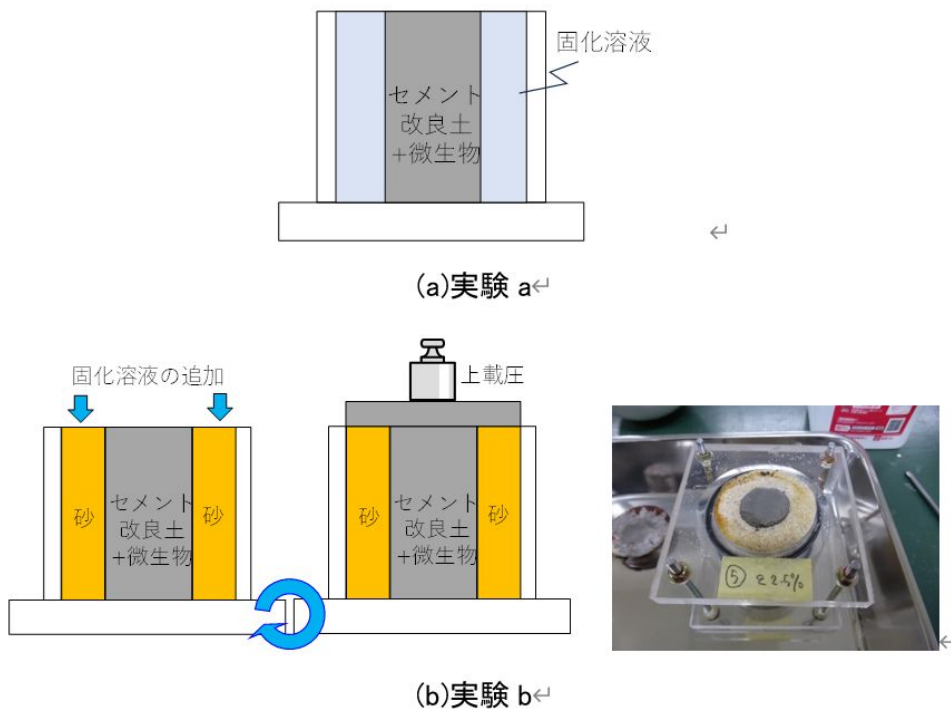


図-2 自己修復環境

4. 研究成果

自己修復機能を付与させたセメント改良土の諸特性ならびに固化過程の進展メカニズムを明らかにするために、自己修復機能を付与させたセメント改良土を作製し、各種実験を実施し、その諸特性を検討した。

得られた知見として、図-3 に示すように、微生物の有無の違いによるセメント改良粘土供試体（直径 50mm、高さ 100mm、養生 7 日）の一軸圧縮試験結果より、微生物を混ぜた供試体は、ピーク強度が大きく低下し、セメント改良粘土特有の明確なピークが生じない結果が得られた。また、固化溶液の pH やカルシウムイオン濃度の計測結果から、固化溶液は常にアルカリ側を示したことから炭酸カルシウムの析出環境を維持でき、液体培地を追加注入した 22 日目からはカルシウムイオン濃度の低下が顕著に確認できた。さらに図-4 に示すように、得られた CT 画像から、固化溶液の交換のみだけの場合、固化溶液が接する表面や亀裂の入り口付近から炭酸カルシウムの析出が確認された。

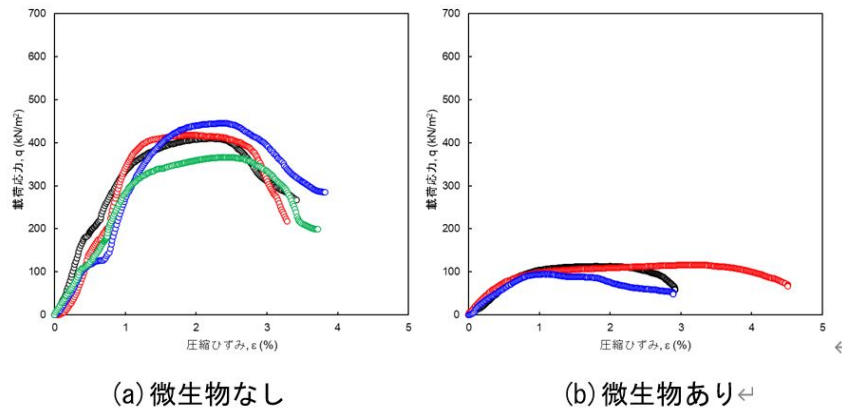


図-3 一軸圧縮結果

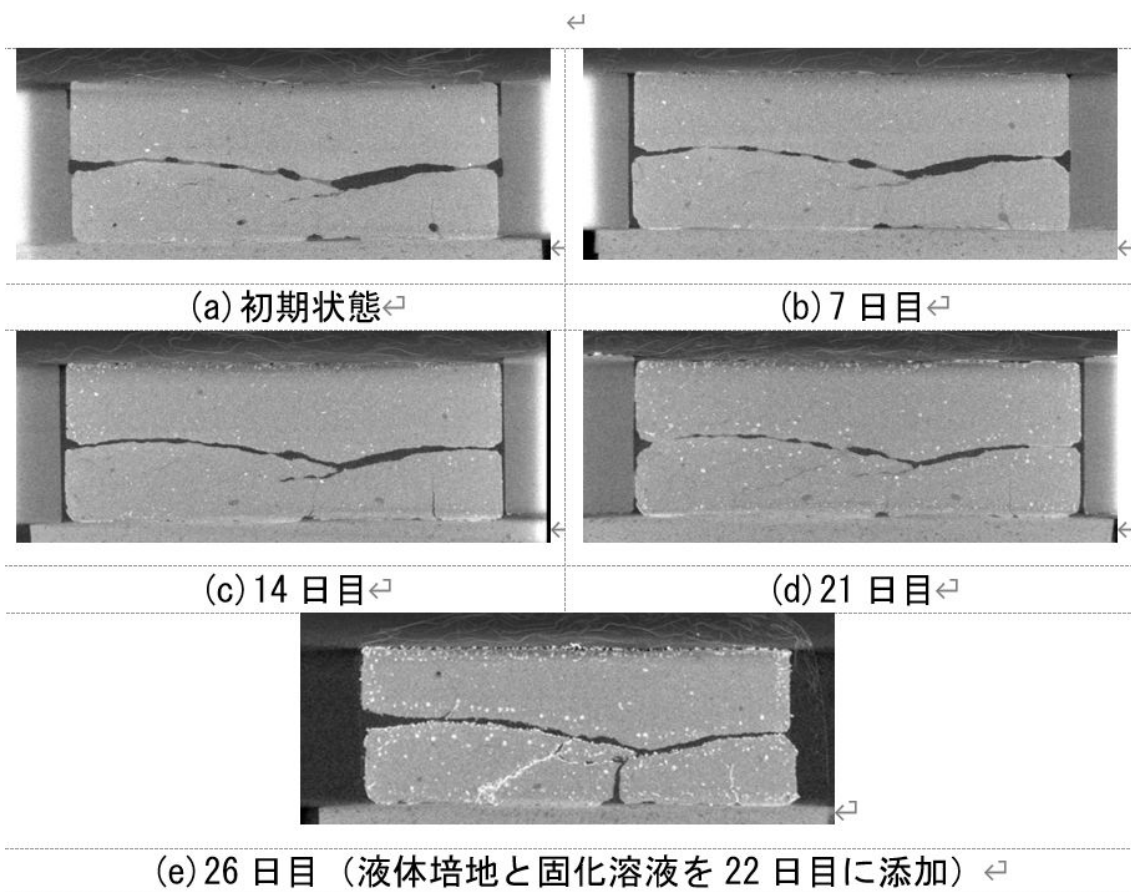


図-4 CT 画像

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) セメント改良粘土に微生物を練り混ぜることで、自己修復機能を付与したセメント改良土を作製し、一軸圧縮試験を行いその強度特性を把握した。微生物を練り混ぜることで供試体の強度は、微生物のっていない供試体の約半分程度に低下し、セメント改良粘土特有の明確なピークが生じない結果となった。
- 2) 自己修復機能を付与したセメント改良粘土の強度回復特性を、損傷レベルおよび自己修復期間、自己修復環境条件の違いによって結果を整理した。損傷レベルが小さいほど強度回復率が高くなり、今回実施した自己修復期間の中では、期間が短いほど強度回復率が高くなる結果となった。また、同じ自己修復期間でもモールドに入れ砂地盤で周囲を固め、上載圧をかけた状態のものより、固化溶液に浸漬していたものの方が強度回復率が高くなった。

最後に、今後の研究の課題について述べる。

- 1) 微生物を混ぜることによって供試体の強度が下がり、また養生日数による強度の違いも明らかになった。
- 2) 損傷レベル、自己修復期間、自己修復環境によって強度回復率が異なることが明らかになった。特に損傷レベルによる強度回復率の差は、短繊維をセメント改良土に練り混ぜることで解消された。今後は混ぜる短繊維の量を変えて適正量を見つけ出し、また実用性があるかどうかについて検討する必要がある。
- 3) 本研究では、供試体をモールドに入れ砂地盤で周囲を固め、上載圧をかけた状態での自己修復および固化溶液に浸漬した状態での自己修復の二種類の実験条件で自己修復させたが、今後は実務で適用する場合を想定した方法を検討しなければならない。また、今回は初めから微生物を混ぜた供試体で実験を行ったが、もともとの強度が低下することを考慮すると、後から微生物を入れる方法を見つける実験も今後は行っていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kondo A., Takano D., Kohama E., Bathurst R. J.	4. 巻 12
2. 論文標題 Visualization of pile penetration using mechanoluminescent-coated particles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geotechnique Letters	6. 最初と最後の頁 203 ~ 208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1680/jgele.21.00069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakurai K., Takano D., Sugiyama Y., Kisanuki H., Hasegawa N., Niibe T.	4. 巻 2023
2. 論文標題 Evaluation of Cross-Hole Resistivity Tomography using Sparse Modeling for Monitoring Chemical Grouted Area	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 5th Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience & Engineering	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3997/2214-4609.202378051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 TAKANO Daiki, SUGIYAMA Yuri, NIIBE Takamasa, HASEGAWA Nobusuke, SAKURAI Ken, TAKEHANA Kazuhiro	4. 巻 78
2. 論文標題 MODEL EXPERIMENTS OF REAL-TIME MONITORING OF CHEMICAL GROUTING BY ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_781 ~ I_786
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejoe.78.2_I_781	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 TSUTSUMI Ayato, YAMAMOTO Atsushi, KAI Masahiro, TAKANO Daiki, TAKAHASHI Hidenori, SAKAKIBARA Junichi	4. 巻 78
2. 論文標題 WORK PROGRESS CONTROL FOR GROUND IMPROVED BY CHEMICAL GROUTING USING P-WAVE AMPLITUDE ATTENUATION TOMOGRAPHY	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_805 ~ I_810
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejoe.78.2_I_805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TAKANO Daiki, MORIKAWA Yoshiyuki, SUGIYAMA Yuri, MATSUO Yasunari, HAMANO Yoshiaki, ARAI Fumitaka	4. 巻 77
2. 論文標題 CENTRIFUGAL MODEL TEST ON PASSIVE RESISTANCE MECHANISM OF STEEL PIPE SHEET PILES WITH SOIL IMPROVEMENT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_397 ~ I_402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.77.2_I_397	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TAKANO Daiki, ARAI Fumitaka, MORIKAWA Yoshiyuki, MATSUO Yasunari, HAMANO Yoshiaki	4. 巻 76
2. 論文標題 CENTRIFUGAL MODEL TEST ON THE PASSIVE RESISTANCE OF STEEL PIPE SHEET PILES WITH SOIL IMPROVEMENT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_480 ~ I_485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.76.2_I_480	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Daiki Takano
2. 発表標題 Evaluation of triaxial compression behavior of artificial particles using X ray tomography
3. 学会等名 5th International conference on tomography of materials & structures (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高野大樹
2. 発表標題 三次元比抵抗トモグラフィによる薬液改良地盤の出来形計測実験
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高野大樹
2. 発表標題 前面に固化改良体を有する鋼管矢板の受働抵抗に関する遠心模型実験
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神埼達也
2. 発表標題 養生期間がセメント改良土の局所化挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神埼達也
2. 発表標題 セメント量と養生期間がセメント改良土の局所化挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野々山 栄人 (Nonoyama Hideto) (00624842)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・准教授 (82723)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	宮田 喜壽 (Miyata Yoshihisa) (20532790)	防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、 電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・教授 (82723)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関