

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04042

研究課題名(和文)劣化促進による重金属等汚染物質を含む固化土からの長期溶出特性の解明

研究課題名(英文) Characteristics of long-term dissolution of contaminants such as heavy metals from stabilized soil by promoting deterioration

研究代表者

森川 嘉之 (Morikawa, Yoshiyuki)

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：10450777

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：限られた期間で固化土の長期的な特性変化を検討するために、劣化促進試験方法の検討を実施した。検討の結果、コンクリートの透水試験器をもとに改良した試料容器と溶液の浸透方法で、供試体の均一な劣化促進が可能となった。

また、打設37年後の現地固化処理土の採取、試験を実施し、固化処理土の強度および変形係数の長期特性に関する知見を得た。劣化深度と経過年数の関係については、既往のデータと整合するものであった。

さらに、室内で作製したセメント改良土の供試体を攪乱の後、静的締固めまたは動的締固めを行い、攪乱による強度低下と締固めやその後の養生による強度回復状況を詳細に調べた。

研究成果の概要(英文)：To investigate the long-term characteristic change of stabilized soil for limited period, we developed the method for promotion of deterioration of the stabilized soil. In this deterioration method, a compulsory infiltration apparatus developed based on the equipment for concrete specimen is used. The stabilized soil can be deteriorated uniformly in relatively short term by this apparatus.

And we conducted sampling of soil stabilized in-situ 37 years ago and laboratory tests on its long-term characteristics change. As a result of the test, the relationship between deterioration depth and elapsed time consistent with the past data was obtained.

Furthermore, strength recovery of the stabilized soil, which was disturbed after several days from mixing, was investigated in detail, as well as strength reduction due to disturbance.

研究分野：工学

キーワード：固化土 劣化

1. 研究開始当初の背景

港湾地域や河川・湖沼部に堆積している重金属などで汚染された土質の処理は快適な環境を維持するために解決すべき重要な課題である。対策方法として、汚染土の固化処理は有力な技術の一つである。汚染物質の不溶化を目的として固化処理を適用した場合、固化土の劣化による汚染物質の溶出が考えられることから、劣化をはじめとした固化土の長期特性変化を把握しておくことは非常に重要である。しかしながら、原位置固化土の長期特性変化については、固化後に上部構造物を構築することから、継続的な調査が困難なため情報量が非常に少ない。また、深層混合処理工法の開発から40年余りしか経過していないことから、調査期間も長いもので20年程度にとどまっている。加えて、固化土は周辺環境による劣化や掘削・運搬などによる攪乱の影響を受ける可能性が高い。このため、劣化や攪乱を受ける固化土からの汚染物質の溶出特性の解明や、劣化度の特性を評価することは当技術を利用していく上で不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 一定の期間内に長期劣化試験を行うことは難しく、固化土の長期強度と汚染物質の溶出の関係が明らかになっていない。限られた期間に長期溶出特性の研究に取り組むために、固化処理土の長期劣化特性を把握した上で、劣化メカニズムに基づいた劣化促進試験の手法とシステムを確立する。

(2) 固化処理土による埋立地盤は、施設の更新や用途変更などによって、掘削などが行われる可能性も高い。また、基礎地盤の変形や沈下によって固化土の内部にクラックが生じることがある。このため、掘削攪拌を受けた固化処理土の強度特性を把握する。

(3) 原位置で固化処理された土の物性は、室内配合での固化土の特性と大きく異なることは知られている。そのため、原位置での固化処理土の物性や強度特性を把握し、室内試験での特性と比較検討することは特に重要である。しかし、原位置での長期劣化に関する研究は実施が困難であり、国内外問わず研究事例が少ない。このため、研究代表者が所属先にて管理している長期養生中の原位置固化土を用いて固化土の長期特性変化を調べる。

3. 研究の方法

(1) 時間と劣化特性の関係を短縮した期間で再現する劣化促進試験装置と方法を確立する。具体的な固化土の劣化方法は、供試体とその劣化を促進させるための液体を強制的に通水し、供試体内部の間隙水と継続的に交換する方法である。

(2) 固化土の強度特性に及ぼす攪乱・締固めの影響を室内試験で調べる。具体的には、室内で作製したセメント改良土の供試体を攪乱の後、静的締固めまたは動的締固めを行い、攪乱による強度低下と締固めやその後の養生による強度回復状況を詳細に調べる。

(3) 1979年から37年間長期養生している固化土を掘り起し、ボーリング、サンプリングを実施する。サンプリングした試料に対して強度劣化量やカルシウム含有量などを計測する。固化直後のデータや過去に定期的実施している調査結果も併せて、地中養生下における劣化速度や劣化傾向を明らかにする。

4. 研究成果

(1) コンクリートの透水試験器を参考に、短時間で固化土を均一に劣化させるための強制通水試験装置を開発した。図1に装置の概要を示す。本装置では、貯水槽に加圧することにより、固化土の供試体とその劣化を促進させるための液体を強制的に通水し、供試体内部の間隙水と継続的に交換する。その際、供試体側面のゴムスリーブに貯水槽よりも若干高い圧力を加え、供試体側面の水みちの発生を防止する。この装置を用いて固化土供試体に強制通水したところ、供給した水道水のpH=7に対して、排水にpH=11の強いアルカリ性が確認された。細粒分などの排水への混入は見られず、強制通水により固化土内の安定材の成分が排出されたと考えられる。この装置により固化土を均一に劣化させることが可能となり、力学試験などにより劣化の程度と固化土の種々の特性との関係を正確に把握することが可能となる。

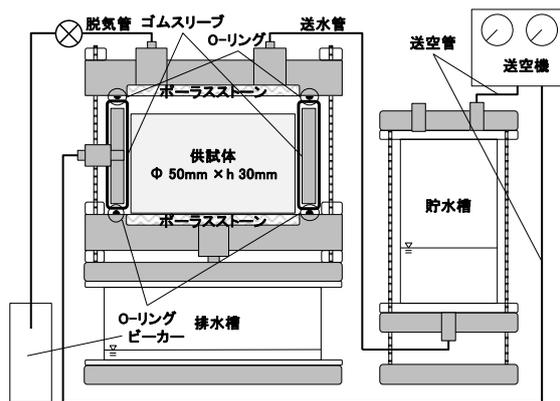


図1 強制通水試験装置

(2) 図2に針貫入試験、図3に一軸圧縮試験の結果の例を示す。試験は、同じモールドから切出した2つの供試体に対して、一方は強制的に通水し、もう一方には通水せず実施した。図2と図3から、強制通水により針貫入抵抗、一軸圧縮強度および変形係数が低下していることが確認できる。また、針貫入試験では、貫入量に対して貫入抵抗値が線形的に増加しており、深さ方向に一樣な強度分布

となっていたことが分かる。このことから供試体が均一に劣化していることが確認された。

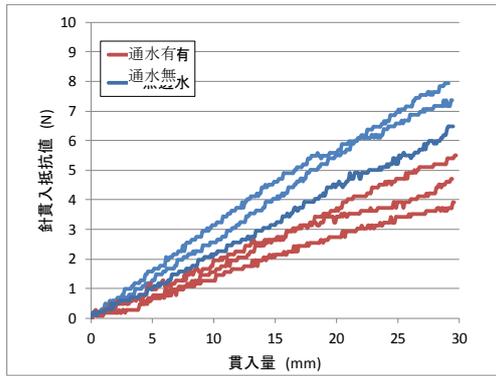


図2 針貫入試験結果

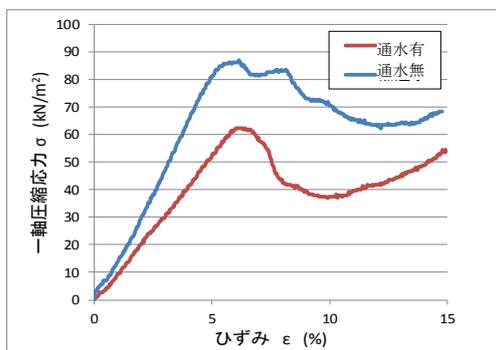


図3 一軸圧縮試験結果

(3) 強制通水による供試体劣化に対する安定材の影響を検討した。安定材には普通セメント、早強セメント、特殊土用セメントを使用した。これまでと同様に針貫入試験、一軸圧縮試験を実施したほか、通水1日経過ごとに排水のpH、Ca²⁺溶出量を測定した。その結果、供試体が均一であったことは確認できたものの、早強セメントによる固化土以外は劣化による強度低下が見られなかった。排水のpH、累積のCa²⁺溶出量(図4)を確認すると、通水1日経過以後は早強セメントのケースのみCa²⁺の溶出が止まり、pHが減少に転じていた。一方、その他のケースでは、Ca²⁺の溶出とpHの値の上昇が継続していた。

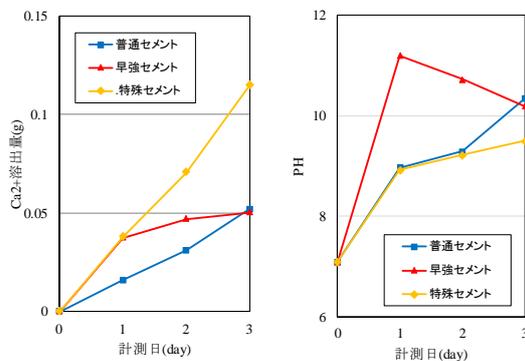


図4 Ca²⁺溶出量(累積)と排水のpH

これは、早強セメントのケースでは間隙水中のカルシウムが排出されてしまい、セメンテーション物質からカルシウムが溶解し始めているが、その他のケースでは間隙水中のカルシウムがまだ残っており、セメンテーション物質が壊されていないためと考えられる。劣化が確認されなかった安定材についても、今回よりも長く通水を続けることでカルシウムの排出による供試体の劣化は可能と考えられる。固化土の強度増加は時間とともに小さくなることから、通常の現場での劣化に要する期間に比べてはるかに短い、実験室レベルで実現可能な期間と考えられる。

(4) 固化途中の攪乱による強度低下とその後の回復状況を詳細に調べた結果、攪乱を受けた固化土は攪乱直後には延性的な挙動を示すが、その後の養生とともに強度が回復し、再び脆性的な性質を示すようになることが分かった。図5と図6に養生28日後と865日後の一軸圧縮試験の応力-ひずみ関係を示す。

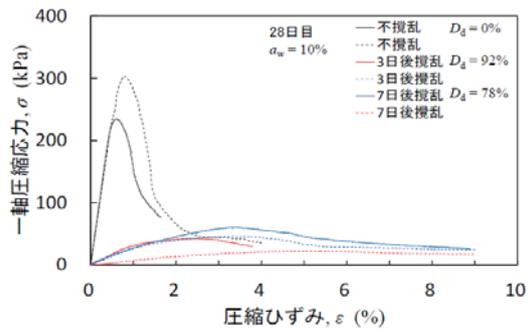


図5 応力-ひずみ関係(養生28日後)

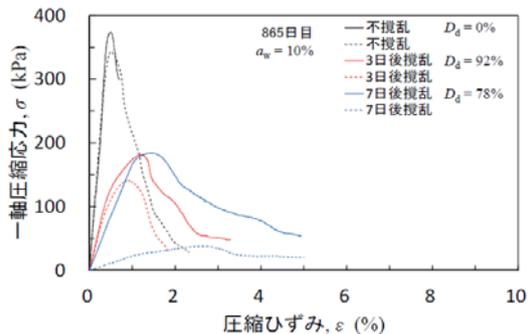


図6 応力-ひずみ関係(養生865日後)

(5) 固化土は攪乱を受けると改良土表面に微細な空隙が多数出現して強度が低下すると考えられるが、長期間の養生中にこれらの空隙は水和物などで埋められることで強度が増加し、脆性的な破壊を示す構造へと変化することが分かった。図7に攪乱直後、図8にその後1.5年を経過した固化土の電子顕微鏡写真を示す。

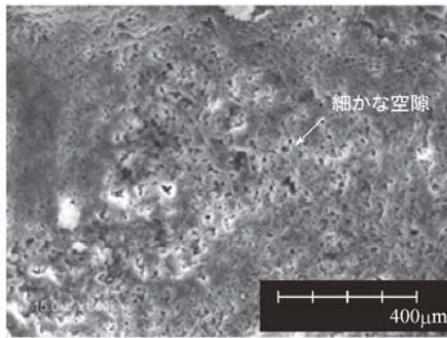


図7 固化土の電子顕微鏡写真（攪乱直後）

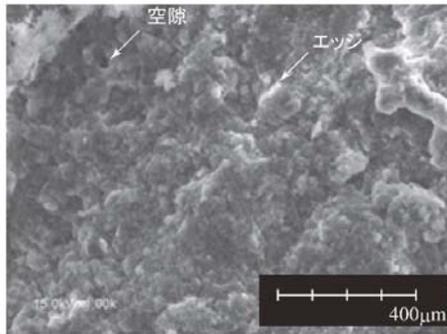


図8 固化土の電子顕微鏡写真（攪乱1.5年後）

(6) 1979年から港湾空港技術研究所（横須賀市長瀬3-1-1）内で37年間の間、地中養生されてきた原位置固化土（図9）の特性を調査した。このため、今回のデータは他に例のない原位置固化土の長期特性変化の情報を提供するものであり、大変貴重である。今回の調査は、固化直後、1991年、2007年に続き4回目の調査である。調査では、埋設した原位置固化土周囲の埋戻し土を除去し、ボーリングにより、力学試験、物理試験、化学試験用の試料をサンプリングした。今回サンプリングしたコアをRQD法で評価したところ、RQD値はほぼ100%であり、コアの品質が高かったことが確認された。



図9 埋設した原位置固化土

(7) 室内試験として、一軸圧縮試験、湿潤密度試験、含水比試験、針貫入試験、カルシウム含量試験、pH試験、電気伝導度試験を行った。図10に一軸圧縮強さの経年変化を示す。

一軸圧縮強さの平均値は、固化直後（64日）および11年後にそれぞれ1002から3641 kN/m²に増加し、その後、今回の調査まではほぼ一定であった。分散係数はやく19~24%で、これにも大きな経時変化は見られなかった。したがって、これまで例のない40年近い期間経過後も固化土の強度が維持されていることが確認された。

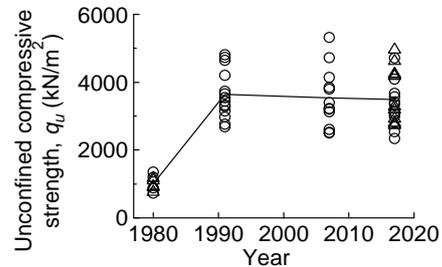


図10 一軸圧縮強さの経年変化

(8) 図11に固化土表面、図12に固化土内部の針貫入試験の結果の例を示す。固化土表面の貫入量-貫入抵抗曲線は屈曲点を示しており、表面から劣化が進行していることが確認される。一方、固化土内部の結果には屈曲点は見られず、貫入量に対して貫入抵抗が一定の割合で増加しており、劣化が表面にとどまっていることを示している。2007年の調査では劣化深度は21mmであったが、今回の結果では、劣化深度は28mmと増加していることが確認された。図11と図12には、カルシウム含有量その他、pH、電気伝導度試験結果も併せて示している。pHをみると、固化土内部が強いアルカリ性を示しているのに対して、表面付近で中和が進んでいることがわかる。また電気伝導度は固化土表面付近で低く、内部高い値を示している。これらの結果は固化土上部でイオン化傾向が低いことを示している。これら表面付近の低いpHおよび電気伝導度により、間接的にカルシウムが表面から放出されたことが確認された。

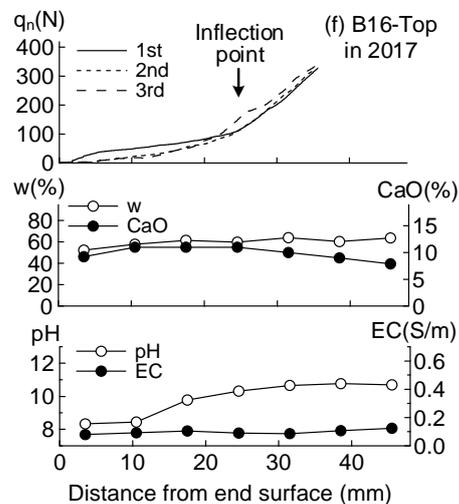


図11 固化土表面の針貫入試験結果の例

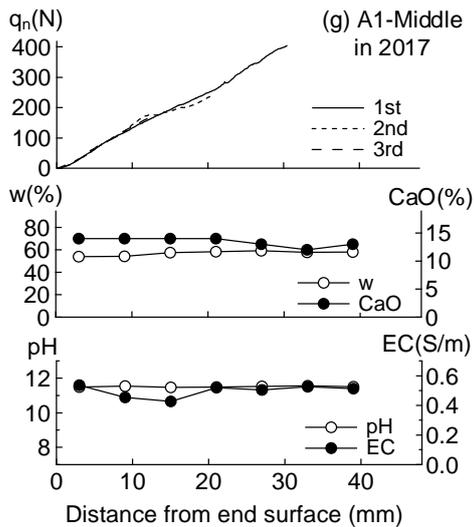


図 1 2 固化土内部の針貫入試験結果の例

(9) 図 1 3 と図 1 4 は pH とカルシウム含有量、電気伝導度の関係をプロットしたものである。針貫入試験で劣化の見られた表面付近とそれ以外でプロットの色を分けて表示すると、ある明確な閾値でデータが区別されることがわかる。今回の調査結果では、カルシウム含有量、電気伝導度ともに、 $\text{pH}=11$ を共通の閾値として劣化の有無が区別されている。このことは一軸圧縮試験などの力学試験に比べて少量の試験片で可能な化学試験で劣化の有無を判断できる可能性のあることが分かった。

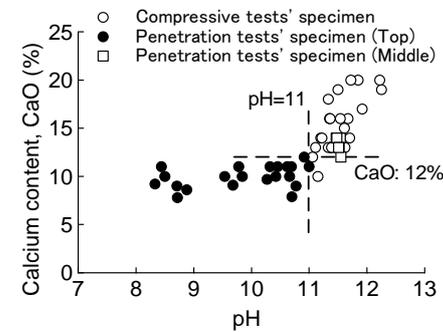


図 1 3 pH とカルシウム含有量の関係

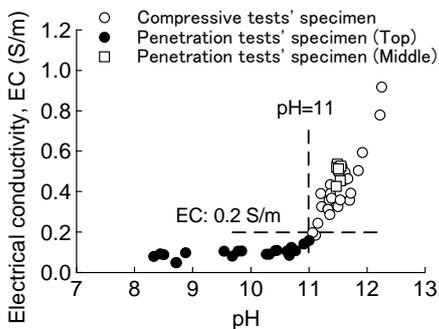


図 1 4 pH と電気伝導度の関係

(10) 固化後の経過時間と劣化深度をプロットすると、図 1 5 のようになる。図には、著者グループを含め、これまでの既往の文献に

示されたデータも合わせてプロットしてある。固化後の経過時間と劣化深度の関係は、比較的狭い範囲にプロットされており、2007 年および今回の調査結果もその範囲にあることが確認された。今回の調査結果を追加したことで、図 1 5 に示した関係の期間が飛躍的に長くなったことから、およその精度ではあるが、劣化深度を推定が可能となる。この図から推定される劣化深度の固化土に対して、 pH やカルシウム含有量、電気伝導度の試験を実施すれば、(3) で説明した強制通水試験の通水時間の設定が可能になると考えられる。

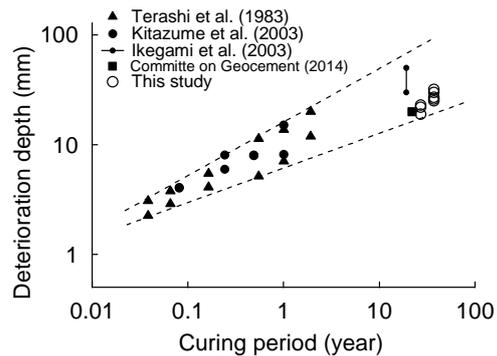


図 1 5 固化後の経過時間と劣化深度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

- ① Takahashi, H., Morikawa, Y., Fujii, N. and Kitazume, M., Thirty-seven-year investigation of quicklime-treated soil produced by deep mixing method, Ground Improvement, 査読あり、2018、<http://dx.doi.org/10.1680/jgrim.17.00044>
- ② Maher, A., Kitazume, M., Janbaz, M., Miskewitz, R., Douglas, S. and Yang, D., Utilization of pneumatic flow tube mixing technique (PFTM) for processing and stabilization of contaminated soft sediments in the NY/NJ harbor, Marine Georesources & Geotechnology, 査読あり、Vol. 36, Issue 3, 2018, pp. 271-279, <https://doi.org/10.1080/1064119X.2016.1257668>
- ③ Ayeldeen, M., Hara, Y., Kitazume, M. and Negm, A., Unconfined compressive strength of compacted disturbed cement-stabilized soft clay, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 査読あり、Vol. 2, Issue 4, 2016, pp. 1-10, <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0064-4>

④北詰昌樹、牧野真大、吉田有希、攪乱を受けたセメント改良土の一軸圧縮試験と顕微鏡観察、土木学会、論文集C(地圏工学)、査読あり、第72巻、第3号、2016、pp. 277-282、
<https://doi.org/10.2208/jscejge.72.277>

⑤Makino, M., Takeyama, T. and Kitazume, M., The influence of soil disturbance on material properties and micro-structure of cement-treated soil, International Journal of Lowland Technology, 査読あり、Vol. 17, No. 3, 2015, pp.139-146、
https://doi.org/10.14247/liti.17.3_139

[学会発表] (計 6件)

①森川嘉之、高橋英紀、藤井愛彦、立花賢吾、透水装置を利用したセメント固化処理土の劣化特性の把握、第53回地盤工学研究発表会、2018(印刷中)

②Kitazume, M., Maher, A., Janbaz, M., Miskewitz, R. and Yang, D., Field strength properties of cement stabilized soil by pneumatic flow tube mixing method, International Foundations Congress and Equipment Exposition (IFCEE 2018), 2018

③藤井愛彦、森川嘉之、高橋英紀、37年にわたる長期養生下での石灰安定処理土の強度変化特性、第52回地盤工学研究発表会、2017

④森川嘉之、高橋英紀、藤井愛彦、坂本恭史、透水による固化処理土の劣化促進への試み、第52回地盤工学研究発表会、2017、pp. 553-554

⑤吉田有希、北詰昌樹、管中混合固化処理工法によるセメント改良土の強度特性に関する現場実験、地盤工学会、第51回地盤工学研究発表会、2016、pp. 639-640

⑥原由樹、北詰昌樹、Mohamed Ayeldeen、攪乱を受けたセメント改良土の強度特性に及ぼす締固め効果、地盤工学会、第51回地盤工学研究発表会、2016、pp. 635-636

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森川 嘉之 (MORIKAWA, Yoshiyuki)
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
研究者番号：10450777

(2) 研究分担者

高橋 英紀 (TAKAHASHI, Hidenori)

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
研究者番号：60371762

(3) 研究分担者

北詰 昌樹 (KITAZUME, Masaki)
東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授
研究者番号：70359230

(4) 連携研究者

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
研究者番号：80626218