

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：92502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630222

研究課題名(和文)微生物触媒法による長期沈下発生粘性土地盤の骨格構造の高位化の試み

研究課題名(英文)Study on the solidification experiment of long term settlement clay using Urease

研究代表者

金田 一広 (Kaneda, Kazuhiro)

株式会社竹中工務店 技術研究所・その他部局等・研究員(移行)

研究者番号：30314040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は自然堆積粘性土地盤の補強、補修に関するものである。自然堆積粘土地盤上に建設された盛土構造物の中で長期沈下が発生しているものがある。一度沈下が発生すると対策費用は莫大となり、現在大きな問題となっている。遅れ沈下は先行圧密応力を超えた荷重対する骨格構造の劣化を伴った軟化が原因である。現在まで、軽量盛土にするオーバーレイによる補修・ドレーン設置による圧密促進などの対策が実施されているが、効果不十分である。本研究の目的は、粘性土地盤内にウレアーゼなどの素および尿素、カルシウムを投入することにより炭酸カルシウムを析出させ粘性土地盤の骨格構造を復活・強化し遅れ沈下を抑止することである。

研究成果の概要(英文)：This research relates to reinforcement and repair of natural sedimented clay soils. The long-term settlement has occurred among embankment structures built on natural sedimented clay ground. Once settlement occurs, the cost of measures becomes huge, which is now a big problem. The long term settlement is caused by the softening accompanied by de-structured of the soil skeleton exceeding the preceding consolidation stress. Until now, countermeasures such as repair by overlay to make lightweight embankment, promotion of consolidation by drain installation are being implemented, but the effect is insufficient. The purpose of this research is to precipitate calcium carbonate by inputting the elements such as urease and calcium in the clay soils to restore and strengthen the soil skeletal structure and deter lag settlement.

研究分野：地盤工学

キーワード：微生物触媒 ウレアーゼ 炭酸カルシウム 粘性土 遅れ沈下 固化 骨格構造

1. 研究開始当初の背景

図1に示すように全国の軟弱地盤上に建設された高速道路は全国で約50地区ほどあり、その2割の10地区(赤色)では残留沈下が1m近く発生している。

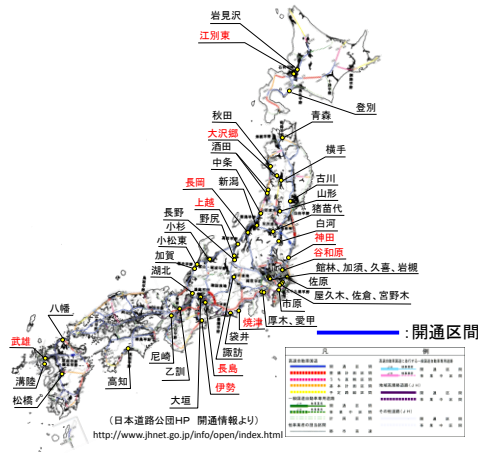


図1 高速道路の施工実績

また、地震後に沈下が発生している粘性土地盤があることも最近報告されてきている。世界に目を向けると、バンコク、上海、ベトナムなど沿岸部に構造物を建設した後に予期せぬ沈下が何十年も継続していることも知られている。

さて、このような長期にわたる大きな沈下の原因は粘性土地盤の骨格構造の劣化に起因している。図2の概念図に示すように、自然堆積粘土は正規圧密粘土より大きな間隙を持ち、さらに明確な先行圧密応力が存在する。先行圧密応力を超えるとわずかな応力の増加で圧縮が大きく発生することが分かる。いわゆる二次圧密という現象である。ここでは先行圧密応力を超えて荷重が載荷されると土骨格の塑性圧縮軟化に伴い過剰間隙水圧の発生、その後水圧の消散とともに遅れ沈下が生じる現象と考えられる。

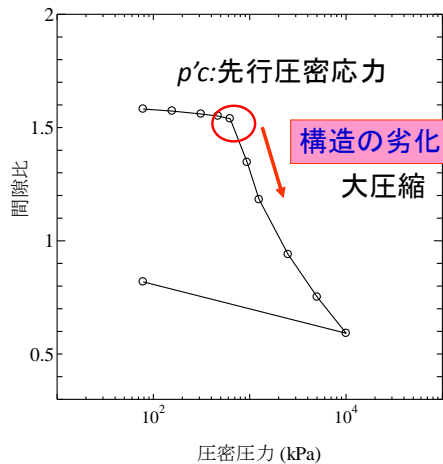


図2 骨格構造の劣化

地震時の液状化は地震が発生したら瞬時に沈下し高々1m程度であるが、一方粘性土の場合は数十年にわたって10cm/年程度、少しずつ沈下が発生することが特徴である。10年以上継続して沈下し、1mを超えることも多々ある。現在では、このような既設構造物直下の粘土地盤の地盤改良工法はなく、盛土などの構造物を軽量化したり、オーバーレイをしたりしているのが現状であり、その結果補修費が毎年膨らんでいる。

2. 研究の目的

本研究の目的は粘性土地盤内に現地から採取した微生物の培養液あるいはそれに相当する酵素であるウレアーゼ、および尿素、カルシウムを投入することにより炭酸カルシウムを析出させ粘性土地盤の間隙を減少させ、同時に骨格構造を復活・強化し遅れ沈下を抑制することである。この技術は現時点では不可能とされている現地粘性土地盤を修復させる。国内のみでなく海外で発生している沈下対策にも寄与できると考えている。

3. 研究の方法

固化メカニズムは図3に示す。

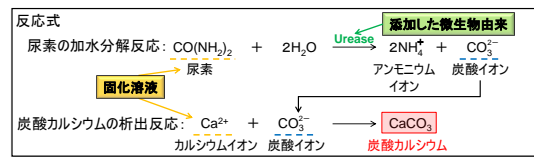
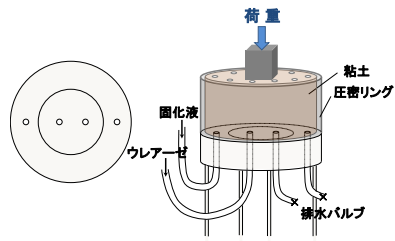


図3 固化メカニズム

生物由来の酵素ウレアーゼによって尿素を加水分解させ、アンモニウムイオンと炭酸イオンに分解する。この炭酸イオンと固化液であるカルシウムイオンが反応して炭酸カルシウムが析出する、というメカニズムである。

研究は室内実験を想定する。図4に示すように既存の圧密容器にウレアーゼと固化液を別々に注入する専用の通水装置を開発し、粘土供試体内で上記の反応を促進させる。砂などの透水性が高い材料ではウレアーゼと固化液を混合した溶液を通水させることが多いが、粘性土の場合は透水性が小さいために別系統とした。圧密リングを通水装置にセットして、供試体中心領域にウレアーゼ溶液、外周領域に固化液をそれぞれ注入する。通水は水位のヘッド差を用いており、圧密リングの下からの距離としている。なお、通水が進むと注入速度が遅くなるため適宜ヘッド差を大きくしている。また、重りとして2250gを載荷し、4.3kN/m<sup>2</sup>ほどの上載圧をかけている。実験は、溶液の濃度をいくつか変えて行った。所定の通水が終わった後、定率ひずみ圧密試験を実施して、無対策のものと圧密特性を比較した。



平面図

側面図

図 4 実験装置の概要

#### 4. 研究成果

表 1 に実験のケースと注入した溶液を示す。固化液としては、尿素と塩化カルシウムをいれ、また PH 調整として塩化アンモニウムと炭酸水素ナトリウムをいれている。Case1 を基本ケースとして Case2 はウレアーゼを半分に、Case3 は固化液の濃度を倍にしている。通水は初め 150ml ずつ行い、注入が終了してから同時に 100ml ずつ追加し、全体で 450ml 注入した。なお、ウレアーゼと固化液が同等に注入できない場合は、早く注入が終わった方に蒸留水を適宜追加した。粘土供試体は、粉末カオリン粘土を加えて、スラリー状にした後、圧密圧力 100kN/m<sup>2</sup> で事前圧密を実施して作成した。注入した供試体はひずみ速度 0.02%/min の定ひずみ圧密試験を実施した。

表 1 実験ケース

	ウレアーゼ	尿素	塩化カルシウム	塩化アンモニウム	炭酸水素ナトリウム
Case1	32mg	1.2g	1.66g	2.5g	0.53g
Case2	16mg	1.2g	1.66g	2.5g	0.53g
Case3	32mg	2.4g	3.32g	2.5g	0.53g

図 5 にヘッド(cm)と注入水量の関係図を示す。3 か月半くらいかけて 450ml を注入した。また、ヘッドも通水が進むにつれて徐々に大きくしていった。表 2 に注入前後の粘土供試体の状況を示す。湿潤密度、乾燥密度が無処理粘土に比べて通水した粘土は大きくなっている。間隙比は無処理粘土は 1.776 であったが、Case1 では 1.658 になり 0.11 程度間隙が減少した。

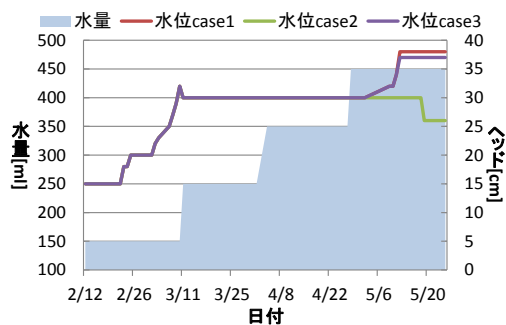


図 5 注入量・ヘッドの関係

表 2 供試体諸元

試料No.	無処理	CASE-1	CASE-2	CASE-3
湿潤密度 $\rho_{t0}$ g/cm <sup>3</sup>	1.564	1.601	1.607	1.601
含水比 $w_0$ %	66.4	63.1	62.1	63.3
乾燥密度 $\rho_{d0}$ g/cm <sup>3</sup>	0.940	0.982	0.991	0.980
間隙比 $e_0$	1.776	1.658	1.632	1.661
圧縮指数 $C_c$	0.44	0.41	0.42	0.41
圧密降伏応力 $p_c$ kN/m <sup>2</sup>	67.0	133	134	145

Case1~3 とも間隙は減少しているが、Case2 が今回の実験では一番減少し、0.144 となった。また、 $C_c$  は無処理粘土と優位な変化が生じていなかった。一方、圧密降伏応力は無処理粘土では 67kN/m<sup>2</sup> であったが Case1~3 は 130kN/m<sup>2</sup> 以上となり増加している。これは注入することで新たな骨格構造を形成し構造が高位化したと考えられる。図 6 に間隙比~圧密応力関係図を示す。無処理粘土に比べて通水した粘土は初期の間隙比が下がって間隙が少なくなっている。圧密が進むと無処理粘土に重なる。これは、間隙に析出したカルシウムが高圧力になると水と共に排水され、もとの無処理粘土の骨格構造に近づくと考えられる。図 7 に 100kN/m<sup>2</sup> までの拡大図を示す。Case1~3 に関して若干差はあるもののほとんど優位な差が見られなかった。図 8 に圧縮ひずみ 15%における圧密応力の関係図を示す。無処理粘土に比べて Case1~3 の方が明らかに圧縮応力が増加し、強度が増加したことが分かる。表 3 に今回の配合と通水量から求めた計算上の炭酸カルシウム析出量(100%結晶化した場合を想定)を示す。Case1,2 は同等で、固化液が倍である Case3 は倍の量が析出される計算になる。次に、実験後の各供試体の質量を炭酸カルシウムの析出による増加と考えて各 Case でどの程度の炭酸カルシウムが析出したかを表 4 に析出効率として示す。その結果 Case1,2 は同程度であるが、Case3 は 32%と小さい。すなわち、理論上もっとも多く CaCO<sub>3</sub> が析出すべき Case3 について、結晶化の効率が著しく低下していることが分かる。この原因としては、添加した塩化カルシウム由来の pH 低下などが考えられ、効率的な固化を行うためには固化溶液に含まれる各成分の濃度を最適化する必要があることが明らかとなった。

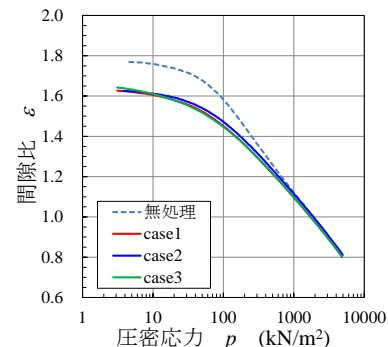


図 6 間隙比~圧密応力関係図

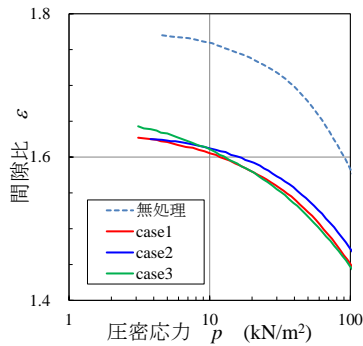


図 7 間隙比～圧密応力関係図(拡大図)

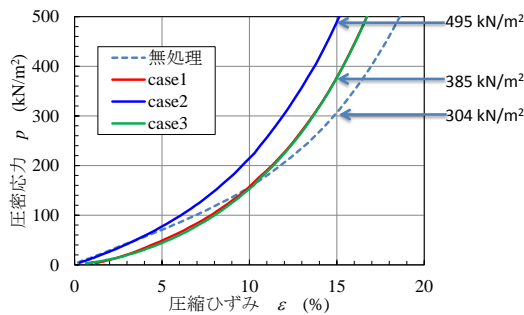


図 8 圧密応力～圧縮ひずみ関係

表 3 累積通水量の炭酸カルシウム析出量 (計算値)一覧

累積通水量 (ml)	計算上の累積CaCO <sub>3</sub> 析出量(g)		
	Case1	Case2	Case3
150	1.5	1.5	3.0
250	2.5	2.5	5.0
350	3.5	3.5	7.0
450	4.5	4.5	9.0

表 4 累積通水量の炭酸カルシウム析出量 (計算値)一覧

析出効率(%)		
Case1	Case2	Case3
62	73	32

一方、Case2 ではウレアーゼ量が半分でも Case1 と同程度析出していることから、ウレアーゼの濃度についても最適な値が存在すること考えられる。市販の酵素剤は他の成分と比較して工学であることから、適正なウレアーゼ濃度を明らかにすることが今後必要になると考えられる。

<まとめ>

粘土供試体にウレアーゼと固化液を注入することで間隙に炭酸カルシウムが析出し間隙比が減少することが分かった。また、析出にはウレアーゼの濃度が関係することも分かった。施工コストを考えた場合、酵素製剤ではなく原位置にすでに生息している微生物が生産する酵素を利用することが

重要となる。原位置にすでに生息しているウレアーゼ活性陽性微生物を用いた場合には、微生物種により結晶のサイズや析出スピードが異なることが報告されている。これら原位置の特性にあわせた固化溶液の組成や注入速度を明らかにし、効率的な補修技術としての実用化を目指していきたい。

<引用文献>

金田一広、島俊郎、川原孝洋、中條邦英、島山正則(2017): ウレアーゼ活性による粘性土供試体の固化実験, 平成 29 年度地盤工学会全国大会講演集.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. Toshihiro HATA, Kazuhiro KANEDA, Tomohiro TANIKAWA(2016) : New microbial-function-based reinforcement method for embankment, Int. J. of Geotechnique, Construction Materials and Environment, Vol.10,No.21, pp.1834-1841.

2. Du L. Nguyen, Satoru Ohtsuka and Kazuhiro Kaneda(2016): Ultimate bearing capacity of footing on sandy soils against combined load of vertical, horizontal and moment loads Int. J. of Geotechnique, Construction Materials and Environment, Vol. 10, No. 1(Sl. No. 19), pp. 1649-1655.

3. 金田一広、中井健太郎、野田利弘、浅岡顕、澤田義博(2016): 浦安地区の地盤材料物性の把握と東北地方太平洋沖地震における K-NET 浦安地震記録を用いた基盤上昇波の推定、日本地震工学会論文集、Vol. 16, No.4、特集号「2011 年東北地方太平洋沖地震の地震動と地盤」、p.4\_155-4\_166.

4. 金田一広、青木 雅路、大塚悟(2016):剛塑性有限要素解析による砂質地盤の寸法効果と傾斜支持力の検討、日本建築学会構造系論文集、Vol. 81, No. 728, 1665-1671, Oct.

[学会発表] (計 6 件)

1. Kaneda K, Tanikawa T, Koumura Y and Hata T(2015): Mechanical properties of cement-treated soil improved using urea. Proc. 15<sup>th</sup> Asia Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

2. Hata T, Kaneda K, and Tanikawa T.(2015): New reinforcement method for slopes based on the microbial function. International Conference on Geotechnique, Sonstruction Materials and Environment (GEOMATE 2015),ISBN 978-4-9905958-4-5 C3051, pp.653-656.

3. 田中仁、島俊郎、金田一広(2016) : 原位置微生物の代謝機能を活用した液状化対策技術の有効性に関する研究, 平成 27 年度土木学会中部支部研究発表会講演集.

4. 伊藤留寿都、梶俊郎(2017):微生物固化における供試体内の溶存酸素量の変化に関する研究, 平成 28 年度土木学会中部支部研究発表会講演集
5. 伊藤留寿都、梶俊郎(2017):富山県射水市由来の微生物を用いた地盤改良技術に関する研究, 平成 28 年度土木学会全国開会講演集.
6. 金田一広、梶俊郎、川原孝洋、中條邦英、梶山正則(2017): ウレアーゼ活性による粘性土供試体の固化実験, 平成 29 年度地盤工学会全国大会講演集.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：盛土構造物及び盛土構造物の施工方法  
発明者：金田一広、梶俊郎、水谷崇亮、篠永龍毅  
権利者：同上  
種類：特許  
番号：特願 2015-173342  
出願年月日：2015 年 9 月 2 日  
国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金田一広 (KANEDA Kazuhiro)  
竹中工務店・技術研究所・主任研究員  
研究者番号：30314040

(2) 研究分担者

梶俊郎 (HATA Toshiro)  
富山県立大学・工学部・教授  
研究者番号：30435424

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )