

微生物代謝を利用した固化砂地盤の液状化強度評価

Evaluating Liquefaction Resistance of Solidified Sand Specimen Using Microbial Ureolysis

鈴木 康 嗣 古山田 耕 司¹⁾ 安 達 直 人
秀 川 貴 彦 上 野 嘉 之

要 約

地盤中に実在する微生物の代謝を利用して炭酸カルシウムを析出させ、砂地盤の液状化強度を増加させる手法の可能性を検討するため、国内の採取土から前培養した微生物とカルシウム源などの培養液を複数回注入した三軸供試体に対して繰返し非排水三軸試験を行い、液状化強度を評価した。得られた知見は以下のとおりである。1) 東京の砂質土から前培養した微生物を用いた場合、養生温度 30℃、培養液の注入回数 4~8 回で液状化強度が 2~6 倍に増加した。2) 国内 10 か所の砂質土から前培養した微生物を用いた場合、養生温度 30℃、注入回数 4 回で液状化強度が 1.5~4 倍に増加し、いずれの微生物でも液状化強度の増加が確認された。3) 液状化強度の増加には、養生期間が重要であることが確認された。4) 走査型電子顕微鏡で元素分析を行い、炭酸カルシウムが砂粒子を固結させている状況を確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 微生物代謝による砂地盤固化
- III. 試験概要
- IV. 試験結果
- V. おわりに

I. はじめに

東日本大震災では、戸建て住宅の沈下や傾斜など液状化による被害が多発したため、既存建物に適用可能な地盤改良工法の開発が強く望まれている。既存建物直下地盤を改良可能な方法の一つとして、微生物の代謝を利用して炭酸カルシウムを析出させ、砂粒子同士を固結させることにより液状化強度を増加させる手法が提案されている^{1)~3)}。そこで本報では、地盤改良工法としての可能性を評価するため、国内の実地盤に存在する微生物の代謝を利用して砂地盤を固化した試料に対して実施した液状化強度試験結果を報告する。試験では、微生物の採取場所、培養液の注入回数や注入間隔及び養生期間などについて検討し、それらが液状化強度に与える影響を分析した。また、走査型電子顕微鏡を用いて元素分析を行い、炭酸カルシウムが砂粒子を固結させている状況を確認した。

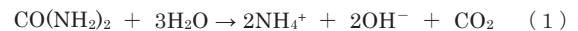
II. 微生物代謝による砂地盤固化

1. 固化原理

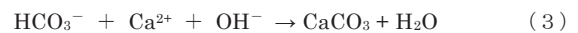
本工法は、地盤中に培養液を注入し、微生物の代謝によって生じ

る二酸化炭素と培養液中のカルシウム源の化学反応から炭酸カルシウムを析出させて土を固化させる技術である^{1)~3)}。本研究では、稲垣ら²⁾の研究を参考にし、微生物の尿素分解による二酸化炭素を利用した下記の化学反応による砂粒子の固化について検討した。

a. 尿素分解



b. 炭酸カルシウム析出



上記化学反応に必要な培養液には、Table 1 に示す 5 種類の溶液を所定の分量で配合して用いた。

2. 微生物

既往の研究では、尿素分解作用が活発な微生物 *Sporosarcina Pasteurii* (ATCC11859 株) が用いられている^{1)~3)} が、外来種のため国内の実地盤では利用できない。そこで本研究では、国内の実地盤への適用を考え、国内各地に存在する微生物を用いることとし、砂 50g に対して培養液 100g (炭酸カルシウムを除く) を与え、30℃ で 1 週間以上培養した。

III. 試験概要

1. 試験ケース

Table 2 に試験ケースを示す。試験では、微生物による固化を行

Table 1 培養液の成分
(Composition of Culture Medium)

成分	分量 (g/l)
塩化カルシウム二水和物	73.50
尿素	30.03
Nutrient Broth	3.00
塩化アンモニウム	10.00
炭酸水素ナトリウム	2.12

Table 2 試験ケース一覧
(List of Test Cases)

実験ケース	試験体数	注入回数 (回)	注入間隔 (週)	養生期間 (週)	微生物採取地点
C0	7	0	—	—	—
C1	8	4	1	2	A
C2	3	6	1	2	A
C3	3	8	1	2	A
C4	6	4	2	2	A
C5	8	4	1	4	A
C6	10	4	1	2	B~K

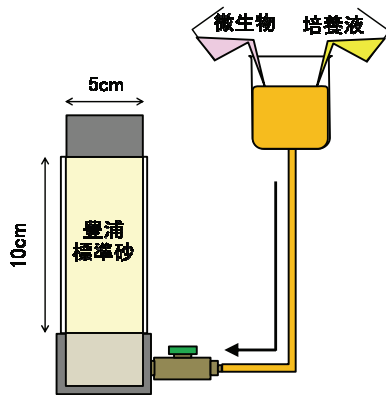


Fig.1 培養液の注入方法
(Grouting Method of Microbial Liquid)

っていないケース C0 と、培養液の注入回数 (ケース C1~C3) や注入間隔 (ケース C4) 及び養生期間 (最終注入から液状化試験までの期間, ケース C5), 微生物の採取源 (ケース C6) をパラメータとして検討を行った。基本ケース (ケース C1) は培養液を 1 週間毎に 4 回与えた後, 2 週間養生して繰返し非排水三軸試験 (液状化試験) を実施した。基本ケースに対して注入回数を 6 回にしたものをケース C2, 8 回にしたものをケース C3 とした。また, 基本ケース C1 に対して注入間隔を 2 週間毎にしたものをケース C4, 基本ケース C1 に対して養生期間を 4 週間にしたものをケース C5 とした。なお, ケース C1~C5 は, 東京都臨海部の採取砂から前培養した微生物を用いたが, ケース C6 では日本各地より採取した砂から前培養した微生物を用いて基本ケースと同じ条件で試験を実施した。

2. 試験方法

Fig.1 に培養液注入の概要を示す。試料には, 三軸試験用のモールド (φ50mm×H100mm) に空中落下法で作製した相対密度約 50% の豊浦標準砂を用い, 培養液を下から注入して飽和させた。

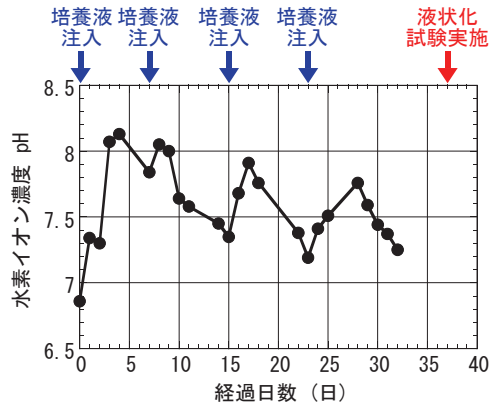


Fig.2 水素イオン濃度 (pH) の測定結果
(Measurement Result of the pH)

いずれのケースも前培養した微生物を 1 回目の注入時に培養液と混ぜて注入し, 30℃ の恒温器で養生した。また, 三軸装置に試料をセットするため, 培養液を排水した後, -25℃ の冷凍庫で一晩凍結させた。凍結試料を三軸装置にセットし, 有効拘束圧 20kPa で 2~3 時間放置して解凍し, 二酸化炭素, 脱気水を下から注入して飽和させた。その後, 間隙圧係数 B 値が 0.96 以上であることを確認し, 有効拘束圧 98kPa で 2 時間程度等方圧密した後, 0.1Hz の正弦波による液状化試験を実施した。

IV. 試験結果

1. 基本ケースの試験結果

水素イオン濃度 (pH) の測定結果を Fig.2 に示す。微生物による尿素分解作用でアンモニアが発生するため, 培養液を注入して 3~4 日間は pH が上昇し, 1 回目の注入では pH は 8.0 を超えている。その後, 炭酸カルシウムの析出に伴い pH が低下した。基本ケース C1 では, この過程を約 1 週間毎に 4 回繰返した後, 約 2 週間養生して液状化試験を実施した。

ケース C0, C1 の液状化試験結果の 1 例を Fig.3 に示す。図には, 繰返し軸差応力, 軸ひずみ, 過剰間隙水圧比の時刻歴と共に, 繰返し軸差応力~軸ひずみ関係と有効応力経路を示す。繰返し軸差応力~軸ひずみ関係はサイクリックモビリティの影響で逆 S 字の性状を示し, ケース C1 では軸ひずみの増大が抑えられていることが分かる。また, 有効応力経路よりケース C1 の内部摩擦角は砂試料のケース C0 に比べて大きくなっていることが分かる。

炭酸カルシウムの析出状況を確認するため, 走査型電子顕微鏡 (SEM) による分析を行った。分析には約 1 cm の試料片を用い, 十分に乾燥させてから SEM にセットした。SEM では試料に電子線を照射することによって生じる二次電子を計測し, 対象物の形状を評価した。さらに, 特性 X 線のエネルギー量から物質の成分を分析した。SEM の分析による炭酸カルシウム (CaCO₃) 析出状況を Photo 1 に示す。赤が砂粒子, 緑が炭酸カルシウム CaCO₃ で, (a) がケース C0 の砂試料, (b), (c) がケース C1 の固化試料である。SEM による分析結果より, CaCO₃ が砂粒子の周囲に析出して砂粒子同士を結合させている状況が分かる。また, 比較的大きな CaCO₃ 結晶が生じる場合と小さな結晶が生じる場合があることが分かった。

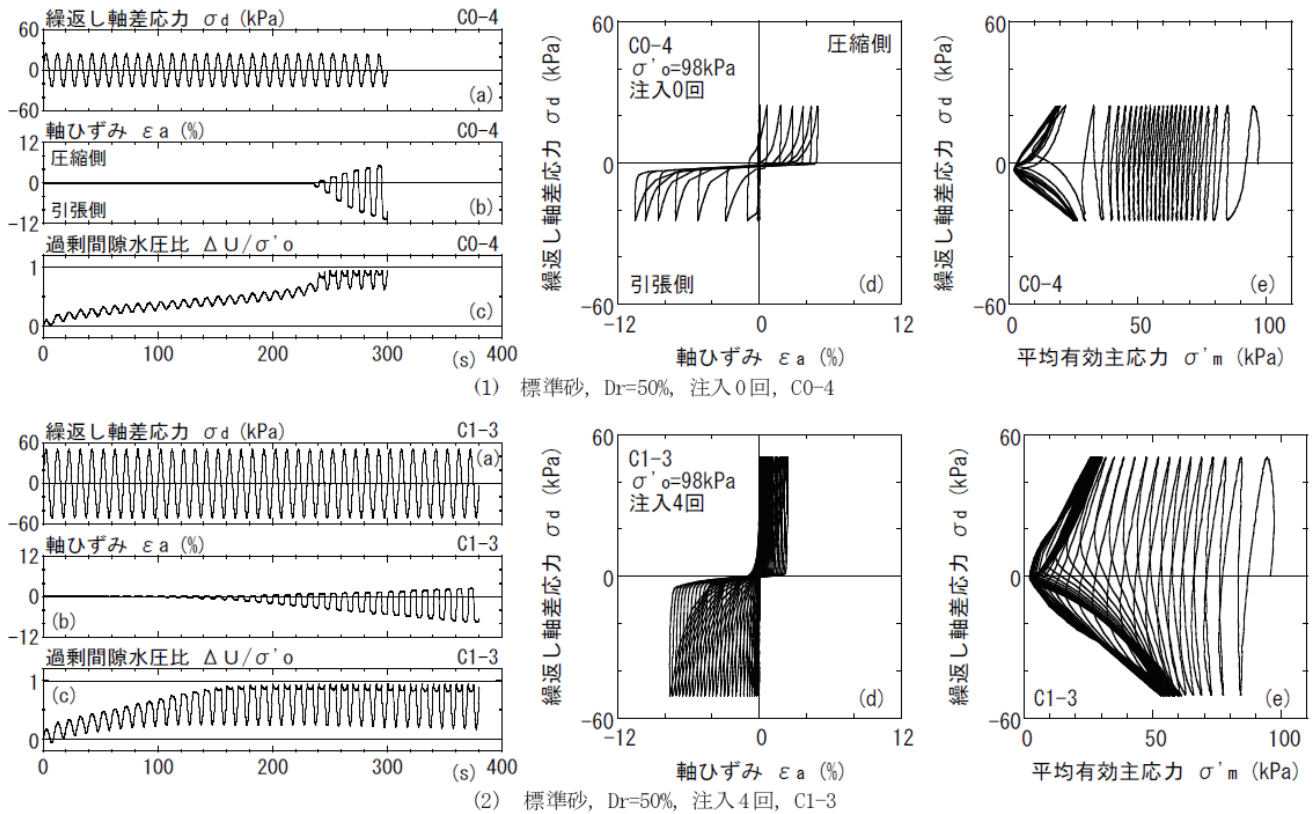


Fig.3 時刻歴、応力ひずみ関係と有効応力経路 (ケース C0, C1)
(Time History, Stress Strain Curve and Stress Pass)

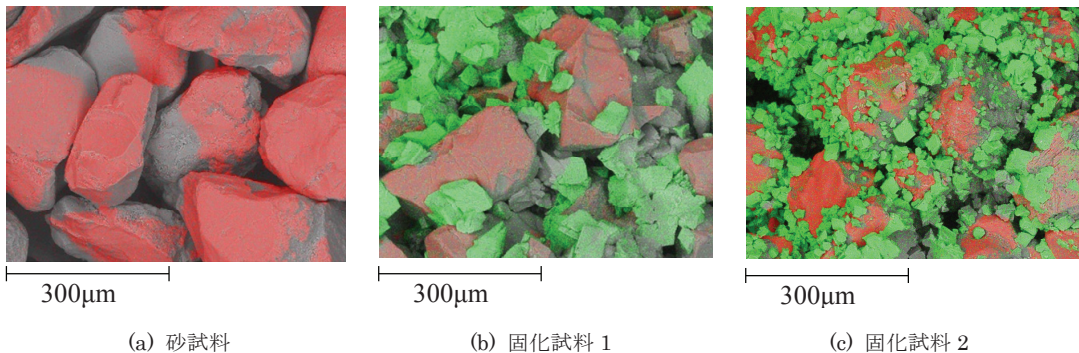


Photo 1 走査型電子顕微鏡 (SEM) による画像および元素分析結果 (赤: 砂粒子, 緑: 炭酸カルシウム)

(Results of Image and Elemental Analysis by SEM)

2. 注入回数の影響

注入回数 6 回の C2, 8 回の C3 の液状化試験結果の 1 例を Fig.4 に示す。図の並びは Fig.3 と同じである。両者共に、サイクリックモビリティの影響で過剰間隙水圧比が負圧になるまで減少し、軸ひずみが増加し難い密な砂の特性を示していることが分かる。

注入回数の違いによる液状化強度を Fig.5 に示す。図には、ケース C0 (破線) に対して約 2, 4, 6 倍に上昇したラインを併記している。ケース C0 の砂試料に比べて固化試料 C1~C3 の液状化強度は明らかに大きくなり、ケース C1 の繰返し回数 15 回における繰返しせん断応力比 ($R=0.31$) は砂試料であるケース C0 ($R=0.14$) の約 2 倍に上昇している。また、注入回数が増えるほど繰返し回数 15 回における液状化強度は上昇し、注入回数 6 回のケース C2 で約 4

倍、8 回のケース C3 で約 6 倍となっている。また、繰返し回数が少ないほど、液状化強度の上昇率が大きくなる傾向が認められる。

3. 注入間隔と養生期間の影響

注入間隔の違いによる液状化強度を Fig.6 に示す。注入間隔が約 1 週間毎のケース C1 に比べ、約 2 週間毎のケース C4 の液状化強度はわずかに大きくなる傾向が認められるもののその差は小さく、いずれも液状化強度は約 2 倍となった。

養生期間の違いによる液状化強度を Fig.7 に示す。養生期間が約 2 週間のケース C1 に比べ、約 4 週間のケース C5 の液状化強度は増加する傾向が明らかである。本試験の結果、養生期間が 2 週間の場合は 2 倍、4 週間では 4 倍まで上昇する。これは、養生期間 2 週間では間隙水中の炭酸カルシウムが析出しきらずに水溶液中に残って

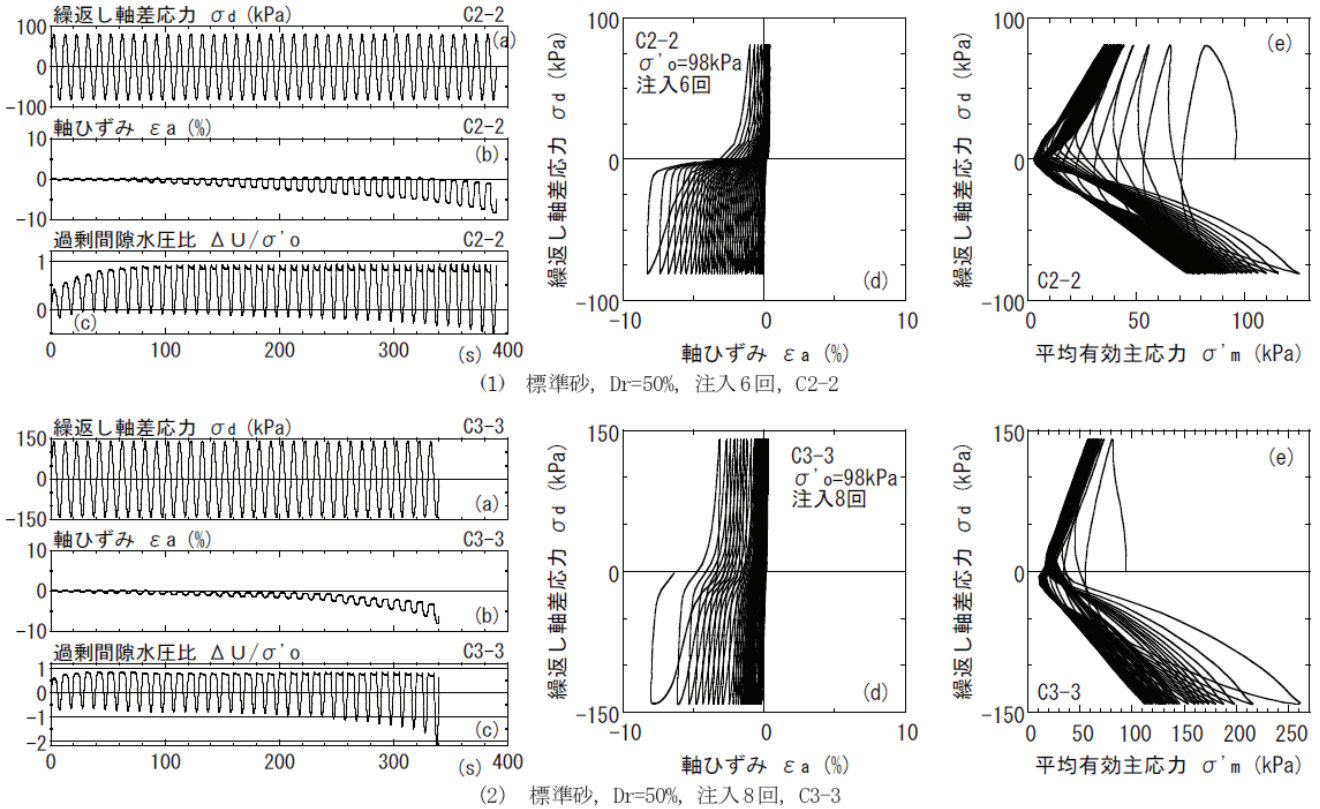


Fig.4 時刻歴, 応力ひずみ関係と有効応力経路 (ケース C2, C3)
(Time History, Stress Strain Curve and Stress Pass)

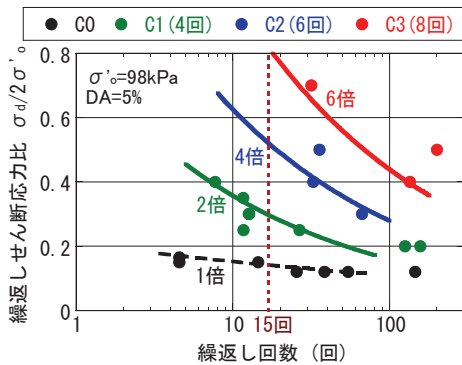


Fig.5 注入回数の違いによる液状化強度

(Liquefaction Resistance by Difference in the Grouting Times)

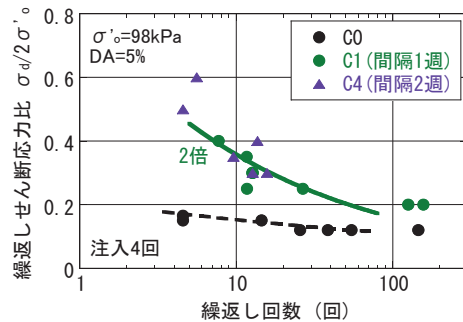


Fig.6 注入間隔の違いによる液状化強度

(Liquefaction Resistance by Difference in the Grouting Interval)

いるためと推測され, さらに長く養生すれば液状化強度が増加する可能性が指摘できる。

4. 前培養微生物の採取地点による影響

前述のとおり, 本研究では国内の実地盤への適用を考え, 国内の自然採取土から前培養した微生物を用いている。これまでは, 東京都臨海部で採取した砂から前培養した微生物を用いた。本節では, 全国 10 地点の採取砂から前培養した微生物を用いた固化試料の液状化試験結果について示す。

採取地点を Fig.8 に, 微生物採取地点毎の繰返し回数を Fig.9 に, 地点 A (ケース C1) と共に, 効果が大きかった地点 J, K の液状化試験結果の 1 例 (繰返し軸差応力 $\sigma_a=60\text{kPa}$) を Fig.10 に示す。

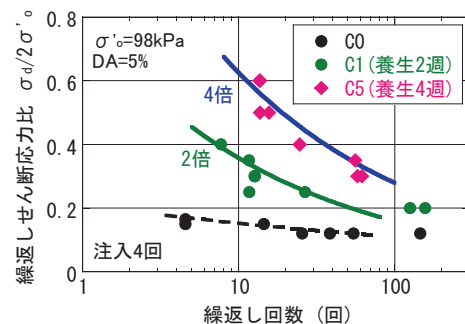


Fig.7 養生期間の違いによる液状化強度

(Liquefaction Resistance by Difference in the Curing Period)



Fig.8 微生物を採取した 11 地点
(11 Extraction Points of Bacteria)

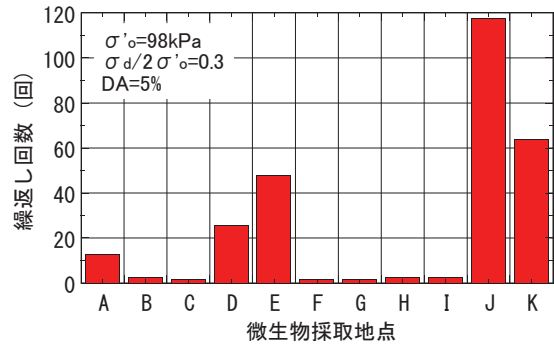
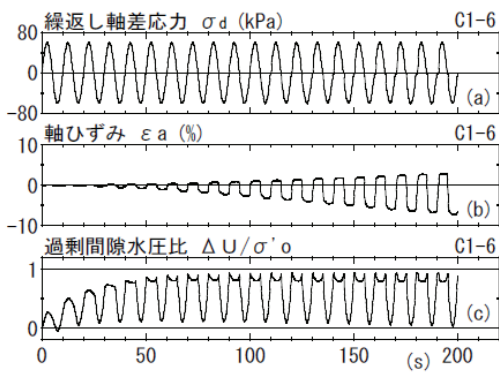
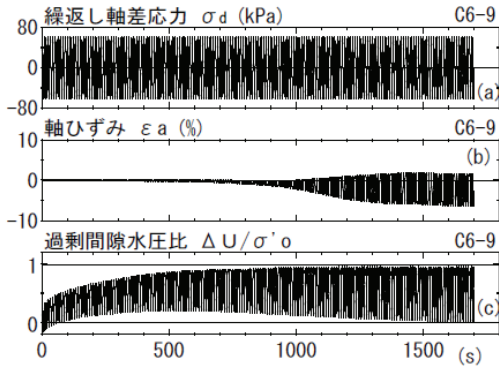
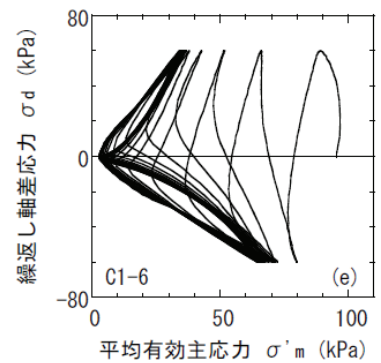
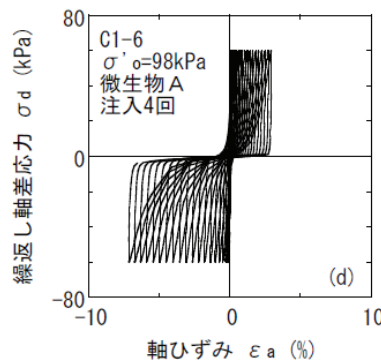


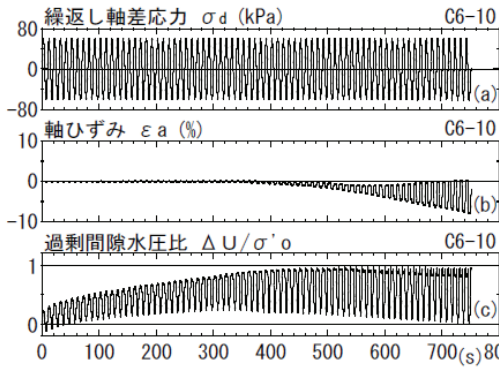
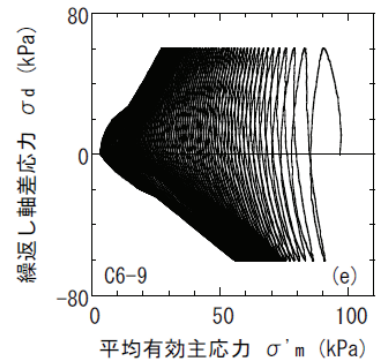
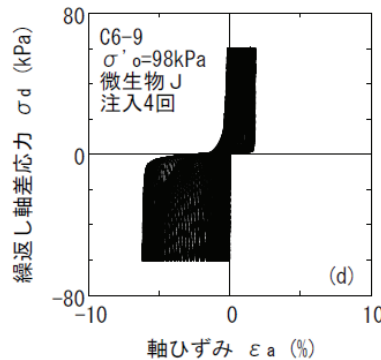
Fig.9 固化試料の繰返し回数の比較
(Comparison of the Number of Cycles)



(1) 標準砂, $Dr=50\%$, 微生物採取地点A, 注入4回, C1-6



(2) 標準砂, $Dr=50\%$, 微生物採取地点J, 注入4回, C4-9



(3) 標準砂, $Dr=50\%$, 微生物採取地点K, 注入4回, C4-10

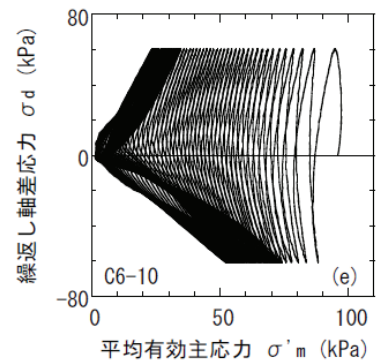
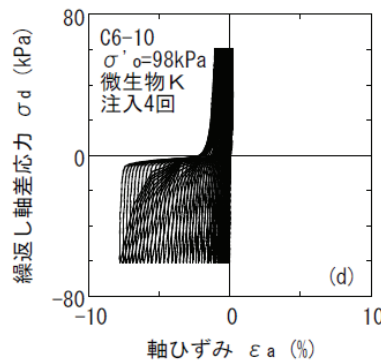


Fig.10 時刻歴, 応力ひずみ関係と有効応力経路 (ケース C2, C3)
(Time History, Stress Strain Curve and Stress Pass)

Fig.8に示したA地点はケースC0～C5に用いた東京都臨海部で、B～K地点は北海道から九州までを網羅している。固化試料の作製条件、液状化試験条件は基本ケースC1と全く同じで、約1週間毎に培養液を4回加え、約2週間養生した後、有効拘束圧98kPa、0.1Hzの正弦波で液状化試験を実施した。

Fig.9に示した液状化試験は、全て繰返し軸差応力 $\sigma_d=60\text{kPa}$ で行った。いずれの地点もケースC0に比べれば繰返し回数が増加しているが、地点D、E、J、Kでは地点Aより繰返し回数が増加し、東京都臨海部の微生物より改良効率の高い微生物が各所に存在する可能性が示唆された。

Fig.10の図の並びはFig.3と同じである。地点J、K共にFig.5に示した4倍のライン程度の液状化強度があるが、Fig.4のように過剰間隙水圧が極端な負圧になることはなく、強度が4倍に増加していても特性はやや異なっていると判断される。

以上の結果より、地点によって前培養される微生物が違いため液状化強度は異なるものの、試験を行った11地点全てで液状化強度が増加した。このことを確認できたことは、実用化に向けた第一歩と考えられる。

V. おわりに

国内の実地盤から採取した微生物の代謝を利用して砂地盤を固化した試料に対して、液状化強度試験を実施した。試験では、微生物の採取場所、培養液の注入回数や注入間隔及び養生期間等について検討を行い、それらが液状化強度に与える影響を分析した。また、走査型電子顕微鏡で元素分析を行った。得られた知見は以下のとおりであり、地盤改良工法としての可能性が示された。

- 固化試料作製時に微生物による尿素分解作用でアンモニアが生じるため、培養液を注入して3～4日間はpHが上昇し、1回目の注入では8.0を超え、その後、炭酸カルシウムの析出に伴いpHが低下した。
- 固化試料の応力ひずみ関係はサイクリックモビリティの影響で逆S字の性状を示し、固化試料のひずみの増大が抑えられていることを示した。また、応力経路より固化試料の内部摩擦角は砂試料に比べて大きくなることを確認した。

c. 走査型電子顕微鏡(SEM)による分析の結果、炭酸カルシウムが砂粒子の周囲に析出し砂粒子同士を結合させている状況を確認した。

d. 液状化強度は、培養液の注入回数4回で砂試料の2倍、6回で4倍、8回で6倍になること、注入間隔の影響は小さいこと、及び養生期間2週間で液状化強度が2倍、4週間で4倍になることが分かった。

e. 全国10地点の採取砂から前培養した微生物を用いて作製した固化試料の液状化試験より、いずれの地点でも繰返し回数が増加することが確認できたとともに、基本ケースに用いた東京都臨海部の微生物より効率の高い微生物が各所に存在する可能性が示唆された。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 基盤研究(B)「微生物代謝を利用した既存建物直下地盤の液状化対策の開発」(課題番号:26289198, 研究代表者:鈴木康嗣)の助成を受けたものです。

参考文献

- 川崎了ほか; 微生物の代謝活動により固化する新しいグラウトに関する基礎的研究, 応用地質, 第47巻, 第1号, 2006, pp.2-12.
- Whiffin, V. S., Van Paassen, A. L. and Harkes, M. P.; Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique, Geomicrobiology Journal, 24, 2007, pp.417-423.
- 稲垣由紀子ほか; 微生物代謝による液状化対策に関する動的遠心模型実験, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, 2011.5, pp.157-167.

Evaluating Liquefaction Resistance of Solidified Sand Specimen Using Microbial Ureolysis

Yasutsugu Suzuki, Kohji Koyamada¹⁾, Naohito Adachi, Takahiko Hidekawa and Yoshiyuki Ueno

For the purpose of improving liquefaction resistance using microbial metabolism living in soils which produces calcium carbonate, the authors conducted cyclic undrained triaxial tests on solidified sand specimen injected microbial culture that was enriched from soils in Japan and culture liquid containing calcium source repeatedly, and evaluated the liquefaction resistance of the sands. The results showed that: (1)The liquefaction resistance was increased two to six times by the methods using bacteria cultured from soils in Tokyo, at 30 degrees Celsius, and injecting culture liquid four through eight times; (2)From the tests using each bacteria cultured from ten sites in Japan, it was observed that all liquefaction resistances of the sands were increased; (3)Curing period was an important factor for increasing the liquefaction resistance; (4)It was confirmed that calcium carbonate was produced in soil voids and solidified soil grains by SEM(scanning electron microscope).