

微生物代謝を利用した原位置地盤の液状化強度評価

Evaluating Liquefaction Resistance in In-situ Ground Using Microbial Ureolysis

安達直人 秀川貴彦 鈴木康嗣
笠松健太郎 上野嘉之

要 約

筆者らは、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地盤改良について検討を進めている。本報では、本手法を原位置地盤に適用するための培地を検討するとともに、検討した培地を用いた注入固化試験により地盤の改良効果を検討した結果について報告する。得られた知見は以下のとおりである。1) 原位置地盤で適用する培地成分には、適切な濃度の塩化カルシウム、尿素、酵母エキスが最低限必要で、pH調整剤、増粘剤は固化効果には影響しない。2) 原位置地盤において培地による注入固化試験を実施し、目標量の培地を注入し、拡散、滞留させることができた。3) 常時微動計測による高振動数域のフーリエスペクトル比から固化分布の推定が可能である。4) 改良前後の地盤調査から地盤のN値、せん断波速度、液状化強度の増加を確認し、微生物代謝による地盤固化が原位置地盤で可能であることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 原位置地盤に適用する培地
- III. 原位置地盤における注入試験
- IV. 固化領域の推定と改良効果
- V. おわりに

I. はじめに

砂地盤の改良工法のひとつとして、微生物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手法が提案されている¹⁾。筆者らは、微生物代謝による地盤改良について、多数の国内採取土から得た微生物を用いた要素試験により地盤の固化効果を検討してきた^{2), 3)}。本報では、原位置地盤に適用する培地の検討とともに、原位置地盤での注入固化試験を行い、地盤の改良効果を検討した結果を報告する。

II. 原位置地盤に適用する培地

1. 要素試験の概要

要素試験における培養液の注入方法を Fig.1 に、培地成分(濃度 1 倍)を Table 1 に示す。地盤固化は、文献 1) を参考に微生物による尿素分解で生じた二酸化炭素を利用する

炭酸カルシウム析出法を用いた。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、原位置地盤⁴⁾から前培養した微生物の培養液と培地を混合した培養液をモールドの下端から注入し、恒温器(30℃)で養生した。培養液の注入回数は2回、養生期間は2週間とし、三軸試験装置に試料をセットするため、排水後に-25℃の冷凍庫で一晩凍結させて液状化試験を実施した。

培地は、文献 1) の分量(濃度 1 倍と規定)を基本とし、原位置地盤での適用を想定して、酵母エキスと増粘剤を追加した。培地成分は文献 1) のほか、低コスト化のための Nutrient Broth の代替となる酵母エキスと、改良対象層の地下水の流れが速い場合でも、培地を地中になるべく長い時間滞留させるための、環境負荷の少ないメチルセルロース系の増粘剤(水の2~3倍の粘性)とした。

試験ケースを Table 2 に示す。各ケースには、培地に含まれる成分を○印(濃度倍率 1 倍)とし、濃度倍率 1 倍以外は○印の後の()内に倍率を記した。C0 は未改良のケース、C8-1 は文献 1) の基準ケース、C8-2 は酵母エキスの検討ケースである。C8-3 および C9-1~C9-5 は、塩化カルシウムと尿素的濃度(0.5~3 倍)と、地中での拡散により希釈された場合

キーワード: 液状化, 微生物, 地盤改良, 炭酸カルシウム, 繰返し非排水三軸試験, 原位置試験

Keywords: liquefaction, bacteria, ground improvement, calcium carbonate, cyclic undrained triaxial test, in-site test

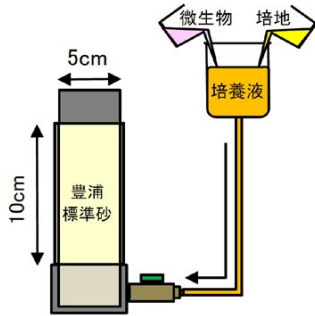


Fig.1 培養液の注入方法
(Injection Method of Culture Solution)

Table 1 培地成分 (1倍濃度)
(Composition of Medium (1×Concentration))

成分(濃度1倍)	分量(g/L)	文献 ¹⁾
塩化カルシウム水和物(CaCl ₂)	73.5	○
尿素((NH ₂) ₂ CO)	30.03	○
Nutrient Broth(NB)	3.0	○
酵母エキス	20.0	
pH調整剤	塩化アンモニウム(NH ₄ Cl)	10.0 ○
	炭酸水素ナトリウム(NaHCO ₃)	2.12 ○
増粘剤(メチルセルロース系)	2.0	

Table 2 試験ケース (網掛けは変動パラメタ)
(Test Cases)

ケース	培地成分の濃度(濃度倍率○:1倍 斜線無し)					増粘剤	検討内容
	塩化カルシウム	尿素	NB	酵母エキス	pH調整剤 NH ₄ Cl NaHCO ₃		
C0							未改良ケース
C8-1	○	○	○	○	○	○	基準ケース
C8-2	○	○	○	○	○	○	酵母エキスの影響
C8-3	○(3倍)	○	○	○	○	○	塩化カルシウム,尿素の濃度の影響
C8-4	○	○	○	○	○	○	pH調整剤の影響
C8-5	○	○	○	○	○	○	増粘剤の影響
C9-1	○(0.5倍)						塩化カルシウム,尿素の濃度の影響
C9-2	○						
C9-3	○(1.5倍)						
C9-4-1	○(2.0倍)			○			
C9-5-1	○(3.0倍)						
C9-4-2	○(2倍→1/2倍希釈)						希釈の影響
C9-5-2	○(3倍→1/3倍希釈)						

の炭酸カルシウムの析出効果の検討ケース, C8-4, C8-5 は pH 調整剤, 増粘剤の有無による影響の検討ケースである。

2. 培地成分の違いによる液状化強度

培地成分の違いによるケース (C8-1~C8-5) の pH 推移を Fig.2 に示す。塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの 3 倍とした以外のケース (C8-1,2,4,5) は, 微生物代謝による尿素の分解作用によりアンモニウムイオンが発生するため, 培養液を注入すると pH が上昇し, 炭酸カルシウムの析出に伴い pH が緩やかに低下するサイクルを繰り返している。一方,

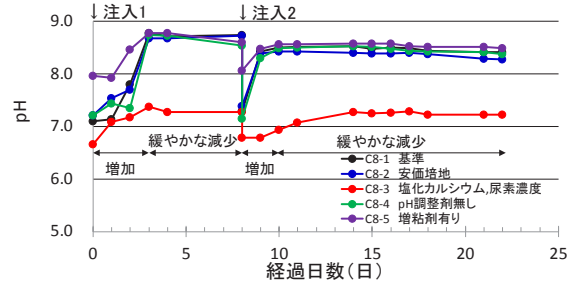


Fig.2 培地成分の違いによる pH 推移
(pH Transition by Difference in the Composition of Medium)

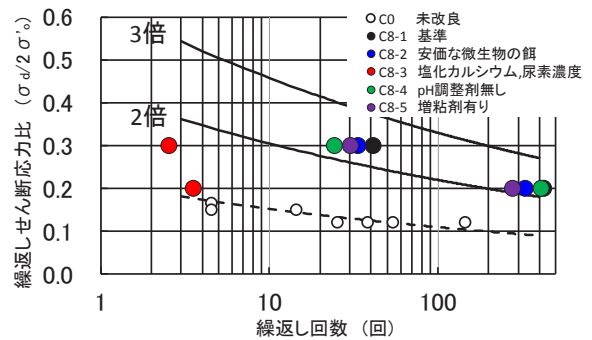


Fig.3 培地成分の違いによる液状化強度
(Liquefaction Resistance by Differences in the Composition of Medium)

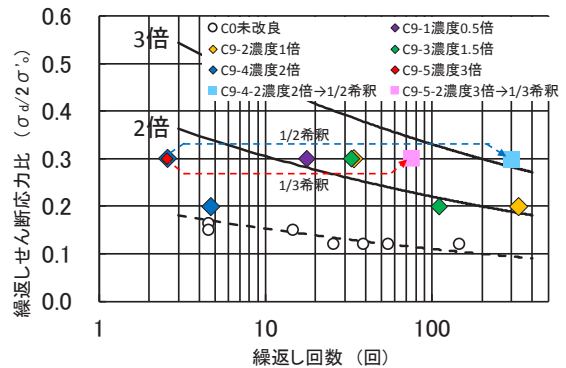


Fig.4 塩化カルシウム・尿素濃度の違いによる液状化強度
(Liquefaction Resistance by Differences of Calcium Chloride and Urea Concentration)

塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの 3 倍としたケース (C8-3) では, 培養液の注入で pH が若干上昇して緩やかに減少するサイクルを繰り返すが, ほかのケースに比較して pH の変動は小さい。

培地成分の違いによるケース (C8-1~C8-5) の液状化強度曲線を Fig.3 に示す。塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの 3 倍とした以外のケース (C8-1,2,4,5) では, 未改良ケース (C0) の 2~3 倍の液状化強度となり, 酵母エキス, pH 調整剤, 増粘剤は固化効果には影響しない。一方, 塩化カル

シウムと尿素の濃度を基準ケースの3倍としたケース(C8-3)では、未改良ケース(C0)と同等の液状化強度であり、改良効果がほとんど無いことが分かる。

3. 塩化カルシウムと尿素の濃度の違いによる液状化強度

塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの0.5~3倍に変動させた検討を行った。塩化カルシウムと尿素の濃度の違いによるケース(C9-1~C9-5)、および塩化カルシウムと尿素の液を希釈したケースの液状化強度曲線をFig.4に示す。濃度が0.5~1.5倍までのケースでは、未改良のケース(C0)の2~3倍の液状化強度となり、改良効果が確認できる。一方、濃度が2,3倍のケースでは、Fig.3同様に改良効果がほとんど無い。高濃度の塩化カルシウムと尿素では液状化強度が増加するわけではなく、培地成分に適切な濃度があり、この結果は文献1)と整合する。一方、濃度が2,3倍のケースをそれぞれ1/2, 1/3倍に希釈したケース(C9-4-2, C9-5-2)では、濃度が0.5~1.5倍のケースと同等の改良効果が認められる。このことは、塩化カルシウムと尿素が高濃度の培地でも、地中で拡散して濃度が希釈されることで地盤改良効果が見込めると考えられる。

上記の検討から原位置地盤で適用する培地成分には、適切な濃度の塩化カルシウム、尿素、酵母エキスが最低限必要で、pH調整剤、増粘剤は固化効果には影響しない。

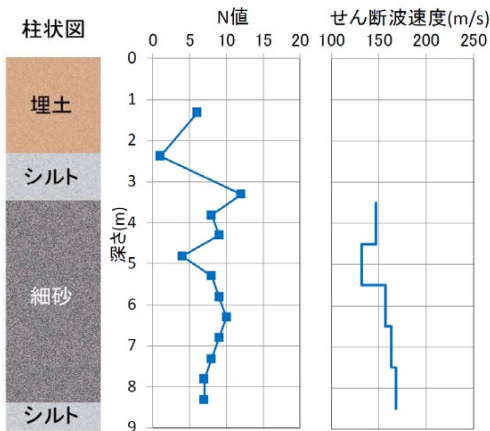


Fig.5 柱状図, N値およびPS検層結果
(Result of Soil Boring log, N Value and PS Logging)

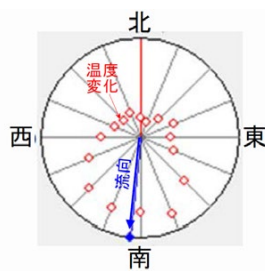


Fig.6 流向試験結果
(Result of Groundwater Flow Direction and Flow Rate)

III. 原位置地盤における注入試験

1. 地盤概要

原位置試験の対象地盤の土質柱状図, N値およびPS検層結果をFig.5に示す。対象地盤は、地表から埋土, シルト, 細砂, シルトの構成であり, G.L.-3.4m~8.5mの細砂層ではN値10以下, せん断波速度 $V_s=132\sim168\text{m/s}$ であり, 液状化の可能性(液状化層5.1m)と考えられる。細砂層の透水係数は現場透水試験より $k=1.75\times 10^{-3}\text{cm/s}$ で比較的透水性の高い地盤である。また, Fig.6に示す地下水の流向試験から流向は北からほぼ南であり, 流速試験から流速は約 $0.037\sim0.041\text{cm/min}$ ($53\sim59\text{cm/日}$) であり, 比較的流れの速い層であることを確認した。

2. 試験計画

試験では、はじめに水頭差のみでの注入が可能かを確認するために、食塩水による事前注入試験を行い、その後培地による注入固化試験を実施した。また、注入固化試験から5か月後に地盤の固化分布を推定するために常時微動計測を行い、9か月後に改良効果の確認のための地盤調査を実施した。

注入試験の概要図をFig.7に示す。確認注入試験では、事前の地盤調査結果を考慮して、注入孔を中心に観測孔を東西および南に1m離れた3地点に配置した。注入孔にはウエルポイントロッドを挿入し、注入深度を細砂層のG.L.-3.4m~

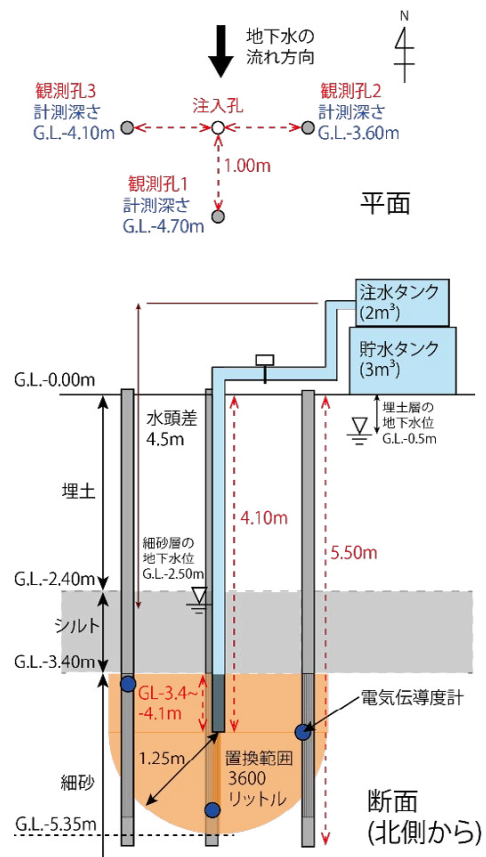


Fig.7 注入試験の概要
(Outline of Injection Test)

G.L.-4.1m とした。注入は水頭差 (4.5m) のみで行った。観測孔には、G.L.-3.4m~G.L.-4.9m にスリット (1.5m) のある塩ビ管を挿入した。観測孔には、注入中および注入後の採水による pH 等の測定と、食塩水の電解質濃度を測定するために電気伝導度計を 3 深度に設置した。食塩水は、主にウェルポイントロッドの先端から球状に排出され、Fig.7 に示すように拡散・滞留することを想定した。目標注入量は、注入孔から半径 1.25m, G.L.-3.4m~G.L.-5.35m の範囲の間隙 (間隙率 $n=0.5$ を仮定) の地下水を置換するために必要な体積から約 3600 ℓ とした。

注入固化試験では、原位置地盤の採取土から前培養した微生物を事前に注入し、その後培地を注入した。培地には、塩化カルシウム、尿素および酵母エキスと、地中に拡散・滞留させるために増粘剤 (水の粘性の 2~3 倍) を付与した。注入量の減少が予想されたため、観測孔 2 を変更して注入孔を 2 カ所とした。貯水と注水タンクは、培地の温度 30~35 度を維持するために断熱材を貼り付けて保温した。注入した培地の拡散・滞留の確認には、観測孔 1 に電気伝導度計 (観測孔 1 の G.L.-3.6, 4.1, 4.7m の計 3 カ所) を設置した。培地は、比重 (1.3) と地下水の流れにより、地盤深部への沈降と、広範囲への拡散による希釈の効果を考慮して、濃度を 3 倍とした塩化カルシウムと尿素を使用した。

3. 事前注入試験

濃度 0.5% の食塩水 (温度 15 度) による注入量と時間の関係を Fig.8 に示す。注入は、流量メーターにより毎分の流量を注入開始から 9 時間まで計測し、その後も残りの食塩水を流し続けた。注入量は 5 ℓ /分で安定しており、9 時間で約 2700 ℓ が注入された。その後も 5 ℓ /分の注入量であったと仮定すると、最終的に 13 時間で目標注入量以上の 3750 ℓ となり、自然水頭差のみで注入可能であることを確認した。

食塩水による電気伝導度・地下水温度と時間の関係を Fig.9 に示す。観測位置・深度により電気伝導度の増加傾向に違いが見られた。注入孔の南側で地下水の流れ方向に位置する観測孔 1 (G.L.-4.7m) では注入開始から約 1 時間後には急激に電気伝導度の上昇が始まり 3 時間後には濃度 0.5% 近くまで達しており、食塩水に置換されたと考えられる。また、注入孔の東側の観測孔 2 (G.L.-3.6m) でも注入開始から 8 時間後には濃度 0.4% を超え、概ね食塩水に置換されたと考えられる。一方、注入孔の西側の観測孔 3 (G.L.-4.1m) では、注入開始から電気伝導度の上昇が小さく、濃度分布に違いが見られた。また、各観測孔の電気伝導度の値から、注入終了後の濃度低下は小さく、ある程度の時間は滞留していると考えられる。地下水温度では、常時の地下水の温度が 18.5~19 度に対して食塩水の温度は 15 度であったため、食塩水の拡散と連動して観測孔での地下水の温度が低下する傾向が見られた。また、注入終了後では、観測孔 1, 2 の地下水温度が上

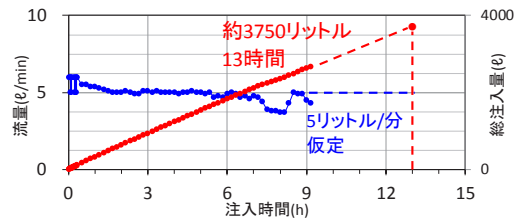


Fig.8 食塩水による注入量と時間の関係
(Relationship between Injection Volume and Time using Saline Solution)

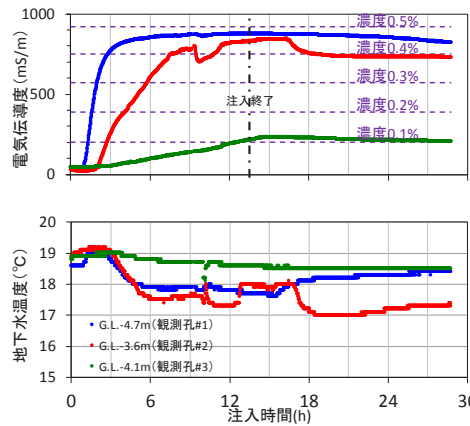


Fig.9 食塩水による電気伝導度
・地下水温度と時間の関係
(Relationships between Electrical Conductivity, Groundwater Temperature and Time using Saline Solution)

昇する傾向が見られるが、その上昇は緩やかで、ある程度の時間は滞留していると考えられる。

4. 注入固化試験

培地による注入量・電気伝導度・地下水温度と時間の関係を Fig.10 に示す。目標の 3600 ℓ を約 5 日間で注入し、それを 2 回繰り返した。平均注入量は 0.5~1.0 ℓ /分となり、事前の食塩水の場合 (5 ℓ /分) と比較して注入量が大きく減少する結果となった。これは増粘剤による粘性の影響や注入資材の不純物等による注入孔や地盤の目詰まりが原因と考えられる。電気伝導度の値は深い位置ほど高くなり、食塩水による結果と整合する。G.L.-4.7m では 1 回目の注入で所定の培地の半分程度の濃度に、2 回目で概ね所定の培地の濃度になり、その後、徐々に低下するが十分に地中に滞留している。地下水温度は、注入開始時の 18 度から上昇するが、19~21 度程度までしか上昇していない。

注入試験後の観測孔内水の pH 定期計測結果を Fig.11 に示す。注入前の地下水は pH7.2 である。注入試験終了直後では尿素分解により pH8.3 に上昇するが、徐々に低下して約 3 か月後には注入前の pH に近づき反応が収束している。

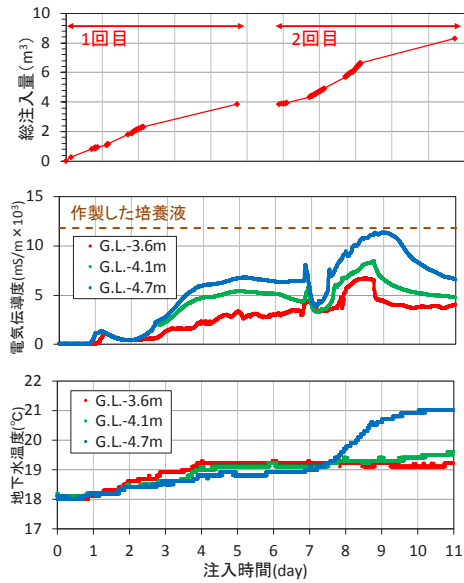


Fig.10 注入量・電気伝導度・地下水温度と注入時間の関係 (Relationships between Injection Volume, Electrical Conductivity, Groundwater Temperature and Time)

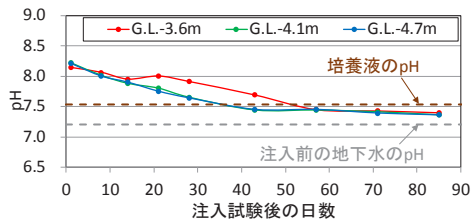


Fig.11 注入試験後の pH の推移 (観測孔 1) (Transition of pH after Injection Test (Observation Well 1))

IV. 固化領域の推定と改良効果

1. 常時微動計測による固化分布の推定

Fig.12 に常時微動計測による計測位置とフーリエスペクトル比を示す。注入孔と観測孔の近辺は 1m 間隔、その周辺は 2m 間隔に速度計を設置し、鉛直方向の常時微動を計測した。計測では、データ長 163.84s (サンプリング周波数 200Hz) の常時微動記録を 80 フレーム取得した。フーリエスペクトル比はアンサンブル平均より算出し、基準点は計測位置の最西側とした。注入孔から離れた位置 (地点 a) と基準点のフーリエスペクトル比では、0~50Hz の振動数で振幅比が概ね 1 倍に近い結果である。それに対して、注入孔に近い位置 (地点 b) では、0~30Hz の振動数では振幅比が概ね 1 倍であるが、高振動数域 (特に 30~50Hz) では、振幅比が 1 倍より下回る傾向にある。これは、微生物代謝により地盤が固化して剛性が増加したためと考えられる⁵⁾。各計測点のフーリエスペクトル比より、高振動数域で振幅比が小さくなる計測位置

を囲うと Fig.12 の赤線の領域となり、この領域で地盤が固化したと推定される。そこで、事後の地盤調査は赤線枠内を対象とした。

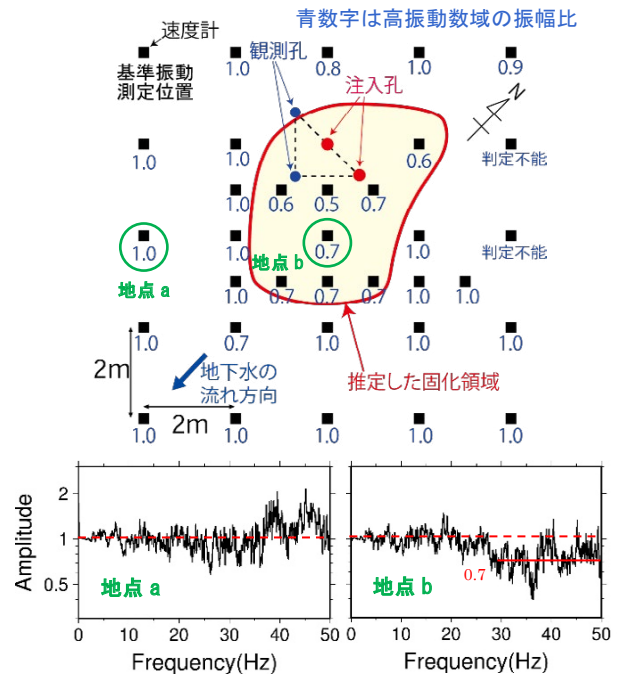


Fig.12 常時微動計測位置とフーリエスペクトル比 (Micromotion Measurement Position and Fourier Spectrum Ratio)

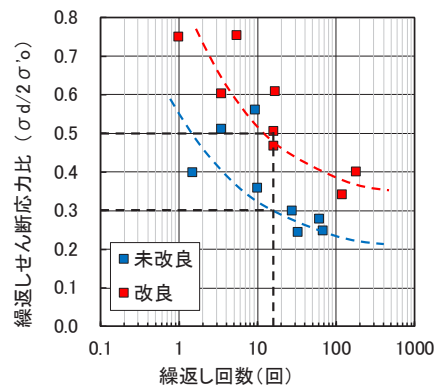
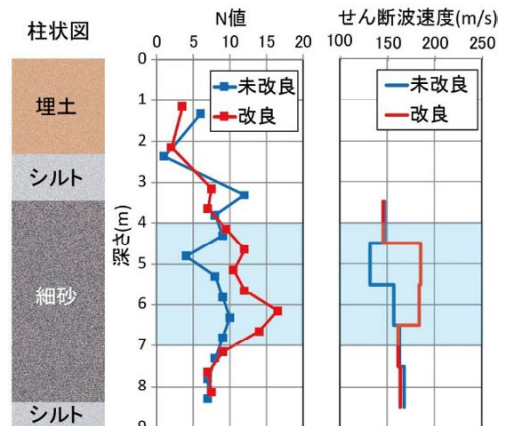


Fig.13 地盤改良効果 (Ground Improvement Effect)

2. 改良効果の確認

常時微動計測結果をもとに、改良効果の確認のための地盤調査を実施した。改良前後に得られた N 値、せん断波速度、液状化強度の結果を Fig.13 に示す。G.L.-4.0~7.0m では、未改良で N 値 10 以下であったのに対して改良では 10~16 に増加している。また、せん断波速度も $V_s=132\sim168\text{m/s}$ から 180m/s に増加している。液状化強度は未改良では繰返しせん断応力比が 0.3 (繰返し回数 $N=15$) であったが、改良後は 0.5 となり、地盤が固化して液状化強度の増加が確認できる。地盤固化が地盤深部や広範囲で確認されたことは、培養液の比重と地下水の流れによる拡散の影響と考えられる。

V. おわりに

微生物代謝による地盤改良について、原位置地盤に適用する培地、固化注入試験、常時微動計測による固化領域の推定と改良効果の確認から以下の知見を取得した。

- 原位置地盤で適用する培地成分には、適切な濃度の塩化カルシウム、尿素、酵母エキスが最低限必要で、pH 調整剤、増粘剤は固化効果には影響しない。
- 原位置地盤で培地による固化注入試験を行い、目標量の培地を注入し、拡散、滞留を確認した。
- 常時微動計測による高振動数域のフーリエスペクトル比から固化分布の推定が可能である。
- 改良前後の地盤調査から地盤の N 値、せん断波速度、

液状化強度の増加を確認し、微生物代謝による地盤固化が原位置地盤で可能であることを確認した。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 基盤研究(B)「微生物と地下水の流れを利用した液状化対策の開発」(課題番号：17H03348, 研究代表者：鈴木康嗣)の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 稲垣由紀子；微生物代謝により固化した砂の強度向上と液状化対策に関する実験的研究，北海道大学学位論文，2014.
- 2) 鈴木康嗣ほか；微生物代謝を利用した固化砂地盤の液状化強度評価，鹿島技術研究所年報，第 63 号，2015. 11, pp. 25-30.
- 3) 安達直人ほか；微生物代謝により固化した砂試料の液状化強度，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I，2016. 8, pp. 511-512.
- 4) 安達直人ほか；微生物代謝による液状化対策のための注入固化試験，第 54 回地盤工学研究発表会，2019. 7, pp. 2029-2032.
- 5) 笠松ほか；屈折法地震探査データを用いた波形逆解析による表層地盤の 2 次元 S 波速度構造の推定，物理探査学会第 137 回学術講演会論文集，2017. 11, pp. 61-62.

Evaluating Liquefaction Resistance in In-situ Ground Using Microbial Ureolysis

*Naohito Adachi, Takahiko Hidekawa, Yasutsugu Suzuki,
Kentaro Kasamatsu and Yoshiyuki Ueno*

The authors have been studying ground improvement to precipitate calcium carbonate using microbial metabolism and to increase the liquefaction resistance. In this study, we examined the culture solution in order to apply this method to in-situ ground, and carried out an injection solidification test in the in-situ ground to confirm the ground improvement effect. The results showed that: (1) the composition of culture medium applied in the in-situ ground requires at least calcium chloride, urea and yeast extract, and it is considered necessary to adjust the concentration and use of thickener depending on the ground conditions and injection method; (2) the culture medium could be injected, diffused and retained in the in-situ ground; (3) it is possible to estimate the solidification distribution from the Fourier spectrum ratio in the high-frequency range by microtremor measurement; and (4) the increase of N value, shear wave velocity and liquefaction resistance of the ground was confirmed from a ground survey, thus showing that ground solidification by microbial metabolism is applicable in in-situ ground.