

# 微生物代謝を利用した砂の液状化対策効果

稲垣由紀子\* 塚本将康\*\* 森 啓年\*\*\* 中島 進\*\*\*\* 佐々木哲也\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

我が国の社会資本は高度経済成長期を中心に大量に整備・蓄積されてきたが、近年はその維持管理・更新費が増加しており、既設構造物をどのように維持管理・補修・補強していくかが課題となっている。

併せて、社会的に温室効果ガス排出の削減も求められる中、建設分野では、環境負荷の少ない建設資材を適用条件を考慮して使用することなども求められる。

これらを踏まえると、地盤改良技術としては、既設構造物を解体せずにその基礎地盤を補修・補強することができ、改良材製造時や改良施工時に温室効果ガス排出が少ない技術などが必要と考えられる。

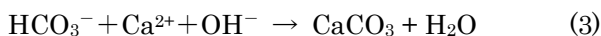
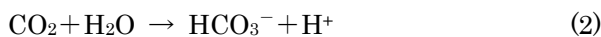
近年研究開発が進められている微生物代謝を利用した地盤改良技術は、効果の発現（固化の進展）が比較的緩やかで、注入材の拡散による広範囲にわたる改良が可能のため、離れた地点からの施工で既設構造物直下の改良に適用することも期待される。また、改良材製造時の温室効果ガスの発生が少なく、次世代の地盤改良技術として期待される。

そこで、微生物代謝を利用して砂を固化した場合の補強効果（強度向上、液状化対策）を確認するため、三軸圧縮試験および動的遠心模型実験を行った。

## 2. 研究の手法

本研究では、微生物代謝を利用した地盤改良技術の1つである、炭酸カルシウム法に着目した。

炭酸カルシウム法は、微生物代謝による二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)と土の間隙中のカルシウム源から炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)を析出させて土粒子同士を接合し、土を固化させる技術である<sup>1)</sup>。CaCO<sub>3</sub>は、微生物の呼吸のほか、尿素分解作用により発生させたCO<sub>2</sub>を用い、以下に示すような化学反応で析出させることができる。



微生物は、既往の研究より化学反応式(1)に示すよ

うな尿素(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)分解作用が活発で、CaCO<sub>3</sub>を析出させるのに有効とされている“*Sporosarcina Pasteurii*”（スポロサルシナ パストゥーリ：米国最大の生物資源バンクにATCC11859番で登録されている微生物。以下、「微生物」と表記<sup>2)</sup>）を培養液の状態<sup>3)</sup>で用いた。培養液は、微生物に適した組成の溶液中で微生物を活性化させたものである。

## 3. 三軸圧縮試験による強度向上効果の確認

### 3.1 目的

炭酸カルシウム法により砂を固化させた場合の強度向上効果を確認するため、三軸圧縮試験(CD試験)を実施し、供試体中のCaCO<sub>3</sub>析出量と圧縮強さの関係を調べた。

### 3.2 供試体作製

豊浦砂を試料土とし、モールド内に供試体を作製した(図-1)。空中落下法により豊浦砂を投入後、フィルター層の直下より、蒸留水を浸透させて豊浦砂を浸水させた。その後、培養液250mLをモールド上部より注入した。次に、カルシウム源の供給と微生物の尿素分解作用の活性化を目的とした栄養塩の注入を1日1回、24時間間隔で200mLずつ、所定回数行い、豊浦砂を固化させた。モールド内の豊浦砂は飽和状態を維持し、次回栄養塩等が注入されると、前回までに注入されて間隙に存在していた栄養塩等が排出されるしくみとした。所定回数の栄養塩注入が終了して1日後に、蒸留水を注入して供試体中の栄養塩の成分を洗い流し、モールドのまま供試体を凍結保管した。三軸圧縮試験実施前に供試体をモールドから取り出し、直径50mm、高さ100mmに成形した。

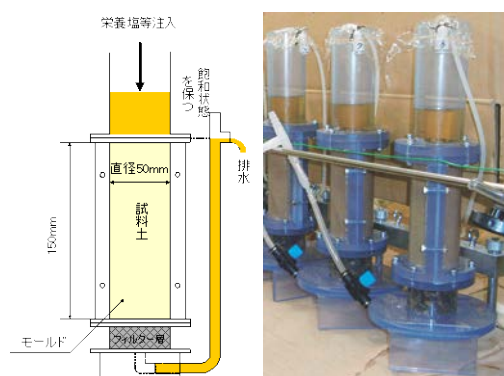


図-1 供試体作製状況

CaCO<sub>3</sub>析出量が強度に与える影響を調べるため、豊浦砂を蒸留水で飽和したのみの供試体と、栄養塩の注入回数が1, 2, 4, 7回の供試体を3本ずつ作製した。

### 3.3 三軸圧縮試験 (CD試験)

各供試体について、三軸圧縮試験 (CD試験) を行った。

供試体は全て凍結状態で速やかにセル内に設置し、二重負圧法により、約500mLの脱気水を通水して飽和、解凍させた。その後、背圧を200kPaまで上昇させ、有効拘束圧  $\sigma'_c = 50, 100, 200\text{kPa}$  で等方圧密し、ひずみ速度0.5%/minで軸圧縮を行った。

### 3.4 供試体中の炭酸カルシウム析出比の確認

三軸圧縮試験 (CD試験) が終了し、供試体の乾燥質量を測定した後、供試体を砕いて混ぜ合わせた土の中から100g程度を抽出し、その中に析出したCaCO<sub>3</sub>の質量を以下の手順で調べた。

抽出した土の炉乾燥後の質量  $m_1$  を測定し、この中に析出したCaCO<sub>3</sub>を0.5mol/Lの塩酸で分解・溶出させて再び炉乾燥した後の土の質量  $m_2$  を測定した。この間に減少する土の質量 ( $m_1 - m_2$ ) をCaCO<sub>3</sub>析出量とした。土のみの質量  $m_2$  に対するCaCO<sub>3</sub>析出量の比 (以下、CaCO<sub>3</sub>析出比) を求めた。

### 3.5 CaCO<sub>3</sub>析出比と圧縮強さの関係

栄養塩の注入回数別に、3.4で求めたCaCO<sub>3</sub>析出比と圧縮強さの関係を図-2に示す。栄養塩を1回注入したのみの供試体では、CaCO<sub>3</sub>析出比が1%未満にとどまり、圧縮強さの改善は見られなかった。栄養塩を2回以上注入した場合には、CaCO<sub>3</sub>析出比が2~8%程度に達し、圧縮強さも注入回数が1回の場合に対して1.1~2.8倍程度まで増加した。CaCO<sub>3</sub>析出比や圧縮強さは栄養塩の注入回数に伴って増加した。

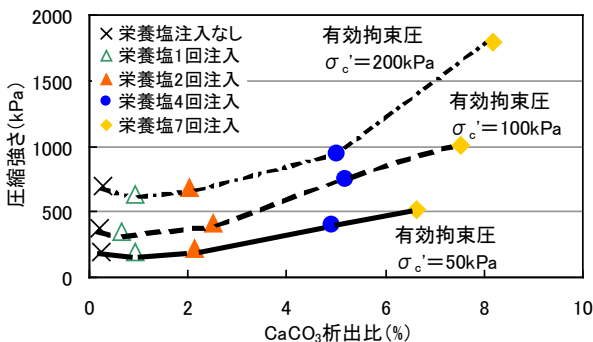


図-2 CaCO<sub>3</sub>析出比と圧縮強さの関係

## 4. 動的遠心模型実験による液状化対策効果確認

### 4.1 目的

炭酸カルシウム法により固化させた土の液状化対策としての効果を確認するため、動的遠心模型実験を行った。

### 4.2 模型地盤作製

液状化対策として既設の埋設管の周辺を固化する場合を模擬し、縮尺1/30、試料土を豊浦砂 (最大乾燥密度  $\rho_{dmax} = 1.645\text{g/cm}^3$ 、最小乾燥密度  $\rho_{dmin} = 1.333\text{g/cm}^3$ ) として図-3に示すような模型地盤を作製した。土槽内を鋼版で仕切った中央に固化をしない無対策の地盤 (Case1)、両側は炭酸カルシウム法により固化させた地盤 (Case2およびCase3) を作製した。

Case2およびCase3については、それぞれ、5Lの蒸留水で地盤を飽和させ、培養液5Lを注入して間隙全体に微生物を存在させた後、3.2で用いたものと同じ栄養塩を1日1回、5Lずつ、所定回数注入した。所定回数の栄養塩注入が終了して1日後には、蒸留水を注入して栄養塩の成分を洗い流した。栄養塩等は、土槽中央寄りの注入タンクから注入し、土槽の壁際の排水タンクへ向けて流した。注入タンクと排水タンクの水位差を1cmに保ち、新たな栄養塩等の注入により、前回までに注入された栄養塩等を排水タンク側に排出した。Case2、Case3の栄養塩の成分の洗い流し、脱水後、真空状態において、模型地盤全体を水の30倍の粘性に調製したメチルセルロース水溶液により飽和させた。地下水位は各Caseとも、地表面に設定した。

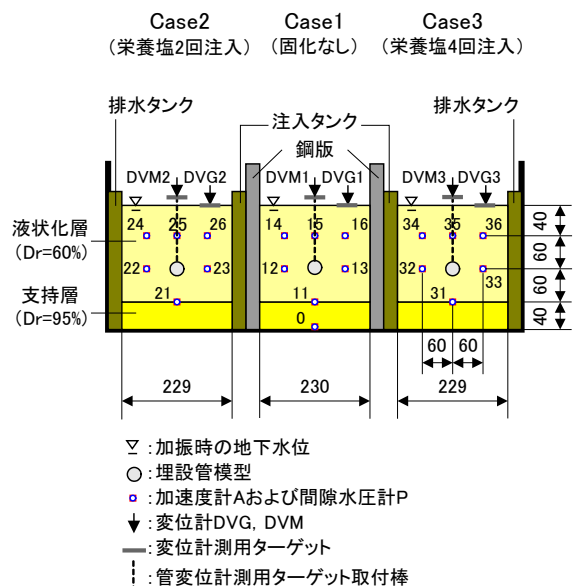


図-3 模型地盤 (模型寸法、単位: mm)

Case2とCase3では、CaCO<sub>3</sub>析出比による液状化対策効果の違いを調べるため、栄養塩の注入回数を変えた。図-2より、CaCO<sub>3</sub>析出比や強度特性の違いが見られた2種類を設定し、Case2では2回、Case3では4回とした。

#### 4.3 加振条件

模型地盤を遠心加速度30G場で周波数2Hzの正弦波20波を入力し、2段階で加振した。Step1加振では最大加速度の平均が約350cm/s<sup>2</sup>の波形、Step2加振では、最大加速度のピークが約570 cm/s<sup>2</sup>の波形を入力した。

#### 4.4 模型地盤中の炭酸カルシウム析出状況

Step2加振終了後、Case2とCase3の各模型地盤内のCaCO<sub>3</sub>析出比の分布を調べた。

模型地盤を1辺5cm以内の直方体のブロックに区切り、3.4と同様の方法でCaCO<sub>3</sub>析出比を求めた。土槽奥行き方向にはCaCO<sub>3</sub>析出比のばらつきが0.2~0.3%以内であった。奥行き方向の平均値を各ブロックの中心におけるCaCO<sub>3</sub>析出比とみなしてCaCO<sub>3</sub>析出比の等高線図を描くと、図-4に示すような分布となった。

CaCO<sub>3</sub>析出比は、Case2では2~5%程度、Case3では4~10%程度であった。それぞれ、多くの部分で図-2に示す栄養塩2回注入のCaCO<sub>3</sub>析出比（約2%）、4回

注入のCaCO<sub>3</sub>析出比（約5%）に達しており、これらと同等以上の強度特性を有したと考えられる。

#### 4.5 透水性の変化

Case2とCase3では、毎回の栄養塩等の注入時に模型地盤の見かけの透水係数の変化を調べた。

見かけの透水係数は、模型地盤全体で一様と仮定し、注入タンクと排水タンクの水位差、排水タンクからの栄養塩等の時間当たり排水量を用いて算出した。

蒸留水で模型地盤を飽和させた時点を目安とし、経過時間に伴う見かけの透水係数の変化は図-5に示すとおり、1桁未満にとどまった。

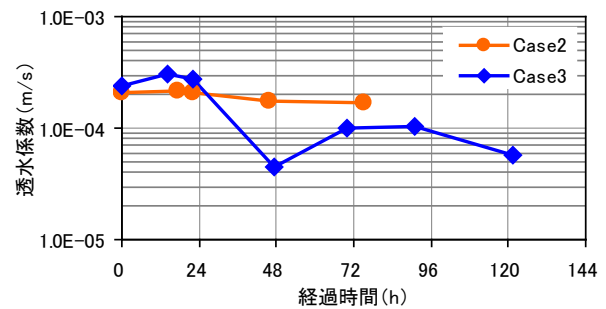


図-5 固化させた模型地盤の透水係数の変化

#### 4.6 動的遠心模型実験結果

##### 4.6.1 模型地盤の変形および埋設管の浮上がり

加振による模型地盤の変状の様子を目視で観察した。写真-1は、Step2 加振後の様子である。無対策のCase1では、液状化による管付近の地盤の沈下や、管の浮上がりが顕著に見られた。固化したCase2では、

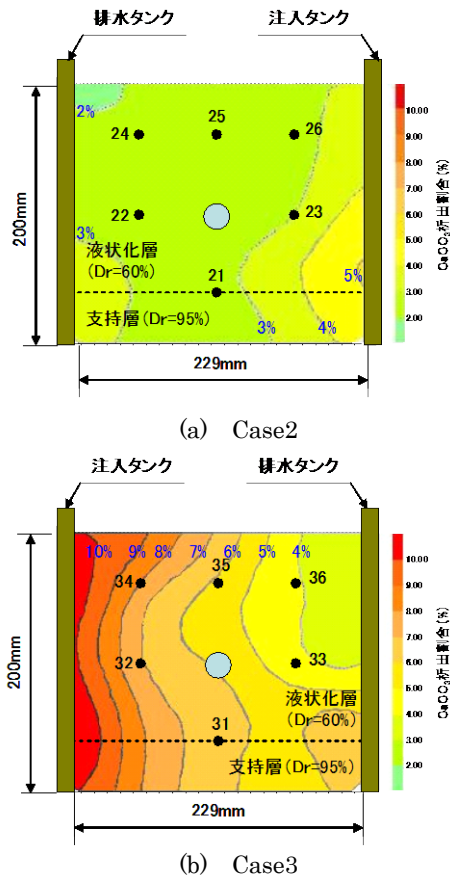


図-4 CaCO<sub>3</sub>析出比分布（模型寸法、単位：mm）

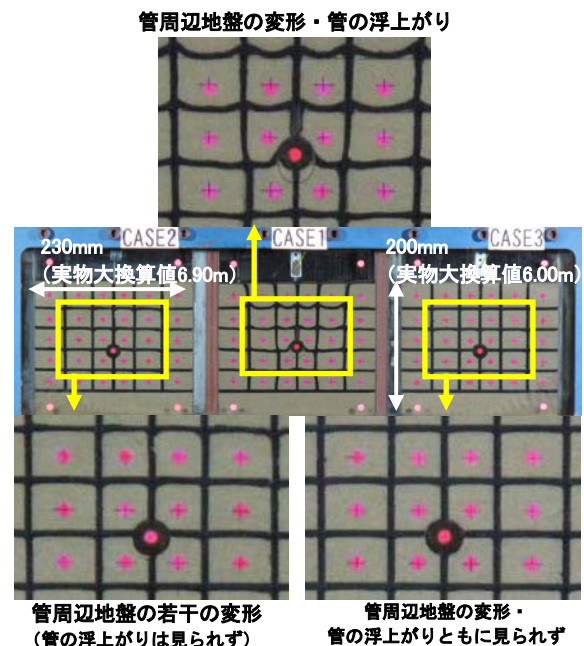


写真-1 加振による模型地盤の変状の様子

管付近で地盤の若干の変形が観察されるにとどまった。Case3では変形が見られなかった。

管の浮上がりの残留値からも、Case2やCase3では、Step2加振後においても埋設管の浮上がりが見られなかった。地表面の残留沈下量については、Case2ではCase1の半分以下、Step2加振後の実物大換算値で10cm以内であった。Case3では、Step2加振後も地表面の残留沈下が生じなかった。

#### 4.6.2 地盤中の過剰間隙水圧の変化について

各Caseの過剰間隙水圧消散の経時変化の例として、管上、深さ1.2mでのStep1加振時の結果を図-6に示す。

Case1、Case2、Case3の順に過剰間隙水圧の上昇が大きく、過剰間隙水圧が消散するのにも長い時間を要した。液状化に至っていると考えられるCase1では加振後も過剰間隙水圧の上昇した状態が続き、消散するまでに150s程度を要したが、Case2やCase3では50s程度経過した際には過剰間隙水圧は消散していた。過剰間隙水圧の上昇や消散について、Step1加振時での他の計測位置やStep2加振時でも同様の傾向が見られた。

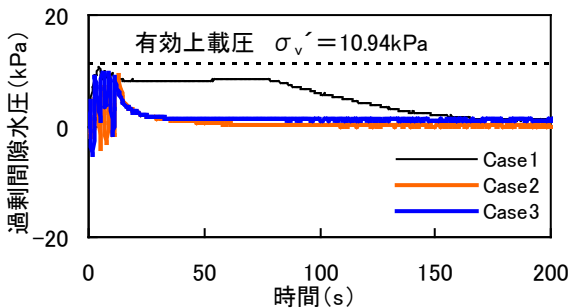


図-6 過剰間隙水圧消散の経時変化 (Step1加振時、管上・深さ1.2m、実物大換算値)

## 5. まとめ

微生物代謝を利用し、炭酸カルシウム法により砂を固化させた場合について、三軸圧縮試験 (CD試験) の結果から、強度向上が期待できることを確認した。

これと同程度の量の炭酸カルシウムを析出させて豊浦砂を固化した模型地盤を作製し、動的遠心模型実験を行い、液状化対策としての効果を確認した。模型地盤中に析出していた炭酸カルシウムの量との関係より、相対密度60%の豊浦砂の場合、土の質量に対して2~4%程度の炭酸カルシウムを析出させれば、今回の加振条件に対しては、液状化対策としての効果が得られるものと考えられた。

また、栄養塩等注入時の模型地盤の見かけの透水係数の変化を調べた結果、地盤の固化に伴う透水係数の低下は1桁未満であり、地下水流動を阻害することなく液状化対策を実施できる可能性が示唆された。

炭酸カルシウム法の現地地盤への適用に向けては、栄養塩等を目的とする範囲全体に三次元的に到達させ、目的の改良効果を得るために必要な時間滞留させることが可能な注入方法の提案とともに、炭酸カルシウム析出や地盤改良効果の空間的な違いも考慮した検討、注入する栄養塩等の周辺環境への影響に関する検討等が今後課題になると考えられる。

### 参考文献

- 1) Victoria S. W., Leon A. P. and Marien P. H. : Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique, Geomicrobiology Journal, 24, pp.417-423,2007.
- 2) Sébastien D. , Marc P. , Bénédicte M. and François G. : Experimental and numerical modeling of bacterially induced pH increase and calcite precipitation in saline aquifers, Chemical Geology, Volume 265, pp.44-53, 2009.

稲垣由紀子\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 研究員  
Yukiko INAGAKI

塚本将康\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 交流研究員  
Masayoshi TSUKAMOTO

森 啓年\*\*\*



国土交通省総合政策局 (前独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム主任研究員)、博士 (工学)  
Dr. Hiroto MORI

中島 進\*\*\*\*



鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 (前独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム専門研究員)、博士 (工学)  
Dr. Susumu NAKAJIMA

佐々木哲也\*\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 上席研究員  
Tetsuya SASAKI