

## 微生物機能による地盤改良技術の適用に向けた研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 28

担当チーム：地質・地盤研究グループ（土質・振動）

研究担当者：佐々木 哲也，加藤 俊二，稲垣 由紀子

### 【要旨】

微生物代謝による二酸化炭素を利用し、土の間隙中のカルシウム源との反応により炭酸カルシウムを析出させて地盤を固化させる方法（炭酸カルシウム法）で固化させた砂の強度向上や液状化対策効果は確認されている。一方、実地盤の改良に適用するためには、固化に有利な栄養塩の到達や滞留の状態を広範囲に作ることや、注入した微生物や栄養塩の成分が周辺環境に与える影響の軽減策、具体的な用途イメージを示すことが必要である。そこで、本研究では、均一な固化や砂の強度発現、間隙中での栄養塩由来の成分や微生物の残留抑制に有利な方法について検討した。また、侵食防止等のためのり面補修への適用を想定した場合の均一な固化に有利な栄養塩の供給条件について検討した。これらの結果、固化に最適な注入日数等を踏まえて可能な範囲で薄くした水溶液の栄養塩を、間欠的に浸透させて与えるのが固化と環境影響軽減の両面から有効であることを確認した。

キーワード：地盤改良，炭酸カルシウム法，微生物，栄養塩，注入

## 1. はじめに

### 1.1 微生物機能を用いた地盤改良技術の必要性

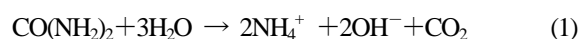
建設分野においても二酸化炭素の排出削減が求められる中、地盤改良技術においても、製造時に温室効果ガスを多く排出する建設資材に替わり、より環境負荷の少ない技術も適材適所で使用することが求められている。

近年研究開発が進められている地盤改良技術として、シリカゲル法や炭酸カルシウム法といった微生物代謝を利用したものがある<sup>1)</sup>。これらの方法は、温室効果ガスの発生が少ないなどの特徴があり、次世代における低環境負荷の地盤改良技術としても期待されている。その中で、本研究では炭酸カルシウム法に着目した。

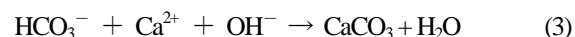
### 1.2 炭酸カルシウム法と本研究における取り組み

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>）と土の間隙中に存在する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させ、土を固化させる技術である。本研究においては、微生物の尿素分解によるCO<sub>2</sub>を利用した、以下の反応による砂の固化について検討した。微生物は、尿素分解効果の高いことが知られる“*Sporosarcina pasteurii*”（ATCC11859）<sup>2)</sup>を用いた。

（尿素分解）



（炭酸カルシウム析出）



この反応を利用して固化させた砂の強度向上や液状化対策としての効果は、理想的な条件での室内試験レベルでは既に確認している<sup>3)</sup>。実地盤の改良では、栄養塩等の注入も、広範囲へ三次元的に行う必要が想定される。固化の対象を比較的広範囲とし、三次元的に栄養塩を注入した実験では、砂は均一に固化せず、これは栄養塩が到達する際の濃度や流速、到達した栄養塩が滞留する時間に空間的ばらつきが生じることが要因と考えられた<sup>4)</sup>。そのため、実地盤への適用に向けては、栄養塩の与え方等の施工条件や、その結果得られる栄養塩等の到達や滞留の状況が固化させた砂の強度特性や耐久性に与える影響について明らかにする必要がある。また、注入される微生物や栄養塩の成分が周辺環境に与える影響の評価や環境影響を軽減する方策について検討し、この結果と施工方法も踏まえたうえで、適用可能性のある具体的な用途についても示す必要がある。

そこで、本研究では炭酸カルシウム法を対象に、以下を目標として検討を実施した。

- 1) 施工条件・環境条件が固化した土の強度特性・耐久性に及ぼす影響の解明
- 2) 微生物の利用による周辺環境影響の評価と軽減策の提案
- 3) 用途に応じた適用方法の提案
  - 1) および2) の目標に向けては、地盤内における栄

養塩等の供給状況をモールド内の砂への栄養塩等の注入条件を変えて要素レベルで再現し、それが砂の固化状況に与える影響について確認した(後述の2.)。また、栄養塩等注入時や注入終了後の間隙水について、微生物個体濃度、栄養塩由来のイオンの濃度やpHを調べ、微生物や栄養塩の注入に伴う影響についても確認した(後述の3.)。これらの取り組みの結果を踏まえ、3)の目標に向けては、侵食防止等のためののり面表層部の補強への利用を想定した改良方法を検討した(後述の4.)。

## 2. 施工条件・環境条件が固化した土の強度特性・耐久性に及ぼす影響

### 2.1 実験概要

地盤への栄養塩等の供給(流量、濃度等)や滞留の状況が砂の固化状況に与える影響を要素レベルで再現し、それらが砂の固化の均一さや強度に与える影響について確認した。

実験では、式(1)から式(3)の反応を利用し、以下の手順で直径5cm、高さ15cmの塩化ビニル製モールド内に珪砂6号を固化させた供試体を作製した(図-1)。

① 空中落下法により珪砂6号(最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.661\text{g/cm}^3$ , 最小乾燥密度 $\rho_{dmin}=1.376\text{g/cm}^3$ )をモールド

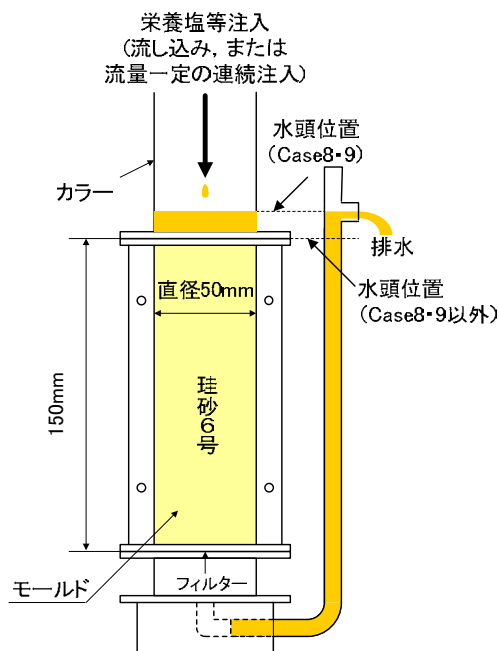


図-1 供試体作製状況

- 内に投入後、フィルターの直下から蒸留水を浸水させる。  
 ② *Sporosarcina pasteurii* の培養液250mLをモールド上部より流し込む。

表-1 実験条件

(a) 注入条件

Case No.	培養液	栄養塩組成	栄養塩注入総量 (mL)	注入方法	注入流量	注入日数(日)		
						栄養塩	蒸留水	合計
Case1	1	組成0	400	連続注入(供試体表面水頭)	0.07mL/min	4	4	8
Case2	1	組成0	400	連続注入(供試体表面水頭)	0.04mL/min	8	8	16
Case3	1	組成1	800	連続注入(供試体表面水頭)	0.07mL/min	8	4	12
Case4	2	組成0	400	連続注入(供試体表面水頭)	0.14mL/min	2	2	4
Case5	2	組成0	400	連続注入(供試体表面水頭)	0.28mL/min	1	1	2
Case6	2	組成1	800	連続注入(供試体表面水頭)	0.14mL/min	4	2	6
Case7	2	組成1	800	連続注入(供試体表面水頭)	0.28mL/min	2	1	3
Case8	3	組成1	800	連続注入(供試体上方水頭)	0.14mL/min	4	2	6
Case9	3	組成2	1600	連続注入(供試体上方水頭)	0.14mL/min	8	2	10
Case10	4	組成2	1600	間欠注入	200mL/回/日	8	2	10
Case11	4	組成1	800	間欠注入	200mL/回/日	4	2	6
Case12	4	組成1	800	置換え+連続注入(供試体表面水頭)	0.14mL/min*	3	2	5
Case13	4	組成1	800	連続注入(供試体表面水頭)	0.14mL/min	4	2	6

\*間隙を栄養塩200mLで置き換えた後の連続注入時の流量

(b) 栄養塩の成分総量および組成

	総量(g)	各成分の濃度(蒸留水1L中)		
		組成0	組成1	組成2
塩化カルシウム(CaCl <sub>2</sub> )	22.196	55.49	27.745	13.873
尿素(CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> )	12.012	30.03	15.015	7.508
塩化アンモニウム(NH <sub>4</sub> Cl)	4	10	5	2.5
ニュートリエントブロス	1.2	3	1.5	0.75
注入総体積(mL)	-	400	800	1600

(c) 各培養液の微生物個体濃度

培養液	微生物個体濃度(/mL)
培養液1	データなし
培養液2	$1.03 \times 10^5$
培養液3	$3.06 \times 10^6$
培養液4	$3.84 \times 10^7$

③ 栄養塩を注入し、最後に供試体中の栄養塩等の成分を洗い流すための蒸留水（総量 400mL）を注入する。

供試体の作製は、栄養塩の組成と注入方法を変え、表-1(a)に示す条件で 13 ケース行った。栄養塩として固化のために注入する成分の総量は、全ケースで等しく、表-1(b)に示すとおりである。栄養塩の成分を蒸留水に溶かす際の濃度を 3 段階に変えており、組成 0 に対して、組成 1、組成 2 ではそれぞれ 0.5 倍、0.25 倍の濃度とした。栄養塩注入総量は、濃度に反比例させ、組成 1 および組成 2 ではそれぞれ、2 倍、4 倍とした。

なお、表-1(a)で培養液の番号が異なっているとおり、全てのケースで同じ培養液（同一容器で同時期に作成した培養液）を注入してはいない。後述の 3. で供試体の間隙に残留した微生物個体濃度と最初に注入した培養液中の微生物個体濃度を比較するため、各培養液の微生物個体濃度を確認した結果、表-1(c)に示すとおりとなった。各培養液は、同じ材料と培養日数（2 日間）で作成し、直接の原因は不明だが、材料や培養日数以外の様々な要因から、微生物個体濃度に幅がある。また、培養液 1 については、微生物個体数を調べる培養液の採取の関係で、データが得られていない。

栄養塩の注入方法は、以下に示すように連続注入、間欠注入、置換え+連続注入とした。

#### ① 連続注入

注入総体積を定量ポンプにより流量一定で与え続けた。このときの流量は、定量ポンプで設定した。水頭を砂の表面に合わせた注入（以下、連続注入（供試体表面水頭））と、水頭を砂の表面から 7mm 上に合わせて砂の上方に常時水面がある状態での注入（以下、連続注入（供試体上方水頭））を行った。後者は、砂表面全体が常時栄養塩と接触した状態を作り、均一に固化させることを期待したものである。

#### ② 間欠注入

1 回あたり 200mL（間隙体積を置き換えるのに十分な量）の栄養塩をモールド上部から流し込み、30 分程度で自然流下させた後 1 日放置することを繰り返した。

#### ③ 置換え+連続注入

培養液注入直後に栄養塩の総注入体積のうち 200mL を流し込んで間隙を置き換えてから、残りの栄養塩を流量一定で連続注入した。

栄養塩等の成分を洗い流すための蒸留水は、間欠注入では 400mL を流し込んだ後 2 日間放置、連続注入および置換え+連続注入では、栄養塩を連続注入した時と同じ流量で連続注入した。

蒸留水の注入終了後、供試体を脱水、凍結保存した。凍結した供試体を上下端 2.5cm ずつを切り落として高さ 10cm に成形した後に、試験機に設置し、室温で 2 時間放置により解凍してから一軸圧縮試験を行った。

一軸圧縮試験終了後には、载荷した供試体と、成形時に切り落とした上端部および下端部の CaCO<sub>3</sub> 析出量を、塩酸による CaCO<sub>3</sub> の分解・溶出に伴う乾燥質量の変化から調べた。

## 2.2 実験結果および考察

各供試体の CaCO<sub>3</sub> 析出比と一軸圧縮強さ  $q_u$  の関係を図-2 に示す。ここで、CaCO<sub>3</sub> 析出比は、砂のみの質量に対する CaCO<sub>3</sub> 析出量の比を百分率で表したものである。CaCO<sub>3</sub> 析出比が高いほど一軸圧縮強さも大きくなる傾向が見られた。以下、連続注入の流量、砂上方の水頭の有無、栄養塩注入方法が固化状況に与える影響について示す。

### 2.2.1 連続注入の流量による影響

連続注入（供試体表面水頭）のケースについて、栄養塩等の注入流量と一軸圧縮強さの関係を図-3 に示す。また、各ケースの一軸圧縮試験後の供試体の状態を写真-1 に示す。

図-3 より、同じ培養液（同一容器内で同時期に作製した培養液）、同じ組成の栄養塩を注入したケースであっても、注入流量により一軸圧縮強さに違いが見られた。組成 0 の栄養塩を注入した供試体の固化状況について写真-1 に示すが、Case2（組成 0 の栄養塩を 0.04mL/min で注入）や Case5（組成 0 の栄養塩を 0.28mL/min で注入）では、一軸圧縮試験後に塊が残らず、CaCO<sub>3</sub> 析出比や一軸

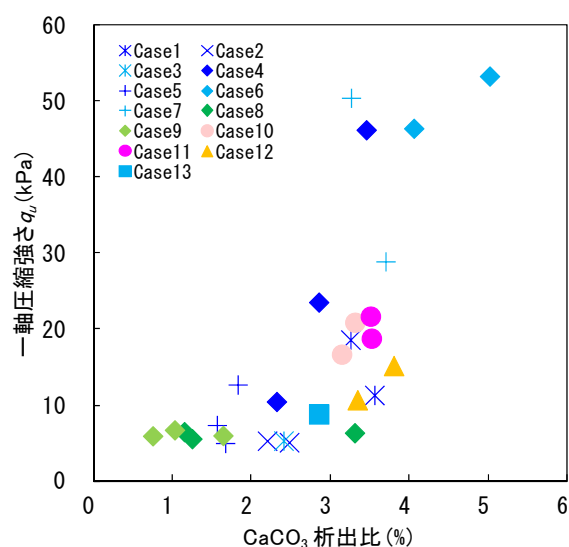


図-2 CaCO<sub>3</sub> 析出比および一軸圧縮強さの関係

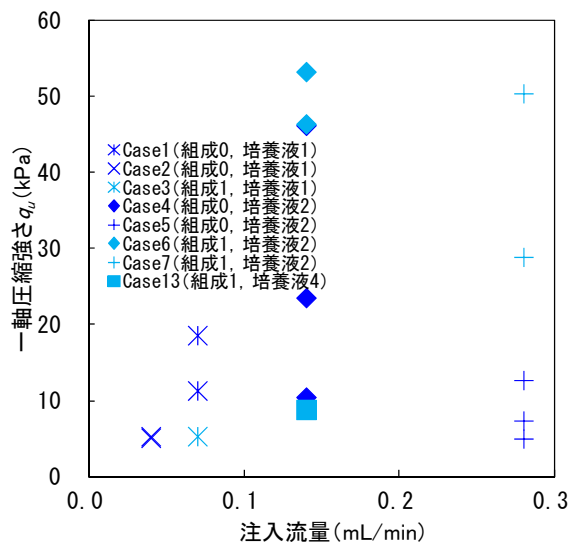


図-3 注入流量および一軸圧縮強さの関係  
(連続注入 (供試体表面水頭))

圧縮強さも相対的に低かった。Case 2 では、栄養塩注入開始後 5 日目頃から、砂の上部が目詰まりし、注入した栄養塩や蒸留水が砂の間隙全体に浸透せずに上部のカラ一内に貯まり続け、砂からの排水がほとんど出なくなった。栄養塩総注入量の 400mL のうち、間隙全体に到達したのは 200mL 程度にとどまり、固化が進まなかったと考えられる。一方、Case 5 では、砂の上部が目詰まりや通水不良はなかったが、栄養塩注入期間が 2 日間と短く、栄養塩の成分が  $\text{CaCO}_3$  析出に十分利用されないまま、砂の中を流れたことが考えられる。

以上より、栄養塩を連続注入で与える場合、栄養塩の成分が固化に有効に利用される適切な注入流量を設定する必要があることと考えられる。

### 2.2.2 砂上方の水頭の有無による影響

2.2.1 で、一軸圧縮試験終了後に塊が残ったケースでも、数 cm 程度の塊が少数残る状態で、均一な固化は見られなかった。この要因として、連続注入 (供試体表面水頭) では、栄養塩が流量一定で砂の表面に直接滴下され、その付近のみが集中的に固化した状況が考えられた。そこで、滴下時の栄養塩の集中を防ぐために常時砂表面より上方に栄養塩の水面がある状態で栄養塩を連続注入することにより均一に固化させる可能性について検討した。

注入流量 0.14mL/min で連続注入した各供試体の  $\text{CaCO}_3$  析出比と一軸圧縮強さの関係を図-4、組成 1 の栄養塩を注入したケースを例に、一軸圧縮試験後の供試体の状態を写真-2 に示す。連続注入 (供試体上方水頭) で

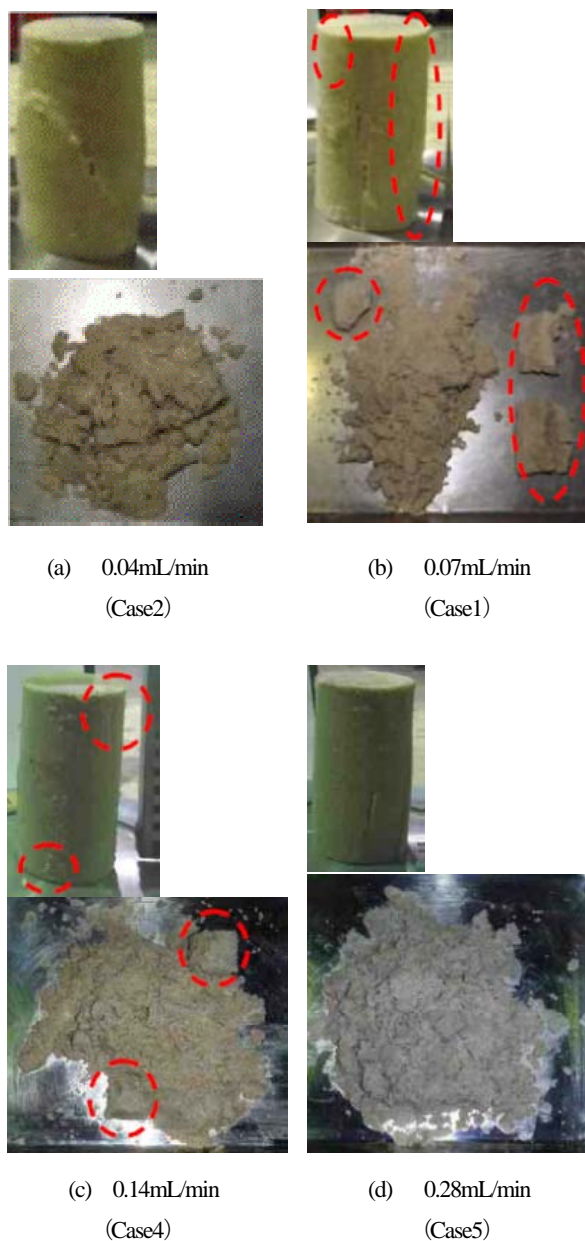


写真-1 注入流量による固化状況の違い  
(組成 0 の栄養塩注入の例)

は、連続注入 (供試体表面水頭) に比べて  $\text{CaCO}_3$  析出比、一軸圧縮強さともに小さくなり、一軸圧縮試験後の供試体では塊がほとんど残らなかった。

次に、各供試体と上端部の  $\text{CaCO}_3$  析出比の関係を図-5 に示す。Case 4 および Case 6 については上端部の  $\text{CaCO}_3$  析出比を調べていなかったため、それ以外の 3 ケースについて示す。全体に上端部と供試体の  $\text{CaCO}_3$  析出比の差が大きく、注入された栄養塩の成分の大部分が上端部での集中的な固化に使われる傾向であったが、連続注入 (供試体上方水頭) では、それがより顕著に見られた。

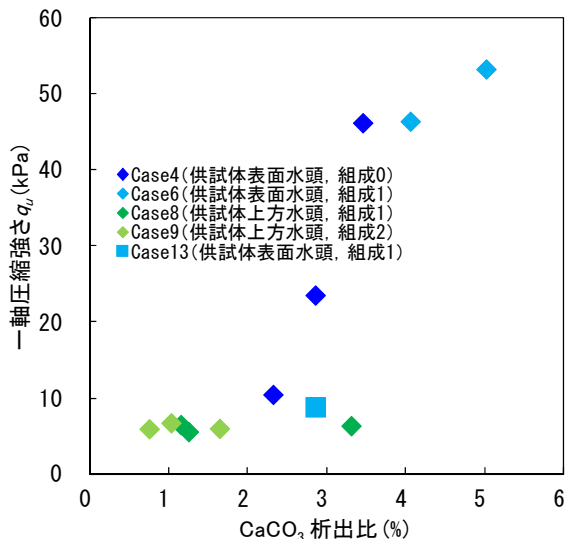


図-4 砂上方の水頭の有無と一軸圧縮強さの関係



(a) 砂上方水頭 (Case8) (b) 砂表面水頭 (Case13)

写真-2 一軸圧縮試験終了後の様子

(組成1の栄養塩を0.14mL/minで連続注入した例)

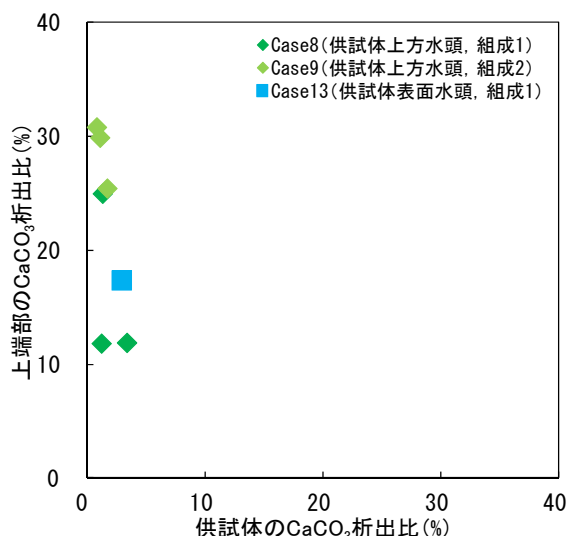


図-5 供試体と上端部のCaCO<sub>3</sub>析出比

以上より、連続注入では栄養塩を砂表面全体に接触させながら注入しても、限られた範囲の集中的な固化にと

どまった。

### 2.2.3 栄養塩注入方法による影響

2.2.1 および2.2.2の連続注入では、注入流量や注入時の水頭位置による多少の違いはあるが、全体として均一な固化が難しい結果となった。その要因としては、栄養塩の成分が全体に到達しなかった、あるいは到達してもCaCO<sub>3</sub>析出に十分な時間留まらなかったことが考えられた。

そこで、同一の培養液(表-1(c)の培養液4)を注入のうち、間欠注入も含め、栄養塩の注入方法を変えたCase10からCase13で比較した。Case12の置換え+連続注入では、培養液注入直後に栄養塩の総注入体積800mLのうち200mLを流し込んで間隙を置き換えてから、残り600mLの栄養塩を0.14mL/minで連続注入した。これらのケースについて、CaCO<sub>3</sub>析出比と一軸圧縮強さの関係を図-6、一軸圧縮試験終了後の供試体の様子を写真-3に示す。

CaCO<sub>3</sub>析出比が高いほど一軸圧縮強さも大きくなる傾向で、間欠注入のCase10およびCase11で連続注入のCase13に比べて大きくなっている。置換え+連続注入のCase12では、これらの中間的な結果となった。

一軸圧縮試験後の供試体の様子を比較すると、間欠注入のCase10およびCase11では2cm程度までの塊が多数残ったのに対し、連続注入のCase13および置換え+連続注入のCase12では数cm程度の比較的大きな塊が少数残っていた。こうした状況から、間欠注入では均等に固化したが、連続注入および置換え+連続注入では均等に固化しなかったことが考えられる。

次に、一軸圧縮試験後の供試体と、供試体成形時に2.5cmずつ切り落とした上端部および下端部のCaCO<sub>3</sub>析出比を比較した結果を図-7に示す。供試体のCaCO<sub>3</sub>析出比に対する下端部のCaCO<sub>3</sub>析出比の比(以下、下端部/供試体)を横軸、上端部のCaCO<sub>3</sub>析出比の比(以下、上端部/供試体)を縦軸に取っている。上端部/供試体、下端部/供試体がいずれも1に近い場合は、上端部・供試体・下端部のCaCO<sub>3</sub>析出比のばらつきが少ないといえる。間欠注入のCase10およびCase11はこの状態に近く、上端部・供試体・下端部の全体で概ね均一にCaCO<sub>3</sub>が析出したといえる。連続注入のCase13では、供試体と比べて上端部のCaCO<sub>3</sub>析出比が6倍程度、下端部では半分程度と、CaCO<sub>3</sub>析出が上端部に集中したといえる。置換え+連続注入のCase12については、供試体と比べて上端部のCaCO<sub>3</sub>析出比が3倍程度、下端部では0.6倍程度と、上部ほどCaCO<sub>3</sub>析出が多くなったが、部分によるCaCO<sub>3</sub>

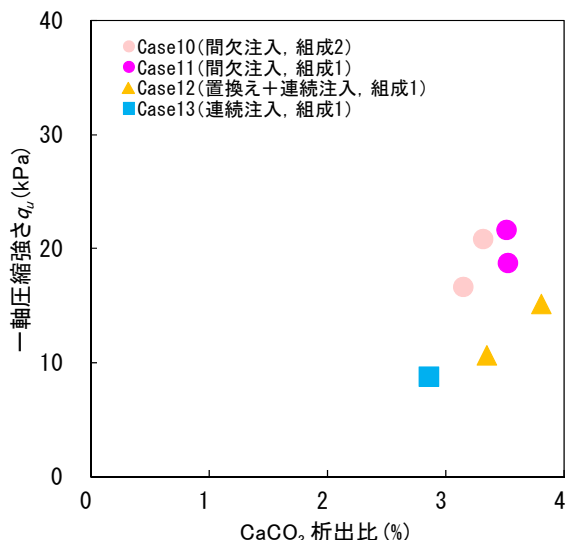


図-6 注入方法による固化状況の違い (培養液4を用いた場合)

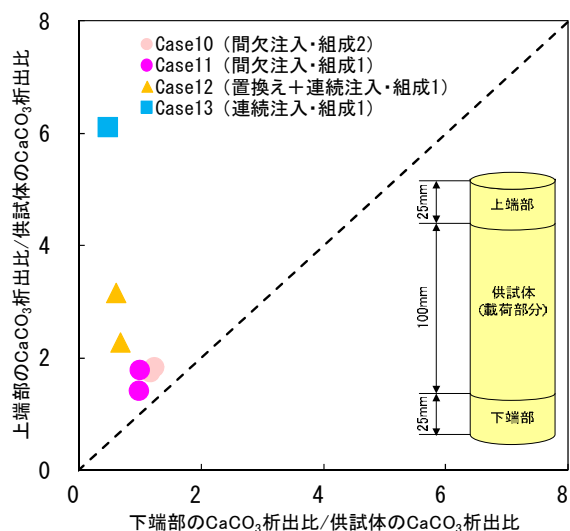


図-7 部分ごとのCaCO<sub>3</sub>析出比の比較

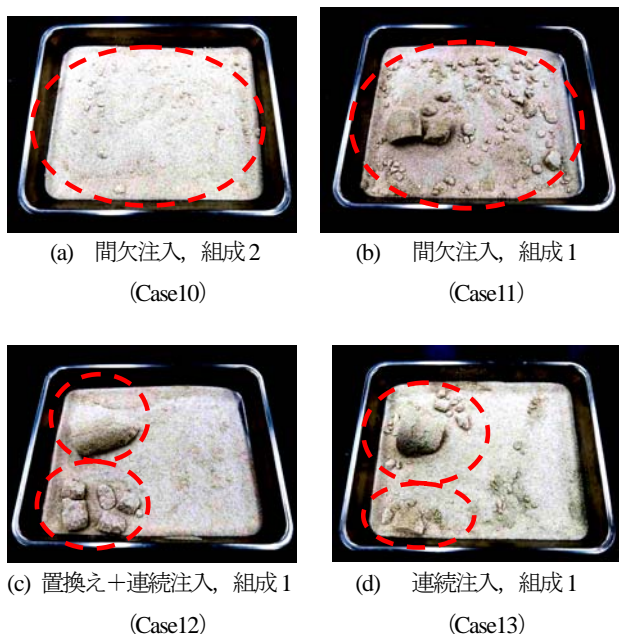


写真-3 一軸圧縮試験後の供試体の様子 (培養液4を用いた場合)

析出比の違いはCase13に比べて小さくなっていた。

以上より、栄養塩を間欠注入で与える方が、試料土内全体で比較的均一にCaCO<sub>3</sub>析出が進み、強度としても有利になった状況が確認できる。間欠注入の場合、栄養塩の注入により既に存在していた間隙水と置き換わる際には、栄養塩は濃度が大きく変わらないまま間隙全体に到達し、新たに栄養塩等が注入されるまで滞留する。その間にCaCO<sub>3</sub>析出とCaCO<sub>3</sub>による砂粒子同士の接合が進んだものと考えられる。一方で、栄養塩が連続的な滴下で注入される場合、成分の一部が上部でのCaCO<sub>3</sub>析出に

使われた後の栄養塩が供試体や下端部に到達したことが考えられる。また、注入期間中は常時間隙水の動きがあったことから、CaCO<sub>3</sub>が析出しても移動や流出して砂粒子同士を十分に接合させることができなかったことも考えられる。

### 2.3 まとめ

微生物代謝を利用して砂を固化させる際の栄養塩の与え方が砂の固化状況に与える影響を確認した。

連続注入では、注入時に栄養塩が砂表面全体に接触していたか否かにかかわらず、限られた範囲の集中的な固化にとどまることが確認された。

これに対し間欠注入では、均一な固化が見られ、一軸圧縮強さとしても連続注入に比べ有利な結果となった。最初に栄養塩が試料土全体に到達後、次の栄養塩注入まで間隙に滞留したことで、CaCO<sub>3</sub>析出と砂粒子同士の接合が進んだことによると考えられる。

## 3. 微生物の利用による周辺環境影響の評価と軽減策

### 3.1 間隙水水質の把握

微生物や栄養塩の注入による、間隙中の微生物個体濃度や栄養塩の成分由来のイオン濃度の変化や、固化後の砂の強度との関係を調べるため、2.1に示した実験の中で、注入期間中に回収された間隙からの排水、注入終了後に間隙中に残留した水について、pH、Ca<sup>2+</sup>濃度、Cl<sup>-</sup>濃度、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度、微生物個体濃度を調べた。

pHとNH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度は微生物による尿素分解の進行を表す指標として調べた。Cl<sup>-</sup>濃度は、栄養塩に由来するもので、今回の実験条件では他のイオンと析出物を作ることはなく、栄養塩到達の指標となる。Ca<sup>2+</sup>濃度は、栄養塩の到

達のほか、 $\text{CaCO}_3$  析出の指標となる。 $\text{Cl}^-$ 濃度が栄養塩中に含まれる程度の濃度で検出され、 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度が 0 に近い場合は、栄養塩が到達し、 $\text{CaCO}_3$  析出が進んだといえる。

### 3.2 実験結果および考察

#### 3.2.1 栄養塩濃度による影響

##### (1) 間隙水水質への影響

培養液 2 を用いた Case4 から Case7 を例に、間隙水水質の経時変化を図-8 に示す。図-8(a)は  $\text{Cl}^-$ 濃度の推移である。栄養塩に含まれる  $\text{Cl}^-$ 濃度は、組成 0 および組成 1 の栄養塩でそれぞれ 42.11g/L、21.06g/L である。各 Case とも、注入期間のうち、最初に培養液と栄養塩が置き換わる時期と、最後に栄養塩が蒸留水と置き換わる時期を除き、概ね栄養塩中の  $\text{Cl}^-$ 濃度に近い濃度で推移した。これより、栄養塩は間隙全体に到達したと考えられる。 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度は、各ケースとも終始 0.6g/L 未満で推移した。栄養塩に含まれる  $\text{Ca}^{2+}$ 濃度は組成 0 および組成 1 の栄養塩でそれぞれ 20.04g/L、10.02g/L であるのに対し、6% 未満の濃度に当たる。栄養塩到達後に  $\text{Ca}^{2+}$ の多くが  $\text{CaCO}_3$  析出に使われ、濃度が減少したと考えられる。pH については、各ケースとも、初期は培養液 (pH=9.0) が排水される影響で 9 付近であったが、栄養塩 (組成 0、組成 1 ともに pH=6.4) の到達が進むにつれて下がり、8 付近で

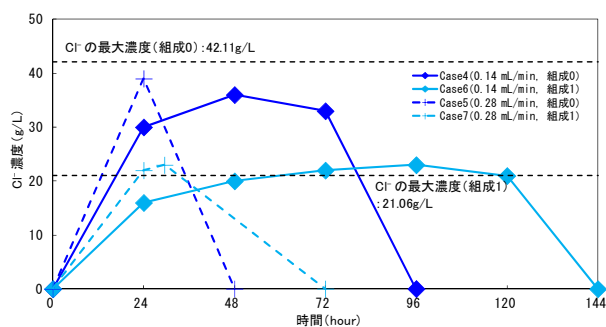
推移した。栄養塩の pH よりも高いのは、栄養塩中の尿素が分解され、 $\text{NH}_4^+$ が生じたことによると考えられる。図-8(b)は、 $\text{NH}_4^+$ 濃度の推移である。最初に培養液と栄養塩が置き換わる時期と、最後に栄養塩が蒸留水と置き換わる時期を除き、濃度の大きな変化がなく推移した。

ここで、注入した栄養塩濃度による排水の  $\text{Cl}^-$ 濃度および  $\text{NH}_4^+$ 濃度への影響に着目し、注入流量が同じであるが、栄養塩濃度と総注入体積が異なる Case4 と Case6、Case5 と Case7 を例に比較する。 $\text{Cl}^-$ 濃度については、栄養塩中に含まれていた濃度が排水中でも検出され、栄養塩濃度を半分、総注入体積を 2 倍とした Case6 および Case7 では、Case4 および Case5 の半分に抑えられた。 $\text{NH}_4^+$ 濃度については、培養液中の  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  の残留があり、栄養塩中の尿素が全て分解された場合で、栄養塩中の  $\text{NH}_4\text{Cl}$ に由来するものと尿素分解により生じるものとを合わせて、組成 0 の栄養塩では最大 24.14g/L、組成 1 の栄養塩では最大 13.44g/L 検出され得る。これに対し、組成 0 の栄養塩を注入した Case4 および Case5 では 15~17g/L 程度、組成 1 の栄養塩を注入した Case6 および Case7 では 6.5~11g/L 程度で推移した。前者では栄養塩濃度が高い分、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  由来や尿素分解による  $\text{NH}_4^+$ 濃度も高くなった。しかし、最大で検出され得る濃度に対する比は、組成 0 の栄養塩を注入した場合は約 70%、組成 1 の栄養塩を注入した場合は約 82%と、後者の方が栄養塩の成分として注入された尿素のうち、分解されて  $\text{CO}_2$  発生や  $\text{CaCO}_3$  析出に寄与した割合が高いと考えられる。

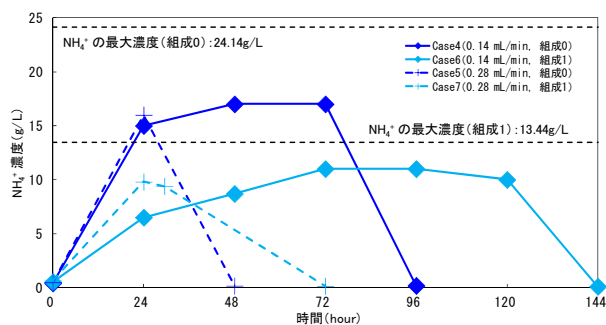
これらのイオン濃度は栄養塩注入に由来するもので、周辺環境影響を軽減する観点から、低い方が望ましい。固化に必要な量の成分を注入する際、濃度を薄く、濃度に反比例して総注入体積を多く注入することは、栄養塩の成分を有効利用しながら、栄養塩由来のイオン濃度を低減し得ることが考えられる。

##### (2) 栄養塩濃度が固化状況に与える影響

栄養塩濃度を薄くしたことによる固化状況への影響に着目し、Case4 から Case7 における  $\text{CaCO}_3$  析出比と一軸圧縮強さの関係を図-9 に示す。組成 1 の栄養塩を注入した Case6、Case7 においても、組成 0 の栄養塩を注入した Case4、Case5 と  $\text{CaCO}_3$  析出比や一軸圧縮強さに大きな違いは見られなかった。固化に必要な成分を供給するのに、栄養塩濃度を薄く、体積を反比例で多く注入する方法でも同等の固化効果が得られた。



(a)  $\text{Cl}^-$ 濃度の推移



(b)  $\text{NH}_4^+$ 濃度の推移

図-8 間隙水の水質変化の例 (培養液 2 を用いた例)

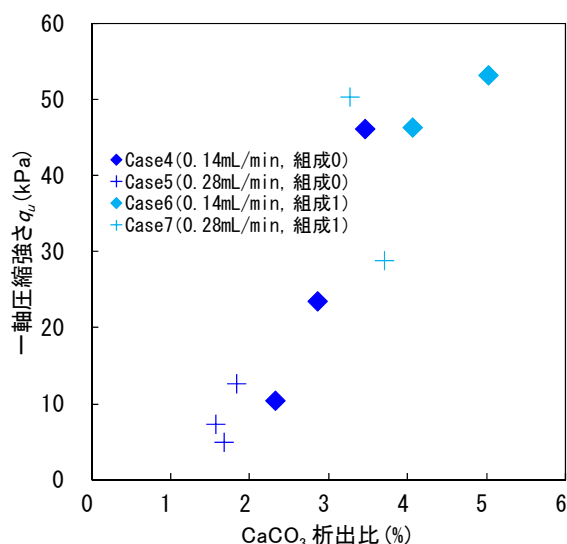


図-9 CaCO<sub>3</sub>析出比と一軸圧縮強さの関係 (培養液2を用いた例)

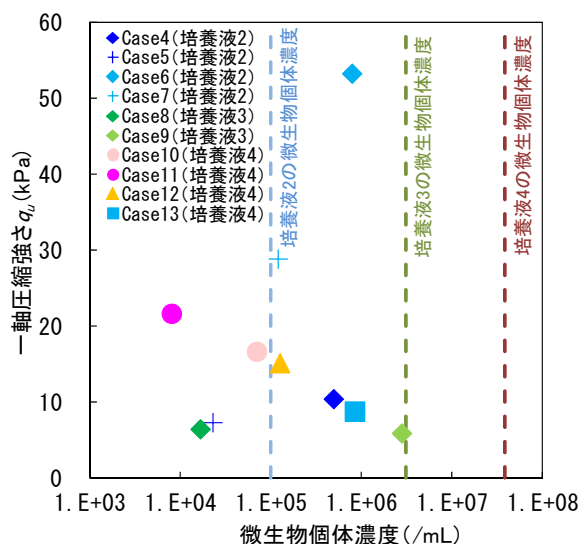


図-10 注入終了時の微生物個体濃度と一軸圧縮強さの関係

### 3.2.2 微生物個体数による影響

各 Case の注入終了時の間隙水中の微生物個体濃度と一軸圧縮強さの関係を、使用した培養液中の微生物個体数と併せて図-10 に示す。

全体的に、微生物の残留が多いことが一軸圧縮強さに有利とは限らない結果といえる。培養液3 または培養液4 を用いた各ケースでは、注入終了後の間隙水の方が培養液に比べて微生物個体濃度が低く、新たに注入された栄養塩等で間隙水が置き換えられる際に微生物が流出した。間欠注入ではその傾向がより顕著で、間隙の置き換えが短時間で進み、微生物が押し出されたと考えられる。培養液2 を用いたケースでは、注入終了後の間隙水の方が培養液に比べて微生物個体濃度が高くなることもあったが、培養液の10倍のオーダーでの増加にとどまった。

### 3.3 まとめ

微生物代謝により砂を固化させる際の、微生物の増殖や栄養塩の残留による環境への影響を軽減する方法について検討した。

栄養塩は、固化に最適な注入日数、濃度を明らかにしたうえで、可能な範囲で濃度を薄くして与えるのが、環境影響軽減の面からも有効であると考えられる。

栄養塩を間欠的に与える場合、連続的に与える場合に比べて、強度の発現に有利であるとともに、微生物の残留が抑えられた。栄養塩を間欠的に与え、排水を適切に回収・処理することが環境影響の軽減につながり得る。

## 4. 用途に応じた適用方法

### 4.1 実験概要

微生物代謝による地盤改良技術を侵食防止等のためののり面表層部の補強に利用する場合を想定した改良方法を検討した。2. および3. から、栄養塩は間欠的に与えるのが固化効果や微生物の増殖抑制に有利となることが考えられたため、栄養塩は間欠的に与えることとした。

実験は以下に示す手順で行った。

- ①幅 20cm × 奥行 12cm × 深さ 14cm の容器に、2.52kg の珪砂6号を投入する。
- ②*Sporosarcina pasteurii* (ATCC11859) の培養液 1.2L を容器の上から流し込み、砂表面より上に溜った分は、シリンジで吸い出して抜く。
- ③栄養塩を表-2 に示す量と方法で注入し、1日放置する。これを4回繰り返す。
- ④栄養塩注入終了後、成分の洗い流しのため、1回の栄養塩注入量と同量の蒸留水を流し込み、2日間放置する。
- ⑤砂を吸引脱水し、形を崩さないように、ステンレスのバットに開け、炉乾燥する
- ⑥炉乾燥後、砂の塊の状態を確認する。

表-2 栄養塩の与え方

CASE No.	状態	1回当たりの栄養塩の与え方
CASE1	水溶液	水溶液 1.2L を流し込み
CASE2	水溶液	水溶液 1.2L を霧吹きで吹付け
CASE3	水溶液	水溶液 1.2L を流し込み後、棒で攪拌
CASE4	水溶液	水溶液 0.8L を流し込み
CASE5	粉末+水	成分の粉末を表面に撒き出した上に水 0.8L を流し込み



実験は、栄養塩の与え方を表-2 のように変えて5 ケース実施した。栄養塩は全て、表-1(b)に示す組成0に相当するものである。

## 4.2 実験結果および考察

### 4.2.1 水溶液の栄養塩の与え方による違い

水溶液の栄養塩を与えたCASE1 からCASE3 の固化状況として、写真-3 に炉乾燥後の状態を示す。CASE1 は栄養塩を流し込んで放置、CASE2 は栄養塩を霧吹きで噴霧、CASE3 は栄養塩を流し込んで砂を攪拌後放置したケースである。

CASE1 は全体が塊となって形状を保持したが、CASE2 では、固化したのは表面の5mm程度で、その下は十分に固化していなかった。CASE3 では、複数の塊に分かれた。

CASE1 では栄養塩中の成分が砂の間隙全体に均等に到達して全体が固化したが、CASE2 では噴霧の際に栄養塩が飛散し、表面付近の栄養塩が届きやすい位置で集中的に固化したことが考えられる。CASE3 では、栄養塩を注入して攪拌した際に、固化が始まっていた塊の一部崩壊が繰り返され、複数の塊に分かれたことが考えられる。

固化に必要な成分が対象範囲全体に到達し、CaCO<sub>3</sub>析出に必要な時間滞留のうえ、析出したCaCO<sub>3</sub>を攪乱させない方法が有効と考えられた。



(a) 流込み (CASE1)



(b) 噴霧 (CASE2)



(c) 攪拌 (CASE3)

写真-3 栄養塩の与え方と固化状況の違い

(水溶液の栄養塩を与える場合)

### 4.2.2 与える栄養塩の状態による違い

水溶液の栄養塩を流し込んで与えたCASE4、成分の粉末を混合して砂の表面に撒き出したところに蒸留水を流し込む方法で栄養塩を与えたCASE5の固化状況として、

写真-4 に炉乾燥後の状態を示す。

CASE4 は全体が塊となって形状を保持したが、CASE5 は表層1cmから下は複数の塊に分離した。CASE5 では、成分の粉末が流し込まれた蒸留水に十分な濃度で溶けて砂の間隙に達した範囲が限られていたことが考えられる。

栄養塩は、成分の粉末と蒸留水を別々に与えるのではなく、均一に混ぜた水溶液で与えるのが固化に有効と考えられた。



(a) 水溶液 (CASE4)



(b) 粉末+水 (CASE5)

写真-4 栄養塩を与える時の状態と固化状況の違い  
(栄養塩を浸透させて与える場合)

## 4.3 まとめ

侵食防止等のためののり面表層部の補強への利用を想定し、栄養塩の与え方による固化状況の違いを調べた。

その結果、栄養塩は成分の粉末と水を分けて与えるのではなく、水溶液の状態で与える方が、均一な固化に有利と考えられた。また、水溶液の栄養塩を与える場合、吹付けや混合ではなく、浸透させる方法が均一な固化に有利と考えられた。

## 5. おわりに

微生物機能を利用した地盤改良技術のうち炭酸カルシウム法を対象に、施工条件・環境条件が固化した土の強度特性・耐久性に及ぼす影響、微生物の利用による周辺環境影響の評価と軽減策、用途に応じた適用方法の観点から検討を行った。その結果、以下を確認した。

- ・栄養塩を連続注入で与える場合、注入時に栄養塩が砂表面全体に接触していたか否かにかかわらず、限られた範囲の集中的な固化にとどまることが確認された。
- ・間欠注入で与えると、連続注入に比べて均一な固化が見られ、一軸圧縮強さとしても有利な結果となった。また、間隙中への微生物の残留も少なく抑えられた。
- ・栄養塩は、固化に最適な注入日数、濃度を明らかにしたうえで、可能な範囲で濃度を薄くして与えるのが、環境影響軽減の面からも有効と考えられた。
- ・侵食防止等のためののり面表層部の補強等への適用を

想定する場合も、栄養塩は、成分の粉末と水を分けて与えるのではなく、水溶液の状態を与える方が、均一な固化には有利と考えられた。

・水溶液の栄養塩は、吹付けや攪拌よりも、浸透させる方法で注入した方が、均一な固化が期待できると考えられた。

#### 参考文献

- 1) 川崎 了, 村尾 彰了, 広吉 直樹, 恒川 昌美, 金子 勝比古: 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, pp.2-12, 日本応用地質学会, 2006.
- 2) Dupraz, S., Parmentier, M., Ménez, B. and Guyot, F. : Experimental and numerical modeling of bacterially induced pH increase and calcite precipitation in saline aquifers, *Chemical Geology*, Vol.265, pp.44-53, 2009.
- 3) 稲垣 由紀子, 塚本 将康, 森 啓年, 中島 進, 佐々木 哲也, 川崎 了: 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, pp.157-167, 地盤工学会, 2011.
- 4) 稲垣 由紀子, 塚本 将康, 石原 雅規, 佐々木 哲也, 川崎 了: 微生物代謝を用いた模型実験による地盤改良効果の検討, 第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.315-322, 2012

## STUDIES FOR APPLICATION OF SOIL IMPROVEMENT BY MICROBIAL FUNCTIONS

**Budged** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2014-2016

**Research Team** : Geology and Geotechnical Engineering

Research Group

(Soil Mechanics and Dynamics)

**Author** : SASAKI Tetsuya

KATO Shunji

INAGAKI Yukiko

**Abstract** : On the treated soil by Microbial Carbonate Precipitation (MCP), improvement in strength and effectiveness as a measure against liquefaction are observed. For application of MCP to practical ground, arrival and stay of nutrient salt in a large extent, a reduction of environmental influence of micro-organisms and injected nutrient salt, and concrete uses are necessary. In this study, effective measures for uniform solidification of sand and for decrease of rest of micro-organism and components of nutrient salt in void were investigated. In addition, the effective injection conditions of nutrient salt for slope repair to prevent erosion were investigated. As results, it was verified that intermittent seepage of nutrient salt which is a thin solution in consideration of period to inject is effective from both side of solidification and environment.

**Key words** : Soil Improvement, Microbial Carbonate Precipitation, Micro-organism, Nutrient salt and Injection

# 微生物機能による地盤改良技術の適用に向けた研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 28

担当チーム：寒地地盤チーム

研究担当者：林 憲裕、山梨 高裕、佐藤 厚子

## 【要旨】

近年、土壌中に含まれる微生物の代謝活動を利用した地盤の固化改良技術が注目され、国内外において研究開発が進められている。この技術は、微生物が活動する際に発生する二酸化炭素と土砂中のカルシウムとが反応することにより、炭酸カルシウムが発生することを利用したものである。寒地地盤チームでは、北海道に広く分布している泥炭について、施工現場に既に生育している微生物を利用して、泥炭を固化させる試験を行った。

その結果、炭酸カルシウム法による泥炭の固化に際して、固化に影響を与えるウレアーゼ活性の程度を推定できること、泥炭を固化できることがわかった。

キーワード：炭酸カルシウム法、泥炭、一軸圧縮強さ、固化、微生物

## 1. はじめに

微生物機能による地盤改良技術の適用に向けた研究において寒地土木研究所では、泥炭<sup>1)</sup>を対象とした。泥炭は、高有機質土で軟弱な土質であるため、そのままでは盛土材料として使用できない材料である<sup>2)</sup>。泥炭は汚泥に分類されることから管理型最終処分場で処分しなければならず<sup>3)</sup>、その費用は小さくない。この泥炭を土木材料として安価に有効利用できれば、処分費を低減できるだけでなく、現場で必要な材料の購入費が不要となる。これにより、工事に要するコストを削減でき、かつ、資源の有効活用や環境への負担の軽減となる。

そこで、北海道の泥炭を対象として、泥炭中に生息する微生物の代謝活動を利用した泥炭の固化実験を行った。

## 2. 微生物の代謝活動を利用した固化

微生物の代謝活動を利用した固化改良技術としては、シリカ法<sup>4)</sup>、炭酸カルシウム法<sup>5)</sup>などがある。本研究では、炭酸カルシウム法による微生物固化技術に関する実験を行った。

炭酸カルシウム法は、微生物の代謝により発生する二酸化炭素と土の間隙中のカルシウム源とが反応し析出する炭酸カルシウムにより、地盤を固化させる技術である。炭酸カルシウムは析出する際に土粒子同士を結合させる働きがあり、土の強度が増加する。

## 3. 泥炭の微生物固化の適用性

### 3. 1 北海道の泥炭の性質

試験を行った泥炭の採取地を図-1に、基本物性を表-1に示す。採取した泥炭は、一般の土砂<sup>6)</sup>と比較して、自然含水比、強熱減量が非常に高く、土粒子密度が小さい。また、泥炭の特性でpHが非常に低い。



図-1 泥炭の分布と採取箇所(参考文献7)に加筆

### 3. 2 泥炭に生息する微生物

泥炭は、有機物の分解速度が遅いことから、生息する微生物が少ないと考えられている。そこで、表-1に示す泥炭の中の3種類について、生息している

微生物数を調べた。

表-2に、一般細菌および放線菌の数を示す。泥炭中には、微生物がほぼ生息していないと考えられたが、試験したどの泥炭からも一般細菌や放線菌などの微生物の存在が確認できた。通常、一般の土壌には1gあたり107~109の微生物が存在しており<sup>8)</sup>、これと比較して少ないが、泥炭中にも微生物が生息していることから、これらの微生物により泥炭を固化できる可能性があると考えられる。

表-1 泥炭の基本物性値

No.	試料名 (採取地)	含水比 w(%)	土粒子 密度 ps(g/cm <sup>3</sup> )	強熱 減量 Li(%)	pH
1	利別川	93.3	2.474	17.5	4.7
2	富川	119.6	2.206	39.0	2.5
3	岩見沢1	292.9	2.176	32.0	4.3
4	釧路	299.9	1.537	45.5	6.5
5	江別	300.0	1.943	49.2	5.6
6	岩見沢2	344.5	2.136	40.4	3.9
7	北広島	402.6	2.093	43.3	4.5
8	江別太1	510.2	1.970	52.9	5.1
9	江別太2	545.9	1.895	56.6	4.1
10	当別	578.3	1.773	77.1	4.7
11	岩見沢3	664.1	1.514	93.2	4.6
12	稚内	924.8	1.542	93.8	3.9
13	北島	109.9	2.421	18.6	3.3
14	岩見沢4	292.9	2.176	32.0	4.3
15	岩内	1028.6	1.557	93.8	5.5

表-2 泥炭に含まれる細菌・放線菌の数

試料名	釧路		岩見沢1		岩内	
	菌の 種類	菌数 (cfu/g)	菌の 種類	菌数 (cfu/g)	菌の 種類	菌数 (cfu/g)
一般細菌	7	1.1×10 <sup>6</sup>	5	2.8×10 <sup>5</sup>	3	3.3×10 <sup>4</sup>
放線菌	3	3.7×10 <sup>4</sup>	1	1.7×10 <sup>2</sup>	-	-

cfu : colony forming unit (コロニーを形成する能力のある単位数)

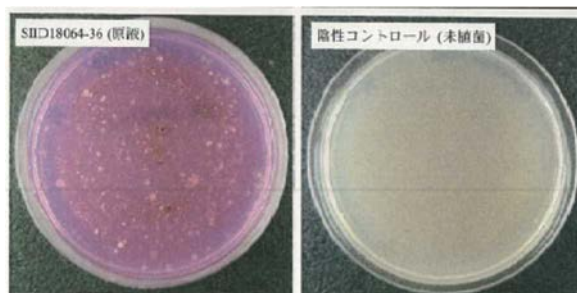
### 3.3 微生物のウレアーゼ活性

炭酸カルシウム法による固化改良では、二酸化炭素を供給するために尿素を、カルシウム源としてカルシウム化合物を投入した。尿素の加水分解により二酸化炭素が発生するが、この反応速度を高める酵素としてウレアーゼがある。改良の対象とする土砂にウレアーゼ活性を有する微生物が生息していれば、炭酸カルシウムの析出量が多くなり、対象土の強度

が大きくなると考えられる。

そこで、泥炭に含まれる微生物のウレアーゼ活性を調べた。ウレアーゼ活性は、クリステンゼン培地による方法<sup>9)</sup>より求めた。この方法は、培地がアルカリ性になると赤変することを利用したもので、培地中の尿素がウレアーゼ活性を有する微生物により加水分解されると、二酸化炭素とアンモニアが生成される。アンモニアはアルカリ性であるため、培地が赤変すればウレアーゼ活性がある微生物が存在することを示す。

写真-1はウレアーゼ活性試験結果例である。ウレアーゼ活性を有する微生物が存在すると培地が赤変し、ウレアーゼ活性を有する微生物が不在であれば培地は変化しない。No.1 から No.15 までの泥炭について試験したところ、すべての試料について培地が赤変し、ウレアーゼ活性を持つ微生物が北海道の泥炭内に普遍的に生息しているといえる。



a. ウレアーゼ活性を有す 微生物存在  
b. ウレアーゼ活性を有する微生物不在

写真-1 ウレアーゼ活性試験結果例

### 4. 炭酸カルシウム法による泥炭固化に関する試験

炭酸カルシウム法により泥炭を固化する方法を検討した。まず、ウレアーゼ活性の程度が微生物固化に影響を与えられと考えられたので、泥炭中のウレアーゼ活性を推定する方法について検討した。次に、採取した泥炭のうち代表的な一つについて炭酸カルシウム法による固化実験を行った。

#### 4.1 ウレアーゼ活性の推定

島ら<sup>10)</sup>は、電気伝導度増加量からウレアーゼ活性の程度を評価する方法を提案している。この方法が泥炭のウレアーゼ活性の程度の推定方法として適応できるかを調べた。この方法は、所定の培地により微生物を液体培養して、これに尿素溶液を混合した液体の電気伝導度を測定することにより、微生物の尿素加水分解速度を求めるものである。

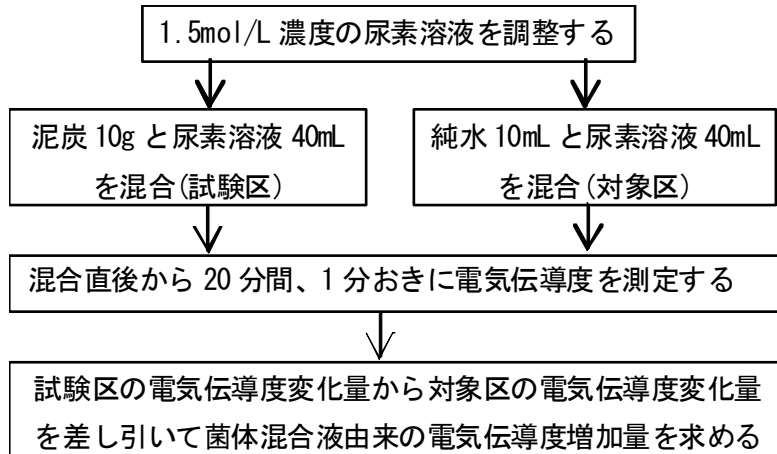


図-2 尿素加水分解速度の測定手順  
文献 11)の一部を修正簡略化

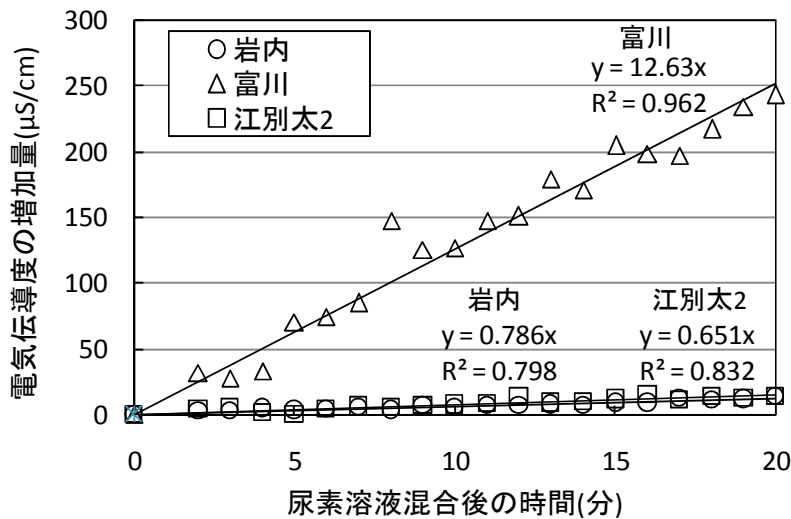


図-3 尿素混合後の時間と電気伝導度の増加量

畠らの方法は菌体の培養液 10ml と尿素溶液 40ml を混合しているが、泥炭の含水比が非常に高いことから、泥炭 10g と尿素溶液 40ml と混合して懸濁状態にして電気伝導度を測定した。図-2 に尿素加水分解速度の測定手順を示す。なお、泥炭の中から固着が可能な微生物を単離することは、高度な技術と専門的な機器装置が必要であり、土木材料として改良するための事前作業としてはあまり実用的ではない。このため、泥炭から微生物を単離することなく、自然の泥炭中に生息している微生物のウレアーゼ活性を求めることとした。

尿素溶液混合後の経過時間と電気伝導度の増加量の関係例として富川、江別太2、岩内を図-3 に示

す。経過時間に対する電気伝導度の増加量が大いこと、ウレアーゼ活性が大いことを示している。経過時間に対する電気伝導度の増加量は、岩内、江別太では小さく、ウレアーゼ活性が小さい。しかし、富川ではこれらよりは大きく、泥炭の種類によってウレアーゼ活性の程度が異なっていることがわかった。

#### 4.2 泥炭の固化実験

本検討において、改良の目標を運搬可能な程度<sup>11)</sup>の一軸圧縮強さ 50kN/m<sup>2</sup>とした。

ウレアーゼ活性を確認できた泥炭のうち江別太2 (写真-2) について炭酸カルシウム法による固化実験を試みた。江別太2 は、約 550%の高含水比で

あり、このままでは微生物を利用した固化が困難と考えられたことから、ある程度まで含水比を低下させてから尿素と塩化カルシウムを混合した。泥炭中の水分量に対して尿素は 10%、塩化カルシウムは 20%混合した。



写真－2 江別太 2 の泥炭

微生物による固化では、pH が中性域～弱アルカリ性域の場合にその効果が良好である<sup>12)</sup>。酸性の泥炭に塩化カルシウムを加えると、より酸性化すると考えられたので、pH を調整するためにアルカリ性を示す重曹を 20g 混合した。また、ウレアーゼ活性が低いと固化しないことも考えられたので、ウレアーゼ活性を高めるため、なた豆由来の酵素(ウレアーゼ)を加えたケースも設定した。

微生物による固化実験の配合を表－3に示す。各配合において、地盤工学会基準「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」<sup>13)</sup>により、直径 5cm、高さ 10cm の供試体を作製し、20℃で養生した。供試体を作製してから 1 か月後と 4 か月後に一軸圧縮強さを測定した。また、一軸圧縮強さに関係する炭酸カルシウム含有量を簡易的に測定した。これは、炭酸カルシウムが酸によって溶解した場合に、塩化カルシウムと二酸化炭素ガスを発生することから、二酸化炭素ガス圧を測定する<sup>14)</sup>ことにより、炭酸カルシウムの含有量を推定するものである。

表－3 固化実験の配合

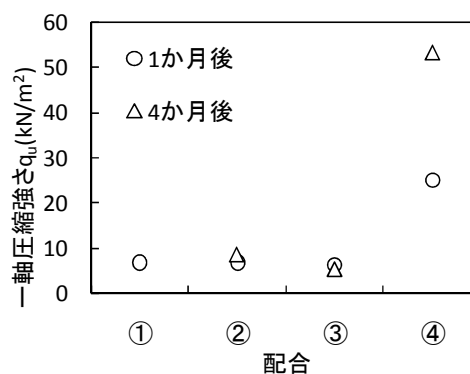
	尿素 CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	塩化カルシウム CaCl <sub>2</sub>	重曹 NaHCO <sub>3</sub>	ウレアーゼ
①	116	232	-	-
②	-	-	-	-
③	116	232	20	-
④	116	232	20	3.5

#### 4. 2. 1 改良土の一軸圧縮強さ

供試体を作製してから、1 か月、4 か月後の一軸圧縮強さを図－4に示す。一軸圧縮強さは 2 供試体の平均値である。なお、全ての配合で、供試体作製時には自立しなかった。

①、②、③は、ウレアーゼを混合しない配合である。1 か月後と 4 か月後の一軸圧縮強さは非常に小さく、時間経過による強度の変化はみられなかった。

④はウレアーゼ活性を高めるためにウレアーゼを混合した配合である。一軸圧縮強さは、1 か月後で 25kN/m<sup>2</sup>、4 か月後で 53kN/m<sup>2</sup>となり、ウレアーゼを混合することにより強度発現し、時間が経過することによって強度が増加する傾向が見られたことを確認した。ウレアーゼ活性を高めることにより、運搬可能な強度(50kN/m<sup>2</sup>)まで改良することができた。



図－4 1 か月後、4 か月後の一軸圧縮強さ

#### 4. 2. 2 二酸化炭素ガスの発生量

供試体を作製してから、1 か月、4 か月後の二酸化炭素ガス圧を図－5に示す。ガス圧は、一軸圧縮強さを測定した供試体のうちの 1 供試体から採取した 2 つの試料 10g について測定し平均したものである。供試体作製時にはガスの発生は確認されなかったが、各配合で、1 か月および 4 か月経過後の供試体においてガス圧が生じ、炭酸カルシウムが析出したものと考えられる。なお、1 か月後、4 か月後に強度発現が顕著であった④では、比較的大きなガス圧が確認された。

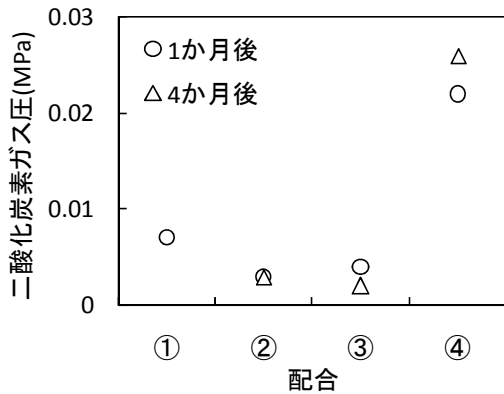


図-5 1か月後、4か月後の二酸化炭素ガス圧

次に、二酸化炭素ガス圧と一軸圧縮強さの関係を図-6に示す。ばらつきが大きいものの、二酸化炭素ガス圧が大きくなるほど一軸圧縮強さも大きくなる傾向がある。

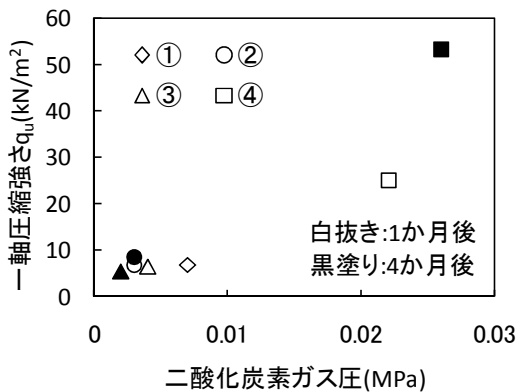


図-6 二酸化炭素ガス圧と一軸圧縮強さ

炭酸カルシウム法によりどの程度炭酸カルシウムが析出されたかを調べるため、炭酸カルシウムを0.5、1.0、2.0g、所定の濃度の塩酸に溶解させたときの二酸化炭素ガス圧を求めた。二酸化炭素ガス圧と炭酸カルシウム量の関係を図-7に示す。この図より、④の供試体では、10gの試料中に1か月後で0.9g、4か月後で1.1gの炭酸カルシウムが析出されたと推察される。

これより、泥炭中の微生物にはウレアーゼ活性があり、尿素が加水分解し炭酸カルシウムの析出を促進できれば、泥炭を固化できる可能性があるといえる。

今回の試験結果より、炭酸カルシウム法による微生物の代謝を利用した固化では、1gを超える炭酸カルシウムを析出できれば、目標とした一軸圧縮強さ  $q_u=50\text{kN/m}^2$  を確保できる可能性があるといえる。た

だし、泥炭の含水比は一般的な土砂よりもかなり高く、必ずしもこの量で目標値を満足することができないことも考えられる。

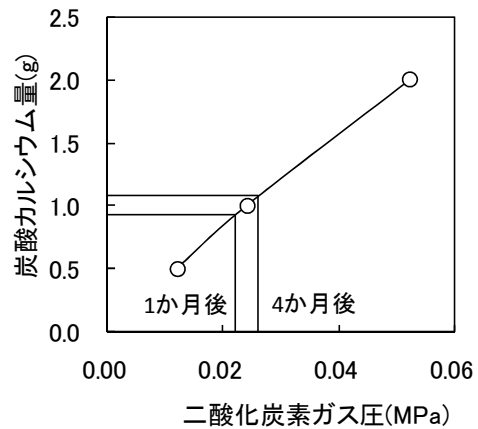


図-7 炭酸カルシウム量と二酸化炭素ガス圧との関係

## 5. まとめ

本試験の結果を次にまとめる。

- ① 調査した泥炭数のすべてでウレアーゼ活性を示す微生物の存在が確認できたが、活性の大きさには泥炭によって違いがあることがわかった。
- ② 微生物の代謝活動を促進する材料を泥炭と混合して養生することにより、運搬可能な強度である  $q_u=50\text{kN/m}^2$  を得ることができた。

## 参考文献

- 1) 能登繁幸：泥炭地盤工学、pp.4-7、技報堂出版、1991.
- 2) 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル第4版、2013.
- 3) 環境省：廃棄物の処理及び清掃に関する法律、1970.
- 4) 寺島 麗、島田俊介、小山忠雄、川崎 了：微生物に代謝により固化するシリカ系地盤注入材バイオグラウトの基礎研究、土木学会論文集 C、Vol. 65、No. 1、pp.120-130、2009.
- 5) 稲垣由紀子、塚本将康、森 啓年、中島 進、佐々木哲也、川崎 了：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、pp.157-167、2011.
- 6) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、2009.11.
- 7) 土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、2017.
- 8) T. Y. スエタニ、E. A. エーデルバーグ、J. L. イングラム、M. L. ウィーリス著、高橋 甫、斎藤日向、



- 手塚泰彦、水島昭二、山口英世訳：微生物学入門編、pp. 67-74、培風館、1980.
- 9) 坂崎利一、吉崎悦郎、三木寛二著：新細菌培地学講座・下 I、近代出版、1978.
- 10) 畠 俊郎、横山珠美、阿部廣史：尿素加水分解速度に基づく微生物固化技術の沿岸域への適用性評価、地盤工学ジャーナル Vol.8、No.4、pp.505-515、2013.10
- 11) 北海道開発局事業振興部技術管理課：北海道開発局における建設副産物適正処理の手引き、p. 20、2008.
- 12) 椋木俊文、吉永智昭、川崎 了：異なる pH および有機栄養源がバイオフィルムの生成に及ぼす影響評価に関する基礎的研究、地盤工学ジャーナル、Vol. 5、No. 1、 pp. 69-80、2010.
- 13) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、安定処理土の締固めをしない供試体作製方法、2009.
- 14) 福江正治、加藤義久、中村隆昭、森山 登：土の炭酸塩含有量の測定方法と結果の解釈、土と基礎、Vol.49、No.2、pp.9-12、2001.

## STUDY TOWARD THE APPLICATION OF A LAND-IMPROVEMENT TECHNOLOGY THAT UTILIZES MICROBIAL ACTIVITIES

In recent years, soil solidification improvement technologies that harness the metabolism of microbes in soil have been gaining attention. Such R&D has proceeded within and beyond Japan. These technologies utilize the activities of microbes in which carbon dioxide generated by the microbes reacts with calcium in the soil to produce calcium carbonate. The Geotechnical Research Team conducted an experiment to solidify peaty soil, which is widely distributed in Hokkaido, by using microbes existing in the soil of the construction site.

It was found possible to estimate the degree of urease activity, which influences the solidification of peaty soil in calcium carbonate soil solidification, and it was found that the method could be used to solidify peaty soil.

Key words : soil solidification, utilizes microbial activities, calcium carbonate, peat, urease activity

Budget : Grants for operating expenses  
General account  
Research Period : FY2014-2016  
Research Team : Cold-Region Construction  
Engineering Research Group  
(Geotechnical)  
Author : HAYASHI Toshihiro  
YAMANASHI Takahiro  
SATO Atsuko