

## 微生物代謝によって改良された豊浦砂の等方圧縮・三軸圧縮挙動

### Behavior of Isotropic and Triaxial Compression of Toyoura Sand Improved by Microbial Carbonate Precipitation

塚本将康 Masayoshi TSUKAMOTO (川崎地質(株) 首都圏事業本部(元土木研究所交流研究員))  
 小田和広 Kazuhiro ODA (大阪大学大学院 工学研究科)  
 稲垣由紀子 Yukiko INAGAKI ((国研) 土木研究所 地質・地盤研究グループ)  
 佐々木哲也 Tetsuya SASAKI ((国研) 土木研究所 地質・地盤研究グループ)

微生物代謝を利用し、炭酸カルシウムを析出させることによって地盤改良を行う新たな技術が提案されている。この技術によって改良された土の力学特性は、微生物・栄養塩等の添加条件および土の種類・密度の影響を顕著に受けることが知られている。本研究では、この技術の実用化に向け、設計上必要な強度・変形特性を把握する目的で、等方圧縮・三軸圧縮試験を行った。試験では、まず、供試体に対して等方圧力の載荷・除荷を繰返し、等方圧縮挙動を把握する。その後、三軸圧縮試験を実施した。その結果、相対密度が大きいほど、また炭酸カルシウム析出比が大きいほど圧縮性は減少する。炭酸カルシウム析出比の増加に伴い、最大主応力差、剛性、残留時の主応力差ともに増加することが明らかとなった。

キーワード：微生物代謝，炭酸カルシウム，等方圧縮，三軸圧縮 (IGC : D-5, D-6, D-10)

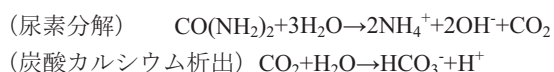
#### 1. はじめに

近年、新しい地盤改良技術として微生物代謝を利用した地盤改良技術が提案され、実用化に向けた研究開発が行われている。この技術によって改良された土の力学特性は、微生物・栄養塩等の添加条件、土の種類・密度の影響を顕著に受けることが知られている。本研究では、この技術の実用化に向け、設計上必要な強度・変形特性を把握する目的で、等方圧縮・三軸圧縮試験を行った。その結果を報告する。

#### 2. 既往の研究

微生物代謝を利用した地盤改良技術の先駆的な研究として、Whiffin et. al.の研究<sup>1)</sup>が挙げられる。彼らは、微生物代謝により発生する二酸化炭素と栄養塩中のカルシウムを反応させることによって炭酸カルシウムを析出させ、地盤を改良させる技術(以下、本手法を炭酸カルシウム法と記す)を提案した。

この手法では、まず、微生物の尿素分解作用を利用して二酸化炭素を発生させる。発生した二酸化炭素は間隙水中のカルシウムと反応し、炭酸カルシウムが析出する。そしてそれが土粒子同士を接合し、その結果、地盤は改良される。この間の反応式は下記ようになる。



炭酸カルシウム法を適用する際には地盤へ注入する微生物の培養やそれを活性化させるための栄養塩の添加が必要となる。表-1 および表-2 はそれぞれ、微生物として *Sporosarcina Pasteurii* (ATCC11859)を用いる場合の培養基と栄養塩の組成を示している。これらの添加条件によって地盤の改良の程度が異なる。

表-1 培養基の組成

試薬名	添加量
0.13M Tris (pH=9)	0.13mol=15.75g
Yeast extract	20g
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10g
Distilled Water	1L

表-2 栄養塩の組成

試薬名	添加量
Nutrient broth	3g
NH <sub>4</sub> Cl	10g
NaHCO <sub>3</sub>	2.12g
Urea	0.5mol=30.03g
CaCl <sub>2</sub>	0.5mol=55.49g
Distilled Water	1L

塚本らは、炭酸カルシウム法により豊浦砂の供試体を固化させ、圧密排水三軸圧縮試験を実施し、炭酸カルシウムの析出量とせん断強さの関係を明らかにしている<sup>2)</sup>。それによれば、炭酸カルシウム析出量が無析出のケースと比較して 200kg/m<sup>3</sup>析出させたケースではピーク強さが 10~25 倍増加することが報告されている。

また稲垣らは、動的遠心力载荷模型実験を実施し炭酸カルシウムの析出が液状化対策効果に与える影響を明らかにしている<sup>3)</sup>。それによれば、砂質量に対する炭酸カルシウム析出質量の比が2%に達すると、液状化対策としての効果が期待されることが報告されている。

### 3. 試験方法

#### 3.1 供試体作製方法

本研究では、試験試料として豊浦砂を用いた。図-1に示すモールドを用いて供試体を作製した。供試体の作製手順を図-2に示す。

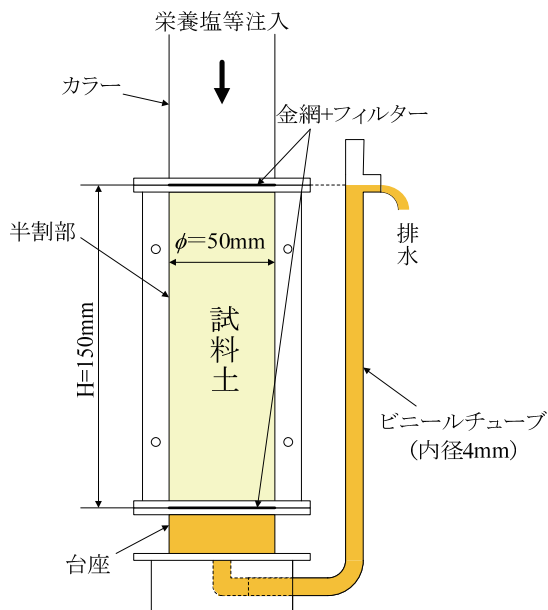


図-1 モールドの模式図

まず、モールドの内側壁面にシリコングリスを薄く塗布する。台座、半割部のモールドを組み立てた上で、所定の密度となるように空中落下法により試料土を投入する。その後、モールド下部から蒸留水を注水し、試料土を飽和させる。室温 22℃の室内で飽和後、微生物として *Sporosarcina Pasteurii* を 30℃で培養した培養液をモールド上部から 250mL 注入する。全て培養液が試料土に浸透したことを確認した後、栄養塩をモールド上部から注入する。この際、1 回当たりの栄養塩の注入量は 200mL とし、自然流下により注入する。1 回当たりの注入に要する時間は、固化の進展にもよるが、約 30～60 分程度である。栄養塩の注入後、所定の時間静置し、固化反応を待つ。今回の場合、Inagaki et. al.<sup>4)</sup>の研究成果を参考にし、12 時間経過後に次の栄養塩を注入することとする。この栄養塩の注入回数が土の固化の程度(炭酸カルシウム析出量)を支配する。所定の回数の栄養塩の注入が完了した後、蒸留水を注入し、間隙中の栄養塩を洗い流す。その後、モールドごと冷凍庫に入れて試料土を凍結させる。ただし、凍結による試料土の膨張を低減させるため、吸引に

より間隙水を脱水する。凍結後、試料土をモールドから脱型し、供試体サイズ(直径 5cm×高さ 10cm)となるように旋盤および電動カッターを用いて整形する。整形終了後、供試体は試験に供するまで冷凍庫で保管する。写真-1 はこのようにして整形された後の供試体を示している。

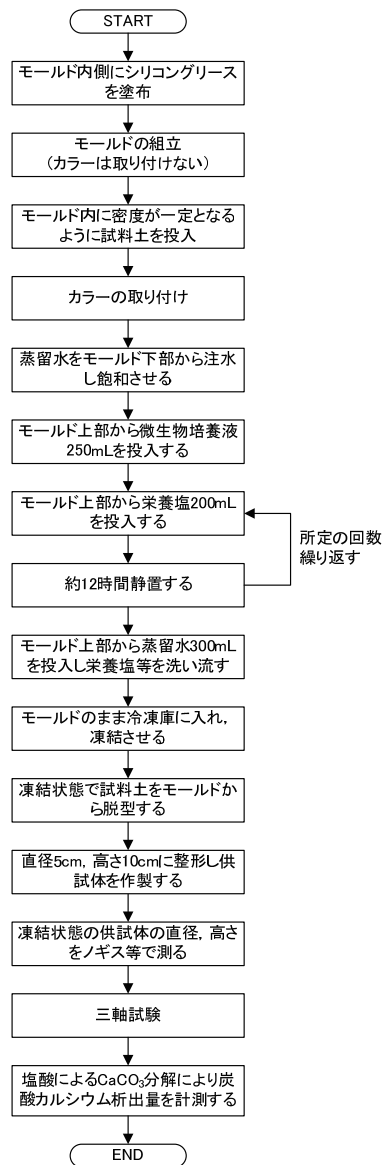


図-2 試料土・供試体作製から実験までのフロー



写真-1 整形後の供試体

### 3.2 三軸試験装置の概要

本研究で使用した三軸試験装置の概要を図-3 に示す。本試験装置は、軸力、セル圧、背圧のそれぞれを自動で制御することが可能であり、等方応力状態での加圧・減圧、およびひずみ制御・応力制御での軸荷重載荷が可能となっている。

本研究では、供試体の飽和過程までは手動により実施したが、飽和後の背圧上昇・等方圧縮過程、軸圧縮過程は全て自動制御により実施した。

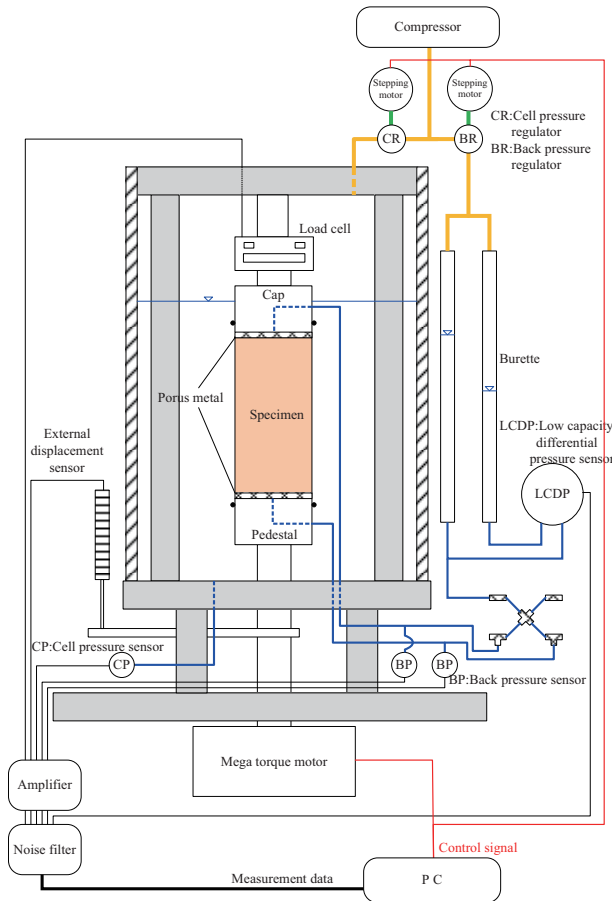


図-3 三軸試験装置の概要

### 3.3 等方圧縮・三軸圧縮試験

表-3 は試験ケースを示している。初期相対密度と栄養塩の通水回数を変動パラメータとした全 15 ケースの試験を実施した。なお、 $D_r=15\%$ の試験ケースでは、3.1 の供試体作製過程における飽和の際の水締め効果により、 $D_r=35\%$ 程度に密度が増加している。

等方圧縮・三軸圧縮試験は次の手順に従って実施した。まず、凍結状態で供試体のサイズ（直径と高さ）を測定し、その後、供試体にゴムスリーブを被せ三軸セルにすばやく設置する。セルカバーを被せない状態で、背圧として $-30\text{kPa}$ の圧力（有効拘束圧  $30\text{kPa}$ ）を与え室温にて解凍させる。解凍時間は、解凍に伴う収縮による軸変位が収束するのを目安とし、室温  $22^\circ\text{C}$  の環境下において解凍時間を 90 分とした。

表-3 試験ケース

CASE	目標相対密度 $D_r$ (%)	栄養塩通水回数	炭酸カルシウム析出比 (%)
L-P0	15 (39.7)	0	-
L-P1	15 (34.2)	2	1.79
L-P2	15 (29.2)	4	4.54
L-P3	15 (30.3)	8	10.89
L-P4	15 (26.3)	12	19.48
M-P0	60 (59.9)	0	-
M-P1	60 (60.2)	2	1.64
M-P2	60 (59.9)	4	4.20
M-P3	60 (59.8)	8	9.01
M-P4	60 (59.9)	12	18.34
D-P0	85 (85.0)	0	-
D-P1	85 (84.9)	2	1.48
D-P2	85 (85.1)	4	3.68
D-P3	85 (85.1)	8	8.09
D-P4	85 (84.7)	12	16.06

※相対密度のカッコ内は、水締め後の実測値

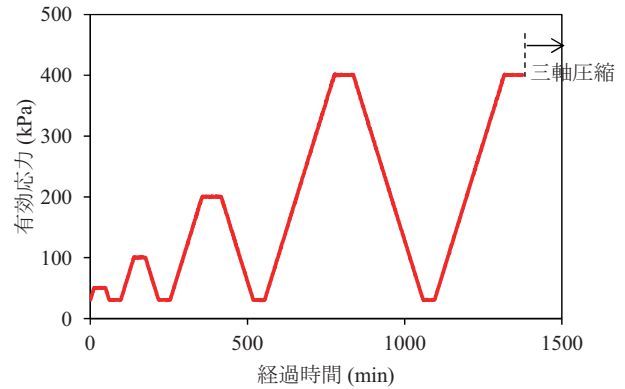


図-4 等方圧縮・膨潤過程の荷重時刻歴

解凍後、供試体の直径と高さを再度計測する。直径については、 $\pi$ テープによるゴムスリーブ上からの計測値からゴムスリーブの厚みを差し引いて求める。高さについては、解凍に伴って生じる軸変位を計測し、それを使って凍結状態での供試体高さを補正する。供試体のサイズを計測後、セルカバーを被せ、セル水を注水する。その後、二重負圧法により供試体を飽和させる。供試体を飽和させた後、背圧を  $200\text{kPa}$  まで上昇させる。ここまでの段階では有効拘束圧として解凍時と同じ  $30\text{kPa}$  を保つ。背圧を上昇させた後、排水条件で図-4 に示す等方圧縮膨潤の繰り返し荷重を実施する。等方圧縮圧力は、 $50, 100, 200, 400\text{kPa}$  まで与え、それぞれの圧縮後、 $30\text{kPa}$  まで除荷する。荷重・除荷スピードは  $20\text{kPa}/\text{min}$  とし、所定の圧力に達した後、3~5 分間その圧力を維持する。最終的に、再度、等方圧縮圧力を  $400\text{kPa}$  まで荷重したあと、排水条件で軸圧縮を行う。

試験の終了後、供試体を炉乾燥させ乾燥質量を測定する。乾燥質量を測定後、供試体に含まれる炭酸カルシウム量を、稲垣ほかに示される方法<sup>5)</sup>に基づき、塩酸での炭酸カルシウム分解による質量減少量により求める。

## 4. 試験結果

### 4.1 炭酸カルシウム析出特性

図-5 は栄養塩の通水回数と炭酸カルシウム析出比の関係を示している。各相対密度ともに通水回数の増加に伴い、炭酸カルシウム析出比が増加している。また、相対密度が小さいほど炭酸カルシウム析出比が大きいのが分かる。

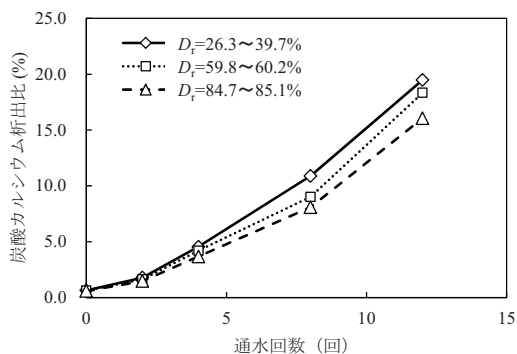


図-5 栄養塩の通水回数と炭酸カルシウム析出比の関係

### 4.2 等方圧縮挙動

等方圧縮・膨潤過程における体積ひずみと平均有効応力の関係を図-6 に示す。ここでは、例としてケース M-P1 ( $D_r=60\%$ 、栄養塩の通水回数 2 回) と M-P2 (同 4 回) を示す。

いずれのケースにおいても体積ひずみと平均有効応力の関係は非線形であり、圧縮・膨潤特性は有効拘束圧の影響を受けることが分かる。すなわち、有効拘束圧が高いレベルに比べて、それが低いレベルでは圧縮・膨潤挙動が顕著である。また、正規圧縮状態と膨潤・再圧縮過程とは明らかに圧縮特性が異なり、正規圧縮状態の方が圧縮性が高い。さらに、膨潤過程と再圧縮過程における体積ひずみと平均有効応力の関係はほぼ一致している。このように、今回試験に使用した炭酸カルシウム法により固化された豊浦砂の圧縮・膨潤挙動は、一般的な土のそれと大きな違いは認められない。

ここで、体積圧縮特性を検討するための一環として、体積圧縮挙動を式(1)で近似することとした。

$$\varepsilon_v = \alpha \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right) + \beta \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_v$  : 体積ひずみ

$p'$  : 平均有効応力

$p'_0$  : 基準時における平均有効応力 (=1kPa)

$\alpha, \beta$  : 材料定数

ここに、 $\alpha$  は圧縮性を表すパラメータであり、圧縮性が高いほどその値が大きい。

図-7 はケース M-P1 と M-P2 における正規圧縮部分における体積ひずみと平均有効応力の関係とその近似曲線をそれぞれ示している。いずれのケースにおいても近似曲線は試験結果を精度良く再現していることが分かる。

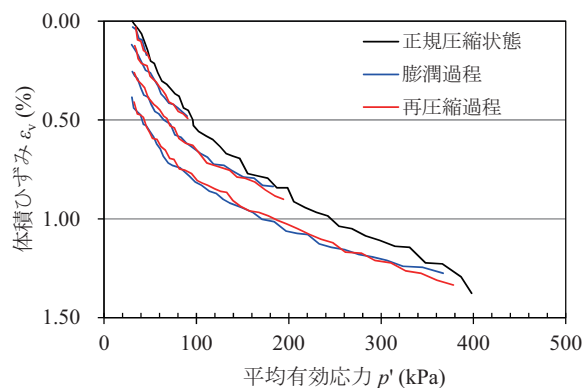


図-6(a) 等方圧縮試験結果 (M-P1)

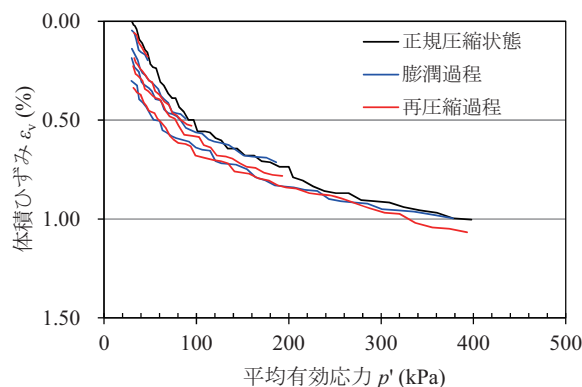


図-6(b) 等方圧縮試験結果 (M-P2)

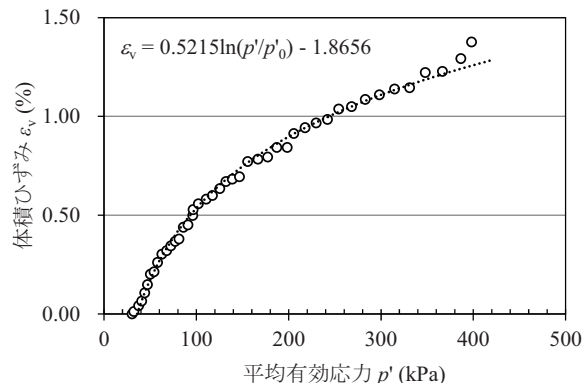


図-7(a) 正規圧縮部分の平均有効応力と体積ひずみの関係 (M-P1)

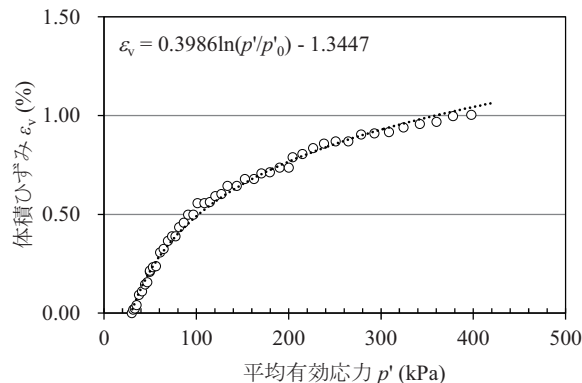


図-7(b) 正規圧縮部分の平均有効応力と体積ひずみの関係 (M-P2)



表-4 材料定数 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) の一覧

CASE	炭酸カルシウム析出比(%)	$\alpha$	$\beta$	相関係数 $R$
L-P0	-	0.56	-1.96	0.99
L-P1	1.79	0.64	-2.31	0.99
L-P2	4.54	0.46	-1.61	0.99
L-P3	10.89	0.41	-1.39	0.99
L-P4	19.48	0.31	-1.07	0.99
M-P0	-	0.50	-1.80	0.99
M-P1	1.64	0.52	-1.87	0.99
M-P2	4.20	0.40	-1.34	0.99
M-P3	9.01	0.29	-0.95	0.99
M-P4	18.34	0.25	-0.81	0.99
D-P0	-	0.44	-1.55	0.99
D-P1	1.48	0.40	-1.34	0.99
D-P2	3.68	0.32	-1.09	0.99
D-P3	8.09	0.32	-1.08	0.99
D-P4	16.06	0.20	-0.67	0.99

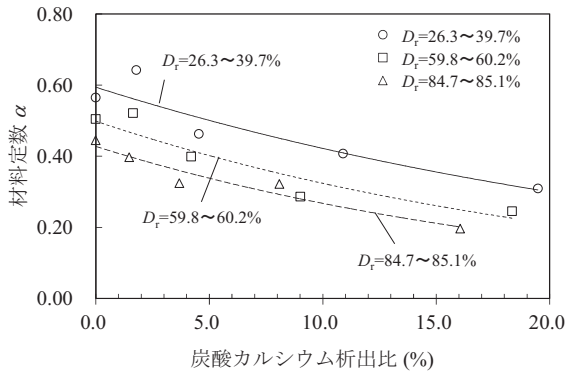


図-8 炭酸カルシウム析出比と材料定数 $\alpha$ の関係

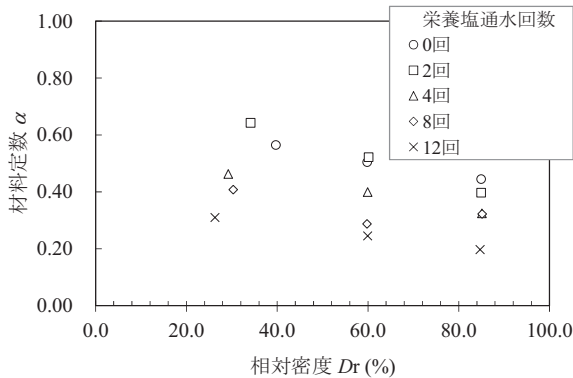


図-9 相対密度  $D_r$  と材料定数 $\alpha$ の関係

表-4 は全ての試験ケースに対する材料定数 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) と相関係数を示している。全てのケースにおいて、相関係数  $R$  は 0.9 以上であり、式(1)による近似度が高いことが分かる。

図-8 は式(1)における  $\alpha$  と炭酸カルシウム析出比の関係を示している。いずれの相対密度においても、 $\alpha$  は炭酸カルシウム析出比の増加に伴い減少している。このことは圧縮性が小さくなることを意味している。

図-9 は  $\alpha$  と相対密度の関係を示している。栄養塩注入回数と同じ、つまり析出比が同程度であれば相対密度が

大きいほど  $\alpha$  は小さい。すなわち、圧縮性が小さくなっている。栄養塩を注入しないケースに対する  $\alpha$  の減少量は相対密度が小さい程大きい。すなわち、相対密度が小さい程、圧縮性に対する改良効果が大きい。ただし、栄養塩の通水回数が 12 回であっても  $\alpha$  は相対密度が小さい程大きい。すなわち、栄養塩の通水回数、つまり、炭酸カルシウム析出量が大きくなっても圧縮性は初期の状態の影響を受ける。

### 4.3 三軸圧縮挙動

等方圧縮試験の後、有効拘束圧 400kPa にて三軸圧縮試験をおこなった。 $D_r=60\%$  の供試体を例に、その軸ひずみと主応力差、体積ひずみ関係を図-10 に示す。栄養塩 2 回注入 (M-P1) における最大主応力差は、無析出 (M-P0) におけるそれと有為な差があまり見られない。一方、栄養塩 4 回 (M-P2)、8 回 (M-P3) および 12 回 (M-P4) における最大主応力差は、無析出におけるそれに比べ著しく増加している。試験では、炭酸カルシウム析出比が大きいほど最大主応力差が大きくなるという炭酸カルシウム法の特徴がよく調べられている。

次に、軸ひずみ 0.5% 程度までの主応力差-軸ひずみ曲線の傾きに注目すると、炭酸カルシウムを析出させたケースの曲線の傾きは無析出のそれよりも大きい。

最後に、体積ひずみの変化に着目すると、炭酸カルシウム析出比が多いほど、小さい軸ひずみで膨張側の体積ひずみが生じているのが確認できる。また、主応力差が最大になるまでの体積ひずみ-軸ひずみ曲線における傾

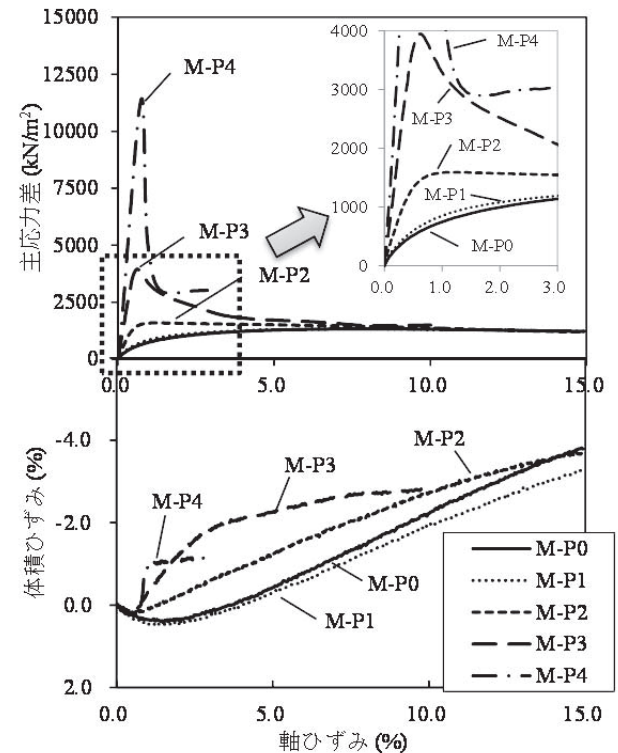


図-10 三軸圧縮過程での軸ひずみと主応力差、体積ひずみの関係

きは栄養塩の注入回数が多いほど大きい。このことは、改良土のダイレイタンスー特性は炭酸カルシウムの析出量の影響を受けることを示している。

なお、塚本ほかの研究から、粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  といった強度定数についても炭酸カルシウム析出量に応じて増加することが報告されている<sup>2)</sup>。

図-11には、相対密度ごとに炭酸カルシウム析出比と最大主応力差と残留時の主応力差の関係を示す。炭酸カルシウム析出比の増加とともに最大主応力差、残留時主応力差ともに増加しているのがわかる。

図-12には、相対密度ごとに炭酸カルシウム析出比と三軸圧縮時の軸ひずみ0.5%時点の剛性の関係を示す。炭酸カルシウム析出比の増加とともに剛性がほぼ単調に増加しているのがわかる。

これらのことから、微生物代謝による炭酸カルシウム析出により強度特性が改善されることを示している。

## 5. まとめ

本研究では、微生物代謝によって改良された豊浦砂の強度・変形特性を把握する目的で、等方圧縮・三軸圧縮試験を行った。本研究における主な知見を以下にまとめる。

- (1) 等方圧縮試験結果から、体積ひずみと平均有効応力の関係は非線形であり、等方圧縮・膨潤特性は有効拘束圧の影響を受ける。
- (2) 圧縮性を表す $\alpha$ は、炭酸カルシウム析出比の増加に伴い減少する。このことは圧縮性が小さくなっていることを意味する。
- (3) 同じ栄養塩の通水回数であっても、 $\alpha$ は相対密度が小さいほど大きい。つまり、炭酸カルシウム析出量が大きくなって圧縮性は初期の状態(砂の密度)の影響を受ける。
- (4) 三軸圧縮試験の結果から、炭酸カルシウム析出比の増加に伴い、最大主応力差、残留時の主応力差ともに増加する。
- (5) 炭酸カルシウム析出比と三軸圧縮時の軸ひずみ0.5%時点での剛性の関係から、炭酸カルシウム析出比の増加に伴い、剛性も増加する。

以上の結果から、微生物代謝によって炭酸カルシウムを析出させることにより、強度・変形特性が改善されることを示唆している。

## 参考文献

- 1) Whiffin, V. S., Van Paassen, A.L. and Harkes, M. P.: Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique, *Geomicrobiology Journal*, 24, pp.417-423, 2007.
- 2) 塚本将康, 稲垣由紀子, 石原雅規, 佐々木哲也, 小田和広: 微生物代謝を利用して改良した砂のせん断特性

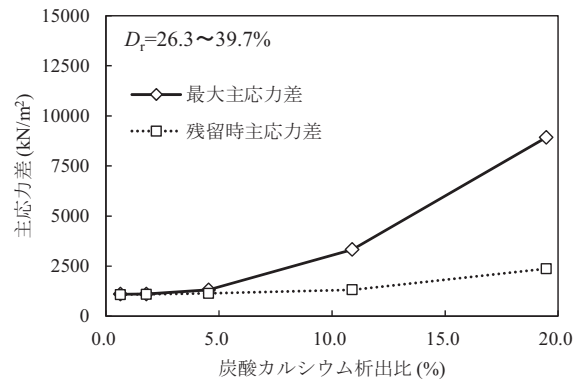


図-11(a) 炭酸カルシウム析出比と最大主応力差、残留時主応力差の関係 ( $D_r=26.3\sim39.7\%$ )

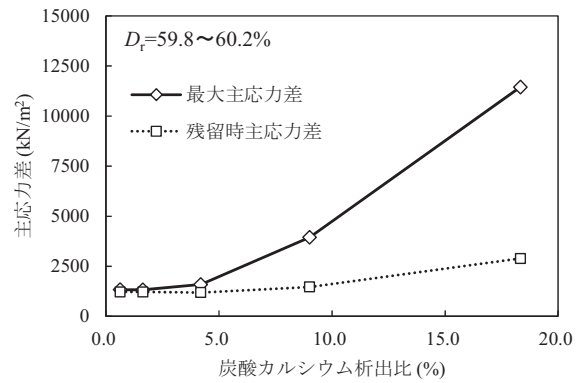


図-11(b) 炭酸カルシウム析出比と最大主応力差、残留時主応力差の関係 ( $D_r=59.8\sim60.2\%$ )

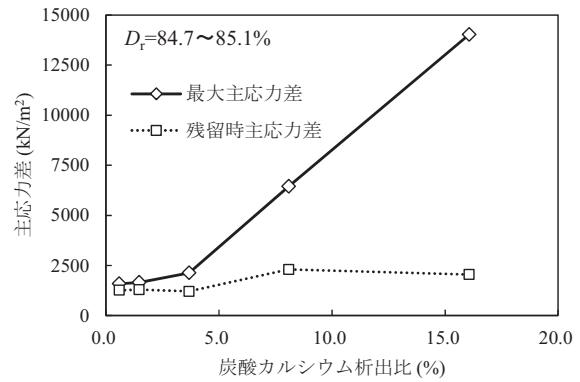


図-11(c) 炭酸カルシウム析出比と最大主応力差、残留時主応力差の関係 ( $D_r=84.7\sim85.1\%$ )

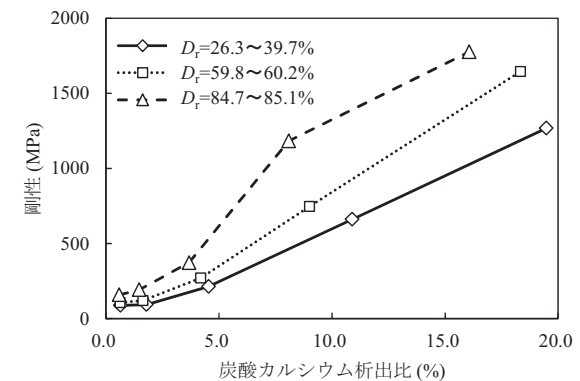


図-12 炭酸カルシウム析出比と剛性の関係

と改良過程での透水性の変化, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 323-328, 2012.

- 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, 2011.
- 4) Inagaki, Y., Tsukamoto, M., Mori, H., Sasaki, T., Soga, K., Qabany, A. Al., and Hata, T.: The influence of injection

conditions and soil types on soil improvement by microbial functions, *Geo-Frontiers 2011*, ASCE, pp.4021-4030, 2011.

- 5) 稲垣由紀子, 塚本将康, 森啓年, 佐々木哲也, 曾我健一, Ahmed Al Qabany, 畠俊郎: 微生物代謝による地盤固化への栄養塩等注入条件に関する実験, 第45回地盤工学研究発表会 CD-R, pp.1965-1966, 2010.

(2015年6月22日 受付)

