

## 炭酸カルシウム結晶析出による砂の液状化特性の改善効果

林 和幸<sup>1</sup>, 岡村 未対<sup>1</sup>, 安原 英明<sup>1</sup>

1 愛媛大学大学院 理工学研究科 生産環境工学専攻

## 概 要

炭酸カルシウム結晶を析出させた砂の液状化特性を明らかにするため、ゆるい炭酸カルシウム析出砂の非排水繰返し三軸試験を行った。また、析出した結晶による砂粒子間のボンディング形成の有無が液状化抵抗に及ぼす影響を調べるため、結晶析出砂を攪乱・再構成し、ボンディングの効果を除去した供試体の試験も行った。その結果、砂供試体中に析出した結晶は、ゆるい砂の液状化強度・変形特性を著しく改善することが分かった。液状化強度の増加は、結晶により形成されたボンディングが主たる要因であること、結晶析出砂の液状化強度は、正規化せん断弾性係数と液状化強度の関係を基に評価できることが明らかとなった。

キーワード：液状化，地盤改良，炭酸カルシウム，せん断弾性係数

## 1. はじめに

微生物の代謝を利用して、間隙に炭酸カルシウムの結晶を析出させる地盤改良工法が注目されつつある。これは、間隙中のカルシウムイオンと、微生物の呼吸で生じた二酸化炭素を利用して炭酸カルシウム結晶を土粒子表面に析出させ、土の強度増加を図るものである。

Deyong et. al.<sup>1)</sup>は、微生物の代謝で生じた炭酸イオンと注入溶液中のカルシウムイオンの結合により、間隙に炭酸カルシウム結晶を砂供試体中に析出させ、有効拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kPa}$ で三軸試験を行った。その結果、無改良砂の降伏時のせん断強度が約 $50\text{kPa}$ であったのに対し、微生物による結晶析出砂では約 $200\text{kPa}$ と4倍に増加することを示した。杉本ら<sup>2)</sup>は、ため池から採取した微生物を用い砂供試体中に炭酸カルシウムを析出させ、せん断波速度が無改良の砂の約2倍になったと報告している。また、微生物代謝を利用して析出させた結晶が、砂の透水性に及ぼす影響についても研究が進められている。川崎ら<sup>3)</sup>や畠ら<sup>4)</sup>またはNemati et. al.<sup>5)</sup>は、イースト菌あるいはため池から採取した微生物を用い、析出した炭酸カルシウム結晶が間隙を小さくすることで、透水係数が無改良の砂と比べ1オーダー小さくなることを示した。これらの研究は、微生物代謝を利用して、砂の力学特性を改善することが可能であり、これを用いた地盤改良工法の可能性を示すものである。

これらの研究では、微生物の代謝により炭酸カルシウムを析出させている。微生物数や代謝量は、気温や栄養分の流入の有無などの環境の変化により著しく変化することから、微生物代謝を利用した方法では、たとえ室内における試験であっても析出量を精度よく制御するのは容易で

はない。そこで林ら<sup>6)</sup>は、砂の力学特性に及ぼす結晶析出のみの影響を把握するため、微生物の代謝によらず化学変化のみで供試体内に結晶を析出させ、析出量や析出形態と力学特性の関係を調べた。炭酸ナトリウム粉末を混ぜた豊浦砂供試体に塩化カルシウム水溶液を通水して、間隙内に炭酸カルシウム結晶と水のみが存在する供試体を作製しCD試験を行ったところ、砂質量の1~3%程度の炭酸カルシウム結晶を析出させることで、無改良の豊浦砂と比べ結晶析出砂のピーク強度は10~35%、初期ヤング率は2~2.5倍程度増加した。また、せん断初期の体積圧縮量が減少したことから、液状化強度特性も改善されることが予想された。

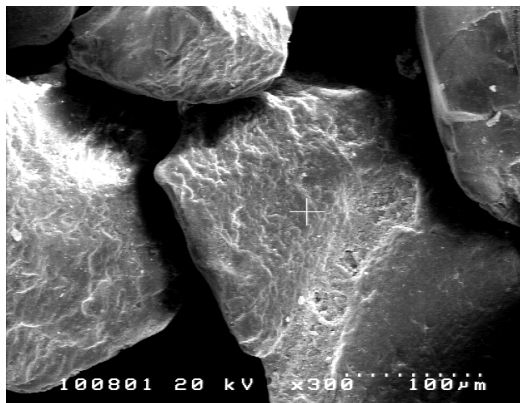
セメント混合やシリカ系薬液注入などの固化処理による砂の液状化対策については、これまで数多く研究されている<sup>例えば7)8)</sup>。これら固化処理による砂の静的せん断強度の増加は、主として固化材の砂粒子結合による砂への粘着力の付与によるものである。一方、炭酸カルシウム結晶が析出した砂では、析出量が砂質量の1~3%程度の場合粘着力は付与されず、結晶析出砂の静的せん断強度の増加は、砂粒子表面に付着した結晶(写真1)による表面摩擦や正のダイレイタンスの増加による内部摩擦角 $\phi_d$ の増加に起因する<sup>6)</sup>。このように、粘着力の付与ではなく、表面摩擦や正のダイレイタンスの増加により静的せん断強度が増加した砂の液状化特性については、これまで研究が行われていない。そこで本研究では、炭酸カルシウム結晶析出砂の液状化特性を明らかにすることを目的として、炭酸カルシウム析出の有無や量を変えた砂について非排水繰返し三軸試験を行った。また、結晶を析出させた供試体を一度攪乱し同じ密度に再構成した供試体を用いた非排水繰返

しせん断を行い、結晶による固結(以下、ボンディングと称する)、またはそれによる剛性の違いが液状化特性に及ぼす影響についても調べた。

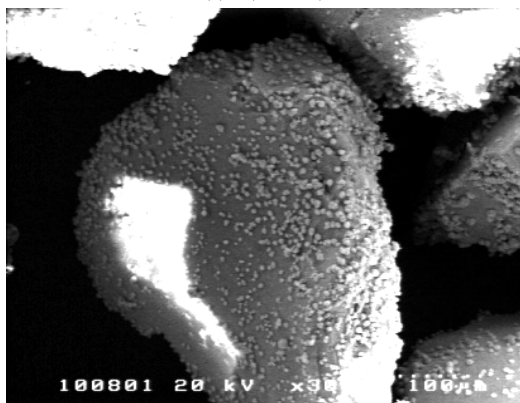
## 2. 試験方法

### 2.1 結晶析出方法

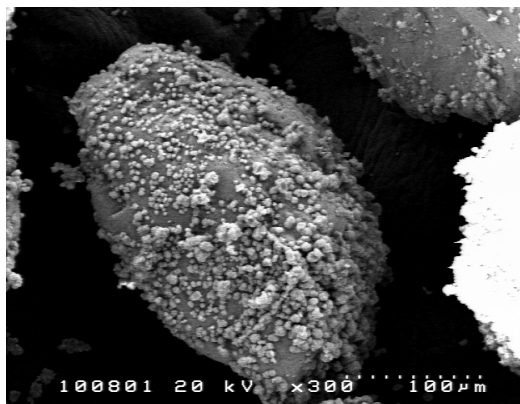
本研究では、所定量の炭酸ナトリウム(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)微粉末を



(a) N(析出無)



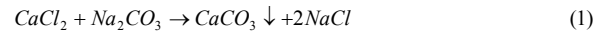
(b) P<sub>L</sub>(析出少)



(c) P(析出多)

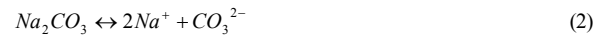
写真 1 SEM で撮影した砂粒子表面<sup>6)</sup>

あらかじめ砂に混ぜて作製した供試体に、塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)水溶液を通水し、砂供試体中に炭酸カルシウム結晶を析出させることとした。着目した化学反応式を式(1)に示す。



炭酸カルシウム結晶は、以下 2 つのプロセスが同時に進行して析出される。

- 砂に混ぜた炭酸ナトリウム粉末が塩化カルシウム水溶液の通水により溶解・電離し、間隙を満たす溶液中に炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)とナトリウムイオン(Na<sup>+</sup>)を供給する(式(2))。
- 通水した塩化カルシウム水溶液(式(3))に含まれるカルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)と、炭酸ナトリウム粉末の溶解で間隙水中に供給された炭酸イオンが結合し、炭酸カルシウム結晶が析出する(式(4))。



砂に混ぜた炭酸ナトリウム、供試体に通水する水溶液中の塩化カルシウム、析出物質である炭酸カルシウムおよび副産物である塩化ナトリウムの溶解度を表 1 に示す。

### 2.2 供試体作製方法と試験条件

本研究で用いる供試体は、無改良砂、結晶析出砂、および結晶析出供試体の攪乱・再構成砂の 3 種類である。それぞれ、1)豊浦砂、2)炭酸ナトリウム微粉末を混合した豊浦砂、および 3)2)の結晶析出供試体を 425µm メッシュのふるいにかけて攪乱した試料を用い、いずれも空中落下法により供試体(φ5cm, H10cm)を作製した。

図 1 に、試験装置の概要を示す。供試体への薬液注入は、一般に応力解放状態で行われるが<sup>11)</sup>、東畑ら<sup>12)</sup>や岡ら<sup>13)</sup>の研究では、薬液注入時の拘束圧の有無により改良砂の固結状況や力学特性が異なることが指摘されている。特に、本研究の様に析出させる炭酸カルシウム結晶の量が砂の

表 1 各化学種の化学的特性<sup>9)</sup>

名称	式量 (g/mol)	溶解度 (20°C)
塩化カルシウム (CaCl <sub>2</sub> )	110.98	42.7g/水 100g
炭酸ナトリウム (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	105.99	18.1g 水 100g
炭酸カルシウム (CaCO <sub>3</sub> )	100.09	0.091g/水 100g <sup>注1)</sup>
塩化ナトリウム (NaCl)	58.44	26.4g 水 100g

注1)文献10)に示される炭酸カルシウムの溶解度0.91g/Lを基に、水溶液の密度を1.0kg/Lとして換算。

質量の数%と少ない場合、注入、養生後に拘束圧を与えると結晶による砂粒子間のボンディングが破壊される可能性が高く、炭酸カルシウム析出砂の液状化特性を正確に評価することが困難となる。そこで本研究では、乾燥状態の供試体有効拘束圧 $\sigma'_c$ (本研究ではいずれも 100kPa)を与えた状態で塩化カルシウム水溶液を通水し、非排水繰返し三軸試験が終了するまで有効拘束圧を一定に保った。塩化カルシウム水溶液の濃度は、間隙と同体積の塩化カルシウム水溶液を通水した時に炭酸ナトリウムが過不足なく反応するように調製し、通水量は間隙体積とほぼ等しくした。

林ら<sup>9)</sup>は、本研究と同様の供試体を用いた CD 試験において、定期的に  $4 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$  の微小な軸ひずみ振幅を供試体に加え、20°C の温度一定条件において、結晶析出に伴うヤング率の変化を調査した。その結果、いずれの実験ケースでも時間とともにヤング率が増加し、養生開始から 6~20 時間でヤング率が一定値を示した。このことから、それ以上の養生期間を設ければ供試体が力学的に定常状態になると判断し、養生期間を 24 時間に統一し実験を行っている。そこで、本研究においても、これと同様に 24 時間の養生期間を設けた。養生を終えた後、式(1)の化学反応の副産物である塩化ナトリウムの除去および飽和度を高めることを目的として、 $\sigma'_c=100\text{kPa}$  を保ちながら -90kPa 程度の背圧を与えた状態で、150ml の脱気蒸留水を通水した。副産物である塩化ナトリウムの除去は、150ml 程度の蒸留水の通水で間隙からすべて除去されることが、砂粒子表面の元素分析結果で示されている<sup>9)</sup>。脱気蒸留水を通水し、100~300kPa の背圧を与え、B 値が 0.95 以上となった

ことを確認後、初期有効応力を  $\sigma'_0=100\text{kPa}$  として非排水繰返し三軸試験を行った。また、無改良砂および再構成の供試体では、養生による結晶の再固結を防ぐため、養生は行っていない。

載荷は応力制御方式で一定振幅の正弦波として与え、載荷周波数は 0.1 または 0.05Hz とした。試験後は、供試体中の全試料を慎重にバットに取り出し、110°C の高温乾燥炉で乾燥、冷却後にその質量を計測し、試験前の砂質量との差を炭酸カルシウム析出質量とした。

試験条件を表 2 に示す。結晶を析出させる試料には、砂質量に対し 2%あるいは 5%の炭酸ナトリウム微粉末を含有する豊浦砂を用いた。豊浦砂の物理的特性を表 3 に示す。これにより、これら供試体には、砂質量に対し最大で約 2%(6g)および 5%(15g)の炭酸カルシウムが析出することになる。本研究では、林ら<sup>9)</sup>による CD 試験の結果を引用して結晶析出砂の液状化特性について考察していくため、用いる砂の種類や密度および結晶析出に関わる条件(析出量、通水条件(量、濃度)および養生条件)は、林ら<sup>9)</sup>と等しくした。相対密度  $D_r$  は全てのケースで約 50%とした。なお、ここでの相対密度は、供試体に含まれる豊浦砂のみの質量と供試体体積から求めたものである。

### 3. 炭酸カルシウム析出砂の非排水繰返し三軸試験

#### 3.1 炭酸カルシウム析出が砂の非排水繰返しせん断挙動に与える影響

図 2 に、N(析出無)と P<sub>L</sub>(析出少)の非排水繰返し三軸試験における繰返し応力比、軸ひずみ、および過剰間隙水圧

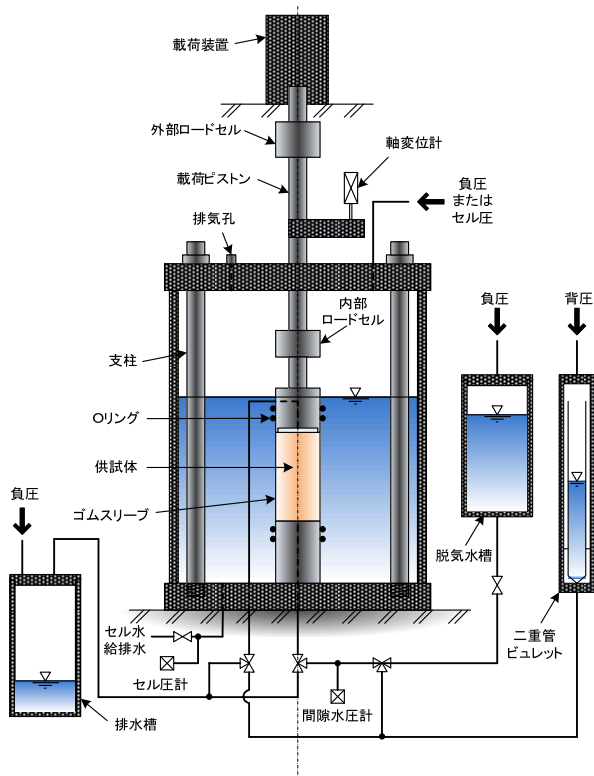


図 1 液状化試験装置

表 2 試験条件

実験ケース	$D_r$ (%)	$R_{Ca}^{※1}$ (%)	$\sigma'_0$ (kPa)	$\sigma_q/2\sigma'_0$
N	47.0~51.5	0.0	100	0.13, 0.14, 0.15, 0.17, 0.18
P <sub>L</sub>	47.6~52.2	1.17~1.44	100	0.20, 0.25, 0.40, 0.50
P <sub>L'</sub>	48.1~52.6	1.17~1.44	100	0.13, 0.15, 0.20, 0.25
P	49.3~52.2	3.12~3.59	100	0.40, 0.45
P'	48.3~50.5	3.12~3.59	100	0.15, 0.20

※1 炭酸カルシウム析出質量/砂質量

表 3 豊浦砂の物理的特性

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.64
最大間隙比 $e_{max}$	0.973
最小間隙比 $e_{min}$	0.609
平均粒径 $D_{50}$ (mm)	0.17
10%粒径 $D_{10}$ (mm)	0.11
細粒分含有率 $F_c$ (%)	0

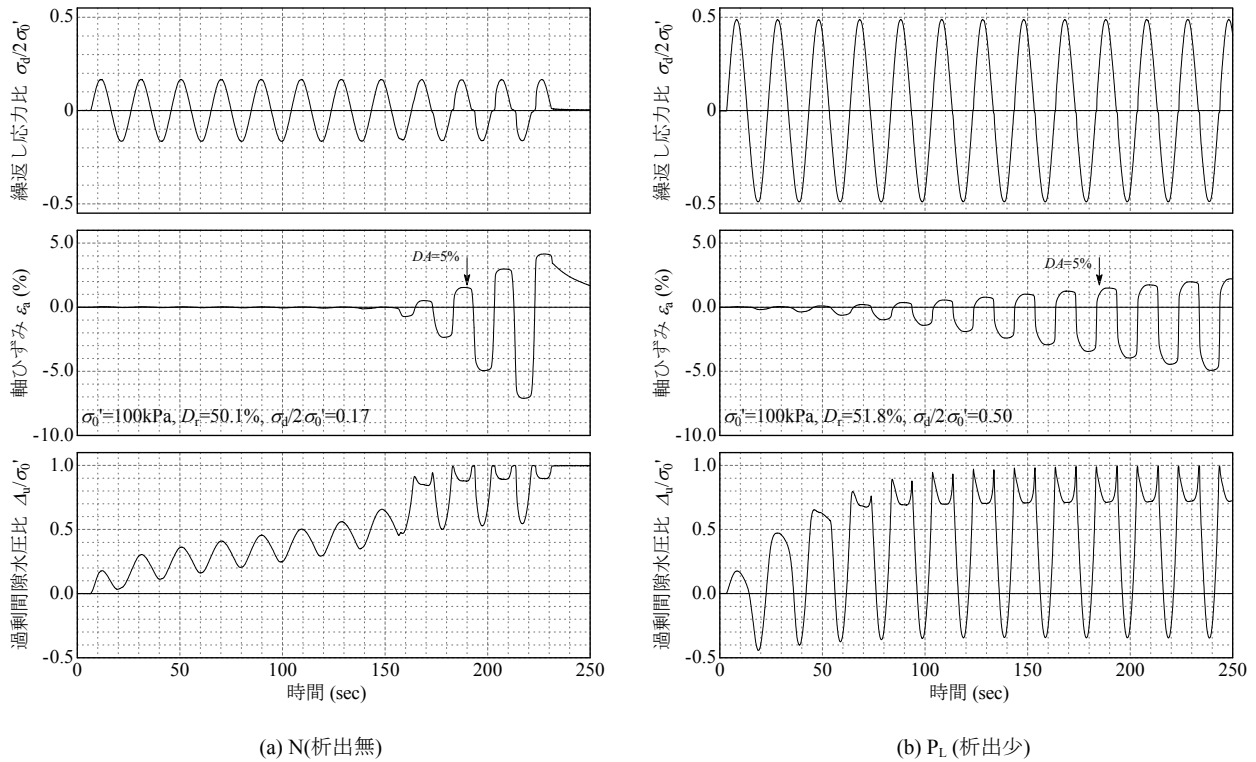


図 2 非排水繰返しせん断の時刻歴

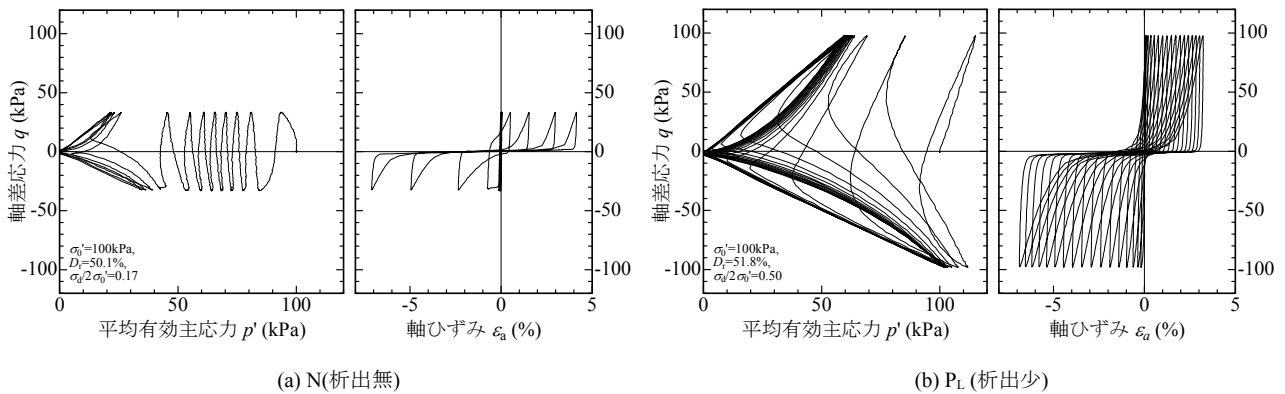


図 3 炭酸カルシウム析出砂の非排水繰返しせん断特性

比の時刻歴を示す。図には、繰返し回数が概ね 10 回で軸ひずみ両振幅が  $DA=5\%$  となるケースを選んだ。繰返し応力比は、N、 $P_L$  でそれぞれ  $\sigma_d/2\sigma_0' = 0.17, 0.50$  である。図の (a) N(析出無)では、 $t=170$  秒付近から過剰間隙水圧比、軸ひずみとも急激に増加し始め、過剰間隙水圧比が 1.0 に達した直後に軸ひずみ両振幅  $DA$  が 5% に達している。一方 (b)  $P_L$  (析出少)では、N よりも応力比が大きい比較早い段階から軸ひずみが伸び始めるが、その伸びは N と比べ緩やかである。

図 3 に、N と  $P_L$  の有効応力経路と軸差応力-軸ひずみ曲線を示す。図 3(b)  $P_L$  (析出少)では、特に載荷初期において、載荷による平均有効主応力の低下が N(析出無)に比べ

て明らかに抑制されている。

図 4 に、 $DA=5\%$  となる時の繰返し回数とせん断応力比の関係を示す。図のプロットは本研究で行った N(析出無)、 $P_L$  (析出少)、P(析出多)の結果であり、比較のため、既往の研究<sup>7,8)</sup>で行われた非アルカリシリカ薬液による改良砂、セメント混合砂、およびそれぞれの改良前の砂の液状化強度曲線を示した。図 4 より、砂質量の 1% 程度の炭酸カルシウム結晶を含む  $P_L$  の液状化強度(N=20 回での応力比)は、無析出の砂 N の約 2 倍に増加している。また 3% 程度の結晶を含む P では、せん断応力比 0.5 以上の試験においてネッキング破壊が生じたため、2 点のみのプロットとなっているが、無析出の砂 N と比べ約 4 倍程度となっているこ

とが分かる。P とほぼ等しい質量のセメント(3.7%含有)を混合した砂の非排水繰返し三軸試験<sup>7)</sup>(図4, 二点鎖線)では、無改良砂に対し液状化強度が約2倍に増加している。また、濃度3%の非アルカリシリカ溶液を注入した砂の非

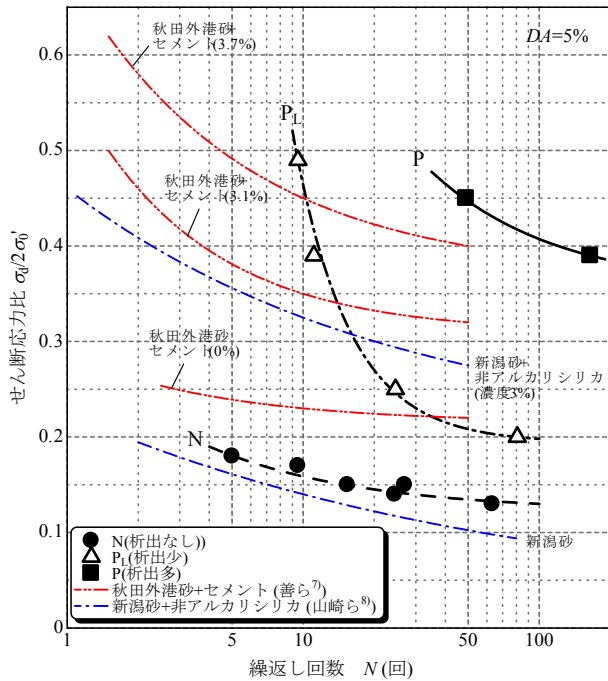


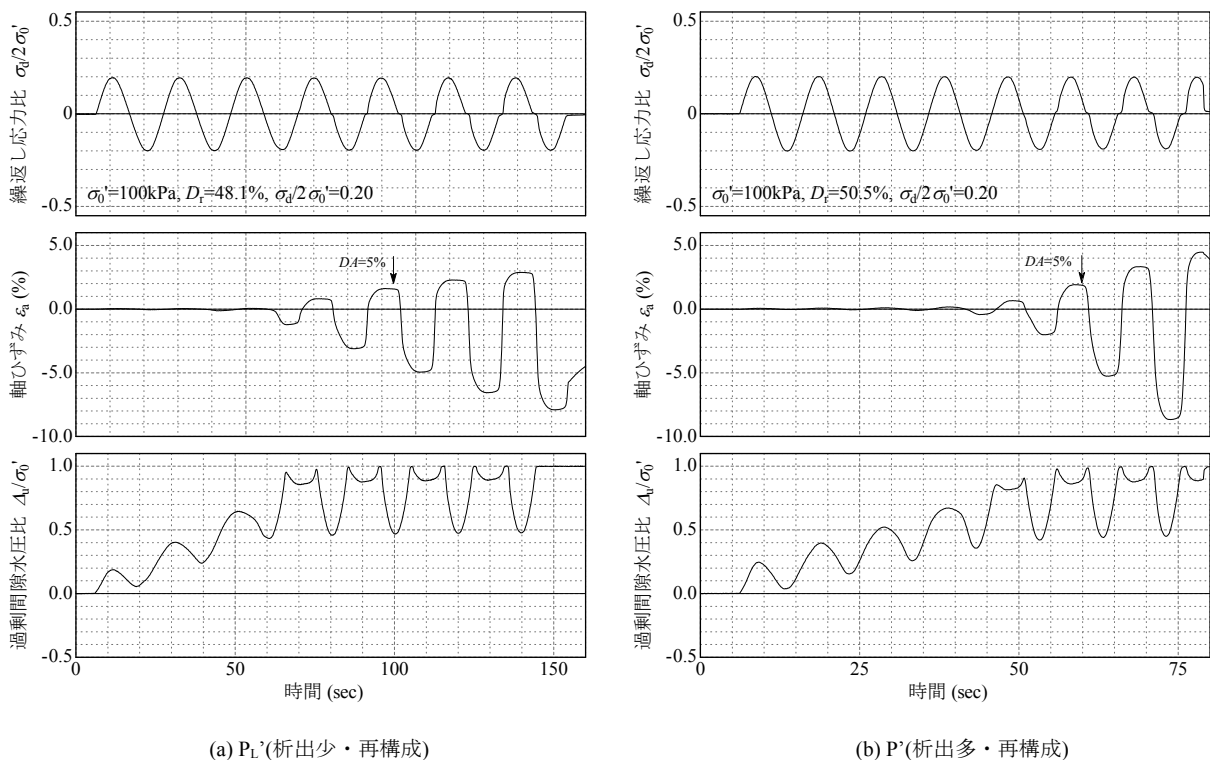
図4 対策工法による液状化強度曲線の違い(DA=5%)

排水繰返し三軸試験<sup>8)</sup>(図4, 一点鎖線)でも、無改良砂に対し液状化強度が約2倍増加している。これら他の改良砂とは、静的せん断強度増加のメカニズムや、供試体作製時の拘束圧の有無などが本研究とは異なるが、他の改良方法と同じ質量比の炭酸カルシウム析出により同程度かそれ以上の液状化強度増加を見込むことができると言えそうである。

N(析出無)からP<sub>L</sub>(析出少)にかけて結晶析出量が増加すると、液状化強度が増加するだけでなく、繰返し回数が小さい範囲での傾きが急増している。これに対して、セメントやシリカを混合したものは、無改良砂の曲線が上方へ平行移動した曲線となっており、繰返し回数が小さい範囲の曲線の勾配に顕著な変化はない。ゆるい砂に炭酸カルシウム結晶を析出させることにより、液状化強度特性が、粘り強い密な砂のそれへと変わることが分かる。

図5に、P<sub>L</sub>およびPの再構成供試体であるP'<sub>L</sub>およびP'の非排水繰返し三軸試験の繰返し応力比、軸ひずみおよび過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。繰返し応力比は、いずれもσ<sub>d</sub>/2σ'<sub>v</sub>=0.20である。P<sub>L</sub>およびPでは、過剰間隙水圧比が1.0を示してからDA=5%に達するまで、数回の繰返し載荷を要していたのに対し、P'<sub>L</sub>とP'ではこれらがほぼ同時に起こっている。

図6に、P'<sub>L</sub>およびP'の有効応力経路と軸差応力-軸ひずみ曲線を示す。P'<sub>L</sub>およびP'の有効応力経路は、図3(a)のN(析出無)と同様に、載荷による平均有効主応力の低下が大きく、P<sub>L</sub>やPで見られた結晶による過剰間隙水圧の抑



(a) P'<sub>L</sub>(析出少・再構成)

(b) P'(析出多・再構成)

図5 再構成供試体の非排水繰返し三軸圧縮試験の時刻歴

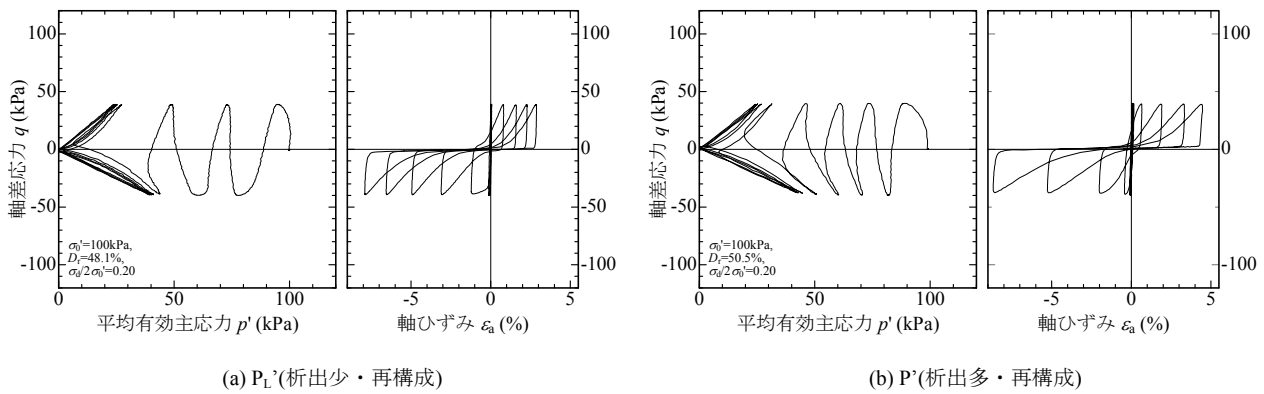


図 6 再構成供試体の有効応力経路と応力ひずみ履歴

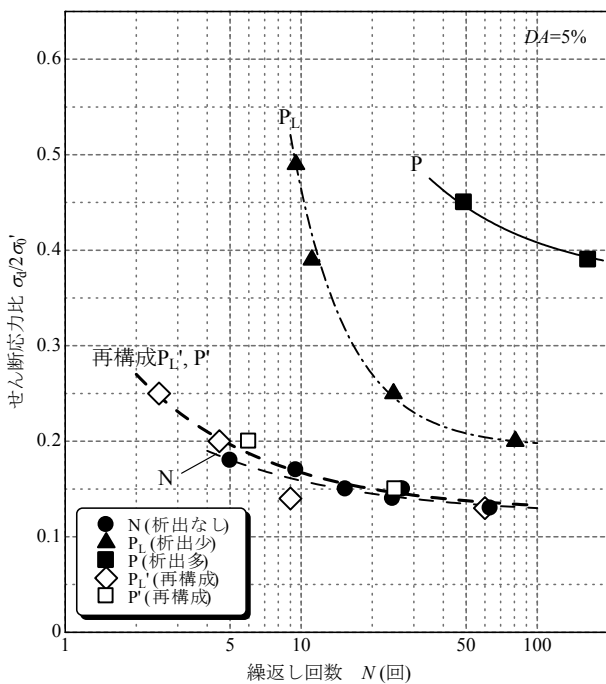


図 7 液状化強度曲線(DA=5%)

制は再構成供試体では見られない。

図 7 に、 $DA=5\%$ となる時の繰返し回数とせん断応力比の関係を示す。再構成試料である  $P_L'$  と  $P'$  の結晶量は、 $P_L$  や  $P$  と等しく、砂粒子表面には  $P_L$  や  $P$  と同様の炭酸カルシウム結晶による凹凸が存在するにも拘わらず、液状化強度( $N=20$ 回での応力比)は結晶を含まない  $N$  とほぼ等しい。すなわち、結晶量が 1~3%程度の範囲では、結晶が存在するだけでは液状化強度は増加しない。このことより、結晶析出による液状化強度の増加は、セメント混合や薬液注入と同様、固結物質による砂粒子間のボンディングが支配的要因であると考えられる。

### 3.2 炭酸カルシウム結晶析出により改善された変形特性と液状化強度の関係

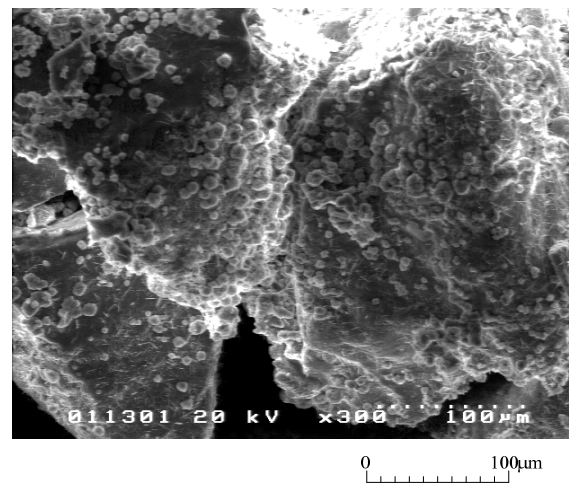
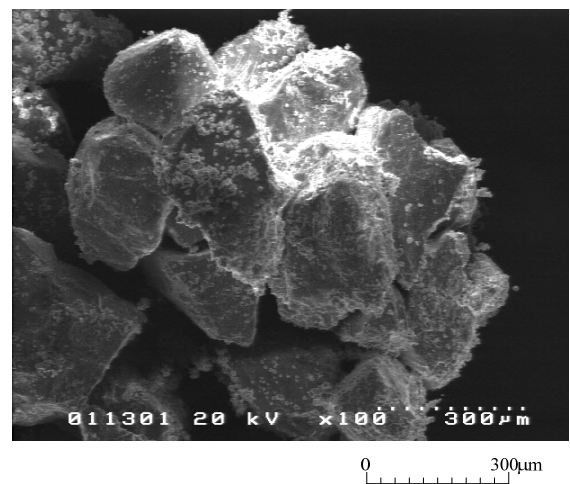


写真 2 炭酸カルシウムにより形成された砂粒子間のボンディング<sup>6)</sup>(結晶析出が砂質量の3.1%であり本研究の  $P$  に相当)

析出した結晶が砂質量の 1~3%程度の場合、結晶による砂粒子間のボンディングは、写真 2 に示す様にいくつもの細かい結晶で形成される。ボンディングはせん断の早い段階で破壊され、結晶によるボンディングの有無は排水せん断強度の大きさに影響を及ぼさない<sup>6)</sup>。一方、砂の初期ヤ

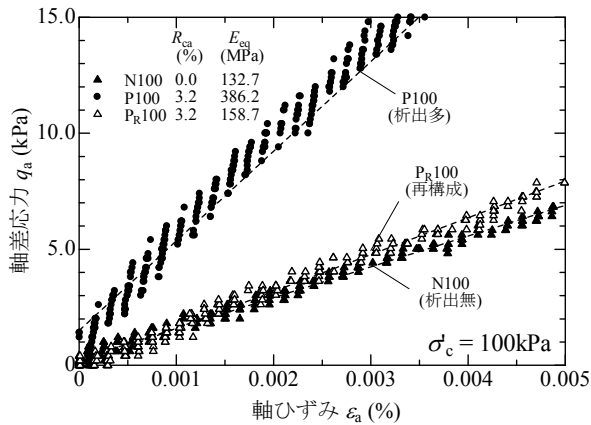


図 8 炭酸カルシウム結晶析出砂の CD 試験における微小変形領域の応力ひずみ関係<sup>6)</sup> (P<sub>R</sub>100は本研究の P'に相当)

ング率が 2 倍以上に増加することが明らかとなっている<sup>6)</sup>。  
 図 8 は、結晶析出砂の CD 試験における微小変形領域  $0 < \epsilon_a < 5 \times 10^{-5}$  の軸差応力-軸ひずみ関係<sup>6)</sup>である。図中に示した  $E_{eq}$  は、軸ひずみが  $0 < \epsilon_a < 5 \times 10^{-5}$  の平均勾配から求めたヤング率を示す。図中の N100 は無改良の砂, P100 は結晶析出砂, P<sub>R</sub>100 はその攪乱・再構成供試体であり、それぞれ本研究の P, N または P' と同じ析出量の試験である。再構成供試体である P<sub>R</sub>100 の結晶含有量は P100 と等しいにも拘わらず、ヤング率は結晶析出がない N100 とほぼ等しい結果となっている。

Tokimatsu et. al.<sup>14)</sup> は、せん断弾性係数と液状化強度の間には良い相関があることを示した。また Tokimatsu et. al.<sup>15)</sup> は後に、密度、種類およびサンプリング方法などが異なる様々な砂を対象として非排水繰返し三軸試験を行い、液状化強度と式 (6) により求めた正規化せん断弾性係数  $G_N$  の間にユニークな関係があることを示した。

$$G_N = G_0 / [F(e_{min})(\sigma'_m)^{2/3}] \quad (6)$$

$$F(e_{min}) = (2.17 - e_{min})^2 / (1 + e_{min}) \quad (7)$$

ここで、 $G_0$  は初期せん断弾性係数、 $F(e_{min})$  は式(7)で表される最小間隙比の関数であり、 $\sigma'_m$  は平均有効拘束圧である。図 9 に、Tokimatsu et. al.<sup>15)</sup> が求めた正規化せん断弾性係数  $G_N$  と液状化強度  $R_{15}$  ( $N=15$  回で軸ひずみ両振幅が  $DA=5\%$  となるせん断応力比) を示す。本研究では、変形特性試験を行っていないため、ここでは、既往の CD 試験<sup>6)</sup> で求めたヤング率を基に、側方ひずみをゼロと仮定して求めたせん断弾性係数  $G_0 (=E/2)$  を用いてプロットした。また、セメント混合砂<sup>7)</sup> および非アルカリシリカによる薬液注入砂<sup>8)</sup> についても、既往研究を基に同様にプロットした。セメント混合砂や非アルカリシリカ改良砂では、Tokimatsu et. al.<sup>15)</sup> の曲線のように右上がりの傾向が見られない。一方、結晶析出砂は、いずれもほぼ Tokimatsu et. al.<sup>15)</sup> による曲線上に位置している。このことより、結晶析出砂の液状化強度は、せん断弾性係数を基に評価することが可能であると

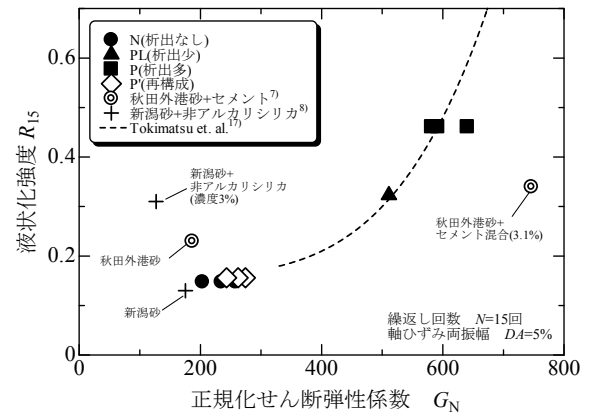


図 9 正規化せん断弾性係数と液状化強度の関係 (文献 15) に本研究の結果をプロット)

考えられる。

以上より、砂質量に対し 1~3% 程度の炭酸カルシウム結晶析出による砂の液状化強度の増加は、結晶析出により形成された砂粒子間のボンディングによる変形特性の改善が主たる要因であること、および結晶析出砂の液状化強度は、砂の正規化せん断弾性係数と液状化強度の関係を基に評価可能であると言える。

### 3.3 結晶析出による砂粒子の表面摩擦および正のダイレイタンスの増加と液状化強度増加の関係

結晶析出による砂粒子の表面摩擦と正のダイレイタンスの増加により、砂の排水せん断強度が増加することが明らかにされている<sup>6)</sup>。そこで、摩擦、および正のダイレイタンスの増加が液状化強度増加に及ぼす影響について調べた。

図 10 に、 $\sigma'_0 = 100 \text{ kPa}$  ( $P_L$  のみ  $\sigma'_0 = 50 \text{ kPa}$ ) のケースの内部摩擦角  $\phi_d$ <sup>6)</sup> と液状化強度  $R_{20}$  の関係を示す。液状化強度  $R_{20}$  は、20 回の繰返しせん断で軸ひずみ両振幅が  $DA=5\%$  に達するせん断応力比を示す。内部摩擦角  $\phi_d$  は、以下の式(5)から求めた。

$$\phi_d = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \quad (5)$$

また、P の液状化強度は、図 4 の結果を外挿して求めた。P と P' は、結晶によるボンディング形成の有無のみ異なり、相対密度や結晶量などほかの条件は等しくしている。図 10 に示すように P と P' では内部摩擦角がほぼ等しいにも拘わらず、液状化強度  $R_{20}$  は 3 倍程度異なっている。このことより、表面摩擦の増加は、液状化強度増加の主たる要因であるとは言えない。

図 11 に、 $\sigma'_0 = 100 \text{ kPa}$  (ただし  $P_L$  のみ  $\sigma'_0 = 50 \text{ kPa}$ ) のケースの主ひずみ増分比最大値  $(1 - d\epsilon_v/d\epsilon_a)_{max}$ <sup>6)</sup> と液状化強度  $R_{20}$  の関係を示す。主ひずみ増分比最大値は、その値が大きいほど正のダイレイタンスが大きいと言える。P と P' では、主ひずみ増分比最大値がほぼ等しいが、液状化強度  $R_{20}$  は

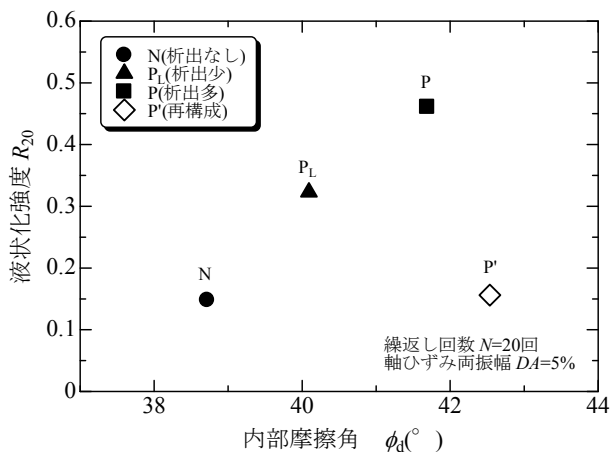


図 10 内部摩擦角と液状化強度の関係

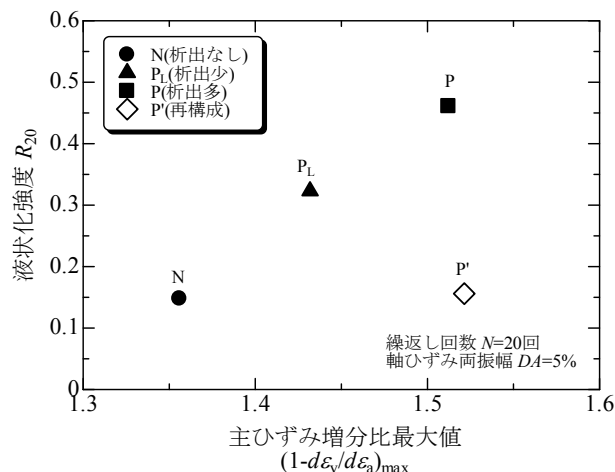


図 11 主ひずみ最大値と液状化強度の関係

図 10 と同様に 3 倍程度異なっている。このことより、正のダイレイタンシーの増加が結晶析出による液状化強度増加の主たる要因であるとは言えない。吉村ら<sup>16)</sup>は、粒子表面凹凸は砂のダイレイタンシーや $\phi_d$ の値に影響を与えるが、これと比べ液状化強度が受ける影響は小さいことを実験的に示しており、本研究の試験結果からも同じことが言える。

以上より、結晶析出による砂粒子の表面摩擦や正のダイレイタンシーの増加は、液状化強度を増加させるものではないことが明らかになった。これは、内部摩擦角や主ひずみ増分比が、数%というオーダーの比較的大きなひずみレベルで発揮される力学特性の指標であるのに対し、液状化は、間隙水圧の蓄積が小さいひずみレベルで起こる現象<sup>17)</sup>であるためであると考えられる。

#### 4. 結論

炭酸カルシウム結晶の析出が砂の液状化特性に及ぼす影響を検討するため、炭酸カルシウム結晶析出の有無と量、および炭酸カルシウム結晶によるボンディングの有無を変えた非排水繰返し三軸試験を行った。以下に、得られた結果を示す。

- 1) 砂中に析出した炭酸カルシウム結晶には、繰返しせん断による過剰間隙水圧の発生やひずみの成長を抑制する効果がある。
- 2) ボンディングを有する結晶析出砂では、炭酸カルシウム結晶析出量が多いほど液状化強度は大きい。液状化強度は、砂質量の 1%程度の結晶析出であれば、無析出砂の約 2 倍、3%程度の析出であれば約 4 倍となった。
- 3) 本研究で対象とした析出量の範囲(砂質量の 1~3%程度)では、結晶が存在するだけでは液状化強度は増加しない。結晶析出による液状化強度の増加は、結晶によるボンディングによる変形特性の改善が主たる要因である。
- 4) 本研究で対象とした析出量の範囲では、結晶析出砂の

液状化強度は、正規化せん断弾性係数と液状化強度の関係に基づいて評価することが可能である。

- 5) 本研究で対象とした析出量の範囲では、砂粒子表面に付着した結晶による摩擦の増加や正のダイレイタンシーの増加は、液状化強度に影響を及ぼさない。

#### 参考文献

- 1) Dejong, J. T., Fritzes, M. B. and Nusslein and K.: Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No.11, pp.1381-1392, 2006.
- 2) 杉本大輔, 桑野玲子: 微生物を利用した砂供試体固化の試行実験, 第 44 回地盤工学研究発表会 CD-ROM, pp.581-582, 2009.8.
- 3) 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, 2006.
- 4) 島俊郎, 桑野玲子, 阿部廣史: 微生物機能を用いた原位置透水性制御手法に関する基礎的研究, *土木学会論文集 G*, Vol.64, No.2, pp.168-176, 2008.
- 5) M.Nemati, E.A.Greene and G.Voordouw: Permeability profile modification using bacterially formed calcium carbonate: comparison with enzymic option, *Process Biochemistry* 40, pp.925-933, 2005.
- 6) 林和幸, 只信紗也佳, 安原英明, 岡村未対: 炭酸カルシウム結晶析出による砂の力学特性の改善効果, *土木学会論文集 C*, Vol. 66, No. 1, pp.31-42, 2010.
- 7) 善功企, 山崎浩之, 渡辺篤, 芳沢秀明, 玉井章友: セメント混合した砂質土の埋立工法に関する研究—改良土の基本特性と混合・埋立て実験—, *港湾技研資料*, No.579, pp.4-15, 1987.
- 8) 山崎浩之, 前田健一, 高橋邦夫, 善功企, 林健太郎: 溶液型注入固化材による液状化対策工法の開発, *港湾技研資料*, No.905, pp.10-12, 1998.
- 9) 国立天文台: 理科年表, 丸善株式会社, pp.351-564, 2008.
- 10) 化学便覧: 基礎編 II 改定第 5 版, 丸善株式会社, pp.144-159, 2004.
- 11) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説 第 1 回改訂版, pp.246-329, 2000.
- 12) 東畑郁生, 高田徹, 那須丈夫, 関口宏二, 大野康年: 一定拘束圧下における薬液浸透供試体の作成方法, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1681-1682, 2000.
- 13) 岡二三生, 小高猛司, 大野康年: コロイダルシリカのさんご



混じり砂への適用性, 土木学会論文集 C, Vol.64 No.3, pp.571-584, 2008.

- 14) Kohji Tokimatsu, Tsutomu Yamazaki and Yoshiaki Yoshimi: Soil liquefaction evaluations by elastic shear moduli, Soils and Foundations, Vol.26, No.1, pp.25-35, 1986.
- 15) Kohji Tokimatsu and Akihiro Uchida: Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity, Soils and Foundations, Vol.30, No.2, pp.33-42, 1990.
- 16) 吉村優治, 小川正二: 砂の等方圧密およびせん断特性に及ぼす粒子形状の影響, 土木学会論文集, 第 487 号/III-26, pp.187-196, 1994.
- 17) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化(第二版), 技報堂出版, p.88, 1991  
(2009.10.8 受付)

## Identification of liquefaction resistances in sand improved by calcium carbonate precipitated

Kazuyuki HAYASHI<sup>1</sup>, Mitsu OKAMURA<sup>1</sup> and Hideaki YASUHARA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

### Abstract

A suite of undrained cyclic triaxial tests was performed to clarify the effects of calcium carbonate precipitation on liquefaction resistance of sand. For the tests Toyoura sand was utilized with relative density of ca.50%. Two kinds of soil samples were prepared by mixing 1-3 wt.% precipitated calcium carbonate into Toyoura sand, and the difference of liquefaction resistances evolved under the two different initial conditions was examined. Triaxial tests results and the corresponding examinations elucidate that 1) liquefaction resistances of calcium carbonated precipitated sand increase with increase of the amount of the mineral precipitated (at maximum threefold), 2) the augmentation may be attributed mainly to improvement of deformation characteristics due to intergranular cohesion evolved by the mineral precipitation, and 3) the liquefaction resistance can be evaluated via a simple relation between normalized shear modulus and liquefaction resistance of bare sand.

Key words: liquefaction, soil improvement, calcium carbonate, shear modulus