戦-15 微生物機能による自己修復性地盤改良技術の開発(1)

研究予算:運営費交付金(一般勘定)

研究期間:平21~平22

担当チーム:材料地盤研究グループ(土質・振動)

研究担当者: 佐々木 哲也、森 啓年、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)は、既設構造物直下の改良にも適用しやすく、改良材製造時の二 酸化炭素排出の少ない地盤改良技術として期待される。

炭酸カルシウム法では、現地地盤へ微生物源やそれを活性化させる栄養塩等を土質条件等に応じて添加する必要があるため、本研究ではその方法を検討した。その結果有効と考えられた条件で微生物源や栄養塩等を注入して固化させた砂に対し、三軸圧縮試験や動的遠心模型実験を行い、強度向上効果や液状化対策効果が期待できることを確認した。

キーワード:地盤改良、炭酸カルシウム法、三軸圧縮試験、動的遠心模型実験、液状化対策

1. はじめに

地盤改良技術の一つとして、微生物代謝による二酸化 炭素と土の間隙中のカルシウム源から炭酸カルシウムを 析出させて土を固化させる方法(炭酸カルシウム法)が 存在する¹⁾。炭酸カルシウム法では、栄養塩等の注入によ り地盤中の微生物を活性化させ、土を固化させるため、 反応が緩やかに進む。このため、実用化に至れば、既設 構造物直下の改良に適し、改良材製造時の二酸化炭素の 発生が少ない地盤改良技術となることが期待できる。

本研究では、以下の化学反応式に示すような、微生物の尿素(CO(NH₂)2)分解による二酸化炭素(CO₂)と間隙中のカルシウムイオン(Ca²⁺)の反応により地盤中に炭酸カルシウム(CaCO₃)を析出させて地盤改良を行う技術について検討した。微生物は、既往の研究より尿素分解作用により炭酸カルシウムを析出させるのに有効という知見²⁾が得られている"*Bacillus Pasteurii*"

(ATCC11859) を用いた。

(尿素分解)

CO (NH₂) ₂ + 3H₂O → 2NH₄⁺ + 2OH⁻ + CO₂ (1) (炭酸カルシウム析出)

 $\mathrm{CO}_2 \ + \ \mathrm{H}_2\mathrm{O} \ \rightarrow \ \mathrm{HCO}_3^- \ + \ \mathrm{H}^+ \tag{2}$

 $HCO_3^- + Ca^{2+} + OH^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ (3) 炭酸カルシウム法を用いる際には、微生物の添加に加 えて、カルシウム源の供給と微生物代謝の活性化のため 栄養塩の注入が必要となるが、その添加条件によって $CaCO_3$ 析出量が変わる。また、既往の研究からも、炭酸 カルシウム法による土の強度向上や液状化対策としての 効果は、CaCO₃の析出量によっても変わり、CaCO₃の析 出量が多くなるほど圧縮強さや液状化強度が高くなるこ とは確認されている^{3, 4}。

そこで、本研究では、上述の既往研究の結果も踏まえ、 微生物や栄養塩の添加条件とCaCO3析出状況の関係、 CaCO3析出量と強度向上の関係を把握するとともに、 CaCO3を析出させた地盤の強度向上効果および液状化対 策効果に着目して動的遠心模型実験等を行い、炭酸カル シウム法の適用性を検証した。

2. 微生物および栄養塩の添加条件と炭酸カルシウム析 出状況

2.1 シリンジを用いた実験

図1に示すような手順を基本とし、微生物や栄養塩の 添加条件を変えて、試料土中の炭酸カルシウム析出状況 を調べた。

供試体は容量 60mL のシリンジに 25mL の蒸留水、所 定量の試料土を投入し、体積が 40mL になるように作製 した。試料土は全て、炉乾燥等により滅菌したものを用 いた。試料土の投入後、微生物として Bacillus Pasteurii 培養液(以下、培養液)を 25mL 注入した。これらの操 作後、栄養塩を試料土の上から毎回 25mL ずつ注入した。

栄養塩の注入は1日1回または2回ずつ行い、栄養 塩の注入を継続した期間(以下、通水日数)は1~14 日とした。試料土は飽和状態とし、このとき試料土の



図1 基本的な実験手順



図2 シリンジを用いた実験のしくみ

表1 栄養塩の組成(蒸留水1L当り)

成分	分量
塩化カルシウム(CaCl ₂)	0.5mol=55.49g
尿素(CO(NH ₂) ₂)	0.5mol=30.03g
ニュートリエントブロス	3g
塩化アンモニウム (NH ₄ Cl)	10g
炭酸水素ナトリウム(NaHCO ₃)	2.12g

表面と排水側で水頭が等しくなり、次回栄養塩が注入されると、前回注入されて間隙中に存在していた栄養塩が



写真1 固化して取り出された供試体の例(豊浦砂)

押し出され、排水されるしくみとした(図 2)。

注入した栄養塩は、溶液型のもので、表1に示す組成 を基本とした。表1に示す栄養塩の成分のうち、塩化カ ルシウム(CaCl₂)から、化学反応式(3)に示すCaCO₃析出 のためのカルシウムイオン(Ca²⁺)が供給される。尿素 (CO(NH₂)₂)は、*Bacillus Pasteurii*の代謝により化学反 応式(1)に示すように分解され、CO₂を発生させる。ニュ ートリエントブロスは、牛肉エキスとペプトンの粉末で、 微生物を培養する際の培地に多く用いられる成分である が、ここでは*Bacillus Pasteurii*への栄養分となる。塩化ア ンモニウム(NH₄Cl)および炭酸水素ナトリウム (NaHCO₃)は*Bacillus Pasteurii*の代謝が活性化する環境 (pH条件等)を整える役割を果たし、栄養塩の各成分に 由来するイオンが平衡してpH等の環境の急激な変化を 抑制しながら、CO(NH₂)₂の分解やCaCO₃析出の反応を進 行させる。

栄養塩の通水期間終了後、シリンジ内の試料土を取り 出し(写真 1)、試料土の間隙中に析出したCaCO3の量を 調べた。その方法は、0.5mol/L塩酸によるCaCO3の分解・ 溶出を基本とした。

なお、1 つの実験ケース(微生物の添加状件、栄養塩の添加条件(栄養塩の組成、1 日当たり注入回数、注入日数)、土質状件の組合せ)につき、供試体は3本ずつとし、CaCO₃析出量等は、3 本の供試体の平均値で評価することを基本とした。また、一連の実験では培養液中の微生物の数は数えていないが、微生物の数に大差のない条件での比較ができるよう、実験結果の比較は、同時期に作成した培養液を用いた結果同士で行うことを基本とした。

2.2 微生物の添加状件による影響

微生物は培養液として添加しており、培養液は栄養塩 注入開始前の初期に注入する方法、毎回の栄養塩注入時 に、栄養塩の体積に対して0.5%の割合で添加する方法で 添加した。

試料土を豊浦砂 60gとし、栄養塩注入開始前の初期の 培養液注入の有無、栄養塩注入時の添加の有無の条件を 変えて実験を行った。その結果、初期の培養液注入がな い場合は、栄養塩注入時に培養液を添加しても、CaCO3 がほとんど析出しなかった。一方、初期に培養液を注入 した場合、栄養塩注入時の培養液添加の有無による CaCO3析出量の違いは誤差程度のものであった⁵。

そこで、初期に添加する培養液の量を 5mL、10mL、 20mL、40mL、80mLと変えて実験を行った⁶。培養液は 同時期に作成したものを十分に混ぜ合わせてから各シリ ンジに分注したことにより、添加した微生物の量は培養 液の量に比例するものと見なした。栄養塩の注入は、培 養液の注入量を変えた条件毎に、1日2回ずつを1日、2 日、4日の繰返しの3条件で行った。注入した栄養塩は、 表1に示す組成で、pH調整や栄養塩注入時の培養液添加 は行っていない。

培養液の注入量とCaCO₃析出量の関係は図 3 のよう になった。培養液の注入量に関係なく、CaCO₃析出量は 通水日数とほぼ比例関係であった。いずれの注入条件(1 日当りの注入回数および通水日数)でも、供試体作製時 に注入した培養液の量が 20mLまでの場合はCaCO₃析出 量は培養液の注入量とほぼ比例関係であった。培養液の 注入量が 20mL以上の場合でも、培養液注入量の増加に 伴ってCaCO₃析出量も増えたが、培養液注入量の増加に 対するCaCO₃析出量の増加割合は 20mLまでと比べて低 かった。

今回の場合、シリンジ内の試料土の間隙は 25mL程度 であり、培養液の注入量が間隙の体積より少ない 20mL までは、培養液が間隙中の蒸留水と置き換わって注入し た微生物がほぼ全て間隙中にとどまり、CaCO₃析出に寄 与したと考えられる。一方、40mLや80mLでは、間隙中 の体積を置き換える分より余分な量の培養液が流出し、



図3 培養液の注入量とCaCO3析出量の関係

注入した微生物のうち、一部は間隙中にとどまらずに流 出しことが考えられる。これらの結果から、培養液の注 入量を固化させようとする土の間隙の体積と同程度にす ることが、効率良くCaCO3を析出させることにつながる と考えられる。

2.3 栄養塩の添加条件による影響

栄養塩の成分として添加するカルシウム源と尿素の濃度の違いがCaCO3析出状況に与える影響に着目した実験を行った⁷。試料土は豊浦砂60gとし、供試体は図1と同様の方法で作製した。

栄養塩の組成は**表**1 に準じたが、うちカルシウム源 (CaCl₂) とCO(NH₂)₂の注入濃度を変化させた。化学反 応式(1)~(3)より、CaCl₂とCO(NH₂)₂各 1molずつから 1mol のCaCO₃が析出することになるため、両者のモル濃度は 等しくして、0.25、0.5、0.75、1.0、1.5mol/Lと変化させ た。

いずれの組成の栄養塩でも、培養液は添加しておらず、 pHは7.0程度であり、Bacillus Pasteuriiが好むpH環境(pH =7~9程度)に近い。pHが高くなると、CaCO₃の析出が 速く進行して土の間隙中で目詰まりするクロッギングが 生じ、その箇所を境に栄養塩が到達せずに固化効果が得 られなくなる可能性があるが、栄養塩のpHが7.0程度で はクロッギングは生じないという結果を得ている⁵。一方、 pHが下がると、析出したCaCO₃が溶出するという問題が あるが、それも見られていない。このため、栄養塩に対 するpH調整は行っていない。

各組成(CaCl₂およびCO(NH₂)₂の濃度)の栄養塩でそ れぞれ、1日1回ずつを7日間、14日間の繰返し、1日2 回ずつを4日間、7日間の繰返しという4つの注入条件 で栄養塩を注入した。

CaCl₂とCO(NH₂)₂の濃度(以下、注入濃度)とCaCO₃ 析出量の関係を図4に示す。実験結果は、注入条件毎に 整理している。いずれの注入条件でも、注入濃度を 0.5mol/Lとした場合にCaCO₃析出量が最も多くなり、 1.0mol/Lや1.5mol/LにするとCaCO₃の析出がほとんど見 られなかった。注入条件別に比較すると、注入濃度が 0.25mol/L、0.5mol/Lでは、CaCO₃析出量が注入回数や通 水日数とほぼ比例関係となった。0.75mol/Lにおける CaCO₃析出量は通水日数とほぼ比例関係であったが、 1.0mol/L、1.5mol/Lでは析出量そのものが少なく、注入条 件による析出量の違いもほとんど見られなかった。

CaCl₂や尿素の濃度を多くすることが必ずしもCaCO₃ 析出量の増加にはつながらないと考えられる。これは、 微生物の代謝によるCaCO₃析出の反応の進み具合に限



図4 塩化カルシウム、尿素濃度とCaCO3析出量の関係

界があり、CaCO₃析出量を増やすのに最適な注入濃度があるためと考えられる。

また、最適な注入濃度を決める要素の1つとして、水 溶成分への微生物の耐性が考えられる。注入濃度を 1.0mol/Lや 1.5mol/Lとした場合、蒸留水に溶かした栄養 塩の成分総重量の蒸留水重量に対する比率は 20%前後 にもなり、"Bacillus Pasteurii" がほとんど活動できず、 CaCO₄析出の反応が進まなかったことが推察される。

2.4 土質条件による影響

土質条件に着目し、試料土の種類を豊浦砂 60g、珪砂3 号 60g、江戸崎砂 45g、釧路泥炭 10gとして試験を行った⁶⁸。 各試料土の物性値は**表 2** に示すとおりである。豊浦砂と 珪砂3号は珪質土、江戸崎砂は細粒分混じりの砂、釧路 泥炭は腐食土である。泥炭については、間隙が大きく、 培養液や栄養塩の浸透が期待できることから検討した。

豊浦砂、珪砂3号、江戸崎砂については炉乾燥後のものを用い、供試体は図1に示す方法で作製した。釧路泥炭については、乾燥試料10gを押子で締め固めて体積が40mLとなるようにした後、蒸留水25mLで飽和させ、培養液25mLを注入した。栄養塩の注入条件(1日当りの注入回数と通水日数の組合せ)は2.3と同様の4条件を基本とした。栄養塩の組成は表1と同様とした。

実験結果を図 5 および図 6 に示す。各試料土の体積は 40mLずつとしているため、CaCO3析出量は単位体積当

衣 2 谷祇科工の物性値ねよい夫練グー	こい実験ケーノ	ース
----------------------------	---------	----

ケース名	試料土	土粒子の密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	D ₅₀ (mm)	細粒分 含有率(%)	土懸濁液 のpH	1日当たり 通水回数
to-1 to-2	豊浦砂	2.623	42.81	0.177	0.6	6.3	1 2
ke-1 ke-2	珪砂3号	2.634	43.05	1.310	0.4	5.9	1 2
ed-1 ed-2	江戸崎砂	2.701	58.35	0.172	25.0	7.5	1 2
ku-1 ku-2	釧路泥炭	1.637	84.73	_	_	6.5	1 2
15 to-1							



図5 各種土質における栄養塩注入総量と CaCO₃析出量の関係





りの析出量として比較した。に示す $CaCO_3$ 析出効率は、 化学反応式(1)~(3)より、 $CaCl_2$ 1molから $CaCO_3$ 1molが析 出されるため、栄養塩の成分として注入された $CaCl_2$ のモ ル数に対する析出した $CaCO_3$ のモル数の百分率と定義し た。

CaCO₃析出量(図 5) や**CaCO**₃析出効率(図 6) については、土質条件による違いが見られ、釧路泥炭、豊浦砂、江戸崎砂、珪砂3号の順に高い傾向となった。

栄養塩総注入量とCaCO₃ 析出量の関係(図 5)から、 いずれの土質条件でもCaCO₃ の析出量は通水日数とも ほぼ比例関係にあることが確認できた。

CaCO₃析出効率(図 6)について、栄養塩の総注入量 が同じ条件で、栄養塩を1日1回ずつ注入したケースと 1日2回ずつ注入したケースでCaCO₃析出効率を比較す ると、いずれの土質条件でも前者の方が高いCaCO₃析出 効率となり、栄養塩の成分として注入されたカルシウム 源や尿素がCaCO₃析出のために効率よく利用されたと考 えられる。その中で、釧路泥炭については、1日当たり の栄養塩注入回数によるCaCO₃析出効率の違いが少なか

4

った。これは、1日2回の栄養塩注入でも、栄養塩の成 分が泥炭中の間隙だけでなく、土に含まれる枯れ草にも 吸収されてとどまり、CaCO3析出に寄与したことによる と考えられる。このため、従来は地盤改良が困難であっ た泥炭でも栄養塩を浸透させて固化させる可能性が期待 できる。また、江戸崎砂で栄養塩を1日2回ずつ注入し たケースを除いては、栄養塩の総注入量に伴いCaCO3析 出効率が減少する傾向が見られた。これは、通水日数が 長くなる中での微生物の活性低下が原因として考えられ た。

CaCO₃析出量やCaCO₃析出効率は、粒径分布は異なる ものの、平均粒径D₅₀がほぼ等しい豊浦砂と江戸崎砂が近 い値を示し、粒径の大きさによる影響を受けやすいと考 えられた。

3. 炭酸カルシウム法による強度向上効果の検証

3.1 供試体作製方法

シリンジを用いた試験(2.)の結果CaCO₃の析出量の 多かった微生物や栄養塩の添加条件で固化させた土につ いて、三軸圧縮試験(CD試験)を行い、強度向上効果を 確認するため、供試体を作製した⁹。供試体は、豊浦砂(最 大乾燥密度 ρ_{drax} =1.645g/cm³、最小乾燥密度 ρ_{drain} = 1.333g/cm³)を試料土とし、以下のような手順で直径5cm、 高さ15cmの塩化ビニル製モールド内に作製した。

モールド内に空中落下法により豊浦砂を投入した後、 図7に示すフィルター層の直下より、蒸留水を浸透させることにより豊浦砂を浸水させた。豊浦砂の浸水後には、 モールド上部より Bacillus Pasteurii の培養液を250mL 注入した。培養液は、その状態の違いによる影響が極力少ない条件で実験結果を比較できるよう、全ての供試体に



図7 供試体作製状況 対して培養基の溶液に Bacillus Pasteurii を植え付けてか

ら実験に使用するまでの温度条件と日数を全て30℃で2 日間としたものを用いた。

培養液の次に、表2に示す組成の水溶液である栄養塩 を1日1回、24時間間隔で200mLずつ、所定回数注入 して豊浦砂を固化させた。栄養塩の注入頻度は、1日1 回、24時間間隔とした。

栄養塩等を注入している期間中、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押し 出され、排出されるしくみとした(図7)。培養液や栄養 塩の注入開始から、試料土の間隙に入り、前回注入され ていた栄養塩等と置き換わるまでに要した時間は20分 間程度であった。なお、培養液の注入量250mLおよび1 回当りの栄養塩の注入量200mLは、供試体の間隙を置き 換えるのに十分な量として定めた量である。

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、吸引脱水 させて、モールドのまま供試体を凍結保管した。試験実 施前に供試体をモールドから取り出し、供試体が凍結し た状態のうちに速やかに直径 50mm、高さ 100mm に成 形した。

供試体は、CaCO₃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で培養液や栄養塩 を注入していない供試体と、栄養塩の注入回数を1、2、 4、7回とした供試体を栄養塩の注入回数別にそれぞれ3 本ずつ作製した。三軸圧縮試験終了後に、3.3に述べる 手法により供試体中のCaCO₃析出量を求めた。析出した CaCO₃の質量を除いた、豊浦砂のみでの各供試体の相対 密度は、平均でDr=45.7%(乾燥密度 ρ_d =1.460g/cm³) であった。

3. 2 三軸圧縮試験結果

3.1 で栄養塩の注入回数を変えて作製した各供試体で、 以下の手順により三軸圧縮試験(CD試験)を行った。

供試体は全て、凍結状態で、自立する状態のまま速や 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、飽和状態を確認 するため B 値を測定し、いずれの供試体も 0.95 以上を 確認した。B 値の確認後、有効拘束圧 $\sigma c' = 50$ 、100、 200kPa で等方圧密し、ひずみ速度 0.5%/min で軸圧縮を 行った。軸力を三軸圧縮試験機セル内部のロードセル、 軸ひずみをセル外部の変位計、体積圧縮ひずみを低容量 差圧計により計測した。セル圧、背圧は水圧計により計 測した。



図8 各有効拘束圧における主応力差一軸ひずみ曲線(上段)および体積ひずみ一軸ひずみ曲線(下段)

栄養塩の注入回数別の各供試体の主応力差ー軸ひずみ 曲線および体積ひずみー軸ひずみ曲線を有効拘束圧の条 件別に図8に示す。図8中で"栄養塩注入なし"と示し たのは、豊浦砂を蒸留水で飽和したのみで培養液や栄養 塩を注入していない供試体での結果である。

図8より、いずれの有効拘束圧においても、栄養塩の 注入回数が増えるのに伴い圧縮強さ(最大主応力差)が 大きくなる傾向が確認でき、注入回数が4回、7回の場 合では、主応力差がピークを示した後に急激に主応力差 が小さくなった。各有効拘束圧σc'=50、100、200kPa における残留強度は、栄養塩を7回注入した場合を除き、 それぞれ、170kPa、330kPa、620kPa程度になった。

いずれの有効拘束圧、栄養塩の注入回数でも、一度圧 縮側の体積ひずみが生じた後に、軸ひずみの増加に伴い 膨張側の体積ひずみが生じる傾向が見られた。しかし、 供試体の膨張が始まる時の軸ひずみは、各有効拘束圧に おいて、栄養塩注入なしの場合は1.3%、注入回数1回の 場合は1.6%であった。注入回数が2回の場合は0.8%と、 注入なしや1回の場合に比べて半分程度の軸ひずみで膨 張が始まった。さらに、注入回数が4回と7回の場合で は0.4%と、2回の場合の半分程度の軸ひずみで膨張が始 まった。栄養塩の注入回数が多いほど、供試体の軸方向 圧縮に伴う膨張側の体積ひずみが生じやすい傾向が見ら れた。 有効拘束圧がσc'=100、200kPaの場合には、圧縮強 さが有効拘束圧に比例して大きくなった。また、体積ひ ずみー軸ひずみ曲線の形状は、栄養塩の注入回数が増え るのに伴い、有効拘束圧による違いが見られるようにな った。有効拘束圧が大きいほど、供試体の膨張が少ない 結果であった。

3.3 炭酸カルシウム析出比

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、その中に含まれるCaCO₃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 含まれる $CaCO_3$ を 0.5mol/Lの塩酸で分解・溶出させ、再 び炉乾燥した後の土の質量 m_2 を測定した。

蒸留水で飽和したのみの供試体に対して上述の操作を した場合の質量の減少は 0.2~0.3%と、無視できる範囲 のものであったことから、ここでは、塩酸による $CaCO_3$ の分解後に減少する土の質量 ($m_1 - m_2$) が $CaCO_3$ 析出量 に相当するとした。

豊浦砂のみの質量に当たるm₂に対するCaCO₃析出量の 比(以下、CaCO₃析出比と呼ぶ)として整理し、各供試 体間での比較を行った。

栄養塩の注入回数別に、上述の手順で求めたCaCO3析 出比と圧縮強さの関係を図9に示す。栄養塩を1回注入 したのみの供試体では、CaCO3析出比が1%未満にとどまった。栄養塩注入なしの場合に対して圧縮強さは0.92~0.96倍と低下したが、供試体作製時や試験時の誤差の範囲内と考えられる。栄養塩を2回注入した場合にはCaCO3析出比が2%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倍程度と、増加する結果となった。 栄養塩の注入回数を4回、7回とした場合は、CaCO3析出比や圧縮強さが注入回数に伴ってさらに増加した。 CaCO3析出比は、4回の場合は5%程度、7回の場合は7~8%程度に増えた。圧縮強さについては、注入回数1回での場合に対して、4回の場合は1.5~2倍程度、7回の場合は2.8倍程度の圧縮強さが得られた。

また、CaCO₃析出比と剛性の関係を図 10 に示す。こ こでの剛性は、各供試体の軸ひずみ0.5%における主応力 差から求めたものである。栄養塩を1回注入したのみで の剛性は、栄養塩注入なしの場合に対して0.64~0.92 倍 と低下したが、誤差の範囲と考えられる。各供試体の剛 性を注入回数1回の場合と比較すると、注入回数2回で は1.7~2.2 倍、4回では3.8~7.8 倍、7回では6.6~8.4 倍 になった。有効拘束圧 σ c'=50、100kPaの供試体では、 栄養塩の注入回数が4回と7回での剛性に大きな違いが



図9 CaCO₃析出比と圧縮強さの関係



図 10 CaCO₃析出比と剛性(軸ひずみ 0.5%時)の関係 見られなかった。

今回の実験条件では、CaCO3析出比が2%以上になると、 CaCO3析出比の増加に伴う圧縮強さや剛性の増加が見られた。

4. 動的遠心模型実験による液状化対策効果の確認

4.1 模型地盤作製方法

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、縮尺を実物の1/30とした模型地盤を作製した⁹。

模型地盤は図 11 に示すように、幅 800mm×奥行き 200mm×深さ 300mm の土槽を鋼板で 3 つの領域に仕切 り、中央は土の固化を行わない無対策の地盤(Case1)、 両側は炭酸カルシウム法により土を固化させた地盤 (Case2 および Case3) とした。

各 Case の模型地盤は、支持層として豊浦砂 (最大乾燥 密度 ρ_{dmax} =1.645g/cm³、最小乾燥密度 ρ_{dmin} =1.333g/cm³) を厚さ 4cm で相対密度 Dr = 95% (乾燥密度 ρ_{d} = 1.626g/cm³) になるよう締め固めた上に、液状化層とし て豊浦砂を相対密度が Dr = 60% (乾燥密度 ρ_{d} = 1.504g/cm³) になるよう、空中落下させて作製したもの である。液状化層の相対密度は、無対策では液状化する 程度にゆるく、かつ後述する真空状態での飽和の際に密 度変化が生じないような相対密度としてDr=60%とした。 埋設管の模型は、直径 21mm、長さ 195mm (実物大換



図 11 模型地盤(模型寸法、単位:mm)

算値で直径 63cm、長さ 5.85mに相当)のアクリル製中空 管で、その内側最下部に真ちゅう製の丸棒を固定し、見 かけの密度が 0.8g/cm³相当になるよう調整したものであ

る。これを土かぶり約90mm(実物大換算値で約2.7mに 相当)の深さに設置した。

模型地盤内には、図 11 に示すとおり、加速度計、間 隙水圧計を設置した。また、管の浮上がり量や地表面の 沈下量はアルミ製板のターゲットを設置し、この変位を 土槽上部に設置したレーザー変位計で計測した。管の浮 上がり量を計測するためのターゲットは、これを固定す るためのアルミ棒を埋設管模型の上端中央に垂直に立て、 地表面に出したアルミ棒の先端にターゲットを水平にな るよう設置した。地表面の沈下量を計測するためのター ゲットは、地表面に静置した。

無対策の Casel については、遠心加速度に応じて水の 30 倍の粘性に調製したメチルセルロース水溶液により 模型地盤全体を飽和させた。地下水位は地表面に設定し た。

Case2 および Case3 については、それぞれ、土の間隙 体積全体を置き換えるのに十分な量である 5L の蒸留水 で地盤を飽和させ、Bacillus Pasteuriiの培養液 5L を注入 して間隙全体に微生物を存在させた。培養液注入後、カ ルシウム源の供給と微生物代謝の活性化を目的として、 表2に示す組成の栄養塩を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。固化 する前の地盤の飽和と栄養塩の成分洗い流しの際の蒸留 水、培養液および栄養塩は、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、新たに 栄養塩等を注入して、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。所定回数の栄養塩注入が終了 して栄養塩の成分を蒸留水で洗い流し、脱水した後、真 空槽において真空状態にし、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。Case2 および Case3 の地下水位は Case1 と同様、地 表面に設定した。

Case2 とCase3 では、CaCO3 析出比の違いによる液状化 対策効果の違いを調べる目的で栄養塩の注入回数を変化 させた。栄養塩の注入回数は、図9より、固化による強 度向上が見られ、CaCO₃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。

4.2 加振方法

4.1 に示す方法で作製した模型地盤を重力加速度の30 倍の遠心加速度場において加振した。以下、計測値等は、

特に断らない限り実物大換算値で示す。

加振は、まず Step1 加振を行い、Step1 加振後の模型地 盤に対して Step2 加振を行うという、2 段階で行った。

入力波形は、図 12 に示すような周波数 2Hzの正弦波 20 波で、Step1 加振の入力波形は、20 波の最大加速度が 大きく変わらず、平均約350cm/s²のものである(図12 (a))。Step2加振の入力波形は、最大加速度のピークが約 570cm/s²のものである(図 12(b))。





図 12 加振時の入力波形 (実物大換算値)

4.3 炭酸カルシウム析出比

Step2 加振終了後、炭酸カルシウム法により豊浦砂を固 化させたCase2 とCase3 の各模型地盤内のCaCO3析出比 の分布を調べた。

豊浦砂を1辺5cm以内の直方体のブロック毎に取り出 した。模型地盤のブロック分けでは、図 11 で土槽内を 仕切った鋼版に対して垂直に厚さ5cmずつの4枚の板状 に区切った。さらに、これらを図 13(a)に破線で示すよ うに区切った。各ブロックの土について、固化による塊 のものは砕いて混ぜ合わせた後、100g程度を抽出し、3. 3と同様の方法でCaCO3析出比を求めた。



図 13(a)に示す区画位置が同じ4つのブロック間の

(a) CaCO3析出比確認のための区画割



(b) Case2 におけるCaCO3 析出比の分布



(c) Case3 におけるCaCO3 析出比の分布

図 13 模型地盤内のCaCO₃析出状況 (模型寸法、単位:mm)

CaCO₃析出比の値の差は、いずれの区画でも 0.2~0.3% 以内であった。そこで、模型地盤中のCaCO₃析出比の分 布については、仕切りの鋼版に垂直な断面での分布に着

目した。図 13(a)に示す各区画の中心におけるCaCO₃析出 比を、同じ区画位置にある厚さ5cmずつの4つのブロッ クでのCaCO₃ 析出比の平均値とみなして、CaCO₃析出比 の等高線図を描いたところ、図 13(b)および図 13(c)に示 すとおりとなった。図 13(b)はCase2、図 13(c)はCase3 に ついてのCaCO₃析出比の分布を示したものである。

Case2、Case3とも、位置によりCaCO3析出比に違いが あったものの、模型地盤全体にわたりCaCO3の析出は確 認できた。注入タンクに近い位置でCaCO3析出比が高く、 注入タンクに近い部分から固化が進むが、固化に使われ た栄養塩の残りの成分は排水タンク側へと到達し、排水 タンク付近の固化に寄与した状況が推察される。鉛直方 向については、地表面から深い位置でCaCO3析出比が高 い傾向が見られ、これは、栄養塩の比重が水よりも大き いため、注入された栄養塩の成分濃度が模型地盤中の地 表面から深い位置で高くなったことが推察される。

加振時の加速度計、間隙水圧計の計測結果については 4.5.2 で述べるが、加速度計および間隙水圧計を設置し た各位置(図13中の●の位置)でのCaCO₃析出比は、 Case2 では2~3%程度であった。Case3 では、CaCO₃析出 比の低い部分では約4%、高い部分では約8%と、位置に よる違いが見られた。

CaCO₃析出比は、模型地盤全体の平均で見ると、Case2 の模型地盤では平均 2.86%、Case3 の模型地盤では平均 6.57%となった。なお、これらの値は、模型地盤内のCaCO₃ 析出比の分布を調べるために区切った直方体の各ブロッ クにおけるCaCO₃析出比に対して、各ブロックの体積で 重みをつけた平均値として算出したものである。

模型地盤内のCaCO3析出比は、Case2では2~5%程度、 Case3では4~10%程度で分布しており、模型地盤の多く の部分で、図9に示される栄養塩の注入回数が同じ三軸 圧縮試験の供試体におけるCaCO3析出比(Case2:約2%、 Case3:約5%)に達していた。CaCO3析出比の模型地盤 全体の平均値の方が栄養塩の注入回数が同じである三軸 圧縮試験の供試体に比べて1%程度高くなったのは、栄 養塩が試料土内を流れる距離が長い分、試料土中にとど まる時間が長くなり、栄養塩の成分のより多くが土の固 化に有効利用されたためと考えられる。

以上より、模型地盤のほぼ全域にわたり Case2 では、3. 3の三軸圧縮試験(CD試験)で栄養塩を2回注入したケース、Case3では栄養塩を4回注入したケースと同等以上の強度特性を有したと考えられる。

4. 4 透水性の変化

Case2 と Case3 の模型地盤については、豊浦砂の固化

に伴う透水性の変化を確認するため、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kは、模型地盤全体で一様と仮定して、栄養塩等の流路長L(=注入タンクと排水タンクの間の距離)、注入タンクと排水タンクの水位差h、平均動水勾配i(=h/L)、排水タンクからの栄養塩等の時間当たり排水量Q、流路面積A(=注入タンクと排水タンク水位の平均×栄養塩等流路幅200mm)を用いて、k=Q/Aiより算出した。

培養液注入前に蒸留水で模型地盤を飽和させた時点を 基準とし、経過時間に伴う見かけの透水係数の変化を図 14に示す。

Case2 では、見かけの透水係数にほとんど変化が見られなかった。Case3 で約47時間経過時点において一時的に見かけの透水係数の低下が大きくなっているのは、排水タンク内に貼り付けたフィルターの目詰まりによるもので、これを取り外したことにより、見かけの透水係数も回復した。この影響を除けば、Case2 よりもCaCO3析出比の多いCase3 でも見かけの透水係数の変化は1桁未満にとどまった。

以上より、炭酸カルシウム法は、時間とともにCaCO₃ 析出が進み、土の固化が進行しても透水係数が低下する ことはないため、地下水流動を阻害せずに地盤改良が可 能な技術であることが示唆された。



図 14 固化させた模型地盤の透水係数の変化

4.5 動的遠心模型実験結果

4.5.1 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土槽ガラス面より 目視で観察した。写真 2(a)は、加振前とStep1およびStep2 加振後の模型地盤の様子である。

0	CASE2	CASE1	CASE3
-			
	all all and a least		

● :計測器(加速度計および間隙水圧計)





写真 2 加振による模型地盤の変状の様子

Step1 加振後には、無対策のCase1 のみ、液状化による管 付近の地盤の沈下や、管の浮上がりが観察された(写真 2(b))。Step2 加振後には、Case1 でこうした様子がより顕 著に見られた。一方、炭酸カルシウム法により豊浦砂を 固化したCase2 では、管付近で、地盤の若干の変形が観 察されるにとどまった。Case2 よりもCaCO₃析出比が高 いCase3 では、こうした変形も見られなかった(写真 2(c))。

これらの状況は、土槽ガラス面から見える部分の目視の結果であるが、CaCO3 析出比の土槽奥行き方向のばら

つきはほとんどなかったことから、模型地盤内部でも同様であったと考えられる。

管の浮上がりおよび地表面沈下の残留値は、表3に示 すとおりである。ここで、残留値は、実物大換算での各 Step の加振開始時からの経過時間870~900sec における 変位計の計測データの平均値から求めたものである。 Step1 加振後の値は、加振開始前からの増分に相当する。 Step2 加振後の値については、Step1 加振後からの増分を 示しているが、Step1 加振後に比べて小さな値となってい る。これは、Step1 加振による模型地盤の密度増加の影響 によると考えられる。

Case2 やCase3 では、写真 2 に示した模型地盤の変形 状況と同様、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 の半分以下に低減される結果となった。Case2 よりもCaCO3析出比の高いCase3 では、Step2 加振後でも、 地表面の残留沈下が生じなかった。

表3 管の浮上がり量および地表面沈下量の残留値 (実物大換算値)

-			
		Step1 加振後	Step2 加振後
	Case	(加振開始前	(Step1 加振後
		からの増分)	からの増分)
埋設管の	Case1	0.134	0.058
浮上がり量 (m)	Case2	0.000	0.000
(浮上がりを正)	Case3	-0.001	0.000
地表面の	Case1	0.186	0.109
残留沈下量(m)	Case2	0.047	0.046
(沈下を正)	Case3	0.000	0.000

4.5.2 地盤中の応答加速度および過剰間隙水圧

各 Case の応答加速度について、Step1 加振時を例に図 15 に示す。ここでは、土槽底部からの入力地震動(図 12) に対する、管側方、管上・側方、管上の応答を示した。 図 15 の凡例中の番号は、図 11 の計測器設置位置の番号 に対応している。図 15 の各図では、比較のため液状化 層底部における加速度(A11、A21、A31)の波形も併せ て示した。管側方の応答加速度は各 Case、同一深さ毎に 管を挟んだ両側で計測しているが、各 Case とも管の両側 の応答加速度波形にほとんど違いが見られなかったため、 Case1 では、Case3 の地盤に近い方の A13、A16 の応答加 速度波形を代表値として示した。Case2 および Case3 に ついては、排水タンク側での応答加速度波形を示してい る。 Case1 では、応答加速度は加振初期のみ液状化層底部の加速度よりも大きくなり、その後減衰して小さくなる傾向であった。この傾向は、管より浅い深さ1.2mの位置で顕著に見られ、液状化による剛性低下によるものと考えられる(図 15(a))。Case2の応答加速度は、深さ3.0mにおいて液状化層底部の加速度とほぼ一致したが、深さ1.2mでは液状化層底部の加速度に対して増幅が見られた(図 15(b))。Case3 では、液状化層底部と各地点で応答加速度の波形がほぼ一致し、応答加速度の増幅がほとんど見られなかった(図 15(c))。Case3の方がCase2 に比べてCaCO3析出比が大きく、土粒子間の結合が強くなったことが要因と考えられる。各Caseにおいて、Step2 加振でも上述と同様の傾向が見られた。

次に、各Caseの過剰間隙水圧消散の経時変化について、 Step1 加振での結果を例に図 16 に示す。図 16 の凡例中 の番号は、図 11 の計測器設置位置の番号に対応してい る。管の側方の間隙水圧についても各Case、同一深さ毎 に管を挟んだ両側で計測しているが、Case1 では管の両 側の過剰間隙水圧の変化に大きな違いが見られなかった ため、Case3 の地盤に近い方のP13、P16 の過剰間隙水圧 を代表値として示した。炭酸カルシウム法により土を固 化させたCase2 およびCase3 については、排水タンク側で 過剰間隙水圧の上昇が数kPa以内であるが大きくなった ため、排水タンク側で計測した結果を示している。なお、 この理由としては、同一深さでは、排水タンク側でCaCO3 析出比が小さく、土粒子間の結合が弱くなり、過剰間隙 水圧が発生しやすくなったことが考えられる。

いずれの位置においても、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する結果となった。最も過剰間隙 水圧の上昇が大きい Casel の有効上載圧に対する過剰間 隙水圧の比(過剰間隙水圧比)は、管側方と管上・側方 で1.00、管上で0.97となり、液状化に至っていると考え られる。Step2加振時には、管上の位置で過剰間隙水圧比 が0.88 であったが、管側方と管上・側方では1.00 に達す る結果となった。Case2 および Case3 では、過剰間隙水 圧はいずれの位置においても有効上載圧に達しなかった。 なお、加振初期にP13とP16の間隙水圧計で有効上載圧 を若干超える過剰間隙水圧が観測されたが、これは、 Case1 の加振初期に液状化層底部の加速度を超える応答 加速度となった際の動水圧の影響も含まれているものと 考えられる。過剰間隙水圧の消散については、Casel 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



図 15 各 Case・各位置における応答加速度の経時変化(Step1 加振時、実物大換算値)



図 16 各位置における過剰間隙水圧消散の経時変化(Step1 加振時、実物大換算値)

程度経過した際には過剰間隙水圧が消散していた。過剰 間隙水圧の上昇や消散については、Step2加振時でも上記 と同様の傾向が見られた。

以上より、加振による応答加速度や過剰間隙水圧の経時変化から、豊浦砂を固化させていない Casel では液状化に至ったが、炭酸カルシウム法により豊浦砂を固化させた Case2 や Case3 ではほとんど液状化に至らなかったといえる。

図 13(b)および図 13(c)より、模型地盤の応答加速度の 経時変化や過剰間隙水圧消散の経時変化を調べた各位置 のうち、CaCO₃析出が最も少ない位置でのCaCO₃析出比 は、Case2 で 2%程度、Case3 で 4%程度であったといえ る。そのため、豊浦砂で相対密度Dr=60%の地盤の場合、 炭酸カルシウム法でCaCO3析出比 2~4%程度を確保する ような地盤改良をすれば、4.2 で示した今回の加振条件 に対しては、液状化の発生をほぼ抑制できると考えられ る。

5. 土の亀裂の自己修復

炭酸カルシウム法は、土の間隙中に炭酸カルシウムを 析出させて間隙を埋めることにより、土の亀裂を自己修 復させる地盤改良技術としても期待される。

土の亀裂の自己修復の可能性を調べるため、図1に示 すような方法で作成し、栄養塩の注入を繰り返して全体 を固化させた供試体をせん断破壊させた後、再度シリン ジに原形に近い形になるよう詰め直し、培養液や栄養塩 を再度注入した場合について、炭酸カルシウムの析出や 供試体の固化状況を確認した。

その結果、炭酸カルシウムの析出や全体が固化した様 子が見られ、土の亀裂の自己修復の可能性が確認できた (図 17)。ただし、原形に近い形でシリンジに詰め直す のが難しく、固化した土の塊同士の隙間が大きく開いた 場合には、炭酸カルシウムが土の表面のみに析出して亀 裂を埋めるには至らなかったなど、土の亀裂状態によっ て自己修復の効果に違いが出る可能性も確認された。



図 17 豊浦砂の自己修復の例

6. まとめと今後の課題

本研究では、微生物(Bacillus Pasteurii (ATCC11859)) の代謝による二酸化炭素を利用し、炭酸カルシウム法に より土を固化する地盤改良技術について、その適用性、 強度向上効果、液状化対策効果、自己修復性の確認を行 った。

(1) 炭酸カルシウム法の適用性の確認

シリンジを用いた試験により、微生物の添加条件、栄養塩の添加条件(pH、組成や1日当りの注入回数と通水日数)や土質条件の違いが炭酸カルシウムの析出に与える影響を調べた。

その結果、炭酸カルシウム法により地盤を固化させる 場合には、地盤の固化に寄与する微生物を間隙全体に行 き渡る程度に存在させたうえで、微生物が活動しやすい pH や組成(カルシウム源や尿素の濃度)の栄養塩を注入 する必要があることが示唆された。

炭酸カルシウムの析出や地盤固化の効果は、栄養塩の 注入回数および通水日数や土質条件の影響も受けるため、 栄養塩の注入は、土質条件に応じた効率的な条件を設定 して行う必要があると考えられた。

(2) 強度向上効果の確認

三軸圧縮試験(CD 試験)の結果から、炭酸カルシウム法で炭酸カルシウムを析出させて固化した土は強度向上が期待できることを確認した。

(3) 液状化対策効果の確認

三軸圧縮試験(CD 試験)の結果を参考に、炭酸カル シウム法により埋設管周辺の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った。

動的遠心模型実験での管の浮上がり、地盤の残留沈下、 加速度応答、間隙水圧の変化等の状況から、同じ相対密 度の豊浦砂の飽和地盤では液状化が確認されたが、炭酸 カルシウム法で豊浦砂を固化させた地盤ではほとんど液 状化に至らなかった。

こうした実験結果と、固化させ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、土の重量に対して 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。

(3) 炭酸カルシウム法による土の透水性への影響についての確認

動的遠心模型実験の模型地盤作製時に、栄養塩等を注入する毎に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桁未満のものであった。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。

(4) 自己修復性の確認

炭酸カルシウム法で固化させた土をせん断破壊した後、 微生物や栄養塩を添加したところ、土の塊の隙間や亀裂 の幅によっても効果は異なるが、再度の固化が見られ、 自己修復が確認された。

(5) 今後の課題

炭酸カルシウム法による地盤改良で目的の効果(強度 向上、液状化対策効果等)を得るのに必要な炭酸カルシ ウム析出比や、それを実現するための微生物や栄養塩の 注入条件等は、土質条件や土の密度によっても異なるこ とが予想され、個別に検討が必要と考えられる。

また、広範囲にわたって地盤改良を行う際は、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が必要である。

これらと併せ、繰返し三軸試験により、固化した土の 液状化対策としての効果の詳細についても把握すること が課題として挙げられる。

参考文献

 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.
- 3)林和幸、只信約也佳、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.
- 4)林 和幸、岡村 未対、安原 英明: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、地盤工学ジャーナル Vol.5、 No.2、pp.391-400、2010.
- 5) 稲垣 由紀子、塚本 将康、森 啓年、佐々木 哲也、曽我 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、平成22 年度発表講演集、pp.1965-1966、2010.
- 6) Y. Inagaki, M. Tsukamoto, H. Mori , T. Sasaki , K. Soga, A. Al. Qabany and T. Hata : The Influence of Injection Conditions and Soil

types on Soil Improvement by Microbial Functions, Geo-Frontier 2011, American Society of Civil Engineers, 2011.3

- 7) 稲垣 由紀子、塚本 将康、森 啓年、佐々木 哲也、曽我 健 一、Ahmed Al Qabany、畠 俊郎:微生物の働きが地盤固化に 与える影響についての基礎実験、第65回土木学会年次学術講 演会講演概要集、Ⅶ-190、2010.
- 8) 塚本 将康、稲垣 由紀子、森 啓年、佐々木 哲也、曽我 健 一、Ahmed Al Qabany、畠 俊郎:土質が微生物代謝による地 盤固化に与える影響についての実験、第45回地盤工学研究発 表会、平成22 年度発表講演集、pp.1967-1968、2010.
- 9) 稲垣 由紀子、塚本 将康、森 啓年、中島 進、佐々木 哲也: 微生物代謝による液状化対策効果に関する動的遠心模型実験、 第55 回地盤工学シンポジウム論文集、pp.221-228、地盤工学 会、2010.11.

DEVELOPMENTS OF SOIL IMPROVEMENT BY MICROBIAL FUNCTIONS

Budged : Grants for operating expenses General account Research Period : FY2009-2010 Research Team : Materials and Geotechnical Engineering Research Group (Soil Mechanics and Dynamics Research Team) Author : SASAKI Tetsuya MORI Hirotoshi INAGAKI Yukiko

Abstract : Microbial Carbonate Precipitation (MCP) shows promise as a new environmentally friendly soil improvement method, because of its low carbon dioxide emission. MCP produces calcium carbonate from carbon dioxide and the calcium in soil voids through ureolysis by "*Bacillus Pasteurii*", and is suitable as a measure against liquefaction under existing structures.

On Toyoura sand stabilized by MCP, improvements in compressive strength were observed in the triaxial compression tests. In the centrifugal model tests, the results of excess pore water pressure, acceleration response and residual deformation showed MCP's effectiveness.

Key words : Soil Improvement, Microbial Carbonate Precipitation, Triaxial Compression Tests, Centrifugal Model Test, Liquefaction Countermeasure