

機関番号：15401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760373

研究課題名（和文） 自然由来の微生物を用いた既存宅地の耐震補強工法の開発

研究課題名（英文） Development of an aseismic reinforcement of existing houses with bacteria

研究代表者

加納 誠二 (KANO SEIJI)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40280408

研究成果の概要（和文）：

本研究は、自然由来の微生物を用いて、既存宅地の耐震補強工法の開発を目的として、微生物を用いた改良地盤の変形特性や菌種、土質材料の違いによる違いについて実験的に検討を行った。実験結果から、学術上は同じ名前でもあって菌種によって反応速度に違いがあることや、砂の種類（ここでは川砂と風化花崗岩）の違いによる差があまりないこと、改良地盤の方が未改良地盤に比べ、変形抑制効果があることなどがわかった。

研究成果の概要（英文）：

In this study, mechanical characteristics of improved soil using bacteria were examined in order to develop the aseismic reinforcement of existing houses. A series of tri-axial compression tests was carried out under several conditions. Influences of a kind of bacterium and a kind of soil on the improved soil behavior were also examined. The results revealed that the kind of bacterium affected to a reaction rate and the kind of soil did not affect to the shear strength of improved soil. Comparing the no-improved soil, the improved soil has higher deformation resistance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：微生物・耐震・地盤・防災

1. 研究開始当初の背景

これまでに微生物（細菌）を地盤中の重金属の固定に使った環境浄化工法（Etemadia et al., 2003 など）など微生物の地盤工学への利用法が研究されている。その中で、2006年アメリカ合衆国カリフォルニア大学デー

ビス校の J. De Jong 准教授らは微生物を利用した地盤改良工法を提案している。この方法は、自然地盤に多く存在している微生物（*Bacillus pasteurii*）に餌となる尿素を投与することで、地盤中の Ca^{2+} を CaCO_3 に変換し、生成された CaCO_3 が土粒子骨格の接触

部に吸着し、粘着力として作用することで強度増加を図る工法である。この方法は **Time** 誌が選ぶ 2007 年の偉大な発明の一つとして紹介されて、世界的に大変注目を集めている (**Time** 誌の HP より)。

日本では未だ微生物を利用した地盤改良工法についての研究は行われていないが、**Bacillus pasteurii** は国内の地盤でもその存在が確認され、一般の地盤に多く見られる自然由来の微生物であり、地盤改良に利用可能で、環境に対する負荷もほとんどない。

現在日本で地震防災上大きな問題となっているのが、宅地の耐震補強である。宅地の耐震補強が抱える問題点とは①個人所有物であるため、公的資金の導入が難しく、高価な工法は採用できない、②既存構造物がある、③化学物質(薬液注入工法など)は安全性の懸念から採用されないという点であり、これらを克服した新たな耐震補強工法の開発が急務とされている。

DeJong 准教授らの論文によれば、微生物により改良された土は非改良土に比べ非排水三軸圧縮強度は約 4 倍程度、せん断波速度も 2.5 倍程度になっている。宅地の高さは数 m 程度であるため、上載圧が小さく、要求される地盤強度も低い。そのため薬液注入などに比べ、微生物による地盤改良工法の方がふさわしい。また化学物質を使わず、環境負荷のないやさしい工法であるため、住民にも受け入れられやすい。微生物を活用した耐震補強工法が開発されれば、これまで開発が遅れていた宅地の安全性向上、ひいては地域の防災力向上に非常に有効な手段となる。

しかし、宅地の耐震対策工法として微生物による地盤改良工法を用いるためには、以下のような点が未だ明らかになっていない。

① 微生物によるセメンテーションが促進されやすい細粒分含有率などの地盤および環境の条件

② 雨水の浸透など地盤内条件の変化によるセメンテーション効果の消失の危険性

③ 改良された地盤の動的特性

④ 地震作用などにより崩壊された場合の復旧工法としての可能性

⑤ 既存構造物下での微生物および栄養源の注入方法の開発

⑥ 実大スケールでの適用性の確認

2. 研究の目的

本研究では、微生物 (**Bacillus pasteurii**) を利用した宅地の耐震対策工法を開発することを目的としているが、以下のこと 3 項目について検討した明らかにする。

① 微生物のセメンテーションが促進される菌種と地盤の条件

セメンテーションを効率的に発揮させるための地盤条件や菌種を明らかにする。

② 雨水の浸透など地盤内条件の変化によるセメンテーション効果の消失の危険性

改良後に雨水の浸透などによる地盤内の地下水位や pH の変化などの環境条件の変化により、セメンテーション効果が消失する危険性について検証する。

③ 改良された地盤の動的特性

改良地盤の地震時変形量や強度低下などの動的特性を明らかにする。

3. 研究の方法

①については、菌種と土試料を変えて実験を行った。

実験に用いた菌は **Sporosarcina pasteurii** (**Bacillus pasteurii** と同じ) である。しかし国内の菌バンクでは購入できないため、アメリカの菌バンク (ATCC) から購入した。ATCC には同種の菌としていくつかの菌が登録されているが、本実験では No.6453 と No.11859 の 2 種類の菌を購入して、室内で培養し、使用した。

ビーカー内に土試料(ここでは豊浦砂を使用)を入れ、それぞれの菌と栄養源、炭酸カルシウムなどを混入・攪拌し、pH の時間的変化から、反応速度の違いについて検討した。

また、土試料の違いによる改良効果の実験では、2 mmふるい通過した豊浦砂(硅砂)とまさ土(風化花崗岩)を試料作製容器に所定の間隙比になるように詰め、上から微生物が入った培養液と、栄養液、炭酸カルシウムが入った溶液などを流し、改良試料を作成する。

試料ができたら、三軸セル内にて圧密排水試験を実施し、土試料の違いがせん断強度に及ぼす影響について検討した。

ここで、試料の改良方法について説明する。

まず、土試料をアクリル製のモールド(図-1)に所定の相対密度になるように水中落下法を用いて詰める。つぎに、Injection 溶液に菌(ここでは反応速度の速い No.11859)を加える(菌は Injection 溶液 100ml に対して

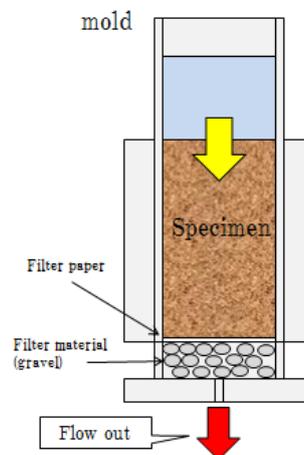


図-1 土試料改良概要

15ml で濃度は 1.7×10^7 cell/ml)。できた溶液を、土試料を詰めたモールドの上から流し込み土試料内を自然流下させる(図-1)。流し込む液の量は間隙体積の2倍とした。6時間後、次は Injection 溶液に塩化カルシウムを加えた液を試料に流す。これも同様に間隙の体積の2倍程度流し、これを3(～12)時間おきに15回繰り返す。改良中は常に試料は飽和状態にしておく。

改良過程が終わると、試料を凍結させモールドから取り出す。その後、供試体の端面を整え三軸試験機にセットし、試験を行う。

図-2 に豊浦砂を改良したものの写真を示す。十分自立する程度の強度を有した供試体を作成できている。



図-2 豊浦砂を固化した例

②については、①の微生物による地盤改良効果を調べるため、ビーカー試験および試料作製の際に合わせて検討した。

③については、豊浦砂を①の結果を受けて反応速度が速い No. 11859 の *Sporosarcina pasteurii* 菌を用いて改良し、三軸セル内にて圧密非排水繰返し三軸圧縮試験を実施した。合わせて未改良試料を用いた試験を実施し、微生物を用いた改良地盤の動的応答特性について検討した。

4. 研究成果

①菌種の違いによる反応速度の違い

ビーカー試験では、土試料を改良する際に注入する溶液(以下、Injection 溶液)に菌を混ぜ、その後の経過時間と pH の変動を調べ菌による反応速度の違いについて検討した。

Injection 溶液は尿素、塩化アンモニウム、炭酸水素ナトリウム、Difco Nutrient Broth から構成されている。

図-3 に実験結果を示す。何も混入していない Injection 溶液の pH は約 7.1 である。そこに菌を混入すると、図-3 を見てわかるよう No.11859 も No.6453 も pH8 付近を示している。これは、菌を混入すると即反応が始まり pH の上昇が起こっているためである。今回の結果において、菌を入れていない場合では

ほとんど pH の上昇は起こっていない。菌を混入した場合には最終的には No.11859 も No.6453 も pH9 付近の値になっている。pH が 9 付近になるのに要する時間は No.11859 は約 90 分、No.6453 は約 300 分かかっており、No.11859 が約 3 倍の反応速度となっている。このことから、No.11859 の方が尿素を分解する速度が早いことがわかったので、以下に示す三軸試験の供試体改良の際にはより反応の早い No.11859 の菌を使用することにした。

またコンクリートなどでは、pH の値が炭酸カルシウムの析出・沈殿に大きく関係しているといわれており、炭酸カルシウムは pH が 8.5～9.3 の間にある時沈殿するとされている。また、pH が低い場合、この菌種はほとんど活動しないことも指摘されている。

そのため、地盤内を中性よりも高い pH9 程度に保つ必要がある。土は若干アルカリ性である場合が多いが、このことは工事を実施する際に弊害となりうるかもしれない。また施工が何らかの事情により酸性の地下水や酸性雨が流れ込んだ場合、地下水に析出した炭酸カルシウムが再度溶出し、改良効果が失われる危険性があることがわかる。

実際、今回の研究でみられた現象として次のものがある。通常三軸試験では試料内の飽和度を高めるため、あらかじめ試料内の空気を二酸化炭素に置換し、その後水を注入する。しかし、微生物を使った改良を三軸セル内で行おうとした場合、カルシウムイオン入りの Injection 溶液を流したら、中部内で炭酸カルシウムの析出・沈殿が起こり、地盤改良ができなかった。

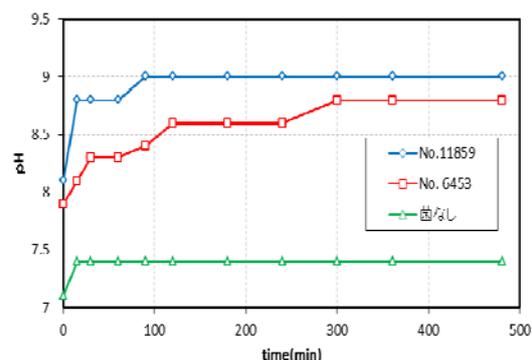


図-3 pH の経時変化

②土の種類が地盤改良効果に及ぼす影響

土の種類の違いによる改良効果の影響を調べる実験では、相対密度を 15%、圧密圧力を 196kPa とした。

それぞれの図-4 に軸差応力とひずみ関係を示す。改良したまさ土と豊浦砂において軸ひずみ 10%以下では軸差応力の挙動に関して差がみられる。豊浦砂では軸ひずみ 5%で

ピークを迎えているがまさ土では軸ひずみ10%でピークをむかえている。しかし最大軸差応力は豊浦砂 482 N/m² に対して、まさ土 460 N/m² とあまり差が見られない。

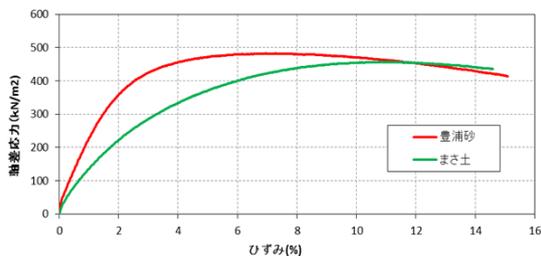


図-4 軸ひずみと軸差応力の関係

図-5 に体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。図を見てわかるように豊浦砂・まさ土両方において同じような挙動を示しているのがわかる。ともに体積ひずみが1.0~1.5%程度の間で変化しており体積変形が小さくゆるやかであった。原因として、土粒子を結びつける炭酸カルシウムが粘着力を持ち体積変形を抑制していたのではないかと考えられる。

この三軸試験では試料の相対密度が15.1%程度であるにもかかわらず、450 kN/m²以上の軸差応力が生じており、微生物による改良効果があったと考えられる。これらから土の種類による改良効果への影響は少なく、微生物を用いた工法が細砂であれば適用可能であると考えられる。

しかし、粒度分布の影響などについて更なる検討が必要である。なぜなら、Injection 溶液の流入速度は、地盤の透水係数を関係し、また炭酸カルシウムが土粒子間の空隙に析出し、土粒子同士を結び付けていると考えられると、空隙の大きさなども影響を及ぼすと考えられるからである。

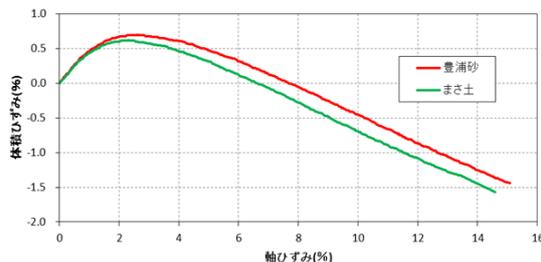


図-5 軸ひずみと体積ひずみの関係

③改良地盤の動的特性

圧密非排水繰返し三軸試験は、豊浦砂を No.11859 の菌で改良して作成した供試体を用いて行った。試料の相対密度は30%と40%とし、未改良試料は40%とした。圧密圧力は196kN/m²である。

繰返し三軸試験の結果を図-6、図-7に示す。

図-6 は過剰間隙水圧比の経時変化を表している。未改良供試体のものと改良した供試体を比べると、改良したものは過剰間隙水圧比の上昇が抑えられており、液状化対策としても効果的である可能性があると考えられる。繰返し回数が少ない範囲ではあるが、相対密度40%のものは、過剰間隙水圧比が1まで達していない。

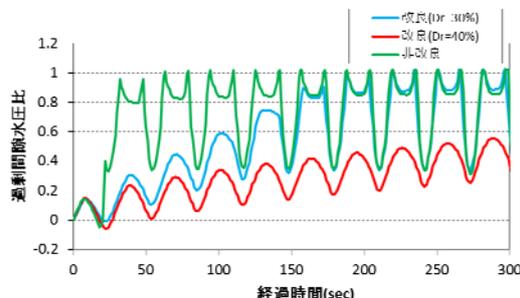


図-6 過剰間隙水圧比の経時変化

図-7 は軸ひずみと等価ヤング率の関係を表している。実線は例として黒線が非改良、赤線が改良したものの繰返し回数10回目の状態を示している。微小ひずみ振幅の範囲においては、改良した試料の方が初期強度は低く出てしまっているものの、改良したものと改良していないものとは異なる挙動を示していることがわかる。この原因については本研究では明らかにすることができなかった。またひずみ振幅が大きくなると、未改良供試体は急激に等価ヤング率が低下しているが、改良した試料の方は高いヤング率を示しており、大きなひずみにおいて変形抑制効果があると考えられる。

また今回試験を行った範囲では、相対密度の違いによる改良効果の違いはあまりみられなかった。

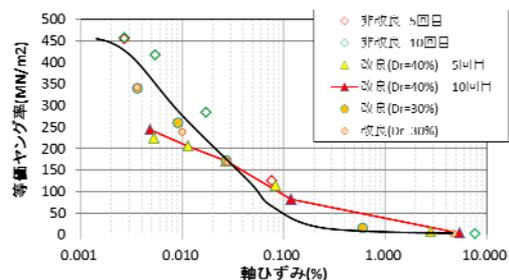


図-7 軸ひずみと等価ヤング率の関係

以上より、微生物を用いた地盤改良工法が液状化の抑制など、既存宅地の耐震対策に有効であると考えられる。しかし実用化に向けては、pHが高い環境でなければならないことや地下水環境の変化に伴う炭酸カルシウムの溶脱の危険性についても更なる検討が必要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

1.原弘、加納誠二、土田孝：微生物を用いた地盤改良に及ぼす菌種と土試料の影響、第46回度地盤工学研究発表会発表講演集、2011年7月6日(決定)

2.原弘、加納誠二、土田孝：微生物を用いた地盤改良に及ぼす菌種の違いと土試料の影響、平成23年度土木学会中国支部研究発表会講演概要集、2011年5月21日(決定)

6. 研究組織

(1)研究代表者

加納 誠二 (KANO SEIJI)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40280408

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：