

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：92604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03348

研究課題名(和文) 微生物と地下水の流れを利用した液状化対策の開発

研究課題名(英文) Development of liquefied soil improvement method under existing building using microbial ureolysis

研究代表者

鈴木 康嗣 (SUZUKI, Yasutsugu)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・都市防災・風環境グループ・専任部長

研究者番号：70416767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：全国の地盤から採取した微生物と、別途カルシウム源・栄養源を用い、濃度、養生期間・温度などが異なる条件下で要素実験を行い、砂の固化程度や固化に必要な時間等を確認すると共に、本手法を原位置地盤に適用するための最適な改良液と条件を把握した。ウエルポイント工法を応用した手法で改良液を地中に注入するとともに別の地点から揚水し、原位置地盤に改良液を拡散・滞留させ、数m離れた注入地点と揚水地点の中間の地盤を改良可能であることを確認した。また、地盤改良前後の原位置地盤地表における常時微動測定結果の高振動数域のフーリエスペクトル比から改良範囲を推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存構造物直下地盤の液状化対策は、曲がりボーリングで薬液を注入する高価な工法しか存在しない。本手法は、構造物の片側から安価な改良液を安価な手法で地中に注入し、反対側から地下水を揚水することで構造物直下に改良液を拡散・滞留させ、元々地中に存在する微生物の代謝を利用して砂地盤の液状化強度を高めるものであり、安価な工法である。本工法により、これまで高コストであきらめていた既存構造物直下地盤や周辺地盤の液状化対策が可能になる。

研究成果の概要(英文)：Elementary experiments were occurred under different conditions such as concentration, curing period and temperature using microorganisms collected from the ground all over Japan, calcium and nutrient sources. As a result, solidification of sandy ground, the degree and time until solidification were confirmed. At the same time, the optimum composition and conditions of the improvement liquid required for application to the in-situ ground were understood. Improving liquid was injected into the ground by applying the wellpoint method and simultaneously pumped up from the opposite side separated by several meters. It was confirmed that the intermediate ground between the pumping and injection point separated by several meters could be improved. In addition, the improvement range was estimated from the value of the Fourier spectrum ratio in the high frequency region of the microtremor measurement results performed on the surface of the in-situ ground before and after the ground improvement.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 地盤改良 液状化 微生物 地震 せん断波速度

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では、液状化により浦安市などの埋立地に建つ戸建て住宅で沈下・傾斜の被害が多数発生した。1/100以上傾斜した住宅には住み続けられないため、多くの住宅で数百万円～千万円の工事費をかけて傾斜を修正しているが、根本的な液状化対策は行われていない。また、東日本大震災では、首都圏の加速度がそれほど大きくなかったことから液状化の被害は埋立地の戸建て住宅に限られていたが、より大きな加速度が予測される首都直下地震では、沖積地盤に建つRC造建物でも液状化による甚大な被害が予想され、既存建物に対応可能な安価な液状化対策工法の開発が望まれている。液状化対策は、更地で実施することを前提とした工法が多く、建築では安価なサンドコンパクションパイル工法や格子状深層混合処理工法を採用するか、さらにコストを削るため地盤改良を行わず杭基礎で構造的に対処するケースが多い。また、既存建物に対する液状化対策は、更地で実施される液状化対策に比べてコストが10倍以上かかるため、検討はされても対策をあきらめるケースがほとんどである。

また、自然界では「ビーチロック」のように砂浜の砂が固化する現象が生じている。これは微生物の代謝により発生する二酸化炭素とカルシウムが反応して生じる炭酸カルシウムによる固化現象で、コンクリートのひび割れの修復にも応用されている。この炭酸カルシウムを利用した砂粒子の固結現象は、室内実験で比較的容易に再現することが出来る。また、砂に対して重量比で1%程度の炭酸カルシウムを析出させれば、液状化強度が2倍程度になることが分かっている。しかし、既往の研究に利用されている微生物は、登録された特殊なものや外来種が多く、そのまま日本の土壌に利用できる訳ではない。そこで、北海道から九州までの全国11か所の砂から培養した微生物でも、液状化強度が2～4倍になることを申請者らが確認している。

2. 研究の目的

地中に「カルシウム源と微生物の栄養源」を注入し、地下水の流れを利用して既存建物直下地盤に拡散させ、国内の土壌に実在する微生物の代謝を利用して炭酸カルシウムを析出させる地盤改良工法を、国内外に先駆けて実用化する。

3. 研究の方法

全国の地盤から採取した土壌に含まれる微生物と、別途カルシウム源・栄養源を用い、濃度、養生期間・温度などが異なる条件下で要素実験を行い、砂の固化程度や固化に必要な時間等を確認すると共に、本手法を原位置地盤に適用するための最適な改良液と条件を把握した。

ウエルポイント工法を応用した手法で改良液を地中に注入するとともに別の地点から揚水し、原位置地盤に改良液を拡散・滞留させ、数m離れた注入地点と揚水地点の中間の地盤を改良可能であることを確認した。また、地盤改良前後の原位置地盤地表における常時微動測定結果の高振動数域のフーリエスペクトル比から改良範囲を推定した。

4. 研究成果

(1) 改良効果の確認

① 要素試験の概要

要素試験における培養液の注入方法を図-1に、培地成分（基本濃度）を表-1に示す。地盤固化は、文献¹⁾を参考に微生物による尿素分解で生じた二酸化炭素を利用する炭酸カルシウム析出法を用いた。試料には、三軸試験用のモールド（φ50mm×H100mm）に空中落下法で作製した相対密度約50%の豊浦標準砂を用い、原位置地盤から前培養した微生物の培養液と培地を混合した培養液をモールドの下端から注入し、恒温器（30℃）で養生した。培養液の注入回数は2回、養生期間は2週間とし、三軸試験装置に試料をセットするため、排水後に-25℃の冷凍庫で一晩凍結させて液状化試験を実施した。

培地は、文献¹⁾の分量（基本濃度、濃度1倍と規定）を基本とし、原位置地盤での適用を想定して、酵母エキスと増粘剤を追加した。培地成分は文献¹⁾のほか、低コスト化のためのNutrient Brothの代替となる酵母エキスと、改良対象層の地下水の流れが速い場合でも、培地を地中になるべく長い時間滞留させるための、環境負荷の少ないメチルセルロース系の増粘剤（水の2～3倍の粘性）とした。

② 培地成分の違いによる液状化強度

塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの3倍とした以外のケース（C8-1, 2, 4, 5）は、微生物代謝による尿素の分解作用によりアンモニウムイオンが発生するため、培養液を注入するとpHが上昇し、炭酸カルシウムの析出に伴いpHが緩やかに低下するサイクルを繰り返した。一方、塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの3倍としたケース（C8-3）では、培養液の注入でpHが若干上昇して緩やかに減少するサイクルを繰り返すが、ほかのケースに比較してpHの変動は小さかった。

培地成分の違いによる液状化強度曲線を図-2に示す。塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの3倍とした以外のケース（C8-1, 2, 4, 5）では、未改良ケース（C0）の2～3倍の液状化強度となり、酵母エキス、pH調整剤、増粘剤は固化効果には影響しない。一方、塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの3倍としたケース（C8-3）では、未改良ケース（C0）と同等の液状化強度であり、改良効果がほとんど無いことが分かる。

③ 塩化カルシウムと尿素の濃度の違いによる液状化強度

塩化カルシウムと尿素の濃度を基準ケースの 0.5～3 倍に変動させた検討を行った。塩化カルシウムと尿素の濃度の違いによるケース (C9-1～C9-5)、および塩化カルシウムと尿素の液を希釈したケースの液状化強度曲線を図-3 に示す。濃度が 0.5～1.5 倍までのケースでは、未改良のケース (C0) の 2～3 倍の液状化強度となり、改良効果が確認できる。一方、濃度が 2,3 倍のケースでは、図-2 と同様に改良効果がほとんど無い。高濃度の塩化カルシウムと尿素では液状化強度が増加するわけではなく、培地成分に適切な濃度があり、この結果は文献¹⁾と整合する。一方、濃度が 2,3 倍のケースをそれぞれ 1/2, 1/3 倍に希釈したケース (C9-4-2, C9-5-2) では、濃度が 0.5～1.5 倍のケースと同等の改良効果が認められる。このことは、塩化カルシウムと尿素が高濃度の培地でも、地中で拡散して濃度が希釈されることで地盤改良効果が見込めると考えられる。

上記の検討から原位置地盤で適用する培地成分には、適切な濃度の塩化カルシウム、尿素、酵母エキスが最低限必要で、pH 調整剤、増粘剤は固化効果には影響しないことが明らかとなった。

(2) 原位置地盤における固化試験

① 地盤概要

原位置試験の対象地盤は、後述の図-7 に示すように地表から埋土、シルト、細砂、シルトの構成であり、G.L. -3.4m～-8.5m の細砂層では N 値 10 以下、せん断波速度 $V_s=132\sim 168\text{m/s}$ であり、液状化の可能性がある (液状化層 5.1m) と考えられる。細砂層の透水係数は現場透水試験より $k=1.75\times 10^{-3}\text{cm/s}$ で比較的透水性の高い地盤である。また、地下水の流向・流速試験から流向は北からほぼ南であり、流速は約 0.037～0.041cm/min (53～59cm/日) であり、比較的流れの速い層であることを確認した。

② 注入固化試験計画

試験では、はじめに水頭差のみでの注入が可能かを確認するために、食塩水による事前注入試験を行い、その後培地による注入固化試験を実施した。また、注入固化試験から 5 か月後に地盤の固化分布を推定するために常時微動計測を行い、9 か月後に改良効果の確認のための地盤調査を実施した。

注入試験の概要図を図-4 に示す。確認注入試験では、事前の地盤調査結果を考慮して、注入孔を中心に観測孔を東西および南に 1m 離れた 3 地点に配置した。注入孔にはウエルポイントロッドを挿入し、注入深度を細砂層の G.L. -3.4m～G.L. -4.1m とした。注入は水頭差 (4.5m) のみで行った。観測孔には、G.L. -3.4m～G.L. -4.9m にスリット (1.5m) のある塩ビ管を挿入した。観測孔には、注入中および注入後の採水による pH 等の測定と、食塩水の電解質濃度を測定するために電気伝導度計を 3 深度に設置した。食塩水は、主にウエルポイントロッドの先端から球状に排出され、拡散・滞留することを想定した。目標注入量は、注入孔から半径 1.25m、G.L. -3.4m～G.L. -5.35m の範囲の間隙 (間隙率 $n=0.5$ を仮定) の地下水を置換するために必要な体積から約 3.6 m^3 とした。

注入固化試験では、原位置地盤の採取土から前培養した微生物を事前に注入し、その後培地を注入した。培地には、塩化カルシウム、尿素および酵母エキスと、地中に拡散・滞留させるために増粘剤 (水の粘性の 2～3 倍) を付与した。注入量の減少が予想されたため、観測孔 2 を変更して注入孔を 2 カ所とした。貯水と注水タンクは、培地の温度 30～35 度を維持するために断熱材を貼り付けて保温した。注入した培地の拡散・滞留の確認には、観測孔 1 に電気伝導度計 (観測孔 1 の G.L. -3.6, 4.1, 4.7m の計 3 カ所) を設置した。培地は、比重 (1.3) と地下水の流れにより、地盤深部への沈降と、広範囲への拡散による希釈の効果を考慮して、濃度を 3 倍とした塩化カルシウムと尿素を使用した。

③ 注入固化試験

培地による注入量・電気伝導度・地下水温度と時間の関係を図-5 に示す。目標の 3.6 m^3 を約 5 日間で注入し、それを 2 回繰り返した。平均注入量は 0.5～1.0 ℓ /分となり、事前の食塩水の場合 (5 ℓ /分) と比較して注入量が大きく減少する結果となった。これは増粘剤による粘性の影響や注入資材の不純物等による注入孔や地盤の目詰まりが原因と考えられる。電気伝導度の値は深い位置ほど高くなり、食塩水による結果と整合する。G.L. -4.7m では 1 回目の注入で所定の培地の半分程度の濃度に、2 回目で概ね所定の培地の濃度になり、その後、徐々に低下するが十分に地中に滞留している。地下水温度は、注入開始時の 18 度から上昇するが、19～21 度程度までしか上昇していない。

注入試験後の観測孔内水の pH 定期計測を行った。注入前の地下水は pH7.2 であったが、注入試験終了直後では尿素分解により pH8.3 に上昇し、徐々に低下して約 3 か月後には注入前の pH に近づき反応が収束していると推測された。

④ 注入・揚水固化試験

注入試験と同じ敷地で、注入と共に揚水し、両者の中間位置の地盤を固化させる実験を実施した。1m 間隔の 3 カ所の注入孔と、2～3m 離れた 1m 間隔の 5 カ所の揚水孔を注水孔と平行に設置し、注入試験と同様に、原位置地盤の採取土から前培養した微生物を事前に注入し、その後培地

を注入した。培地には、塩化カルシウム、尿素および酵母エキスをを用いたが、地中に拡散・滞留させるための増粘剤は用いなかった。注入量は3.2m³で、全体的に円状に広がるとともに、揚水孔側に流れ、注水試験よりも広い範囲に拡散した。

(3) 固化領域の推定と改良効果

① 常時微動計測による固化分布の推定

図-6 に注入試験地点で実施した常時微動計測による計測位置とフーリエスペクトル比を示す。注入孔と観測孔の近辺は1m間隔、その周辺は2m間隔に速度計を設置し、鉛直方向の常時微動を計測した。計測では、データ長163.84s（サンプリング周波数200Hz）の常時微動記録を80フレーム取得した。フーリエスペクトル比はアンサンブル平均より算出し、基準点は計測位置の最西側とした。注入孔から離れた位置（地点a）と基準点のフーリエスペクトル比では、0～50Hzの振動数で振幅比が概ね1倍に近い結果である。それに対して、注入孔に近い位置（地点b）では、0～30Hzの振動数では振幅比が概ね1倍であるが、高振動数域（特に30～50Hz）では、振幅比が1倍より下回る傾向にある。これは、微生物代謝により地盤が固化して剛性が増加したためと考えられる²⁾。各計測点のフーリエスペクトル比より、高振動数域で振幅比が小さくなる計測位置を囲うと図-6の赤線の領域となり、この領域で地盤が固化したと推定される。そこで、事後の地盤調査は赤線枠内を対象とした。

なお、注入・揚水試験においても同様の常時微動測定を実施し、改良範囲を推定した。注入・揚水試験の方が広い範囲が改良された。

② 改良効果の確認

常時微動計測結果をもとに、改良効果の確認のための地盤調査を実施した。改良前後に得られたN値分布を図-7に、液状化強度試験結果を図-8に示す。図-7、図-8には、注入試験と共に、注水・揚水試験の結果も併記している。G.L.-4.0～7.0mでは、未改良でN値10以下であったのに対して改良では最大20に増加している。また、せん断波速度の増加も確認している。液状化強度は未改良では繰返しせん断応力比が0.3（繰返し回数N=15）であったが、改良後は0.4～0.5程度となり、地盤が固化して液状化強度の増加が確認できる。地盤固化が地盤深部や広範囲で確認されたことは、培養液の比重と地下水の流れによる拡散の影響と考えられる。

(4) おわりに

微生物代謝による地盤改良について、原位置地盤に適用する培地、注入固化試験、注入・揚水固化試験、常時微動計測による固化領域の推定と地盤調査による改良効果の確認から以下の知見を得た。

- 原位置地盤で適用する培地成分には、適切な濃度の塩化カルシウム、尿素、酵母エキスが最低限必要で、pH調整剤、増粘剤は固化効果には影響しない。
- 原位置地盤で培地による注入固化試験を行い、目標量の培地を注入し、拡散、滞留を確認した。
- 注入・揚水固化試験を行い、地下水の流れにより地盤中の培養液を特定の方向に移動させ、改良範囲を設定できることを確認した。
- 常時微動計測による高振動数域のフーリエスペクトル比から固化分布の推定が可能である。
- 改良前後の地盤調査から地盤のN値、せん断波速度、液状化強度の増加を確認し、微生物代謝による地盤固化が原位置地盤で可能であることを確認した。

参考文献

- 稲垣由紀子；微生物代謝により固化した砂の強度向上と液状化対策に関する実験的研究，北海道大学学位論文，2014。
- 笠松ほか；屈折法地震探査データを用いた波形逆解析による表層地盤の2次元S波速度構造の推定，物理探査学会第137回学術講演会論文集，2017.11，pp.61-62。

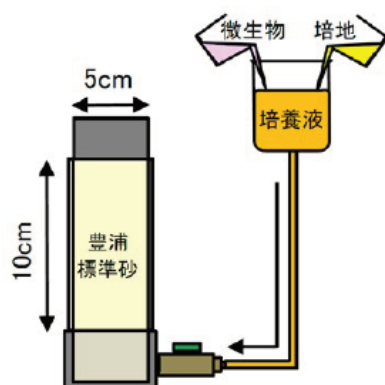


図-1 培養液の注入方法

表-1 培養液の成分(基本)

成分(濃度1倍)		分量(g/L)	文献1)
塩化カルシウム水和物(CaCl ₂)		73.5	○
尿素((NH ₂) ₂ CO)		30.03	○
Nutrient Broth(NB)		3.0	○
酵母エキス		20.0	
pH調整剤	塩化アンモニウム(NH ₄ Cl)	10.0	○
	炭酸水素ナトリウム(NaHCO ₃)	2.12	○
増粘剤(メチルセルロース系)		2.0	

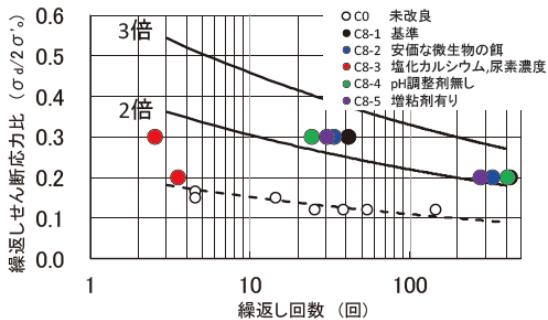


図-2 培地成分の違いによる液状化強度

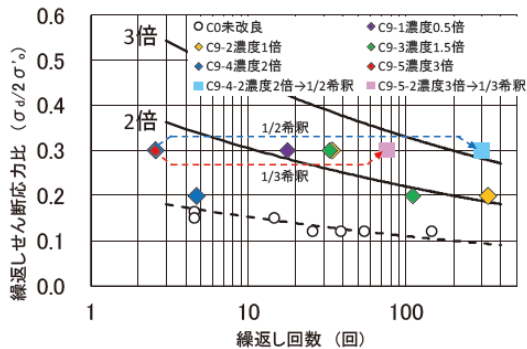


図-3 塩化カルシウム・尿素濃度の影響

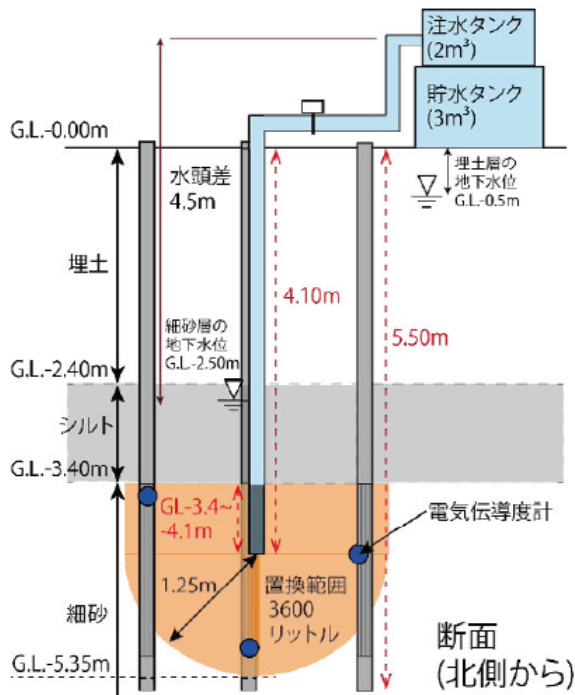


図-4 注入試験の概要

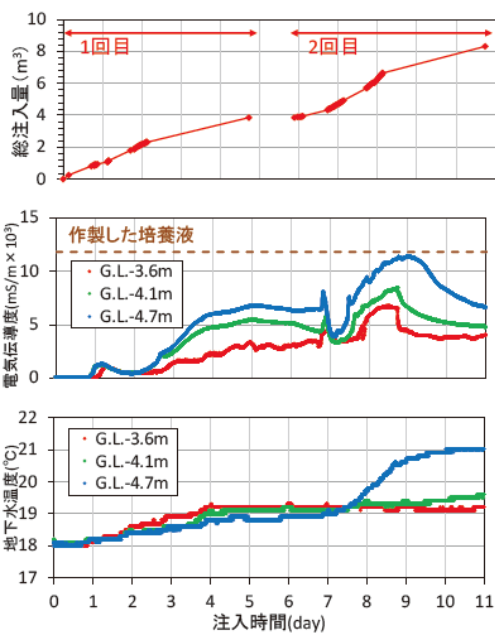


図-5 注入量・電気伝導度の経時変化

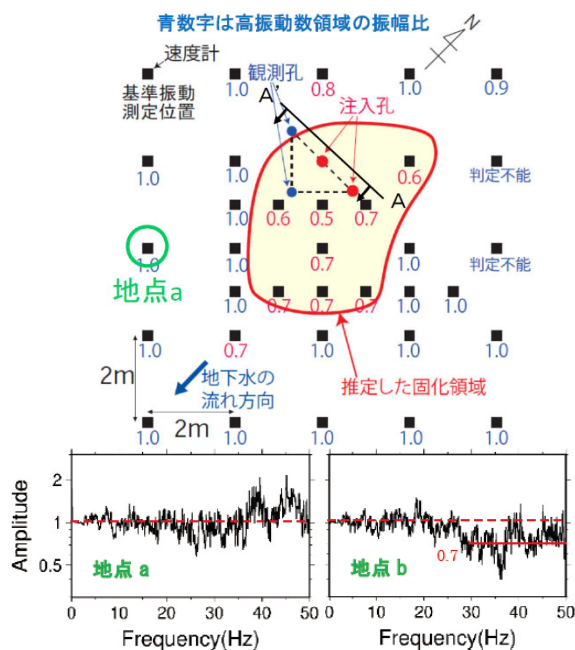


図-6 常時微動計測による改良範囲の推定

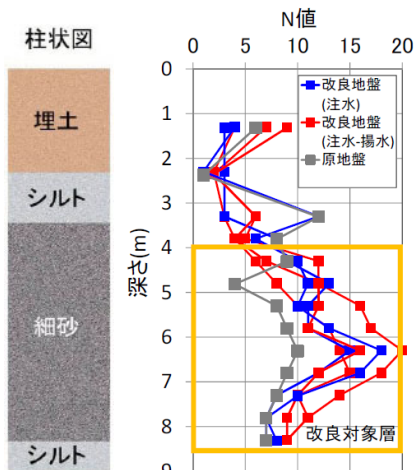


図-7 原位置における改良効果の確認

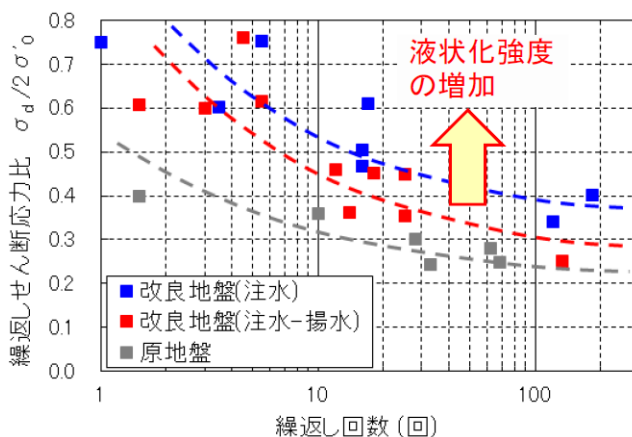


図-8 液状化強度試験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 安達 直人 秀川 貴彦 鈴木 康嗣 笠松 健太郎 上野 嘉之	4. 巻 67
2. 論文標題 微生物代謝を利用した原位置地盤の液状化強度評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鹿島技術研究所年報	6. 最初と最後の頁 23-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安達直人 秀川貴彦 鈴木康嗣 堀井隆 上野嘉之
2. 発表標題 微生物代謝による液状化対策のための注入固化試験 その1 原位置試験概要
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達直人 秀川貴彦 堀井隆 鈴木康嗣 上野嘉之 笠松健太郎
2. 発表標題 微生物代謝による液状化対策のための注入固化試験 その2 注入固化試験と改良効果
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達直人 秀川貴彦 鈴木康嗣 古山田耕司
2. 発表標題 微生物代謝を利用した固化試料の液状化強度に対する培養液成分の影響
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 地盤改質方法	発明者 安達直人 秀川貴彦 鈴木康嗣	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-52429	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 地盤改質方法	発明者 安達直人 秀川貴彦 鈴木康嗣 山田岳峰	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-44576	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 地盤改質方法	発明者 安達直人 永田茂 秀川貴彦 鈴木康嗣	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-47247	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	上野 嘉之 (UENO Yoshiyuki) (60416724)	鹿島建設株式会社(技術研究所)・地球環境・バイオグル ープ・上席研究員 (92604)	