原位置微生物の代謝機能を活用した液状化対策技術の有効性に関する研究

富山県立大学 学生会員 ○田中 仁
同上 正会員 畠 俊郎
株式会社竹中工務店 正会員 金田 一広

1, はじめに

日本では，1964 年の新潟地震で液状化現象が広く認知されるようになった．東日本大震災においても，関東地方 1 都 6 県 96 市町村で液状化による甚大な被害が確認された．地震大国である日本では，今後も巨大地震が危惧されており地震災害のひとつである液状化現象においても対策技術が必要とされている．本文では，微生物の代謝活動を利用した地盤改良技術に着目して実施した室内試験および数値解析の結果を報告する．

2, 目的

本研究では，ウレアーゼ活性（尿素を加水分解し，二酸化炭素とアンモニアを生成する能力）を有する原位置微生物を用いて，砂の間隙中に炭酸カルシウムを析出させることで砂地盤の液状化抑制を目的とした．液状化強度特性改善効果を明らかにするため室内試験を実施し，液状化による構造物被害予測プログラム FLIP（Finite element analysis program for Liquefaction Process）を用いた地震応答解析を行い，既設道路盛土に適用した場合の有効性について検討することとした．

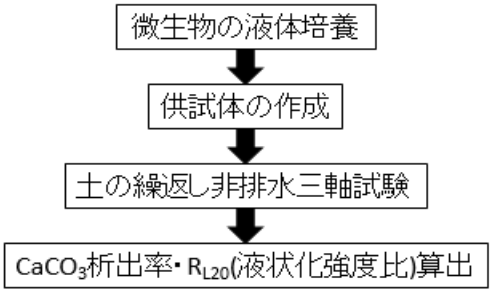


図-1 液状化特性試験手順

3, 研究方法

本研究で着目した微生物機能による炭酸カルシウム析出メカニズムを式(1)および(2)に示す．

$$CO(NH_2)_2+2H_2O \xrightarrow{Urease} 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (1)$$

$$Ca^{2+}+CO_3^{2-} \longrightarrow CaCO_3\downarrow \quad (2)$$

地震応答解析に先立ち，原位置由来の微生物を用いて固化した砂の供試体を対象とした土の繰返し非排水三軸試験を行い，R_{L20} を求めることとした．液状化特性試験手順を**図-1** に示す．なお，原位置微生物には富山湾海底の表層土壌より採取してきた底泥由来の単離菌（酵素活性値＝48.7U/L）を用いた．具体的には，**表-1** に示す組成の培養液を用い，30℃×120rpm の条件で 72 時間培養した溶液を試験に用いた．供試体は，**表-2** に示した通り，豊浦砂 300g をプラスチックモールド内に投入後に純水で 5 倍に希釈した液体培養液を 100ml（間隙体積分，菌体濃度は 1.0E+07cells/mL）通水した．その後，**表-3** に示した固化溶液を 3 回通水し，固化期間 9 日で固化させた．なお，試験の実施に先立ち単離微生物の人工海水中での酵素活性維持について実験を行った．その結果，海水よりも高い濃度の塩化物イオンを含む条件であっても酵素活性を維持する効果を確認している．

表-1 培養液の組成

試薬名	容量
75%人工海水	100ml
ポリペプトン	0.5g
Yeast extract	0.1g

表-2 供試体作成条件

砂種	豊浦砂
砂量	300g
固化溶液通水量	100ml
固化溶液通水回数	3 回
通水間隔	72 時間

表-3 固化溶液の組成

試薬名	容量
Nutrient Broth	0.90g
NH_4Cl	3.00g
$NaHCO_3$	0.64g
$CO(NH_2)_2$	5.41g
$CaCl_2$	9.99g
人工海水	300ml

その後，土の繰返し非排水三軸試験を行い，繰返し応力振幅比，繰返し載荷回数を求めた．各供試体の R_{L20} を算出し，液状化強度の推移を比較した．さらに，供試体内に析出した炭酸カルシウムを 0.50mol/L 濃度の塩酸を用いて酸分解し，砂重量に対する炭酸カルシウム析出率を算出した．

室内試験により得られた実験値を用いて FLIP による数値解析を行った．解析対象として深さ 6m，幅 30m の地盤を定義し，その上に高さ 2m，幅 10m の盛土が構築されている条件を仮定した．基層（深さ 3～6m）および盛土は非液状化地盤と仮定し，基層上部（深さ 0～3m）を液状化地盤として，対策を行っていない地盤（無対策），盛土の直下のみ微生物固化によって改良した地盤（直下改良:30m²），盛土の端からそれぞれ幅 3m 程度改良範囲を延長した地盤（広範囲改良:48m²）の 3 ケースについて数値解析を行い有効性について比較・検討することとした．

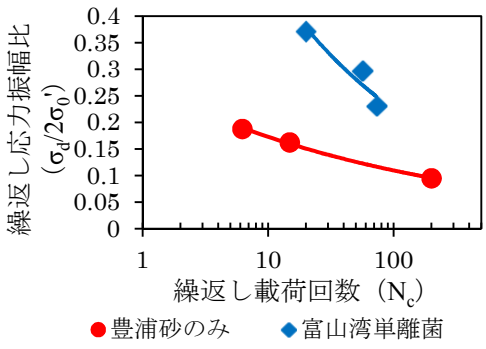


図-2 液状化強度の比較

表-4 砂重量に対する $CaCO_3$ 析出率

富山湾単離菌	$CaCO_3$ 析出率[%]
1 本目	2.027
2 本目	2.051
3 本目	2.012

4, 研究結果

土の繰返し非排水三軸試験から得られた繰返し応力振幅比と繰返し載荷回数のグラフを**図-2** に示す．豊浦砂のみの試験結果と比較し，原位置由来の微生物で固化させた供試体について顕著な液状化抑制効果が認められる結果となった．以上の結果は，原位置微生物を用いた場合においても 1 か月程度の施工で液状化抑制効果が期待できることを表しており，工期の面でもその有効性を明らかにすることができた．**表-4** にそれぞれの砂重量に対する炭酸カルシウム析出率を示す．今回の試験条件では，添加した固化溶液に含まれるすべてのカルシウム分が結晶化したと仮定すると砂重量に対して 3%程度の析出率となる．しかしながら，すべての供試体について 2%程度の析出でとどまる傾向が明らかとなった．この原因を明らかにすることを目的とし，今後は固化試験期間中にカルシウムイオン濃度測定を組み合わせるなどし，添加したカルシウムがどの程度消費されるかを明らかにする必要があると考えている．

次に地震応答解析の結果を示す．FLIP の数値解析における解析メッシュを**図-3** に，計算によって得られた最大せん断ひずみコンター図を**図-4** にそれぞれ示す．解析の結果から，液状化対策を行っていない地盤（無対策）では液状化に伴い盛土の沈下が進み，盛土直下の最大せん断ひずみが上昇することが明らかとなった．一方，微生物機能を用いて固化したケースはいずれもひずみの抑制効果が示され，液状化対策としての有効性が地震応答解析の結果からも明らかとなった．直下改良と，広範囲改良ともに無対策と比較して最大せん断ひずみの上昇を抑えられるものの，広範囲改良の方がより顕著な抑制効果が期待できる結果となった．今後は異なる種類の液状化対策効果が期待される微生物を用いた試験結果などを用いた解析を進め，効率的な改良範囲設定などに取り組んでいきたい．

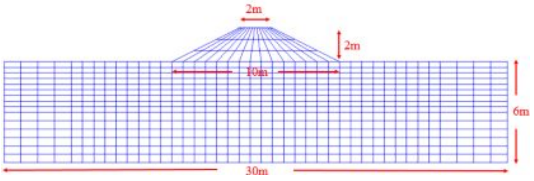
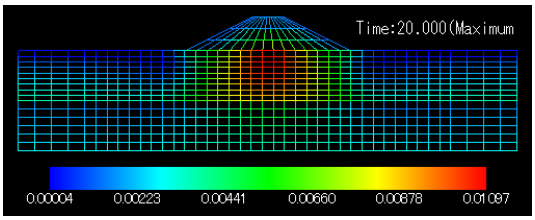
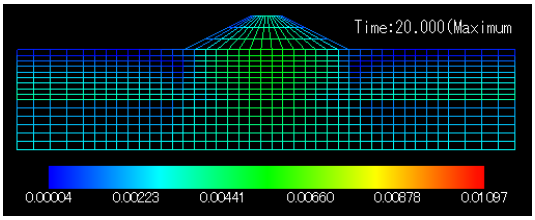


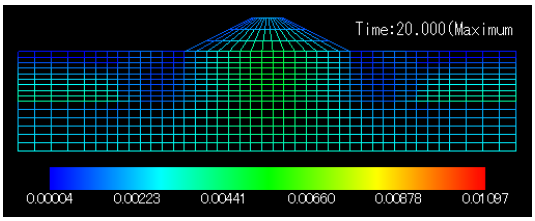
図-3 解析モデル



無対策



直下改良（改良面積 30m²）



広範囲改良（改良面積 48m²）

図-4 最大せん断ひずみコンター図