

植物種子を用いた炭酸カルシウム改良砂の力学特性

Mechanical properties of calcium carbonate treated sand using plant seeds

山下隼史¹, 小高猛司², 桐山和也³, 武藤裕久³, 江本菜々美⁴, 谷藤春奈⁴

- 1 名城大学大学院・理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 矢作建設工業株式会社
- 4 元名城大学学生

概 要

近年、地盤改良の分野においてもカーボンニュートラルの達成が意識されるようになっており、環境に配慮した地盤改良技術の研究が活発化してきている。そこで本研究においては、マメ科の植物種子粉末に含まれるウレアーゼ酵素を利用して、炭酸カルシウムを地盤中に析出させる地盤改良工法の検討を実施した。具体的には、実際の地盤改良施工を想定した供試体作製方法を提案し、三軸試験及び要素シミュレーションを実施した。その結果、単調載荷試験においては、改良の効果によってせん断初期の剛性が上昇し、弾性が卓越した挙動を示すことが明らかになった。繰返し載荷試験においても、改良の効果により液状化強度が増加していることが確認された。単調載荷試験の要素シミュレーションでは、改良によって骨格構造が高位かつ劣化しづらくなるとするパラメータを設定することで、改良による力学挙動の変化を説明可能であることが示された。

キーワード：炭酸カルシウム、植物由来酵素、三軸試験、要素シミュレーション

1. はじめに

南海トラフ巨大地震をはじめとする将来の巨大地震に備えて液状化対策が急務となっている。一方で、気候変動をはじめとした環境問題も深刻化してきている。このような背景から、近年では環境に配慮した地盤改良工法の研究開発の重要性が増してきている。一般的な地盤改良でよく用いられるセメントは製造時に多量のCO₂を排出しているとの懸念があり、こうした背景から微生物を用いた尿素分解により得られる、炭酸イオンとカルシウムイオンによって炭酸カルシウムを地盤内に析出させる地盤改良工法が提案されている¹⁾²⁾。しかし、微生物は実験室内では理想的な環境を整えることは出来るが、実地盤内で微生物が想定通りの役割を果たすことができるかという点に疑問が残る³⁾。そこで近年、微生物を用いないウレアーゼ酵素の供給方法が注目されている。たとえば、安原らは植物種子から精製されたウレアーゼ酵素を用いて、炭酸カルシウムを地盤中に析出させ、地盤を改良できることを示している⁴⁾。また、林らは供試体の養生時の飽和度によって同じ炭酸カルシウムの析出量であっても改良後の供試体の強度が大きく異なることを示している⁵⁾。これは、炭酸カルシウムを析出させる際の供試体の条件によって、炭酸カルシウム析出後の強度が大きく変わることを示唆している。

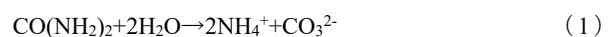
そのため、炭酸カルシウムによる地盤改良の効果を適切に評価するためには、実際の地盤に注入して改良を行うことを想定した供試体の作製方法で評価を行うことが望ましい。そこで、本研究においては実務で用いることを想定するため、拘束圧のある飽和地盤に固化溶液を注入する方法で供試体を作製し、その力学特性を把握することを目的とする。また、ウレアーゼ酵素の供給源としてナタマメの粉末から直接得る手法についても提案する。作製した供試体は、三軸試験機による単調載荷試験及び繰返し載荷試験を実施することによって改良の効果の評価を行った。さらに単調載荷試験に対して、弾塑性構成モデルによるシミュレーションを実施し、骨格構造という観点から改良の効果を評価した。

2. 試験概要

2.1 固化溶液

本研究で用いている炭酸カルシウムの析出過程を以下の式に示す。

- 尿素分解過程



- 炭酸カルシウム生成過程





尿素には肥料用の粒状尿素を用いた。尿素分解過程では尿素分解に尿素分解菌もしくはウレアーゼ酵素が必要となる。尿素分解の触媒となるウレアーゼ酵素はナタマメ粉末の水溶液から供給する。また、炭酸カルシウムの析出に必要なカルシウムイオンは粒状の塩化カルシウム（濃度 73%以上、 CaCl_2 ）から供給した。本研究で用いた固化溶液 1L あたりの配合を表 1 に示す。ナタマメ粉末の水溶液はナタマメ粉砕物 30g と蒸留水を容器内に入れ、一分間振とうした後 2 時間静置することで抽出を行った。抽出後は不織布を用いて残渣の質量が 60g になるまで絞ることでナタマメの水溶液を精製した。反応溶液には尿素と塩化カルシウムの水溶液を用いた。反応溶液とナタマメ水溶液を混合させた固化溶液は、混合後 1 時間以内に供試体内へ注入した。

2.2 供試体作製方法

改良供試体の作製方法を図 1 に示す。三軸試験を行う供試体は、三河珪砂 6 号砂の乾燥試料を相対密度 20%、40%、60%になるように、空中落下法にて高さ 150mm、直径 50mm の円柱供試体を作製した。供試体の上部 10mm、下部 30mm にはそれぞれ三河珪砂 3 号砂をフィルターとして使用した。その後ピストンを設置し、地盤内の拘束圧を模擬するため 20kPa の圧力をかける。飽和度を高める目的で二酸化炭素を下部から注入する（図 1-a）。続いて、脱気した蒸留水を供試体下部から注入し飽和化を行う（図 1-b）。最後に固化溶液を供試体下部から注入する（図 1-c）。以上のような手順で供試体を作製することによって、飽和している地盤内に固化溶液を注入することを模擬している。すべての供試体は炭酸カルシウムの析出量が一定となる 6 日間以上養生した。なお、炭酸カルシウムの析出量は養生日数 3 日以降で一定値に落ち着くことを別途確認している。養生中はピストンに空気圧 20kPa をかけた状態で恒温室内において温度を 20°C で一定に保った（図 2）。養生終了後に供試体を脱型し、上下端部を切り落として成形することで長さ 100mm 直径 50mm の円柱供試体を作製し、三軸試験用供試体とした。一方、無改良供試体は三軸試験室内にてゴムスリーブを被せたモールドを使用し、空中落下法にて供試体を作製した。

2.3 三軸試験概要

単調荷試験に用いた供試体の諸元を表 2 に、繰返し荷試験に用いた供試体の諸元を表 3 に示す。単調荷試験は、有効拘束圧 50, 100, 150kPa の 3 パターン、せん断時の荷速度は 0.1%/min で実施した。表中の改良供試体の試験前相対密度は、供試体を試験機に設置後 20kPa の負圧によって自立させた際に計測した体積と試験後に試料をすべて回収し、炭酸カルシウムを溶脱した後に残った砂の炉乾燥後の質量を用いて計算を行った。圧密後の相対密度は、初期相対密度から圧密時の二重管ピュレットの排水量分を体積変化として計算した。無改良供試体は 20kPa

表 1 固化溶液 1L あたりの配合

マメ粉砕物 (g)	反応溶液濃度 (mol/L)	
	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	CaCl_2
30	1.0	1.0

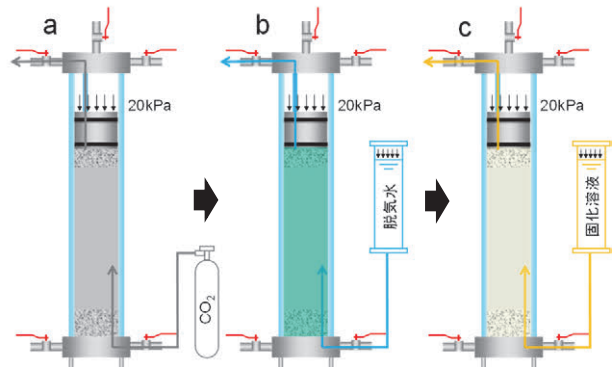


図 1 三軸供試体の作製手順

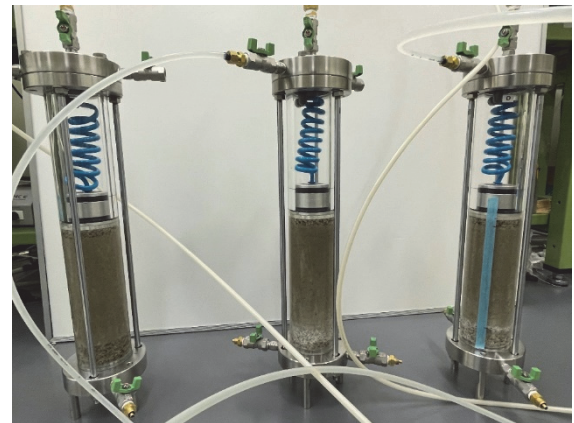


図 2 養生中の三軸供試体

表 2 単調荷試験の供試体諸元

供試体番号	相対密度区分	固化溶液	拘束圧 (kPa)	試験前相対密度 (%)	圧密後相対密度 (%)
1	40~60	あり (改良供試体)	50	43.8	46.1
2			100	37.2	44.4
3			150	42.8	48.7
4		なし (無改良供試体)	50	49.6	51.2
5			100	44.4	47.9
6			150	44.7	49.5
7	60以上	あり (改良供試体)	50	67.9	70.2
8			100	60.0	63.9
9			150	63.3	67.8
10		なし (無改良供試体)	50	63.5	65.0
11			100	69.6	73.0
12			150	59.7	63.4

表 3 繰返し荷試験の供試体諸元

供試体番号	固化溶液	繰返し応力比	試験前相対密度 (%)	圧密後相対密度 (%)	繰返し荷回数
13	あり (改良供試体)	0.25	47.2	53.8	5
14		0.20	52.1	58.1	18
15		0.17	39.6	47.0	30
16	なし (無改良供試体)	0.20	49.4	53.6	2
17		0.17	53.0	56.3	9
18		0.15	48.5	52.7	14
19		0.14	47.3	51.2	25

の負圧により供試体を自立させた際の直径の計測値と投入した砂の質量を用いて試験前の相対密度を計算した。圧密後の相対密度は改良供試体と同様に圧密時の排水量を用いて求めている。供試体の飽和化は、二重負圧法及び背圧を 200kPa かけることにより実施した。再計算した改良供試体の相対密度のばらつきが大きかったため、再計算した相対密度の大きさによって 40%~60%、60%以上の 2 種類に相対密度で区分し、無改良供試体と改良供試体の全 12 ケースの試験結果を比較した。供試体の相対密度がばらついた理由は図 1-b における脱気水を通す過程において乾燥試料がサクシオン消失によるコラプスによって沈下したことや、供試体脱型の際に密詰めになった可能性が考えられる。特に、図 1-b の作業後に一部の供試体の沈下量から概算した相対密度の値が、先述の計算方法による試験前相対密度と近い値であったことから、図 1-b の作業に伴い供試体が沈下してしまった影響が大きいと考えている。

繰返し載荷試験(液状化強度試験)は、有効拘束圧 100kPa、周波数 0.1Hz で実施した。液状化の判定基準は、初期の有効応力が 95%消失した時点とした。繰返し載荷試験の供試体も大きなばらつきが見られたため、比較的ばらつきの少なかった目標相対密度 40%で作製した供試体について試験結果の比較を行う。

3. 試験結果

3.1 炭酸カルシウム析出量結果

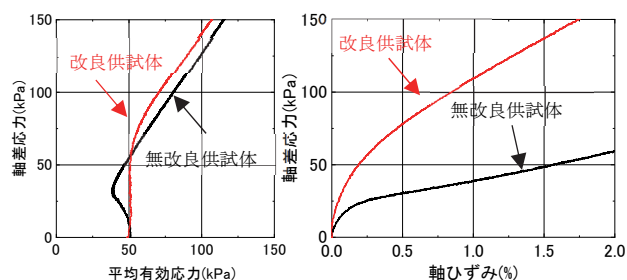
炭酸カルシウムの析出量結果を表 4 に示す。炭酸カルシウムの析出率は供試体内の炉乾燥後の砂質量に対する炭酸カルシウムの質量を表している。炭酸カルシウムの析出量の測定方法は、試験後の供試体をおおよそ三分割した後炉乾燥させた質量と希塩酸を用いて炭酸カルシウムを溶脱させた後の砂の質量の差から求めている。析出させた炭酸カルシウムが流出する可能性を考慮し、供試体作製後から試験終了後まで炭酸カルシウム以外の未反応物質を洗い流す操作を行っていない。表 4 からは概ね 3~4%程度の炭酸カルシウムの析出が確認できたが、供試体の上下でのばらつきが大きく、特に供試体下部に多く析出する傾向が見られた。これは薬液にマメの粉砕物などの不純物が多く、砂のろ過効果によって供試体上部まで固化溶液が均一に行き渡らなかったことを示唆しており、供試体の内部での均質な供試体を作製することに加え、供試体毎にも均質な供試体を作製する事が課題である。

3.2 単調載荷試験結果

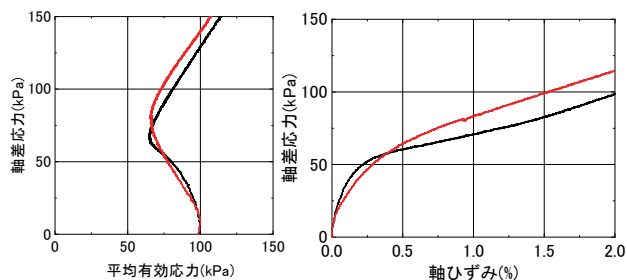
単調載荷試験の有効応力経路および軸差応力~軸ひずみ関係を図 2、図 3 に示す。図 2 においては、拘束圧 50kPa と 100kPa において赤線で示した改良供試体で有効応力経路が鉛直に立ち上がっていることから、初期の弾性的な挙動が卓越していることが分かる。また、軸差応力~軸ひずみ関係からも明らかにせん断初期の剛性が高いことが分かる。図 2 の供試体はすべての拘束圧において改良供試

表 4 炭酸カルシウム析出量

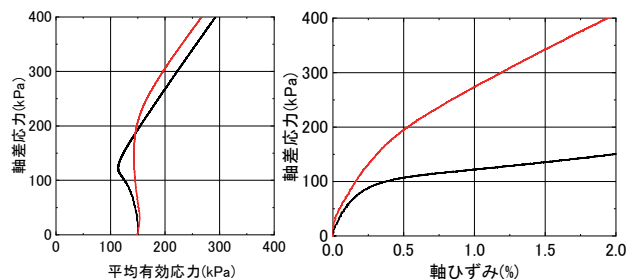
供試体番号	試験内容	炭酸カルシウム析出率 (%)			
		供試体上部	供試体中部	供試体下部	供試体平均
1	単調載荷試験	2.89	4.00	5.82	4.04
2		2.55	2.96	3.16	2.69
3		3.30	5.05	6.38	4.71
7		2.06	5.28	4.04	3.59
8		2.89	4.01	6.68	4.33
9		2.50	3.12	3.64	2.88
13	繰返し載荷試験	2.64	4.45	4.27	2.84
14		2.69	2.40	3.78	2.95
15		2.61	4.40	3.91	2.73



(a) 拘束圧 50kPa・供試体番号 1, 4



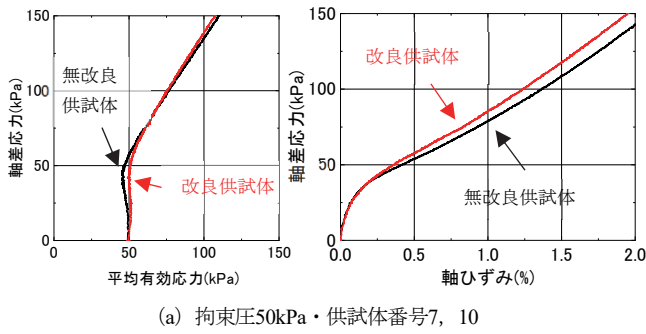
(b) 拘束圧 100kPa・供試体番号 2, 5



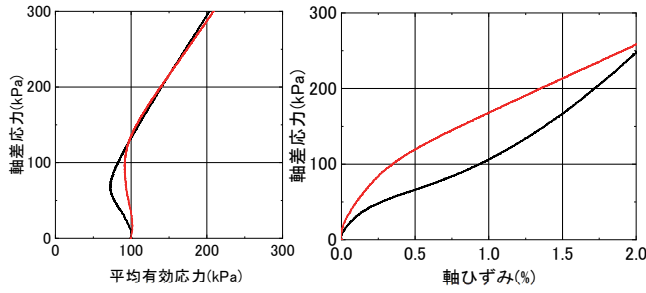
(c) 拘束圧 150kPa・供試体番号 3, 6

図 2 単調載荷試験結果 (相対密度 40%~60%)

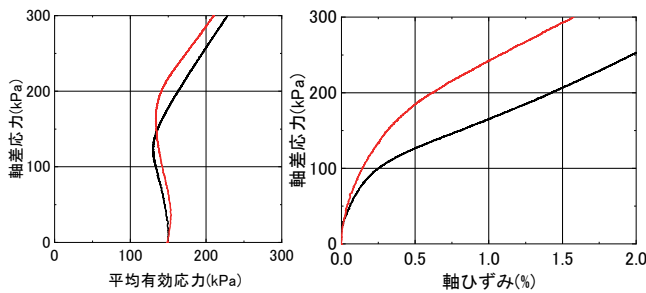
体の方が緩詰となっていることから、このようなせん断初期の剛性の違いは改良の効果によるものであると考えられる。また、供試体の挙動が塑性膨張を伴う硬化挙動に変化する点である変相点に着目すると、すべてのケースにおいて改良供試体の方が高い軸差応力となっていることから改良の効果があったと考えられる。ただし、拘束圧 100kPa のケースは無改良供試体と改良供試体が類似した挙動となっている。これは表 4 に示したように、このケースの炭酸カルシウムの析出量が少ないことや相対密度も最も小さい供試体であることに起因すると考えている。図 3 の相対密度が 60%以上となったケースでは、有効応力経



(a) 拘束圧50kPa・供試体番号7, 10



(b) 拘束圧100kPa・供試体番号8, 11



(c) 拘束圧150kPa・供試体番号9, 12

図3 単調載荷試験結果 (相対密度60%以上)

路や軸差応力～軸ひずみ関係が類似していることから改良の効果が小さい結果となった。しかし、わずかな違いではあるが、すべてのケースにおいて変相点の位置は改良供試体の方が高い軸差応力となっており、軸差応力～軸ひずみ関係においても改良供試体の方がやや高い剛性を示す傾向があることが分かる。図2, 図3のような低ひずみレベルでの剛性の増大は液状化に対する強度増加に大きな影響を与えると考えられることから、繰返し載荷試験を実施して確認した。

3.3 繰返し載荷試験結果

繰返し載荷試験によって得られた液状化強度曲線を図4に示す。改良供試体は無改良供試体と比較すると明らかに高い液状化強度を示すことが分かる。林らは炭酸ナトリウム微粉末を砂に混ぜ、塩化カルシウム水溶液を注入することで炭酸カルシウムを析出させた実験で、砂の質量に対し僅か1%の炭酸カルシウムの析出で液状化強度が約2倍、3%の析出で液状化強度が約4倍となることを示している⁹⁾。しかし、本研究ではそこまでの改良効果には至っていないことが分かる。これは供試体の作製方法が異なることが影響している可能性がある。

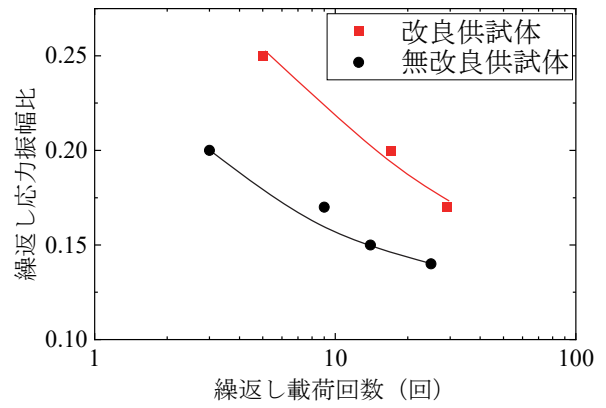


図4 繰返し載荷試験結果 (液状化強度曲線)

図5, 図6に繰返し載荷試験における無改良供試体, 改良供試体の (a) 有効応力経路, (b) 軸差応力～軸ひずみ関係, (c) 軸ひずみの経時変化, (d) 過剰間隙水圧比の経時変化を示す。図5, 図6には液状化に至る繰返し載荷回数が近いケースを抽出した。有効応力経路による比較では無改良供試体は1サイクル目の圧縮側において、若干の塑性圧縮挙動を示しているのに対し、改良供試体は若干の塑性膨張挙動を示すという違いがある。このような初期の力学挙動の違いは単調載荷試験とも整合している。加えて、平均有効応力が50kPa以下の領域においては無改良供試体の平均有効応力が急激に減少し0に近づくのに対し、改良供試体は粘り強さを発揮している。これは (d) 過剰間隙水圧比の経時変化のグラフにおいて100s以降の過剰間隙水圧比の上昇スピードが改良供試体の方が明らかに抑制されていることに由来する。(b) 軸差応力～軸ひずみ関係, (c) 軸ひずみの経時変化からは、改良供試体の軸ひずみの進展が緩やかになっていることが分かり、無改良供試体よりも明確なサイクリックモビリティ現象を発現していることを示している。

4. 単調載荷試験の要素シミュレーション

炭酸カルシウムによって改良された砂の力学挙動が弾塑性構成モデルによってどのように記述されるかを検討するため、単調載荷試験の要素シミュレーションを行った。本論文では特に相対密度区分40%～60%の拘束圧50kPa, 150kPaの試験結果に対し、SYSカムクレイモデル⁷⁾を用いた数値計算による要素シミュレーションを実施し、炭酸カルシウムによる改良効果について弾塑性力学的な考察を行った。なお、拘束圧100kPaについては炭酸カルシウムの析出が最も少なく、相対密度も最も小さい供試体となっていたために改良の効果が判別しづらいことからシミュレーションを行っていない。表5に要素シミュレーションに用いた弾塑性パラメータを、図7にシミュレーション結果を示す。炭酸カルシウムによる改良によって、初期の過圧密比の増加と同時に初期の構造も増加すると仮定することにより、試験結果を上手く説明できることがわか

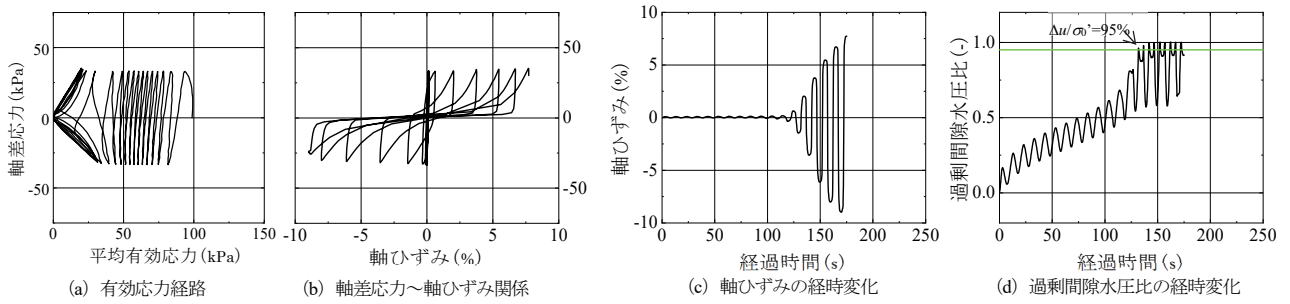


図 5 無改良供試体（供試体番号18）の繰返し載荷試験結果

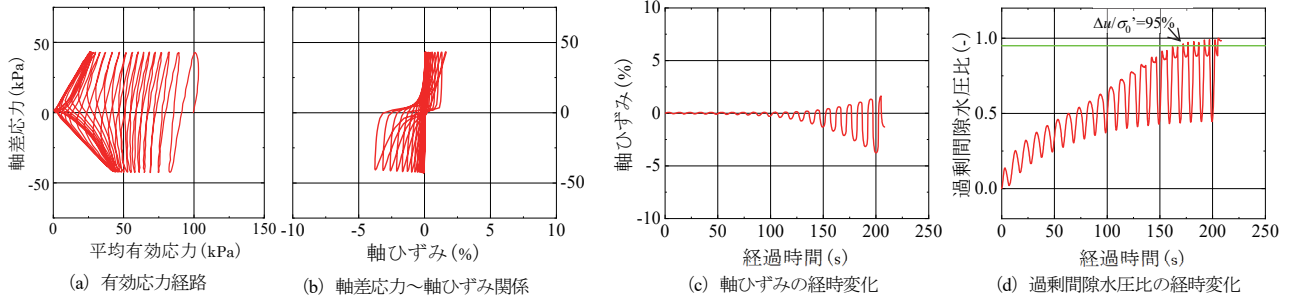
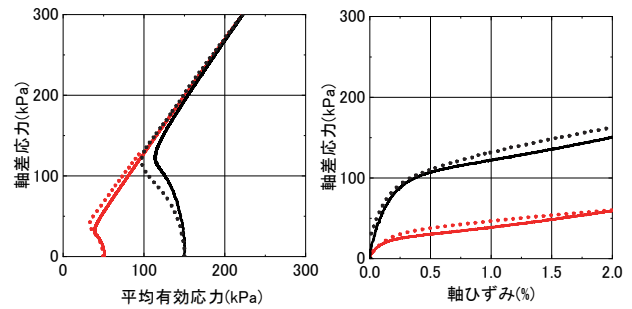


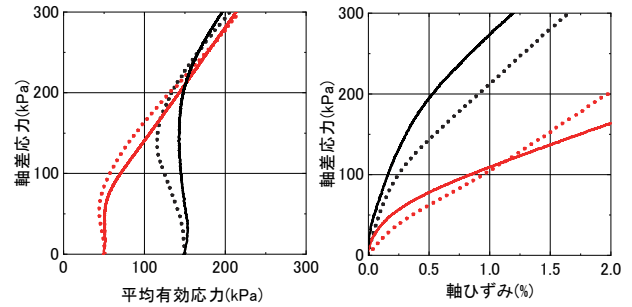
図 6 改良供試体（供試体番号 14）の繰返し載荷試験結果

表 5 シミュレーションに用いた弾塑性パラメータ

供試体		無改良	改良
弾塑性パラメータ	圧縮係数 λ	0.050	
	膨潤指数 κ	0.007	
	限界状態定数 M	1.200	
	NCLの切片 N	1.880	
	ポアソン比 ν	0.300	
発展パラメータ	構造劣化指数 a ($b = c = 1.0$)	2.000	0.050
	正規圧密土化指数 m	0.100	
	回転硬化指数 b_r	2.000	
	回転硬化限界定数 m_b	0.500	
初期値	初期比体積 v_0	1.890	
	初期の構造の程度 $1/R_0^*$	1.100	13.90
	初期過圧密度 $1/R_0$	5.540	70.00
	初期異方性 ζ_0	0.010	
	初期平均有効応力 p_0'	20.00	



(a) 無改良供試体・供試体番号 1, 3



(b) 改良供試体・供試体番号4, 6

図 7 シミュレーション結果（実線：試験結果，点線：計算結果）

る。さらに、骨格構造の劣化の速さを司る構造劣化指数 a が、改良供試体の方が小さく評価されたことから、炭酸カルシウムによって劣化しづらい強固な骨格構造が形成されていることが弾塑性モデルからも解釈できる。

5. まとめ

本研究ではナタマメの粉末をウレアーゼ酵素の供給源として、地盤中に炭酸カルシウムを析出させる手法を提案した。さらに、飽和地盤かつ拘束圧のある地盤に注入する際の供試体作製方法についても提案し、固化溶液の改良効果に対する検討を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) ナタマメの粉末をウレアーゼ酵素の供給源として尿素を分解し、炭酸カルシウムを析出させることが可能であり本研究のケースでは砂の乾燥質量の概ね 3~4% 程度が析出した。
- 2) 実務を想定した拘束圧のある飽和地盤に固化溶液を注入する方法で作製した供試体を用いて単調載荷試験を実施した結果、液状化と関連が深いと考えられるせん断初期の剛性に影響が出ることが明らかとなった。
- 3) 繰返し載荷試験からは明確に液状化強度が増加し

た。ただし、他の研究において確認されているような液状化強度が何倍にもなるような改良効果までは得られなかった。

- 4) 改良効果が大きかったケースでの力学挙動の変化は、固化溶液による改良の効果によって、初期の構造の程度が高位かつ劣化しにくいと評価することで弾塑性構成モデルを用いて説明可能である。

一連の試験結果から、ナタマメをウレアーゼ酵素の供給源とした炭酸カルシウム改良砂による地盤改良が有効である可能性が示された。一方で、供試体内部の炭酸カルシウム析出量の不均一性や供試体毎のばらつきなどの改善点も多く見られた。改良効果の定量的な評価を行うためには均質な供試体を作製することが必須であり、固化溶液を適切にろ過する手法の開発などに取り組む予定である。

謝辞

SYS カムクレイモデルによる要素挙動の解析にあたっては名古屋大学中井健太郎准教授に大変お世話になりました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 川崎了:微生物機能を利用した地盤改良技術, 公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol. 29, No. 1, 2011.
- 2) 地盤工学会 次世代地盤改良技術に関する研究委員会: 微生物を利用した土の固化に関する手引き, 次世代地盤改良技術に関する研究委員会報告書, 2021.
- 3) 高畑陽:地盤工学と微生物, 地盤工学会誌, Vol. 61, No. 11/12, pp. 14-17, 2013.
- 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) 安原英明, Neupane, D., 木下尚樹, 林和幸, 海野寿康: 生体触媒を活用した炭酸カルシウム結晶析出による地盤固化効果の検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 70, No. 2, pp. 290-300, 2014.
- 6) 林和幸, 岡村未対, 安原英明, Simatupang, A.: 炭酸カルシウム結晶析出時の飽和度が改良砂の液状化特性に及ぼす影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 74, No. 2, pp. 164-176, 2018.
- 7) 例えば, Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol. 42, No.5, pp. 47-57, 2002.