

植物種子を用いた炭酸カルシウム改良砂の三軸試験とその要素シミュレーション

名城大学大学院 学生会員 ○山下 隼史
元名城大学生 江本菜々美・谷藤 春奈
名城大学 正会員 小高 猛司
矢作建設工業株式会社 正会員 桐山 和也, 武藤 裕久

1. はじめに

液状化対策としての地盤改良工法はセメント系の固化剤が利用されることが多い。しかし、セメントは製造時に多量の CO_2 を排出することから、 CO_2 の排出量を抑える目的で炭酸カルシウムを地盤中に析出させる地盤改良工法が注目されている¹⁾。安原ら²⁾は、植物種子から精製したウレアーゼ酵素を用いて、尿素分解から得られる炭酸イオン (CO_3^{2-}) と、塩化カルシウムから供給されたカルシウムイオン (Ca^{2+}) から炭酸カルシウム (CaCO_3) を地盤中に析出させる地盤改良工法の効果を示した。一方、本報ではウレアーゼ酵素の供給源としてマメ科の植物種子の粉碎物を直接用いた固化溶液を提案し、その効果を三軸の繰返し載荷試験及び単調載荷試験から検討する。さらに、炭酸カルシウムによって改良された砂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単調載荷試験の要素シミュレーションを行うことで検討する。

2. 試験の概要

今回用いた薬液の 1L あたりの配合を表 1 に示す。ウレアーゼ酵素は粉碎したナタマメ 30g の水溶液から供給し、反応溶液として尿素と塩化カルシウムを用いた。三軸試験を行う供試体は、三河珪砂 6 号砂の乾燥試料を目標相対密度 40% になるように作製した、高さ 150mm、直径 50mm の円柱供試体である。その後、ピストンを設置し、地盤内の拘束圧を表現するため 20kPa の圧力をかける。二酸化炭素を下から注入し、脱気水を下から注水することで供試体を飽和させる。そうすることで、拘束圧のある飽和地盤に薬液を注入することを模擬している。その後、薬液を下から注入し室温 20°C の恒温室内で 1 週間養生した。写真 1 に養生中の供試体を示す。養生後にアクリル円筒から脱型し、上下端を成形し高さ 100mm の供試体とした。繰返し載荷試験は有効拘束圧 100kPa、周波数 0.1Hz で載荷した。単調

表 1 薬液の配合

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

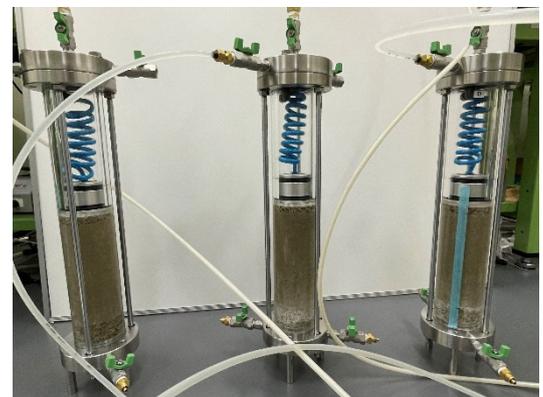


写真 1 養生中の三軸供試体

載荷試験の有効拘束圧は 50, 100, 150kPa の 3 種、載荷速度 0.1%/min、で CU 試験を実施した。さらに、試験後の供試体を用いて、供試体内に析出していた炭酸カルシウムの析出量の計測を実施した。また、炭酸カルシウムを溶脱した後に回収した砂試料の質量を厳密に計測することにより、供試体の相対密度を再計算した。本報では、特に目標相対密度 40% の供試体に対し、SYS カムクレイモデル³⁾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。

3. 試験ならびにシミュレーション結果

図 1 に繰返し載荷試験から得られた液状化強度曲線を示す。液状化強度は無改良供試体と比較して改良供試体の方が高く出ている結果となった。改良供試体には炭酸カルシウムが 2~4% ほど析出していることを確認しており、この析出した炭酸カルシウムが液状化強度を高めたと考えてよい。図 2 に目標相対密度 40%、

キーワード 地盤改良, 液状化, 炭酸カルシウム, 弾塑性構成式

連絡先

〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学部

TEL: 052-838-2347

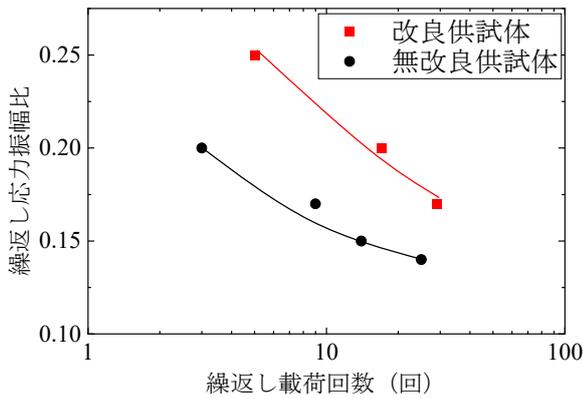


図1 液状化強度曲線 (Dr=40%)

拘束圧 50kPa, 150kPa の有効応力経路を示す. 試験結果を実線, 数値シミュレーションの結果を点線で示している. 改良供試体の拘束圧 100kPa のケースが, 他のケースと比べ相対密度や炭酸カルシウムの析出量が異なる供試体となっていたためグラフには載せていない. 有効応力経路及び軸差応力～軸ひずみ関係において, 液状化への耐性と関連が深いと考えられるせん断初期の低ひずみ領域に着目する. 無改良供試体は, 有効応力経路からせん断初期に平均有効応力が減少する塑性圧縮挙動を示している. 一方, 炭酸カルシウム改良供試体は, せん断初期の剛性の上昇によって, 有効応力経路が鉛直に立ち上がる弾性が卓越した挙動を示す. 表2に要素シミュレーションに用いた弾塑性パラメータを示す. 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示された.

4. まとめ

三軸試験による繰返し载荷試験及び単調载荷試験結果からナタマメの粉末をウレアーゼ酵素の供給源とした薬液の改良効果が示された. また, 炭酸カルシウムによる改良効果は SYS カムクレイモデルにおける骨格構造に関連するパラメータによって説明可能であることが示された. 今後は今回の計算結果によって得られたパラメータを用いて有限要素法による解析によって改良効果の検討も行う予定である.

参考文獻

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) 安原英明: 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, Vol. 70, No. 2, pp. 290-300, 2014. 3) A. Asaoka et al : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), 2002.

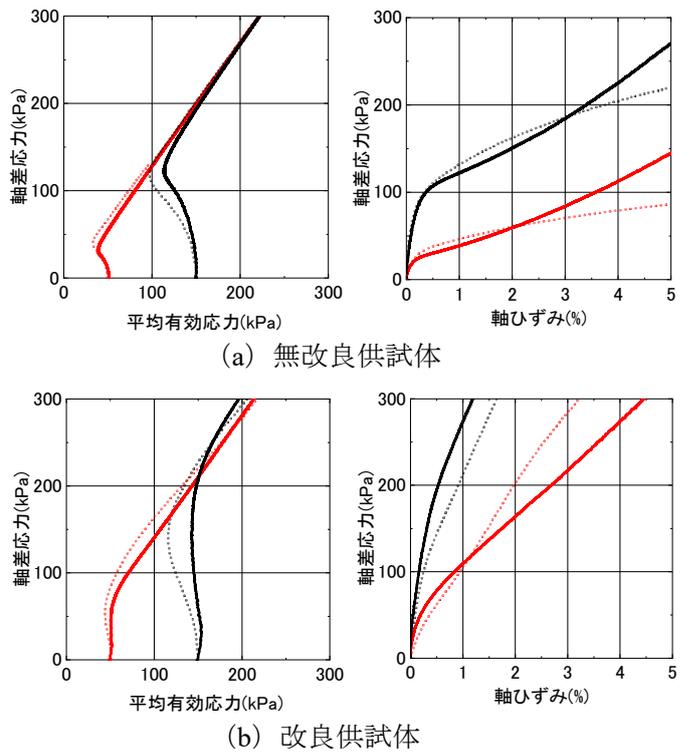


図2 Dr=40%の試験結果及び計算結果
(実線: 試験結果, 点線: 計算結果)

表2 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
パラ弾塑性	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	
パラ発メ展則	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	
初期値	回転硬化限界定数 m_b	0.500	
	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	