セメント改良土および練返したセメント改良土の力学挙動と SYS Cam-clay model によるその再現

セメント安定処理，練返し，骨格構造　　名古屋大学　国際会員　○山田正太郎，中野　正樹，野田　利弘
学生会員　堀内　俊輔，依田　広貴，笹山　哲司

1. はじめに

本稿では，浚渫土砂をセメント安定処理した土の力学挙動を把握することを目指す。そのために，はじめに，セメント改良した浚渫土砂を対象に実施した標準圧密試験および非排水三軸試験の結果を示す。これらの実験によって得られたセメント改良土の力学挙動を，骨格構造の変化を記述可能な弾塑性構成式 SYS Cam-clay model[1]を用いて再現しつつ，セメント添加による改良効果を骨格構造概念および弾塑性力学に基づいて説明することを試みる。

2. 浚渫土の物理特性とセメント改良土の配合条件

実験には，名古屋港ポートアイランドで採取した浚渫土砂を用いた。**表-1** に浚渫土砂の物理特性を示す。細粒分が 96%を超える粘土質の浚渫土である。本研究では，この浚渫土砂を管中混合固化処理工法によってセメント安定処理することを想定して実験を行った。適度な流動特性を得るために，目標フロー値を 90～100mm に設定した。また，目標強度を養生 28 日の一軸圧縮強度で 100～200kPa に設定した。これらの目標値を満たすべく決めた配合条件を**表-2** に示す。実験は全て養生 28 日の供試体に対して行った。

表-1　浚渫土の物理特性

土粒子密度	ρ_s [g/cm^3]	2.67
自然含水比	w_n [%]	50～110
液性限界	w_L [%]	52.5
塑性限界	w_P [%]	25.1
塑性指数	I_P [%]	27.4
粘土分	[%]	60
シルト分	[%]	36.6
砂分	[%]	3.4
平均粒径	D_{50} [mm]	0.002

3. セメント改良土の力学挙動

図-1 にセメント改良土の標準圧密試験結果を示す。図中には，比較のために，改良の対象とした浚渫土の標準圧密試験結果も示す。フロー値を満足させた結果，初期間隙比の高い状態になっていることが分かる。また，セメント添加の効果によって，ある程度の応力レベルまでこの高い含水比を保つことができることも分かる。一方，ある応力レベルに達すると浚渫土に比べて高い圧縮性を示すことが分かる。これらのことから，セメント改良土は，構造が発達した状態でかつ，擬似的に過圧密な状態になっていると考えられる。

表-2　セメント改良土の配合条件

	浚渫土含水比 w_0[%]	セメント添加量 C[kg/m^3]	水セメント比 W/C
セメント改良土	120	50	14.98

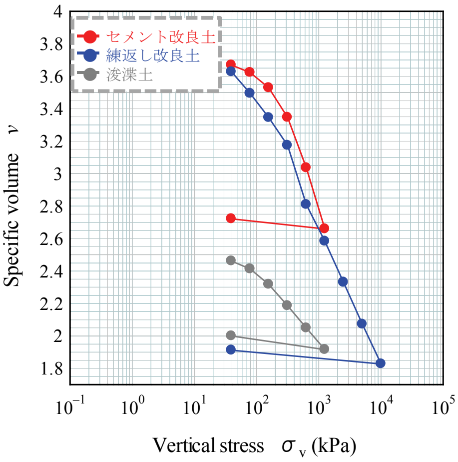

図-1　標準圧密試験結果

図-2 にセメント改良土の非排水三軸試験結果を示す。低拘束圧では有効応力経路で巻き返し挙動が見られる。また，拘束圧を挙げていくと，顕著な塑性圧縮を伴う軟化挙動が見られるようになっている。これらの挙動は構造の発達した自然堆積粘土に特徴的な挙動である[2]。したがって，**図-2** に示す挙動からも，セメント改良土は構造が発達した状態でかつ擬似的に過圧密な状態になっていると考えられる。また，低拘束圧で巻き返し挙動が見られることから，セメント改良土は構造劣化に比べて過圧密の解消が速い試料であると考えられる。

4. 練り返したセメント改良土の力学挙動

上記の結果を踏まえ，本稿では，セメント改良土を構造が発達し過圧密な状態にある土として，SYS Cam-clay model によってその挙動を再現することを試みる。SYS Cam-clay model は，練返し正規圧密土の弾塑性挙動を記述する Cam-clay model をベースに，構造が発達し過圧密にある土が塑性変形を受けることで練返し正規圧密土に漸近してゆく過程を記述する弾塑性構成式である。このモデルでは，Cam-clay model に必要な材料定数のことを弾塑性パラメータと呼ぶ。通常，自然堆積した粘土に対して SYS Cam-clay model を用いる場合は，その試料を練り返して意図的に構造を劣化させた試料に対して室内要素試験を行うことで，弾塑性パラメータを決定する。セメント改良土に骨格構造概念を適用する場合，一つの考え方として，セメント改良土は塑性変形の結果，セメント添加によって得られた効果を全て喪失し，最終的にセメントを添加する前の母材（本稿では浚渫土）と同じ状態に帰着すると考えることができる。しかし，本稿では，セメントが一旦添加されると，その土は母材とは異なる土になるとの考え方

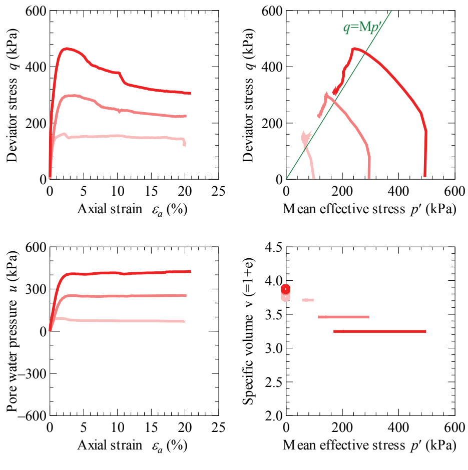

図-2　セメント改良土の非排水三軸試験結果

Mechanical behaviour of cement-treated soil and remolded cement-treated soil and simulation of that by SYS Cam-clay model: Yamada, S., Nakano, M., Noda, T., Horiuchi, S., and Yoda, H., Sasayama, T. (Nagoya University)

から，自然堆積粘土を対象とする場合と同様に，セメント改良土を練り返した試料に対し実験を行い，弾塑性パラメータを決定することを試みる。

図-1 に一旦固化したセメント改良土（養生 28 日）を練り返した試料に対し行った標準圧密試験結果を示す。同図には練り返す前のセメント改良土と浚渫土の実験結果も示している。まず，練り返したセメント改良土は浚渫土と異なる挙動を取っている。また，練返したセメント改良土の圧縮線は比較的直線的な挙動をとっており，構造の劣化した正規圧密土と言ってよい状態にあると考えられる。したがって，これらの結果より，一旦セメントが添加された土は，十分に練り返しても母材には帰らないことが示唆される。また，セメント改良土の一次元圧縮挙動は練り返したセメント改良土の一次元圧縮挙動に徐々に漸近しており，練り返したセメント改良土を基準にとることの妥当性が伺える。

図-3 に練り返したセメント改良土の非排水三軸試験の結果を示す。同図には，比較のために，浚渫土の非排水三軸試験結果も示す。練り返したセメント改良土は，練返し正規圧密粘土に見られる挙動をとっている。その挙動は浚渫土とよく似ているが，セメント改良土は浚渫土に比べて明らかに高い間隙比を有しており，やはり一旦セメントが添加された土は，十分に練り返しても母材には帰らないことが見て取れる。

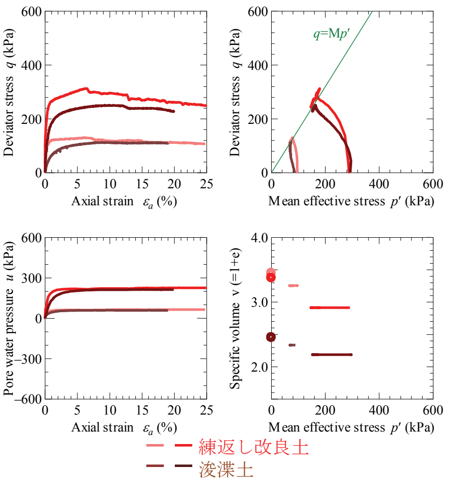

図-3 練り返したセメント改良土の非排水三軸試験結果

表-3 材料定数と初期値結果

試験条件		非排水三軸試験 拘束圧98.1kPa	標準圧密試験
弾塑性パラメータ			
圧縮指数	λ	0.363	0.363
膨潤指数	κ	0.050	0.050
限界状態定数	M	1.600	1.600
NCLの切片	N	3.400	3.400
ポアソン比	ν	0.300	0.300
発展則パラメータ			
正規圧密土化指数	m	0.6	0.6
構造劣化指数	a	0.6	0.6
	b	1.0	1.0
	c	1.0	1.0
塑性せん断：塑性圧縮	c_s	0.5	0.5
回転硬化指数	b_r	0.001	0.001
回転硬化限界定数	m_b	0.5	0.5
初期値			
過圧密比	$1/R_0$	20.933	12.254
構造の程度	$1/R^*_0$	10	10
鉛直応力	σ_v	19.62	39.24
比体積	v_0	3.753	3.669
応力比	η_0	0	0
初期異方性	ζ_0	0	0

5. SYS Cam-clay model によるセメント改良土の力学挙動の再現

次に，SYS Cam-clay model によりセメント改良土の力学挙動（**図-1** と 2）を再現することを試みる。**表-3** に解析に用いた材料定数と初期値を示す。表中に示す弾塑性パラメータは，**図-1** と 3 に示す練り返したセメント改良土に対して実施した実験結果より求めた値である。

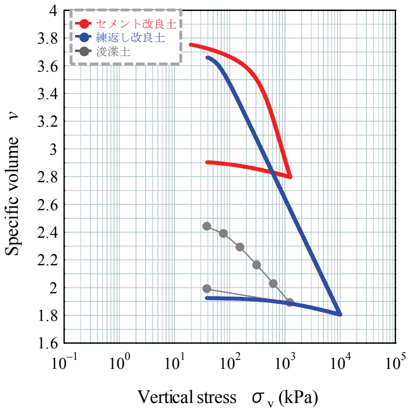

図-4 標準圧密試験のシミュレーション結果

図-4 にセメント改良土の一次元圧縮挙動のシミュレーション結果を示す。図中には練り返したセメント改良土のシミュレーション結果も併せて示す。セメント改良土は，練り返したセメント改良土よりも高い間隙比を示しているが，鉛直応力が増加していくと，徐々に塑性変形量が大きくなり，ある応力レベルを過ぎると，次第に練り返したセメント改良土の一次元圧縮挙動に漸近してゆく様子が再現されている。

図-5 にセメント改良土の非排水せん断挙動のシミュレーション結果を示す。解析は，**表-2** に示す拘束圧 9.81kPa の状態から各拘束圧まで等方圧縮する過程も含めて行った。**図-5** は，**図-2** に示す実験結果と同様に，拘束圧を上げていくと，巻き返すような挙動から，巻き返さずに塑性圧縮を伴う軟化挙動を示す挙動に変化してゆく様子が見られ，実験結果を概ね再現できている。このように，セメント添加は，その土に人工的な構造高位化と疑似的な過圧密土化をもたらすとしてその効果を理解できる。

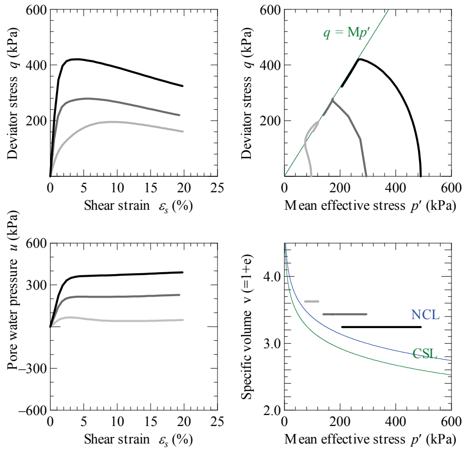

図-5 非排水三軸試験のシミュレーション結果

なお，**図-4** の実験結果には練り返したセメント改良土の限界状態線を示しているが，拘束圧 294kPa および 491kPa の結果は q=Mp' よりも上側で塑性圧縮を伴う軟化挙動を示している。これに対し，**図-4** に示す解析結果は q=Mp' よりも下側で塑性圧縮を伴う軟化挙動を示している。（異方性による効果を仮に見なければ，）SYS Cam-clay model は限界状態線よりも上側で塑性圧縮を示すことはないため，実験結果が示す挙動を厳密には再現することができない。セメント添加量を増加させてゆくとこのような挙動が卓越して見られるようになってくるため，今後はこのような挙動についても着目して調べて行きたい。

参考文献） 1) Asaoka, et al. (2002): An elasto-plasticelasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F* **42**(5), 47-57. 2) Asaoka, et al. (2001): The loss of structure and the decay of overconsolidation, *Proc. 15th ICSMGE*, Istanbul, Turkey, 19-22.