

III-197

自然粘土シミュレーション材料の開発(その2)

(株)奥村組 筑波研究所 正会員 ○ 日下部 伸
技術研究所 正会員 森尾 敏
技術研究所 正会員 小田 恵之輔

1. まえがき

筆者らは地震時の地盤挙動を模擬するオンライン地震応答実験システムの開発を進めている^{1)~7)}。この手法は、①地盤環境を実験装置内で再現し、②地震動を受け時々刻々に変化する地盤の復元力特性を解析ステップ毎に準静的要素試験の供試体から直接求め、③応答解析にオンラインで結びつけ、地盤挙動を模擬しようとする仮動的実験・解析法である。したがって供試体をいかに「本物」らしく作製するかは、重要な課題の一つである。

前報⁹⁾では、大阪湾海底地盤の大阪沖・Ma13層と同様な素材(液性限界 W_L 、塑性限界 W_p)の広島粘土を使用し、早強セメントによる人工的な化学的結合速度と圧密沈下速度を制御して同様な初期条件(自然含水比 W_n 、初期間隙比 e_0 、湿潤密度 ρ_w)になる様に構造を付加することによって、自然粘土と類似の圧縮挙動を示すシミュレーション材料を作製できる事実を示した。本稿では、半沢(1990)⁹⁾らが報告している不攪乱・有明粘土の挙動を模擬すべく、スラリー状の有明粘土を素材としたシミュレーション材料について実施したひずみ速度圧密試験、異方圧密非排水三軸圧縮試験結果について述べる。

2. 実験方法: 素材として使用した有明粘土の物理的性質は、表-1に示す様に引用した半沢らのデータ⁹⁾($G_L=4.2\sim5.6$ m)とほぼ同様である。試料は液性限界の2.0倍の含水比でスラリー化後、真空脱気を行った。このスラリー1000cm³に対して早強セメント8.00gを混合し、 $\phi 50$ mm、H130mmの両面排水の一次元再圧密容器に入れ、図-1に示す再圧密履歴を与えた。図中の○印はひずみ速度圧密試験CRS、●印は異方圧密非排水三軸圧縮試験CKCUを実施した時点である。

CRS試験の供試体寸法は $\phi 46$ mm、H10mm、ひずみ速度は $3\times 10^{-2}\%$ /minである。CKCU試験の供試体寸法は $\phi 50$ 、H81mmである。キャップとベダスタルの端面は拡幅・摩擦除去を行っている。異方圧密時の主応力比 $K=\sigma'_3/\sigma'_1$ の値は、半沢ら(1981)¹⁰⁾、土田ら(1991)¹¹⁾が海成の沖積粘土(正規圧密エージド粘土)について報告している値を参考にし、0.45とした。圧密過程では、軸方向ひずみ速度を一定とし(0.01%/min)、供試体上端の非排水面の中で過剰間隙水圧をモニターし、側面のろ紙を介してベダスタルより排水を行った。表-1に引用した $G_L=5.6$ mの有効土かぶり応力 σ'_{v0} に相当する0.25kgf/cm²まで異方圧密後、排水条件で40分間放置し、非排水せん断を開始した。ひずみ速度は0.50、0.05、0.005%/minの3種類である。

3. 実験結果と考察: 1) CRS試験: 図-2に間隙比 e ~圧密応力 σ'_c 関係を示す。図中の破線は $G_L=4.2$ mの有効土かぶり応力 $\sigma'_{v0}=0.20$ に相当する半沢らのデータをプロットしたものである。 σ'_y は圧密降伏応力を示している。Cc₁は年代効果により付加された構造が破壊されて行く過程の圧縮指数である。Cc₂は構造が破壊された後の σ'_y の5倍に相当する σ'_c 時の圧縮指数である。 σ'_b はCc₁とCc₂の境界の σ'_c を示している。表-2は、これらの圧縮挙動を表現する値を整理したものである。また、Ccと σ'_c の関係を図-3に示す。以下の検討ではシミュレーション材料をS材、引用した比較

対象をN材と称する。①本研究で設定した σ'_{v0} は0.25kgf/cm²であり、N材の0.20kgf/cm²より大きいことを考慮しても、S材の初期間隙比 e_0 は過少となっている様である。この原因は図-1で示した再圧密履歴を与える初期の σ'_c の値が過大であったためと推察される。② σ'_y に至る過程のCcは良い一致を示している。③S材の σ'_y の値が小さい。早強セメント量がやや少なかったためと思われる。④S材のCc₁が小さい。再圧密時の初期に過大な σ'_c を与えたため、本来 σ'_y 直後に発生すべき e の減少分を事前に消費してしまったためと考えられる。⑤S材のCc₂の値がやや小さい。⑥S材のCc₁/Cc₂の値がやや小さい。⑦ σ'_b の値はおおむね一致している。⑧ σ'_b/σ'_y の値はほぼ一致している。⑨Cc~log σ'_c 関係においてCcの値は、 σ'_c の増加にともない σ'_y の直後に明確なピークを示し、その後減少している。土田ら(1991)¹²⁾が(1)式で定義している圧縮指数比 r_c の値はS材において1.8であり、わが国の自然沖積粘土の値(1.1~3.0)との対応も良い様である。

$$r_c = Cc_{\max}/Cc^* \dots\dots\dots (1)$$

ここにCc_{max}はCc~log σ'_c 曲線におけるCcの最大値、Cc*はCc_{max}の5倍の σ'_c におけるCcの値である。以上の検討より、S材はN材に対して左下側にシフトしているものの、提案した方法は正規圧密エージド粘土に分類される有明粘土の圧縮挙動を模擬できそうである。

2) CKCU試験: 粘土の非排水せん断強度 S_u を有効土かぶり応力 σ'_{v0} で正規化した値 S_u/σ'_{v0} は、せん断強度や応力履歴を評価する上で重要であり、これに関する既往の研究のレビューと原位置での S_u と σ'_{v0} の間の基本的な関係が半沢ら(1991)¹³⁾によって指摘されている。そこで、ここでは試験結果を図-4、5に示すように同様な正規化を行った応力比ひずみ関係、有効応力経路として表示した。図中には半沢ら(1981)¹⁰⁾が実施した正規圧密エージド粘土に分類される東京湾夏島粘土のデータ($K=0.48$)を並記した。試験結果の一覧と本研究と同一の σ'_{v0} に相当する有明粘土のデータ⁹⁾を表-3に示す。①S材の正規化された応力~ひずみ関係は正規圧密エージド粘土に類似している。②半沢ら(1992)¹⁴⁾はアラビア湾、インドネシア、日本の海成沖積粘土の正規圧密ヤング状態の $S_{un(c)}/\sigma'_{vc}$ の値がIpと有意な関係を持たず、0.29~0.39(有明粘土は0.31)であることを報告している。S材の $S_{uf(c)}/\sigma'_{v0}$ の値は明らかに正規圧密ヤング粘土の値と異なり、正規圧密エージド粘土状態にある有明粘土の値によく一致している。③S材の有効応力経路は正規圧密ヤング粘土のそれとは異なり¹⁵⁾、正規圧密エージド粘土に類似している。④ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の違いにより、S材の正規化された応力~ひずみ関係、有効応力経路に差異が生じている。 $\dot{\epsilon}$ が0.005%/minと0.5%/min時のS材の S_u 比は0.83である。K₀圧密あるいはそれに相当する異方圧密による正規圧密ヤング粘土では $\dot{\epsilon}$ が0.001%/minと0.1%/min時の S_u 比は0.74~0.87¹⁴⁾、 $\dot{\epsilon}$ が0.005%/minと0.5%/min時の S_u 比は0.78¹⁵⁾といった値が得られている。一方、岡ら(1989)¹⁶⁾は不攪乱鋭敏性粘土の等方圧密・非排水三軸圧縮試験を行

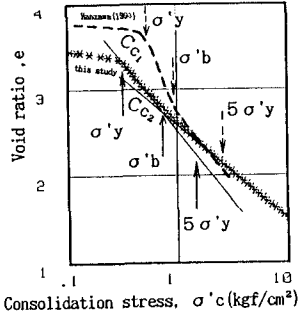
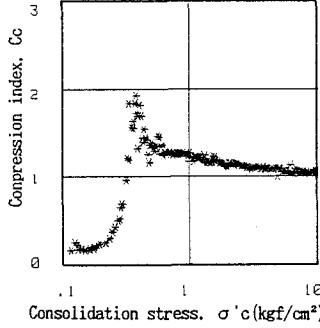
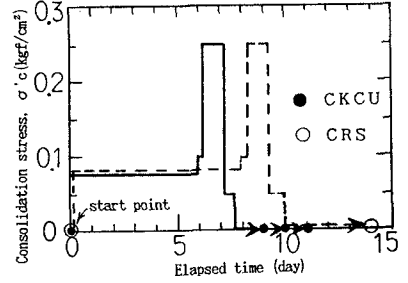

図-2 $e \sim \log \sigma'_c$ 関係

図-3 $C_c \sim \log \sigma'_c$ 関係


図-4 再圧密履歴

表-1 素材・粘土の物理的性質

	This study	Hanzawa (1990)*
Depth (m)	GL-0.5-2.0	GL-4.2-5.6
ω_L (%)	105.0	90-100
ω_P (%)	44.7	40
I_p	60.3	50-60
ω_n (%)	118	106-118

表-2 定ひずみ速度圧密試験結果

	This study	Hanzawa (1990)*
σ'_{vo} (kgf/cm²)	0.25	0.20
σ'_y (kgf/cm²)	0.32	0.54
C_{c1}	1.57	3.46
C_{c2}	1.06	1.69
C_{c1}/C_{c2}	1.48	2.05
σ'_b (kgf/cm²)	0.73	0.95
σ'_b/σ'_y	2.28	1.76

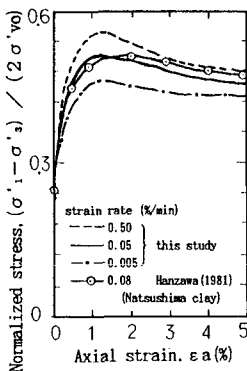


図-5 正規化された応力～ひずみ関係

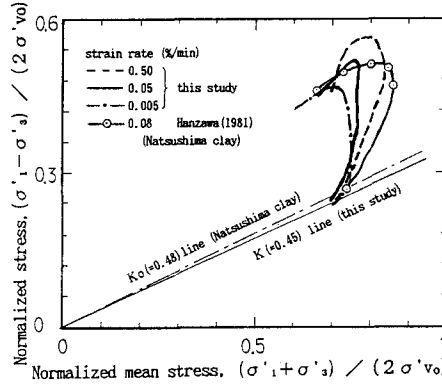


図-6 正規化された有効応力経路

表-3 異方圧密非排水三軸圧縮試験結果

Case	Strain rate (%/min)	Elapsed time (day)	Wet unit weight (g/cm³)	Water content (%)	B value	q max (kgf/cm²)	εaf (%)	Surf(c) / σ'vo	OCR #1
①	0.50	10	1.365	119.7	0.94	0.289	1.28	0.578	1.87
②	0.05	9	1.368	119.7	0.94	0.265	1.15	0.530	1.71
③	0.005	11	1.369	120.0	0.94	0.239	1.29	0.478	1.54
Hanzawa (1990)*	0.1	—	1.37	118	—	—	—	0.57	1.84

*1: $OCR = \text{Surf}(c) / \sigma'_{vo} + \text{Surf}(c) / \sigma'_{vc}$ ($\text{Surf}(c) / \sigma'_{vc} = 0.31$)

い、正規圧密エージド状態では応力～ひずみ関係、有効応力経路のひずみ速度依存性が少ないことを報告しており、その場合 $\dot{\epsilon}$ が $0.000548\%/min$ と $0.01\%/min$ 時の S_u 比は 1.00 となっている。前述のデータに比べて $\dot{\epsilon}$ が 1 オータ小さい事に注意する必要があるが、正規圧密エージド粘土のせん断ひずみ速度依存性についてはデータの蓄積が十分とは言えない様であり、シミュレーション材料についても、さらに検討を深める必要がある。

4. あとがき：早強セメントによる人工的な化学的結合速度と圧密沈下速度を制御することにより、年代効果を受けた沖積層として最も普遍的な正規圧密エージド粘土の圧縮および非排水せん断挙動を模擬し得る事実を示した。尚、スラリー化した有明粘土の入手とその W_L , W_P , ρ_s のデータは、応用地質 $\text{およ} \text{コアラボ}$ ・中山栄樹氏のお世話になりました。末筆ながら感謝の意を表します。

参考文献

- 1), 2), 3), 4), 6), 6) 日下部、森尾、有本、岩崎 (1987~1992) : 地盤系オンライン地震応答実験システムの開発 (その1~6)、「第22~27回土質工学研究発表会」
- 7) 日下部、森尾、有本 (1990) : オンライン地震応答実験による2層系砂地盤の液状化挙動、「土質工学会論文報告集」、第30巻、第3号
- 8) 日下部、森尾、有本 (1991) : 自然粘土シミュレーション材料の開発 (その1)、「土木学会第46回年次学術講演会」
- 9) Hanzawa, H., Fukaya, T. and Suzuki, K. (1990) : "Evaluation of engineering properties for an Ariake clay," Soils and Foundations, Vol. 30, No. 4, pp. 11-24.
- 10) Hanzawa, H. and Kishida, T. (1981) : "Fundamental considerations on undrained strength characteristics of alluvial marine clays," Soils and Foundations, Vol. 21, No. 1, pp. 39-50.
- 11) Tsuchida, T. and Kikuchi, Y. (1991) : "Ka consolidation of undisturbed clays by means of triaxial cell," Soils and Foundations, Vol. 31, No. 3, pp. 127-137.
- 12) Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J. (1991) : "Effect of aging of marine clay and its duplication by high temperature consolidation," Soils and Foundations, Vol. 31, No. 4, pp. 133-147.
- 13) 半沢秀郎、鈴木耕司、田中洋行 (1991) : 粘土のノーマライズされた非排水せん断強度、「土と基礎」、Vol. 39, No. 8, pp. 29-34.
- 14) Hanzawa, H. and Tanaka, H. (1992) : "Normalized undrained strength of clay in the normally consolidated state and in the field," Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, pp. 132-148.
- 15) 例えば、Mukabi, J. N., Tatsuo, F. and Hirose, K. (1991) : "Effect of strain rate on small strain stiffness of Kaolin in CU triaxial compression," 26th Japan National Conf. on SMFE, Vol. 1, pp. 659-662.
- 16) 岡二三生、平田武弘、橋本正、ブラダンテージ B. S., 三村衛、長瀬澤一 (1989) : 鋭敏性粘土のせん断特性と弾塑性構成式、「第24回土質工学研究発表会」、Vol. 1, pp. 589-592.