

排水距離を変化させた粘土の部分排水試験による新たな強度推定法の提案

中央大学大学院 学生会員 ○ 石田 和希
中央大学 正会員 金澤 伸一
中央大学研究開発機構 正会員 石井 武司
中央大学研究開発機構 フェロー会員 太田 秀樹
中央大学 正会員 齋藤 邦夫

1. 背景・目的

一般に、地盤の安定解析における排水条件は、砂か粘土かの区分に基づいて選択されている。しかしながら、施工時の載荷速度も排水条件の決定に大きく影響を与える。施工速度次第では、粘土地盤でも排水条件、砂地盤でも非排水条件として扱わなければならない場合も考えられる。齊藤は、粘土(S40)ならびに砂と粘土を混合した中間土(SK70)を用い、載荷速度 ϵ'_a をそれぞれ変化させた部分排水せん断試験と非排水せん断試験を行った。その結果、図-1 に示すように、土の種類に依らない部分排水せん断強度推定法を提案した。ただし、この提案では相対載荷速度 ϵ'_a/c_v の単位が(m²)の次元を残しているため、実地盤に適用する際は排水距離を考慮する必要がある。そこで本研究は、まず排水距離の異なる粘土供試体に対して、広範な載荷速度の下で、部分排水せん断試験を実施すると共に、同試験に対応させた数値解析を行う。次いで、両者の結果より、相対載荷速度 ϵ'_a/c_v に排水距離を乗じた正規化相対載荷速度を導入して、排水距離に依らない強度推定式の提案を試みた。

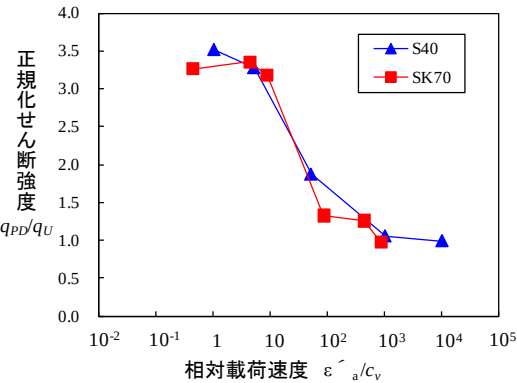


図-1. 正規化せん断強度 - 相対載荷速度関係

2. 推定式の提案ならびに意義

相対載荷速度に排水距離を掛けた正規化相対載荷速度は、 $0.01 \leq \epsilon'_a/c_v \times \text{排水距離}^2 \leq 0.5$ のとき、
 $q_{pd}/q_u = -0.555 \ln(\epsilon'_a/c_v \cdot \text{排水距離}^2) + 0.7173 \dots (1)$

この推定式を用いることで、対象地盤の非排水せん断強度、圧密係数、排水距離がわかれば、その地盤の部分排水強度、また、その載荷速度の示す範囲を知ること、粘土地盤でも設計に非排水せん断強度ではなく、部分排水強度を用いることが可能となる。よって過度に安全側にする必要がなく、工学的にも経済的にも意義があるため、この推定式が適用できる範囲を検討する。対象地盤(図-2)の試料を汐留粘土(S40)、そして汐留粘土に珪砂7号を混合し、砂分量を人工的に30%,60%,70%に調整したSK30,SK60,SK70の4通りとする。排水距離は2~7mの6通りとする。対象地盤の破壊ひずみを3%と仮定し、それにかかる時間を10日~

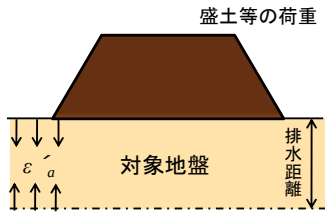


図-2. 対象地盤のモデル

表-1. 試料の物性値

試料名	汐留粘土	SK30	SK60	SK70
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.70	2.66	2.65	2.65
液性限界 w_L (%)	66.4	64.7	39.1	30.6
塑性限界 w_P (%)	27.2	33.6	22.9	24
塑性指数 I_p	39.2	31.1	16.2	6.6
砂分 (%)	8.5	30	60	70
シルト分 (%)	41.5	32.8	18.8	14.4
粘土分 (%)	50	37.2	21.2	15.6
圧密係数 (m ² /min)	9.5×10^{-6}	1.2×10^{-5}	3.2×10^{-5}	1.1×10^{-4}

100 日(10 日刻み)の 10 通りとし,それを載荷速度とする.原地盤の浅い範囲では,深さ方向に対する非排水せん断強度の変化はほとんどないと仮定する. 図-3 は, 各試料の対象地盤が部分排水・排水レンジに入る条件範囲を示している. この結果より,粘土でも部分排水強度を示す範囲があることが読み取れる. 中間土の結果も併せてみていくと,砂分量が増えて

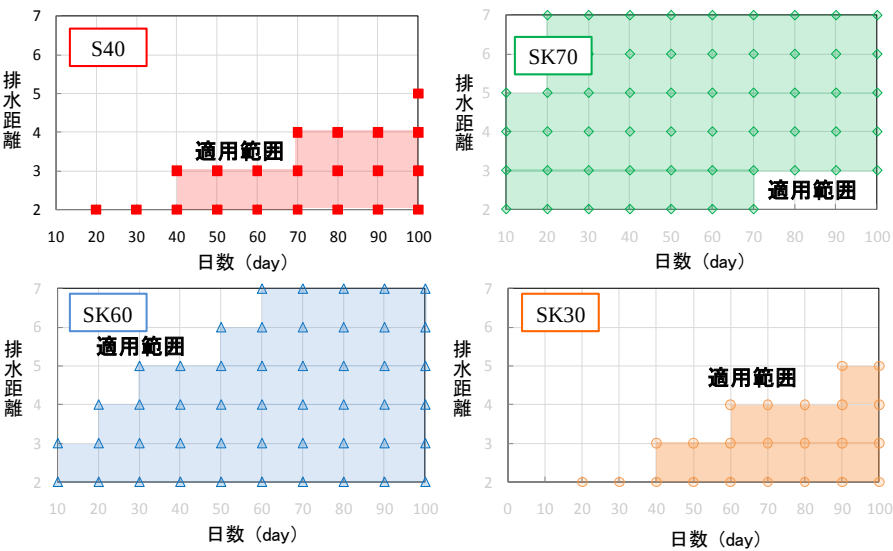


図-3. 試料ごとの部分排水・排水レンジ範囲表

いけば部分排水・排水レンジの範囲が広がっていくことがわかる. また, 砂分量 70%の SK70 は設定した範囲のほとんどが部分排水・排水レンジとなる. 以上より, 一般に中間土の設計は安全側を重視して, 粘土と同じく非排水せん断強度を採用している現設計方法が, 過小評価・非経済的であることが示唆される.

3. 室内実験

3.1 試料, 実験条件

試料は $I_p=40$ の汐留粘土を用いた. 作製法は液性限界 w_L の 2 倍に含水比を調整し, 圧密圧力 100kPa で予備圧密を行う. 部分排水せん断試験・非排水せん断試験の手順を述べる. 供試体は直径 50mm, 高さ 100mm にトリミング法にて成形する. 飽和度 S_r を高めるため, 有効拘束圧を 10kPa に保ち, 背圧を 20kPa ずつ 10 段階で計 200kPa 加える. その後セル圧を 500kPa まで増加させ, 有効拘束圧 300kPa で等方圧密を行った. せん断はセル圧を一定のまま, ひずみ制御方式で行った. 部分排水せん断試験は, 片面排水と両面排水条件の 2 種類を行う. 片面は上面の排水バルブのみを, 両面は上下面の両方の排水バルブを開けて行う. これにより片面の排水距離は 100mm となり, 両面の排水距離 50mm の 2 倍となる. これより, 排水距離を変えた試験となる. 非排水せん断試験は両面の排水バルブを閉じて行う. 試験ケースは表-2 に示す.

表-2. 室内実験条件

載荷速度 ϵ_a' (%/min)		
部分排水		非排水
両面	片面	
10	10	10
1	1	0.05
0.5	0.1	0.005
0.05	0.05	
0.005	0.01	
0.001	0.005	
	0.001	

3.2. 室内実験結果

表-3 に, 部分排水せん断試験ならびに非排水せん断試験の結果を示す. ここで 10, 0.05, 0.005%/min 以外の載荷速度の非排水せん断強度は, 10, 0.05, 0.005%/min の実験結果より, ひずみ速度に比例する推定式から求めた値を用いる. 非排水せん断強度 q_u は載荷速度が遅くなると低下していることがわかる. また, 部分排水せん断強度 q_{pd} は両面, 片面とも載荷速度が遅くなるとともに上昇していくことがわかる. 載荷速度が速い範囲では, q_{pd} は概ね q_u と同等の大きさとなっており非排水状態であることが確かめられた. 正規化せん断強度は載荷速度ごとの部分排水せん断強度を非排水せん断強度で除した値で

表-3. 室内実験結果

	載荷速度	部分排水せん断強度	非排水せん断強度	正規化せん断強度	相対載荷速度
	ϵ_a %/min	q_{pd} (kPa)	q_u (kPa)	q_{pd}/q_u	ϵ_a/c_v
両面	10	290	292	1.0	1.1×10^4
	1	294	278	1.1	1.1×10^3
	0.5	333	274	1.2	5.3×10^2
	0.05	489	261	1.9	52.6
	0.005	649	244	2.7	5.3
	0.001	696	235	3.0	1.1
片面	10	331.4	292	1.1	1.1×10^4
	1	289.8	278	1.0	1.1×10^3
	0.1	287.1	263	1.1	1.1×10^2
	0.05	332.1	261	1.3	52.6
	0.01	527	249	2.1	10.5
	0.005	585.1	243	2.4	5.3
	0.001	766.2	235	3.3	1.1

ある。相対荷速度は、荷速度 ε'_a を試料の圧密係数 c_v (表-1) で除した値である。図-4 は、両面ならびに片面ごとの正規化せん断強度 q_{pd}/q_u と相対荷速度関係である。この結果より両面と片面で荷速度が遅くなるにつれて、正規化せん断強度が上昇する部分排水レンジの範囲が異なることがわかる。部分排水レンジは、両面排水では $5\text{m}^2 \leq \varepsilon'_a/c_v \leq 1 \times 10^2 \text{m}^2$ 、片面排水では $1\text{m}^2 \leq \varepsilon'_a/c_v \leq 50\text{m}^2$ の範囲となる。よって排水距離が違う場合、既往の部分排水強度推定法は適用できないことが認められた。ここで排水距離に依らない推定式を提案するため、相対荷速度に排水距離を掛けた正規化相対荷速度と名付けた $\varepsilon'_a/c_v \times (\text{排水距離})^2$ を用いて正規化せん断強度との関係を表す(図-5)。両面の排水距離は 50mm, 片面の排水距離は 100mm となる。この結果より、一義的な評価が可能となり、排水距離に依らない推定式の提案ができることが確かめられた。部分排水レンジは、 $0.01 \leq \varepsilon'_a/c_v \times (\text{排水距離})^2 \leq 0.5$ であるといえる。この結果に併せて、図-6 に中間土(SK30,SK60,SK70)の既往の部分排水・非排水せん断試験結果も併せて整理した。これより、土の種類に依らない一義的な評価が可能となることわかる。部分排水レンジは先と同じ範囲である。この範囲の正規化せん断強度の関係を対数近似した結果が(1)の式となる。

5. 数値解析概要・結果

解析手法として、土/水連成有限要素解析コードの DACSA-M^{3,4)} を用いて、弾塑性モデル(修正カムクレイモデル)⁵⁾ による非排水、および部分排水三軸圧縮試験の再現解析を軸対称条件で行った。有限要素メッシュをそれぞれ図 7(i), (ii) に示す。非排水試験が 1 要素、部分排水試験が両面排水の一次元 100 要素である。表-4.5 に解析に用いたパラメータを示す。等方圧密終了後の供試体の状態を表現するため、初期間隙比 e_0 、原位置静止土圧係数 K_i 、ならびに初期圧密圧力 σ'_{v0} 、圧密降伏応力 σ'_{vi} は、実験条件より圧密終了時の値を用いた。また、圧縮指数 λ 、膨潤指数 κ ならびに初期透水係数

$k_{s0}(=k_{y0}$ と仮定) は定ひずみ圧密試験の値を用いた。 M , D は荷速度ごとに非排水実験の結果の値、ならびに室内実験と同様に解析結果から求まる推定式の値を用いる。さらに、室内実験の再現解析と併せて供試体サイズが $D=250\text{mm}, H=500\text{mm}$, そして $D=500\text{mm}, H=1000\text{mm}$ の 2 種類の数値実験を行う。図-8 に再現解析の結果を示した。解析結果は実験の結果と概ね対応する。図-9 に数値実験による供試体サイズごとの正規化せん断強度 q_{pd}/q_u - 相対荷速度 ε'_a/c_v 関係を示した。解析結果からも、既往の推定式が排水距離に影響を受けることが確かめられ

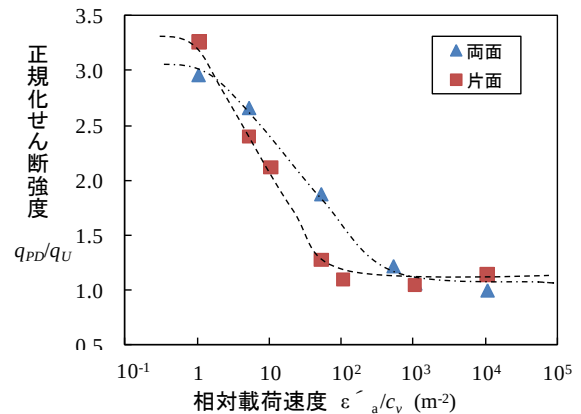


図-4. 正規化せん断強度-相対荷速度関係

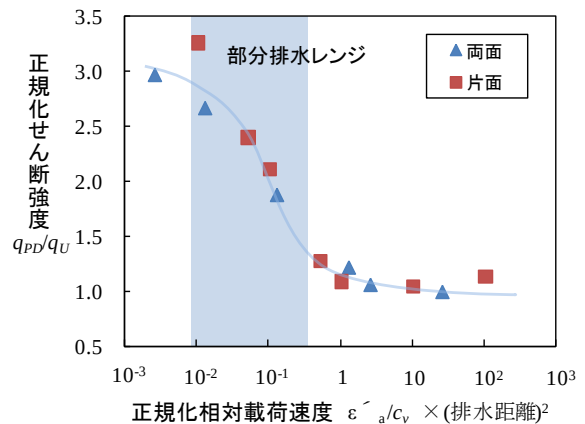


図-5. 正規化せん断強度 - 正規化相対荷速度

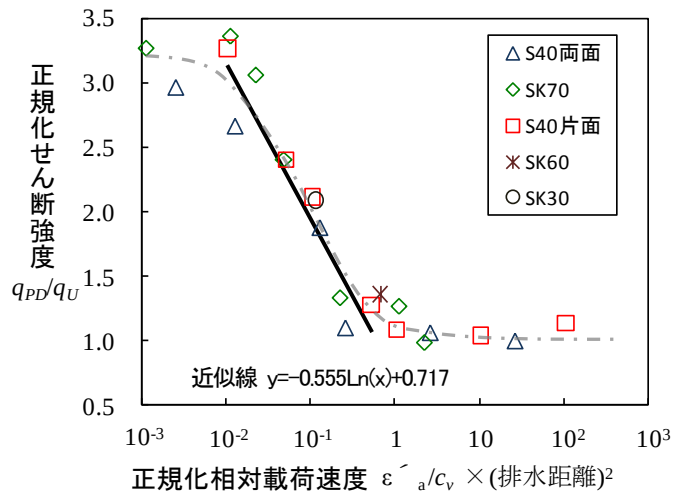


図-6. 粘土、中間土の正規化相対荷速度 - 正規化せん断強度関係

た．供試体サイズが大きくなるほど，部分排水レンジは遅い範囲を示していく結果となった．図-10 は，図-9 を正規化相対載荷速度で表したものであり，室内実験とはほぼ同様に一義的評価が可能となった．以上より，数値解析でも粘性土の部分排水挙動を示すことができた．

表-4. 入力パラメータ (1)

初期間隙比	e_0	1.360
圧縮指数	λ	0.226
膨潤指数	κ	0.04
非可逆比	A	0.823
初期静止土圧係数	K_0	1
原位置静止土圧係数	K_i	1
有効ポアソン比	ν'	0.33
初期圧密圧力 (kPa)	σ_{v0}	300
圧密降伏応力 (kPa)	σ_{vi}	300
初期透水係数 (m/min)	$k_{s0}=k_{y0}$	2.74×10^{-8}

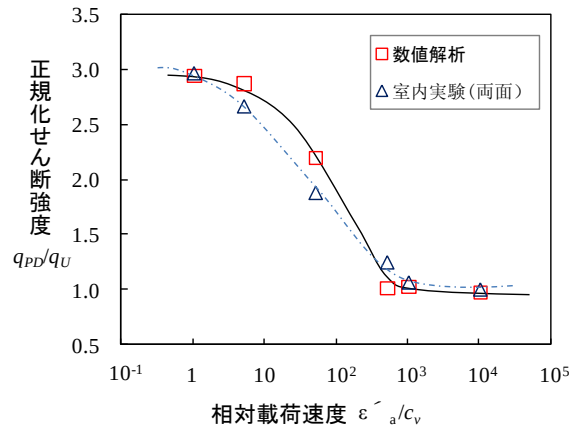


図-8. 再現解析結果

6. まとめ

- 1) 排水距離を変えた部分排水せん断試験を行い，相対載荷速度での部分排水レンジは変化することが確かめられた．また，数値実験からも同様のことが確かめられた．
- 2) 正規化相対載荷速度を用いて排水距離に依らない部分排水強度推定式を室内実験結果より提案した．

7. 今後の予定

推定式を用いて，盛土載荷時の地盤の支持力計算を行い，併せて円弧滑り解析との対応をみることで，推定式の実務問題への適用性をみていく．また，中間土の部分排水・非排水せん断試験の再現解析も検討していく．

<参考文献>1) 齋藤王二郎：中間土の力学特性評価に関する研究，中央大学修士論文(2010)，2) 社団法人地盤工学会 ジオテクノート 中間土砂か粘土か pp.7-9,3) A.fizuka and Ohta,H”A determination procedure of input parameters in elasto-visco plastic finite element analysis is”Soil and Foundation Vol27,No.3,pp.71-87,1987,4) 竹山智英：土/水連成有限要素解析手法における解の信頼性に關する諸問題とその理論的解決方法，博士論文，5) Rosco,K.H.and Burland,J.B. On the generalized stress-strain behavior of “wet” clay.Engineering Plasticity,ed.J.Heyman and F.A. Leckie,Cambridge University Press:Cambridge University Press:Cambridge,1968;535-609

表-5. 入力パラメータ (2)

載荷速度(%/min)	ϵ'_a	0.001	0.005	0.05	0.5	1	10
限界状態定数	M	1.46	1.49	1.56	1.58	1.60	1.64
ダイレイタンス係数	D	0.054	0.053	0.051	0.050	0.049	0.048

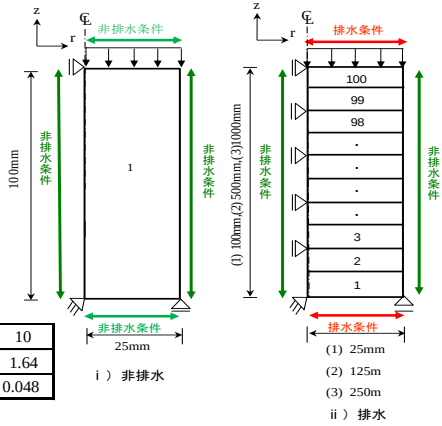


図-7. 要素メッシュ

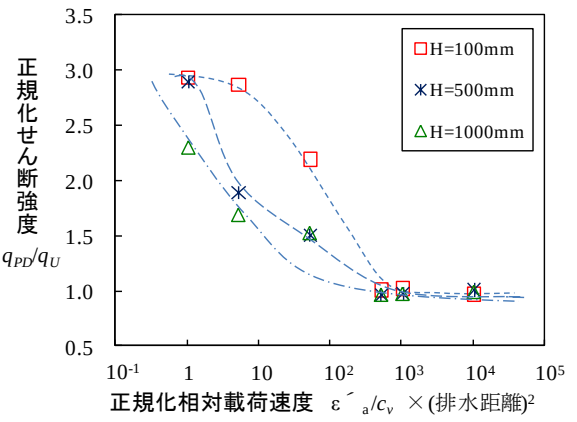


図-9. 数値実験結果

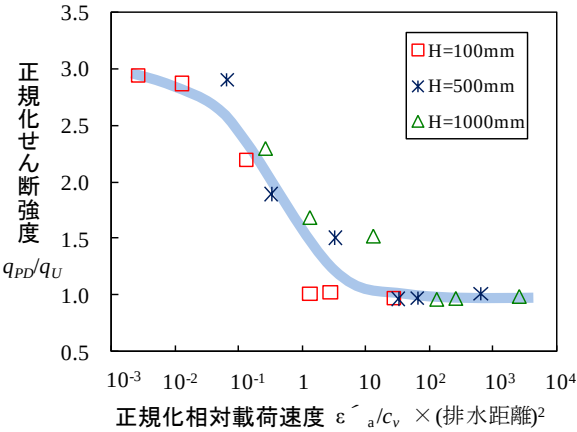


図-10. 数値実験による q_{PD}/q_U - 正規化相対載荷速度関係