

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 29 日現在

機関番号：51601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889062

研究課題名(和文)飽和/不飽和地盤における部分排水効果を利用した強度推定法の構築

研究課題名(英文)Proposal of the prediction-method for strength of considering partial drainage in saturated / unsaturated soils

研究代表者

金澤 伸一 (kanazawa, shin-ichi)

福島工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：20580062

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：土の部分排水効果を考慮した強度推定法を室内実験から提案し、それをを用いた簡易的な支持力計算を行うことで、提案する推定法の適応性を示す。まず、粘土、中間土を用いた部分排水せん断試験において、ひずみ速度を変化させ試験を試みた。その結果から、正規化したせん断強度と載荷速度・排水距離・圧密係数の関係を表し、部分排水強度を評価できる推定法を示した。また、要素試験から得られた推定法を境界値問題へ適用するため、拘束圧依存、不攪乱による構造の違いについて検討を行った。あわせて、数値実験による部分排水せん断試験を行い、提案する推定法の妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, it is proposed that the Prediction-Method for strength of soils considering partial drainage with numerical analysis. The applicability of the Prediction-Method is shown by calculating a bearing capacity simply, using it. The partial drainage shearing tests that use clay and intermediate soil are done, choosing both one side and both sides drainage condition, changing the shear strain speed. As a result, the tests have changed the drainage distance. The relations between the regularized shear strength and the relative shear strain speed was shown, using one side and both side partial drainage shearing test results separately.

研究分野：地盤工学

キーワード：部分排水強度 部分排水レンジ

1. 研究開始当初の背景

近年、あらゆる産業において、コストを削減しつつ製品に対する品質を高めることが社会的動きとなっている。このような動きを受け、建設業界においても、品質評価が必須の性能照査型設計法に移行しており、盛土構造物においてもすでに枠組みは導入されている。

一般に、盛土構造物の設計時に行う安定解析において、盛土載荷時の施工速度などは問わず、地盤の不均質性・境界条件の不明確性を考慮し安全側である非排水せん断強度が用いられている。しかしながら、載荷速度により非排水強度が異なることは広く知られている。また、地盤の透水係数や排水距離と載荷速度の関係によっては、非排水ではなく、部分排水効果による強度増加が期待できる。よって、このような強度増加が期待できること、つまり部分排水効果を考慮して、コスト低減・品質向上に活かすことが可能であると考えられる。地盤の性状によっては、非排水強度のみではなく、部分排水強度から排水強度の範囲まで検討することが可能となると考えられる。その結果、簡易的な強度推定、さらには現場における最適な工期の決定が可能になると示唆される。

2. 研究の目的

本研究では、ひずみ速度を変化させた非排水・部分排水せん断試験を行うことで、部分排水効果を考慮した土の強度推定法の提案を行う。あわせて、強度推定法の実地盤問題への適用を図るため、寸法効果、拘束圧依存と不攪乱試料へ着目し、適応範囲の検討を行う。さらに、数値解析による部分排水効果の適用性を試みる。最後に、推定式を用いた簡易的な安定計算を行うことで、提案する推定法の適応性を探る。

3. 研究の方法

使用した試料は、東京湾汐留地区で採取した汐留粘土 (S40) と、これに硅砂 7 号を混合して砂分量が 50% (SK50)、70% (SK70) となるように人工的に調整した中間土試料を用いた。また不攪乱試料として、埼玉県久喜市内でシンウォールサンプリングした深度 6.00m-7.00m の沖積シルトを用いた。試験手順は、液性限界  $w_L$  の 2 倍に含水比を調整し 100kPa で予備圧密した試料を、トリミング法により直径 50mm、高さ 100mm に成形し三軸室に設置した。次に、飽和度  $S_r$  を高めるために有効拘束圧を 10kPa に保ったまま、背圧を 20kPa ずつ 10 段階で 200kPa 加えた。その後セル圧を 500kPa まで増加させ、有効拘束圧 500kPa で等方圧密を行った。B 値はセル圧上昇の際に計測している。非排水・部分排水せん断試験はひずみ載荷速度  $\dot{\epsilon}_a$  を変化させている。各せん断試験のひずみ載荷速度は表-2 に示す通りで、セル圧一定のまま、軸ひずみを一定割合で増加させるひずみ制御方式で、

ひずみ  $\epsilon_a=16\%$  まで行った。部分排水は、上下両方の排水バルブを開けて行う。また非排水せん断試験は両面排水バルブを閉じて行う。さらに、これら実験結果を、土/水連成有限要素解析プログラムを用いて、非排水試験、部分排水三軸圧縮試験の再現解析を軸対称条件で行う。

4. 研究成果

(1) 部分排水試験

実験結果を表-1, 2, 3 にまとめる。図-1 に正規化せん断強度と排水係数を示す。ここで、正規化せん断強度とは部分排水せん断強度  $q_{PD}$  を非排水せん断強度  $q_U$  で除した値であり、排水係数は載荷速度  $\dot{\epsilon}_a$  を圧密係数  $c_v$  で除したうえで、最大排水距離  $\bar{H}^2$  を乗じた値である。 $c_v$  については、先行で実施した定ひずみ圧密試験結果より、正規圧密領域では一定値となるので、この領域で平均化した値を用いた。粘性土～中間土で整理しても部分排水の範囲（以下、部分排水レンジと呼ぶ）が確認され、試料に依らず概ねライン上にあることが確認できる。正規化せん断強度が 1 の場合、部分排水せん断強度と非排水せん断強度が等しく非排水条件、3 の場合は、部分排水せん断強度と排水せん断強度が等しく排水条件と区分することができる。このことから、排水係数がおよそ

$0.01 \dot{\epsilon}_a / c_v \times \bar{H}^2 \sim 1.0$  の範囲を部分排水レンジとし、この範囲内における対数近似直線を新たに部分排水強度推定式として提案する。

$$q_{PD} / q_U = 1.2 - 0.4 \times \ln(\dot{\epsilon}_a / c_v \times \bar{H}^2) \quad (1)$$

表-1 試験結果 (S40)

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	排水係数
$\dot{\epsilon}_a$ %/min	$q_{PD}$ (kPa)	$q_U$ (kPa)	$q_{PD}/q_U$	$\dot{\epsilon}_a / c_v \times \bar{H}^2$
10	290	292	0.99	26.3
1	294	278	1.06	2.6
0.5	333	274	1.22	1.3
0.05	489	258	1.90	$1.3 \times 10^{-1}$
0.005	649	245	2.65	$1.3 \times 10^{-2}$
0.001	696	235	2.96	$2.6 \times 10^{-3}$

表-2 試験結果 (SK50)

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	排水係数
$\dot{\epsilon}_a$ %/min	$q_{PD}$ (kPa)	$q_U$ (kPa)	$q_{PD}/q_U$	$\dot{\epsilon}_a / c_v \times \bar{H}^2$
10	332	305	1.09	11.4
1	320	279	1.15	1.1
0.5	374	270	1.39	$5.7 \times 10^{-1}$
0.05	650	254	2.56	$5.7 \times 10^{-2}$
0.005	731	233	3.14	$5.7 \times 10^{-3}$

表-3 試験結果 (SK70)

载荷速度 $\dot{\epsilon}_a$ %/min	部分排水 せん断強度 (kPa)	非排水 せん断強度 (kPa)	正規化 せん断強度 $q_{PD}/q_u$	排水係数
10	318	324	0.98	2.2
5	411	327	1.26	1.1
1	440	298	1.48	$2.2 \times 10^{-1}$
0.1	797	278	2.87	$2.2 \times 10^{-2}$
0.05	829	261	3.18	$1.1 \times 10^{-2}$
0.005	780	244	3.20	$1.1 \times 10^{-3}$

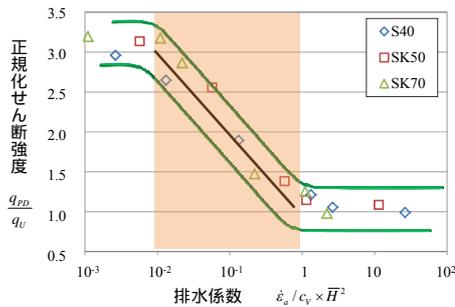


図-1 正規化せん断強度と排水係数

(2) 再現解析

実験結果を、土/水連成有限要素解析プログラムを用いて、非排水試験、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。図-2は再現解析の結果を示している。解析結果は、ややばらつきはあるものの実験結果と概ね対応し、再現解析によって実験結果を表現できている。さらには、粘性土(S40)、中間土(SK50, SK70)の全試料における部分排水レンジも確認された。

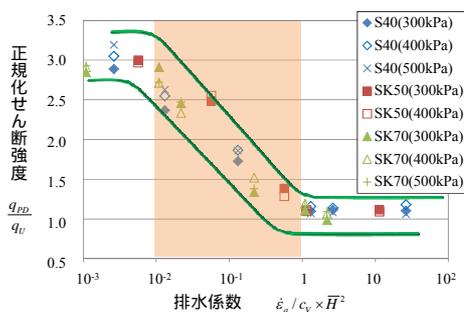


図-2 正規化せん断強度と排水係数 (解析結果)

(3) 盛土の施工载荷による計算

これらの結果から、地盤の非排水せん断強度  $s_u$ 、圧密係数  $c_v$ 、排水距離  $H$  を知ることができれば、提案する強度推定式を用いることで、対象地盤の部分排水強度を示す载荷速度の範囲、さらには部分排水強度を知ることが示した。また、粘土地盤でも選定場所によっては部分排水せん断強度を用いることが可

能であると考えられる。

そこで、提案する強度推定式の実務問題への適用性を把握するために、盛土载荷に着目し、簡易的な支持力計算を行った。

対象地盤(図-3)は盛土下部がすべて同試料で構成されていると仮定し、汐留粘土(S40)、中間土(SK50, SK70)の3通りとした。ここでは、層厚を20mとし上部の10mについて検討している。要素を深さ1mごとに区切り、要素に作用する拘束圧ごとの非排水せん断強度  $s_u$  を与え算出した。非排水せん断強度については、前章で用いた数値解析手法を用いて決定している。対象地盤の破壊ひずみを3~6%と仮定し、それまでにかかる時間を日数とすることで、ひずみ速度としている。载荷日数は1日から300日をかけている。また、盛土高さは20mとし、盛土内の密度を  $19.6 \text{ kN/m}^3$  とした。計算に用いた载荷日数、排水距離、対象地盤、盛土の条件設定を表-4に示している。支持力計算には簡便法として Fellenius の式

$$q = 5.52 \times s_u \text{ or } s_{PD} \quad (2)$$

を用いた。

安全率は、これまでに得られた部分排水強度を代入した値と盛土载荷重の比から算出している。以上の計算方法により、深さごとの部分排水領域、安全率の算出を行った。

表-4 計算条件

载荷日数	(day)	1 ~ 300	
排水距離	(m)	1 ~ 10	
盛土高さ	(m)	20	
盛土密度	( $\text{kN/m}^3$ )	19.6	
地盤内密度	( $\text{kN/m}^3$ )	20	
圧密係数	S40	$(\text{m}^2/\text{day})$	
	SK50		$1.37 \times 10^{-2}$
	SK70		$3.17 \times 10^{-2}$
			$1.58 \times 10^{-1}$

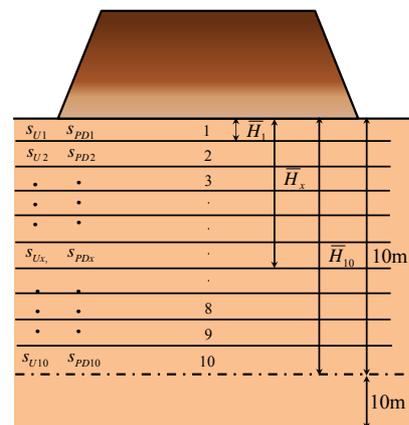


図-3 対象地盤モデル

図-4, 5, 6 はそれぞれの試料における支持力の計算結果を示している。図中の  $F_s$  が示されている色線は、安全率  $F_s$  がそれぞれの数値以上の範囲(安全域)と未満の範囲(危険

域)を示している。さらに、非排水領域、部分排水領域、排水領域の背面色を分けて示した。その結果、粘土(S40)でも、部分排水領域があることがわかり、粘土地盤でも排水距離と日数によっては、部分排水効果が十分に期待できることがわかる。さらに、中間土の結果もあわせてみていくと、砂分量が増えていけば部分排水もしくは排水領域の範囲が広がっていくことがわかる。つまり、非排水領域よりも部分排水もしくは排水領域が徐々に増え、それと同時に安全域が拡大してゆく。特に、中間土のSK70においては、そのほとんどが部分排水もしくは排水領域に入ることが確認された。

また、全試料とも非排水せん断強度を用いた設計では、支持不可能な盛土高さでも、載荷(施工)速度と排水距離 $H$ を考慮した部分排水せん断強度を用いることで、安全率 $F_s$ が1.2以上の安全域に入ることが確認された。以上より、提案する部分排水強度推定式を用いることで、非排水強度だけでなく、部分排水強度から排水強度の範囲まで検討することが可能となった。また、この手法では盛土

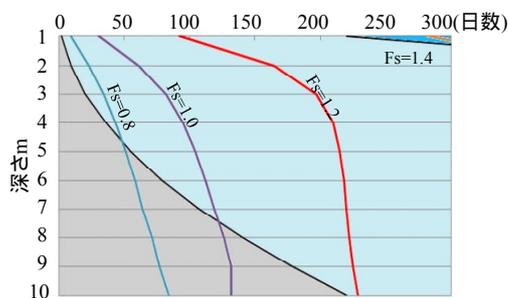


図-4 支持力計算結果(S40)

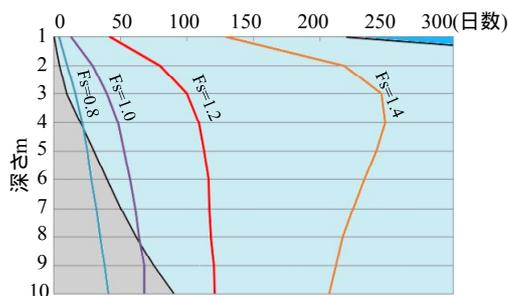


図-5 支持力計算結果(SK50)

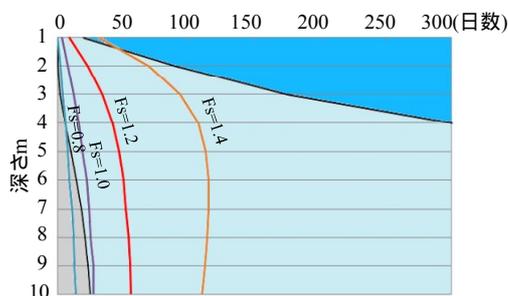


図-6 支持力計算結果(SK70)

高さ、層厚だけでなく、一様な試料でない場合も要素ごとのパラメータの決定により部分排水強度ならびに安全率を推定することが可能である。その結果、各施工現場における、地盤の非排水せん断強度 $s_u$ 、圧密係数 $c_v$ 、排水距離 $H$ を知ることができれば、物理実験と数値解析を用いることによって部分排水を考慮した推定式を知ることができ、地盤の性状によっては、部分排水効果を利用することが可能となる。

#### (4) まとめ

本研究では、粘土(S40)と中間土(SK50, SK70)を試料の対象として、室内試験と数値解析による部分排水せん断試験を行った。その結果、概ね同様の結果となった。また部分排水効果を考慮した土の強度推定式を算出し、その適用性を盛土載荷による支持力計算を用いて検討した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) ひずみ速度を変化させた非排水・部分排水せん断試験を行い、正規化せん断強度 - 排水係数関係より、部分排水効果考慮した強度推定式の提案を行った。

2) 粘性土から中間土における部分排水試験の数値解析を行い、部分排水効果を再現することで、その解析結果より、室内試験結果と照らし合わせた結果、概ね一致する傾向となった。

3) 提案する強度推定式を用いて、盛土載荷による支持力計算を行った。その結果、粘土(S40)でも部分排水効果が期待できることが確認された。さらに、中間土(SK50, SK70)の部分排水強度が発生する範囲を示し、部分排水強度推定式の適用性、ならびに部分排水強度を選択する可能性を示した。

この提案式を利用することで、非排水強度から排水強度の範囲まで検討することが可能となり、地盤の性状によっては、施工現場ごとに部分排水効果もしくは排水効果を利用することが可能となると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

金澤伸一, 橋伸也, 飯塚敦: 盛土構造物の排水能力に対する解析的検討, 土木学会論文集 A2, 土木学会, Vol.71, pp.429-436, 2015.

〔学会発表〕(計2件)

吉野修, 石山宏二, 金澤伸一, 飯塚敦: 地層処分における緩衝材の再冠水挙動に関する解析的検討, 平成27年度土木学会全国大会, 第70回年次学術講演会(岡山), CS12-031, 2015.

野口祥吾, 金澤伸一, 林久資: 近年の集中

豪雨に伴う盛土構造物への影響, 第 50 回地  
盤工学研究発表会講演集, pp.1059-1061, 2015.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

金澤 伸一 (KANAZAWA SHIN-ICHI)

福島工業高等専門学校・建設環境学科・

准教授

研究者番号 : 20580062