

# 中間土の力学特性評価に関する研究

A Study on Evaluation of Mechanical Characteristics of Intermediate Soils

土木工学専攻 21号 齊藤 王二郎

SAITOU Oujirou

## 1. はじめに

地盤の安定解析において、粘性土地盤におけるせん断強度は非排水せん断強度を用い、砂地盤におけるせん断強度は排水せん断強度を用いるのが通例である。これは通常の施工スピードにおいて、砂地盤では完全排水となり粘土地盤では完全非排水と仮定できるためである。しかしながら、砂と粘土が混ざったような中間土地盤では表-1に示すように、透水係数、圧密係数とも粘土と砂の中間的な数値を示すため、通常の施工スピードにおいても部分的な排水が生じ、非排水せん断強度と排水せん断強度の中間的強度である部分排水せん断強度となると考えられる。また、粘性土地盤であっても極めて遅い載荷速度であれば排水せん断強度を用いることが可能であり、砂地盤であっても極めて早い載荷速度であれば非排水せん断強度を用いることが可能である。すなわちどのような土であっても、図-1に示すように載荷速度と土の透水性(圧密特性)の兼ね合いに応じて、非排水せん断強度、排水せん断強度、非排水せん断強度と排水せん断強度の中間強度である部分排水せん断強度が存在するといえる。

本研究では、この部分排水せん断強度を示す載荷速度の範囲を部分排水レンジと称し、粘土と中間土に対して部分排水せん断試験と非排水せん断試験を実施することで、載荷速度と圧密係数に着目した評価を行った。その結果、載荷速度  $\dot{\epsilon}_a$  (%/min) を圧密係数  $c_v$  ( $m^2/min$ ) で除した相対載荷速度  $\dot{\epsilon}_a/c_v$  ( $m^2$ ) を用いることで、部分排水レンジに対する土の種類及び拘束圧によらない一義的評価の可能性を捉えることができた。

## 2. 使用試料

本研究で用いた試料は、汐留埋立地から採取した塑性指数  $I_p=40$  の汐留粘土 (S40) と、汐留粘土に硅砂7号を混合し、人工的に砂分量を調整した中間土 SK70、SK30、SK60である。これらは、液性限界の2倍に含水比を調整し、圧密圧力 100 kPa で予備圧密して作成した。なお、中間土の SK は汐留と硅砂の頭文字であ

表 1 中間土の判断基準<sup>1)</sup>

	粘土	中間土	砂
砂含有量 S (%)	50以下	50 ~ 80	80以上
塑性指数 $I_p$	25以上	NP ~ 25	NP
透水係数 k (cm/s)	$10^{-7}$ 以下	$10^{-7} \sim 10^{-4}$	$10^{-4}$ 以上
圧密係数 $c_v$ ( $cm^2/min$ )	$10^{-1}$ 以下	$10^{-1} \sim 10$	10以上

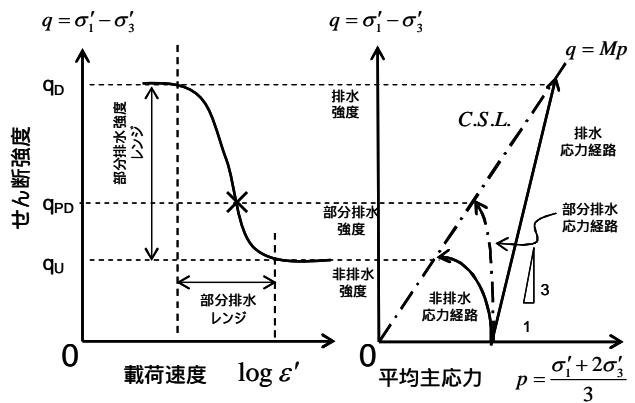


図 1 部分排水の概念図

表 2 試料の物性値

試料名	S40	SK30	SK60	SK70
土粒子密度 $\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	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	24.0
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

り、数字は砂分含有量を表わしている。各試料の物理特性を表-2に示す。

## 3. 試験概要

今回行った試験は Series1、Series2、Series3 に大別される。Series1 は S40 と SK70 における部分排水レンジを確認するための試験であり本研究における根幹をなす。Series2 と Series3 は Series1 において求めた推定式の妥当性を確認するために行った試験であり、Series2 では圧密係数  $c_v$  の違いに着目し、Series3 では拘束圧  $\sigma_3$  の違いに着目している。試験手順はまず 100kPa で予備圧密した試料を、トリミング法により直径 5cm、高さ 10cm に成形し、三軸室に設置した。次に、飽和度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、Series1、

Series2 ではセル圧を 500kPa まで増加させ、有効拘束圧 300kPa で等方圧密を行い、Series3 ではセル圧を 600kPa と 700kPa まで増加させ、有効拘束圧 400kPa と 500 kPa で等方圧密を行った。セル圧を増加させる際に B 値を計測し、全ての試験において 0.96 以上であることを確認している。圧密終了時間は 3t 法により判断し、S40 では 28 時間、SK70 では 3.5 時間、SK30 では 24 時間、SK60 では 8 時間とした。せん断はセル圧一定のまま、軸ひずみを一定割合で増加させるひずみ制御方式で、軸ひずみ  $\epsilon_a=16\%$  まで行った。その際に部分排水せん断試験は排水バルブを開け、非排水せん断試験はバルブを閉じることとした。また、せん断中は供試体の変形挙動を捉えるために軸ひずみ 0.5% 毎に写真撮影を行い、試験終了後には供試体中央部における含水比を高さ 1cm ごとに計測している。各シリーズにおける試験ケースを表-3 に示す。

#### 4. 試験結果

図-2、図-3 は Series1 に対して載荷速度を変化させて行った非排水せん断試験及び部分排水せん断試験結果の応力～ひずみ関係である。図-2 より、ひずみ速度が遅くなるほどせん断強度が低下するという、既往の研究で言われている非排水三軸試験のひずみ速度効果が確認できる。ひずみ速度 0.005%/min における強度はひずみ速度 10%/min における強度よりも、S40 では 30%、SK70 では 20% 程度低下しており、粘土分の多い土の方がひずみ速度依存性は大きい。またグラフの形より、S40 はひずみ軟化型であり SK70 はひずみ硬化型となることから SK70 は砂に近いせん断挙動を示していることが分かる。図-3 からは部分排水状態において載荷速度が遅いほど強度が大きくなる傾向が見られる。S40 では  $\dot{\epsilon}_a=10\%/min$  と  $1\%/min$  のグラフが一致し、SK70 では  $\dot{\epsilon}_a=0.1, 0.05, 0.005\%/min$  のグラフが一致している。このことは、S40 において  $\dot{\epsilon}_a=1\%/min$  が非排水せん断強度と部分排水せん断強度の境界であり、SK70 では  $\dot{\epsilon}_a=0.1\%/min$  が部分排水せん断強度と排水せん断強度の境界であることを意味している。図-4 はせん断強度と載荷速度の関係である。このグラフより S40 と SK70 の部分排水レンジを求めることができ、S40 の部分排水レンジは  $0.005\%/min < \dot{\epsilon}_a < 1\%/min$  であり、SK70 の部分排水レンジは  $0.1\%/min < \dot{\epsilon}_a < 10\%/min$  となる。

表 3 試験ケース

Series1							
S40		SK70					
非排水		部分排水		非排水		部分排水	
実験番号	載荷速度 $\dot{\epsilon}_a$ (%/min)	実験番号	載荷速度 $\dot{\epsilon}_a$ (%/min)	実験番号	載荷速度 $\dot{\epsilon}_a$ (%/min)	実験番号	載荷速度 $\dot{\epsilon}_a$ (%/min)
U-1	10	P-1	10	U-4	10	P-6	10
U-2	0.05	P-2	1	U-5	1	P-7	5
U-3	0.005	P-3	0.05	U-6	0.05	P-8	1
		P-4	0.005	U-7	0.005	P-9	0.1
		P-5	0.001			P-10	0.05
						P-11	0.005

#### Series2

試験種別	実験番号	載荷速度 $\dot{\epsilon}_a$ (%/min)
SK70 部分排水	P-12	0.213
SK30 非排水	U-8	0.056
SK30 部分排水	P-13	0.056
SK60 非排水	U-9	0.862
SK60 部分排水	P-14	0.862

#### Series3

セル圧 (kPa)	試験種別	実験番号	載荷速度 $\dot{\epsilon}_a$ (%/min)
SK70 400	非排水	U-10	0.25
	部分排水	P-15	0.25
SK70 500	非排水	U-11	0.25
	部分排水	P-16	0.25

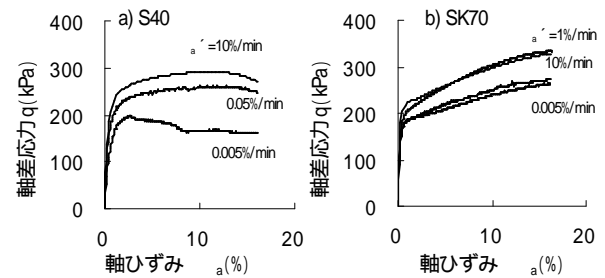


図 2 非排水せん断試験結果

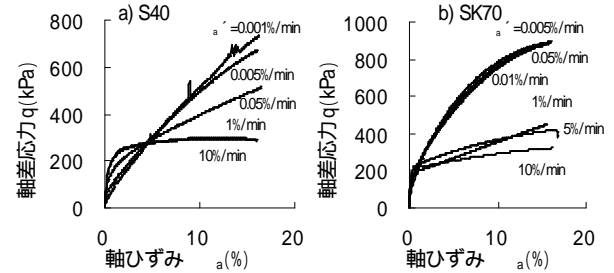


図 3 部分排水せん断試験結果

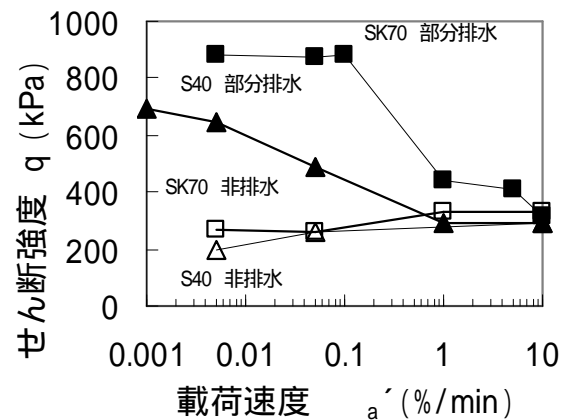


図 4 せん断強度～載荷速度 関係

このことから、S40、SK70 ともに部分排水となる載荷速度は異なるものの部分排水レンジとしては  $10^2$  程度の幅となることが分かり、中野ら<sup>2)</sup>と朴ら<sup>3)</sup>の見解と一致する。

次に部分排水試験におけるひずみ速度の違いが供試体の変形挙動に与える影響について調べた。写真-1はS40の部分排水試験  $\dot{\varepsilon}_a=10\%/min$  と  $\dot{\varepsilon}_a=0.001\%/min$  における軸ひずみ  $\varepsilon_a=0\%$  と  $\varepsilon_a=15\%$  時の変形状況である。 $\varepsilon_a=15\%$  時のとき、 $\dot{\varepsilon}_a=10\%/min$  は、 $\dot{\varepsilon}_a=0.001\%/min$  の場合よりも供試体中央部の膨らみが大きい。この違いを定量的に評価するために、図-6のように点 e の周囲 4 点 a,b,c,d での x-y 面上での変位を測定し、点 e における各種ひずみを求めた結果が図-5 である。載荷速度が遅い場合の方が、x 方向のひずみが小さくなることで、体積ひずみは大きく、せん断ひずみは小さく出ている。すなわち、載荷速度が遅いほど、同量の軸変形に対する体積収縮（圧密）が大きくなりせん断ひずみが小さくなるため、強度が大きくなっていることが分かった。この傾向はSK70でも同様である。

### 5. 部分排水レンジに対する考察

ここでは、部分排水レンジに対する載荷速度と圧密係数を統括した評価を行う。部分排水効果とは、せん断中にも部分的に排水（圧密）されせん断強度が変化することであり、冒頭でも述べたように載荷速度と圧密進行との兼ね合いで引き起こされていると考えられる。よって、部分排水レンジを評価するため表-4に示すように載荷速度  $\dot{\varepsilon}_a$  を圧密係数  $c_v$  で除して算出した相対載荷速度と部分排水せん断強度を非排水せん断強度で除した正規化せん断強度を図-8のようにプロットした。これにより図-4において載荷速度で評価していた際にはS40とSK70で異なっていた部分排水レンジが、相対載荷速度で評価した場合には一致すると言え、おおよそ  $10^3 m^{-2} \leq \dot{\varepsilon}_a/c_v \leq 10^5 m^{-2}$  の範囲であることが分かる。すなわち、相対載荷速度による部分排水レンジの評価は土の種類によらず一義的に行える可能性がある。そこで、図-8において部分排水レンジを示す部分に対して、対数近似し推定式(1)式を算出した。

$$\frac{q_{PD}}{q_u} = 6.03 - 0.44 \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_a}{c_v}\right) \quad \dots (1)$$

ただし、 $10^3 \leq \frac{\dot{\varepsilon}_a}{c_v} \leq 10^5$

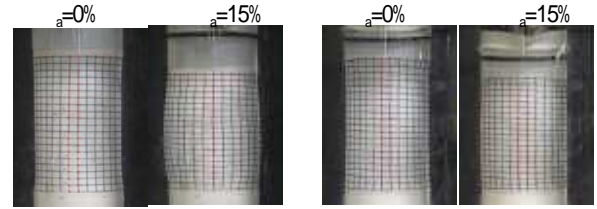


写真 1 載荷速度の違いによる変形挙動の違い (S40)

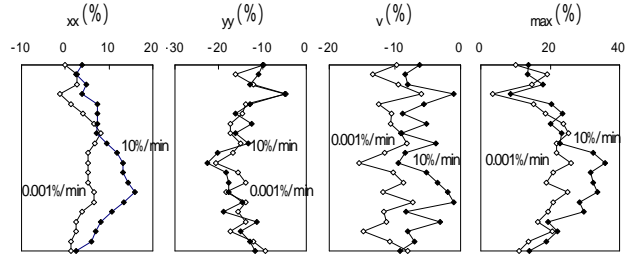


図 5 載荷速度の違いによるひずみ量の違い (S40)

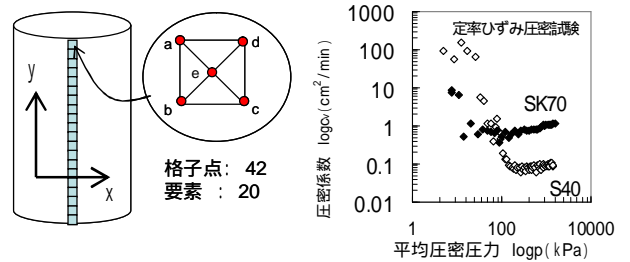


図 6 ひずみ計算箇所

図 7 S40, SK70 の圧密係数  $c_v$

表 4 Series1 データ整理結果

	載荷速度 $\dot{\varepsilon}_a$ %/min	部分排水 せん断強度 $q_{PD}$ kPa	非排水 せん断強度 $q_u$ kPa	正規化 せん断強度 $q_{pd}/q_u$	圧密係数 $c_v$ $m^2/min$	相対 載荷速度 $\dot{\varepsilon}_a/c_v$ $\%/m^{-2}$
S40	10	290	292	0.99	$9.5 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^6$
	1	294	278 ( )	1.06		$1.1 \times 10^5$
	0.05	489	261	1.87		$5.3 \times 10^3$
	0.005	649	198	3.28		$5.3 \times 10^2$
	0.001	696	198 ( )	3.52		$1.1 \times 10^2$
SK70	10	318	324	0.98	$1.1 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^4$
	5	411	327 ( )	1.26		$4.4 \times 10^4$
	1	440	331	1.33		$8.8 \times 10^3$
	0.1	884	278 ( )	3.18		$8.8 \times 10^2$
	0.05	877	261	3.36		$4.4 \times 10^2$
	0.005	882	270	3.27		44

非排水せん断強度における ( ) は図-4 から読み取った値

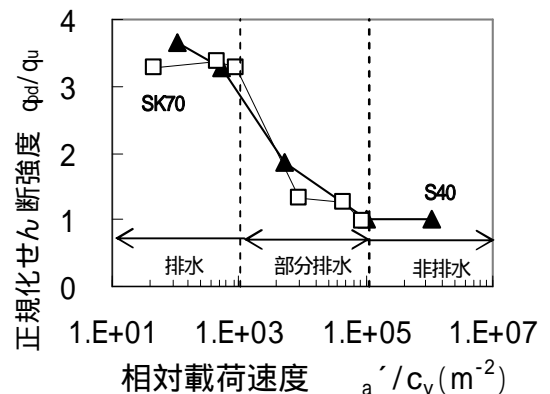


図 8 正規化せん断強度 ~ 相対載荷速度 関係

以上より地盤の圧密係数が既知の時、想定する施工スピードが  $10^3 m^2 \cdot \varepsilon_a'/c_v$   $10^5 m^2$  の範囲外であれば、排水せん断強度を用いるべきか非排水せん断強度を用いるべきかの判断をすることができる。想定する施工スピードが  $10^3 m^2 \cdot \varepsilon_a'/c_v$   $10^5 m^2$  の範囲内の場合、(1)式を用いることで地盤の強度が非排水せん断強度の何倍程度かを算出することができる。この概念図を図-9に示す。

### 6. 部分排水せん断レンジの一義性に対する検討

ここでは、Series2 と Series3 の試験結果を示すことによって前節で算出した推定式の妥当性を検討した。Series2 はSK60 とSK30 に対して、表-5 のように既知の圧密係数と、適当に決めた正規化せん断強度を(1)式に代入して求めた載荷速度で行った試験である。その結果を図-11 に、図-11 より算出した正規化せん断強度を相対載荷速度に対してプロットしたものを図-12 に示す。表-6 は(1)式より算出した正規化せん断強度と、実験値とを比較したものであり、両者は誤差 13% 以内に納まっていることが分かる。これらのことから、(1)式の汎用性を確認できた。Series3 は、SK70 に対して拘束圧を 400kPa と 500kPa とし、同様の載荷速度で行った試験である。その結果を表-7 と図-13 に示す。400kPa と 500kPa ではほぼ等しい正規化せん断強度になることが分かり、(1)式上にプロットされた。よって、正規圧密領域において一定値となる圧密係数  $c_v$  を、相対載荷速度に用いる工学的意味が確認できた。

### 7. まとめ

部分排水レンジは相対載荷速度  $\varepsilon_a'/c_v$  によって評価した場合、土の種類及び拘束圧によらず一定の範囲  $10^3 m^2 \cdot \varepsilon_a'/c_v$   $10^5 m^2$  となる。

#### 【参考文献】

1)小林ら：ジオテクトニクス 2 中間土、社団法人土質工学会、1992、 2)中野正樹：粘土の非排水部分排水せん断挙動の解析と軟弱地盤上の盛土工設計への応用に関する研究、名古屋大学博士学位論文、1993 3)竹村ら：中間土 - Headache Soil か否か？ -、土と基礎、Vol.41, No7, pp.1-4、1993 4)石田和希：中間土の透水係数に関する実験的検討、第6回地盤工学会関東支部地盤工学発表会、2009

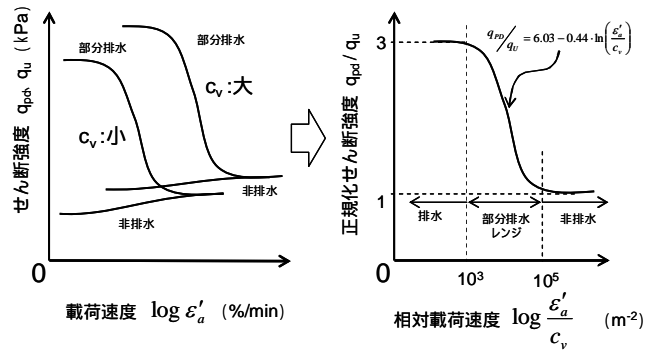


図 9 部分排水レンジの一義性に対する概念図

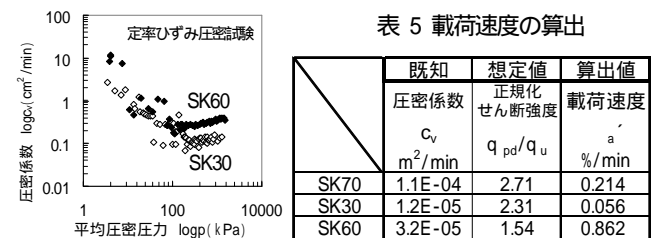


図 10 SK60、SK30 の圧密係数  $c_v$

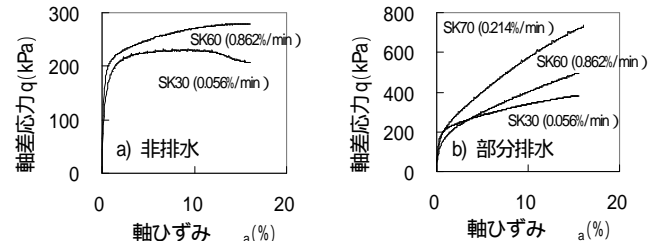


図 11 Series2 における非排水、部分排水せん断試験結果

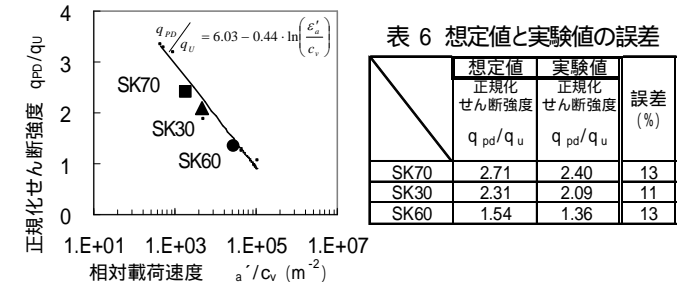


図 12 Series2 における正規化せん断強度～相対載荷速度 関係

表 7 Series3 の試験結果

	載荷速度 $a'$ %/min	部分排水せん断強度 $q_{pd}$ kPa	非排水せん断強度 $q_u$ kPa	正規化せん断強度 $q_{pd}/q_u$	圧密係数 $c_v$ $m^2/min$	相対載荷速度 $a'/c_v$ $m^2$
		976	370	2.64		
SK70(400kPa)	0.25	1149	425	2.70	1.1E-04	$2.2 \times 10^3$
SK70(500kPa)						

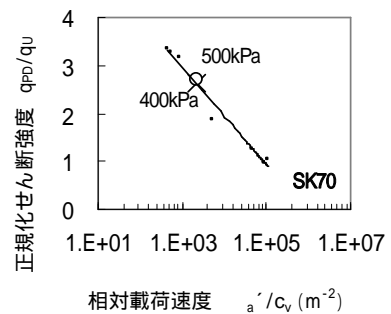


図 13 Series3 における  $q_{pd}/q_u \sim \varepsilon'_a/c_v$  関係