

自然粘土の残留強度に及ぼす過圧密比の影響

信州大学大学院 学○辰谷明記
信州大学工学部 正 梅崎健夫 正 河村 隆

1. はじめに 残留状態において垂直応力 σ_N を段階的に減少させることにより過圧密比 ($OCR=\sigma_c/\sigma_N$, σ_c : 圧密応力) を変化させるリングせん断試験および過圧密粘土を用いた通常のリングせん断試験を実施し、自然粘土の残留強度 τ_r に及ぼす圧密過程およびせん断過程における過圧密比の影響について検討した。

2. 試料および試験方法 同一地点から採取した泥岩を細粒化した試料の物理特性を表－1 に示す。試料を液性限界の約2倍の含水比で練り返し、予圧密応力 $\sigma_v=333.2\text{kPa}$ ($=0.85\sigma_c$) で5日間一次元的に予圧密した後、外径100mm、内径60mm、高さ20mmの環状供試体に成形した。 σ_N をせん断中に制御しない「簡易定圧試験」を実施した。 σ_N は供試体とリング周面の間に発生する摩擦力（リング周面摩擦力）のためにせん断中変化する。 σ_N をリング周面摩擦力を考慮したせん断面上の平均的な値として評価する。せん断中の上下リングの隙間を0.1mm、せん断変位角速度を0.0025rad/min.（せん断変位速度0.1mm/min.に相当）とした。試験装置および試験方法の詳細については参考文献1), 2)を参照されたい。

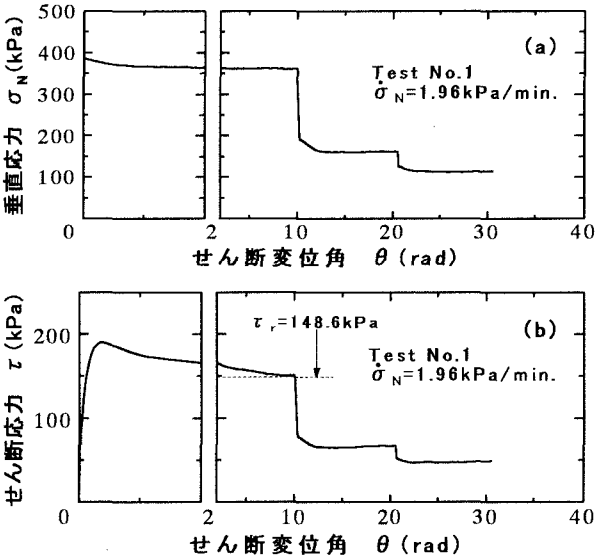
表－1 試料の物理特性

Test No.	採取深度 z(m)	G_o	w_L (%)	I_p
1	3.40～4.40	2.716	29.8	19.1
2	0.80～3.10	2.693	27.6～30.1	16.4～19.4
3, 4	4.70～7.00	2.686	25.8～27.2	14.5～16.0

①残留状態において垂直応力を減少させるリングせん断試験(Test No.1～3) 供試体を $\sigma_c=392\text{kPa}$ で60分間圧密 ($3t\div 30\text{min.}$) して正規圧密状態にした後、設定垂直応力 σ_N^* をせん断変位角 $\theta=10\text{rad}$ （せん断変位400mmに相当）ごとに $\sigma_N^*=392\rightarrow 196\rightarrow 130.7\text{kPa}$ ($OCR=1\rightarrow 2\rightarrow 3$) と段階的に減少させる試験を実施した。垂直応力の減少速度 $\dot{\sigma}_N$ は、Test No.1, 2において $\dot{\sigma}_N=1.96\text{kPa/min.}$, Test No.3において $\dot{\sigma}_N=4.9\text{kPa/min.}$ とした。

②過圧密粘土のリングせん断試験(Test No.4) Test No.3と同じ試料を用いて作製した供試体を $\sigma_c=392\text{kPa}$ で60分間圧密した正規圧密状態から、圧密応力を130.7kPaまで除荷して30分間膨潤させて過圧密状態($OCR=3$)にした後、 $\sigma_N=130.7\text{kPa}$ で $\theta=10\text{rad}$ までせん断する試験を実施した。

3. 試験結果および考察 図－1(a), (b)に、それぞれTest No.1における $\sigma_N-\theta$ および $\tau-\theta$ 関係を示す。 σ_N は各段階において σ_N^* から漸次減少し、一定値に収束する。 $\theta\leq 10\text{rad}$ において、 τ はせん断開始直後に最大値 τ_p （このときのせん断変位角を θ_p とする）を示した後漸次減少し、一定値に収束する。双曲線近似法¹⁾を用いて τ_r を求めると148.6kPaとなり、 τ の収束値にほぼ一致することから供試体が残留状態に達していることがわかる。ここで、 $c_f=0$ とすると、残留状態の内部摩擦角 $\phi_f=22.3^\circ$ ($=\tan^{-1}(\tau_r/\sigma_N)$) が求まる。 $\theta\geq 10\text{rad}$ において σ_N^* を段階的に減少させると、 σ_N の減少とともに τ も瞬時に減少し、一定値に収束している。第2, 3段階はすでに残留状態に達していることから、 $c_f=0$ として $\phi_r(=\tan^{-1}\tau/\sigma_N)$ の平均値を求めた。4つの試験における各段階から得られた ϕ_r とその平均値を表－2に示す。第2, 3段階の ϕ_r は、双曲線近似法を用いて求めた第1段階の ϕ_r にほぼ等しい。



図－1 垂直応力およびせん断応力とせん断変位角の関係 (Test No.1, 2)

表-2 残留状態における内部摩擦角 $\phi_r(c_r=0)$ の決定

Test No.	1			2			3			4
過圧密比 OCR	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3
せん断変位角 θ (rad)	$\theta_p \sim 10$	10 $\sim$ 20	20 $\sim$ 30	$\theta_p \sim 10$	10 $\sim$ 20	20 $\sim$ 30	$\theta_p \sim 10$	10 $\sim$ 20	20 $\sim$ 30	$\theta_p \sim 10$
ϕ_r の算出法	双曲線近似	平均	平均	双曲線近似	平均	平均	双曲線近似	平均	平均	双曲線近似
$\phi_r(^{\circ})(c_r=0)$	22.3	22.1	22.5	25.8	24.9	24.1	22.6	21.6	21.7	21.5
	平均値: 22.3			平均値: 24.9			平均値: 21.9			—

図-2(a), (b)に, それぞれ Test No.1 および 2 における応力経路を示す. τ は破壊強度線 (Test No.1: $\phi_d=27.0^{\circ}$, $c_d=0$, No.2: $\phi_d=29.1^{\circ}$, $c_d=0$) に達した後, 残留強度線 (Test No.1: $\phi_r=22.3^{\circ}$, $c_r=0$, No.2: $\phi_r=24.9^{\circ}$, $c_r=0$) 付近まで減少し, σ_N^* の減少過程において残留強度線に沿って減少している. 残留強度線は σ_N が減少しても一つの直線で表されることから ϕ_r はせん断中の OCR に依らず一定である.

図-3 に Test No.3, 4 における $\tau-\theta$ 関係を示す. Test No.3 の第 1 段階において双曲線近似法を用いることにより $\tau_r=163.9\text{kPa}$ および $\phi_r=22.6^{\circ}$ ($c_r=0$) が求まる. Test No.3 において残留状態の τ の値が変動しているのは, $\dot{\sigma}_N$ の値が大きかったためである. 第 2, 3 段階については Test No.1, 2 と同様の方法で ϕ_r を求めた. 各段階の ϕ_r とその平均値を表-2 に示す. Test No.4 において双曲線近似法を用いると $\tau_r=47.1\text{kPa}$ および $\phi_r=21.5^{\circ}$ ($c_r=0$) が求まる. この値は Test No.3 の第 3 段階における τ_r , ϕ_r ($c_r=0$) の値にほぼ等しい.

図-4 に Test No.3, 4 における応力経路を示す. Test No.3 の τ は, Test No.1, 2 と異なり σ_N の減少に伴い階段状に減少している. これは $\dot{\sigma}_N$ の値が大きかったために供試体内に負の間隙水圧が発生し, せん断面上の平均的な有効垂直応力が増加したことに起因すると考えられる. σ_N が一定値に収束した後, 間隙水圧が消散するため, τ は一定値に収束し, 収束した点を結んだ直線を残留強度線として近似することができる. Test No.4 において, τ はせん断開始直後に Test No.3 の破壊強度線 ($\phi_d=29.3^{\circ}$, $c_d=0$) 付近に達した後, それに沿って減少し, Test No.3 の残留強度線 ($\phi_r=21.9^{\circ}$, $c_r=0$) 上に至る. したがって, ϕ_r ($c_r=0$) は垂直応力減少過程の応力経路から求めることができる.

4. まとめ ①残留状態における内部摩擦角 ϕ_r ($c_r=0$) は, 圧密過程およびせん断過程における過圧密比に依らず一定である. ②等しい垂直応力, 過圧密比の下での残留強度 τ_r は, 圧密過程およびせん断過程の垂直応力履歴に依らず一定である. ③残留状態において垂直応力を段階的に減少させるリングせん断試験を行うことにより, 残留状態における内部摩擦角 ϕ_r ($c_r=0$) を垂直応力減少過程の応力経路から求めることができる.

【参考文献】 1) 鈴木素之, 梅崎健夫, 川上 浩: リングせん断試験における粘土の残留強度とせん断変位の関係, 土木学会論文集, No.575/III-40, pp.141-158, 1997. 2) 鈴木素之, 梅崎健夫, 川上 浩, 山本哲朗: 直接型せん断試験における土の残留強度, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.37-50, 2000.

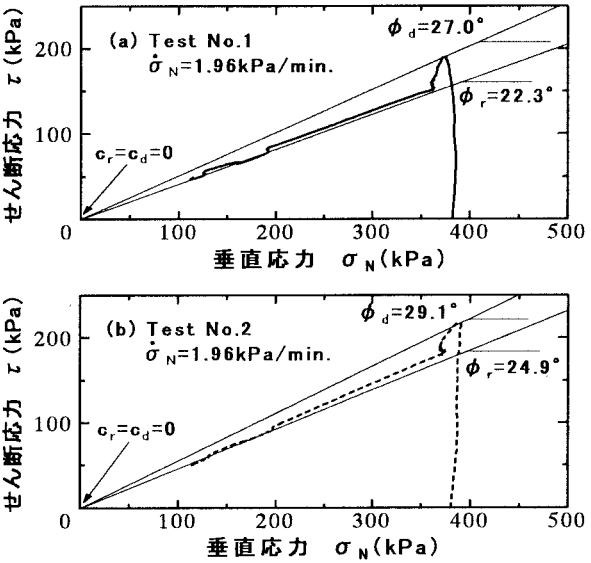


図-2 応力経路 (Test No.1, 2)

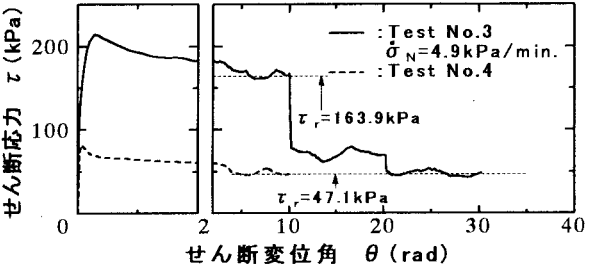


図-3 せん断応力とせん断変位角の関係 (Test No.3, 4)

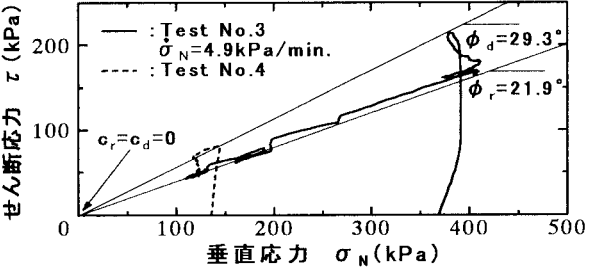


図-4 応力経路 (Test No.3, 4)