

(3) 初期せん断応力を受けた過圧密粘土の繰返しせん断挙動の予測

山口大学工学部 兵動正幸
山口大学大学院 ○河田頼治
(株) オオバ 杉山太宏
山口大学工学部 安福規之 村田秀一

1. まえがき

一般に、粘性土地盤は侵食作用、地下水位の変動、掘削等といった応力履歴を受けることによりある程度の過圧密状態にある。また、セメンテーションやクリープによる年代効果により見かけ上、過圧密的な性状を示し、これは疑似過圧密と呼ばれている。このような粘土地盤に盛土等の構造物が存在する場合、その斜面や構造物基礎地盤にはあらかじめ静的なせん断応力が作用している。これまで、地震等の繰返し外力を受けた粘性土地盤上の構造物の被害事例は数多く報告されているにもかかわらず、飽和砂地盤の液状化のようなドラスティックな問題として取り上げられていないのが実状である。そこで本研究では、初期せん断応力履歴を受けた過圧密粘土の繰返しせん断挙動を明確にする目的で、海性粘土を対象に過圧密比および初期せん断応力を種々に変化させた非排水繰返し三軸試験を行った。また得られた実験結果をもとに繰返し荷重により発生する軸ひずみおよび間隙水圧の予測を行い、その妥当性について検討した。

2. 試料及び実験方法

実験に用いた試料は、広島市五日市より採取された海性粘土であり、攪拌後粒度調整した後、初期含水比 $W=260$ (%)とし直径25cmの予圧密容器内で鉛直圧密応力 $\sigma_v=50\text{kPa}$ まで2週間予圧密した再構成試料である。その物性値は、 $G_s=2.532$ 、 $W_L=124.2\%$ 、 $W_p=51.4\%$ 、 $I_p=72.8$ である。これを直径5cm、高さ10cmの円柱に切り出して空圧制御式繰返し三軸試験機にセットした。また、排水は供試体側面に巻かれたペーパードレーンを通じて上部より行い、下部において間隙水圧を測定した。次に圧密過程は、供試体が飽和していること(B値が0.96以上)を確認した後、所定の過圧密比になるように最大先行圧密応力 p_m まで24時間圧密し、その後除荷し所定の過圧密比(OCR=1, 1.5, 2, 4)とした。さらに、排水状態で初期せん断応力を平均有効主応力 p_e を一定として載荷し、24時間放置した。その後、非排水状態で圧縮側より周波数0.02Hzの正弦波荷重を加えた¹⁾。具体的な試験条件は、表1に示している。

表1 試験条件(五日市粘土再構成試料)

TEST NO.	p_e (kPa)	$\sigma_{v'}$ (kPa)	OCR	q_c (kPa)	$q_{c,cr}$ (kPa)	f (Hz)	W (%)	e_i	e_s
HRS13	100	80	1	60	64.3	0.02	78.8	1.974	1.621
HRS14	100	80	1	60	83.0	0.02	80.3	2.013	1.666
HRS15	100	80	1	60	50.1	0.02	80.2	2.000	1.656
HRS23	100	80	1.5	60	86.6	0.02	75.3	1.900	1.603
HRS24	100	80	1.5	60	64.0	0.02	80.4	2.004	1.585
HRS25	100	80	1.5	60	52.3	0.02	79.4	1.967	1.571
HRS33	100	80	2	60	55.6	0.02	80.0	1.995	1.503
HRS33X	100	80	2	60	153.7	0.02	79.9	1.992	1.532
HRS34	100	80	2	60	94.6	0.02	79.8	1.995	1.509
HRS35	100	80	2	60	84.5	0.02	80.4	1.981	1.512
HRS36	100	70	2	90	72.5	0.02	84.8	2.174	1.584
HRS37	100	70	2	90	84.8	0.02	84.7	2.150	1.578
HRS38	100	70	2	90	54.0	0.02	84.8	2.092	1.520
HRS39	100	60	2	120	72.2	0.02	77.0	1.925	1.495
HRS40	100	60	2	120	50.2	0.02	76.6	1.937	1.517
HRS41	100	60	2	120	47.0	0.02	84.9	2.095	1.520
HRS43	50	40	4	30	82.9	0.02	75.4	1.874	1.480
HRS44	50	40	4	30	66.5	0.02	79.1	1.864	1.516
HRS45	50	40	4	30	51.3	0.02	78.6	1.955	1.514

3. 実験結果及び考察

図-1、図-2は、初期せん断応力比 $q_c/p_e=0.6$ で過圧密比OCR=1およびOCR=4における試験結果から得られた応力ひずみ関係をそれぞれ示したものである。図-1、図-2の両図から、過圧密比の違いによらず偏差応力の繰返しにより軸ひずみが増大しており、変形は、圧縮側に初期せん断応力を加えていることから圧縮側へと残留していくことが認められる。また図-1では、載荷初期からのせん断剛性を保ちながら一定の割合で変形が進行していることがわかる。しかし図-2においてせん断剛性は、偏差応力の繰返しにより徐々に減少していることがわかる。これは、過圧密比の違いというよりむしろ偏差応力が伸張側へ進行することによる応力反転の影響であると考えられる。また図-3、図-4は、 $q_c/p_e=0.6$ でOCR=1およびOCR=4の試験結果から得られた有効応力経路をそれぞれ示したものである。図-3においては載荷初期からの比較的大きな間隙水圧の発生により平均有効主応力が大きく減少し、その後繰返し回数の増加と共に減少を連ね、最終的に破壊に至り定常なループを描いている。図-4については、過圧密の影響により載荷初期に負の間隙水圧が発生し平均有効主応力の増加が見られるが、最終的にはOCR=1と同

様の挙動を示していることがわかる。また最終的な定常ループは、両者とも図中に示した静的破壊線を大きく飛び出していることが認められる。ここで本研究では、有効応力径路において最終的に定常ループに至った点がおおよそ $\varepsilon_p=10\%$ であることから、 $\varepsilon_p=10\%$ を破壊と定義した。

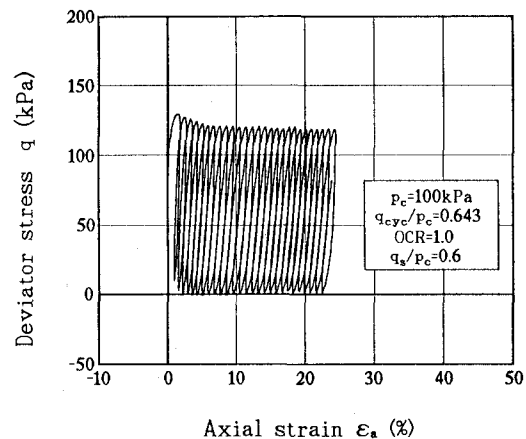


図-1 応力ひずみ関係 (OCR=1)

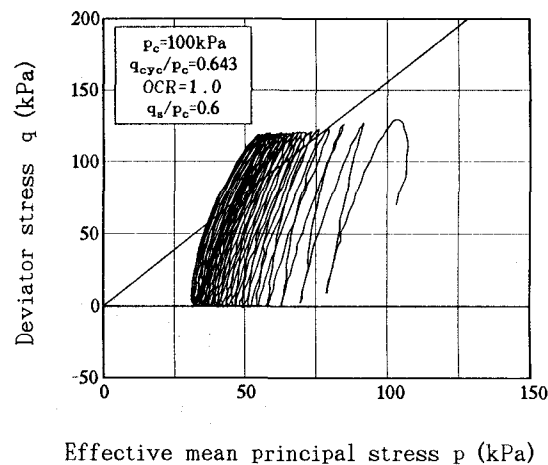


図-3 有効応力径路 (OCR=1)

次に図-5 は、ピーク軸ひずみ $\varepsilon_p=10\%$ に至るに必要な繰返し応力比 q_{cyc}/p_c と繰返し回数 N の関係を初期せん断応力比 q_a/p_c と過圧密比 OCR をパラメータとして示したものである。図中の実線は $OCR=2$ 、点線は $OCR=1$ の繰返しせん断強度曲線を示している。図より過圧密比によらず、初期せん断応力比が増加すると繰返しせん断強度は低下することがわかる。このことは、正規圧密地盤であろうと過圧密地盤であろうと初期せん断応力が増加すれば、地震等の繰返し外力に対するせん断抵抗が低下することを示唆している。

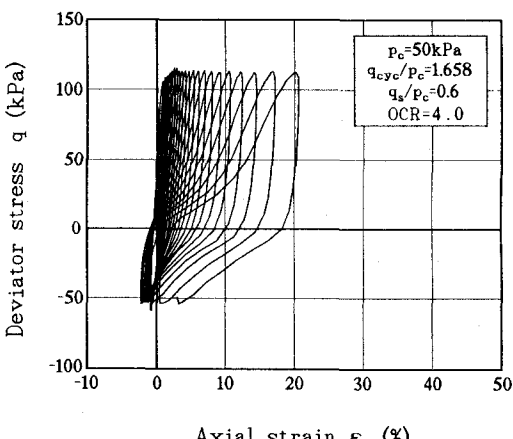


図-2 応力ひずみ関係 (OCR=4)

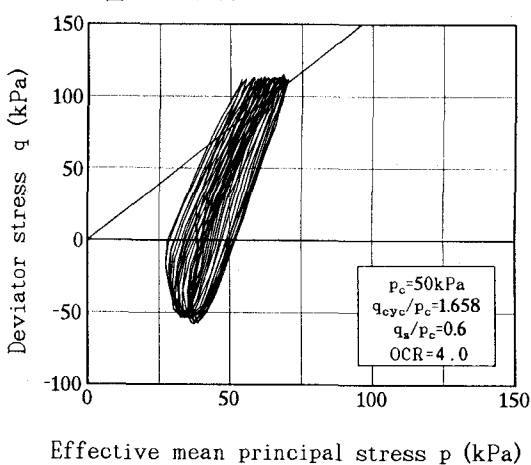


図-4 有効応力径路 (OCR=4)

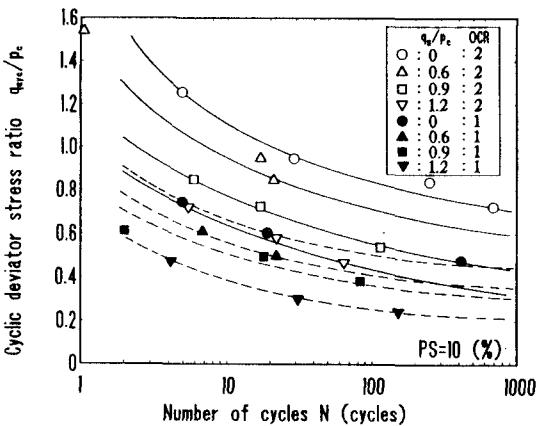


図-5 繰返し応力比 q_{cyc}/p_c と繰返し回数 N の関係 (PS=10%)

4. 軸ひずみおよび間隙水圧の定量化

4-1. 軸ひずみと有効応力比の関係

図-6は、ピーク軸ひずみ ε_p とピーク有効応力比 η_p の関係を過圧密比と繰返し応力比をパラメータとして示したものである。図から過圧密比や繰返し応力比の違いによってプロットが大きくばらついていることがわかる。また有効応力径路からもわかるように最終的な応力比は、静的のそれを大きく越えている。これは過圧密や繰返し履歴の影響で見かけ上の粘着成分が生じたためと考えられる。そこで、このばらつきを修正するためにピーク修正有効応力比 ζ_p の定義を行った。²⁾ 図-7は、各実験において有効応力経路が最終的に破壊状態で定常ループに至った時の圧縮のピーク点をそれぞれp-q面上に連ねたものである。図から各点を結ぶループの包絡線は、q軸上に切片を持つ直線で表すことができ、この直線は過圧密履歴や繰返しせん断を受けた粘土の粘着力効果を表す破壊線に相当することがわかる。ここでこの直線が、p軸上で交わる点を p_r としピーク修正有効応力比 ζ_p を以下のように定式化することが可能となった。

$\zeta_p = q / (p - p_r) \dots (1)$ ($p_r = -7.5 \text{ kPa}$)
ここで図-8は、図-6と同条件におけるピーク軸ひずみ ε_p とピーク修正有効応力比 ζ_p との関係を示したものである。この図から初期の応力比を修正するには至っていないが、両者の関係には図-6と比べプロットにまとまりが見られ、過圧密比や繰返し応力比に依らない一義的な双曲線関係が存在することがわかる。そこで両者の関係を、次式のように定式化することが可能となった。 $\varepsilon_p = \zeta_p / (2.1 - 1.1 \zeta_p) \dots (2)$

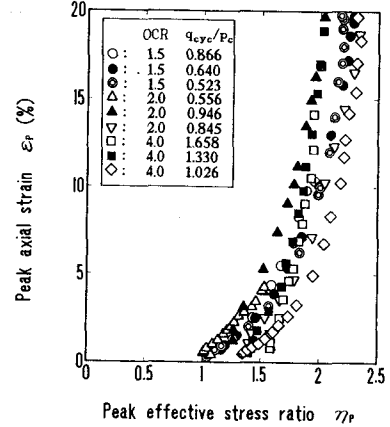


図-6 ピーク軸ひずみ ε_p とピーク有効応力比 η_p の関係

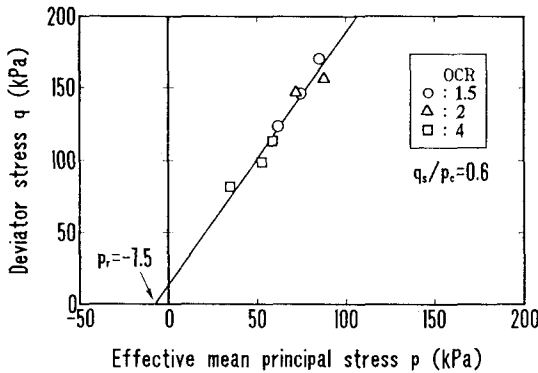


図-7 過圧密粘土の破壊包絡線

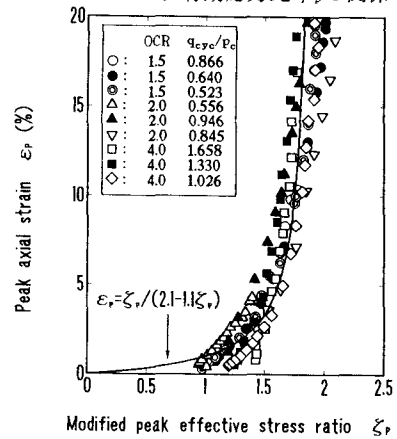


図-8 ピーク軸ひずみ ε_p とピーク修正有効応力比 ζ_p の関係

4-2. 軸ひずみおよび間隙水圧の定量化³⁾

図-9は、 $q_s/p_c = 0.6$ の試験結果から得られた $\varepsilon_p = 10\%$ に至るに必要な最大繰返し応力比 $(q_{cyc} + q_s)/p_c$ と繰返し回数Nの関係を過圧密比をパラメータとして両対数上に示したものである。この図より両者の関係から、過圧密比が高いものほど繰返しせん断強度が高くなることがわかる。また両者間には、過圧密比別に一本の直線関係が存在することが認められ、繰返しせん断強度 R_f は次式で定式化される。

$R_f = (q_{cyc} + q_s)/p_c = \kappa N^\beta \dots (3)$ ここで、 β 、 κ はそれぞれこの直線の傾きおよび切片を表す定数である。

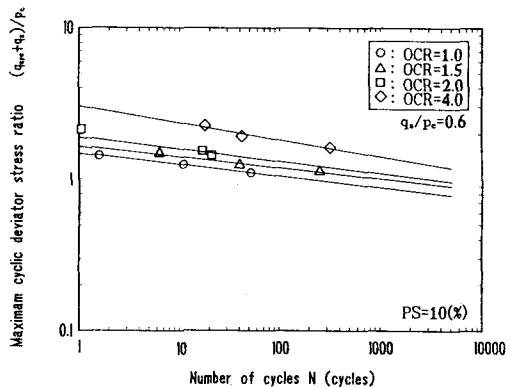


図-9 最大繰返し応力比 $(q_{cyc} + q_s)/p_c$ と繰返し回数Nの関係 (PS=10%)

次に、初期ピーク修正有効応力比 ζ_0 と破壊時のピーク修正有効応力比 ζ_f の間で、任意の繰返し回数におけるピーク修正有効応力比 ζ_p の相対的位置を表す有効応力比を相対修正応力比 ζ^* として次式のように定義し、その概念図を図-10に示している。

$$\zeta^* = (\zeta_p - \zeta_0) / (\zeta_f - \zeta_0) \dots (4)$$

また、図-10から任意のピーク修正有効応力比 ζ_p に対応するピーク間隙水圧 u_p は次式で表される。

$$u_p = (q_{cyc} + q_0) (1/\zeta_0 - 1/\zeta_p) \dots (5)$$

さらに、図-11は強度比 R/R_f と相対修正応力比 ζ^* との関係を示したものである。ここで、強度比 R/R_f は、外力としての繰返し応力比 $(q_{cyc} + q_0)/p_c$ を式(3)で定義した繰返しせん断強度 R_f で除して正規化したものであり、初期状態の0から破壊状態の1まで連続的に変化する安全率の逆数のようなパラメータである。この図から両者の間には、多少のばらつきはあるが一本の双曲線関係が存在することが認められ、次式のように定式化される。

$$\zeta^* = R/R_f / (15 - 14R/R_f) \dots (6)$$

以上に述べてきた定量化により任意の繰返し回数におけるピーク軸ひずみ ε_p およびピーク間隙水圧 u_p を予測することが可能となる。最後に図-12、図-13は、OCR=4、 $q_0/p_c=0.6$ の試験結果より得られたピーク軸ひずみ ε_p と繰返し回数 N の関係およびピーク間隙水圧比 u_p/p_c と繰返し回数 N の関係をそれぞれ示したものである。図中のプロットは実験値であり、実線は予測結果を示している。図から予測結果は、実験結果をうまく表現していることが認められ、この予測手法の妥当性が明かとなった。

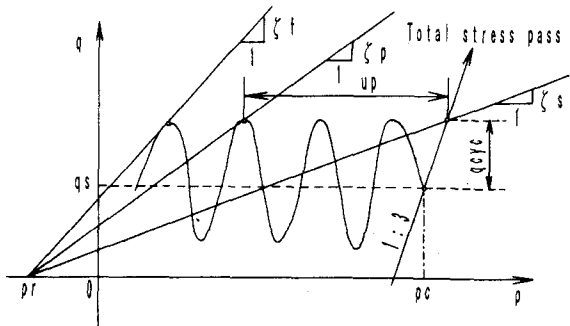


図-10 修正有効応力比 ζ の概念図

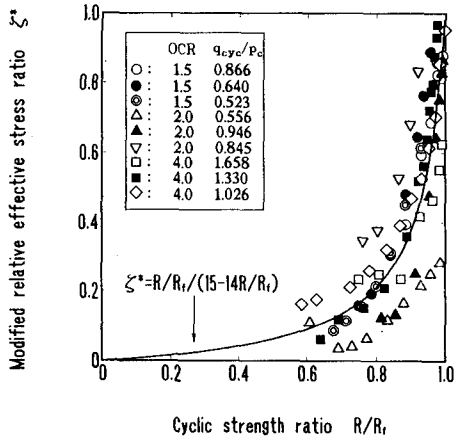


図-11 相対修正応力比 ζ^* と強度比 R/R_f の関係

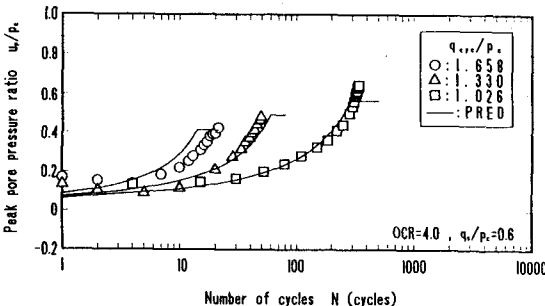
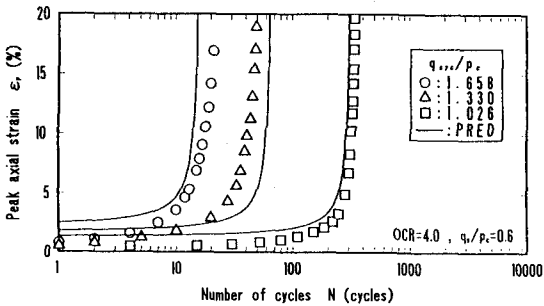


図-12 ピーク軸ひずみ ε_p と繰返し回数 N の関係 図-13 ピーク間隙水圧比 u_p/p_c と繰返し回数 N の関係

【参考文献】

- 1) 山本・兵動・村田・安福・杉山：粘土の非排水繰返し特性に及ぼす載荷周波数の影響，第27回土質工学研究発表会講演集，pp903～906，1992。
- 2) 山本・兵動・杉山・河田：過圧密された五日市粘土の非排水繰返しせん断強度について，第44回土木学会中国四国支部研究発表会講演集，1992
- 3) 兵動・山本・村田・安福・杉山：繰返しせん断を受ける過圧密粘土の間隙水圧及び変形の評価，第26回土質工学研究発表会講演集，pp787～790，1991