

(78) 累積ひずみと間隙水圧発生量の関係の応力制御による繰返し三軸試験結果に基づく検討

建設省土木研究所 正会員 松本 秀應

建設省土木研究所 正会員 佐々木 康

建設省土木研究所 正会員 佐谷 祥一

1. まえがき

1964年に発生した新潟地震以後、地盤の液状化現象に関する研究が盛んに行われるようになった。特に、間隙水圧の発生特性や液状化強度に関する研究では、試験の簡便さ等から応力制御による繰返し三軸試験を用いた研究が広く行われてきている。しかし、液状化現象が土のせん断変形に伴う体積変化に起因する現象であること、土の応力～ひずみ関係が土の密度や均束圧の影響を大きく受けることを考慮すると、応力制御による試験を行うよりも、ひずみ制御による試験の方がより直接的かつ精度良く液状化特性を表現できると考えられる。このような背景のもとに、著者らは豊浦標準砂を用いたひずみ制御による繰返し三軸試験を実施し、間隙水圧の発生量と累積ひずみの間に高い相関があることを確認した。今回、このような間隙水圧の発生量と累積ひずみの関係が、土が異なる場合にも常に認められる関係であるのかどうかを検討するために、応力制御による既往の繰返し三軸試験結果を用い、累積ひずみと間隙水圧発生量の関係について整理を行った。

2. 検討に用いた試験データ

検討に用いた試験データの概要は、

表-1 検討に用いたデータの試験条件

表-1に示した通りであり、①標準砂を等方圧密状態から繰返し三軸試験を実施したもの、②標準砂を用い初期せん断応力を作用させた状態から試験を実施したもの、③浅間山砂にカオリン粘土を加え粒度調整を行い正規圧密状態から試験を実施したもの、④同じく浅間山砂にカオリン粘土を加え粒度調整を行い、過圧密及び均束圧の影響を見るために試験を実施したものの4種類に大別される。

これらのデータを用いることにより、細粒分含有率 $F_o = 0 \sim 37\%$ 、相対密度 $D_r = 20 \sim 170\%$ 、均束圧 $\sigma_{30'} = 0.1 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、過圧密比 $OCR = 1 \sim 4$ の試験に対する検討を行うことができる。

試験結果の例を示したものが図-1である。応力制御による繰返し三軸試験のデータをそのまま使用しているため、軸ひずみ ε は大ひずみまで計測 (25%程度) できるよう設定されており、 ε の測定分解能は0.014%程度となっている。

データ名	材料	試験仕様概要			
		細粒分含有率	相対密度	有効拘束圧	過圧密比
CTS000	豊浦砂	0%	40 ~ 80%	0.5 kgf/cm ²	1
CTA000	豊浦砂	5%	50 ~ 80%	1.0 kgf/cm ²	1
ADYN-O	浅間山砂	17~37%	70 ~ 110%	0.5 kgf/cm ²	1
FDYN-O	カオリン粘土				
ADYN00	浅間山砂	5~32%	20 ~ 170%	0.1 kgf/cm ²	1 ~ 4
HDYN00	カオリン粘土			0.5 kgf/cm ²	

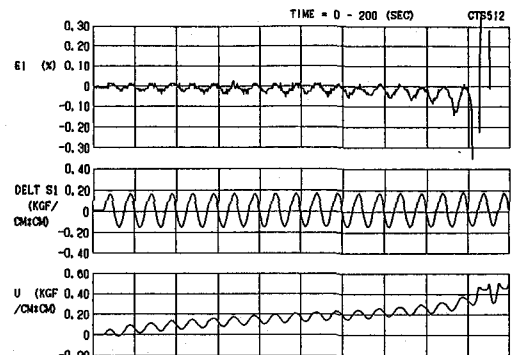


図-1 応力制御による試験結果の例

3. 累積ひずみと間隙水圧比の関係の整理方法

今回の整理においては、時々刻々変化する間隙水圧の発生量を整理するのではなく、図-2に示したポイント5における間隙水圧比 (以後ポイント5における間隙水圧比を U と表す) を用いることとした。ポイント5は、軸差応力 $\Delta\sigma$ が零であり、 $\Delta\sigma$ による有効平均主応力 $\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ の増加、あるいは減少による間隙水圧の変動分が含まれておらず、測定された間隙水圧比の値がそのまま、それま

での繰返し載荷により蓄積された間隙水圧と考えてよい点である。

また、累積ひずみは図-3に示すように各1回の載荷における圧縮時と引張時の軸ひずみの変動分を累積することにより求め、間隙水圧比との関係について整理を行った。

図-4は、標準砂に対するひずみ制御による繰返し三軸試験の結果から図-2ポイント5の説明図 図-3 累積ひずみの説明図 上記のようにして求めた累積ひずみ $\Sigma \varepsilon$ と有効均束圧比 $(1-U)$ の関係を示したものである。これより、相対密度 D_r が50~90%と大きく変化しても $\Sigma \varepsilon$ と $(1-U)$ はほぼ直線関係にあり、良い相関が有ることがわかる。つまり、有効均束圧比 $(1-U)$ と累積ひずみ $\Sigma \varepsilon$ の関係は、式(1)で表される。

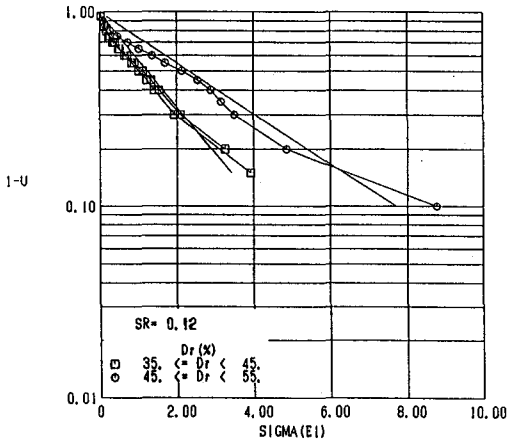
$$\log(1-U) = a \cdot \Sigma \varepsilon \quad (1)$$

式(1)を変形することにより式(2)を得る。

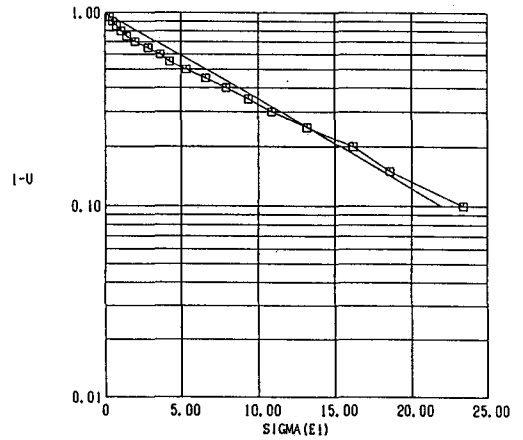
$$U = 1 - A^{\Sigma \varepsilon} \quad (2)$$

ここで $A = 10^a$ である。

累積ひずみと間隙水圧比の関係を、応力制御による繰返し三軸試験の結果に対して求めた例が図-5である。ここでは浅間山砂及び、浅間山砂にカオリン粘土を混ぜた($F_c = 37\%$)供試体に対する結果を示しており、細粒分含有率が大きく異なっても $\Sigma \varepsilon$ と $(1-U)$ はほぼ直線関係にあり、応力制御による繰返し三軸試験の結果から、 $\Sigma \varepsilon$ と U の关系到及ぼす土の違い、圧密条件の違い等に関する検討を行うことが可能であることがわかる。図中には各試験に対して(1)式により、最小自乗法により求めた $\Sigma \varepsilon$ と $(1-U)$ の関係を併記している。以降の整理においては、各試験条件に対する $\Sigma \varepsilon$ と U の関係を表わす指標として、この回帰直線の傾き(1)式の係数 a)を用いて作業を行う。



(a) 浅間山砂



(b) 浅間山砂+カオリン粘土

図-5 応力制御による繰返し三軸試験の整理結果の例

4. 累積ひずみと間隙水圧の関係

累積ひずみと間隙水圧比の関係を(1)式により近似し、係数 a に与える試験時応力比 SR 、相対密度 D_r 、細粒分含有率 F_c 、初期せん断力 τ_s 、過圧密比 OCR の影響について整理を行った結果の例が、それぞれ図-6～10である。図-6および図-7に示した係数 a に与える SR 及び D_r の影響については、 D_r あるいは SR がほぼ等しいデータが各条件に対して数点しかないため、明確な傾向を見いだすことはできなかった。

図-8は、係数 a に与える F_c の影響を見るために浅間山砂にカオリン粘土を混入し粒度調整を行った試料を用い、圧密圧力を 0.5kgf/cm^2 とし、等方圧密からの繰返し三軸試験に対する結果を整理したものである。これらの供試体は、圧密土槽内において試料を水中沈降させ堆積させた後、同じ条件で圧密させており同一の堆積条件に対する土と考えてよい供試体である。そのため、細粒分含有量が異なる供試体同士を比較した場合、相対密度は等しくはない。図-8から、細粒分含有率 F_c が増加すると係数 a の絶対値は小さくなり間隙水圧が発生しにくくなる傾向を示し、 F_c が50%程度増加すると a の値が $1/10$ になることがわかる。

図-9は、係数 a に与える初期せん断力 τ_s の影響を見るために豊浦標準砂を用い圧密圧力を 1.0kgf/cm^2 とし、軸力を増加させることにより初期せん断力 τ_s を作用させた状態から繰返し三軸試験を実施した結果を整理したものである。全体として、 τ_s の増加とともに係数 a の値が小さくなる傾向を示しているが、バラツキが大きく有為な関係をみいだすことはできない。

図-10は、係数 a に与える過圧密比 OCR の影響を見るために浅間山砂にカオリン粘土を混ぜ、細粒分含有率 F_c を32%に調整した供試体を試験時の圧密圧力を 0.5kgf/cm^2 とし、 OCR を1, 2, 4と変化させ、等方圧密からの繰返し三軸試験を実施した結果を整理したものである。なお、ここでは過圧密に伴う相対密度の増加が最大で8%程度であったため、相対密度別にデータを分類することはせず、全てのデータを用いて整理を行なっている。図-10より、過圧密比の増加につれ係数 a の値が小さくなり間隙水圧が発生しにくくなる傾向を示し、 OCR が5程度となると a の値が $1/10$ になることがわかる。

5. 重回帰分析による係数 a に与える諸要因の検討

以上の整理結果より、係数 a には F_c や OCR 等が大き

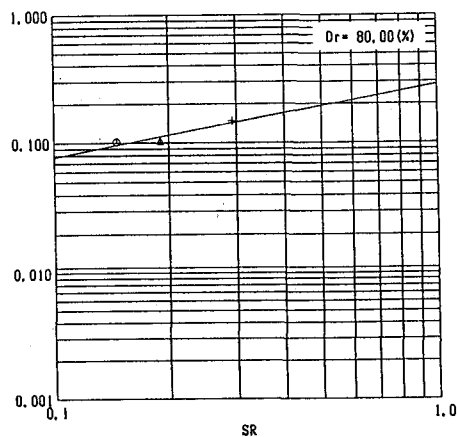


図-6 係数 $a \sim SR$ 関係

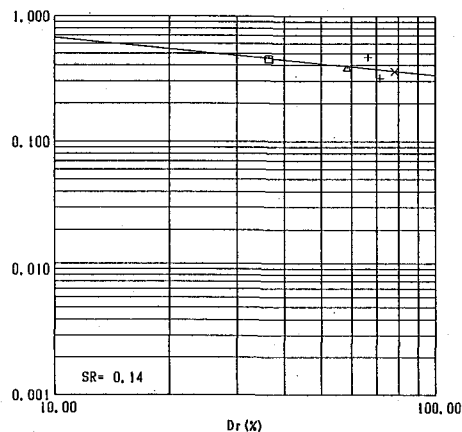


図-7 係数 $a \sim D_r$ 関係

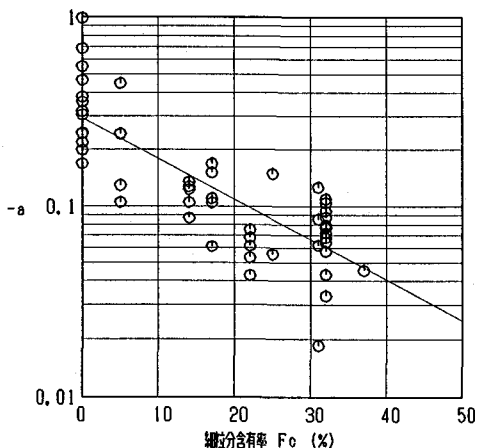


図-8 係数 $a \sim F_c$ 関係

く影響を与えることがわかった。そこで、これらの要因を取り込んだ重回帰分析により係数 a の推定式を求めてみる。回帰に用いた式形の基本は、式 (3) である。

しかし、今回の整理に用いたデータは、2. の項で述べたように、OCR の検討には F_c の大きな供試体に対する試験だけが、また、 τ_s の検討には標準砂に対する試験しか含まれていないため、全てのデータの諸条件が独立であるとして、(3) 式に含まれる全ての説明変数を用い全データを回帰の対象とすることはできない。そこで、 τ_s を受けていない等方圧密に対する試験データのみを用いて回帰を行なった結果が式 (4) であり、 τ_s を受けた標準砂に対する試験データのみを用いて回帰を行なった結果が式 (5) である。

$$-a = A \cdot (D_r)^{B1} \cdot (F_c + 1)^{B2} \cdot (\sigma_c')^{B3} \cdot (OCR)^{B4} \cdot (\tau_s)^{B5} \cdot (SR)^{B6} \quad (3)$$

$$-a = 4.54 \cdot (F_c + 1)^{-0.445} \cdot (\sigma_c')^{0.102} \cdot (OCR)^{-0.748} \cdot (SR)^{-0.292} \quad (4)$$

$$-a = 26.4 \cdot (D_r)^{-1.349} \cdot (\sigma_c')^{0.882} \cdot (\tau_s)^{-0.443} \cdot (SR)^{0.501} \quad (5)$$

係数 a や各説明変数の間の偏相関係数をまとめたものが表-2 である。これより、式 (4) においては F_c 、OCR が係数 a との相関が高く、 σ_c' 、SR との相関が低いことがわかる。また、式 (5) においても SR との相関が低いことがわかる。

6. まとめ

種々の土、種々の圧密条件に対する試験においても、間隙水圧の発生量と累積ひずみの相関は高く、応力比 SR にとらわれることなく、式 (1) の様な簡単な式で両者を関係づけることができることが明かとなった。また、式 (1) 中の係数 a の値が、 F_c や OCR の増加につれ小さくなることも確認された。

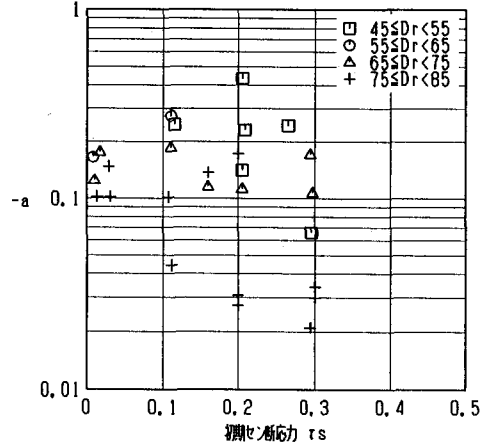


図-9 係数 a ~ 関係 τ_s

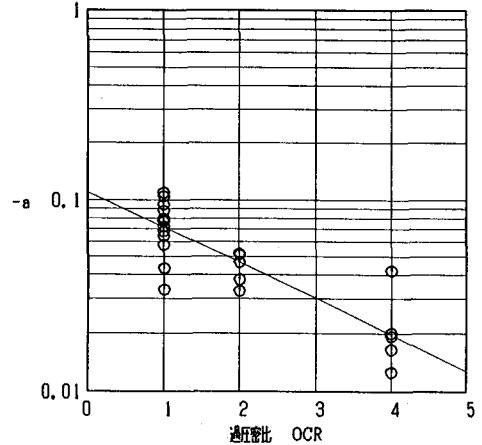


図-10 係数 a ~ OCR 関係

表-2 重回帰分析より得られた偏相関係数

(a) 式 (4) の場合

偏相関	$F_c + 1$	σ_c'	OCR	SR	$-a$
$F_c + 1$	-1.000	0.086	-0.334	0.197	-0.733
σ_c'	0.086	-1.000	0.034	0.057	0.104
OCR	-0.334	0.034	-1.000	0.482	-0.426
SR	0.197	0.057	0.482	-1.000	-0.134
$-a$	-0.733	0.104	-0.426	-0.134	-1.000

(b) 式 (5) の場合

偏相関	D_r	σ_c'	τ_s	SR	$-a$
D_r	-1.000	0.854	-0.705	0.553	-0.367
σ_c'	0.854	-1.000	0.725	-0.406	0.415
τ_s	-0.705	0.725	-1.000	0.741	-0.543
SR	0.553	-0.406	0.741	-1.000	0.156
$-a$	-0.367	0.415	-0.543	0.156	-1.000

参考文献

- 1) 佐々木, 松本, 佐谷: ひずみ制御による液状化試験, 第23回土質工学研究発表会, 1989. 6
- 2) 佐々木, 松本, 佐谷: ひずみ制御による繰返し三軸試験に基づく間隙水圧発生 の検討, 第20回地震工学研究発表会, 1989. 7
- 3) 建設省土木研究所: 振動代実験に置ける水平砂地盤の間隙水圧発生特性の検討, 土木研究所資料第2715号, 1989. 2