

III-A 85

初期せん断を受けた低塑性粘性土の間隙水圧と残留変形のモデル化

東京工業大学 学生会員 ○王桂宣, 正会員 桑野二郎  
正会員 神田政幸, 正会員 竹村次朗

1. まえがき：従来の等価粘弾性モデルの計算で不規則波を等価な正弦波に置き換える際、等価ひずみ振幅の決定など色々難しい点がある。一方、エネルギーは累積可能であり、損失エネルギーが土の物性とも密接な関係を持つため、規則波と不規則波を同様に扱うことが可能になるものと思われる。すでに著者らは累積損失エネルギーにより等価粘弾性モデルの諸量を表すことについて若干の検討を行っている<sup>1), 2)</sup>。本論文では初期せん断を与えた低塑性粘性土の繰返しせん断試験結果に基づいて、間隙水圧と残留変形の変化を累積損失エネルギーで表現するモデルについて検討した。

2. 試料ならびに実験方法：試験に用いた試料は塑性指数が約30の川崎粘土に豊浦標準砂及びその砕砂を混ぜて人工的に作製した塑性指数が約2の低塑性粘性土(M2と称する)である。実験では直径が5.0cm、高さが12.5cmの凍結試料を三軸室内で解凍後、鉛直圧力392kPaと一定とし、側方圧力を169~392kPaと種々変化させて異方圧密し、初期せん断応力比=0.0, 0.14, 0.30, 0.50, 0.92の5種類の供試体を作製し、周波数1Hzで応力振幅を変えて非排水繰返しせん断試験を行った。

3. 損失エネルギー：完全な弾性体では対称な繰返し荷重を受けると累積して貯えられるエネルギーはゼロであるが、土は弾性体ではなく粘弾性的材料であるため、繰返し荷重を受けると、エネルギーの一部は回復するが、一部はその中に吸収され消費される。その損失エネルギーは初期せん断成分  $w_a$  と等方応力に繰返し応力を加えた成分  $w_b$  に分けられる<sup>2)</sup>。 $w_a$  と  $w_b$  は次の式で計算できる。ここで  $\epsilon_a$  : 軸ひずみ,  $\epsilon_v$  : 体積ひずみ (=0),  $\epsilon_d = 2/3 \cdot (\epsilon_s - \epsilon_r) = \epsilon_s$ ,  $\epsilon_{res}$  : 残留偏差ひずみ。

$$w_a = \int (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot d\epsilon_s = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \epsilon_{res} \quad (1)$$

$$w_b = \int \left[ (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3 \cdot d\epsilon_v + (\sigma_1 - \sigma_3)_d \cdot d\epsilon_d \right] = \int \sigma_d \cdot d\epsilon_d \quad (2)$$

初期せん断によって生じる残留変形と過剰間隙水圧はそれぞれ  $w_a$  と  $w_b$  に関係すると推察される。

4. 実験結果：累積損失エネルギーの増加につれて過剰間隙水圧が徐々に増えるが、過剰間隙水圧の生じ方は初期せん断応力により異なるため、各初期条件より求まる最大過剰間隙水圧  $\Delta u_f$  で正規化した過剰間隙水圧比について結果の例をFig. 1に示す。Fig. 1は初期せん断応力を受けた供試体の過剰間隙水圧比と累積損失エネルギーとの関係であるが、各初期条件は繰返し軸応力振幅のみ異なる。Fig. 1に示したように初期せん断応力の大きさや繰返しせん断応力振幅によらずほぼ一つの曲線となる。また主として残留ひずみに影響する要因として初期せん断応力と過剰間隙水圧が挙げられるが、この初期せん断応力と過剰間隙水圧の影響を有効せん断応力比  $q_0 / p' = q_0 / (p_0' - \Delta u)$  というパラメータで表現する。過剰間隙水圧の上昇に伴い、この有効せん断応力比はだんだん大きくなる。このパラメータを横軸とし、残留ひずみを縦軸として、代表的な初期せん断応力に対する結果をFigs. 2~3に示す。初期せん断応力が異なるため、初めに残留ひずみを生ずるせん断応力比は異なる。初期せん断応力を越えると、残留ひずみが生じるが、あるせん断応力比に達すると、残留ひずみが非常に大きくなり破壊状態に達する。Figs. 2~3に示すように、初期せん断応力が同一ならば、いづれも応力振幅によらずほぼ一本の曲線となっている。

5. 過剰間隙水圧と残留ひずみに関するモデル：過剰間隙水圧比  $\Delta u / \Delta u_f$  と累積損失エネルギー  $w_b$  の関係は実験条件によらずFig. 1に示したようになる。得られた曲線の形はほぼ双曲線型とみなせ式(3)のように表わされる。累積損失エネルギー  $w_b$  を横軸に、累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の比  $w_b / (\Delta u / \Delta u_f)$  を

表1. パラメータ  $c, d$

$q_0 / p'$	0.14	0.30	0.50	0.92
$c$	2.45	2.51	2.53	2.5
$d$	0.75	1.04	1.54	3.65

縦軸に取ればFig. 4に示すように直線となる。直線の切片と勾配がそれぞれ  $a$  と  $b$  となる。またFigs. 2～3に示したように各曲線は初めに残留ひずみを生じるせん断応力比は異なるものの、いずれも式(4)のような双曲線により近似できる。 $\Delta u$ の増加に伴い  $p'$ が減少することにより、せん断応力比  $q_0/p_0'$ が増加し、それとともに残留ひずみが増大する。残留ひずみ  $\epsilon_{qres}$ を横軸に、 $\epsilon_{qres}/(q_0/p' - q_0/p_0')$ を縦軸にとると、Fig. 5～6に示したように直線となり、切片と勾配がそれぞれ  $c$  と  $d$  となる。 $c$  と  $d$  の値を表1に示す。 $c$ は約2.5とほぼ一定であるが、 $d$ と初期せん断応力比  $q_0/p_0'$ の関係はFig. 7のようになり、式(5)で表わされる。M2に対しては  $k=3.26$ ,  $m=0.822$ となった。

$$\frac{\Delta u}{\Delta u_f} = \frac{w_b}{a + b \cdot w_b} \quad (3)$$

$$\epsilon_{qres} = \frac{c \cdot (q_0/p' - q_0/p_0')}{1 - d \cdot (q_0/p' - q_0/p_0')} \quad (4)$$

$$d = k \cdot (q_0/p_0')^m \quad (5)$$

6. 結論：低塑性粘性土M2に関し、過剰間隙水圧比は初期せん断応力や繰り返しせん断応力振幅の大きさによらず、累積損失エネルギーとよく対応している。一方残留ひずみは有効せん断応力比とよく対応する。初期せん断応力の大きさにより、残留ひずみを生じ始めるせん断応力比は異なるが、どのケースでも曲線の形状は似ており、双曲線モデルで近似できる。

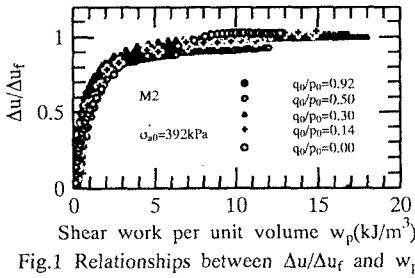


Fig.1 Relationships between  $\Delta u/\Delta u_f$  and  $w_p$

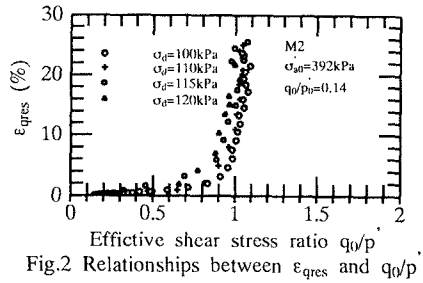


Fig.2 Relationships between  $\epsilon_{qres}$  and  $q_0/p$

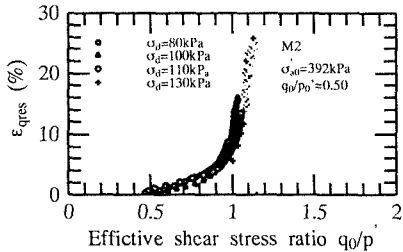


Fig.3 Relationships between  $\epsilon_{qres}$  and  $q_0/p'$

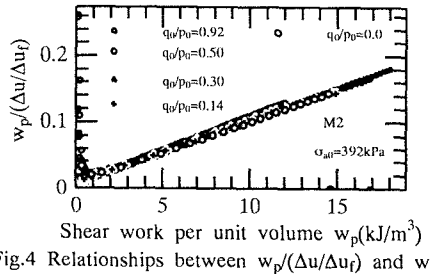


Fig.4 Relationships between  $w_p/(\Delta u/\Delta u_f)$  and  $w_p$

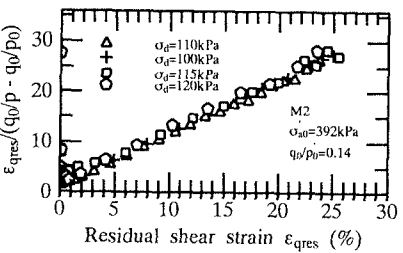


Fig.5 Relationships between  $\epsilon_{qres}/(q_0/p' - q_0/p_0')$  and  $\epsilon_{qres}$

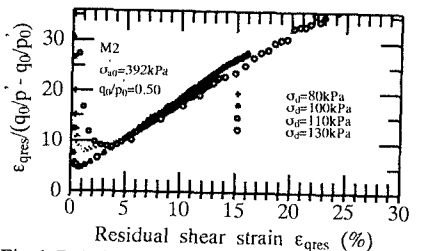


Fig.6 Relationships between  $\epsilon_{qres}/(q_0/p' - q_0/p_0')$  and  $\epsilon_{qres}$

7：参考文献：1)王ら：繰り返し荷重を受ける低塑性粘性土の損失エネルギー特性，第9回日本地震工学シンポジウム，pp. 817-822, 1994. 2)王ら：初期せん断を受けた低塑性粘性土の非排水繰り返しせん断挙動，第31回地盤工学研究発表論文集，1996.（投稿中）

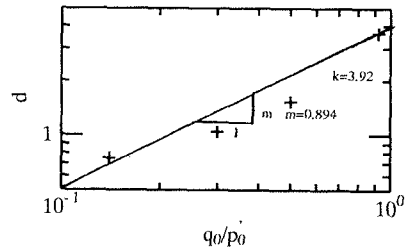


Fig.7 Relationship between  $d$  and  $q_0/p_0'$