

北海道大学工学部 正員 三浦 清一
 北海道大学工学部 正員 土岐 祥介
 電源開発土木設計部 正員 ○佐藤 卓夫

〔まえがき〕 筆者らは原位置における砂地盤の応力へひずみ関係や液状化特性を推定するための基礎的研究として、飽和砂の変形・強度特性におよぼす応力(ひずみ)履歴の影響に関する実験結果を報告している^{1),2),3)}。本文はそれらの結果および新たに行なった他の応力経路の実験事実に基づき、砂の降伏関数、塑性ボテンシャル、硬化関数について考察し、応力履歴を有する飽和砂のダイレイタンシー特性を弾塑性論の立場から解明するうえでの適用性や問題点について論じたものである。

〔試料および実験方法〕 実験に用いた試料は豊浦標準砂($G_s=2.65$, $\epsilon_{max}=0.988$ ⁵⁾, $\epsilon_{min}=0.622$ ⁵⁾)で、あらかじめ数時間煮沸したのち、メンブレンを装着したモールド内に水中で流し込み、適宜モールド側面を叩くことにより圧密完了後に所定の相対密度 D_r (そのバラツキは最大±3%)が得られるようにした。等方および異方圧密完了時の有効平均主応力 σ'_v はすべて2.0 kg/cm²として、表-1に示すせん断試験を実施した。

また、側圧の変化を伴う試験では、メンブレン貫入補正を行なっている³⁾。以下の議論において、その都度説明を加えない記号は前報²⁾のそれと同一である。

〔応力へひずみ関係の予測〕 ここでは種々の応力履歴を有する飽和砂の変形特性の予測を弾塑性論に基づいて考察するが、これに先立って降伏関数 f 、塑性ボテンシャル ψ および硬化関数 g の適切な表現式が必要である。一般にある応力増分 $d\sigma_{ij}$ によるひずみ増分 $d\epsilon_{ij}$ は、 $d\epsilon_{ij} = (d\epsilon_{ij}^e) + (d\epsilon_{ij}^p) + (d\epsilon_{ij}^h) \dots \dots (1)$ ($i, j = 1, 2, 3$) 塑性論によれば⁶⁾塑性ひずみ増分 $(d\epsilon_{ij}^p)$ は、 $(d\epsilon_{ij}^p) = h \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \cdot d\sigma_{ij} \dots \dots (2)$ ($h, l = 1, 2, 3$) で示され、砂に関する ϕ , h , l の情報が必要となる。一方、(1)式において等方応力成分すなわち σ' の変化によるひずみ増分 $(=d\epsilon_v)$ は、等方圧密・膨張試験(図-1参)より明らかのように、その塑性成分を無視できない。従ってここでは、弾性成分および供試体内の局所的すべり現象に起因すると思われる塑性成分を図-1の結果(面対数紙上で直線関係)に基づいて、せん断成分とは別個に評価する。

砂の降伏条件に関しては、Poorooshap⁷⁾, Tatsuoka⁸⁾, Lade⁹⁾などの多くの研究があるが、いづれも P' の増加に対し σ' も増加するとするもので、形狀的には類似している。そこでここでは、(3)式のような簡単な形で f を表現できると見做した。 $\phi = \frac{q}{P'} + m \ln P' \dots \dots (4)$ ただし m は($d\epsilon_v$) σ' =0の点における($\frac{q}{P'}$)値で、本研究で用いた砂では $m=1.15$ (圧縮側), $m=-0.82$ (伸張側)である。この ϕ と塑性ひずみ増分比方向は、ほとんど直交することを確認している³⁾。次に(2)式に(3), (4)式を代入すると、平均主応力一定圧縮試験に対して硬化関数 g を次式のように決定できる。 $h = -\frac{q}{2} P' d\phi / (\sigma' l - m) d\sigma' \dots \dots (5)$

Consolidation condition	Shearing condition	Notation
1 Consol. and Swell. (Iso.)	CIRI	
2 Iso. $\sigma'_r = \text{const.}$	Comp. Ext. CIMCL CIPED	
3 Iso. $P' = \text{const.}$	Comp. Ext. CIPCD CIPED	
4 Iso. $\sigma'_r = \text{const.} (Ext. \rightarrow Comp.)$	(Comp. → Ext.) CISLL CISCD	
5 Aniso. $\sigma'_r = \text{const.}$	Comp. Ext. CKMCD CKMED	
6 Aniso. $\sigma'_r = \text{const.} (Ext. \rightarrow Comp.)$	(Comp. → Ext.) CKSEL CKSCL	

Table 1

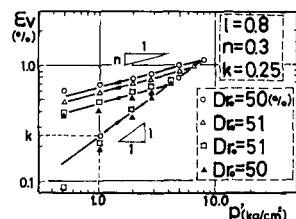


Fig. 1

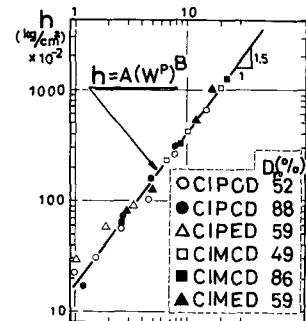


Fig. 2

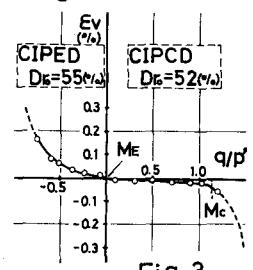


Fig. 3

$\dot{h} = 3 P' d\dot{P}' / dt \dots (6)$ 一方 Frydman¹⁰⁾は、塑性変形の進み具合を表わす硬化パラメータを塑性ひずみ仕事 W^p の関数と見做し、(7)式の関係を得ている。 $\dot{h} = A(W^p)^B \dots (7)$ ただし、 $W^p = \int_0^{q/p} P m dt$ である。本研究の P' 一定経路に対する \dot{h} ～ W^p 関係は(7)式をほぼ満足している(図-2 参)。しかし、他の応力経路に対して(7)式を適用する際には、変数として応力と塑性ひずみ仕事があるため積分が極めて困難である。そこで筆者らは、議論の複雑さを避けるために(7)式は応力経路に依存しないとし、さらに W^p は応力のみの函数で表わしうるものと仮定した。積分を実行するに当って、 $d\dot{P}'$ 成分による降伏開始点 ($M = q_p$) を定める必要がある。図-3 に示す平均主応力一定試験において、圧縮側では $M_c (M_c = 1.15)$ で、伸張側ではせん断開始時 $M_d (M_d = 0)$ よりダイレイターンシーが急増するという異方的挙動を呈している。このような挙動は、供試体の初期構造の異方性によると思われるが、適切な K を設定するには、圧縮側、伸張側でそれぞれ別個の、つまり異方硬化法則を適用する必要がある。図-2 には上述の仮定から求めた他の応力経路の \dot{h} ～ W^p 関係をプロットしてあるが、 D_0 によらずほぼ(7)式を満足していることがわかる。 $(A=15, B=1.5)$

以上の考察から、せん断時に発生する $d\dot{P}'$, $d\dot{P}^p$ は次式のように誘導できる。

$$d\dot{P}' = -\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{P'} \left\{ \left(\frac{3P'}{G^p} \right)^{\frac{1}{B}} + \frac{2}{3} m A^{\frac{1}{B}} (1-B) \cdot (q_p - M) \right\} \frac{1}{T^B} \cdot (q_p - m) d(q_p) \dots (8)$$

$$d\dot{P}^p = \frac{1}{3P'} \left\{ \left(\frac{3P'}{G^p} \right)^{\frac{1}{B}} + \frac{2}{3} m A^{\frac{1}{B}} (1-B) \cdot (q_p - M) \right\} \frac{1}{T^B} \cdot d(q_p) \dots (9)$$

ここで G^p はひずみ硬化開始時における $d(q_p)/d\dot{P}'$ である。また、(1)式における弾性ひずみの評価法は前報で示した通り³⁾である。

[予測値と実測値の比較] 上記の弾塑性理論に基づいた考察から得られる予測値と実測値の対比を種々のせん断試験($R=52\%$)について、代表的に図-4～7 に示す。図-4, 5 は、それぞれ $K=1$ 圧密後および $K=1$ 圧密後の圧縮試験($P'=1$ 一定)で比較したものである。 \dot{P}' と \dot{E}_V 関係は、 \dot{P}' ～ \dot{P}^p のそれに比べて非常に良く一致している。 \dot{P}' は特にせん断初期で多少過小評価している傾向にあるが、これは降伏条件を体積ひずみの面からとらえたことによるものと見られる。降伏条件の吟味は、今後の検討課題である。図-6, 7 においても上述の一貫性は認められるものの、 $K=0.4$ や $R=0.7$ の場合には、予測値と実測値には大巾な差異がみられる。この相違をもたらす要因は逆方向(圧縮側)の伸張側で受けたせん断履歴であって、それらの履歴過程で受けた最大応力比(q_p)やひずみ(せん断ひずみ \dot{P}')に着目すると、 $K=0.4$ の場合は $1.0, 1.2\%$ で、 $R=0.7$ では $0.63, 1.15\%$ である。また予測値との対応が良い図-5 の $K=2.5$ の場合は、 $(q_p) = 0.75, 1.0, 0.97$ で、伸張側で導入された応力の大きさは $R=0.7$ のものに比べて大きいことになる。これは、履歴の影響を応力の大きさで評価するのは適当でないことを示している。図-8 に示すように、 $R=0.7$ の応力履歴過程(\overline{Oabc})で生じたのは、 $K=2.5$ の \overline{Obc} で生じるのに比べて大きいという事実から、そのせん断履歴経路の相違による相の違いに注目すべきである。ゆるづめ試料では、逆方向の $|K|$ が 1% 以下であればダイレイターンシー特性に影響を与えないとした前報³⁾の結果を考慮すると、上述の予測式は $|K| < 1\%$ 以下で適用可能である。今後は、せん断ひずみ履歴の効果をどのように取入れるかが研究課題である。最後に、本研究に御教示頂いた北郷繁教授および実験に多大の協力を得た佐々木君に謝意を表する。

文)リュウ三郎編著:「材料力学」(1983) 第3章地盤力学、(監修:野村義典、著者:川内利一)岩谷社
2)第4回地盤力学研究会(1979) 岩谷社
3)第4回地盤力学研究会(1979) 岩谷社
4)第4回地盤力学研究会(1979) 岩谷社
5)第4回地盤力学研究会(1979) 岩谷社
6)Hill: Oxford Univ. Press, '50. 8) Tatsuoka et al.: Soil Mech. Found., '74
7) Fung: Geol. Soc. Amer. Bull., '53
8) Fung: Geol. Soc. Amer. Bull., '53
9) Fung: Geol. Soc. Amer. Bull., '53
10) Fung: Geol. Soc. Amer. Bull., '53

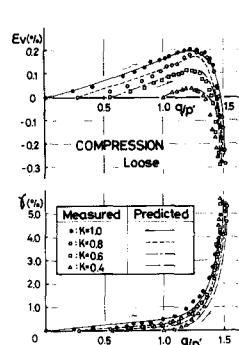


Fig. 4

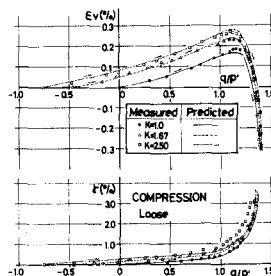


Fig. 5

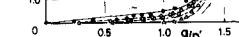


Fig. 6

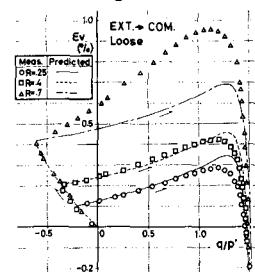


Fig. 7

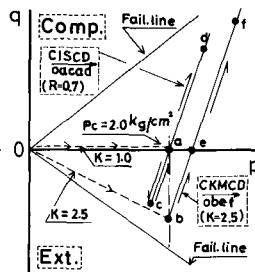


Fig. 8