

砂のせん断時におけるエネルギー式について

神戸大学大学院 学生員 石田 一郎

神戸大学工学部の学生員 奥井 哲士郎

同上 正員 軽部 大蔵

予えがき 変位の拘束を受けぬ砂のせん断特性を調べることは、砂質土の建設問題の解析に有用である。筆者等は、飽和砂の排水(C.D.)及び非排水(C.U.)で三軸圧縮試験を行い、エネルギーの釣合に着目して解析を試みる。

1. 試料 真空ポンプを用いて飽和させた豊浦標準砂(土粒子比重;2.65 均等係数;1.50)及び海砂(G_s ;2.63 U_c ;2.17)を使用した。

2. 実験方法 直径3.50cm, 高さ7.50cmの内径供試体を用い、圧密圧力(0.5, 0.75, 1.0 kg/cm²)で圧密後、側圧一定でヒズミ制御法(0.35 mm/min)によりC.D., C.U.試験を行い、 k 。又、補足的に等方圧密試験を行い、解析の補助とした。尚、排水条件の異なる試験を行うため、計器を水銀メノメーターを用いて、厳密に検定した。

3. 解析の前提 解析に先立ち、「membrane misfit」の補正を施した。Fig. 1の $\delta/p - \epsilon_1$, v (体積ヒズミ) - ϵ_1 及び u (間けき水圧) - ϵ_1 の代表的な関係を示したが、排水と非排水の強度に差があるのが明らかである。解析はこの図の関係をもとにして行われた。

エネルギー式は一般に、「供給エネルギー δE 」が「内部消散エネルギー δW 」と「蓄積エネルギー δU 」の和に等しいことから得られる。この関係は排水条件によらず成立するので、排水条件の異なるせん断試験結果の比較に用いられる。内部仕事の表現方法は研究者によって異なっているので、ここではRowe系とRoscoe系に大別し、解析した。その際、応力パラメータ及びヒズミパラメータは、各々について両者の考え方に従うものとした。(文献1,2)

内部摩擦角及び間けき比は、一括してTable 1.に示した。

4. Roweの解析法 Roweは「stress-dilatancy式」を導いて、塑性成分(以下で表わす)について、せん断時のエネルギー成分を考えた。「stress-dilatancy式」、即ち、

$$\tan^2(\phi_s/2 + 45) = (\sigma_1/\sigma_3) / (1 - \delta\sigma/\delta\epsilon_1) = K_p \quad (1)$$

における $\delta\sigma$ を供試体の摩擦角を ϕ_s と、「主応力差 $\delta\sigma$ 」のなす仕事($\delta W_r = \delta\sigma \delta\epsilon_1$)を次の成分に分ける。

膨張が生じる時の全吸収エネルギー $\delta W_{t,t}$ は式(2)で与えられる。

$$\delta W_{t,t} = \sigma_3 \delta\epsilon_1 (1 - \delta\sigma/\delta\epsilon_1) (K_p - 1) \quad (2)$$

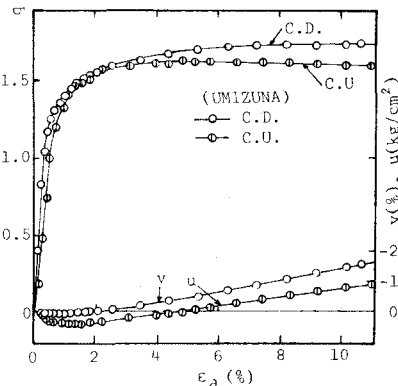
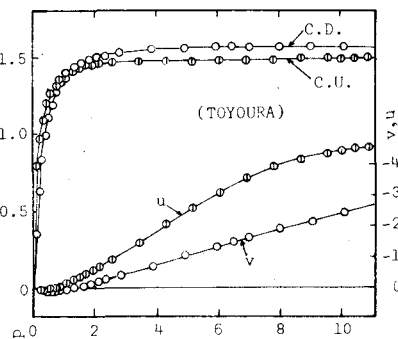


Fig. 1

従、2. 1)「膨張を除いたすべり」に吸収されるエネルギー $-S(W_{e,1})$ 2)「膨張による摩擦」に吸収されるエネルギー $-S(W_{e,2})$ 3)「膨張による外部に対する仕事 $S(W_{e,3})$ 」は、各々、次式で表わされる。

$$S(W_{e,1}) = \sigma_s \{ \sigma_{e1} / (K_p - 1) \} \quad (3)$$

$$S(W_{e,2}) = \sigma_s \{ \sigma_{e1} (1 - \sigma_{e2} / \sigma_{e1}) \} (K_p - 1) \quad (4)$$

$$S(W_{e,3}) = \sigma_s \{ \sigma_{e1} (1 - \sigma_{e2} / \sigma_{e1}) \} \quad (5)$$

次に非排水状態を考えると、(1)式より排水状態と限界状態の区別が得られない。非排水状態では外部的に $\sigma_3 = 0$ ではあるが、すべりによる体積変化が内部で発生しており、その体積変化を相殺する様子の「平均有効主応力 σ_p の仕事」が存在すると仮定し、限界状態と区別してみよう。非排水の体積変化に対応するものとして $C \cdot (\sigma_p - \sigma_u) = C \cdot \sigma_p = \sigma_s \sigma_{e1}$ とおき、「stress-dilatancy式」を拡張すると次式を得る。

$$\tan^2(\phi/2 + 45^\circ) = (\sigma_1 / \sigma_3) / [1 - \sigma_s \sigma_{e1} / \sigma_{e1} \sigma_3] = (K_p \sigma_{e1} / \sigma_3) \quad (1')$$

$$S(W_{e,1}) = \sigma_s \{ \sigma_{e1} (1 - \sigma_s \sigma_{e1} / \sigma_{e1} \sigma_3) \} (K_p \sigma_{e1} / \sigma_3 - 1) \quad (2')$$

$$S(W_{e,2}) = \sigma_s \{ \sigma_{e1} (1 - \sigma_s \sigma_{e1} / \sigma_{e1} \sigma_3) \} \quad (3')$$

係数 C について、 σ_p による体積変化増分が圧密に相当すると考え、等方圧密曲線の勾配を用いると、計算結果はFig 2. となり、結局得られた内部摩擦角(C.D.C.U.をそれぞれ ϕ_c , ϕ_u と表わす)はTable 1.の様になる。エネルギー成分が排水条件とは無関係にある程度一致することから、非排水状態に σ_{e1} を導入することの有効性が示唆される。 $S(W_{e,1})$ は良く一致するが、 ϕ_c 及び $S(W_{e,2})$ が一致しないという点に、圧密に何らかの影響因子を重ね合わせる必要性を示すものであると考え得る。

以上の結果より、「dilatancy」が非排水状態のすべりにも存在すると考えることになり、2. Roweの解析が拡張され得ると推察される。

5. Roscoeの解析法 Roscoeのエネルギー式は次式で表わされる。

$$M \sigma_e + p \sigma_u = M p \sigma_e + p \sigma_u \quad (6)$$

ここに、 M は限界状態における σ_1 / p であり、 $\sigma_e = (2/3) \cdot (\sigma_{e1} - \sigma_{e3}) = (2/3) \sigma_{e1}$ である。C.D.試験の結果から、等方圧密より推定した σ_{e1} を用いて、(6)式より M を求める。 M は一般に $M = \sin \alpha / (3 - \sin \alpha)$ と示されるから、これより α を求めるとTable 1.の結果を得る。理論の本質的な相違にもかかわらず α はほぼ一致する。

Table 1

C. D. - Test						
TOYOURA 海砂	σ_3 / ϕ	e_f	ϕ_d	ϕ_f	ϕ_{cv}	
	0.5	0.721	42.68	32.08	31.26	
	0.75	0.726	38.40	28.19	28.02	
	1.0	0.735	41.10	29.16	28.62	
海砂	σ_3 / ϕ	e_0	ϕ'	ϕ'_f	ϕ'_{cv}	
	0.5	0.763	39.84	32.31	(30.05)	(32.06)
	0.75	0.737	36.73	32.37	(34.98)	(32.18)
	1.0	0.725	37.79	31.58	(34.22)	(31.49)
海砂	1.0	0.631	39.76	36.87	(37.28)	(36.09)

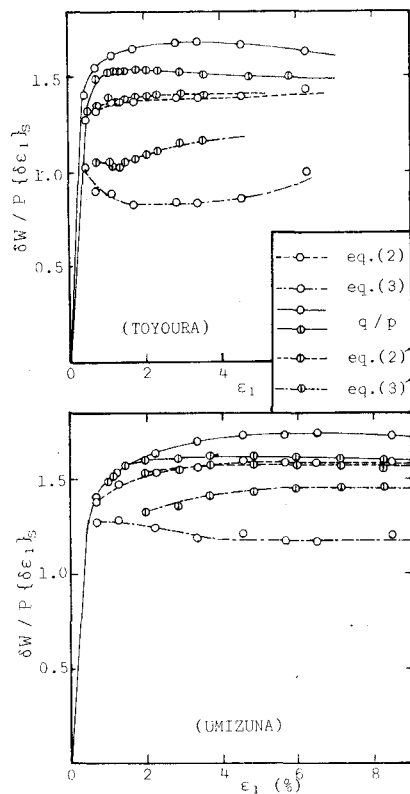


Fig. 2

次に非排水状態について考えると、(6)式によれば、

$$\delta E_i = M p' \delta E_i + p' \delta v_i e \quad (7)$$

となり、非排水状態において弾性エネルギーの蓄積がなされることになる。(7)式に従って、今、体積比ミの弾性成分が p' より生じるとすると、 $\delta v_i e = \alpha \cdot \delta p'$ で表わされ、(7)式は次の様く書き換えられる。

$$\delta E_i = M p' \delta E_i + \alpha \delta p' p' \quad (8)$$

α を等方圧密時の膨潤曲線の勾配にすると、Fig. 3. の結果を得る。排水時の M より大きい結果となっているが、この事は、膨潤時のエネルギー消費以外に要因のあることを示すものであろう。

今一つの考え方として、等体積せん断が非排水せん断と同様の結果を与えよことから、非排水状態では、

$$\delta W = M p' \delta E_i \text{ の他、} \quad \text{「見掛け上等体積を保つための} p' \text{」}$$

の仕事」が加わると考えることがあてられる。そこで、(7)式の右辺に「見掛け上等体積比ミ」 $\alpha \delta p' = \delta v_i e$ に対する仕事($p' \delta v_i e$)を加えると、

$$\begin{aligned} \delta E_i &= M p' \delta E_i + p' \delta v_i e + p' \delta v_i e \\ &= M p' \delta E_i + \{ \delta v_i e \} + \{ \delta v_i e \} \cdot p' \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

そこで、 $\{ \delta v_i e \} + \{ \delta v_i e \} \cdot p' = C \cdot \delta p'$ で表わして、近似的に等方圧密曲線から求めて計算した。結果をFig. 3. Table 1. に示した。この場合の摩擦角を ϕ_0 で表わすと、Roweの ϕ_0 はほぼ等しい結果を得た。

排水状態と非排水状態の M の相違を考えるに当り、一般に排水試験から得られる摩擦角 ϕ はBishopの補正(膨張によって外部に生じた仕事のための補正)を加えると、 ϕ が一様になるとされているが、これを前提として上述の計算を行うと、排水時の M に極めて近い値が得られた。

6. 結 論 微視的な立場に立つ場合の理論の本質的な相違に加え、応力パラメータと比ミパラメータの相違が、RoweとRoweを隔てている。しかし、非排水条件に、

① 弾性成分の蓄積 或は、② 見掛けの体積比ミに対する仕事 を導入するに依り、試験結果は排水条件による系統的な解析し得る可能性を持っている。

参考文献

1. Rowe (1963) "A theoretical and experimental study of strains in triaxial compression tests on normally consolidated clays." Géotechnique Vol. 13, No. 1.
2. Rowe (1964) "Energy components during the triaxial cell and direct shear tests." Géotechnique Vol. 14, No. 3.

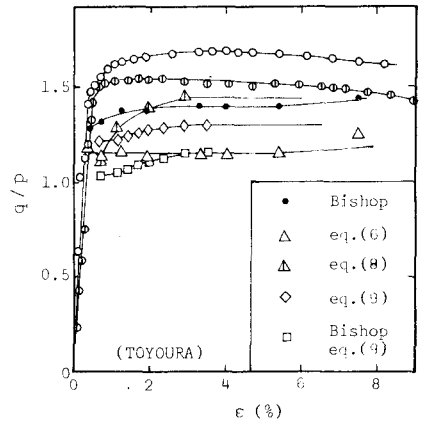


Fig. 3