

玉野総合コンサルタント(元・名工大学部生) ○正員 堀井 学
 名古屋工業大学 正員 中井 照夫
 名工建設(元・名工大学部生) 正員 藤原 和徳

Table 1
土質パラメータ

C_t	0.84%
C_e	0.60%
m	0.3
R_f	4.7
D_f	-0.60
α	0.85

現在までに、力学量 t_{ij} を導入することにより3次元応力下の土の力学挙動を同一パラメータで表わせ、また土の塑性ひずみ増分を等方的な圧縮成分 $d\epsilon_{ij}^{(IC)}$ と t_{ij} 空間で関連流動則を満足する成分 $d\epsilon_{ij}^{(AF)}$ に分けることによりひずみ増分方向の応力経路依存性が表わせる砂の弾塑性構成式(t_{ij} -sand model)を提案している。ここでは、自動制御計測化された三軸試験機を用いて三軸圧縮・伸張条件下のstress-probe試験を行ない、その実測値を t_{ij} -sand modelによる予測値と比較することによりこの構成modelの適用性について検討する。

1. 構成モデルの概要と土質パラメータ

種々の応力経路下の砂の全ひずみ増分を次式で与える。

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^{(IC)} + d\epsilon_{ij}^{(AF)} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、弾性ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^e$ は弾性式 ($d\epsilon_{ij}^e = \{ (1+\nu_e)/E_e \} \cdot d\sigma_{ij} - (\nu_e/E_e) d\sigma_m \cdot \delta_{ij}$ ----- (2)) を使って表わすが、 E_e は等方圧縮時の弾性体積ひずみが平均主応力 σ_m のpower lawで与えられることにより次式で表わされる。

$$E_e = 3(1-2\nu_e) \cdot K_e = \{ 3(1-2\nu_e) P_a^m \} / \{ m \cdot C_e \cdot \sigma_m^{m-1} \} \quad \text{----- (3)}$$

($\nu_e = 0.0$, P_a : 大気圧)
 塑性ひずみ増分の等方的な圧縮成分 $d\epsilon_{ij}^{(IC)}$ (前報では $d\epsilon_{ij}^{(iso)}$ と記している)も等方圧縮時の塑性体積ひずみ($d\epsilon_v^{(iso)}$)が σ_m のpower lawで与えられることにより次式となる。

$$d\epsilon_{ij}^{(IC)} = \frac{\delta_{ij}}{3} (d\epsilon_v^{(iso)}) = \frac{\delta_{ij}}{3} \{ m(C_e - C_e) \sigma_m^{m-1} / P_a \} \langle d\sigma_m \rangle = \frac{\delta_{ij}}{3} \cdot K \cdot \langle d\sigma_m \rangle \quad \text{----- (4)}$$

塑性ひずみ増分の関連流動則 $d\epsilon_{ij}^{(AF)}$ (前報では $d\epsilon_{ij}^{(dir)}$ と記している)は t_{ij} 空間で関連流動則を満足することにより、($d\epsilon_{ij}^{(AF)} = \Delta \left(\frac{\partial f}{\partial t_{ij}} \right)$ ----- (5)) で表わされる。ここに、降伏関数 f や係数 Δ は t_{ij} を用いた仕事相当量($W^{sp} = \int t_{ij} d\epsilon_{ij}^p$)を使って次のように与えられている。

$$f = \ln t_N - \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \{ 1 - (1-\alpha) \frac{t_N}{t_{N0}} \} - \frac{1}{m+\alpha} \ln \left(\frac{t_N}{K_1} + t_{N0} \right) = 0 \quad \text{----- (6)}$$

$$\Delta = - \left\{ \frac{\partial f}{\partial t_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_m} t_{mn} \frac{\delta_{mn}}{3} K \cdot \langle d\sigma_m \rangle \right\} / \left\{ \frac{\partial f}{\partial t_{ij}} \frac{\partial f}{\partial t_{kl}} \cdot t_{kl} \right\} \quad \text{----- (7)}$$

なお以上の式において、 $df \leq 0$ or $f < 0$ の時 $d\epsilon_{ij}^{(IC)} = d\epsilon_{ij}^{(AF)} = 0$, $df > 0$, $f = 0$ & $d\sigma_m < 0$ の時 $d\epsilon_{ij}^{(IC)} = 0$ となる。

Table 1に実験に用いたやや密詰め($e_0 \approx 0.66 \sim 0.68$)の豊浦砂の土質パラメータをまとめている。ここに、(C_t , C_e , m)は等方圧縮試験の載荷・除荷試験から決定されるものであり、 R_f は三軸圧縮試験の破壊強度(σ_1/σ_3)_fを、 D_f はその時のダイレイタンシー曲線の勾配($d\epsilon_v/d\epsilon_1$)_fを意味している。また α は破壊時ひずみや K_0 値から決定される。このように、 t_{ij} -sand modelでは、等方圧縮試験結果と通常の三軸圧縮試験(側圧一定試験でよい)の破壊時の応力、ひずみに関する情報だけからすべての土質パラメータを決定することができる。

2. stress-probe試験結果と t_{ij} -sand modelによる予測値の比較

三軸圧縮条件下のstress probe試験は、龍岡の実験を参考にして、Fig. 1に示す($p = \sigma_m = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$, $q = \sigma_a - \sigma_r$)空間で0点($p = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $q = 1.5 \text{ kgf}$)

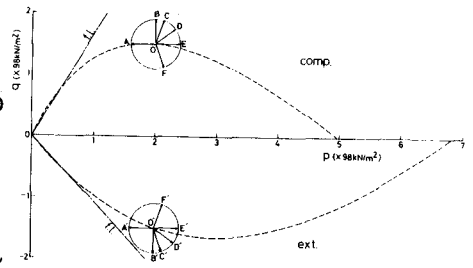


Fig. 1 シリーズ I, II の応力経路 (p ~ q 関係)

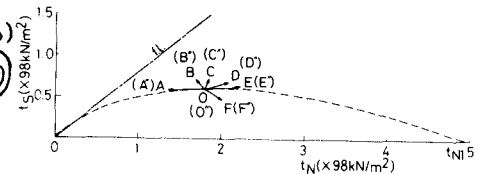


Fig. 2 シリーズ I, III の応力経路 (t_N ~ t_s 関係)

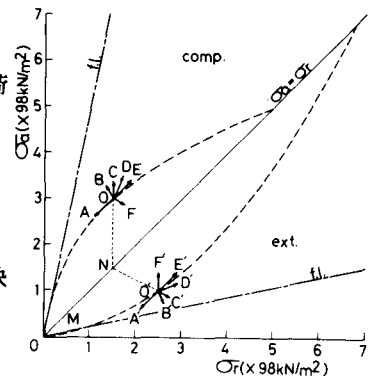


Fig. 3 シリーズ I, II の応力経路 (σ_a ~ σ_r 関係)

/ cm^2)からA~F点の方向に応力状態を変化させる実験(シリーズI)を行っている。

一方、三軸伸張条件下では次の2つのシリーズの実験を実施している。1つはFig. 1に示すように(p , $|q|$)関係でシリーズIと同じ応力経路になる試験(シリーズII: Fig. 1の0点からA'~F'に応力状態が変化する試験)であり、もう1つはFig. 2に示すように(t_N , t_S)関係でシリーズIと同じ応力経路になる試験(シリーズIII)である。ここに、 t_N , t_S は t_{ij} -sand modelの応力パラメータであり、 t_{ij} の主値ベクトルのSMPに垂直な成分および平行な成分を表わす。

Figs. 3, 4は以上の3つのシリーズのstress-probe試験の応力経路を軸圧 σ_a ~ 側圧 σ_r 関係で表わしたものである。また、Figs. 1~4の各図中には0, 0'あるいは0''点を通る降伏関数 f (式(6))を破線、破壊線($R_f = (\sigma_1 / \sigma_3)_f = 4.7$)を一点鎖線で描いている。

Figs. 5, 6, 7は以上の3つのシリーズのstress-probe試験結果と t_{ij} -sand modelによる予測値をせん断ひずみ増分 $d\epsilon_d = \frac{2}{3}(\epsilon_a - \epsilon_r)$ ~ 体積ひずみ増分 $d\epsilon_v$ 関係のベクトルで表示している。まず、各シリーズの実測値(a図)と予測値(b図)の比較を行なうと、経路によっては予測値の $d\epsilon_d$ が実測値に比べ小さくなっているが、全体的に予測値は三軸圧縮・伸張条件下のひずみ増分方向の応力経路依存性や経路の違いによるひずみの大きさの差をよく表わしているといえる。このように、 t_{ij} -sand modelでは、降伏関数は1つであっても塑性ひずみ増分を等方的な圧縮成分と関連流動則成分に分けているため、このようなひずみ増分方向の応力経路依存性を表現できる。ただ、応力比が増加する経路でもその応力経路が降伏曲面上あるいはその内側にある場合(例えば経路OA)では解析上塑性ひずみがでないことになり、せん断ひずみ増分等を過小評価することになる。

次に、(p , q)関係で同じ応力経路となるシリーズI (Fig. 5)とシリーズII (Fig. 6)を比較すると、実測値、予測値とも圧縮条件下と伸張条件下ではひずみ増分方向($d\epsilon_v / d\epsilon_d$)もその大きさ(ベクトルの長さ)もかなりの差がみられる。一方、(t_N , t_S)関係で同じ応力経路となるシリーズI (Fig. 5)とシリーズIII (Fig. 7)の比較では、Fig. 7で実測値が予測値よりベクトルの長さが小さめではあるが、Fig. 7の結果はFig. 5の $d\epsilon_d$ の符合をかえたものとはほぼ等しくなっている。以上のシリーズIとII、シリーズIとIIIのstress-probe試験の比較からも(p , q)を応力パラメータとした場合圧縮・伸張両条件下の砂の挙動をユニークに表現できないが、 t_{ij} -modelの応力パラメータである(t_N , t_S)を用いれば圧縮・伸張を含む3次元応力下の砂の挙動を統一的に説明できることが理解されよう。

謝辞 日頃御助言いただいている本学松岡元助教授に感謝致します。

文献 1)中井他(1984):S&F, Vol.24, No.2, pp.82~94.

2)中井他(1984):第39回土木学会年次講演会、Ⅲ、pp.7~8.

3)高柳他(1984):第39回土木学会年次講演会、Ⅲ、pp.9~10.(a)

4)龍岡他(1974):S&F, Vol.14, No.2, pp.63~76.

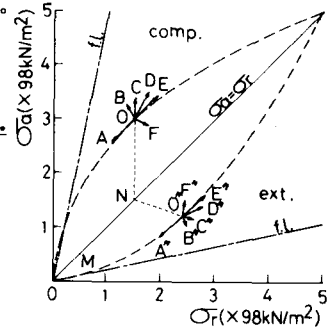


Fig. 4 シリーズI, IIIの応力経路($\sigma_a \sim \sigma_r$ 関係)

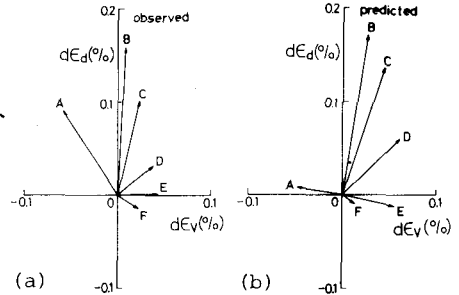


Fig. 5 シリーズI (三軸圧縮条件)の実測値と解析結果

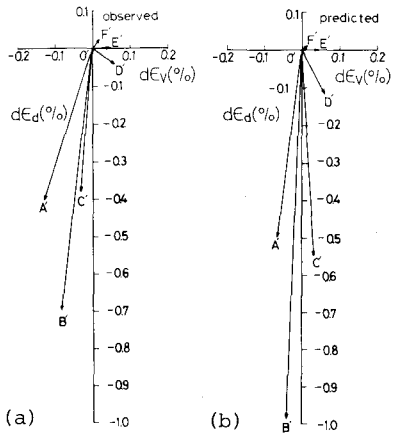


Fig. 6 シリーズII (三軸伸張条件)の実測値と解析結果

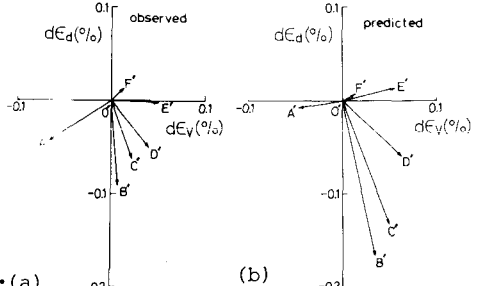


Fig. 7 シリーズIII (三軸伸張条件)の実測値と解析結果