

名古屋工業大学

学生員

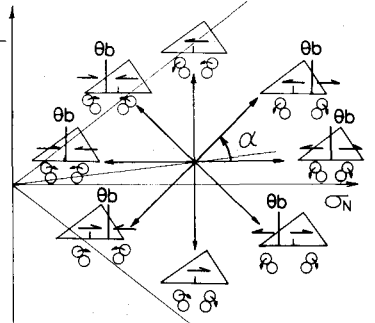
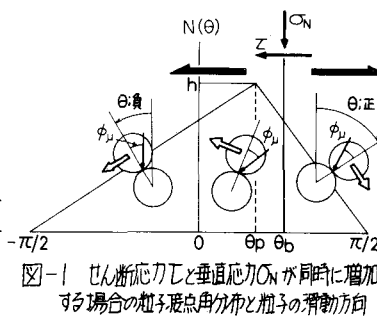
○藤井 俊逸

正員

松岡 元

○藤井 俊逸

粒状体に任意の応力が作用したときの粒子構造の変化を、着在すべり面上の粒子接点角分布とその粒子接点の滑動方向を考慮することによって表現し、圧縮・せん断両現象を統一的に評価した任意応力経路下の粒状体の応力・ひすみ関係式を導いた。



1. 着在すべり面上の応力比ひすみ増分比関係

着在すべり面上の粒子接点角θの度数分布N(θ)を、図-1のように頂点のθがθ_pなる三角形と近似する。^{1),2)} 着在すべり面上でせん断応力τのみが増加すると、粒子は平均的にτの作用方向に滑動(回転も含む)すると考えられるが、τと垂直応力σ_Nが同時に増加する場合には、θが正で大きい領域ではτの作用方向と逆方向に滑動すると考えられ(更別データ)、その境界のθを境界粒子接点角θ_bとする(図-1参照)。

次に更別データより想定した種々の応力経路下のθ_pとθ_bの関係、粒子の滑動方向の概念図を図-2に示す。破壊時(θ = θ_{pf})にはすべての粒子がせん断方向に滑動するものとし、図-2を参考にしてθ_bと応力経路のσ_N軸方向からの角度αの関係を次のように仮定した。²⁾

$$\theta_b = \alpha + (90^\circ - \alpha) \cdot (\theta_p / \theta_{pf}) \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ) \quad (1)$$

さて、図-1のような粒子構造状態におけるせん断・垂直応力比τ/σ_N、せん断ひすみ増分dγ、垂直ひすみ増分dε_Nは次のように式示される。

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{\int_{-\pi/2}^{\theta_p} N(\theta) \cdot \sin(\theta + \phi_m) \cdot d\theta + \int_{\theta_p}^{\pi/2} N(\theta) \cdot \sin(\theta - \phi_m) \cdot d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\theta_p} N(\theta) \cdot \cos(\theta + \phi_m) \cdot d\theta + \int_{\theta_p}^{\pi/2} N(\theta) \cdot \cos(\theta - \phi_m) \cdot d\theta} \quad (2)$$

$$d\gamma = \frac{\bar{\alpha} \cdot k\theta l}{(\pi/2) \cdot D} \left[\int_{-\pi/2}^{\theta_p} N(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta - \int_{\theta_p}^{\pi/2} N(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \right] \quad (3)$$

$$d\epsilon_N = \frac{\bar{\alpha} \cdot k\theta l}{(\pi/2) \cdot D} \left[\int_{-\pi/2}^{\theta_p} N(\theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta - \int_{\theta_p}^{\pi/2} N(\theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \right] \quad (4)$$

ここにφ_mは粒子間摩擦角の平均値、 $\bar{\alpha}$ は平均粒子間距離、kθlはθの変化量、(π/2)は粒子接点角総数、Dはせん断領域一層の厚さの平均値である。上式より算定した種々の応力経路下のτ/σ_N ~ dγ/dε_N関係を図-3に示す。図中の点線は異方圧密(τ/σ_N = tan αなる経路)における関係を示し、プロットは豊浦砂の三軸圧縮試験の更別値³⁾を示す。σ_Nの増加する側圧σ_r一定経路ではα < 90°側、σ_Nの減少する軸圧σ_a一定経路ではα > 90°

図-2 種々の応力経路下の境界粒子接点角θ_bと粒子の滑動方向

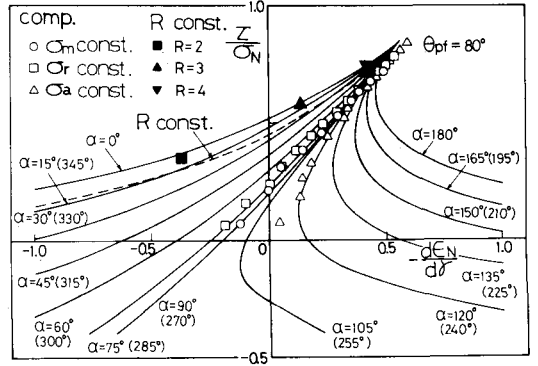


図-3 種々の応力経路(α一定と異方圧密)下の応力比τ/σ_Nひすみ増分比-dγ/dε_N関係の解析値と更別値

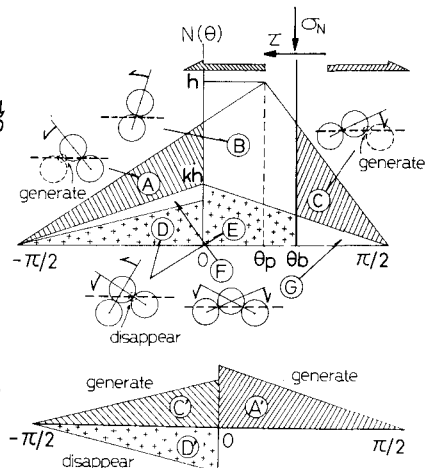


図-4 粒子接点角分布中の1点支持・2点支持接点角分布と粒子接点角の発生・消滅機構(上) その機構に基づいて発生および消滅する接点角分布(下)

側, 平均主応力 σ_m - 定経路ではほぼ $\alpha = 90^\circ$ にプロットされる。また図-5(a)は式(2)の関係を, (b), (c)は式(3), (4)の関係を θ_p に関して整理したものである。

2. 圧縮-せん断両現象を統一的に評価した応力-ひずみ関係

式(3), (4)より $d\sigma$, $d\epsilon_v$ の絶対値を求めるためには θ の関係が必要となる。そこで θ の総変化量 $\Delta(\theta \cdot \pi)$ (θ : θ の平均値 (= $\theta_p/2$), π : 粒子接点角総数 (= $\pi/2$)) が粒子接点角の発生・消滅および定常(接したまま滑動する状態)の挙動の結果生じるものとして次式を立てた(図-4参照)。²⁾

$$\Delta(\theta \cdot \pi) = \Delta\theta \cdot \pi + \bar{\theta} \cdot \Delta\pi = \pi h/6 \{ \Delta\theta_p + \theta_p (\Delta h/h) \}$$

$$= \textcircled{A} \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right) + \textcircled{C} \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right) - \textcircled{D} \cdot \left(-\frac{\pi}{2}\right) - \textcircled{B} \theta \left\{ \int_{-\pi/2}^{\theta_p} N(\theta) d\theta - \int_{\theta_p}^{\pi/2} N(\theta) d\theta \right\} \quad (5)$$

ここに, $\textcircled{A}$, $\textcircled{C}$ は1点支持接点角 $\textcircled{A}$, $\textcircled{C}$ 領域が滑動することによって発生する接点角数(図-4(A), (C)部の面積), $\textcircled{D}$ は2点支持接点角 $\textcircled{D}$ 領域が滑動することによって消滅する接点角数(図-4(D)部の面積)を表す。そして発生割合を $P \cdot \textcircled{A}$ (P は θ 関係は実験値に基づいて直線と仮定した), 消滅割合を $\pi \cdot \textcircled{B}$ として次式を仮定する。

$$\textcircled{A} = P \cdot \textcircled{A}, \textcircled{C} = P \cdot \textcircled{C}, \textcircled{D} = \pi \cdot \textcircled{B} \quad (6)$$

ここに $\textcircled{A}$, $\textcircled{C}$, $\textcircled{D}$ はそれぞれ図-4の(A), (C), (D)部の接点角数(面積)を表わし, π は1点支持接点と2点支持接点の比率(図-4参照)とすると θ_p , θ_b を用いて表わされる。また圧縮時には $\Delta\theta_p = 0$ よりひずみ増分は $\Delta h/h$ に比例し, 一方圧縮時のひずみ増分は $\Delta\sigma/\sigma_m$ に比例するといわれているので次式が成立する(実験データあり)。

$$\Delta h/h \propto \Delta\sigma/\sigma_m \quad (7)$$

以上より, 式(1), (5), (6), (7) から $\textcircled{B}$ が $\theta_p \Delta\theta_p$, $\Delta\sigma/\sigma_m$, α で表わされ, α を与えれば $\Delta\sigma/\sigma_m$ は $\theta_p \Delta\theta_p$ で表わされるので $\textcircled{B}/\Delta\theta_p$ は図-5(d)のように算定される。なお圧縮時には $\Delta\theta_p = 0$ とするで $\textcircled{B}/(\Delta\sigma/\sigma_m)$ として図-5(e)のように表わした。図-5より θ_p を介して任意応力経路下の応力-ひずみ関係が得られる。

図-6, 7はそれぞれ α - 定経路, 主応力比 R - 定経路の応力-ひずみ関係を表わし, 図中のプロットは豊洲砂の実験値³⁾を示す。解析値は種々の応力経路下の砂の実験値の傾向を統一的に説明している。

解析に用いたパラメータは, $\tan \phi_s = 0.20$, $\phi = 40^\circ$ ($\theta_p = 80^\circ$), $c_v/(1+e_0) = 0.928\%$, $\theta_p = 0$ での $P = 500$ (側圧 σ_r - 定の三軸圧縮試験より決定)である。

謝辞 御援助をいただいている本学, 山内利彦教授, 中井照夫助教授, 竹田一助助手に謝意を表します。

文献 1) 花岡外實(1983): S&F, Vol.23, NO.2, pp.83~97.

2) 花岡 謙・中井(1984) 才19回土質工学研究発表会(投稿中) 3) 中井 松岡(1981): 土木学会論文報告集, NO.306, pp.23~34.

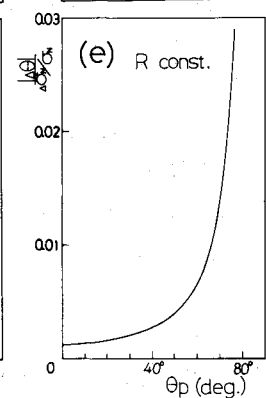
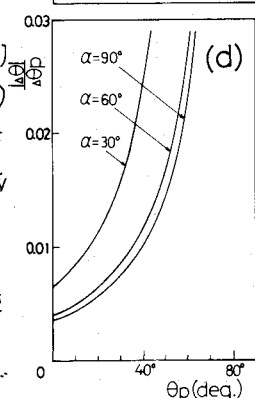
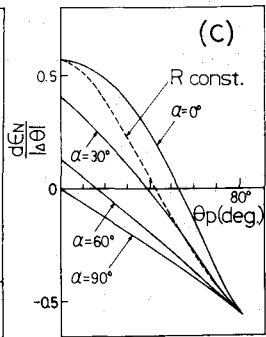
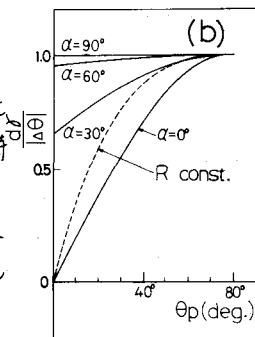
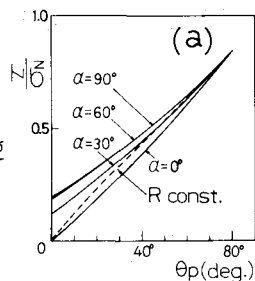


図-5 任意応力(α -定と R -定)経路下での σ/σ_m , $d\sigma/\sigma_m$, $\textcircled{B}/\Delta\theta_p$, $\textcircled{B}/(\Delta\sigma/\sigma_m)$ の θ_p に対する整理

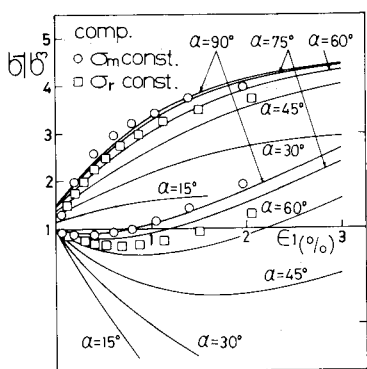


図-6 α - 定経路下の主応力比 $R (= \sigma_1/\sigma_3)$ の θ_p に対する整理

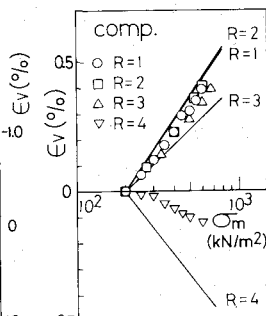


図-7 異方圧経路(主応力比 R - 定)下の体積ひずみ ϵ_v ~ 平均主応力 σ_m 関係の解析値と実験値