

（財）土木基礎設計事務所（元名工大大学院） 正員 ○藤井 俊逸
名古屋工業大学 正員 松田 元

微視的観点からすると、任意応力経路下の粒接触の応力・ひずみ関係を解いているが、¹⁾ここではその成果に基づいて、圧縮とせん断の重ね合せ²⁾による、利用しやすい形の応力・ひずみ関係式について述べる（紙面の都合上、前報¹⁾を参照されたい）。

1. せん断時、異方圧密時のせん断ひずみ増分 $d\gamma$ と垂直ひずみ増分 $d\epsilon_N$ 前報¹⁾の式(5)~(8)より、粒子接点角の変化量 $|\Delta\theta|$ は次式のよう表わされる。

$$|\Delta\theta| = \frac{\sigma_{ps} \cdot 3h}{P_0} \cdot \frac{1}{2(\sigma_{ps} - \sigma_p)(2\lambda \cdot \textcircled{A} - \textcircled{B}) + (\sigma_{ps} + \sigma_p) \cdot \lambda \cdot \textcircled{C}} \left\{ \frac{\Delta\sigma_p}{3} + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\sigma_p}{\lambda} \right) \frac{d\gamma}{h} \right\} \quad (1)$$

せん断時($\alpha=90^\circ$)の $|\Delta\theta|$, $d\gamma$ を $|\Delta\theta|_s$, $d\gamma_s$ とし、異方圧密時(主応力比一定時)を $|\Delta\theta|_c$, $d\gamma_c$ とすれば、微視的観点に基づいて表-1の関係を導びかれる。 $\textcircled{A}$ は、前報図-8の関係で $\textcircled{A}$, $\textcircled{C}$, $\textcircled{D}$ は各部の接点角数(面積)をえらぶ。圧密時には $\lambda \cdot \textcircled{A}$, $\lambda \cdot \textcircled{C}$, $\textcircled{D} \sim \sigma_{ps}$ 関係が図-1のようになり、この関係を直線で近似した。 $\textcircled{B}$ は、前報図-4の $X (= \sigma_{ps}) \sim \sigma_p$ 関係を直線で近似したものである。

ただし、 λ , $\mu (= \tan \phi_m)$ は前報図-7($\sigma_{ps} \sim d\sigma_{ps}$ 関係)において、せん断時($\alpha=90^\circ$)の関係を直線近似したときの勾配および切片に対応する。 $\textcircled{A}$, $\textcircled{B}$ より $|\Delta\theta|_s$, $|\Delta\theta|_c$ が $\textcircled{C}$ のように導びかれる。前報式(9)を $d\gamma/h = C_N \cdot d\sigma_{ps}/\sigma_{ps}$ とすれば、異方圧密時の係数 $C_N (= \lambda \cdot P_0)$ は異方圧密を満足する条件より、複合滑動面(CMP)の考え方をうけると次のように表わされる。

$$\frac{C_N}{\lambda \cdot P_0} = \frac{1}{0.5708} \cdot \frac{0.434}{6} \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \quad (3)$$

上式中の0.5708は、前報図-6の異方圧密時(R -定 $\sigma_p=0$)の $d\epsilon_N/|\Delta\theta|$ の値である。

$\textcircled{A}$ は、前報図-5の $d\gamma/|\Delta\theta| \sim \sigma_p$ 関係で、異方圧密時の関係は放物線と近似した。

$\textcircled{C}$, $\textcircled{D}$ より、 $d\sigma_c$, $d\sigma_s$ は次のようになり、図-2のよう表わされる。

$$d\sigma_s = \frac{6}{\pi \cdot \lambda \cdot \lambda \cdot P_0} \cdot \frac{X_s - \mu}{X_s - X} \cdot dX \quad (4)$$

$$d\sigma_c = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{0.5708} \cdot \frac{0.434}{6} \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{X}{X_s} \cdot \frac{X_s - \mu}{\lambda} \right) \cdot \frac{X}{X_s} \cdot \left(\frac{X_s}{X_s - X} + 1 \right) \frac{dX}{C_N} \quad (5)$$

せん断時の垂直ひずみ増分 $d\epsilon_{Ns}$ は、表-1中の式(2)の関係をより次式とする。

$$d\epsilon_{Ns} = \left\{ (\mu - X)/\lambda \right\} \cdot d\sigma_s \quad (6)$$

異方圧密時の垂直ひずみ増分 $d\epsilon_{Nc}$ は、せん断応力 τ の増加により粒子が重なり合う成分と、垂直応力 σ_N の増加による圧縮成分の和として次のように表わした。²⁾なお、異方圧密時には体積ひずみ増分 $d\epsilon_v = d\epsilon_N$ となることを考慮している。

$$d\epsilon_{Nc} = \left\{ (\mu - X)/\lambda \right\} \cdot d\sigma_c + (0.434/6) \cdot \left\{ C_c/(1+e_0) \right\} \cdot (d\sigma_{ps}) \quad (7)$$

図-3中の1点鎖線は異方圧密時の解析結果であるが、前報図-7の異方圧密時の

表-1

	せん断 ($\alpha=90^\circ$)	異方圧密 (粒接触時)
①	$\Delta\gamma/h = 0$ ($d\gamma_c/h = 0$) $\textcircled{C} = 0$ $\lambda \cdot \textcircled{A} = \textcircled{D} = \pi/4 \cdot \lambda h$	$\Delta\sigma_p = 0$ ($\Delta(\sigma_{ps}) = 0$) $\lambda \cdot \textcircled{A} = \pi/4 \cdot \lambda h$ $\lambda \cdot \textcircled{C} = \pi/4 \cdot \lambda h \cdot \frac{\sigma_{ps} - \sigma_p}{\sigma_{ps}}$ $\textcircled{D} = \pi/4 \cdot \lambda h \cdot \frac{\sigma_p}{\sigma_{ps}}$
②	$X = \lambda/3 \cdot \sigma_p + \mu$ $\equiv \lambda \cdot \left(-\frac{d\epsilon_N}{d\gamma} \right) + \mu$ (2)	$X = X_s/\sigma_{ps} \cdot \sigma_p$ (X_s は破壊時の X 値) $X_s = \lambda/3 \cdot \sigma_{ps} + \mu$
③	$ \Delta\theta _s = \frac{6}{\pi \cdot \lambda \cdot \lambda \cdot P_0} \cdot \frac{X_s - \mu}{X_s - X} \cdot dX$	$ \Delta\theta _c = \frac{2}{\pi \cdot \lambda \cdot P_0} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \frac{X_s - \mu}{\lambda} \cdot \frac{X}{X_s} \right) \cdot \frac{X}{X_s - X} \cdot \frac{dX}{h}$ ($\frac{dX}{h} = C_N \cdot \frac{d\sigma_{ps}}{\sigma_{ps}}$)
④	$\frac{d\sigma_s}{ \Delta\theta _s} = 1$	$\frac{d\sigma_c}{ \Delta\theta _c} = \frac{\sigma_p}{\sigma_{ps}} \cdot \frac{2\sigma_{ps} - \sigma_p}{\sigma_{ps}}$ $= \frac{X}{X_s} \cdot \frac{2X_s - X}{X_s}$

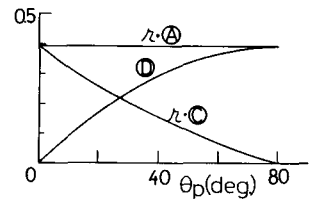


図-1 $\lambda \cdot \textcircled{A}$, $\lambda \cdot \textcircled{C}$, $\textcircled{D} \sim \sigma_p$ 関係 (前報図-8参照)

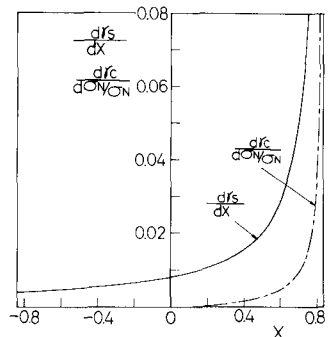


図-2 $d\sigma_s/dX \sim \sigma_p$ 関係(実線)と $d\sigma_c/(d\sigma_{ps} \cdot C_N) \sim \sigma_p$ 関係(点鎖線)

傾向と一致していることから、式(7)の仮定は果方圧延時のダイレイタンス特性を表現しているものと思われる。

2. 任意応力経路の応力・ひずみ関係

以上の考えに基づき、滑動面上の応力・ひずみ関係を、4つの領域($X \geq 0$)に分けて次のように表現した。

I. $dX \geq 0, d\sigma_N \geq 0$

$$d\sigma_s = \frac{6}{\pi \cdot \lambda \cdot k \cdot P_0} \cdot \frac{X_s - \mu}{X_s - X} \cdot dX, \quad d\epsilon_{NS} = \frac{\mu - X}{\lambda} \cdot d\sigma_s$$

$$d\sigma_c = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{0.5708} \cdot \frac{0.434}{\delta} \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{X_s - \mu}{X_s} \cdot \frac{X}{X_s} \cdot \frac{(X_s - \mu)}{(X_s - X)} + 1 \right) \frac{d\sigma_N}{\sigma_N}$$

$$d\epsilon_{NC} = \frac{\mu - X}{\lambda} \cdot d\sigma_c + \frac{0.434}{\delta} \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma_N}{\sigma_N}$$

II. $dX \geq 0, d\sigma_N < 0$

$$d\sigma_s = \frac{6}{\pi \cdot \lambda \cdot k \cdot P_0} \cdot \frac{X_s - \mu}{X_s - X} \cdot dX, \quad d\epsilon_{NS} = \frac{\mu - X}{\lambda} \cdot d\sigma_s$$

$$d\sigma_c = 0, \quad d\epsilon_{NC} = \frac{0.434}{\delta} \cdot \frac{C_s}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma_N}{\sigma_N}$$

III. $dX < 0, d\sigma_N < 0$

$$d\sigma_s = \frac{6}{\pi \cdot \lambda \cdot k \cdot P_0} \cdot \frac{X_s - \mu}{X_s + X} \cdot dX, \quad d\epsilon_{NS} = \frac{\mu - X}{\lambda} \cdot d\sigma_s$$

$$d\sigma_c = 0, \quad d\epsilon_{NC} = \frac{0.434}{\delta} \cdot \frac{C_s}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma_N}{\sigma_N}$$

IV. $dX < 0, d\sigma_N \geq 0$

$$d\sigma_s = \frac{6}{\pi \cdot \lambda \cdot k \cdot P_0} \cdot \frac{X_s - \mu}{X_s + X} \cdot dX, \quad d\epsilon_{NS} = \frac{\mu - X}{\lambda} \cdot d\sigma_s$$

$$d\sigma_c = 0, \quad d\epsilon_{NC} = \frac{0.434}{\delta} \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma_N}{\sigma_N}$$

任意応力経路下の $d\sigma$, $d\epsilon_N$ は、せん断圧延の重ね合せによって次のように表わした。

$$d\sigma = d\sigma_s + d\sigma_c \quad (8) \quad d\epsilon_N = d\epsilon_{NS} + d\epsilon_{NC} \quad (9)$$

図-3は任意応力(α -圧、 R -定)経路下の滑動面上の応力比・ひずみ増分比関係であるが、前報図-7の傾向をよく説明していることから、重ね合せによっても、土の変形挙動を説明できるものと思われる。図-4, 5は、それぞれ $X=0$, $X=0.4$ からの α -定経路下の応力・ひずみ関係を表わし、

図-6は図-4の関係を主応力・主ひずみ関係で整理したものである。

図-7は R -定時の $\epsilon_v \sim \log \sigma_m$ 関係でプロットした結果の一例である。解析に用いたパラメータは、 $\lambda=1.2$, $\mu=0.2$, $X_s=0.84$, $C_s/(1+e_0)=0.928\%$, $C_c/(1+e_0)=0.578\%$, $k \cdot P_0=250$ (松岡・藤井(1985)の三軸圧縮試験より)である。

文献 1) 松岡・藤井(1985): 第20回工學研究発表会(投稿)
2) 松岡・香川・中井(1977): 土木学会論文報告集 No.266, pp.95~105. 3) 中井・松岡(1981): 土木学会論文報告集 No.306, pp.23~34. 4) 松岡・小山・山崎(1985): S&F, 61, 25 No.1, pp.27~42.

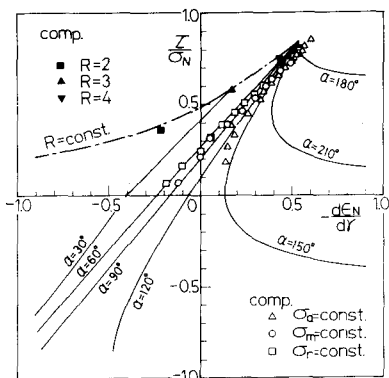


図-3 任意応力(α -圧、 R -定)経路下の応力比 Z/σ_N ・ひずみ増分比 $d\epsilon_N/d\sigma$ の関係の解析値と実測値

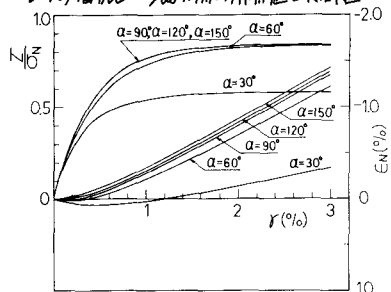


図-4 $X=0$ からの α -定経路下の $Z/\sigma_N \sim \epsilon_N$ 関係

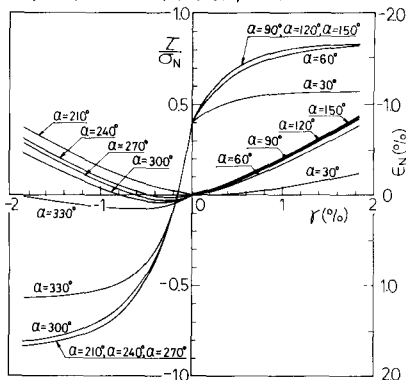


図-5 $X=0.4$ からの α -定経路下の $Z/\sigma_N \sim \epsilon_N$ 関係

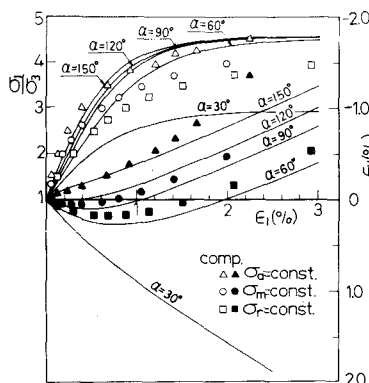


図-6 α -定経路下の主応力比 R -軸ひずみ ϵ_1 軸ひずみ ϵ_v 関係の解析値と実測値

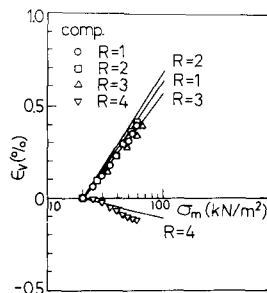


図-7 異方圧延(R -定)経路下の $\epsilon_v \sim \log \sigma_m$ 関係の解析値と実測値