

# 相異なる三主応力下における砂の ダイレイタンスー補正式

落合 英俊\*・棚橋 由彦\*\*

## Dilatancy Correction for Sand under Different Three Principal Stresses

by

Hidetoshi OCHIAI\* and Yoshihiko TANABASHI\*\*

Dilatancy correction for sand under different three principal stresses based on energy balance was proposed. In order to examine the effect of initial anisotropic fabric on the three dimensional strength of sand, this proposed correction was applied to the drained triaxial compression, plane strain, and cubical triaxial test results on anisotropic sand. It might for practical purposes be considered that the corrected strength of sand was not influenced very much by the initial fabric anisotropy.

### 1. まえがき

土に応力変化を与えたときの変形は体積の変化に関係する変形と形状の変化に関係する変形とから成り、体積変化に関係する変形は等方応力成分と偏差応力(せん断応力)成分によるものから成っている。せん断応力の変化による体積変化はダイレイタンスーと呼ばれており、飽和土の非排水せん断のように一定体積に保たれる場合を除いて必ず生じるものであり、砂のような粒状土のせん断強さに大きく寄与するものである。すなわち、土供試体に加えられたせん断応力の一部分は拘束圧力に抗して供試体の体積を変化させるために消費されており、したがって、土のせん断抵抗を考える際には、この体積変化を生じさせるための仕事量に相当する部分を補正しなければならず、一般にダイレイタンスー補正あるいはエネルギー補正と呼ばれている。砂の強度成分のうちからダイレイタンスー成分を定量的に取り出す方法については、Taylor<sup>1)</sup>の

記述以来、Bishop<sup>2)</sup>を始めとしていくつかの式が提案されているが、それらはいずれも軸対称の三軸圧縮試験あるいは直接せん断試験に対してのものであり、一般的な相異なる三主応力下における試験に対しては適用できない。

本文では、まず、ダイレイタンスー補正に関する既往の式を概説し、ついで、エネルギー的考察に基づき、相異なる三主応力下における試験に適用できる一般的なダイレイタンスー補正式を求めた。さらに、提案式を構造異方性を有する砂の試験結果に適用し、砂の三次元強度特性に及ぼす初期構造異方性の影響について検討した。

なお、本文で用いる応力およびひずみはすべて圧縮を正とし、応力は有効応力を意味している。

### 2. 既往のダイレイタンスー補正式

最大・中間・最小主応力を  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  とし、平均有

昭和58年 4月30日受理

\*九州大学工学部 福岡市東区箱崎 (Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

\*\*土木工学科 (Department of Civil Engineering)

効主応力  $\sigma_m$ , および軸差応力  $q$  を次式で表わす.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \\ q &= \sigma_1 - \sigma_3 \end{aligned} \right\} (1)$$

また最大・中間・最小主ひずみ増分を  $d\varepsilon_1, d\varepsilon_2, d\varepsilon_3$  とすると, 体積ひずみ増分  $d\varepsilon_v$  は次式で与えられる.

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 \quad (2)$$

供試体に三主応力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  が作用し, 主ひずみ増分  $d\varepsilon_1, d\varepsilon_2, d\varepsilon_3$  が生じるとき, 供試体がうけるエネルギー増分  $dE$  は次式で表わされる.

$$dE = \sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (3)$$

ここでは, 三軸圧縮試験 ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) に対する既往のダイレイタンスー補正式について概説する. それらは土を連続体とみなした研究と個々の土粒子の集合体とみなした研究に大別され, 以下(1)~(5)は前者に, (6), (7)は後者に属する.

#### 1) Bishop<sup>2)</sup>の式

Bishop は破壊時 ( $\sigma_1$  が最大で  $d\sigma_1 / d\varepsilon_1 = 0$ ) において, 供試体がうけるエネルギー増分  $dE_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f d\varepsilon_1 + \sigma_3 d\varepsilon_v$  と供試体の内部摩擦と粘着力に打ち勝つのに必要な仕事増分  $dW_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f \cdot d\varepsilon_1$  とは等しいとして次式を与えた.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \sigma_3 (d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) \quad (4)$$

#### 2) 赤井<sup>3)</sup>の式

赤井は破壊時の軸差応力のなす仕事増分  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f \cdot d\varepsilon_1$  は, 供試体の粘着力と内部摩擦に打ち勝つに要する軸差応力のなす仕事増分  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f \cdot d\varepsilon_1$  と  $d\varepsilon_1$  なるひずみ増分中になされる外的仕事増分  $d(-\varepsilon_v \sigma_3)$  との和で表わせるとして次式を与えている.

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)_f &= (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \varepsilon_v (d\sigma_3 / d\varepsilon_1) \\ &\quad + \sigma_3 (d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) \end{aligned} \quad (5)$$

なお  $\sigma_3$  一定の試験では  $d\sigma_3 / d\varepsilon_1 = 0$  より, 上式は Bishop の式(4)と一致する.

#### 3) Ladanyi<sup>4)</sup>の式

せん断中の仕事の式は一般に次式で与えられる.

$$\sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3 = dW_e + dW_f \quad (6)$$

ここに  $dW_f$  は内部摩擦に打ち勝つための仕事増分,  $dW_e$  は平均主応力  $\sigma_m$  によって生じる弾性的等方圧縮による仕事増分である. Ladanyi は破壊時附近の応力状態が  $\sigma_m$  一定の条件を満たせば,  $\sigma_m$  の変化による体積ひずみ増分と  $dW_e$  はゼロになると仮定し次式を導いた.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \sigma_m \frac{d\varepsilon_v}{\frac{2}{3}(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)} \quad (7)$$

#### 4) Poorooshasb & Roscoe<sup>5)</sup>の式

Poorooshasb と Roscoe は供試体に加えられるエネルギー増分  $dE$  はせん断変形のため消費されるエネルギー増分  $dW$  と圧縮によって吸収されるエネルギー増分  $dU$  の和式(8)で表わせるとし, 応力と同じ次元のパラメータ  $r = dU / d\varepsilon_1$  を用いて三軸圧縮試験におけるエネルギー収支の考察からダイレイタンスー補正式(9)を導いた.

$$dE = dW + dU \quad (8)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f + (\sigma_m - r) \frac{d\varepsilon_v / d\varepsilon_1}{1 - \frac{1}{3}(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1)} \quad (9)$$

なお上式においてせん断中に体積が減少する場合には  $r = \sigma_m$ , せん断中に体積が増加する場合や砂の場合には  $r = 0$  としている.

#### 5) Roscoe, Schofield & Thurairajah<sup>6)</sup>の式

彼等は式(8)の  $dU$  を供試体に貯えられる回復性の弾性エネルギー増分であるとし,  $dU$  は作用応力の等方成分の変化にのみ依存すると仮定して次式を与えた.

$$dU = \frac{\alpha}{1+e} \cdot d\sigma_m \quad (10)$$

ここに  $e$  は間隙比,  $\alpha$  は圧密試験における  $e$ - $\ln p$  膨潤線の勾配である. またせん断変形のために消費されるエネルギー増分  $dW$  は限界状態 (critical state) における応力比  $M = (\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m$  を用い次式で表わされるとした.

$$dW = M\sigma_m (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_v / 3) \quad (11)$$

(8), (10), (11)式と  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = dW / (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_v / 3)$  で与えられるとして, ダイレイタンスー補正式として次式を導いた.

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)_f &= (\sigma_1 - \sigma_3)_f + \sigma_m \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1 - \frac{1}{3}d\varepsilon_v} \\ &\quad - \frac{\alpha}{1+e} \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_v / 3} \end{aligned} \quad (12)$$

なお  $dU = 0$  とみなすと, 式(12)は Poorooshasb & Roscoe の式(9)と一致する.

#### 6) Newland & Allely<sup>7)</sup>の式

せん断中の個々の土粒子の移動方向はせん断方向と異なるとし, この違いを体積変化と関係づけて砂のせん断強さに及ぼす体積変化の影響を論じた. 破壊時における個々の土粒子の平均的な移動方向とせん断方向とのなす角を  $\theta$ , 砂の内部摩擦角を  $\phi_f$  としたとき,  $\sigma_2 = \sigma_3$  の三軸圧縮試験における主応力比を次式で表わした.

$$\frac{\sigma_{1\max}}{\sigma_3} = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi_f}{2} + \frac{\theta}{2} \right) \quad (13)$$

また三軸圧縮試験における円柱供試体の変形状を模

式化し、その幾何学的考察より  $\tan \theta$  として次式を与えた。

$$\tan \theta = \frac{(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) \sqrt{\sigma_{1\max} / \sigma_3}}{1 + (d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) + (\sigma_{1\max} / \sigma_3)} \quad (14)$$

$\phi_r = \phi_r$  のとき(13)式はダイレイタンス補正式となる。

7) Rowe<sup>6)</sup>の式

Rowe は砂のせん断は粒子接触点に加えられた仕事増分と外力に対してなされる仕事増分との比で定義されるエネルギー増分比が最小となる条件のもとで起こると仮定して、次式で表わされる最小エネルギー増分比  $\bar{E}_{\min}$  を求めた。

$$\bar{E}_{\min} = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi_\mu}{2} \right) = K_\mu \quad (15)$$

ここに  $\phi_\mu$  は粒子間摩擦角である。

三軸圧縮試験に対する最小エネルギー増分比は次式で与えられる。

$$\bar{E}_{\min} = \frac{\sigma_1 d\varepsilon_1}{\sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3} = K_\mu \quad (16)$$

(2)式を用いて(16)式を变形し次式を得た。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3 [1 - (d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) - (d\varepsilon_2 / d\varepsilon_1) \{ (\sigma_2 / \sigma_3) - 1 \}]} = K_\mu = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi_\mu}{2} \right) \quad (17)$$

$\phi_\mu = \phi_r$  のとき上式はダイレイタンス補正式となる。

3. 相異なる三主応力下におけるダイレイタンス補正式

供試体に外力  $\sigma_{ij}$  が作用し、ひずみ増分  $d\varepsilon_{ij}$  を生じるとき、供試体が受けるエネルギー増分  $dE$  は次式で与えられる。

$$dE = \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} = s_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} + \sigma_m \cdot d\varepsilon_v \quad (18)$$

ここに、 $\sigma_m$ ,  $d\varepsilon_v$  は平均有効主応力および体積ひずみ増分、また、 $s_{ij}$ ,  $d\varepsilon_{ij}$  は偏差応力テンソルおよび偏差ひずみ増分テンソルであり、それぞれ次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= \frac{1}{3} \sigma_{ij} \cdot \delta_{ij} \\ d\varepsilon_v &= d\varepsilon_{ij} \cdot \delta_{ij} \\ s_{ij} &= \sigma_{ij} - \sigma_m \cdot \delta_{ij} \\ d\varepsilon_{ij} &= d\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} d\varepsilon_v \cdot \delta_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここに、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタで、次の関係が成立する。

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & : i \neq j \\ 1 & : i = j \end{cases} \quad (20)$$

ひずみ増分は回復性の弾性成分と非回復な塑性成分とに分けられるとすれば、

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_v &= d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p \\ d\varepsilon_{ij} &= d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

と表わせ、式(18)は次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} dE &= (\sigma_m \cdot d\varepsilon_v^e + s_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}^e) \\ &\quad + (\sigma_m \cdot d\varepsilon_v^p + s_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}^p) \\ &= dE_e + dE_p \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)において、 $dE_e$  は構造骨格の弾性的圧縮によるエネルギー増分、 $dE_p$  は粒子間のすべりに基づく非回復なエネルギー増分とみなすことができよう。式(19)と式(22)より、 $dE_p$  は次のように表わされる。

$$dE_p = s_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} + \sigma_m \cdot d\varepsilon_v - dE_e \quad (23)$$

ここで、粒子間のすべりを引き起こす応力は偏差応力であり、この応力  $s_{ij}$ ,  $r$  は次式で表わされると仮定する。

$$s_{ij}, r = dE_p / d\varepsilon_{ij} \quad (24)$$

それゆえ、式(23), (24)より次式が得られる。

$$s_{ij}, r \cdot d\varepsilon_{ij} = s_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} + \sigma_m \cdot d\varepsilon_v - dE_e \quad (25)$$

砂の場合、破壊時には弾性的変形は無視できるので、 $dE_e = 0$  とみなすことができ、式(26)は次のように表わされる。

$$s_{ij}, r \cdot d\varepsilon_{ij} = s_{ij}, r \cdot d\varepsilon_{ij} + \sigma_m \cdot d\varepsilon_v \quad (26)$$

中間主応力の相対的な大きさを表わす  $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  を用い、主応力軸と主ひずみ増分軸が一致するとし、それらの軸に関して  $s_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}$  の項を書き改めると、

$$\begin{aligned} s_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} &= s_{11} d\varepsilon_{11} + s_{22} d\varepsilon_{22} + s_{33} d\varepsilon_{33} \\ &= \{ (\sigma_1 - \sigma_3) + s_{33} \} \cdot d\varepsilon_{11} + \{ (\sigma_2 - \sigma_3) + s_{33} \} \\ &\quad \cdot d\varepsilon_{22} + s_{33} \cdot d\varepsilon_{33} \\ &= (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot d\varepsilon_{11} + (\sigma_2 - \sigma_3) \cdot d\varepsilon_{22} \\ &= (\sigma_1 - \sigma_3) (d\varepsilon_{11} + b \cdot d\varepsilon_{22}) \quad (27 \cdot a) \\ &= (\sigma_2 - \sigma_3) \left( d\varepsilon_{22} + \frac{1}{b} \cdot d\varepsilon_{11} \right) \quad (27 \cdot b) \end{aligned}$$

式(27・a)を用いると、式(26)は次のように表わせる。

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)_r &= (\sigma_1 - \sigma_3)_r + \sigma_m \cdot \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_{11} + b \cdot d\varepsilon_{22}} \\ &= (\sigma_1 - \sigma_3)_r + \\ &\quad \sigma_m \cdot \frac{(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1)}{1 - \frac{1}{3}(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) + b \left\{ (d\varepsilon_2 / d\varepsilon_1) - \frac{1}{3}(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) \right\}} \end{aligned} \quad (28)$$

式(27・b)を用いると

$$\begin{aligned} (\sigma_2 - \sigma_3)_r &= (\sigma_2 - \sigma_3)_r + \sigma_m \cdot \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_{22} + \frac{1}{b} \cdot d\varepsilon_{11}} \\ &= (\sigma_2 - \sigma_3)_r + \\ &\quad \sigma_m \cdot \frac{(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1)}{(d\varepsilon_2 / d\varepsilon_1) - \frac{1}{3}(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) + \frac{1}{b} \left\{ 1 - \frac{1}{3}(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1) \right\}} \end{aligned} \quad (29)$$

式(28)と式(29)より、 $\sigma_3 =$ 一定、 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) =$ 一定の主三応力制御試験におけるダイレイタンス補正

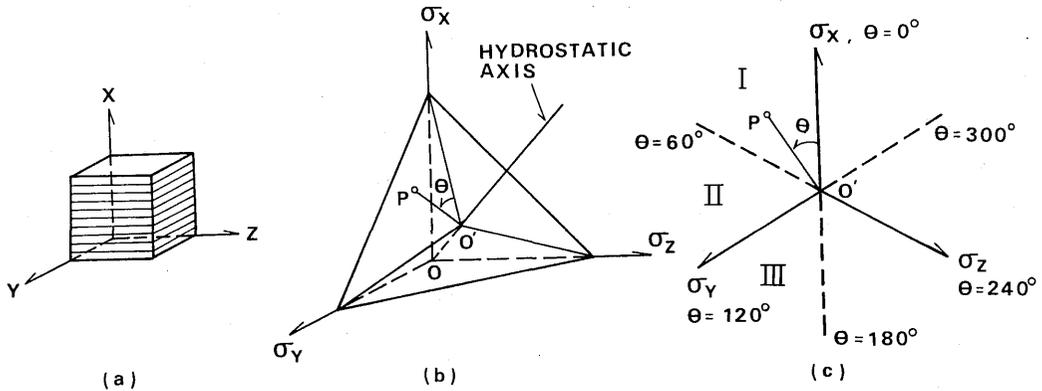


Fig. 1 Orientation of cross-anisotropic specimen relative to (a) Cartesian coordinate system, (b) Principal stress space, and (c) Octahedral plane

した軸差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)_r$  の値を算定することができる。また、 $\sigma_2 = \sigma_3$  の通常の三軸圧縮試験 ( $b = 0$ ) の場合には、式(28)は  $r = 0$  (砂の場合) とした Poorooshasb & Roscoe の式(9)と一致する。

#### 4. 試験結果への適用と異方性砂の強度特性

試験に用いた試料は粒径  $0.84 \sim 2.00 \text{ mm}$  の水洗いた川砂である。粒子はやや長めで扁平な形状を有しており、その平均細長比は  $0.61$  である。供試体は  $7.6 \times 7.6 \times 7.6 \text{ cm}$  の立方体で、図-1(a)に示すような堆積面内で等方な二軸直交異方性をもつように作製された密な供試体である (相対密度  $90 \sim 93\%$ )。

三主応力下における中間主応力  $\sigma_2$  の相対的な大きさを表わすために次の2つのパラメーターを用いる (図-1(b), (c)参照)。

$$b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (30)$$

$$\tan \theta = \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_y - \sigma_z}{(\sigma_x - \sigma_y) + (\sigma_x - \sigma_z)} \quad (31)$$

$\theta$  は応力径路を正八面体面に投影したとき、 $X$  軸から反時計回りに測った角度である。 $b$  は正八面体面上の  $\theta$  の各  $60^\circ$  の放射状部分で定義されており、軸対称三軸圧縮 ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) のとき  $0$ 、軸対称三軸伸張 ( $\sigma_2 = \sigma_1$ ) のとき  $1.0$  となる。なお、図-1を参照して、 $\theta$  に関して次の3つの領域を定義しておく。

領域 I :  $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$  ( $\sigma_x = \sigma_1, \sigma_y = \sigma_2, \sigma_z = \sigma_3$ )

領域 II :  $\theta = 60^\circ \sim 120^\circ$  ( $\sigma_y = \sigma_1, \sigma_x = \sigma_2, \sigma_z = \sigma_3$ )

領域 III :  $\theta = 120^\circ \sim 180^\circ$  ( $\sigma_y = \sigma_1, \sigma_z = \sigma_2, \sigma_x = \sigma_3$ )

試験は  $\sigma_3 = \text{一定}$  の三軸圧縮、平面ひずみ、および  $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = \text{一定}$  の三主応力制御試験であり、いずれもひずみ制御方式の排水試験である。

図-2は、 $b = 0.00$  の三軸圧縮試験における応力・ひ

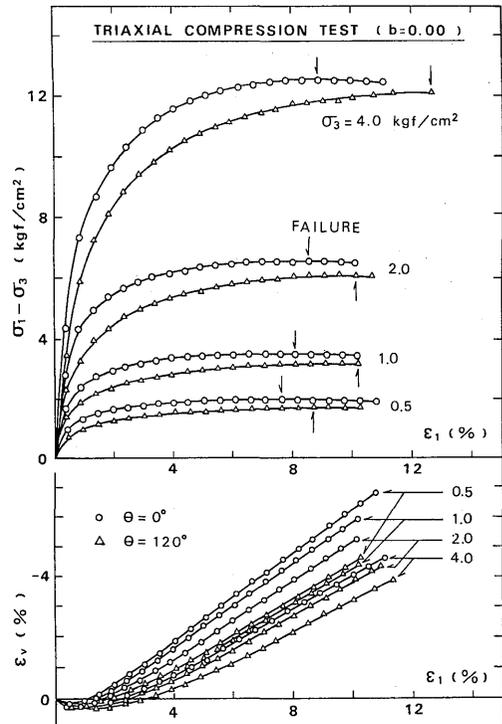


Fig. 2 Stress-strain and volume change characteristics obtained in triaxial compression tests on sand with cross-anisotropic fabric.

ずみ・体積変化曲線を示している。初期構造異方性の影響を受けて  $\theta = 0^\circ$  ( $\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z$ ) と  $\theta = 120^\circ$  ( $\sigma_y > \sigma_z = \sigma_x$ ) の試験ではすべての拘束圧力  $\sigma_3$  においてその挙動は異なり、ある軸差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  に対して、最大主ひずみ  $\epsilon_1$  は粒子長軸に垂直な方向 ( $\theta = 0^\circ$ ) の場合が

平行な場合 ( $\theta=120^\circ$ ) に比べてはるかに小さい。しかし、ひずみが大きくなり破壊状態 (ピーク応力状態) に近づくにつれて、応力・ひずみ曲線はたがいに接近する傾向にある。初期構造異方性の影響は体積変化特性に対しても顕著に現われ、しかも応力の場合とは異なり、ひずみが大きくなってもその影響はなくなる。図-3は、正八面体面上における $\theta$ の各 $60^\circ$ の3つの領域 I, II, IIIにおける破壊時の体積膨張の割合  $-(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1)_f$  と  $b$  値との関係である。 $-(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1)_f$  の値は $\theta$ の各領域において、中間主応力の大きさとともに単調に増加し、また、 $\theta$ の各領域間では一貫して領域 I, II, IIIの順に大きい。このような破壊時における体積膨張率  $-(d\varepsilon_v / d\varepsilon_1)_f$  の値は、前述のダイレイタンシー補正式からも知られるように砂のせん断強さに関係するものである。

図-4は、 $b=0.00$ の三軸圧縮試験において、 $\theta=0^\circ$ と $\theta=120^\circ$ の試験における破壊時の主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  の比で定義された強度比と拘束圧力  $\sigma_3$  の関係である。実線が実測値による強度比、破線が提案式(28)を用いてダイレイタンシー補正された強度比を示しており、参考のために小田ら<sup>9)</sup>による豊浦砂 (細長比 0.605)の結果も示されている。体積変化に対して強度の補正を行えば、拘束圧力が小さい場合でも強度比は1.0に近い値となり、初期構造異方性の影響はほぼ無視しえると考えてよいであろう。なお、本実験と小田

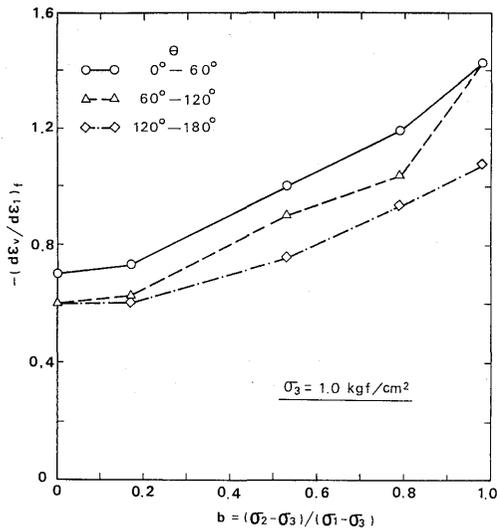


Fig. 3 Rate of volume change at failure obtained in triaxial compression and cubical triaxial tests on sand with cross-anisotropic fabric.

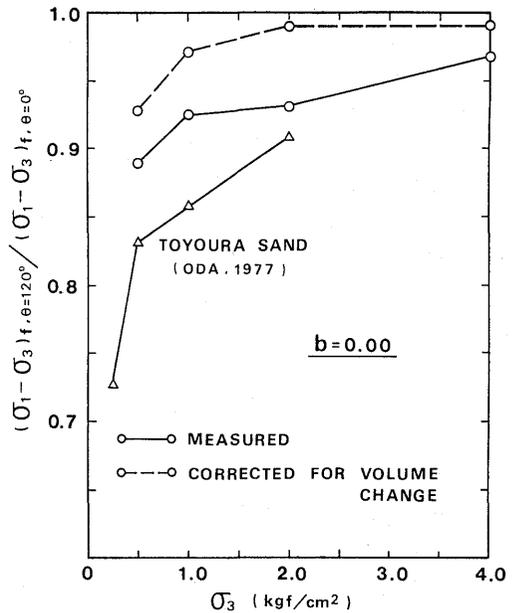


Fig. 4 Strength ratio for triaxial compression tests on sand with cross-anisotropic fabric.

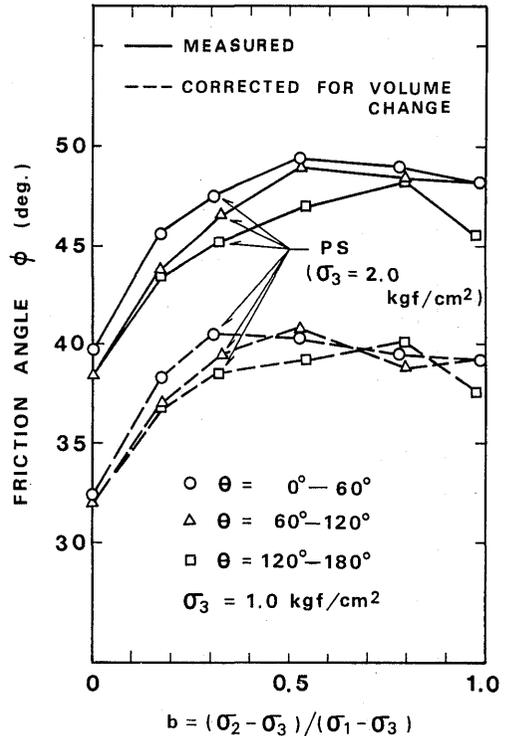


Fig. 5  $\phi$ - $b$  diagram for cubical triaxial and plane strain tests on sand with cross-anisotropic fabric.

らの実験結果との相違は粒子の細長比の求め方にもよるが、破壊に至るまでのひずみが異なり、本実験によるそれが小田らの結果に比べてかなり大きいためと考えられる。

図-5は砂の強度を摩擦角  $\phi = \sin^{-1}\{(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)\}$  で表わし、 $\theta$ の各 $60^\circ$ の3つの領域I, II, IIIに対して $b$ 値との関係を示したものであり、実線が実測値、破線が式(28)を用いてダイレイタンシー補正した値によるものである。なお、式(28)の適用に際して、 $-(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_r$ の値は図-3の結果を用い、 $d\varepsilon_2/d\varepsilon_1$ の値は図-6にその一例を示した $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_2$ 関係図の破壊時のこの配を求めて用いた。 $\theta$ の3つの領域における $\phi \sim b$ 関係の様子はダイレイタンシー補正に関係なくほぼ同じであるとみなせるが、ある $b$ 値に対する $\phi$ の値は、実測値では初期構造異方性の影響を受けて、一貫して領域I, II, IIIの順に大きいが、ダイレイタンシー補正を行なうとその差は小さくなり、大小関係が逆転する場合もみられる。したがって、 $b=0.00$ の三軸圧縮試験の場合と同様、相異なる三主応力下における試験においてもダイレイタンシー補正した強度は、実用上、初期構造異方性の影響を受けないとみなしてもよいであろう。

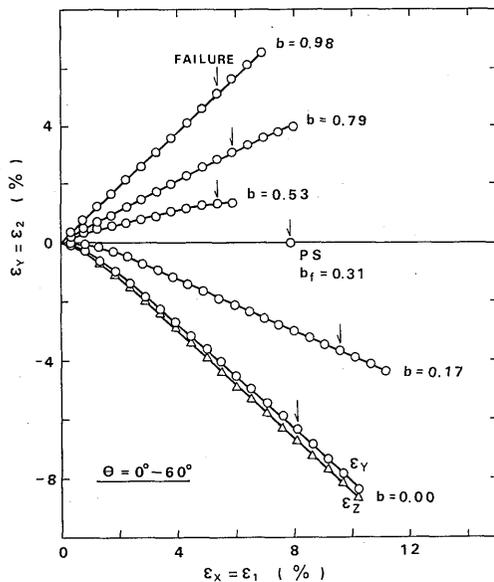


Fig. 6 Relationship between major and intermediate principal strains in cubical triaxial tests on sand with cross-anisotropic fabric.

## 5. まとめ

せん断応力の作用によって生じるダイレイタンシーは砂のせん断強さに大きく寄与し、その一成分をなしている。砂の強度成分のうちからダイレイタンシー成分を取りだす、いわゆるダイレイタンシー補正式はこれまで軸対称( $\sigma_2 = \sigma_3$ )の三軸圧縮試験あるいは直接せん断試験に対してのみ提案され、中間主応力の影響を取り入れた相異なる三主応力下の試験に対しては適用できなかった。

本文では、まず、既往の提案式を参考にし、エネルギー的考察に基づき、テンソル表示のダイレイタンシー補正式を求めた。この式は相異なる三主応力下の試験に適用できる一般式であり、 $\sigma_2 = \sigma_3$ の軸対称三軸圧縮試験の場合には Poorooshasb & Roscoe の式と一致するものである。さらに、この式を構造異方性を有する砂の三軸圧縮、平面ひずみ、および三主応力制御試験結果に適用し、ダイレイタンシー補正された砂の三次元強度は、実用上、初期構造異方性の影響を受けないとみなしてもよいことを明らかにした。

## 参考文献

- 1) Taylor, D. W.; Fundamentals of Soil Mechanics, (1948), pp. 329-361, John Wiley & Sons.
- 2) Bishop, A. W.; Geotechnique, Vol. 4, No. 1, (1954), pp. 43-45.
- 3) 赤井浩一; 土木学会論文集, 第58号, (昭33), pp. 76-81.
- 4) Ladanyi, B.; Bull. Ann. Trav. Publs. (1960). (村山朔郎; 土質力学における最近の諸問題, 日本材料試験協会関西支部, (昭37), による).
- 5) Poorooshasb, H. B. and Roscoe, K. H.; Proc. 5th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, (1961), pp. 297-304.
- 6) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A.; Geotechnique, Vol. 13, No. 3, (1963), pp. 211-240.
- 7) Newland, P. L. and Allely, B. H.; Geotechnique, Vol. 7, No. 1, (1957), pp. 17-34.
- 8) Rowe, P. W.; Stress-Strain Behaviour of Soils, Proc. of the Roscoe Memorial Symposium, (1972), pp. 143-194, G. T. Foulis & Co Ltd.
- 9) Oda, M. and Koishigawa, I.; Proc. 9th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, (1977), pp. 235-238.