地盤と建設
Vol. 10 . No. 1. 1992

中空ねじりせん断試験機の試作とその適用

Hollow Cylindrical Torsional Shear Apparatus and It's Application

安福規之 * (Noriyuki Yasufuku)
村田秀一 ** (Hidekazu Murata)
兵動正幸 *** (Masayuki Hyodo)
山本修三 **** (Osami Yamamoto)
浜田 透 *****(Toru Hamada)

主応力方向回転時の土の変形・強度特性を実験的に調べることができる試験機に、中空ねじりせん断試験機がある。本研究では、この中空ねじりせん断試験機の試作を試み、その適用をも検討した。今回試作した試験機は、以下に示す特徴がある。1)負荷応力をすべて空圧で制御している。2)ピストン部にストロークベアリングを用いている。3)ロードセルとトルク計をセルの内部に設置している。4)背圧負荷時の内圧、外圧の増圧を自動化するために、バイアスリレーを使用している。5)内容積変化を測定することにより、半径方向および円周方向のひずみ量を評価している。また、この試験機を用いて精度の良い実験を行うために、メンブレン貫入量補正とメンブレン張力補正および内容積変化量補正を行った。これらの補正に基づいて行った実験結果は、中空ねじり試験機を用いて行われた同様の実験結果と定性的によい対応を示しており、今回試作した試験機の有用性がうかがえた。

キーワード：応力ーひずみ曲線，砂，せん断強さ，特殊せん断試験，ねじり(IGC:D6)

1．まえがき

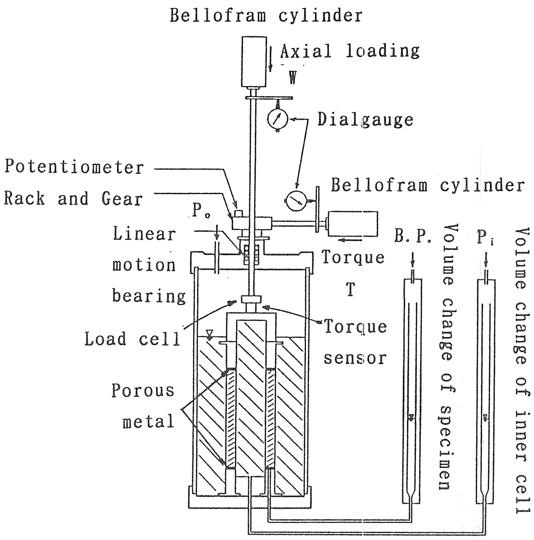
相異なる三主応力状態あるいは、主応力方向が変動するような状態にある土の変形・強度特性を実験的な立場から調べるためには、三主応力およびせん断応力が間接的であれ、直接的であれ独立に制御できる試験機が必要である。その中で中空ねじりせん断試験機は、その代表的なものであろう。このタイプの試験機は、Kirkpatric[1]，Wu, Lok and Malvern[2]，Broms and Jamal[3]，Tatsuoka, Iwasaki and Takagi[4]，Hight, Gens and Symes[5]，Miura, Miura and Toki[6]，Gutierrez[7]，その他多くの研究者によってそれぞれに工夫され用いられている。本報は、過去の試験機に関する研究成果を踏まえ、主応力軸の回転を模擬できるという点で発展性が高いと考えられる中空ねじりせん断試験機の試作を試み、その試験機の特徴や所定の応力を制御する具体的な手法およびひずみ量の計算方法、さらに実験精度を上げるための各種の補正方法について述べるものである。また、試作した試験機を用いて行う応力制御タイプの実験の手法を具体的に説明した上で、試験結果の一例を示し試験機の適用性についても若干検討する。

2．中空ねじりせん断試験機の概要

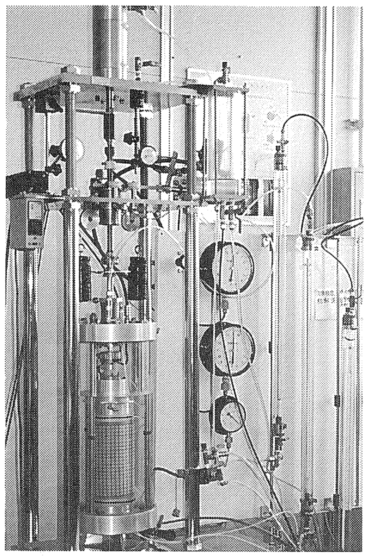
2．1 試験機の特色

試作した中空ねじりせん断試験機の断面図を図１に、また試験機の概観を写真１に示している。この試験機の特徴をまとめると以下のようになる。1)試験装置の構造、操作の簡易化を図るために、負荷応力をすべて空圧で制御している。2)ピストンの摩擦を軽減し、外圧の安定を図るために、ピストン部にストロークベアリングを用いシールを廃止している。3)外力を精度よく測定するために、ロードセル、トルク計をセル内部に設置している（写真２参照）。4)背圧負荷時の内圧、外圧の増圧を自動化するために、バイアスリレーを使用している。5)内容積変化を測定することにより、半径および円周方向のひずみ量を評価している。中空円筒形供試体は、外径10cm、内径6cm、高さ20cmを目標として作成され、メンブレンの厚さは、内側、外側共に0.5mmである（写真３参照）。ポーラスメタルは、供試体にトルク力を伝達するために8枚の刃を備えており、ボルトによりペデスタルに固定している（写真４参照）。供試体への載荷は、鉛直荷重W、トルク力T、内圧P_i、外圧P_o、背圧B.Pの5系統によ

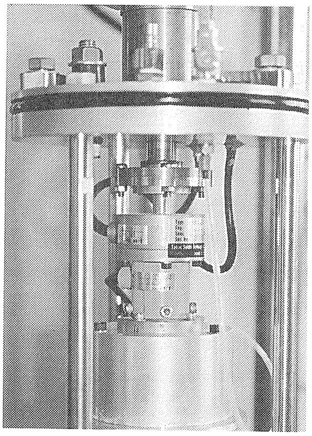
* 山口大学工学部社会建設工学科 助手，**同 教授，***同 助教授，****同 技官，
*****山口大学工学部大学院



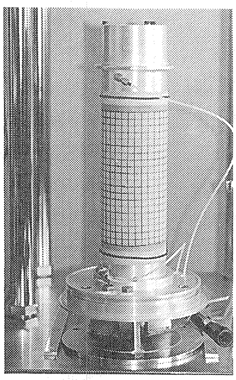
図－1　中空ねじりせん断試験機の断面図



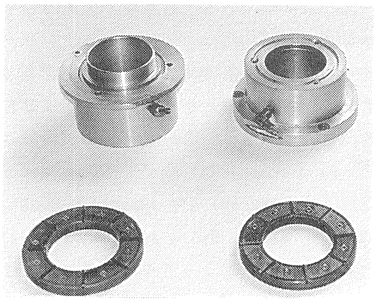
写真－1　中空ねじりせん断試験機



写真－2　ロードセルとトルク計



写真－3　中空円筒形供試体



写真－4　上下ペデスタルとポーラスメタル

り行われる。鉛直荷重は、ベロフラムシリンダーを介して載荷され、圧縮・引張載荷が可能である。鉛直荷重の載荷能力は、ロードセルの測定範囲により±200kgfである。トルク力は、ベロフラムシリンダーにより発生される横荷重をラックと平ギアによってトルク力に変換し、トルク計の測定範囲である最大500kgf･cmまで載荷が可能である。外圧は、セル上部から直接空気圧を負荷することにより制御され、内圧は内セルにつないだ二重ビューレット中に空気圧を負荷することにより制御される。内・外圧は、共に最大6kgf/cm²まで負荷可能である。 鉛直変位と角変位は、0.01mmの精度のダイヤルゲージにより計測され、体積変化と内容積変化は、それぞれ50ml,100mlのビューレットで計測される。

2．2　平均的な応力とひずみの評価

2．2．1　応力の評価

図２はそれぞれ中空円筒形供試体に外力が作用した状態とその結果として供試体要素に作用する応力を模式的に示したものである。この図に示すように、中空円筒形供試体に鉛直力W、トルク力T、外圧P_o、内圧P_iを独立に負荷することにより、供試体要素に鉛直応力σ_z、半径方向応力σ_r、円周方向応力σ_θ、ねじりせん断応力$\sigma_{z\theta}$を作用させることができる。ここで、各応力は、平均的な応力であることに注意する必要がある。鉛直応力σ_zは、図３に示される鉛直方向の力の釣合より次のように書くことができる。

$$\sigma_z=\frac{W}{\pi(r_o^2-r_i^2)}+\frac{P_o(r_o^2-d_r^2)-P_i r_i^2}{r_o^2-r_i^2} \quad (1)$$

ここで、r_i, r_oはそれぞれ内半径、外半径であり、d_rはロッドの半径である。半径方向応力σ_rは、図４に示すように半径方向に作用するP_iとP_oの線形平均をとることにより

$$\sigma_r=\frac{P_o r_o+P_i r_i}{r_o+r_i} \quad (2)$$

で与えられる。また円周方向応力σ_θは、平衡条件式($\sigma_\theta-\sigma_r=r\dfrac{\partial \sigma_r}{\partial r}$)を積分し、そして境界条件として1) $r=r_i$で$\sigma_r=P_i$ 2) $r=r_o$で$\sigma_r=P_o$を考慮することによって

$$\sigma_\theta=\frac{p_o r_o-p_i r_i}{r_o-r_i} \quad (3)$$

で評価される。さらにねじりせん断応力$\sigma_{z\theta}$の評価には、供試体を線形弾性体と仮定し面積の重さ平均をとる方法や剛一完全塑性体と仮定して求める方法がある[8]。まず、供試体を線形弾性体と仮定し面積の重さ平均をとったねじりせん断応力$\sigma_{z\theta}^e$は、結果的に

$$\sigma_{z\theta}^e=\frac{4(r_o^3-r_i^3)T}{3\pi(r_o^2-r_i^2)(r_o^4-r_i^4)} \quad (4)$$

で与えられる。一方、供試体を剛－完全塑性体と仮定した場合には、ねじりせん断応力$\sigma_{z\theta}^P$は

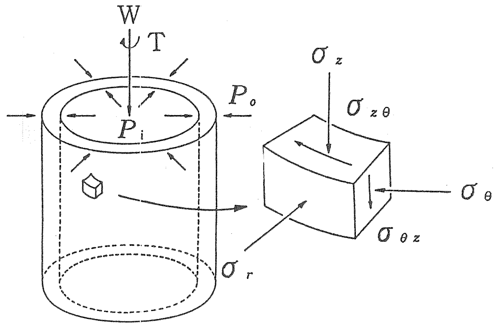
$$\sigma_{z\theta}^P=\frac{3T}{2\pi(r_o^3-r_i^3)} \quad (5)$$

で与えられる。

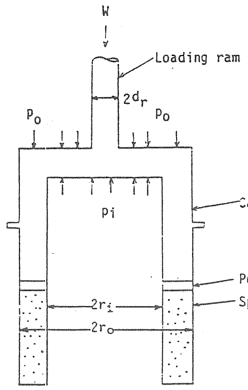
図５は、式(4)と式(5)を用いて求めた$\sigma_{z\theta}^e$, $\sigma_{z\theta}^P$とトルクTの関係を示したものである。この図からかなり大きなトルク力を加えたとしても、２つの仮定に基づくねじりせん断応力の評価には、有意な差が見られないことがわかる。従って、ここでは次式に示すように、式(4)と式(5)の平均値をとることによってねじりせん断応力を評価することとした。すなわち、

$$\sigma_{z\theta}=\frac{1}{2}\left[\frac{3T}{2\pi(r_o^3-r_i^3)}+\frac{4(r_o^3-r_i^3)T}{3\pi(r_o^2-r_i^2)(r_o^4-r_i^4)}\right] \quad (6)$$

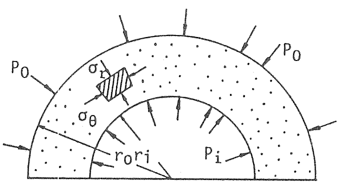
を用いて計算を行う。



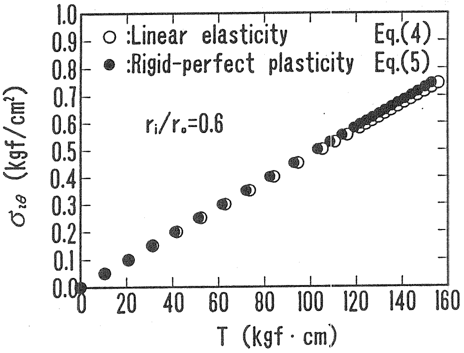
図－２　中空円筒形供試体とその要素



図－３　鉛直方向の力の釣合



図－４　半径・円周方向の力の釣合



図－5　ねじりせん断応力とトルクの関係

2．2．2　ひずみの評価

実験を行う上で、評価すべきひずみには、鉛直方向ひずみε_z，半径方向ひずみε_r，円周方向ひずみε_θ およびねじりせん断ひずみ$\varepsilon_{z\theta}$がある。本研究では、これらのひずみ評価には、Hight et al.の考え方[5]を利用していて、供試体の鉛直変位，角変位，体積変化，内容積変化を測定することにより、ε_z，ε_r，ε_θ および$\varepsilon_{z\theta}$は、以下の式でそれぞれ求められる。ここでも、応力と同様に求めるひずみは平均的なものであることに注意する必要がある。

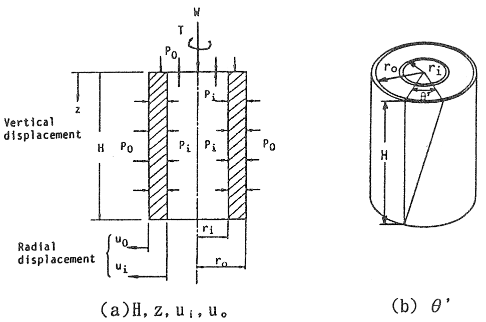
$$\varepsilon_z=\frac{Z}{H} \tag{7}$$

$$\varepsilon_r=-\frac{u_o-u_i}{r_o-r_i} \tag{8}$$

$$\varepsilon_\theta=-\frac{u_o+u_i}{r_o+r_i} \tag{9}$$

$$\varepsilon_{z\theta}=\frac{\theta'(r_o^3-r_i^3)}{3H(r_o^2-r_i^2)} \tag{10}$$

ここに、供試体高さH，鉛直方向変位z，内半径の変位u_i，外半径の変位u_oの定義は図6(a)に示し、角変位θ'の定義は、図6(b)に示している。



(a)H，z，u_i，u_o　　(b) θ'

図－6　変位の定義

2．3　応力・ひずみパラメータ

ここでは、実験で用いる応力およびひずみパラメータをまとめて示す。中空ねじりせん断試験機では、半径方向に対し垂直な面にせん断応力が作用しないので、半径方向応力σ_rは常に主応力となり主応力方向の回転はz－θ面でのみ生じる（図7参照）。図7は、実際に行った実験における主応力方向の回転の様子を模式的に示したものである。この図からわかるように、σ_rが常に中間主応力σ_2となり最大主応力σ_1と最小主応力σ_3の方向のみが変化することになる。この場合、主応力$\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ と$\sigma_z,\sigma_r,\sigma_\theta,\sigma_{z\theta}$の間には以下の関係式が成り立つ。

$$\sigma_1=\frac{\sigma_z+\sigma_\theta}{2}+\sqrt{\left(\frac{\sigma_z-\sigma_\theta}{2}\right)^2+\sigma_{z\theta}^2} \tag{11}$$

$$\sigma_2=\sigma_r \tag{12}$$

$$\sigma_3=\frac{\sigma_z+\sigma_\theta}{2}-\sqrt{\left(\frac{\sigma_z-\sigma_\theta}{2}\right)^2+\sigma_{z\theta}^2} \tag{13}$$

同様に最大主ひずみε_1，中間主ひずみε_2，最小主ひずみε_3と$\varepsilon_z,\varepsilon_r,\varepsilon_\theta$ および$\varepsilon_{z\theta}$の間にも以下の関係が成り立つ。

$$\varepsilon_1=\frac{\varepsilon_z+\varepsilon_\theta}{2}+\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z-\varepsilon_\theta}{2}\right)^2+\varepsilon_{z\theta}^2} \tag{14}$$

$$\varepsilon_2=\varepsilon_r \tag{15}$$

$$\varepsilon_3=\frac{\varepsilon_z+\varepsilon_\theta}{2}-\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z-\varepsilon_\theta}{2}\right)^2+\varepsilon_{z\theta}^2} \tag{16}$$

さて、土の応力状態は、不変量に対応する平均主応力p，軸差応力q，ロードアングルθ（または、中間主応力係数b値）で表現すると便利な場合が多い。これらを先に求めた主応力を用いて表すと以下のようになる。

$$p=\frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3) \tag{17}$$

$$q=\sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2\}} \tag{18}$$

$$\theta=tan^{-1}\frac{\sqrt{3}(\sigma_2-\sigma_3)}{(2\sigma_1-\sigma_2-\sigma_3)} \tag{19}$$

$$b=\frac{\sigma_2-\sigma_3}{\sigma_1+\sigma_3} \tag{20}$$

また、これらの応力パラメータの他に主応力方向回転中の応力状態を表現するパラメータとして次式を用いる。

$$q'=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_z-\sigma_\theta}{2}\right)^2+\sigma_{z\theta}^2} \tag{21}$$

このパラメータq'は、図8に示す$\sigma_{z\theta}-\frac{\sigma_z-\sigma_\theta}{2}$平面においてベクトル$\overline{OA}$ の大きさを表すものである。またこのベクトル$\overline{OA}$ が$\frac{(\sigma_z-\sigma_\theta)}{2}$軸となす角度は、最大主

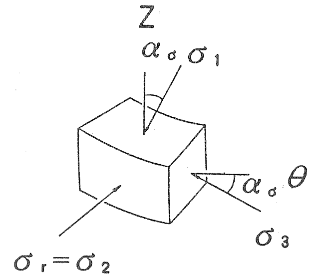
応力σ_1が鉛直軸となす角度の2倍に等しく、この角度は、図8からもわかるように以下のように定義される。

$$\tan 2\alpha_\sigma=\frac{2\sigma_{z\theta}}{\sigma_z-\sigma_\theta} \tag{22}$$

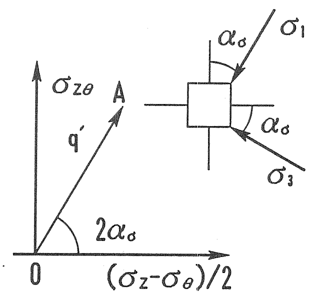
この平面は、主応力方向回転中の応力状態を知る上で大変便利なものである。さらに、ひずみの第一と第二不変量に対応する体積ひずみε_v、せん断ひずみγは、式(14)-式(16)で示される主ひずみを用いると、それぞれ次のように書くことができる。

$$\varepsilon_V=\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3 \tag{23}$$

$$\gamma=\sqrt{\frac{2}{9}\{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2\}} \tag{24}$$



図－7　主応力



図－8　$\sigma_{z\theta}-\frac{\sigma_z-\sigma_\theta}{2}$ 平面

2．4　制御パラメータ

実際の実験では、p, q', b値およびα_σを制御パラメータとして用いて、応力の制御を行っている。p, q', b値およびα_σを具体的に与えれば、上述した関係式に基づいて中空円筒形供試体に作用する4つの応力σ_z, σ_r, σ_θおよび$\sigma_{z\theta}$を誘導することができる。以下には、半径方向応力σ_rを中間主応力σ_2としてσ_1-σ_3軸のみ回転する場合のσ_z, σ_r, σ_θおよび$\sigma_{z\theta}$と制御パラメータとの関係式を示している。

i)0°≦α_σ≦45°　の場合

$$\sigma_z=\frac{q'}{\sqrt{\tan^2 2\alpha_\sigma+1}}+p-\frac{q'(2b-1)}{3} \tag{25}$$

$$\sigma_r=p+\frac{2q'(2b-1)}{3} \tag{26}$$

$$\sigma_\theta=-\frac{q'}{\sqrt{\tan^2 2\alpha_\sigma+1}}+p-\frac{q'(2b-1)}{3} \tag{27}$$

$$\sigma_{z\theta}=\frac{q'}{\sqrt{\tan^2 2\alpha_\sigma+1}}\tan 2\alpha_\sigma \tag{28}$$

ii)45°≦α_σ≦90°　の場合

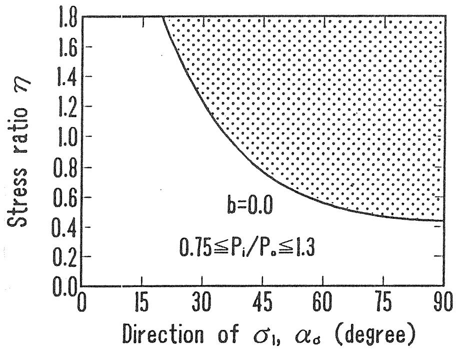
$$\sigma_z=-\frac{q'}{\sqrt{\tan^2 2\alpha_\sigma+1}}+p-\frac{q'(2b-1)}{3} \tag{29}$$

$$\sigma_r=p+\frac{2q'(2b-1)}{3} \tag{30}$$

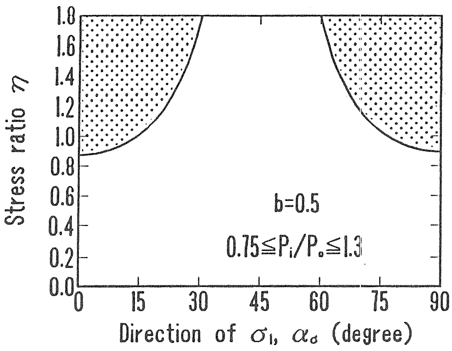
$$\sigma_\theta=\frac{q'}{\sqrt{\tan^2 2\alpha_\sigma+1}}+p-\frac{q'(2b-1)}{3} \tag{31}$$

$$\sigma_{z\theta}=-\frac{q'}{\sqrt{\tan^2 2\alpha_\sigma+1}}\tan 2\alpha_\sigma \tag{32}$$

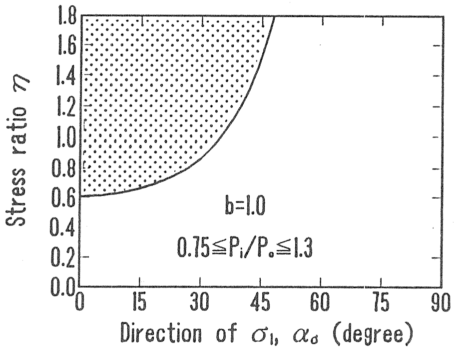
これら4つの応力を中空円筒形供試体を要素とみなして作用させることにより、主応力回転下での砂の挙動を把握することが可能となる。しかし、中空ねじりせん断試験機は内圧と外圧に差が生じる場合、供試体の応力とひずみの分布が一様にならない難点がある。Gutierrez[7]は、供試体が十分に要素として認められうる応力とひずみの非一様性の程度について解析的な検討を行っている。結果として彼は、内径6cm, 外径10cm, 高さ20cmの供試体では、内・外圧比の範囲0.75≦P_i/P_o≦1.3で実験を行えば、要素性が保持されることを言及している。図9(a), (b), (c)は、Gutierrezの示した制約をb値が0.0, 0.5および1.0のそれぞれに対して、η(=q/p)-α_σ平面上に描いたものであり、この実線の範囲（白抜きの部分）であれば、供試体の要素性が保持されることを示している。このよ



図－9(a) 内・外圧比の範囲(b=0.0)



図－９(b) 内・外圧比の範囲(b=0.5)



図－９(c) 内・外圧比の範囲(b=1.0)

うな制約は、Hight et al.[5]によっても示されているが、供試体の寸法によりその制約条件は異なるようである。本研究では、供試体の寸法がGutierrezのものと同じであることから、彼の規定した制約に基づいて実験を行うこととした。

３．システムコンプライアンス

ここでは、実験の精度を上げるための各種の補正について整理する。

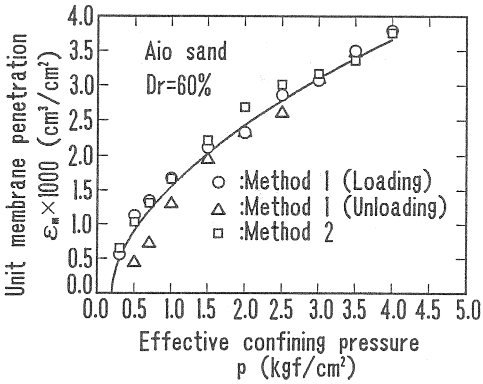
３．１　体積変化測定における誤差の補正

有効拘束圧が変化すると、メンブレンが粒状材料の間隙に貫入することによって測定された体積変化の中にメンブレン貫入量の誤差が生じる。このメンブレン貫入量の補正に関する研究は、いくつか行われている[9),10)]が、ここでは比較的簡便なVaid and Negussey の方法[11)]を使って補正を行った。彼らは、2種類のメンブレン貫入量の評価方法を提案している。まず第一法は、同じ密度で直径の異なる数本の三軸供試体を用いて等方圧密・除荷試験を行った上で、その応力・ひずみ関係を整理することによってメンブレン貫入量を評価するものである。この方法の根底には、直径が異なる供試体でも同じ体積ひずみが生じるという仮定が存在する。また第二法は、1本の三軸供試体を用いて等方圧密・除荷試験を行い、供試体が除荷時に等方的な挙動を示すと仮定した上で除荷時の応力・ひずみ関係からメンブレン貫入量を評価するものである。

メンブレン貫入量の検討は、有効拘束圧0.2kgf/cm^{2}から4kgf/cm^{2}の範囲で、相対密度Dr=60%の三軸供試体を使った第一法と中空円筒形供試体を使った第二法を用いて行われた。なお、メンブレンの厚さは0.5mmである。単位面積当たりのメンブレン貫入量と有効拘束圧との関係を図１０に示す。この図から、0.5mmのメンブレン厚の場合、2つの方法で得られた結果には有意な違いが見られず一義的な関係が存在することがわかる。このプロットを回帰したものが図中の曲線であり、その関係式を示すと次のようになる。

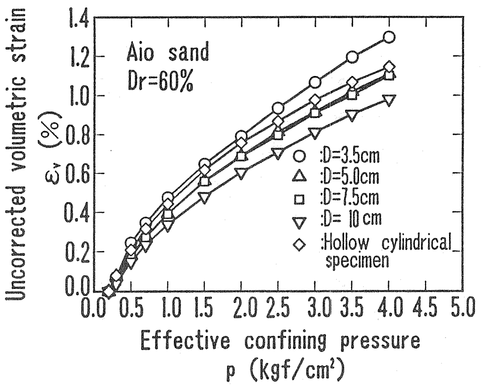
$$\varepsilon_m = \frac{A(p-0.2)^B}{1000} \tag{33}$$

ここに、A,Bは定数でありそれぞれ A=1.76 B=0.55 である。

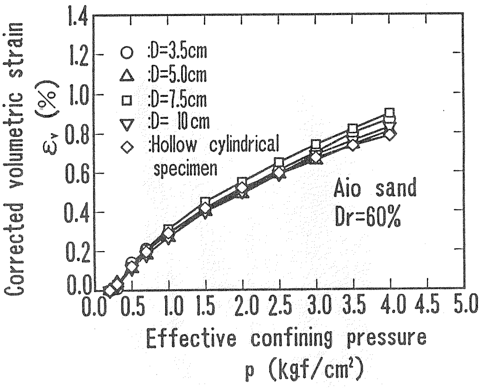


図－１０　有効拘束圧とメンブレン貫入量の関係

図１１(a),(b)は、メンブレン貫入量を補正していない体積ひずみ－有効拘束圧関係と式(33)を用いて補正した場合の体積ひずみ－有効拘束圧関係を示したものである。メンブレン貫入量を補正した体積ひずみには、供試体の体積に関係なくほぼ一義的な関係があり、実験におけるメンブレン貫入量補正の重要性を示している。



図－11(a)有効拘束圧と体積ひずみの関係（補正なし）



図－11(b)有効拘束圧と体積ひずみの関係（補正あり）

3．2　メンブレンの張力による誤差の補正

供試体がメンブレンで被われていると、加えた応力のすべてが供試体自身に作用するわけではなく、その一部はメンブレンにも作用する。目標とする応力状態を精度よく再現するためには、このメンブレンによる張力が応力・ひずみ関係に及ぼす影響を補正することも大切になる。メンブレンの張力を求める方法として、メンブレンのヤング係数に基づくものがあるが、Bishop and Henkelの方法[1)2)]はその代表的なものであろう。ここでは、彼らの示した方法によって実験に使用するメンブレン(厚さ0.5mm)のヤング係数を測定した。

図12は、その結果を示したものであり、メンブレンに作用する直応力σと直ひずみε（単位長さ当たりのメンブレンの伸び）の関係を表している。この図において$\sigma-\varepsilon$関係の勾配がメンブレンのヤング係数を与えるが、この場合17.2kgf/cm²を得る。このメンブレンのヤング係数17.2kgf/cm²を用いて、各応力の補正（$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_r, \Delta\sigma_\theta, \Delta\sigma_{z\theta}$）を行った。これらの補正応力は、メンブレンの変形によって生じるものであり、補正応力の誘導は、Tatsuoka et al.の考え方[13)]に基づいて行った。彼らは、簡単のためにメンブレンの変形形態を圧縮・伸張変形だけの三軸モードと純粋単純せん断モードに分けた上で(i)ねじりせん断中、常に内メンブレン・外メンブレン共に真の円筒形を保つこと、(ii)メンブレンのポアソン比は、0.5であること、(iii)内メンブレン・外メンブレンは、同じ質で同じ厚さであることを仮定し、各補正応力（$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_r, \Delta\sigma_\theta, \Delta\sigma_{z\theta}$）を導いている。以下に、実際に誘導した各補正応力（$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_r, \Delta\sigma_\theta, \Delta\sigma_{z\theta}$）と各ひずみとの関係式を示す。

$$\Delta\sigma_z=\frac{4E_m t_m}{3(r_o^2-r_i^2)}\{r_o(2\varepsilon_{zmo}+\varepsilon_{\theta mo})+r_i(2\varepsilon_{zmi}+\varepsilon_{\theta mi})\} \quad (34)$$

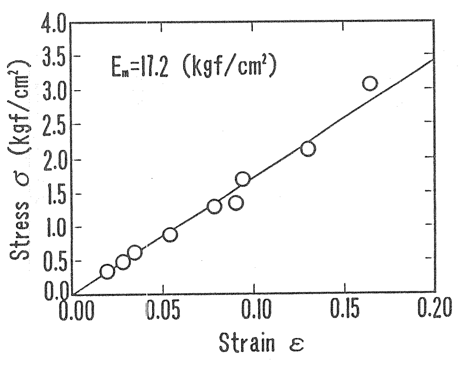
$$\Delta\sigma_\theta=\frac{2E_m t_m}{3(r_o-r_i)}\{(\varepsilon_{zmo}+2\varepsilon_{\theta mo})+(\varepsilon_{zmi}+2\varepsilon_{\theta mi})\} \quad (35)$$

$$\Delta\sigma_r=\frac{2E_m t_m}{3(r_o+r_i)}\{(\varepsilon_{zmo}+2\varepsilon_{\theta mo})-(\varepsilon_{zmi}+2\varepsilon_{\theta mi})\} \quad (36)$$

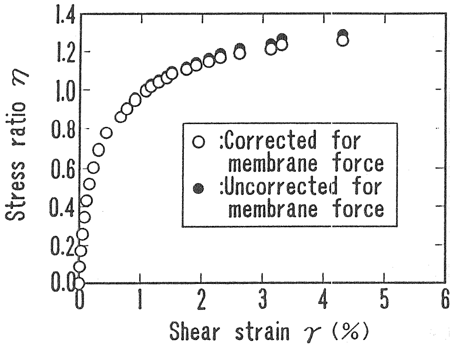
$$\Delta\sigma_{z\theta}=\frac{2}{3}E_m t_m\frac{r_o^3+r_i^3}{r_o+r_i}\left\{\frac{4(r_o^3-r_i^3)}{3(r_o^2-r_i^2)(r_o^4-r_i^4)}+\frac{3}{2(r_o^3-r_i^3)}\right\}\gamma_{z\theta} \quad (37)$$

ここで、E_mは、メンブレンのヤング係数(17.2kgf/cm²)、t_mはメンブレンの厚さ(0.5mm)、ε_{zmi}とε_{zmo}は、内・外メンブレンの鉛直方向ひずみ、$\varepsilon_{\theta mi}$と$\varepsilon_{\theta mo}$は、内・外メンブレンの円周方向ひずみ、および$\gamma_{z\theta m}$は$\frac{\theta'(r_o+r_i)}{2H}$で定義される工学的なねじりせん断ひずみである。

図13は、平均主応力p=1kgf/cm²一定、b値=0.5一定で最大主応力σ_1が鉛直軸となす角度α_σ=45°でせん断した結果を張力補正をした場合としてない場合で、示したものである。この図からわかるように、γが3%を越えるあたりからメンブレン張力の影響が表れていると判断され、補正の必要性を感じる。



図－12　メンブレンのヤング係数



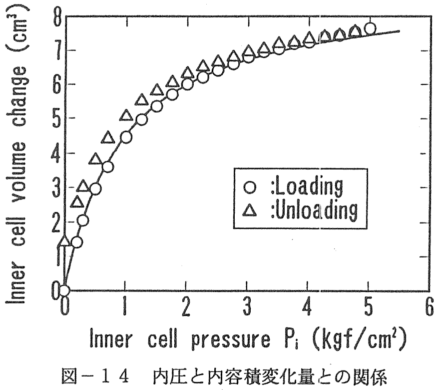
図－１３　応力比－せん断ひずみ関係

３．３　内容積測定における誤差の補正

内圧負荷時に測定された内容積変化は、真の内容積変化だけではなく配管の膨張による内容積変化も含んでいるのでこの誤差を正確に評価する必要がある。この誤差を直接評価するために、内圧を0kgf/cm²から5kgf/cm²の範囲で負荷・除荷した際に得られる配管の膨張による内容積変化を求める検定試験を行った。図１４は、配管の膨張による内容積変化と内圧との関係を示しているが、負荷・除荷共に一義的な関係を示していることがわかる。負荷時のプッロットを回帰したものが図中の曲線であり、次式で与えられる。

$$V_R=\frac{p_i}{C+Dp_i} \tag{38}$$

ここに、C, Dは定数であり、本試験機の場合 C=0.11, D=0.11である。

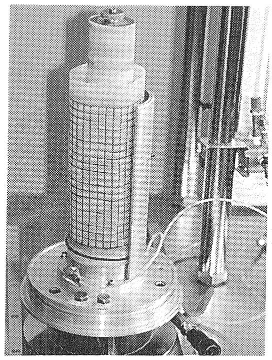


図－１４　内圧と内容積変化量との関係

４　応力制御載荷試験

４．１　供試体の作成方法

今回用いた試料は秋穂砂であり、その物性値は比重2.633, 最大間隙比0.958, 最小間隙比0.582である。以下に中空円筒形供試体の作成方法を簡単に示す。
1)内メンブレン・外メンブレンを内モールド・外モールドに密着させた後（写真５参照）、メンブレン中に気乾した試料を相対密度60%になるように空中落下させる。
2)中空円筒形供試体を0.3kgf/cm²の負圧で自立させ、内径、外径及び高さをシリンダーゲージおよびノギスを用いて測定する。3)負圧をセル圧に置き換え、供試体内の空気を炭酸ガスに置換した後、供試体に脱気水を注入し1kgf/cm²の背圧を負荷する。4)B値を測定してその値が0.96以上を確認した後に、各測定量（鉛直変位・角変位・体積変化・内容積変化）の初期値を記録し実験を開始する。



写真－５　内・外メンブレンと内・外モールド

４．２　実験手順

図１５は、応力制御で行う具体的な実験手順をまとめたものである。以下に実験手順を箇条書きで示す。
(1)実験を行う応力経路とその際の応力ステップを選定し、各ステップに対応するp, q', b値およびα_σ を定める。
(2)目標とするp, q', b値およびα_σ に基づいて式(25)から式(32)より、$\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{z\theta}$ を決定する。
(3)メンブレン貫入補正量と内容積変化補正量を式(33)と式(38)によって考慮した上で、今の応力状態での内半径r_i, 外半径r_oおよび高さHをそれぞれ以下の式で計算する。

$$r_i=\sqrt{\frac{\pi r_{io}{}^2H_O-V_i}{\pi(H_O-z)}} \tag{39}$$

$$r_o=\sqrt{\frac{\pi(r_{oo}^2-r_{io}^2+r_i^2)H_o-\pi r_i^2 z-V_V}{\pi(H_o-z)}} \tag{40}$$

$$H=H_o-z \tag{41}$$

ここに、H_oは、供試体の初期高さ、r_{io}とr_{oo}は、初期の内半径と外半径、zは鉛直変位（圧縮が正）、V_iは、メンブレン貫入量と配管の膨張による内容積変化量を補正した内容積変化量（収縮が正）、V_vは、メンブレン貫入量を補正した体積変化量（収縮が正）である。

(4)計算された供試体の内半径r_iと外半径r_oよりそれぞれ内半径変位u_iと外半径変位u_oを求めることができ、各変位量（u_i, u_o, z, θ'）に基づき式(7),(8),(9),(10),(23)および式(24)を用いて、各ひずみ量（$\varepsilon_z, \varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_{z\theta}, \varepsilon_v, \gamma$）を計算する。

(5)各ひずみ量に基づいてメンブレン張力による補正応力（$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_r, \Delta\sigma_\theta, \Delta\sigma_{z\theta}$）を式(34),(35),(36)および式(37)を用いて計算する。

(6)供試体に作用させるべき応力（$\sigma_z+\Delta\sigma_z, \sigma_r+\Delta\sigma_r, \sigma_\theta+\Delta\sigma_\theta, \sigma_{z\theta}+\Delta\sigma_{z\theta}$）と供試体の寸法に基づいて、制御すべき内圧・外圧・鉛直荷重およびトルク力の計算を式(42)-式(45)を用いて行う。

$$P_i=\frac{(\sigma_r+\Delta\sigma_r)(r_o+r_i)-(\sigma_\theta+\Delta\sigma_\theta)(r_o-r_i)}{2r_i} \tag{42}$$

$$P_o=\frac{(\sigma_r+\Delta\sigma_r)(r_o+r_i)+(\sigma_\theta+\Delta\sigma_\theta)(r_o-r_i)}{2r_o} \tag{43}$$

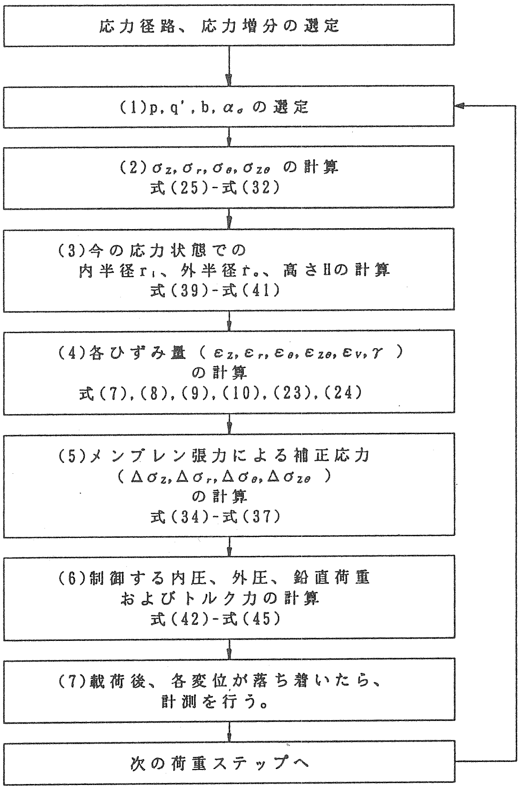
$$W=\{(r_o^2-r_i^2)(\sigma_z+\Delta\sigma_z)+P_i r_i-P_o(r_o^2-d_r^2)\}\pi \tag{44}$$

$$T=\frac{2(\sigma_{z\theta}+\Delta\sigma_{z\theta})}{\left\{\frac{3}{2\pi(r_o^3-r_i^3)}+\frac{4(r_o^3-r_i^3)}{3\pi(r_o^2-r_i^2)(r_o^4-r_i^4)}\right\}} \tag{45}$$

ここに、P_iとP_oは、式(2)と式(3)を解くことにより、またWとTは、式(1)と式(6)に基づいて計算される。

このように決定された内圧・外圧・軸荷重及びトルク力を負荷することにより、所定の応力経路でのせん断を行うことができる。

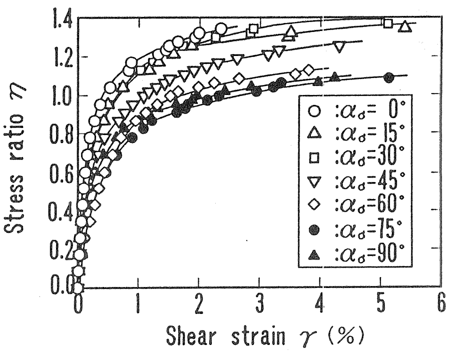
(7)載荷後、供試体の変形が、安定した状態（内容積変化量・体積変化量・鉛直変位及び角変位から判断する）に落ち着いたら、内容積変化量・体積変化量・鉛直変位及び角変位の計測を行う。このような手順を各応力ステップで繰り返し行い、応力制御での実験を進める。



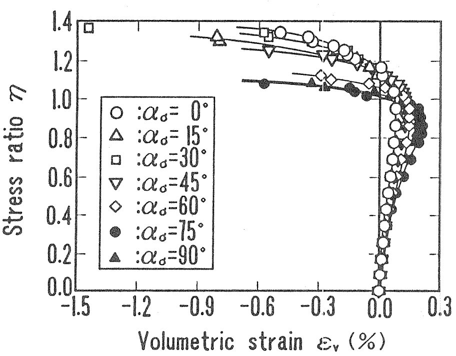
図－１５　実験手順

４．３　実験結果の一例

実験結果の一例として、等方圧密後に平均有効主応力p=1kgf/cm²,中間主応力係数b=0.5一定で、それぞれの主応力方向(α_σ =0°,15°,30°,45°,60°,75°および90°)にせん断を行った結果を示す。図１６(a),(b)は、η(=q/p)-γ関係とη-ε_v関係をそれぞれ示しており、この図より最大主応力の方向と鉛直軸とのなす角α_σが増加するにしたがって剛性は低下し、また最も収縮しているときの体積ひずみ量は、増加することがわかる。このような傾向は、中空ねじりせん断試験機を用いて行われた同様の試験結果[6),7)]と広範なひずみレベルにおいて定性的によい対応を示しており、平均的な応力やひずみの計算の仕方や各種の補正法を含めて、今回試作した試験機の有用性がうかがえる。



図－１６(a) 応力比－せん断ひずみ関係



図－１６(b) 応力比－体積ひずみ関係

５．まとめ

本研究ノートでは、主応力方向の回転や変動を模擬できる中空ねじりせん断試験機を試作し、その操作方法や実験結果の一例を紹介した。この試験機は、平均的な応力やひずみの評価方法を十分に認識し、内容積変化の測定をうまく行えば、ねじりせん断応力や直応力を独立に制御した試験が任意の応力経路下で簡単に行えるという特色を有しており、利用価値の高いものであると考える。

謝辞

試験機の試作や実験にご助力いただいた伊東周作氏（現、基礎地盤コンサルタント）、伊達勇治氏（現、大分市役所）に深謝の意を表する。また、本試験機の製作や改良に関連して何度も足を運んで下さった（株）九州丸東（現、㈱マルタニ試工）故 堀家昭二社長と（株）マルタニ試工 長沢幸司取締役に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

1)Kirkpatrick,W.M.(1957):"The condtion failure for sand,"Proc.4th ICSMFE, Vol.1, pp.172-178.
2)Wu,T.H.,Lok,A.K. and Malvern,L.E.(1963):"Study of failure envelope of soils,"ASCE,Journal of SM Div., Vol.89, No.SM1, pp.145-181.
3)Broms,B.B. and Jamal,A.K.(1965):"Analysis of the triaxial test -cohesionless soils-,"Proc.6th ICSMFE,Montreal, Vol.1, pp.184-188.
4)Tatsuoka,F., Iwasaki,T. and Takagi,Y.(1978):"Hysteretic damping of sands it's relation to shear modulus, "Soils and Foundations, Vol.18, No.2, pp.25-40.
5)Hight,D.M.,Gens,A. and Symes,J.(1983):"The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils," Geotechnique, Vol.33, No.4, pp.355-383.
6)Miura,K.,Miura,S. and Toki,S.(1986):"Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axis rotation,"Soils and Foundations, Vol.26, No.1, pp.36-52.
7)Gutierrez,M.(1989):"Behavior of sand during rotation of principal stress directions,"D.Eng. Thesis, University of Tokyo.
8)福島伸二(1982):"ねじりせん断試験による砂の変形・強度特性の実験的研究," 東京大学学位申請論文
9)Frydman,S., Zeitlen,J.G. and Alpan,I.(1973):"The membrane effect in triaxial testing of granular soils," JTEVA, Vol.1, No.1, pp.37-41.
10)Raju,V.S. and Sadasivan,S.K.(1974):"Memnbrane penetration in triaxial tests on sands", ASCE, Vol.100, No.4, pp.482-489.
11)Vaid,Y.P. and Negussey,D.(1984):"A critical assessment of membrane penetration in triaxial test,"Geotechnical Testing Journal, Vol.7, No.2, pp.70-76.
12)Bishop,A.W. and Henkel,D.J.(1962):"The measurement of soil properties in the triaxial test," Part 4, Appendix 1.
13)Tatsuoka,F., Sonoda,S., Hara,K., Fukushima,S., and Pradhan,T.B.S.(1986):"Failure and deformation of sand in torsional shear,"Soils and Foundations, Vol.26, No.4, pp.79-97.