

## 中空ねじりせん断試験機の試作とその適用について

山口大学工学部 正員 ○安福規之 村田秀一 兵動正幸  
正員 山本修三 学生員 伊東周作

1. まえがき

一般的な応力状態にある土の変形強度特性を実験的に調べるために、三主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、代表的なものであろう。本報は、主応力軸の回転を模擬できると言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、その特徴や三主応力を制御する手法およびそれらに対応するひずみ量の計算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ったロードアングルと平均有効主応力一定のせん断試験結果の一例を示し、その適用性についても若干検討する。

2. 中空せん断試験機の概要

試作した中空セル及び載荷系統を図1に示している。本試験機の特徴をまとめると以下のようなになる。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こと、2) ピストンの摩擦を軽減、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こと、3) 外力を精度よく測定するために、ロードセル、トルク計、非接触型変位計をセル内部に設置していること、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たこと、5) 垂直、半径及び円周方向のひずみ量を評価するために、内容積の測定を可能にしたことなどである。

中空供試体の寸法は、外径10cm、内径6cm、高さ20cmであり、メンブレンの厚さは、外側、内側共に0.2mmである。供試体への載荷は、軸荷重、トルク、外圧、内圧、背圧の5系統により行われる。軸荷重は、ペロフレ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。トルクは、リニアヘッドスピード制御モーター、或はペロフレムシリンダー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に変換することにより制御される。外圧はセル上部から直接空気圧を負荷することによって制御され、内圧は内セルにつないだ二重ビュレット中に空気圧を負荷することにより制御される。

3. 三主応力制御の載荷試験

i) 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2.65、最大間隙比1.05、最小間隙比0.60である。以下に中空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、外モールドに固定した後、メンブレン中に気乾燥した試料を所定の密度になるよう専用ロートを使って慎重に流し込み、充填する。2) 中空供試体を $0.3\text{kgf/cm}^2$ の負圧で自立させ、供試体の内径、外径及び高さを測定する。3) 負圧をセル圧に置き換え、供試体の内空気を炭酸ガスに置換した後、供試体に脱気水を注水し所定の背圧を負荷し飽和させる。4) 制御する各外力（内圧、外圧、軸荷重）や各測定量（体積変化、内容積変化及び軸変位）の初期値を記録した後、実験を開始する。

ii) 実験手順 --- 図2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。まず、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 $p, q, b$ 、 $\theta$ 値を決定する。次に、2)  $p, q, b$ 値に基づいて各主応力の計算と今の応力状態での内径と外径の計算を行う。そして、3)  $\theta$ 値より、まず $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ と $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の対応を評価し（鉛直方向を $z$ 軸、半径方向を $r$ 軸、円周方向を $\theta$ 軸としている）、各測定量に基づいて制御する内圧、外圧及び軸荷重の計算を行う。次に決定された内圧、外圧、軸荷重を負荷す

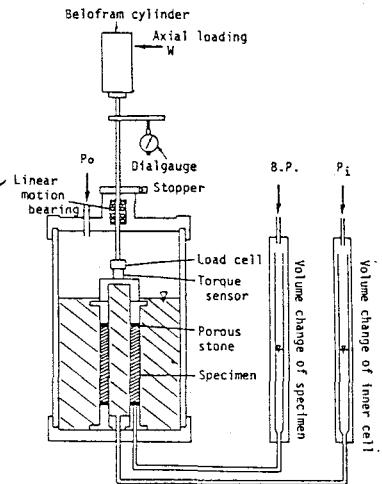


図-1 中空試験機

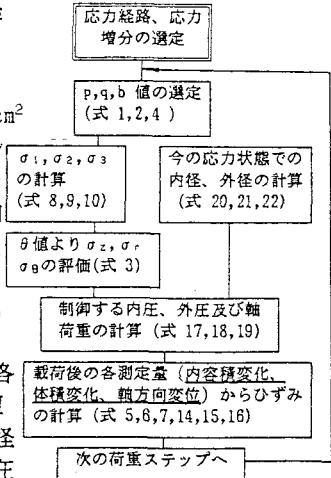


図-2 実験手順

表-1 応力・ひずみ・内圧・外圧・軸荷重の計算

応力パラメータ		内圧・外圧及び軸荷重の計算式		図-1 内外径の計算式
$\rho = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$	(1)	$P_0 = \frac{\sigma_x(d_o + d_i)}{2d_o}$	(17)	
$q = \frac{1}{\sqrt{2}}((\sigma_B - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_B)^2)^{1/2}$	(2)	$P_1 = \frac{\sigma_x(d_o + d_i) - \sigma_B(d_o - d_i)}{2d_i}$	(18)	
$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(\sigma_B - \sigma_r)}{(2\sigma_z - \sigma_B - \sigma_r)}$	(3)	$V = (\sigma_z(d_o^2 - d_i^2) + d_i^2 P_1 - d_o^2 P_0) \pi$	(19)	
$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$	(4)	$\sigma_B - \sigma_r = r \frac{d\sigma_r}{dr}$	(23)	
ひずみパラメータ		内径・外径の計算式		図-1 内外径の計算式
$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$	(5)	$d_{i,2} = \left( \frac{\pi d_{i,1}^2 H_o - C + U}{\pi (H_o - z)} \right)^{1/2}$	(20)	
$\gamma_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3}((\epsilon_B - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_B)^2)^{1/2}$	(6)	$d_{o,2} = \left( \frac{\pi H_o (d_{o,1}^2 - d_{i,1}^2 + d_{i,2}^2) - \pi z d_{i,2}^2 + V}{\pi (H_o - z)} \right)^{1/2}$	(21)	
$\omega = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(\epsilon_r - \epsilon_B)}{(2\epsilon_z - \epsilon_B - \epsilon_r)}$	(7)	$S' = \pi (d_{o,2}^2 - d_{i,2}^2)$	(22)	
主応力の評価		記号の説明		
$\sigma_1 = \frac{q}{(b^2 - b + 1)^{1/2}} + \sigma_3$	(8)	$d_{i,1}$	: 内径及び外径	$V$ : 軸荷重
$\sigma_2 = b(\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3$	(9)	$u_i, u_o$	: 半径方向変位	$p$ : 平均有効主応力
$\sigma_3 = p - \frac{q}{3(b^2 - b + 1)^{1/2}}(1+b)$	(10)	$z$	: 垂直方向変位	$q$ : 鮎差応力(式)
平均的な応力とひずみの評価		$H_o$	: 供試体初期高さ	$b$ : 中間主応力係数
$\sigma_z = \frac{V}{\pi (d_o^2 - d_i^2)} + \frac{p_o d_o^2 - p_i d_i^2}{d_o^2 - d_i^2}$	(11)	$\epsilon_z = \frac{z}{H}$	(14)	$\epsilon_z$ : 垂直方向のひずみ
$\sigma_r = \frac{p_o d_o + p_i d_i}{d_o + d_i}$	(12)	$\epsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{d_o - d_i}$	(15)	$\sigma_1$ : 最大主応力
$\sigma_B = \frac{p_o d_o - p_i d_i}{d_o - d_i}$	(13)	$\epsilon_B = -\frac{u_o + u_i}{d_o - d_i}$	(16)	$\sigma_2$ : 中間主応力
				$\sigma_3$ : 最小主応力
				$U$ : 内容積変化量
				$V$ : 供試体の体積変化量
				$C$ : 内容積リーキ量
				$\theta$ : ロードアングル

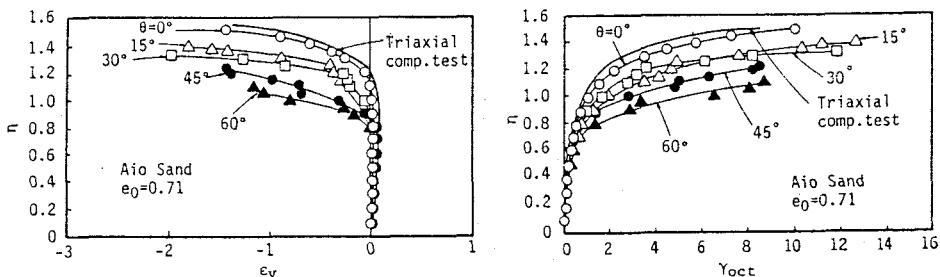


図-3 実験結果

ることにより所定の応力経路でのせん断を開始する。4)載荷後、供試体の変形が、定常状態（内容積変化、体積変化及び軸方向変位から判断する）に落ち着いたら、内容積変化、体積変化及び軸方向変位の計測により各ひずみ量を計算する。このような手順を各荷重ステップで繰返し行う。なお、応力やひずみなどを評価する数式は表1にまとめて示している。また、内容積変化の測定に関しては補正曲線（供試体がない状態での内圧の変化に伴うビュレットの変化を示す曲線）を利用して補正を行うことにより測定精度を高めている。  
iii) 実験結果の一例 --- 図3は、通常の三軸圧縮試験機と試作した中空せん断試験機を用いて同様の試料状態で行ったp一定の三軸圧縮試験結果（b値、θ値共に0）を比較したものである。中空せん断試験機を用いて得られた $\eta (=q/p)$ - $\gamma_{oct}$ 関係、 $\eta - \epsilon_v$ 関係共に、ひずみレベルに関係なく三軸試験機による結果（太い実線）とよい対応を示しており、この試験機の三軸圧縮試験への適用性がうかがえる。図3には、中空せん断試験機を用いてθ値=0, 15, 30, 60度一定のもとで行った、p一定せん断試験の結果もまとめて示している。得られた結果は、真の三主応力試験機を用いて行われた同様の試験結果<sup>1)-3)</sup>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、今回試作した試験機の有用性を示唆しているものと考える。

#### 4.まとめ

本報告では、主にトルクを負荷しない場合の中空ねじりせん断試験機の操作方法と実験結果の一例を紹介した。この試験機は、内容積変化の測定を行えれば三主応力を制御した試験が任意の応力経路下で簡単に実えることから、通常の三主応力制御試験機としても利用価値の高いものであると考える。最後に、本試験機の試作及び実験に精力的にご協力頂いた卒論生古川俊也君（現、日本上下水道設計）に感謝の意を表します。  
参考文献 1)P.V.Lade & J.M.Duncan: ASCE, Vol.99, No.5M10, 1973. 2)Y.Yamada & K.Ishihara: Soils & Foundations, Vol.19, No.2, 1979. 3)H.Ochiai & P.V.Lade: ASCE, Vol.109, No.10, 1982.