

中空円筒供試体による高圧三軸圧縮試験について

徳島大学工学部 正会員 藤井 清司
徳島大学大学院 学生員 ○柿 平 康 伸

まえがき。三主応力値が異なる、三軸試験を行うには、立方体供試体によるのがいいのであるが、それには特別の試験機が必要である。現在、一般に使われている円柱供試体に、流体により $\sigma_2 = \sigma_3$ の側圧を作用させる試験機で、中空供試体を用いると手軽に三主応力三軸試験を行うことができる。そこで、高強度ぜい性材料である岩石のような物質に、この試験方法の適用性を検討するため、岩石と強度、強度定数、応力-ひずみ関係等が非常に類似したセメントモルタルで供試体と作製して、中空三軸試験を行い、破壊包絡線と求め、一般の三軸試験から得られるものと比較する。また、この試験における三主応力は、 $W_k^{(3)}$ 等の計算式によるが、このとき強度定数： c 、 ϕ と前も、て仮定するという欠点をもつので、試験における内・外圧と、それから求まる最大破壊軸応力、さらに、この材料の弾性係数、ポアソン比とデータとして、有限要素法により直接三主応力を求め、三次元座標に破壊面と得て考察する。

中空円筒内の応力。中空円筒供試体内の応力状態を考える場合、材料は降伏点まで弾性挙動を示し、降伏点で塑性になり、降伏状態はモール・クーロンの破壊規準で表わされ、試験体の破壊は、試験体全体が降伏したとき起こると仮定する。ここでは、中空供試体に内・外圧の異なるそれぞれ一定値を作用させ、軸方向に破壊するまじ荷重を増加させる。この場合、軸方向・接線方向・半径方向応力がそれぞれ最大・中間・最小主応力に対応し、それらの値は次のようになる。ただし、 $P_i = 0 \text{ kg/cm}^2$ として導いてある。

$$\sigma_r = -P + \frac{1}{(m^2 - m^2)(r_0 - r_i)} \left\{ [(P + P_0) - P m^2] \frac{r_0^{\lambda_1 + 1} - r_i^{\lambda_1 + 1}}{r_i^{\lambda_1} (1 + \lambda_1)} + [P m^2 - (P + P_0)] \frac{r_0^{\lambda_2 + 1} - r_i^{\lambda_2 + 1}}{r_i^{\lambda_2} (1 + \lambda_2)} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = -P + \frac{1}{(m^2 - m^2)(r_0 - r_i)} \left\{ [(P + P_0) - P m^2] \frac{r_0^{\lambda_1 + 1} - r_i^{\lambda_1 + 1}}{r_i^{\lambda_1}} + [P m^2 - (P + P_0)] \frac{r_0^{\lambda_2 + 1} - r_i^{\lambda_2 + 1}}{r_i^{\lambda_2}} \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_z = -P N_p + \frac{2 N_p}{(m^2 - m^2)(r_0^2 - r_i^2)} \left\{ [(P + P_0) - P m^2] \frac{r_0^{\lambda_1 + 2} - r_i^{\lambda_1 + 2}}{r_i^{\lambda_1} (\lambda_1 + 2)} + [P m^2 - (P + P_0)] \frac{r_0^{\lambda_2 + 2} - r_i^{\lambda_2 + 2}}{r_i^{\lambda_2} (\lambda_2 + 2)} \right\} + 2 C N_p^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda_1 = -1 + (1 - 2\nu N_p + N_p^2)^{\frac{1}{2}}$ 、 $\lambda_2 = -1 - (1 - 2\nu N_p + N_p^2)^{\frac{1}{2}}$ 、 P_i ：内圧、 P_0 ：外圧、 r_i ：中空の内半径、 r_0 ：供試体の外半径、 ν ：ポアソン比、

$$P = \frac{-[-P_0 N_p + 2\nu \frac{N_p^2 P_0}{m^2 - 1}]}{2\nu - N_p}, \quad N_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}), \quad m = \frac{r_0}{r_i}.$$

材料および試験方法。本試験で用いる材料は、重量配合比、水：セメント：砂 = 1：2：6 のセメントモルタルで、圧縮強度：287.6 kg/cm^2 、圧裂引張強度：23.4 kg/cm^2 である。供試体は、外半径：5 cm、高さ：25 cm の標準供試体に内半径：1.7, 2.45, 3.0 cm の中空さをつけ、た円筒供試体である。さらに試験は、Fig. 1 に示すような、高圧三軸圧縮試験機（最大側圧：300 kg/cm^2 、最大軸荷重：200 t）を用いて行う。この試験では、内圧と外圧に差をもたせる必要がある。内圧は、供試体中央の孔が外部と連絡し、試験中常に大気圧と等しくなるようにしてある。外圧は、三軸室へオイルを送ることによって圧力を得る。このような条件のもとで、中空円筒供試体の軸方向に載荷し、最大破壊荷重はロードセルで、変位は撓曲型変位計で測定する。それぞれの内径の

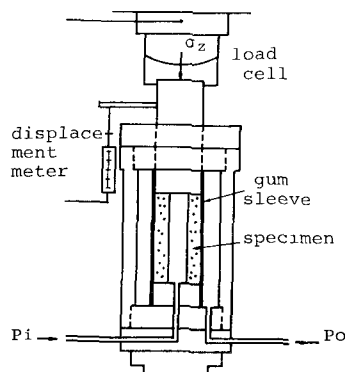


Fig.1: Hollow cylinder triaxial apparatus.

のについて 側圧: 25~200 kg/cm²まで 25 kg/cm² きざみの側圧で試験を行う。

有限要素法解析: 材料の弾性係数: 211,000 kg/cm², ポアソン比: 0.19, 中空三軸試験から求まる最大軸応力をデータとして有限要素法軸対称問題として、中空供試体の応力分布を解析し、三主応力を求める。次にその値を三次元座標にプロットし、空間内の点を正八面体平面上に投影することで、中間主応力の影響を考慮した破壊曲線を求める。

結果と考察 試験結果を Fig. 2 に示す。これより各径につき、破壊時の外圧: P_o と軸応力: σ_z の間には直線関係がみられる。中空円筒供試体にモール・クーロンの破壊理論を適用した式 (3) を、試験で得られる破壊時軸応力から、強度定数: c , ϕ を決定できるような形の式に変形することはできない。そのため、 c , ϕ を各種仮定して式 (3) より軸応力を計算し、それが試験により求められた軸応力と一致したとき、その値がその材料の強度定数となる。このような手順で、Fig. 2 の各径の σ_z - P_o 関係に対して、 c , ϕ を決定し、Table. 1 に示す。これらの値はほぼ一定で、 $c = 101 \text{ kg/cm}^2$, $\phi = 29^\circ$ を得る。一般の三軸圧縮試験から強度定数を決定するに側圧にふり、Table. 1 のようになる。中空三軸試験から求めたものの間には、側圧の高い三軸圧縮試験結果から求めた強度定数が、 $c = 98 \text{ kg/cm}^2$, $\phi = 29^\circ$ となり、せん断強度で、3 kg/cm² の差があるだけでは一致する。

中空三軸試験の応力-ひずみ関係は、破壊に至るまで、各径、各側圧における場合、それらは類似した形状、立ち上がりを示す。三軸圧縮試験による応力-ひずみ関係と比較した場合も、それらは似かよっているところがある。しかし、この材料では、供試体の中空の大きさと、有無によらず、応力-ひずみ関係は同じ傾向を示すといえる。

最後に、有限要素法で求まる、中間主応力を考慮した破壊曲線を求めると Fig. 3 のようになる。Fig. 3 からわかるように、セメントモルタル材料の挙動を表わすには、モール・クーロンの破壊規準が通しているといえる。

なお、本研究に終始御協力いただいた李学卒業生の小川哲宏君(姫野組)に深く感謝いたします。

参考文献^{a)}: T.H.Wu, A.K.Loh, and L.E.Malvein, "Study of Failure Envelope for Soils," proceeding, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Am.Soc. Civil Engrs, Vol.89, SML, Feb. 1963.

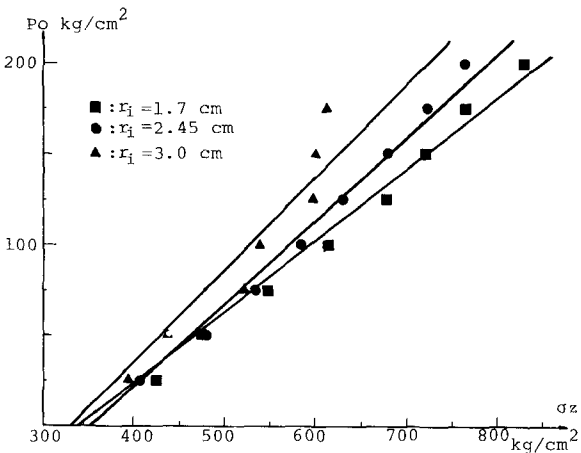


Table.1: Strength parameters.

St. Tests para.	Hollow Cylindrical T.T.			Triaxial Test		
	$r_i = 1.7 \text{ (cm)}$	$r_i = 2.45$	$r_i = 3.0$	$P_o = 0 \sim 200 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$P_o = 0 \sim 150$	$P_o = 100 \sim 200$
$c \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	101	102	101	81	76	98
$\phi \text{ (deg.)}$	29	29	28	32	33	29

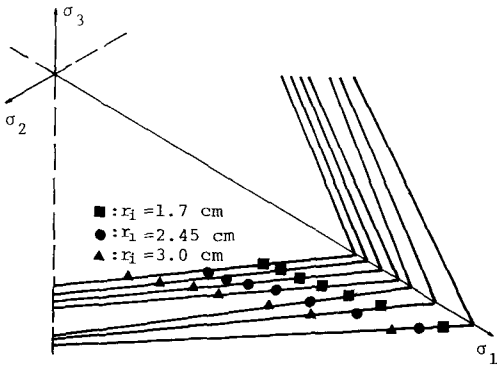


Fig.3: Yield criterion in the octahedral plane.