

岩石のようなぜい性材料の変形特性について

名古屋大学 ○富田和政 秋本昌胤 川本朋万

1. まえがき

著者は空隙の多い材料の一モデルとしてセメントモルタルを使用し、その三軸圧縮下での変形特性¹⁾を実験的に研究した。実験結果より、これらの材料の変形は垂直応力成分、偏差応力成分そして載荷経路に関係すること、また垂直応力成分の増加にともなう材料の質点変化と偏差応力成分の増加にともなう材料の異方性の発生が明らかになった。これらの結果は空隙の存在にもとづく圧縮性材料に一般的に認められる性質と考えられるが、材料の空隙がこれら材料に比べ非常に少ない密なぜい性材料、たとえば大理石、ではどのようなになるかは興味ある問題である。このような観点から、ここでは粗な材料と密な材料の変形特性を比較するために大理石の三軸圧縮下の変形特性が実験的に研究された。以下に、現在までに行なわれた実験結果を示し、発表当日セメントモルタルの変形特性と比較して報告する。

2. 実験概要

(1) 供試体

供試体は巨視的に等方等質とみなせる山口県美禰市産大理石で、その物理的性質を表-1に示す。

表-1 大理石の物理的性質

比重	空隙率	静的弾性率	ポアソン比	圧縮強度	単位体積重量
2.7	0.37	$6.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	0.4	797 kg/cm^2	2.7 kg/cm^3

(2) 三軸圧縮試験機

使用した三軸圧縮試験機は各軸方向にそれぞれ独立に加圧、減圧できる3個の負荷装置からなり、種々の三軸圧縮応力状態をつくることができる。詳細は文献(2)に述べてある。

(3) 実験方法

載荷方法ならびにその目的を次に述べる。

1) 静水圧載荷によつて垂直応力成分のみによる変形を測定する。

2) まず最初供試体に静水圧応力状態を与え、ついでこの状態から各軸方向の偏差応力成分が所定の比率で増加、減少するように載荷する方法で、このとき各軸の垂直応力成分の和は常に一定である。これによつて、偏差応力成分の変化によつて生じる変形、載荷経路が変形に与える影響を測定する。

3) 1)あるいは2)の方法で、ある応力状態を与えその後除荷した供試体を再び一軸圧縮した。一軸圧縮での変形定数を測定して、材料の質的变化および異方性の発生を検討した。

載荷速度は最小主応力方向で $4 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ で、他の方向の速度はこれに順じた。

供試体の変形は載荷が1)および2)でなされるとき、加圧板間にとりつけた差動トランスを使用して載荷が3)でなされるとき、ゲージ長10mmのクロスゲージを4枚供試体にはりつけて測定された。

3. 実験結果および考察

13個の供試体の平均一軸圧縮強度は $\sigma_c = 79.7 \text{ kg/cm}^2$ で、この値で応力状態を無次元化した。なお、このときの標準偏差は 8.2 kg/cm^2 、変動係数は10.3%であつた。応力状態を垂直応力成分と偏差応力成分とに分けて考え、ここでは八面体垂直応力 σ_{oct} 、と八面体せん断応力 τ_{oct} でそれぞれ表わす。ひずみ状態も同様に、体積変化成分と形状変化成分に分けて考え、八面体垂直ひずみ ϵ_{oct} 、と八面体せん断ひずみでそれぞれ表わす。

(1) 体積変化

図-1は載荷方法1)でもとめた結果である。応力-ひずみ関係は低応力時を除いてほぼ線型である。除荷曲線は変形が完全に回復することを示している。これらより、図-1に示す応力レベル以下では、大理石は非圧縮性すなわち体積変化は弾性的であることがわかる。図-2は載荷方法2)でもとめたものの一例で、偏差応力の変化によつて生じた体積変化を示す。図中の θ は載荷経路を示すパラメーターで次式で与えられる。

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \sqrt{3} (\sigma_2 - \sigma_3) / (2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) \right\}$$

図-2は σ_{oct}/σ_c が小さいとき、体積の増加を、また σ_{oct}/σ_c が大きいとき体積の減少を示している。このような体積変化はクラックの発生によつて生じ、拘束圧の大小によつて、クラックの発達状態がことなることを示している。他の載荷経路 $\theta = 0^\circ, \theta = 30^\circ$ の場合にも同様の傾向が認められた。図-1との比較から明らかなように、降伏時を除いて非常に偏差応力による体積変化はわずかである。

(2) 形状変化

図-3に図-2の応力状態に対応する形状変化が示されている。曲線の勾配が変化する応力状態（ここでは降伏応力と呼ぶ）までは曲線は一致しているが、降伏以後は σ_{oct}/σ_c の大小に影響されて異なつた経路を通ること、そして変形特性がぜい性から延性に遷移することを示している。このような性質は $\theta = 0^\circ, \theta = 30^\circ$ のときにも認められた。次に載荷経路が形状変化に与える影響を図-4の(a)(b)で見る。(a)は σ_{oct}/σ_c が小さいとき

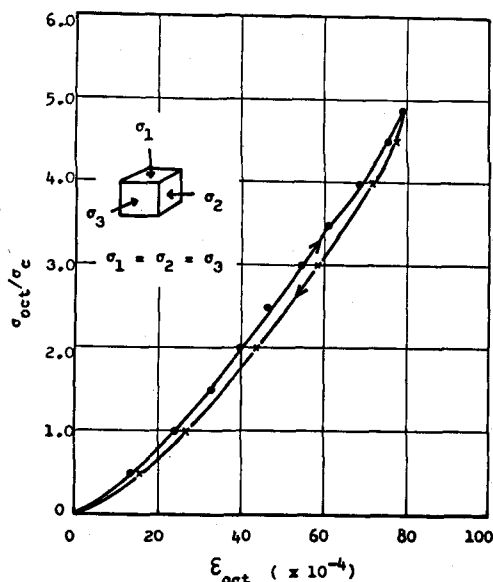


図-1 静水圧応力下の応力-ひずみ関係

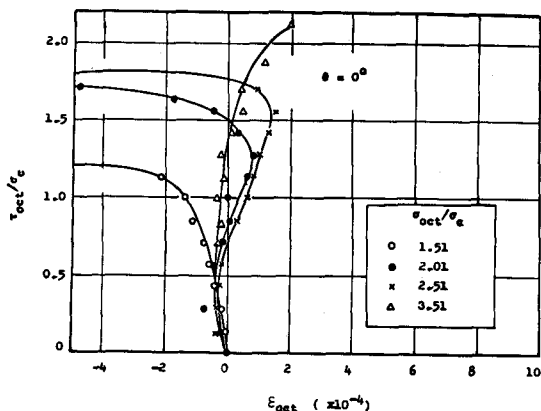


図-2 偏差応力による体積変化

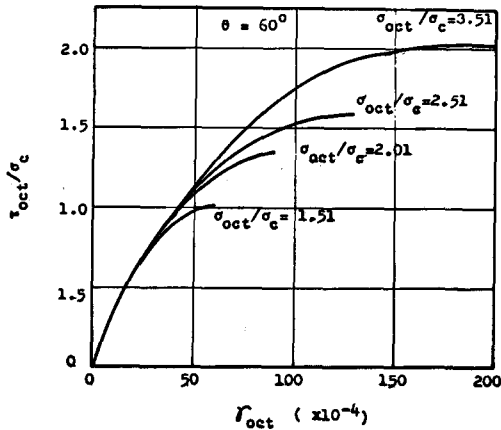


図-3 偏差応力による形状変化

(b)は σ_{oct}/σ_c が大きいときを示す。図-4 (a)の曲線は θ が小さいほど降伏応力のレベルが増加し θ によって変形特性が異なることを示すが、図-4 (b)は θ の影響を示していない。すなわち σ_{oct}/σ_c が大きい応力状態では載荷経路の影響がないことを示している。これは σ_{oct}/σ_c が大きいと変形は流動的になり、流動変形成分が載荷経路の影響をうち消してしまうためであろう。

(1)(2)の結果より、三軸圧縮下の大理石の変形をまとめる。すなわち応力状態が降伏応力以下であれば力と変形の関係は弾性的であるが、降伏以後は、たとえば次式のような関係であらわすことができる。

$$\epsilon_{oct} = f_1(\sigma_{oct}, \tau_{oct}, \theta)$$

$$\tau_{oct} = f_2(\sigma_{oct}, \tau_{oct}, \theta)$$

(3) 異方性

比例載荷されると、内部に生じるクラックは方向性をもつて発達しその結果材料の性質も方向性をもつことになる。これは偏差応力の増加にともなう異方性の発生を意味する。ここでは降伏応力の80%の応力状態まで載荷されたときの異方性の発生が検討されている。図-5に三軸圧縮下の降伏応力が図示されている。なお降伏応力は荷重が急激に変化するときの応力状態でもとめた。

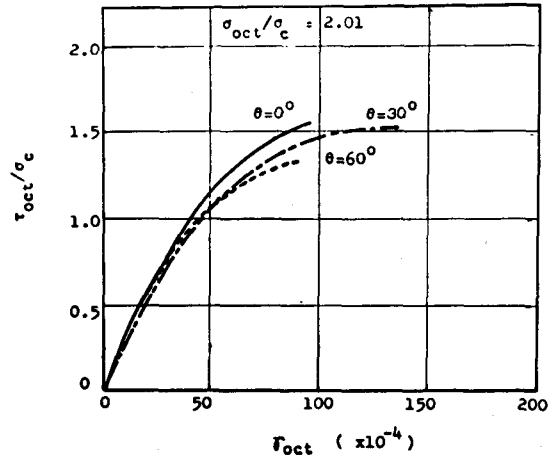


図-4 (a) 載荷経路が形状変化に与える影響

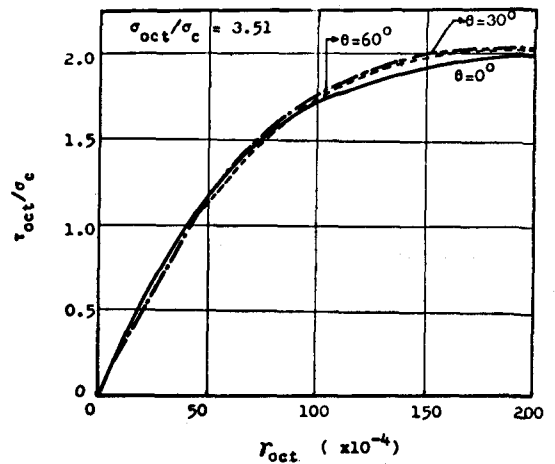


図-4 (b) 載荷経路が形状変化に与える影響

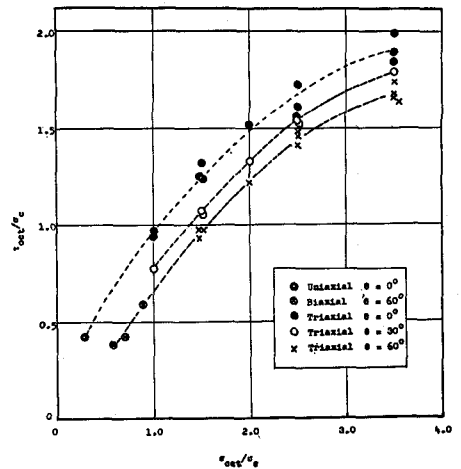


図-5 降伏応力

材料の質的变化が垂直応力成分によって生じるかもしれない。そのため静水圧履歴された供試体の一軸圧縮下での応力-ひずみ曲線が図-6で比較されている。これによるとすくなくとも $\sigma_{oct} = 2800 \text{ kg/cm}^2$ まで載荷された供試体の応力-ひずみ曲線は静水圧履歴の影響を受けていないことがわかる。この履歴応力状態は $(\sigma_{oct})/\sigma_c = 2.51$ に対応している。したがって $\sigma_{oct}/\sigma_c = 2.51$ の状態で偏差応力が降伏応力以下で与えられた場合近似的に材料の質的变化は偏差応力の変化のみによって与えられたものと考えることができる。

図-7および図-8は $\Theta = 30^\circ$ で載荷されたときに発生する異方性を検討する資料である。図-7は各軸方向の弾性係数を、図-8は各軸方向のポアソン比を示す。これらは偏差応力の増加にともない変形定数が方向性を顕著にすることを示し、特にポアソン比の変化はよくそのことを示している。残留強度についても方向性を調べたが、非常にデータのバラツキが大きく方向性を認めることができなかった。

4. あとがき

本実験であつかった応力レベル内での大理石の三軸圧縮下の変形特性をまとめると次のようである。

- (1) 垂直応力と体積変化の関係は近似的に線型で弾性的である。また偏差応力による体積変化は降伏応力以下では非常にわずかである。
- (2) 降伏応力以上の応力が作用するときの形状変化は垂直応力成分、偏差応力成分そして載荷経路を示すパラメーターであらわされる。
- (3) 偏差応力成分の増加にともない異方性が顕著になる。

異方性の発生については今後載荷時に与えられる変形定数により、更に検討を進めたい。

参考文献

- 1) 著者：“三軸圧縮下におけるモルタルの変形特性” 土木学会論文報告集投稿中
- 2) 著者：“モルタルのようなぜい性材料の変形特性” 第5回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要

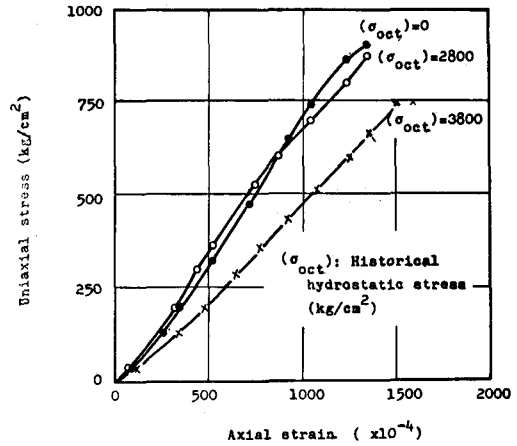


図-6 静水圧履歴をうけた供試体の応力-ひずみ関係

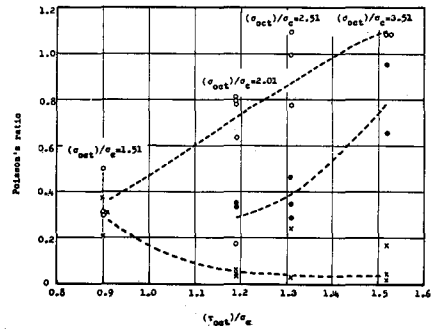


図-7 偏差応力の履歴による三軸方向の弾性係数の変化

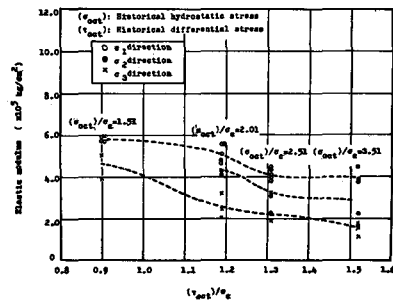


図-8 偏差応力の履歴による三軸方向のポアソン比の変化

On the Characteristics of Deformation of Rock-Like Materials

Kazumasa Tomita, Masatsugu Akimoto
and Toshikazu Kawamoto
Department of Civil Engineering
Nagoya University

It is the purpose of this study to find out experimentally the characteristics of deformation of rock material having little porosity such as marble under the state of triaxial compression.

The cubic specimens (5.5 cm x 5.5 cm x 5.5 cm) used in tests are marble from Miya and their porosity is 0.35 % .

The test data obtained from 150 specimens indicate the following results :

- (1) The stress-strain relationships after failure represented by the sudden change of stress-strain ratio are affected by the value of hydrostatic and deviatoric stress components and the stress path.
- (2) The change of volume after failure is almost elastic.
- (3) The mechanical behaviour transfer from brittle to ductile state as increasing of confining stresses.

Also it is shown that marble become to be anisotropic when subjected to the state of deviatoric stress.