応力状態の変化に伴う大理石とモルタルの変形挙動*

川 本 眺 万** 富 田 和 政***

Variation in the Characteristics of Deformation of Marble and Mortar Due to Transition of Stress from Isotropic State to Anisotropic State

by

Toshikazu KAWAMOTO

(Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

and Kazumasa TOMITA

(Nakanihon Kensetsu Consult Co., Ltd., Nagoya)

In the previous tests performed of cubic specimens of cement mortar, the authors showed that the material would turn anisotropic with increase of the deviatoric stress component, and that the texture of the material underwent changes with increase of its hydrostatic stress component. From these results it is supposed that cement mortar which seems to be macroscopically homogeneous and isotropic will exhibit anisotropy not by the intrinsic property of the material, but by the transition of stress in state, and that the internal change of the texture of the material depends upon the degree of porosity contained in the material.

The triaxial compression tests by experiments I and II were therefore performed of cement mortar and marble specimens with considerable difference in porosity in them respectively under various states of stress, in order to investigate the relationship between the textural change and the characteristics of deformation due to the transition of stress from isotropic state to anisotropic state. From the results of these tests the authors found the following facts.

(1) The internal texture of the material undergoes changes and resistance against deformation decreases with increase of hydrostatic stress under different levels of stress on mortar and marble. The characteristics of deformation tend also to be anisotropic as deviatoric stress increase.

(2) The characteristics of deformation are definitely determined by the state of stress regardless of its path if the given stress of the material is below its yield stress.

(Received Oct. 16, 1970)

1 ま え が き

岩石の力学的挙動に影響する要因として、岩石の成因に起因する地質学的構造異方性をあげることができる。最近では、赤井らが結晶片岩を使用して、構造異方性が岩石の力学的挙動に与える研究を行なった。

著者らがさきに行なったモルタルの三軸圧縮試験結果は、偏差応力成分の増加とともにモルタルが異方性化すること、平均応力成分の増加にともない材料に構造変化が起こることを示した。このことは巨視的には等方、等質とみなせるモルタルが材料自身の性質によってではなく、応力状態によって異方性をもつこと、そして内部的な構造変化は空隙の存在に関係することを示すようである。

そこで、構造変化と異方性に関連する変形挙動と応力状態の関係を検討するために、実験Ⅰと実験Ⅱが行なわれた。

なお、本論文では、材料の異方性化と材料の構造変化を次に示すような意味で使いわけた。すなわち、偏差応力成分による構造変化を材料の異方性化、そして平均応力成分による構造変化を材料の構造変化とした。

2 実 験 概 要

2・1 供試体

モルタル：モルタルの材料は普通ポルトランドセメント（大阪セメントK.K.）と豊浦標準砂である。モルタルの重量配合比を次に示す。

水：セメント：砂＝0.65：1：2

供試体の形状は立方体で、一辺が5.5cmの供試体は実験Ⅰで、一辺が10.8cmの供試体は実験Ⅱで使われた。

* 原稿受理 昭和45年10月16日

** 正 会 員 名古屋大学工学部 名古屋市中村区不老町

*** 中日本建設コンサルタント(株) 名古屋市中村区堀内町堀内ビル

供試体は打設後24時間恒温室(20±1℃)内に置かれ、その後水中(20±1℃)で材令27日まで養生された。そして24時間空中乾燥した供試体が試験された。

大理石：山口県美禰市産の大理石を実験Ⅰで使用した。大理石は白色で、巨視的には等方、等質とみなせるものである。供試体は一辺 5.5 cm の立方体である。大理石の物理的性質を次に示す。

比重	空隙率	弾性係数	ポアソン比	圧縮強度	単位体積重量
2.7	0.1%	6.6×10^5 kg/cm ²	0.4	797 kg/cm ²	2.7 ton/m ³

2.2 三軸圧縮試験機

本実験で使用した三軸圧縮試験機は6個の油圧ジャッキで構成され、ジャッキは互いに直交する3方向に2個ずつ向かい合っておりつけられている。載荷能力は水平方向で100 t、垂直方向で200 tである。本機の詳細は文献2)に譲る。

2.3 実験方法

載荷方法の説明は後述するのでここでは省略する。

変形の測定は実験Ⅰと実験Ⅱでは異なっている。実験Ⅰでは、供試体の4側面にはりつけたクロスストレーンゲージ(ゲージ長10 mm)で、実験Ⅱでは、供試体の主軸方向に埋め込んだ3個のモールドストレーンゲージ(ゲージ長40 mm)で測定した。

供試体と加圧板の間の摩擦を減じるためにシリコングリスを塗布したテフロンシートが使用された。

3 荷重履歴をもつ供試体による実験(実験Ⅰ)

3.1 概要

実験Ⅰの目的は荷重履歴をもつ供試体によって、応力状態の変化にともなう材料の構造変化ならびに異方性化を実験的に確認することと、空隙の多い材料と少ない材料とではどのような差異があるかを調べることである。

そのために空隙の多い材料としてモルタルが、少ない材料として大理石が選ばれた。

これら2つの材料の変形挙動の相違を空隙の大小だけで評価できないが、モルタルや大理石で代表できるような岩石の一般の傾向を知ることはできる。

3.2 平均応力成分の増加に伴う材料の構造変化

平均応力成分による材料の構造変化を検討するための載荷方法は次のようである。まず最初、静水圧載荷によって供試体に所定の平均応力状態を与え、ついでこの応力状態を解放した。このようにして、静水圧履歴荷重をうけた供試体は再び一軸圧縮され、それと同時に供試体の変形が測定された。それらの結果で、平均応力成分の増加に伴う材料の構造変化が考察された。

このときの静水圧履歴応力 σ_{hoct}/σ_c はモルタルに関しては $\sigma_{hoct}/\sigma_c=1.89, 3.78, 6.67, 10$ の4種であり、

大理石に関しては $\sigma_{hoct}/\sigma_c=3.59, 4.98$ の2種である。ここで σ_c は一軸圧縮強度を示し、モルタルでは $\sigma_c=366$ kg/cm²、大理石では $\sigma_c=797$ kg/cm² である。 σ_{hoct} は静水圧履歴応力(または平均履歴応力)である。

Fig. 1 におおのの静水圧履歴応力をうけたモルタルと大理石の応力-ひずみ曲線が示されている。Fig. 1 に示す履歴応力をうけない供試体の応力-ひずみ曲線($\sigma_{hoct}/\sigma_c=0$)を規準にして、変形挙動の変化をみてみよう。

Fig. 1. (a) Stress-strain relationships of mortar specimens after subjected to historical hydrostatic stress.

Fig. 1. (b) Stress-strain relationships of marble specimens after subjected to historical hydrostatic stress.

Fig. 1(a)は静水圧履歴応力の大きさに応じて、モルタルの応力-ひずみ曲線が変化する状況を示している。静水圧履歴応力が、 $\sigma_{hoct}/\sigma_c=1.89$ より小さければ、ほとんど曲線に変化はみられないが、 $\sigma_{hoct}/\sigma_c=3.78$ になると変化は明らかになり、さらに $\sigma_{hoct}/\sigma_c=6.67$ 、または10になると同一の材料の応力-ひずみ曲線と考えられないほど異なった曲線となる。

Fig. 1(b)は大理石の場合について示したものである。モルタルでは、小さな σ_{hoct}/σ_c で変形挙動の変化を認めることができたが、大理石の場合、 $\sigma_{hoct}/\sigma_c=3.59$ であっても応力-ひずみ曲線に目立った変化が現われ

ない。しかしながら、 $\sigma_{hoct}/\sigma_c=4.88$ では変形挙動の変化を認めることができる。

以上より、モルタルと大理石とでは程度の差はあるが、作用する平均応力成分がある限度をこえて作用すると、これらの材料の変形挙動に変化がおこることがわかる。

モルタルと大理石の比較から明らかなように、変形挙動の変化は空隙の多い材料で顕著である。このことは、空隙の多い材料に作用する平均応力成分が増加すると、材料内部に急激な構造変化が起こることを示し、またそれはおもに空隙の存在に起因するものと考えられる。そこでモルタルの構造変化の状況を弾性係数 (Fig. 2)、ポアソン比 (Fig. 4) および残留強度 (Fig. 3) の変化で見てみることにした。ここであつかわれた弾性係数、ポアソン比の値は割線弾性係数とそれに対応するポアソン比で、低応力状態での値を平均したものである。

Fig. 2 は弾性係数が $\sigma_{hoct}/\sigma_c=2.5$ から 5 の間で急激に減少し、5 以上では一定であることを示している。また、Fig. 3 は残留強度が、 $\sigma_{hoct}/\sigma_c=3.5$ から 7 の間で急激におちることを示している。両図で認められる挙動の急激な変化は材料の構造変化によるものである。

Fig. 2. Variation of Young's modulus of mortar specimen to magnitude of historical hydrostatic stress.

Fig. 3. Residual strength of mortar specimen after subjected to historical hydrostatic stress.

Fig. 4. Variation of Poisson's ratio of mortar specimen to magnitude of historical hydrostatic pressure.

ことは充分推測される。なお、弾性係数と残留強度の急激な変化が同じ応力レベルで起こらないことは変形特性と強度特性に影響する要因が一致しないことを示しているようである。

Fig. 4 は静水圧履歴応力が異なってもポアソン比は一定であることを示し、興味ある結果である。

3.3 偏差応力成分の増加に伴う材料の異方性化

偏差応力による材料の異方性化を検討するために、次に示すような方法で履歴載荷された供試体が準備された。

その方法とは、まず最初、供試体に静水圧応力を与え、ついで各軸方向の偏差応力成分が所定の比率で増加、減少し、平均応力成分が先に加えられた静水圧応力と等しくなるように載荷する方法である。本実験では、中間主応力方向の偏差応力が生じないように行なわれた。そして、供試体への載荷は降伏応力の 80% まで行なわれた。降伏応力は予備実験でもとめられており、降伏応力の 80% に対する変形挙動は弾性的であるとみなされた。

以上の方法で載荷された荷重は逆の順序で除荷された。このような荷重をうけた供試体の各主応力方向の履歴応力度は各主応力方向で異なっている。この供試体を用いて、各軸方向の一軸圧縮試験が行なわれた。それらの結果を比較すれば偏差応力の作用による材料の異方性化を調べることができる。

供試体が降伏しないようにして、高いレベルの偏差応力状態を供試体を与えるためには、最初に行なう静水圧載荷を高いレベルの段階まで行なわなければならない。しかしながら、静水圧応力が大きくなると、前記した平均応力成分による材料の構造変化が生じ、偏差応力の作用による変形挙動を単独に得ることが困難になる。特にモルタルの場合、低次の静水圧載荷で材料が変化する。このことを考慮して、次のように履歴応力の大きさが決められた。

モルタルに対して

(1) $\sigma_{hoct}/\sigma_c=1.22$	$\tau_{hoct}/\sigma_c=0.54$
(2) $\sigma_{hoct}/\sigma_c=1.44$	$\tau_{hoct}/\sigma_c=0.64$
(3) $\sigma_{hoct}/\sigma_c=1.66$	$\tau_{hoct}/\sigma_c=0.73$
(4) $\sigma_{hoct}/\sigma_c=1.89$	$\tau_{hoct}/\sigma_c=0.82$

大理石に対して、

- (1) $\sigma_{hoct}/\sigma_c = 1.54$ $\tau_{hoct}/\sigma_c = 0.92$
- (2) $\sigma_{hoct}/\sigma_c = 2.05$ $\tau_{hoct}/\sigma_c = 1.22$
- (3) $\sigma_{hoct}/\sigma_c = 2.56$ $\tau_{hoct}/\sigma_c = 1.34$
- (4) $\sigma_{hoct}/\sigma_c = 3.59$ $\tau_{hoct}/\sigma_c = 1.55$

ここで、 τ_{hoct} は八面体せん断履歴応力を示す。

Fig. 5 は偏差履歴応力をうけた供試体が各軸方向で一軸圧縮されたときの応力-ひずみ曲線の一例である。Fig. 5 で認められる傾向は最大主応力方向と中間主応力方向の応力-ひずみ曲線はほぼ同じ傾向を示し、最

Fig. 5. (a) Stress-strain relationships of mortar specimen after subjected to historical deviatoric stress.

Fig. 5. (b) Stress-strain relationships of marble specimen after subjected to historical deviatoric stress.

Fig. 6. (a) Variation of Young's modulus of mortar specimen to magnitude of historical deviatoric stress.

Fig. 6. (b) Variation of Young's modulus of marble specimen to magnitude of historical deviatoric stress.

Fig. 7. (a) Variation of Poisson's ratio of mortar specimen to magnitude of historical deviatoric stress.

Fig. 7. (b) Variation of Poisson's ratio of marble specimen to magnitude of historical deviatoric stress.

小主応力方向の応力-ひずみ曲線が他の方向の曲線と異なることである。このような傾向は他の大きさの偏差履歴応力をうけた供試体についても認められた。

Fig. 6 と Fig. 7 は Fig. 5 に示す結果を弾性係数とポアソン比で示したものである。ここで示されているポアソン比は、クロスストレングージによって測定された互いに直角な2方向のひずみの値の比から求められる見かけのものである。Fig. 6 で各軸方向の弾性係数を比較してみると、弾性係数と各軸間の関係は Fig. 5 で認められる応力-ひずみ曲線の関係とはほぼ一致している。一方、各軸間のポアソン比の比較を示す Fig. 7 は最大主応力方向、中間主応力方向、最小主応力方向の順にポアソン比が小さくなることを示し、各軸間に異なった性質が存在することを示している。

以上より、偏差応力が作用すると、モルタルや大理石の変形に異方性が生じることがわかる。そして、空隙の差が非常に大きい両材料でこのような挙動が生じることは、すべての岩石のようなぜい性材料でこのような挙動が生じることを示しているようである。

本実験の結果では、ポアソン比を考えた場合、3方向での異方性を、また弾性係数を考えた場合、2方向での異方性を考えることができたが、異方性の状況は作用する偏差履歴応力状態によって種々変化することが推察される。

次に、偏差履歴応力の大小により、異方性の程度が

Fig. 8. (a) Variation of Young's modulus of mortar specimen to magnitude of historical deviatoric stress.

Fig. 8. (b) Variation of Young's modulus of marble specimen to magnitude of historical deviatoric stress.

どのように変化するかを弾性係数、ポアソン比および残留強度の3項目で比較してみよう。

Fig. 8 は偏差履歴応力のために、各軸方向の弾性係数がどのような値になるかを示すものである。Fig. 8 (b)の大理石の場合、弾性係数の異方性は最小主応力方向と他の主応力方向の間に生じ、異方性の程度は偏差応力の増加とともに大きくなるようである。他方、モルタルの場合 (Fig. 8(a)) はデータのバラツキが比較的大で、大理石の場合ほど明確でないが、同様の傾向が存在するようである。Fig. 9 は偏差履歴応力のために、各軸方向のポアソン比がどのような値になるかを示すものである。

Fig. 9. (a) Variation of Poisson's ratio of mortar specimen to magnitude of historical deviatoric stress.

Fig. 9. (b) Variation of Poisson's ratio of marble specimen to magnitude of historical deviatoric stress.

Fig. 9(a)とFig. 9(b)は、モルタルも大理石もある限度以上の偏差履歴応力をうけると、ポアソン比は異方性をもつことを示している。特に最大主応力方向のポアソン比は、0.5以上の非常に大きな値となり、異方性の存在を顕著に示している。このことは、最小主応力方向に垂直な面にクラックが観察されることから考え、最小主応力方向に垂直な面にクラックがさらに発達したためであると考えられる。

各主応力方向のポアソン比の変化状況は、モルタルの場合と大理石の場合とでは異なっている。これは両材料の偏差応力による内部的な構造変化の違い、つまり破壊特性の違いを示すものと思われる。

Fig. 10は偏差履歴応力のために、各軸方向の残留強度がどのような値になるかを示すものである。前述したように、弾性係数とポアソン比に関しては異方性を認めることができたが、残留強度に関しては認めることができない。すなわち、Fig. 10(a)とFig. 10(b)に示すように、モルタルと大理石の残留強度の値は非常にバラつき、方向による差を示していない。

以上は履歴応力をうけた供試体の応力-ひずみ曲線、弾性係数、ポアソン比および残留強度を使用して、材料内部の構造変化に基づく異方性ならびに構造変化を間接的に検討してきたものであるが、これらの問題は

Fig. 10. (a) Residual strength of mortar specimen after subjected to historical deviatoric stress.

Fig. 10. (b) Residual strength of marble specimen after subjected to historical deviatoric stress.

微視的、顕微鏡的立場からさらに検討されなければならない。

4 変形定数の比較による実験 (実験 II)

4・1 概要

ぜい性材料の力学的解析において弾性係数やポアソン比が使用されるが、これらの変形定数は応力状態とともに変化する。このことは前述したことであるが、ここではぜい性材料の変形定数と応力状態の関係を理解するために、次の3点を目的とする実験が行なわれた。

- (1) 変形定数は応力状態の変化にともないどのように変化するか。
- (2) 変形定数と載荷経路の関係
- (3) 応力状態の変化にともなうぜい性材料の異方性化。

以上の問題点を明らかにするために、モルタル立方供試体が軸対称三軸圧縮された。

4・2 載荷方法

本実験で行なった軸対称三軸圧縮載荷方法は3種類で、次のように仮称する。

- c-1 側圧一定載荷
- c-2 平均応力一定載荷
- c-3 比例載荷

各方法の載荷経路を $q(=\sigma_1 - \sigma_3)$ と $p(=(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3)$ を用いて示すとFig. 11のようになる。

Fig. 11. Loading paths.

各載荷方法は主応力間に特別な関係をもっているの以下に示しておく。

c-1の場合

$$\sigma_3 = \text{一定であるから, } d\sigma_3 = 0$$

c-2の場合

$$p = \text{一定であるから, } d\sigma_1 = -2d\sigma_3$$

c-3の場合

$$k = d\sigma_1 / d\sigma_3 = \text{一定 (kは定数)}$$

4・3 軸対称圧縮下の応力-ひずみ関係

軸方向と横方向との間に異方性が存在すると、4個

の変形定数が必要となる。いま、軸方向荷重に対する弾性係数を E_1 、そしてポアソン比を ν_1 とする。同様に横方向の荷重に対して E_3 、 ν_3 とする。

連続体の微小部分でのひずみ増分の関係は次のようになる。

$$d\varepsilon_1 = \frac{d\sigma_1}{E_1} - \frac{2\nu_3 d\sigma_3}{E_3} \quad (1)$$

$$d\varepsilon_3 = (1-\nu_3) \frac{d\sigma_3}{E_3} - \frac{\nu d\sigma_1}{E_3} \quad (2)$$

(1)式と(2)式を前記した主応力間の関係を用いて変形すると次のようになる。

$$E_1 = \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} \quad (3)$$

$$E_1 = \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} (1+\nu_3) \quad (4)$$

$$E_1 = \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} \left(1 - \frac{2\nu_3}{k}\right) \quad (5)$$

$$E_3 = \frac{d\sigma_3}{d\varepsilon_3} \left(\frac{\nu_3-1}{2} - \nu_1\right) \quad (6)$$

$$E_3 = \frac{d\sigma_3}{d\varepsilon_3} \left(\frac{1-\nu_3}{k} - \nu_1\right) \quad (7)$$

上式で、 $d\sigma_1/d\varepsilon_1$ 、 $d\sigma_3/d\varepsilon_3$ は測定値として、また k は既知数としてあつかうことができるので、これらを上式に代入すれば、実験結果から E_1 、 E_3 、 ν_1 、 ν_3 の各定数をもとめることができる。ただし、この場合、載荷経路に関係なく変形定数は一定であるという前提が成立しなければならない。

4・4 応力状態の変化に伴う変形定数の変化

載荷経路 c-1 で載荷されたときの軸方向弾性係数(測定値と(3)式とからもとめる)と応力状態の関係が Fig. 12 に示されている。Fig. 12 から明らかなことは、軸方向弾性係数の大きさは偏差応力のレベルが小さければ、平均応力の大きさに関係なくほとんど一定で、偏差応力のレベルが大きくなると平均応力のレベルによって異なることである。また、平均応力が450~600 kg/cm² のとき偏差応力の増加に対する軸方向弾性係

Fig. 12. Variations of Young's modulus in the axial direction for mortar specimen.

数の変化は、他の平均応力の場合とは異なっている。このことは、ある応力状態に達すると、ぜい性材料の変形定数は急激に変化することを示し、この応力状態に達するとモルタルの変形挙動は急激に変化することを示している。

4・5 変形定数と載荷経路

Fig. 13 には 載荷方法 c-1 で求めた軸方向弾性係数と、載荷方法 c-2 と c-3 が交差する点で求めた軸方向弾性係数が比較されている。Fig. 13 から明らかなように、異なった載荷経路に対する軸方向弾性係数は、実験範囲内の応力状態(これはモルタルに降伏状態を与えない応力状態である)では、ほぼ一致することを示している。したがって、応力状態が降伏応力に達しない限り、応力とひずみは1対1の関係にあり載荷経路に無関係であることがわかる。また、この結果は、(3)式から(7)式の関係式を用いて、変形定数をもとめることができることを示している。

Fig. 13. Comparisons of Young's moduli in the axial direction obtained under different loading paths.

4・6 応力状態の変化に伴う異方性の発生

前節で変形定数は載荷経路に関係ないことが確かめられたから、(3)式から(7)式を用いて軸方向弾性係数と横方向弾性係数をもとめ、それらの比によって異方性を検討した。

Fig. 14 に弾性係数の比 (E_3/E_1) が、各応力状態を示す位置に示されている。これらの値は1との差が大であれば異方性が大であることを示している。

Fig. 14 の値は低拘束圧のもとでは偏差応力が増加しても異方性は余り現われないが、高拘束圧のもとで偏差応力が増加すると急激に異方性を表わすことを示している。

以上の結果は実験 I の結果ともよく一致しているようである。

5 む す び

本実験は応力状態の変化による材料内部の変化に起

Fig. 14. Ratio of lateral Young's modulus to axial Young's modulus under different loading paths.

因する変形挙動の変化を、外的な観察からだけで検討を加えたものである。そのため、内的現象と外的現象を関連づけて説明することはできなかった。今後さらに、顕微鏡的立場にたった研究によって、本研究は補足されねばならない。実験Ⅰの結果は、ある応力状態での挙動を、履歴応力をうけた供試体を一軸圧縮試験したときの結果であつたものである。したがって、実際の応力状態に対しては間接的な接近であると考え

られる。実験Ⅱは実験Ⅰの間接的な方法の不完全さを補なうために行なわれたもので、実験Ⅰの結果を実験Ⅱで確認することができたようである。

最後に本実験から得た結論的内容を記し、むすびとしたい。

- (1) 平均応力成分が増加すると変形抵抗は減少する。
- (2) 偏差応力が作用するとぜい性材料の変形挙動に異方性が生じる。
- (3) 降伏応力以下の応力状態であれば、変形と応力状態は1対1の対応にある。

この研究は昭和44年度文部省科研費（試験研究 研究代表者 川本桃万）による補助を受けたことを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 赤井浩一, 山本和夫, 有岡正樹, 土木学会論文報告集, **170** (1969).
- 2) 富田和政, 秋本昌胤, 川本桃万, 土木学会論文報告集, **174** (1970).
- 3) Kawamoto, T., K. Tomita, and M. Akimoto, Proc. of the 2nd Cong. of the Int. Soc. of Rock Mech., Beograd, 2-2 (1970).