

(46) Dayei 大理石及び Laxiwa 花崗岩の強度特性に及ぼす σ_2 効果について

Effect of the intermediate principal stress on the strength behavior of Dayei marble and Laxiwa granite

李 小春*・許 東俊**・高橋 学*

Xiaochun LI, Dongjun XIU, Manabu TAKAHASHI

To clarify further the effect of the intermediate principal stress (σ_2) on the strength behavior of rocks, Dayei marble and Laxiwa granite were deformed by using a Mogi-type true triaxial compressive machine. According to our observations and those reported by other researchers, under certain σ_2 and σ_3 , for the rocks with uniaxial compressive strength (σ_c) less than 30Mpa, maximum principal stress (σ_1) at failure may increase by less than 20% over that under the corresponding conventional triaxial stress, while for the rocks with σ_c more than 100Mpa, that is 20-47%. Also because of the effect of σ_2 , in stress space, the strength surface of Laxiwa granite encloses that predicted by Mohr-Coulomb criterion and convexes towards outside.

1. はじめに

岩石の基本的な力学的性質を把握するために、古くから多くの研究者が実験室での真三軸応力状態の実現に向けて努力してきた。1960年代前半に中空円筒供試体を用い、内圧と外圧を負荷した状態に軸方向の圧縮やねじりを同時に負荷したり、同じく封圧下で圧裂や曲げ試験を行い、三つの相異なる応力状態を供試体中に実現しようとする方法が採用された。しかしながらこれらの方法には、岩石の様な不均質でかつ非弾性的な挙動を示す材料に、応力勾配が生じるような試験を行っても測定結果の信頼性と再現性は乏しいことが指摘されている。従ってそれ以後、角柱型の供試体を用い、供試体の三つの表面に薄い鋼製フラットジャッキまたは剛体ピストンまたは液体によって載荷し、相異なる主応力状態を実現しようとする手法が採用された(Hojem and Cook 1968; 丹羽ら 1966; 赤井ら 1967; 茂木 1970; 富田ら 1970; Serata et al 1972; 萩野ら 1979; 大沼ら 1980; 西田ら 1983; 古住ら 1986)。これらの手法の中で特に注目するのは茂木によって考案されたものである。彼の装置では、最大及び中間主応力は剛体ピストンで加えられ、最小主応力は圧力容器内で液体によって加えられた。この手法は他の手法と比べると高い応力が加えられ、しかも試験手順が簡略化され、試験結果の再現性も良くなってきた。数種類の岩石に対し行った試験結果により、従来の封圧試験では説明することのできなかつた岩石の三軸組合せ応力下の変形・破壊特性の主要な部分が明らかになった。その後、他の真三軸試験装置(星野・小出 1980; 木下 1984; 周群林 1989; 許東俊 1989)は茂木型を参考にして設計された。これらの試験装置を用い、数十種類の岩石に対し、真三軸試験が行われた。いずれの岩種においても強度・変形・破壊挙動に及ぼす中間主応力の影響が確認された。著者らは茂木式の真三軸試験装置を用い、Dayei 大理石及び Laxiwa 花崗岩の強度特性を調べたので、これらの試験結果の他に、他の研究者によって求められた強度特性についても中間主応力効果を的をしばり併せて議論する。

2. 試験手法

著者らによって開発された試験装置は、基本的には茂木(1970)によって考案されたものと同じであり、

* 通産省工業技術院地質調査所

** 中国科学院武漢岩土力学研究所

主に軸方向の載荷枠、側方(中間主応力方向)のジャッキ、そして圧力容器から構成されている(図 1a)。もう少し詳しく圧力容器を見ると、図 1b のようになる。最大及び中間主応力は剛体ピストンで加えられ、最小主応力は圧力容器内で流体によって加えられる。供試体の寸法は 5×5×10cm の角柱型である。この寸法の供試体の場合、最大・中間・最小主応力方向にそれぞれ 800,400,200Mpa の最大応力を載荷できる。最大主応力方向のエンドピースは供試体にエポキシ樹脂で固定され、中間主応力方向は銅箔とシリコングリースを塗ったテフロンシートの組合せによる減摩剤が用いられている。この減摩剤の採用により、中間主応力方向の摩擦をほとんど無くすることができた。

図 2 は試験で採用した三種類の載荷経路を示している。タイプ A は破壊強度に及ぼす中間主応力の影響を調べるために採用したものである。最初に静水圧で最小主応力(点 a)を与え、次に最大及び中間主応力を同時に載荷する(点 b)。このとき、最大主応力方向は中間主応力方向と同じ値を示している。最後に、最大主応力を増加し、供試体の破壊に至るまで載荷する。

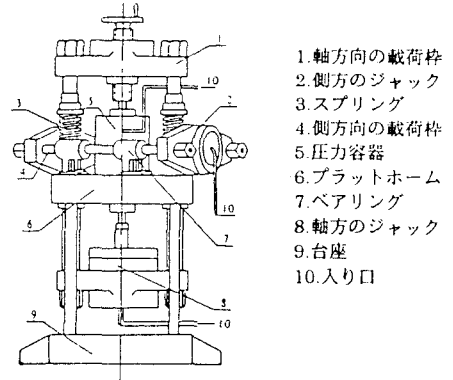
タイプ B, C は岩石の破壊曲面の形状を調べるために採用したものである。破壊曲面は仮想又は実際の破壊条件式 ($f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)=0$) の応力空間(stress space)における仮想的な曲面の事である。岩石強度に及ぼす中間主応力の影響は岩石の実際の破壊曲面の形状からも理解することができる。タイプ B は破壊曲面における応力子午線(meridians)の形状を調べるために採用したものである。そのため、載荷過程中に載荷経路は予定のある応力子午面に沿って載荷することが必要である。載荷過程中次式で示される Lode の応力角度(θ_σ)が一定となるように載荷する

ると、必ず載荷経路は対応する応力子午面に沿う。また、タイプ C は π 平面における破壊曲面の形状を調べるために採用したものである。C の載荷経路では、まず予定の静水圧(p)を与え、 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$ の状態にする。その後次式で示される平均主応力が一定値を保つよう、三つの主応力を増加又は減少し、破壊に至るまで載荷する。

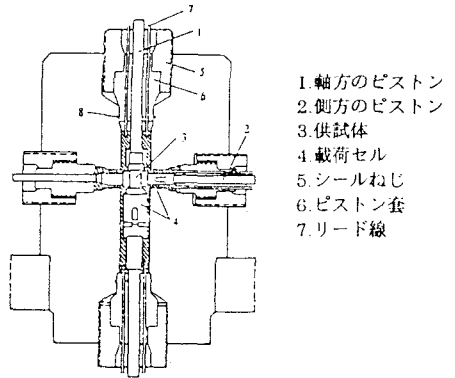
$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (1)$$

$$q = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / \sqrt{3} \quad (2)$$

$$\theta_\sigma = \tan^{-1} \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (3)$$

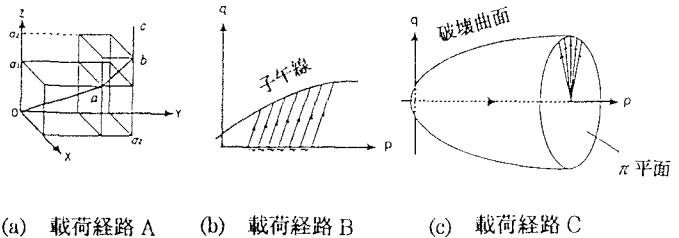


(a) 真三軸装置の外観略図



(b) 圧力容器の概要図

図-1 真三軸試験装置



(a) 載荷経路 A

(b) 載荷経路 B

(c) 載荷経路 C

図-2 載荷経路

ここで、 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 はそれぞれ最大、中間、最小主応力である。pは平均主応力、qは主応力空間において静水圧軸からの距離に相当する。 θ_σ はLodeの応力角度である。

3. 実験結果

強度特性に及ぼす中間主応力の影響は、図3と図4にあるように、 σ_1 と σ_2 との関係で整理すると最も強調されて示される。これらの図において中間主応力効果は $\sigma_2 = \sigma_3$ と $\sigma_1 = \sigma_2$ の間に挟まれた上に凸の曲線で示されている。 σ_3 の増加とともにこの中間主応力の影響量も増加していることがこの図から認められるが、次式のような無次元の値 k_2 を用いて整理してみる。

$$k_2 = (\sigma_1^{\max} - \sigma_1^{\min}) / \sigma_1^{\min} \quad (4)$$

ここで、 σ_1^{\max} 及び σ_1^{\min} は一定の σ_3 のもとで、 σ_1 の最大値及び最小値をそれぞれ示している。従って、 k_2 の値が大きいほど強度に及ぼす中間主応力の影響が大きいことを示している。こうして、Dayei大理石及びLaxiwa花崗岩の k_2 を調べるみると表1のようになった。どちらの岩種についても σ_3 の増加とともに k_2 の値が増加していることが認められる。

岩種	σ_1 (Mpa)	σ_3 (Mpa)	k_2
Dayei大理石	78	0	0.09
		10	0.22
		30	0.25
		40	0.31
Laxiwa花崗岩	152	0	0.19
		10	0.31
		30	0.47

図5はLaxiwa花崗岩の破壊曲面上における五つの応力子午線の形状を示し、各シンボルは各Lodeの応力角度 θ_σ を示している。いずれの

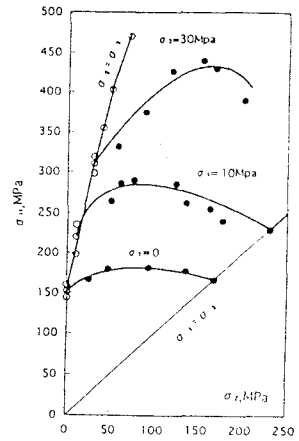


図-3 Laxiwa花崗岩の中間主応力効果

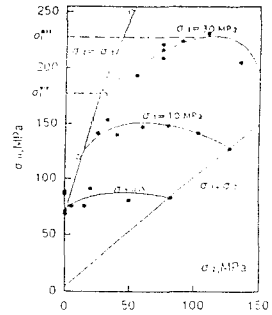


図-4 Dayei大理石の中間主応力効果

Lodeの応力角度においても良い直線性が示され、静水圧軸からそれぞれ異なった距離を有していることが示されている。図6は平均主応力 $p=130, 200$ Mpaの π 平面におけるqを示している。いずれの平均主応力においても π 平面上で外側に凸の形状をしており、中間主応力の影響を考慮していないMohr-Coulomb条件と大きく異なっていることが認められる。この外側への張り出しが中間主応力による影響であることがわかる。さらに、中間主応力の影響は平均主応力が大きくなるほど大きくなっていることも同様に認められる。

4. 中間主応力の影響量に関する議論

k_2 は強度特性に及ぼす中間主応力の影響を示す指標として採用したものであり、今までに報告されているデータを表2のように整理した。これらのデータには、三主応力をピストンで载荷した手法による結果は含まれていない。表からも明らかなように、どの岩種についても明瞭な中間主応力効果は認められるが、その影響量 k_2 はかなり広い範囲に分布している。図7は表2のデータをもとに k_2 に及ぼす最小主応力の影響をみるために、最小主応力を一軸圧縮強度で除した値で整理してある。岩種は大きく異なるが、全体的に以下のことが示されている。

- 1) $\sigma_3 = 0$ 、すなわち二軸試験の時には $k_2 = 10\%$ 程度、
- 2) σ_3 / σ_2 が大きくなるほど、 k_2 は急速に大きくなり、

表2 各岩種の k_2 値

岩種	σ_c (Mpa)	σ_3 (Mpa)	k_2
変質花崗岩 (葛修潤, 1989)	0.96	0.48	0.08
		0.60	0.06
		0.80	0.03
シルト砂岩 (張金鎔, 1979)	9.5	0.3	0.10
		0.9	0.07
		1.5	0.13
		3.5	0.15
砂岩 (許東俊, 1982)	35.0	5.0	0.11
		10.0	0.11
山口大理石 I (許東俊, 1985)	150.0	25.0	0.42
		50.0	0.40
山口大理石 II (高橋学, 1989)		20	0.44
Dayei大理石 (Authors')	78	0	0.09
		10	0.22
		30	0.25
		40	0.31
端穂粗面岩 (茂木清夫, 1971)	100	45	0.22
		60	0.19
		75	0.19
		100	0.18
福田花崗岩 (許東俊, 1985)	210	20	0.40
		60	0.47
Dunbar 苦灰岩 (茂木清夫, 1971)	260	25.0	0.44
		45.0	0.39
白浜砂岩 (高橋学, 1989)	60	8	0.11
		15	0.15
		20	0.09
		30	0.22
		50	0.22
梶内砂岩 I (高橋学, 1989)	97	5	0.06
		10	0.26
		15	0.23
梶内砂岩 (高橋学, 1989)	140	15	0.25
南夕頁岩 (高橋学, 1989)	100	25	0.20
		50	0.15
Laxiwa 花崗岩 (Authors')	152	0	0.19
		10	0.31
		30	0.47

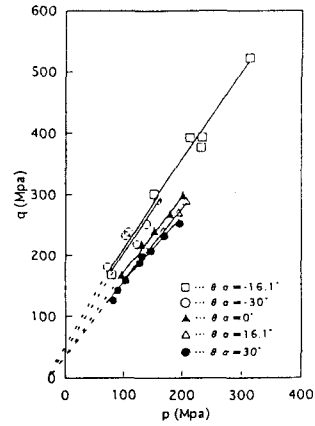


図-5 応力空間において Laxiwa 花崗岩の破壊曲面における五つの子午線の形状(載荷経路 B)

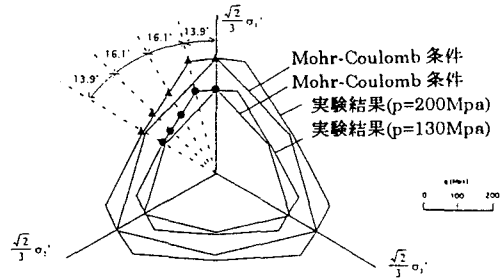


図-6 π 平面において Laxiwa 花崗岩の破壊曲面の形状

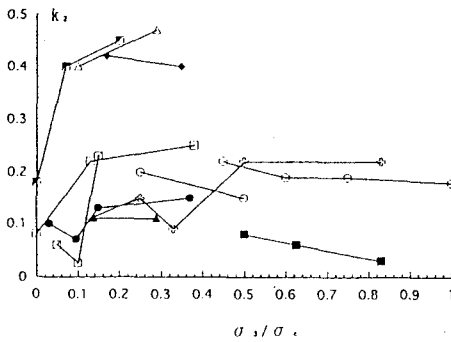


図-7 式(4)に定義された k_2 と σ_3/σ_c との関係。ここで、 σ_3 は最小主応力、 σ_c は一軸圧縮である。

- 3) σ_3/σ_c が0.1から0.5の間では、 k_2 はわずかに増加か、一定値を保っている。
- 4) σ_3/σ_c が0.5以上では、 k_2 は減少する傾向を示している。

ある岩種について最大の k_2 と一軸圧縮強度との関係を図8に示した。一軸圧縮強度が大きくなるにつれ、強度に及ぼす中間主応力の影響も大きくなるが示されておる。一軸圧縮強度が30Mpa以下の岩石では、 k_2 は20%以下であり、100Mpa以上の岩石では k_2 は20-47%の高い値を示している。

5. まとめ

最大・中間主応力は剛体ピストンで載荷し、最小主応力は圧力容器の中の流体で載荷される茂木式の真三軸軸装置をもちい、Dayei大理石とLaxiwa花崗岩の強度特性に及ぼす中間主応力の影響を調べた。また、現在までに報告されている強度に及ぼす中間主応力の影響量を調べ、一軸圧縮強度との相関について

整理してみた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) Dayei 大理石 Laxiwa 花崗岩とも強度に及ぼす中間主応力の影響は他の岩種同様著しいものがあった。
- 2) 両岩種とも、最小主応力の増加とともに強度に及ぼす中間主応力の影響が顕著になることが認められる。
- 3) π 平面において Laxiwa 花崗岩の破壊曲面は Mohr-Coulomb 条件から外れ、外側に凸の形状をしていることがわかった。これは、まさしく強度特性に及ぼす中間主応力の影響を示していることに他ならない。
- 4) 現在までに報告されている試験結果を整理すると、30Mpa 以下の一軸圧縮強度を示す岩石では、中間主応力による強度増加は 20%以下であるが、100Mpa を超える岩石では、強度増加は 20-47%の大きな値を示す。
- 5) 以上のように、強度に及ぼす中間主応力の影響は、岩種以外にも一軸圧縮強度や最小主応力によっても大きく異なることが明らかとなった。

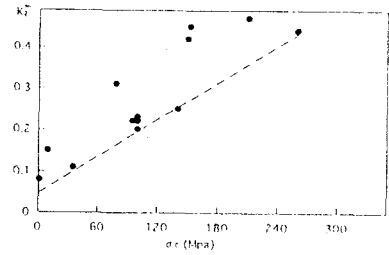


図-8 表-2での各種類岩石についての最大の k_2^m と一軸圧縮強度との関係。ここで、 k_2^m は各最小主応力下での各 k_2 の最大値

参考文献

- 1) 高橋 学・小出 仁：地下 1000m 程度における砂岩・頁岩の強度・変形特性に及ぼす中間主応力効果,地質調査所月報,40-4,pp.207-222,1989.
- 2) 高橋 学・小出 仁・星野一男：岩石における真三軸試験法について,地質ニュース,401,pp.38-50,1988.1
- 3) M.S.バタソーン：実験岩石力学(荻野正二他訳),古今書院.
- 4) Brace,W.F.:Brittle fracture of rocks.In:State of Stress in Earth's Crust. Judd,W.R.(ed).New York:Elsevier,pp.111-174,1964.
- 5) Vutukuri,V.S.et al:Handbook on Mechanical Properties of Rocks,Vol.I,Trans Tech Publications,1974.
- 6) 許 東俊・幸 志堅・李 小春他：RT3 型岩石高压真三軸儀の研製,岩土力学,11-2,pp.1-14,1990.
- 7) 李 小春・許 東俊：中間主応力対岩石強度的影響程度和規律,岩土力学,12-1,pp.9-16,1991.
- 8) 高 渠清他：多軸圧縮下紅砂岩の強度変形和破壊特性,岩石力学與工程學報,No.1,1983.
- 9) 張 金銜他：三軸試験中岩石の応力状態和破壊性質,力学學報,No.2,1979
- 10) 許 東俊：高孔隙性軟弱砂岩在一般三軸応力状態下的力学特性,岩土力学,3-1,pp.13-25,1982.
- 11) Mogi,K.:Fracture and flow of rocks under high triaxial compression,J. Geophys. Res.,76-5,pp.1255-1269,1971.
- 12) Mogi,K.:Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone, Tectonophysics,11-11,pp.111-127,1971.
- 13) Mogi,K.:Effect of intermediate principal stress on rock failure,J.Geophys. Res.,V.72,5117-5131,1967
- 14) Mogi,K.:Fracture and flow of rocks,Tectonophysics,Vol.13,pp.541-568,1972.
- 15) Mogi,K.:Rock fracture,Annual Review Earth Planet,Sci 1,pp.63-84,1973.
- 16) Mogi,K.:Dilatancy of rocks under general triaxial stress states with special reference to earthquake precursors,J. Phys. Earth Vol.25,pp.s203-217,1977.
- 17) Takahashi,M.&Koide,H.:Effect of the intermediate principal stress and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000m,Proceeding of Rock at Great Depth,V.Maury et al(ed.),Balkma Rotterdam,1989.