

# 偏心载荷を受ける岩石供試体の一軸圧縮強度 試験結果のばらつきに関する検討

中川浩二\*・佐野 修\*\*・工藤洋三\*\*\*  
・古川浩平\*\*\*\*

岩石の一軸圧縮試験結果におけるばらつきの主たる原因が偏心载荷にあるとの考え方から、载荷に伴う荷重と偏心量の関係を検討した。その結果一軸圧縮試験における強度の低下は短柱の偏心载荷状態をもとにした縁応力一定の考え方で説明できることを明らかにした。また縁応力に差が生じて強度の低下しない範囲が認められるがこれは材料の応力-ひずみ曲線から説明できることを示した。

**Keywords** : compressive strength, strength distribution, granite, anisotropy, eccentric loading

## 1. はじめに

岩石の一軸圧縮強度は岩石の代表的な物理量であり岩石物性の研究、岩盤構造物の設計、施工のための資料として広く用いられている。そのため今日まで一軸圧縮試験法について非常に多くの研究がなされており、数多くのデータの蓄積がなされてきている。そしてこれらの研究において、岩石はその組織構造上クラック等の内部欠陥を多数含むため、岩石材料固有の強度に大きなばらつきが生じるものと考えられている場合が多く、岩石の一軸圧縮強度の分布について報告した論文等<sup>1),2)</sup>も見られる。現在においては、岩石固有の強度のばらつきは大きいものであるという認識がかなり広く、このことを前提として各種の試験が行われているようにも見受けられる。さらにこのばらつきは、岩盤の諸定数が節理等の影響のため大きなばらつきをもって計測される事実とあいまって、結果的に岩石の一軸圧縮試験のばらつきの原因を真剣に追求しないまま、岩石固有のものとして取り扱われてきたように見受けられる。

これに対して筆者らは前報<sup>3)</sup>、岩石供試体の一軸圧縮試験結果にばらつきをもたらす要因を、①材料固有のばらつき、②岩石供試体作製上のばらつき、③試験条件のばらつき、の3つの要因に分ける必要があると考え、②、③のばらつきをできるだけ小さく抑えることによりはじめて材料固有のばらつきを知ることができると考えた。この考えにもとづき②、③のばらつきをできるだけ小さくした一軸圧縮試験と、③のみが一部異なる一軸圧縮試験とを行った<sup>3)</sup>。前者の試験はサーボ制御材料試験

機を用いて供試体側面に貼られた4枚の軸方向ひずみゲージのひずみ量が等しくなるように低荷重領域の間に調整して実施した試験であり、現時点では必ずしも一般的に行われているとは言い難い。後者の試験はアムスラー型試験機を用いて圧縮試験機を操作する者とひずみ量等をモニターする者とに分かれて行った試験であり、低荷重域におけるひずみの調整は行われていない。この二種類の試験で得られた実験結果には大きな差が生じており、前者ではばらつきは極めて小さいが、後者では大きなばらつきが認められた。このことは通常の岩石試験に用いられるような岩塊から得られる岩石供試体の一軸圧縮試験におけるばらつきのうち①の材料固有の強度のばらつきは必ずしも大きなものではなく、③の試験条件のわずかな違いによるばらつきが大きくなりうることを意味している。

このことから、実験に際しては、実験結果のばらつきに及ぼす諸要因の影響の程度を十分認識した上で実験すべきものであると考える。換言すれば、これから計測するデータは精度よく得られるものであると考えるか、あるいは大きなばらつきをもって得られるものであると考えるかによって、得られるデータそのもののばらつきが大きく異なることは十分に予測されることである。

そこで本研究では、材料固有の強度のばらつきが必ずしも大きくないにもかかわらず、岩石の一軸圧縮試験結果のばらつきが大きくなる理由、すなわち②、③の岩石供試体作製上のばらつきおよび試験条件のばらつきのうち、特に③の試験条件について検討を行う。

## 2. 一軸圧縮試験結果のばらつきの要因

岩石の一軸圧縮実験結果にばらつきを与える要因として多くのものが考えられ、またそれに対する配慮も必要である。この点に関しては別に詳述している<sup>3)</sup>のでここでは簡単に述べる。ただし同一の岩塊から大きな欠陥を

\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科  
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

\*\* 正会員 工博 山口大学助教授 工学部資源工学科

\*\*\* 正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科

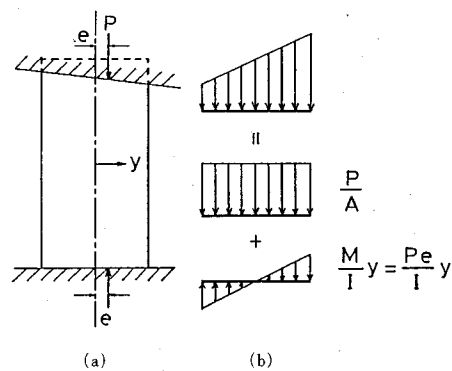
\*\*\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科

含まない供試体を作成し、同一の圧縮試験機を用い、かつ同一人が全試験を行う場合に限定して考えると、その場合にも先の①に関連するばらつきは生じる。すなわち、岩盤内に存在する岩石の不均質性に基づく供試体間のばらつき、あるいは異方性岩石では供試体採取方向の違いにより生じるばらつきが考えられる。特に前者の原因によるばらつきが本来の意味での材料強度のばらつきと考えられるべきものであることはいままでもない。これに対し、後者の供試体採取方向によるばらつきはしかるべき配慮を行うことにより避けることのできるものである。従って供試体採取に当たっては採取方向に十分留意することが必要である。②に関連するものとしては、供試体の形状、寸法、整形精度の問題がある。すなわち、ばらつきの小さい強度試験結果を得るには岩石を構成している粒子に対し、供試体寸法が十分な大きさを有していることが必要と考えられる。ISRM 指針<sup>4)</sup>では一軸圧縮試験には円柱供試体を用い、供試体直径が岩石の最大結晶寸法の 10 倍以上あることが推奨されている。また整形精度については次に述べる③との関連があるが、供試体端面の平滑さや両端面の平行性、供試体軸に対する垂直性などについて ISRM の規定がある。さらに③に関連するものとしては、(イ) 圧縮試験機の加圧板と供試体加圧面との接触状態、(ロ) 球座の適切な設計、管理、使用、(ハ) 球座を使用した場合の荷重軸と供試体軸との一致、などの問題がある。(イ) は端部拘束による側圧効果を減じるために加圧板と供試体端面との間にテフロンシートなどの減摩剤を用いると局部的な応力集中のため強度にばらつきが生じやすくなることに対するものであり、ISRM 指針ではこの使用を禁止している。(ロ)、(ハ) については、球座の管理、使用が必ずしも設計理念に従って行われていない場合が考えられる。

なお供試体端面の平行度については、技術的にもかなりの精度で整形可能であるため、本研究では検討の対象としていない。

### 3. 荷重にともなう偏心 $e$ の変化

通常用いられる剛な加圧板間で供試体を圧縮載荷する場合、球座は供試体端面間の平行度の欠如を球座の回転により補償するために使用するものと考えられる。しかし球座の設計における不適切さや、不完全な潤滑による球座の動作不良、あるいはまた球座の回転中心を供試体軸が通らない場合や球座の半径と比較してはるかに小さな供試体を用いた場合には、球座は使用者が期待している動作をするとは限らない。すなわち載荷試験の間に、球座が滑らかに回転しない、あるいは供試体軸が球座の中心点を通る軸から外れている等の理由により、必ずしも球座が理想的な状態で作動しないことがありうる。



図一 偏心  $e$  をもって載荷された (a) 円柱供試体 (b) 供試体内の応力分布

球座は供試体から受ける反力の球座中心に関する回転モーメントと球座面の摩擦との大小関係で回転あるいは固定する。また偏心  $e$  と供試体軸と球座中心の位置関係によって回転モーメントが載荷条件を改良する方向に作用する場合とそうでない場合がありうる。この違いは載荷の進行に伴う回転モーメントの変化に大きな影響を与えるものと予想される。球座に作用する回転モーメントは軸荷重と偏心に比例する。球座が良好に作動して偏心が小さくなると、さらに球座を回転させるためには軸荷重が増加する必要がある。一方、軸荷重が高くなるにつれて摩擦が大きくなるので比較的高い荷重での球座の作動は期待しにくい。

実際の圧縮試験において加圧板は複雑な動きをするものと考えられるが、これを単純化して考えるため、いま極端な例として、①球座の回転モーメントが摩擦力より十分大きく供試体軸と球座中心が  $d$  だけずれて載荷された場合と、②固定座を用いて載荷板と供試体端面とがある傾きをもって載荷された場合および、③両者のどちらでもない状況で、ある程度の潤滑性を有する球座を用いて若干のずれ  $d$  をもって載荷された場合を考える。ただしここでは円柱供試体の圧縮載荷を構造力学でいうところの短柱の圧縮載荷と考え、供試体内の応力は

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{I} y \dots \dots \dots (1)$$

で与えられるものとする。  $A$  は供試体断面積、  $I$  は断面 2 次モーメント、  $P$  は載荷重、  $M$  は分布荷重のモーメント成分であり、偏心  $e$  は  $e = M/P$  で与えられる。ここで球座が完全な潤滑状態をもたない場合には  $e$  は幾何学的な両軸のずれ  $d$  と異なる可能性があることはいままでもない。

①の場合、球座回転モーメントが摩擦力より十分大きいため  $e \approx d$  となる。供試体内の応力は図一 (a)、(b) のように考えることで説明される。この場合載荷を通じて  $e$  は一定であるため荷重の増加にともなって  $M = Pe$  は増加し続ける。従って、この載荷状態を荷重-モーメ

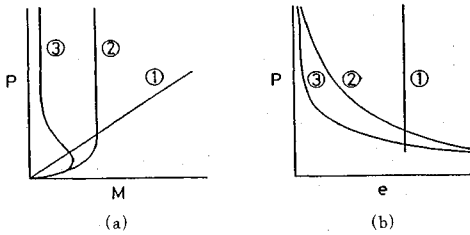


図-2 偏心荷重を受ける供試体の (a) 荷重-モーメント曲線, (b) 荷重-偏心曲線, ①, ②はそれぞれ図-1, 図-3の状態に対応

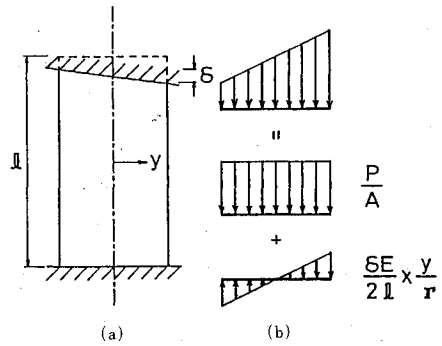


図-3 供試体の最大, 最小変形の差が  $\delta$  となるよう荷重された (a) 円柱供試体 (b) 供試体内の応力状態 ( $r$ は供試体半径)

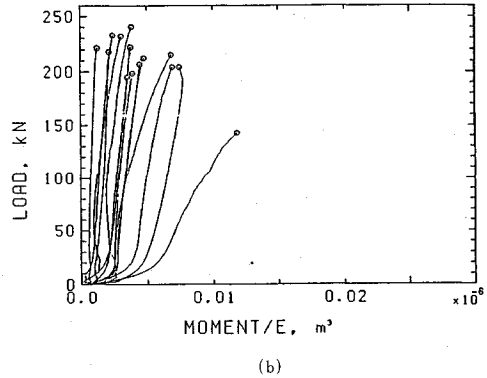
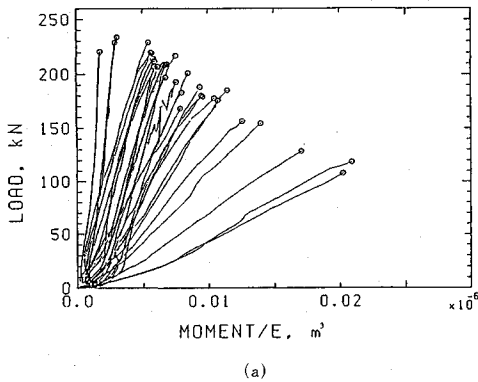


図-4 アムスラー試験機を用いて初期ひずみを調整することなしに行った試験の荷重モーメント曲線 (a) 曲線が原点を通る直線に近いもの (b) モーメントがほぼ一定のもの

ントあるいは荷重-偏心曲線で表すと図-2 (a), (b)の①となる。すなわち、図-2 (a)において $P-M$ 関係は原点を通る直線となり図-2 (b)において $P-e$ 関係は $P$ 軸に平行な直線となる。

②の場合の供試体内の応力は図-3 (a), (b)のように考えることで説明される。この場合載荷板は回転に対して剛であるので供試体の設置位置にかかわらず同一の応力状態となり試験機のもつ載荷軸と供試体軸との関係は意味を持たない。ここで載荷板と供試体端面との傾き方向に平行な方向の直径の両端での加圧板と供試体端面とのずれを $\delta$ とし、供試体長を $l$ とすると供試体内応力は $E\delta/l$  ( $E$ は弾性係数)を縁応力差とするモーメントによる成分と平均応力 $P/A$ とに分けられる。固定座の場合縁応力の差は変化しないため載荷の進行にともなってモーメントは変化せず、 $P$ のみが増加することになる。その結果載荷の進行とともに $e$ は減少する。この状況を図-2 (a), (b)に②によって示している。すなわち、載荷初期を除いて $P-M$ 関係は $P$ 軸に平行な直線となり、 $P-e$ 関係は双曲線となる。

③の場合、載荷初期の加圧板と供試体端面の平行性の

欠如のため軸荷重のみならずモーメントが生じるが、偏心 $e$ と $d$ の符号が異なる場合は、載荷とともに球座はモーメントを小さくする方向へ回転する。しかし球座の回転が完全でないこと、あるいは両軸のずれ $d$ が必ずしも0ではないことから若干の $M$ あるいは $e$ が最後まで残ることとなる。

#### 4. 実験結果の検討

ここで前章に述べた考え方に基づいて前報の実験結果の検討を行う。実験および計測の詳細については前報<sup>3)</sup>を参照されたい。載荷実験中、供試体側面中央部にはられた4枚のひずみゲージで計測されるひずみより側面における最大, 最小のひずみを算出している。モーメント $M$ を弾性係数 $E$ で除したものはこの最大, 最小のひずみ差に $l/2r = \pi r^3/8$ を乗じたもので与えられる。ここで $r$ は供試体の半径である。以下に示す図ではモーメント $M$ に対応するものに $M/E$ を用いている。

まずアムスラー型試験機を用い初期に計測されるひずみを調整することなしに行った試験 (以下試験条件2)の結果について、荷重 $P$ とモーメント $M$  (ここではモー

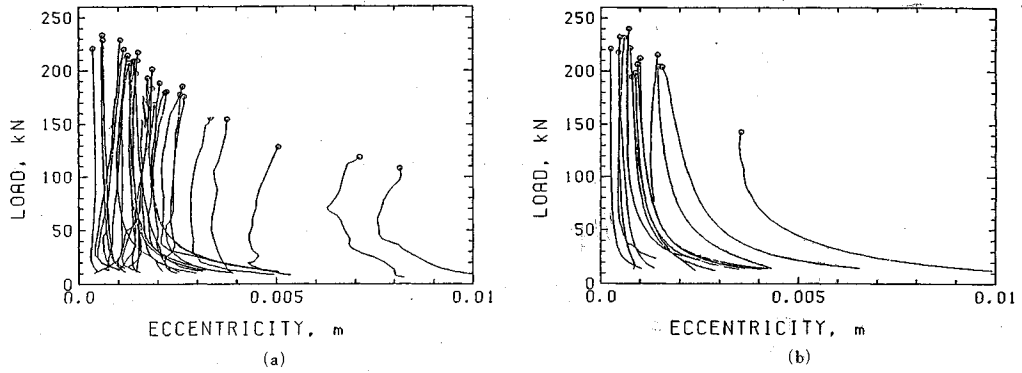


図-5 図-4の曲線を荷重-偏心関係で示したもの (a) 偏心がほぼ一定のもの (b) 偏心が減少し続けるもの ただし、(a), (b)は図-4 (a), (b)に対応

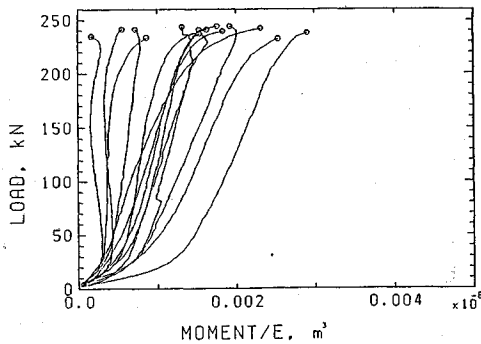


図-6 初期ひずみを調整しサーボ制御試験機を用いて行った試験における荷重-モーメント曲線

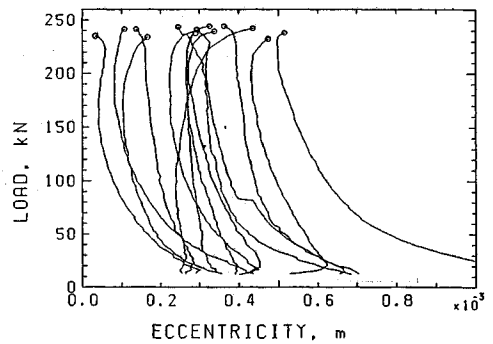
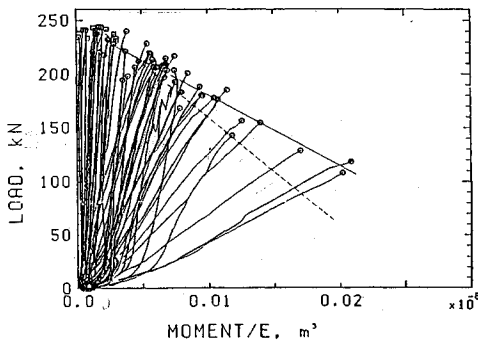


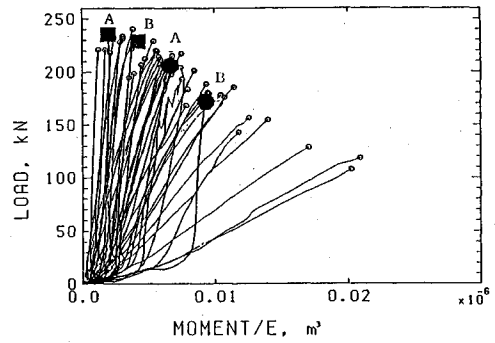
図-7 初期ひずみを調整しサーボ制御試験機を用いて行った試験における荷重-偏心曲線

メントを弾性係数  $E$  で除したもの  $M/E$  との関係に見られる傾向を大きく二つに分類して図-4および5に示す。図-4 (a) は  $P-M$  曲線が原点を通る直線とみなせるものである。この場合モーメントは荷重に比例して大きくなるため最大および最小ひずみの差は荷重に比例して大きくなることになる。言い換えれば加圧板は荷重が増加するに伴っていよいよ平行性を失う方向に回転する。これに対し図-4 (b) に示されたものは、図-4 (a) に示したもの以外のものである。図-4 (b) に示されたものは主として最初は図-4 (a) に示されたものと同様に原点を通る直線であるが、その後、モーメントがほぼ一定となっている。この中にモーメントが一定となる前に減少傾向を示すものも認められるが、これは球座が供試体端面と加圧板の平行度を改善する方向に回転したものである。図-5 は  $e=M/P$  より図-4 に示された関係を荷重  $P$  と偏心  $e$  の関係に変換したものである。図-2 (a), (b) および図-4 (a), (b), 図-5 (a), (b) を比較してわかるように、試験条件2の結果はほとんど前章の①および②に分類することが可能と思われる。このことから試験条件2における実験結果のばらつきは前章の①, ②によると考えることができる。

次にサーボ制御材料試験機を用い初期にひずみの調整をして実施した試験 (以下試験条件1) で得られた結果を図-6および7に示す。ただし図-6および7の横軸の最大値はそれぞれ図-4および5の横軸の最小目盛と一致していることに注意されたい。ここでは試験条件2で得られた結果と異なり、偏心一定とみることのできる結果は認められない。図-7に示すように、一つの例外を除いていずれも載荷の進行に伴い偏心は減少した。一つの例外でも載荷初期にはいったん偏心は減少している。したがって用いたサーボ制御材料試験機に付属している球座は少なくとも図-4 (a) に見られるような結果を生じるような挙動を示すことは少ないと言えよう。また図-6に見られる結果でも、モーメントの増加の歯止めは荷重が20~30 kN 付近から生じており、これは上述のアムスラー型の試験機で用いた球座の挙動と同様であるが、中には150 kN 程度までモーメントが減少し続けたものや、破壊直前でもモーメントが減少したものがいくつか認められる。このことから試験条件1の結果は前章②および③の状況として説明されるものであろう。



図—8 全試験結果のうち  $M/E > 0.002 \times 10^6 \text{ m}^3$  のものに対する回帰直線(実線)と縁応力一定理論から求めた関係(破線)



図—9 試験条件2の結果に併せて描いたサーボ制御材料試験機で載荷したモーメントの大きい試験結果

### 5. 偏心と一軸圧縮試験強度

図—8に全実験結果を併せたものを示す。この図によればばらつきはあるが、 $M/E$ と破壊荷重の関係はモーメントの小さい部分を除いて直線関係で表されるようである。いまこのデータを  $M/E > 2 \times 10^{-9} \text{ m}^3$  の範囲について直線回帰したものが図中の実線である。

一方偏心荷重を受ける短柱内応力に関する式(1)において圧縮最大応力の生じる状態を考え、 $y=r$  ( $r$ は供試体半径)を代入すると

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2} + \frac{M}{\pi r^3} r = \frac{1}{\pi r^2} (P + \frac{4}{r} M) \dots\dots\dots (2)$$

となる。いま、真の一軸圧縮強度  $\sigma_0$  が既知であれば一軸圧縮荷重  $P_0 = \pi r^2 \sigma_0$  を式(2)に代入して

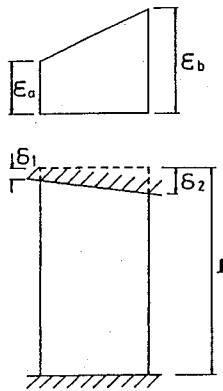
$$P_0 = P + \frac{4}{r} M \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、弾性係数  $E$  を供試体の平均的な値  $E = 56.1 \text{ GPa}$  としたものを先の回帰直線との比較のため  $P_0$  の値にこだわらずその近くに破線で示している。これによると  $P$  と  $M$  の関係は式(3)より勾配が緩くなる傾向にある。式(3)の関係は供試体が破壊点に至るまで線型弾性であるとの仮定のもとに求めたものであり、これに対して実際の材料のひずみは最大荷重点近傍で非線型挙動を示すことなどからこのような状況が生じるものと考えられる。しかし、両直線の勾配には若干の差があるとはいえ、その傾向はよく似ており、偏心載荷を受ける岩石供試体の一軸圧縮強度が短柱の偏心載荷における縁応力一定とする式である程度近似できることを示している。また式(3)を  $M = Pe$  を用いて書き改めると

$$P_0 = P \left( 1 + \frac{4e}{r} \right) \dots\dots\dots (4)$$

となり、図—5(a), (b)に示した破壊点の  $P-e$  関係が双曲線で近似されることになる。

図—8に示した実験結果は試験条件2によるものが主であり、特に試験条件1では高モーメント域の結果が存在しない。すなわち、上述の関係をサーボ制御試験機を用いた結果についても検討するためには図—7に示した結果と比べて大きな偏心のもとでの試験結果が必要である。そこで次のような実験を行った。まず、試験条件1と同じ手順で供試体をセットし、供試体側面の軸方向ひずみがほぼすべて等しい状態となったことを確認する。この時  $e$  および  $d$  は十分に小さい。次に、球座を回転させ僅かに載荷して、計測されるそれぞれのひずみに大きな差が生じていることを確認し、偏心  $e$  を求める。この場合  $d$  は不変で  $e$  は変化する。その後一度除荷し、球座に作用する反力が球座に望ましい回転をさせる方向すなわち  $e$  と同方向に供試体を  $2 \text{ mm}$  移動させて再び載荷する。また別な供試体では反対方向に供試体を  $2 \text{ mm}$  移動させた後再び試験を行う。なお偏心荷重が載荷装置におよぼす影響をできるだけ減らすために、供試体直径を約  $29 \text{ mm}$  とした。式(2)に示すように供試体内の応力のうち荷重  $P$  による一様な応力は直径の2乗に反比例し、モーメント  $M$  による最大・最小曲げ応力は直径の3乗に反比例するので、それぞれ直径の違いを補正し、この結果を示したものが図—9である。図中大きな四角印は供試体の移動方向が球座を正しく回転させる方向であり、大きな丸印はその逆方向である。図中に見られるように、供試体の移動による偏心が極めて大きい時でも、サーボ制御試験機で用いた球座は偏心一定とはならずにはほぼモーメント一定となっている。したがって図—4(a)に見られた挙動は偏心の大きさに依存するものではなく、用いた球座に依存するものと考えられる。また直径の異なるものでもほぼ同一直線上にプロットされることは、式(3)が有効であることを支持している。すなわち、図—6, 7に示されたような極めて丁寧な試験を行わなくとも、供試体側面に少なくとも3カ所以上軸方向ひずみゲージを貼ることにより、供試体に作用するモーメントを求め、その結果をもとに式(3)に従い、本来

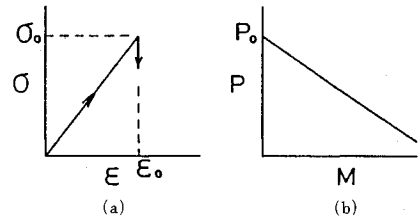


図—10 偏心荷を受けた供試体の端面変形とひずみの分布

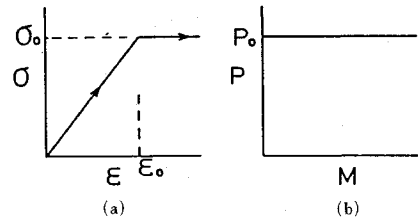
の強度を予測することがある程度可能になるものと期待できる。なお図中 A および B で示されたものはそれぞれ荷初期のひずみの偏差が同程度のものである。実際の荷試験において荷軸と供試体軸を一致させる必要があるが、現実には完全に一致させることは不可能で、いずれかの方向にずれるものと思われる。図—9 に示された A および B 点は供試体軸と荷軸とのずれの方向が異なることにより、著しく異なった結果が得られることを示している。僅かに荷し、軸ひずみの位置による差を求め、モーメントを計算してその作用方向を求め、その結果をもとにして供試体位置を決めることは一般的には行われていないと考えられるので、供試体軸のずれはさまざまとなり、その結果得られる挙動もさまざまになるものと考えられる。

### 6. 一軸圧縮試験で許容しうる偏心量について

一般に圧縮応力が卓越した状態では岩石の破壊は多数の微小破壊の集積により起こることが明らかとなっている。これに対して式 (3) で示された応力状態は供試体端面の極めて狭い領域でしか成立たない。したがってこのような単純な式で偏心荷重の効果が表わされるのは奇妙にも思える。事実、図—8 あるいは図—5 に示された結果にはモーメントの 0 に近い範囲を除いてモーメントあるいは偏心と強度の間には、式 (3) あるいは式 (4) に示された関係が認められるが、図—6 および 7 に示された結果にはほとんど強度差が認められない。一方式 (4) において、図—7 における最大の偏心  $e=0.5 \text{ mm}$  および供試体の半径  $22.5 \text{ mm}$  を代入すると  $P_0=1.089 P$  となり、得られる強度は 8.2% の低下を生じることになる。しかし図—7 に示す実験結果には偏心の増加にともなう強度の低下は認められず、偏心が小さくモーメントが小さい場合にまで式 (3) を適用することが困難であることを意味している。



図—11 理想化された (a) 応力—ひずみ曲線 (1) と (b) 対応する強度—モーメント関係



図—12 理想化された (a) 応力—ひずみ曲線 (2) と (b) 対応する強度—モーメント関係

これらのことより、先に試験条件 1 と試験条件 2 のすべての結果を併せて図示した図—8 において低モーメント域において偏心荷による強度低下の生じない範囲が存在すると解釈すべきであろう。試験条件 1 では荷速度が試験条件 2 の 1/5 であるため、Sano et al. の式<sup>9)</sup>を用いて換算すると強度は 5% 程度大きくなることになるが、ここでは換算前の値を示している。すなわち一軸圧縮試験結果はモーメントの大きい間は短柱の曲げ理論で説明が可能であるが、モーメントが小さくなるとほぼ一定の強度を与える範囲が存在すると考えられる。この点については次のような解釈が可能である。

いま何らかの原因による偏心荷により図—10 に示すように最大変形が  $\delta_2$ 、最小変形が  $\delta_1$  となる供試体の端面状態が得られたとする。その場合の対応するひずみが  $\epsilon_b, \epsilon_a$  である。ここで、全く理想的な一様応力状態で一軸圧縮荷が行われたとしてその時の応力—ひずみ曲線として次の 3 種類のもの考える。すなわち、岩石材料要素の応力—ひずみ関係を次のように仮定する。

(1) 図—11 (a) に示されるように破壊点まで直線であり、破壊点に至ると直ちに耐荷力を失う場合；

図—10 のようなひずみ状態で荷された供試体の最大ひずみ  $\epsilon_b$  が限界値に達するとその最大ひずみの部分で耐荷力を失い、破壊は供試体全体に直ちに伝播し供試体は破壊する。したがって、強度  $P$  とモーメント  $M$  との関係は図—11 (b) のようになり低モーメント域まで  $P-M$  関係は直線である。

(2) 図—12 (a) に示されるように弾塑性状態を示し、ある値以上のひずみで耐荷力が一定となる場合；

この場合、縁ひずみが大きくなっても耐荷力は最大値が持続される。そのため、モーメントの存在のいかに

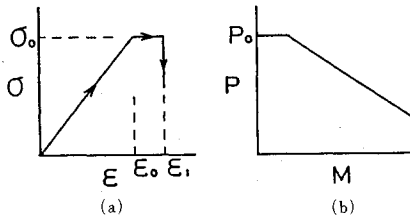


図-13 理想化された (a) 応力-ひずみ曲線 (3) と (b) 対応する強度-モーメント関係

かわらず、耐荷力は最大値が期待され、強度とモーメント  $M$  との関係はモーメントに依存せず図-12 (b) のようになる。

(3) 図-13 (a) に示されるように若干の荷重一定域を示した後耐荷力を失う場合；

供試体に作用する荷重は供試体全域が最大応力  $\sigma_0$  を示す時に最大となる、またもし供試体の一部がこの応力に達しない (図-10 の緑ひずみ  $\epsilon_a$  が  $\epsilon_0$  以下) うちに、最大縁ひずみ  $\epsilon_b$  の位置が耐荷力を失うことになればこの場合は最大荷重を示さない。換言すれば、作用するモーメントがある値より小さく、図-10 における両縁ひずみ ( $\epsilon_b$  と  $\epsilon_a$ ) が図-13 (a) の  $\epsilon_0$  と  $\epsilon_1$  との間に入りうれば、試験結果は常に最大値  $\sigma_0 A = P_0$  を示す。そしてモーメントが大きくなり、この条件が満たされないと試験結果は低くなる。これを示したものが図-13 (b) である。

ここで本研究に用いた北木島花崗岩の荷重-変形曲線の一例を示したものが図-14 である。この曲線は試験条件 1 で得られた理想的な一軸圧縮状態と思われ、大まかにみて図-13 (a) に準ずるものとして考えて良いであろう。この荷重-変形曲線をそのまま応力-ひずみ曲線と考え図に示した直線上昇部の最大の変形  $\delta_1$  をひずみ  $\epsilon_0$ 、最大の変形  $\delta_2$  を破壊時のひずみ  $\epsilon_1$  に対応させると前の (3) の考え方が成り立つ。すなわち、モーメントの存在にもかかわらず強度が最大値を示しうる偏心の限界は図-10 の両縁ひずみ  $\epsilon_a$ 、 $\epsilon_b$  が図-14 の  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  に対応する場合である。すなわち、

$$\epsilon = \frac{P}{EA} \pm \frac{M}{EI}y$$

において両縁ひずみを  $\epsilon_b$ 、 $\epsilon_a$  とすると

$$\epsilon_b - \epsilon_a = \frac{2M}{EI}r = \frac{8Pe}{E\pi r^3} = \frac{P}{EA} \frac{8e}{r}$$

となる。いま  $P/EA$  は平均ひずみであることからこれを  $\epsilon$  とおくと

$$\frac{8e}{r} = \frac{\epsilon_b - \epsilon_a}{\epsilon} = \frac{\epsilon_b - \epsilon_a}{1/2(\epsilon_a + \epsilon_b)}$$

となる。 $\epsilon_b = \epsilon_1$ 、 $\epsilon_a = \epsilon_0$ 、として、図-14 に対応して ( $\epsilon_b - \epsilon_a$ )/0.5( $\epsilon_b + \epsilon_a$ ) = ( $\epsilon_1 - \epsilon_0$ )/0.5( $\epsilon_1 + \epsilon_0$ ) = ( $\delta_2 - \delta_1$ )/0.5( $\delta_2 + \delta_1$ )  $\approx 1/8$ 、さらに  $r = 22.5$  (mm) とおくと

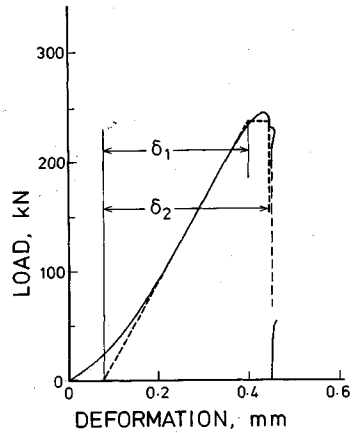


図-14 典型的な荷重-変形曲線と理想化した荷重-変形曲線 (破線)

$$e = \frac{r}{8} \frac{1}{8} = \frac{22.5}{64} = 0.35 \text{ (mm)}$$

が得られる。この値は図-7 で示される強度一定区間と比べると若干小さい。しかし、実際の载荷においては供試体要素は隣接要素の拘束のため若干大きいひずみまで変形が可能であることを考慮すれば十分合理的と言えるものであろう。

以上のことから本研究で用いた半径 22.5 mm の北木島花崗岩円柱供試体においておよそ 0.4 mm 程度までの偏心に対しては偏心による強度の低下は生じず、その理由は応力-ひずみ曲線の非線形性から説明される。いまここでこの供試体に対する 0.4 mm の偏心は最大荷重近くで生じる最大ひずみ差約  $500 \times 10^{-6}$  に対応する。

## 7. おわりに

本研究では岩石の一軸圧縮試験結果におけるばらつきの主たる原因が偏心载荷にあるとの考え方から、载荷に伴う荷重とモーメント、あるいは荷重と偏心との関係を検討し、次に示す結論を得た。

① アムスラー型試験機を用い、計測されるひずみを载荷初期に調整することなしに行った試験では供試体の状態は主として偏心一定と、モーメント一定の状態に分けられる。

② サーボ制御試験機を用いて、ひずみを調整したのち行なった試験では供試体の状態はモーメント一定あるいはモーメントの低下する状態となっている。

③ 偏心あるいはモーメントの大きくなる試験では強度の低下量は大きく、供試体間のばらつきも大きい。また偏心あるいはモーメントの小さい試験ではばらつきはほとんどない。

④ 一軸圧縮試験における試験強度の低下は短柱の偏心载荷状態をもとにした縁応力一定の考え方である程度説明される。またこれは試験機、供試体径、载荷経路が

異なってもある程度成立するようである。

⑤ 上の考え方がある程度成立するにもかかわらず載荷時のモーメントの小さい領域ではモーメントの存在にもかかわらず強度の低下しない（縁応力に差が生じても強度は低下しない）範囲があり、これは材料の応力—ひずみ曲線から説明される。換言すれば偏心をこの範囲内に抑えた試験を行えばばらつきの小さい実験結果を得ることができる。

参 考 文 献

1) 山口梅太郎・西松裕一：岩盤力学入門，第2版，

pp.3~5, pp.95~102, 東京大学出版局, 1977.

- 2) 三木幸蔵：岩盤力学入門，鹿島出版会，pp.186~210, 1986.
- 3) 佐野 修・工藤洋三・古川浩平・中川浩二：岩石の一軸圧縮強度実験結果のばらつきに関する研究，土木学会論文集，第338号／Ⅲ-8, pp.141~150, 1988.
- 4) ISRM 指針：岩の力学連合会，1982.
- 5) Sano, O., Ito, I. and Terada, M.: Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression, J. Geophys. Res., Vol.86, pp.9299~9311, 1981.

(1990.4.12 受付)

## A STUDY OF STRENGTH DISTRIBUTION OF ROCK SPECIMENS SUBJECTED TO ECCENTRIC LOADING

Koji NAKAGAWA, Osam SANNO, Yozo KUDO and Kohei FURUKAWA

Three dominant factors affecting the observed uniaxial compressive strength of rocks are the inherent properties of rocks, specimen preparation and experimental techniques. Among them, we have already shown that under proper conditions of specimen preparation and carefully arranged experimental techniques, the inherent strength scatters minutely. This study focuses on the influence of the experimental techniques of the uniaxial compression test, especially, the effects of eccentricity of the loading axis in relation to the specimen's axis. The load-eccentricity relation is classified into three types which are discussed in detail. We can estimate the inherent compressive strength from the monitoring of the strains obtained from the specimen surface; even though the degree of eccentricity greatly reduces the compressive strength. It is also indicated that there is a certain amount of eccentricity under which the inherent compressive strength never scatters. This tendency is explained from the nonlinear behavior in the stress-strain curve around the maximum stress difference.