

最近の岩石破壊実験

茂木 清夫

近年 岩石や岩盤の力学的性質の研究がさかんになりこの分野に岩石力学(Rock Mechanics)という名称がかなり一般につかわれるようになってきた。しかしその内容はというと 土木 鉱山 地質 地球物理などの各分野に関連して、それぞれの目的によってかなりちがっている。地震研究所では、地震は地下の岩石の急激な破壊によって起こるという立場から、岩石の破壊さらにその他の力学的諸性質の研究が進められている。本文では われわれが最近開発した新しい三軸試験法を中心に、現状を紹介してみたい。

地球物理学の分野では、主として地下深部の岩石の大規模な変形や破壊が問題であるので、これをそのまま実験室で実現することはできないことから、岩石の変形や破壊に共通な一般的法則性を求めることを行なっている。とくに、われわれの研究の最も著しい特徴は、高圧・高温という、地下の深部で期待される圧力・温度での性質を研究しているということである。しかし、高温実験については米国などですでに行なわれているが、わが国ではほとんどこれからで、われわれも現在準備をはじめている所である。

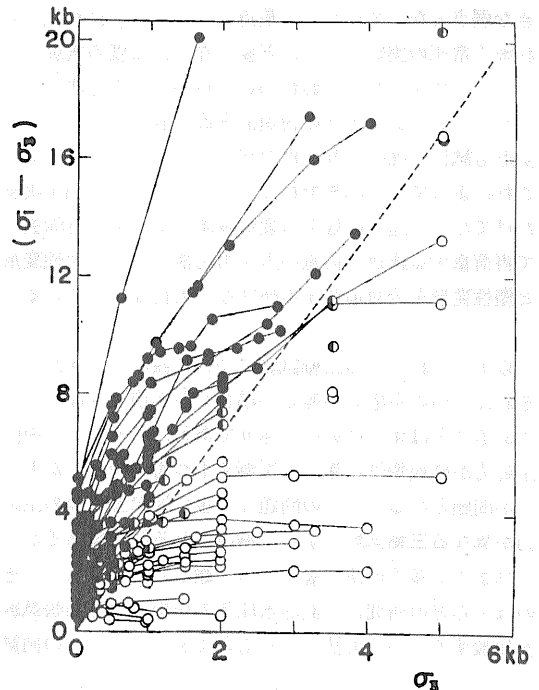
岩石の高圧変形実験の進捗

岩石の近代的な高圧変形実験は、1911年、ドイツの von Kármán がはじめて行なったのであるが、それ以来、多くの実験がアメリカをはじめとした各国で行なわれてきた。Kármán の方法は、円筒形の高圧容器に数百乃至数千気圧に圧縮された油を送入し、その流体圧の中で円筒形の試料を上下方向からピストンで圧縮するというものである。応力状態は互に直交する3つの方向の主応力 σ_1 σ_2 σ_3 (圧縮力を正にとり $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) ができるのであるが、Kármán の方法では σ_2 、 σ_3 が常に流体圧に等しくなる。1915年に Böker は、高静水圧室内で引張試験を行なったが、それは σ_1 と σ_2 が共に静水圧に等しい場合である。この様な、静水圧下の圧縮または引張試験を一般に三軸試験と呼んできた。その後のほとんどすべての高圧変形実験はKármánの方法と本

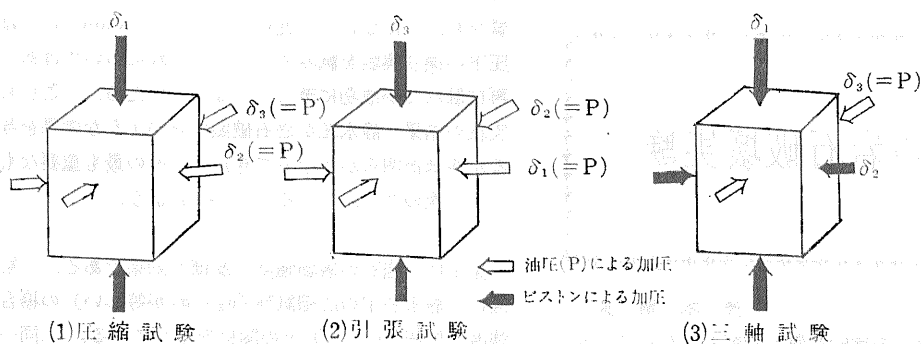
質なちがいはない。近年になって Handin たちは高圧下の振り実験を試みている。これについてはあとで再び触れるが成功に至っていないといえる。これらの実験の結果、静水圧が岩石破壊にどのような効果を与えるかがほぼ明らかになってきた。その最も重要なものとして次の2つをあげることができよう。

第1は、岩石の破壊強度に及ぼす効果である。第1図に、静水圧下の圧縮試験 (σ_2 と σ_3 が等しい) の場合の強度と側圧 ($\sigma_3 = \sigma_2$) との関係を示してある。同一の岩石の値を線で結んである。つまり、強度は側圧と共に一般に急激に増加するのである。

第2の効果は、側圧の増加と共に岩石の脆性が低下し、次第に延性を示すことである。脆性を失うと、急激な破壊による歪エネルギーの放出が起こらなくなるので、地震が起こらなくなるということになり、この脆性から延性への遷移の問題は非常に重要な問題となっている。第1図の黒丸は脆性破壊を、白丸は延性流動を示しているが、各種の岩石で側圧と共に脆性から延性に移行することが認められる。とくに、この図で、黒丸と白丸が原点を通る1つの直線ではほとんど分けられることがわかる。つまり、脆性から延性に遷移する圧力はほぼ強度に比例して増大するのである。なお、黒丸つまり脆性破壊では強度が側圧と共に著しく増加すること、しかしそれは直線的にというよりも下に湾曲しながら増加する



第1図 各種岩石の圧縮強度と側圧との関係
黒丸は脆性破壊、白丸は延性流動を示す



第2図
従来の三軸試験は(1)
と(2)で2つの主応力
が等しい場合
(3)は新しい三軸試験
の応力場
黒い矢印はピストンに
よる加圧
白い矢印は油圧(P)に
よる加圧を示す

ことが認められる。この側圧による強度の増加の度合は、内部摩擦の大小に関係していると考えられているがその機構についてはなお議論のある所である。白丸つまり延性流動(この場合の降伏応力)の場合は、側圧の効果は小さくなり、側圧が大きくなるとほぼ一定値に落着く場合が多い。これは延性金属で降伏強度が静水圧と無関係に一定であることと似ており、この場合に Von Mises の破壊論が適用されることを暗示している。

さらに、実験的に変形させた岩石試料の光学顕微鏡や電子顕微鏡による観察によって、自然の地層の褶曲や断層の機構が解明されてきている。しかし、これまでの実験では、力と変形を高压容器の外部で間接的に測定していたため常圧での実験に比べて著しく測定の精度が低く、しばしば定量的研究には不十分であるというのが大きな弱点となっていた。最近、この点の改良が試みられ、漸く常圧の実験とほとんど変らない高精度の実験ができるようになった。われわれの用いている方法は、ストレインゲージタイプの荷重計を高压容器内にセットし、変形も試料に直接とりつけたゲージで求めるものである。これによって、これまで行われてきた単調な加圧実験だけでなく、途中の種々の変形段階で荷重を一旦除去して再荷重する繰返し荷重の方法も可能となり、弾性変形と塑性変形を分離追跡する研究なども行われている。

以上、これまでの三軸試験について説明してきたが、それは2つの主応力が等しい場合しか実現できないものであることはすでに述べた通りである。そこで、中間主応力が破壊特性に果して影響をもつものであるかどうか問題となる。この問題は、後に述べる3つの主応力が異なる三軸試験によって解決される問題であるが、これまでも多くの研究者によって論じられてきた。そのほとんどの研究は、高静水圧下の圧縮試験と引張試験を比較するという方法によるものであった。この両試

験のちがいは中間主応力 σ_2 の値のちがいであることから、両試験による強度にちがいがあれば、中間主応力 σ_2 の効果によるものであるというのである。しかし、その結果はあるとするものとないというものと相対立してゆずらないということになったのである。たとえば最近の Jaeger と Cook の著書の中でも、両方の結果を並記している。しかし、この原因は、これらの実験とくに、引張実験の精度がこのようなわずかな差異を論ずるには不十分であったためだと思われる。われわれが最近行なった高精度の実験では、いくつかの岩石で両者に有意の差を認め、 σ_2 の効果が無視できないものであることを見出したのである。従って、これまでの三軸試験では不十分であり、より一般的な応力場($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$)を実現できる本当の意味の三軸試験が待望されることになる。

新しい三軸試験

これまで述べてきたように、従来、三軸試験といわれてきたものは、2つの主応力が等しい場合しか実現できないものであるから、さらに、3つの主応力を自由にコントロールできる一般的な三軸加圧試験が要望され、実際に多くの試みが行われてきた。一番多く行われてきた方法は、圧縮・曲げ・振り・静水圧などを色々組合わせて破壊させ、その時の加えた力から弾性論によって応力値を計算するというものである。こういう複雑な力の加え方をすると、一般に、その応力場は3つの主応力が互に異なる場合になり、そういう組み合わせ応力場($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)の実験をしたことになる。しかし、こういう手続きで求められた結果には多くの未知の問題を含んでいて、破壊の基礎的法則性を知るための方法としては不適当なものである。その理由の第1は、応力分布が一様でないということで、不均一な応力場の破壊強度の問題は不明の点が多い。また弾性論からの計算も大きな誤差の原因となる。このように、不均一な応力分

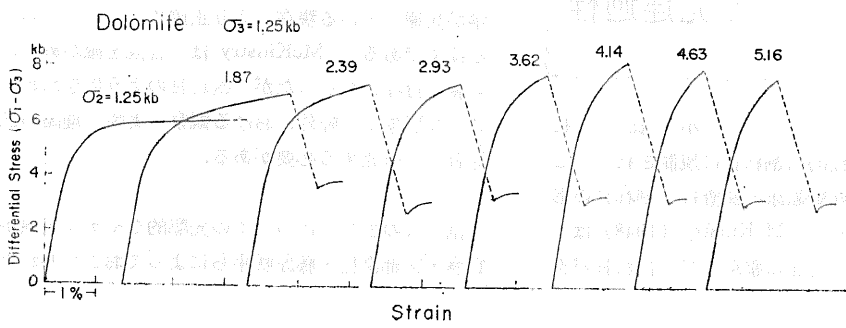
布の実験は 実験そのものは容易であるけれども 基礎実験の方法としては不適当なのである。従って 均一な三軸応力状態をいかに実現するかということが目標となる。その試みの一つとして 1967年に発表された Handin たちの例をあげてみよう。それまで行なわれてきた振り試験は円筒試料を用いたものであったため応力分布が不均一であったので Handin たちは薄肉の円筒試料を用いて 振り・圧縮・静水圧を組み合わせるという方法を行なった。この方法は原理的には一様で一般的な三軸応力状態を与えることになる。しかし 実際には彼らが得た測定値をみると非常にバラツキが大きく 数10%にも達し 強度測定実験としては全く不成功に終わったのであった。その理由は 恐らく 岩石のような脆い結晶集合体では 金属なみの薄肉円筒を完全に製作することは無理であるためであると思われる。

3軸加圧のためには 立方体に3つの方向からピストンで加圧するという方法が 最も直接的でよさそうに思われる。実際 この方法はこれまで主として工学の分野で実用的に使用されている。しかし 定量的な実験としては大きな問題があるとされている。さきにも述べたように 岩石の破壊強度は 最小主応力 σ_3 の僅かな変化によって著しく左右される。従って σ_3 は非常に均一に加えないと大きな誤差の原因となる。これを固体のピストンで加えることは たえば 潤滑剤などを入れたとしても 不均一応力分布や摩擦のため重大な誤差を生ずる可能性がある。また 加圧盤と試料の間に潤滑剤を入れると 試料に浸みこんで引張り破壊をひきおこすと考えられている。最近 この難点を解決するものとして Hojem と Cook が 角柱型の試料について 側圧(σ_2 と σ_3)を銅板で作った2組のフラット・ジャッキで一様に加圧するという方法を発表した。軸圧(σ_1)は従来通りピストンで加圧するのである。2組のジャッキの境界はどうなっているかなどの疑問もあるけれども この方法は これまで報告されてきた唯一の満足すべきものではないかと考えられる。しかし その論文

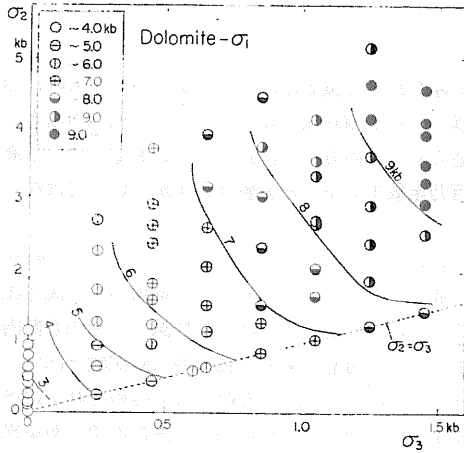
にみられる実験数はわずか数個で しかも σ_3 は200気圧以下 σ_2 も500気圧以下というごく低圧の場合だけで、恐らく この方法ではわれわれの希望している高压(数百乃至数千気圧)の実験はむずかしいのではなからうか。

われわれの方法では 上に述べたように σ_3 を完全に一様に加える必要があるという理由から 流体圧で加えることにした。これは 角柱試料を高压容器内に封入することで可能であり 従来の三軸試験と同様である。次に σ_2 については その効果が σ_3 のそれに比べてかなり小さいということがわかってきたので ある程度精度が低くとも 大きい誤差の原因とはならない。このことを考慮に入れると σ_2 は σ_1 と同様に ピストンで加圧しても差支えないのである。もちろん その場合適当な潤滑剤を入れて摩擦を大きく除去する。結局 円筒状の高压容器に横方向にもう一つの孔をあけて σ_2 のためのピストンを挿入するという構造とした。 σ_3 を油圧による静水圧(最高8000気圧)で加え σ_1 と σ_2 は 上下方向と横方向の二つのピストンで加えることによって 任意の一様な三軸応力場を実現することができたのである。なお 試料端部の応力集中が想像されるけれども 全体が高流体圧内にあるため 著しく減殺されるものと考えられる。この新しい方式の三軸試験機によってすでに1年余の実験を行なってきたが 多少の問題を残しているとはいえ ほぼ満足すべき結果が得られつつある。次に そのおもな結果を説明しよう。

第3図 はこの試験機で得られた応力-歪曲線の一例である。この場合の力や歪の測定は さきに述べた高压容器内にセットされたゲージによる精度の高い測定である。岩石の試料は Dunham dolomite という米国東部産の非常に均一な試料で 実験の再現性はきわめてよい。流体圧(σ_3)を1250気圧に保ち σ_2 を次第に上げてゆくと この図の左から右の方に移る。この曲線群から 第1に強度が σ_2 と共に除々にではあるが明らかに増加するという事 第2には破壊が起こるまでの変形量が σ_2 と共に急速に減少することが直ちに読みとられよう。破壊までの変形量が減少すると



第3図
新しい三軸試験で得られた応力-歪曲線
 σ_3 (流体圧)を1.25kbに保って σ_2 を変えて行った場合

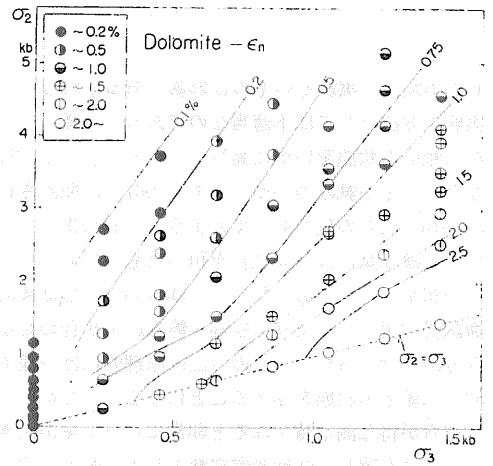


第4図 破壊のときの応力(σ₁)をσ₂とσ₃の函数として示したもの

いうことは、延性の割合が減少すること、つまり脆くなるということである。

第4図 は破壊応力(σ₁)がσ₂とσ₃と共にどう変わるかを示したもので、σ₃のみならずσ₂と共に顕著に変わるものであることがわかる。この図で、破線で示したσ₂=σ₃の線上の値が、従来の三軸試験から知られていたものであるが、それは、全体のごく特殊な状態にあたってはいるもので、一般的な場合を伺い知るにはいかに不十分な情報であったかがわかる。

第5図 は延性の割合を示すものとして、破壊までの非弾性変形の大きさ(E_n)をとって、それがσ₂とσ₃と共にどう変わるかを示したものである。これによって、脆性から延性への遷移が、σ₃のみならずσ₂によって著しい影響をうけるものであることがわかる。特に、延性度はσ₃と共に増加するのに、σ₂と共に減少するものであるということが重要である。従って、「延性度は平均応力と共に増大するものである」というような従来の結果は正しくないものである。



第5図 破壊までの非弾性変形の大きさE_n(延性の程度をあらわす)をσ₂とσ₃の函数として示したもの

このように、一般的な応力場での実験によって、これまで未知であった多くの諸問題が解明される可能性がある。とくに、脆性破壊の破壊論は未解決の大きな問題であるが、それは、特殊な応力状態でのわずかなデータをもとにあれこれと摸索してきたという感があつたが、この問題も大きく前進することが期待される。

以上、三軸試験の基本的な問題についてわれわれの最近の研究を紹介したが、その他にも、破壊振動など、いろいろの興味ある問題があることをつけ加えておこう。

(筆者は東京大学地震研究所)

割れ目の発達過程①

割れ目のパターンと発達過程

小出 仁

鉱床は直接的ないし間接的に割れ目に規制されることが多い。とくに、鉱脈・鉱床の探査には割れ目の形態を知ることが必要である。McKinstry (1948) は経験的知識を簡単な理論をもとに整理して、割れ目パ

ーンの理論をつくった。この理論は鉱床の探査に応用され、非常に成功をおさめた。その原因は彼の豊かな経験に基づくものであろう。McKinstry が割れ目の理論を単純化して使用したのは、経験法則をまとめるためにはそれで十分であったためであろう。しかし、材料科学が発達している現在、より正確で、わしいもののできるはずである。McKinstry は、自説を確かめるために、実験は行なわなかったが、割れ目のようにきわめてふくざつな現象は、野外における観察・実験・理論の三者を総合して研究する必要がある。

割れ目の生じ方についての先駆的なモデル実験が寺田寅彦・宮部直巳・藤原映平らによっておこなわれた。