

氏名	ふるまひみつまさ 古住光正
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和 63 年 3 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最終学歴	昭和 45 年 3 月 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻 修士課程修了
学位論文題目	多軸応力下における岩石の変形・破壊挙動に関する 研究
論文審査委員	東北大学教授 鈴木 舜一 東北大学教授 八嶋 三郎 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 前川 一郎

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

鉱山や土木の分野においては、坑道、トンネル、ダム、地下発電所、原子力発電所および橋梁などの構築に関連して、岩石を対象とする作業が極めて多い。また、近年、資源の涸渇につれて地下開発の深部化が進み、さらに現在、地下岩盤空間は、石油地下備蓄、地下原子力発電、放射性廃棄物地層処分などの新たな目的に利用されつつあり、これら多様なニーズは、地下岩盤構造物をより深い位置に、空洞形状を複雑に、あるいはより大規模な方向へと導いている。

そのため、地下岩盤の評価をめぐる問題もより過酷となり、しかも岩石や岩盤の性状は、特定の工程を経て製錬加工される金属材料などとは異なり、その構成粒子は粗大、不同、かつ不均一で、その集合体としての岩盤は、亀裂、断層、節理、褶曲などによって一層複雑となっているため、今後解決していかなければならない問題点が多数残されている。

本研究では、岩盤構造物の安定維持に関する基礎的な研究として、地下空洞周辺の岩盤や鉱柱の診断、多軸応力下の岩石の安定および不安定破壊問題を取り上げ、主として加圧下の岩石の圧縮破壊過程における破壊機構の検討、多軸応力下の岩石の破壊強度におよぼす中間主応力の影響と破壊条件の検討、および多軸応力下における岩石の不安定変形・破壊機構について実験的な検討と考察を行った。

第2章 一軸荷重下における岩石の圧縮破壊過程

本章では、岩石の一軸圧縮破壊過程、特に強度破壊点以降の破壊過程を定量的に明らかにし、地下空洞周辺の岩盤の性状を診断する方法を確立するために、一軸圧縮応力下において単純載荷と強度破壊点以降の繰り返し載荷による剛性荷重試験を行い、各種岩石の応力-ひずみ挙動と弾性波速度特性を精査し、圧縮破壊過程に伴う破壊亀裂の進展の定量化について実験的な検討を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。

1) pre-failure 領域の岩石の変形・破壊に伴う音速増加率は、岩種により異なり、その差異は、各岩石の空隙率に依存せず、空隙縮小率に依存することが明らかとなった。

2) post-failure 領域の破壊の進展に伴う岩石の組織・構造の変化は、粒状媒質論の圧力依存指数 μ で説明され、pre-failure 領域で一定値をとる μ は、破壊亀裂の進展によって順次低下し、また、その変化の動向は、岩石の脆性度に密接に関係している。

3) 圧力依存指数 μ は、post-failure 領域のいわゆる不安定亀裂の進展の指標となり得ることから、弾性波法は、地下空洞周辺の岩盤や鉱柱の性状診断にとって有効であることを確かめた。

第3章 二軸荷重下における岩石の破壊条件と中間主応力の影響

本章では、破壊強度に及ぼす中間主応力の影響を明らかにするために、最も単純な二軸圧縮組み合わせ応力下において亀裂のない岩石と弱面を有する岩石の破壊強度について検討した。また、ここでは引張領域をも含む多軸応力下の岩石の破壊条件を明らかにするために、圧縮-引張二軸組み合わせ実験を行い、同組み合わせ応力下における岩石の破壊強度についても検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

1) 二軸圧縮組み合わせ応力下における亀裂のない岩石の破壊強度は、中間主応力の増加に伴って増大し、極大値を示した後は減少した。この極値を示すときの破壊強度は岩種によって異なり、その値は一軸圧縮強度の 1.3～1.9 倍である。これより、中間主応力は破壊強度に影響を及ぼすことが明らかとなった。

2) 同組み合わせ応力下における最小主応力軸に平行な弱面を有する岩石の破壊強度は、亀裂のない岩石と同様に極値をもち、弱面の存在方向と主応力の作用方向によって破壊強度に及ぼす中間主応力の影響の度合に差異が生ずることが明らかとなった。

3) 圧縮-引張組み合わせ応力下における破壊強度は、引張応力が増加するにつれて圧縮強度が減少する領域と、引張応力がほぼ一定で破壊する領域よりなることが明らかとなった。また、同組み合わせ応力下における岩石の破壊様式は、組み合わせ応力の配分によって圧縮応力が支配的となるせん断型、圧縮応力と引張応力が同程度に影響し合うせん断型と引張型の混合型、引張応力が支配的となる引張型の3つの異なるモードを示した。

第4章 三軸圧縮荷重下における岩石の破壊条件と中間主応力の影響

本章では、三軸圧縮応力下における岩石の破壊強度に及ぼす中間主応力の影響と、多軸応力下における岩石の破壊条件を明らかにするために、封圧三軸圧縮実験に加えて三つの異なる応力条件を

満足させる真三軸圧縮実験を行い、定量的な検討を行った。まず、封圧三軸圧縮実験によって三軸圧縮応力下における岩石一般の変形挙動を明らかにした。次いで、真三軸圧縮実験から亀裂のない岩石と弱面を有する岩石の破壊強度を調べ、これにLodeのパラメータと三次元に拡張したMohr-Coulombの破壊規準を適用することにより、岩石の破壊強度に及ぼす中間主応力の影響の度合を定量的に検討した。その上で、中間主応力を考慮した拡張 von Mises 形の Drucker-Prager と Murrell の破壊規準により岩石の破壊条件を検討し、圧縮～引張領域を含む多軸応力下の岩石の破壊条件を求めた。

得られた結果を要約すると次のようになる。

1) 三軸圧縮組み合わせ応力下における亀裂のない岩石の破壊強度は、二軸圧縮組み合わせ応力下と同様に極値をもち、破壊強度に及ぼす中間主応力の影響の度合は、影響しない場合を0とすると、来待砂岩では0.63～0.83、荻野凝灰岩では0.48～0.52である。また、岩種による影響の度合の差異には、内部摩擦が関与するものと考えられる。

2) 同組み合わせ応力下における弱面を有する岩石の破壊強度は、亀裂のない岩石と同様に極値をもち、中間主応力の影響の度合は、弱面が中間主応力軸に平行に存在するよりも最小主応力軸に平行な場合のほうが大きく、前者では0.67～0.98、後者では1.25～1.55である。また、弱面を有する岩石の破壊強度に及ぼす中間主応力の影響の度合は、亀裂のない岩石に比して大きいことから、亀裂を含む岩盤の破壊条件の決定に当たっては、中間主応力の取り扱いがより重要である。

3) 圧縮～引張領域を含む多軸応力下の岩石の破壊に対しては、中間主応力を考慮した拡張 von Mises 形の Murrell の条件に最もよい適合性が認められ、同領域における来待砂岩および荻野凝灰岩の破壊条件は、それぞれ $\tau_{oct}=0.841\sqrt{\sigma_{oct}\cdot S_c}$ 、 $\tau_{oct}=0.775\sqrt{\sigma_{oct}\cdot S_c}$ となる。

第5章 封圧下における岩石ばりの座屈変形・破壊挙動

本章では、多軸応力下における岩石の不安定変形・破壊機構を解明するために、封圧下における岩石ばりの座屈変形・破壊挙動を調べ、これより座屈不安定破壊に伴う岩石の曲げ変形・破壊機構を検討した。はじめに、封圧下において単層および三層岩石ばりの座屈実験を行い、各種単層岩石ばりの応力-軸縮み、応力-軸ひずみ曲線から座屈不安定に伴う封圧下の岩石の基本的な曲げ変形様式を検討した。次いで、三層岩石ばりの応力-軸縮み、応力-軸ひずみ曲線を調べ、多層構造における曲げ変形の層間関係と層間すべりを検討し、最後に、永久曲げ変形を呈した岩石ばりのX線透視ならびに顕微鏡観察結果による組織構造の変化とその特徴を明らかにし、多軸応力下の不安定破壊に伴う岩石の曲げ変形・破壊機構を現象論的に検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

1) 封圧下における岩石ばりの変形様式は、他の材料の基本的な座屈変形・破壊過程と同じく、軸荷重が小さい段階では短縮型の圧縮変形モード、軸荷重がさらに大きくなる段階では座屈短縮型の座屈変形モード、軸荷重が臨界荷重に達する段階では曲げの座屈変形モードの3段階の変形過程をたどるが、曲げの度合は、封圧の増加とともに増大した。

2) 封圧下における各種岩石ばりの破壊に対しては、塑性変形係数を考慮した Shanley の座屈実

験式に最もよい適合性が認められ、封圧下の岩石ばりの破壊現象は弾性座屈ではなく、塑性変形を伴う座屈であると考えられる。

3) 封圧下における単層および多層構造の曲げ変形の対比において、同じ岩種よりなる単層試験片と三層試験片の曲げ変形の度合は、単層試験片よりも三層試験片の方が大きくなり、異なる岩種で構成される多層構造の曲げ変形は、より強い層に支配されることが実験的に確かめられた。

4) 永久曲げ変形を呈した岩石ばりにおいては、ヒンジ部の下部に曲げ軸に垂直な粒内・粒界型の引張亀裂の存在が多く認められ、上部では組織の擾乱と粒子の圧潰、ならびに双晶に歪みが認められた。これらX線透視および顕微鏡観察で認められる構造上の特徴は、封圧下における岩石ばりの永久曲げ変形が、臨界応力時付近で発生する引張亀裂によって生ずることを示唆するものである。

第6章 結 論

以上、本論文では、岩石の圧縮破壊過程における破壊機構、岩石の破壊強度に及ぼす中間主応力の影響、圧縮～引張を含む多軸応力下における岩石の破壊条件、および多軸応力下における岩石の不安定変形・破壊機構について検討したものである。これらの研究の成果は、岩盤構造物の設計および安定維持を計る上で、有効な指針を与えるものと考えられる。

審 査 結 果 の 要 旨

最近、地下資源の開発はますます深部に向っており、また石油備蓄や放射性廃棄物保管に地下空間が利用されるようになり、岩盤構造物の安定維持・管理のために、岩石の変形・破壊機構のより精密な解明が要請されている。著者は、このための基礎研究として、多軸応力下の岩石の変形・破壊挙動について実験的研究を行い、圧縮破壊過程における破壊機構、とくに破壊強度におよぼす中間主応力の影響および不安定変形について詳細な検討を行った。なお岩石試料としては、来待砂岩、荻野凝灰岩、江持溶結凝灰岩、東北大理石の4種を用いている。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、一軸圧縮過程における各種岩石の応力-ひずみと弾性波速度特性を精査している。とくに、強度破壊点以降の破壊の進展に伴う造岩鉱物の結合状態の変化は、圧力依存指数 μ により定量的に説明され、 μ が不安定破壊の進展の指標となり得ることを明らかにしている。

第3章では、二軸圧縮下の岩石の破壊強度におよぼす中間主応力の影響を考察している。弱面を有する岩石については、弱面と主応力の方向によって、中間主応力の影響の度合いが異なること、さらに圧縮-引張組合せ応力下では、引張応力が増加するにつれて、圧縮強度が急激に減少することを明らかにしている。

第4章では、第3章の研究をさらに一般化するために、三軸圧縮組合せ下の岩石の変形・破壊挙動について、中間主応力の影響を検討している。弱面を有する岩石では、弱面のないものに比して、中間主応力が破壊強度に大きく影響することを明らかにしている。さらに、圧縮-引張組合せ多軸応力下の岩石の破壊条件を求めている。これらは、岩盤の強度評価を行う上で有用な知見である。

第5章では、封圧下における単層および多層岩石ばりの座屈実験を行い、微細な引張亀裂に注目した破壊機構について詳細な検討を行っている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、多軸応力下における岩石の変形・破壊機構を明らかにし、岩盤構造物の設計・安定維持に必要な基礎資料を提供したものであり、資源工学ならびに岩石力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。