

学位論文題名

岩石のダイラタンシーに関する基礎研究

学位論文内容の要旨

三軸圧縮試験などで岩石試料に偏差応力を加えると、試料の巨視的な破壊に先立ち体積の増加が観測されるが、この現象は一般にダイラタンシーと呼ばれている。この体積の増加は、偏差応力の付加により岩石内部に新たな空隙が発生することを意味している。

岩盤中に掘削した空洞壁面付近には偏差的な応力状態がもたらされるが、偏差応力がダイラタンシーを生じさせるに十分な大きさであれば、この部分では新たな空隙が発生する。このような空隙の発生は、空洞壁面の変形を増加させるばかりでなく、空隙の連鎖による岩盤の崩壊や、長期的には風化などによる岩盤の剛性低下をもたらし、空洞の安定性を脅かす要因となることは想像に難くない。また、岩盤が地下水で飽和している場合には空隙の発生は地下水圧を変化させるであろうし、地下水圧も空隙の発生に大きな影響を及ぼすであろう。このようにダイラタンシーは地下水とも密接な関係を持っていると考えられる。

以上のように、ダイラタンシーは岩盤の挙動を規定する大きな因子の一つであり、岩盤構造物の安定性をより正確に予測するためには、ダイラタンシーの影響を無視することはできない。また、ダイラタンシーの原因を明らかにすることは、岩盤の非弾性的な性質を理解する鍵であると考えられる。

岩石のダイラタンシーに関して行われた数多くの研究から、ダイラタンシーは、偏差応力の増加にともなって生ずるクラックの発生や成長に原因があることがわかっている。また、ダイラタンシーを生じさせるようなクラックは、開口しながらほぼ最大圧縮応力方向に成長する傾向があること、含水飽和した岩石試料でダイラタンシーが生ずると、排水試験では間隙水の流入が、非排水試験では間隙水圧の減少が起きることなども明らかにされている。

これらの成果は、ダイラタンシーの「特徴」を示すに十分なものであるといえる。しかしながら、このような知見を岩盤構造物の安定性向上に役立てていくためには、ダイラタンシーに関する、いわば「定量的な」記述が必要である。本研究は、この定量的なダイラタンシーの記述を行い、これを工学的な問題へ応用することを目的として実施した。

この目的を達成するため、本研究では次のような手順を採用した。

- (1) クラック成長の数学モデルを用い、偏差応力とダイラタンシーの関係式を記述する。
- (2) 間隙水圧も考慮した体系だった岩石三軸試験を実施し、理論式の妥当性を検証する。
- (3) ダイラタンシーを表現でき、かつ岩盤変形と地下水の相互作用を考慮できる数値解析手法を考案し、地下空洞掘削に関する問題に適用する。

これらは、いずれもこれまで未解決の研究課題であり、本研究では既往の研究成果を踏まえた上で独自の考察を行った。以下、論文の構成にしたがって概要を述べる。

第1章で研究の目的と意義を整理したのち、第2章において、岩石に加えた応力とダイラ

タンシーとの関係を理論的に検討した。

まず、ダイラタンシーがクラックの開口に起因するとの前提のもとで、単一のクラックの成長を数学モデルで表現し、その成長方向や成長長さと同力状態との関係を導いた。次に、複数のクラックが存在する場合について検討し、クラックの成長にともなうひずみ（ダイラタンシーひずみ）と同力との関係式を導いた。また、ダイラタンシーに及ぼす間隙水圧の影響についても考察した。

第2章における重要な結論の一つは、用いた数学モデルによれば、ダイラタンシーひずみが有効封圧（最小圧縮同力と同隙水圧の差）に反比例することである。

第3章では、理論式の妥当性を検証するための実験方法について詳細に述べた。実験には、新たに三軸圧縮試験装置を開発し用いた。これは、間隙水圧の制御機構やAEや弾性波速度の計測システムを備え、理論式の検証に足る性能と精度を有するものである。岩石試料には、来待砂岩と三城目安山岩を用い、乾燥、排水、非排水の各条件で体系だった実験を行った。

第4章では、実験結果と理論の比較検討を行った。理論式に基づき実験結果よりダイラタンシーひずみを取り出し、これが有効封圧に概ね反比例することを明らかにした。また、理論式が表す同力-ひずみ関係などを実験結果と直接比較し、理論式が実験結果を良く近似するものであることを示した。

第5章では、理論の適用範囲を明確にするため、土から硬岩にいたる幅広い岩種についてダイラタンシーが有効封圧に反比例しているかを調べた。これには、主として文献に掲載された三軸圧縮試験結果を用いたが、軸ひずみが1%程度の範囲では、対象とした全ての岩石においてダイラタンシーひずみが有効封圧に概ね反比例することが確認できた。同時に、岩石を構成する粒子の再配列を引き起こすような大きな変形に対しては、理論の適用が困難であることがわかった。

第6章では、研究成果を岩盤構造物の安定性向上に役立てていくため、ダイラタンシーの有効封圧依存を反映した岩盤の構成方程式を提案した。また、この構成方程式を岩盤の変形と同隙水の相互作用が考慮できる数値解析に組み入れる手法を考案した。これを用い、地下水で飽和した岩盤に空洞を掘削した際に、空洞周囲の岩盤で生じる現象を予測した。これらの解析からは、ダイラタンシーを考慮した場合には、空洞に施される支保工の効果が明瞭に表現されることなどがわかった。

第7章では、本研究で得られた知見を整理し結論としてまとめた。要約すると以下のとおりである。

- (1) 岩石に偏差同力を加えると開口したクラックが発生し、これは概ね最大圧縮同力方向に成長する。
- (2) 開口をともなったクラックの成長によって生ずるひずみ（ダイラタンシーひずみ）は、有効封圧に反比例する。
- (3) ダイラタンシーの有効封圧依存を考慮することで、トンネルの形状や支保工がトンネルの安定性に及ぼす影響をより適切に評価できる。

本研究の成果は、岩石や岩盤の力学的性質についての理解を深める上で、また、岩盤構造物の安定性を高めていく上で意義を持つものと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 島 洋 二

副 査 教 授 中 島 巖

副 査 教 授 三 田 地 利 之

学位論文題名

岩石のダイラタンシーに関する基礎研究

ダイラタンシーは、圧縮場に置かれた材料が偏差応力の下で体積膨張をする現象で、岩石の示す非弾性的な性質の一つであり、岩石の変形・破壊ならびに岩石中の間隙水圧の挙動と極めて密接に関連していることから、これまでに数多くの研究がなされている。

本研究は、岩石に加えられた応力とダイラタンシーの関係を定量的に記述することを試み、多くの岩種についてその適用性を確認するとともに、得られた構成方程式を空洞掘削の解析に応用したもので、評価すべき成果は以下の3点に要約できる。

第一の成果は、理論的な考察に基づきダイラタンシーを考慮した構成方程式の導出に成功していることである。岩石の微視的構造を微小な初期クラックがランダムに分布する連続体と仮定し、それらの破壊の確率密度（破壊密度関数）は偏差応力の大きさにのみ依存すること、破壊した初期クラックの周囲は応力を負担できなくなることを作業仮説として、含水飽和した岩石に作用する応力が単調増加するときの応力-ひずみの関係を導びいている。その過程で、偏差応力を加えることにより、初期クラックが逐次的に破壊し、その先端から発生したクラックが開口しながら最大圧縮応力方向に成長すること、開口クラックの長さは偏差応力に比例し有効封圧（封圧と間隙水圧の差）に反比例することを明らかにしている。得られた構成方程式は、その妥当性が三軸圧縮試験などによる実験で検証可能な形に記述されており、ダイラタンシーが有効封圧に反比例し、また、破壊密度関数（の積分）に比例することを示している。

第二の成果は、封圧や間隙水圧を制御できる精密な三軸圧縮試験装置とともに、この装置に組み込んだ岩石に軸差応力を加えたときに示す変化を、A E、弾性波速度、排水量あるいは間隙水圧の計測によって詳細に捉えるシステムを開発していることである。この実験システムを用い、3種の岩石について、乾燥、排水、非排水の3条件下で、封圧と間隙水圧の組み合わせを変えた体系的な実験を行い、多数の貴重な資料を得ることに成功している。そして、得られたA E活動、弾性波速度や間隙水圧の挙動から、理論的考察で仮定した岩石の微視的モデルが妥当であることを確認している。また、得られた応力-ひずみ線図から逆解析して求めた破壊密度関数が封圧や間隙水圧の影響を受けず岩石に固有であること、線図から取り出したダイラタンシーひずみが有効封圧に反比例していることなど、理論で用いた作業仮説と導出された構成方程式が妥当であることを実験的に立証している。

さらに、礫材や土から硬岩にいたる種々の岩石の変形試験結果を用いて理論式のあてはまりを検討し、ひずみが小さく、材料が連続体としての変形挙動を示すような範囲内であれば、岩種を問わず理論が適用し得ることを確認し、構成方程式の汎用性が高いことを明らかにしている。

第三の成果は、ダイラタンシーの有効封圧依存性を考慮した変形解析手法の開発に成功していることである。岩盤の変形に及ぼす間隙水圧の効果を評価できるように、ダイラタ

ンシーを組み込んだ構成方程式に基づく変形解析と浸透流解析を連成させた計算コードを有限要素法に基づいて作成し、地下空洞の力学的な安定性問題に応用している。そして、含水飽和している岩盤の場合、弾性を仮定すると、掘削された空洞周囲に間隙水圧が最小圧縮応力を越える領域が出現し、実際と合わない結果が得られること、ダイラタンシーを導入することによって初めて観察結果と矛盾しない解が得られることを確認している。その上で、支保の剛性や透水係数、岩盤の剛性や透水係数などの材料定数、初期地圧や空洞形状などの境界条件、初期間隙水圧などの初期条件が、空洞の変形と周辺の状態に及ぼす影響を検討している。そして、透水係数の小さい支保材料を使うと、空洞へ向かう浸透流が阻止されるために空洞周囲の岩盤が膨れを起こし、空洞が著しく狭小化するなどの結果を得ている。これらは現場の経験を理論的に説明したものと評価できる。

これを要するに、著者は、岩石のダイラタンシーを定量的に表現し、この妥当性を実験により検証し、さらに得られた構成方程式を岩盤の変形解析に組み込み、有益な多くの新知見を得たものであり、資源開発工学ならびに岩石力学の進歩に貢献すること大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。