

氏名	やまもと きよひと 山本清仁
学位(専攻分野)	博士(農学)
学位記番号	論農博第2588号
学位授与の日付	平成18年1月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	岩石脆性材料の劣化による力学特性の変化

論文調査委員 (主査) 教授 青山 咸康 教授 河地 利彦 教授 笈田 昭

論文内容の要旨

各種水利構造物の基礎は岩盤であることが多く、また水路や道路トンネルは主として岩盤層の掘削により構築される。さらにコンクリートの主材料は骨材と呼ばれる砂や砂利であり、これらは一般に岩盤を爆破・掘削・粉碎して製造される。

このように岩石材料は土木構造物の基礎や材料として重要なものであるが、その材料力学上の最大の特質は脆性と呼ばれる性質である。これは破壊(固体材料がある応力下において2つ以上の部分に分離すること)が瞬間的に発生し、塑性変形(応力の増加をほとんど伴わず変形やひずみが発達すること)をほとんど生じないことであり、鋼材をはじめとする多くの金属材料(延性材料)と大きく異なる。脆性材料の使用状態が破壊状態にどれほど接近しているかという認知が困難であることから、この性質は工学材料としては不都合な性質である。

また基礎岩盤やコンクリート製の土木構造物は厳しい自然環境に曝されることが多い。すなわち、気温の日変化及び年変化の繰り返しや、降雨・降雪による乾湿の繰り返しである。これらは材料内部に温度応力の増大と減退の反復荷重を生じ、疲労破壊に似た材料劣化を生ぜしめる。これらの材料劣化は結果として材料内部に微小な亀裂を生む。

この研究は岩石材料やコンクリート(あるいは理想的にモルタル)のような脆性材料が材料劣化を受けた場合の力学挙動を定量評価しようとしたものである。論文は以下の6章構成となっている。

第1章では、上記のような研究視点の論述と既往の研究の紹介を行っている。本研究の目的は脆性材料の破壊を一定の精度をもって予測することであるとしている。既往研究事例では実験手法として、円柱供試体に対する圧縮試験が主であり、これに各種のひずみ計測や、AE計測、コンピューター・トモグラフィ法(CT法)を応用する事例を紹介している。理論研究では、亀裂進展解析法、マイクロメカニクス論、損傷力学モデルを紹介している。

第2章では、凍結融解試験による岩石供試体の劣化試験の結果を示している。凍結融解試験とは自然に生じる気温変化の負荷を短時間内に供試体に作用させる試験方法であり、この場合は直径4~5 cm、高さ10 cmの円柱供試体の内部温度が-18~+6℃となるような温度変化(1サイクルほぼ90分)を240サイクル荷重させるものである。このような温度負荷の影響を3種類の岩石材料供試体について行い、温度負荷を与えないものとの一軸圧縮荷重状態での破壊特性の変化を仔細に計測した。3種類の岩石材料は火成岩である花崗岩が1種と堆積岩である凝灰岩が2種である。特に凝灰岩は母材が火山灰であり、近年国内の各種現場で遭遇する、風化の影響を受けやすい代表的岩種である。

破壊試験の計測には通常ひずみ計測の他に、画像解析により表面ひずみの算定を試みている。これは供試体表面上におよそ1 cm 方眼で微小なマーカーを付着し、マーカーの圧縮変形時の移動量を連続写真撮影したものから得るものである。これらの実験を通じて破壊時軸ひずみの大きさや弾性係数の値などに、温度荷重(240サイクルの凍結融解)経験の影響は3種の岩石に個別の影響を与えることを確認し整理した。

特に重要なのは、すべての岩種において温度荷重が与える効果は同じではないという点である。すなわち花崗岩や比較的堅硬緻密な凝灰岩では、温度荷重により脆性的性質が増す(体積ひずみが収縮から膨張に変わるひずみ量が破壊ひずみに近づく)と判断されるのに対し、軟岩的性質の顕著な凝灰岩においてはその逆の性質を示す(延性的になる)ことを明らかに

した。

第3章では、人為的に内部亀裂を含ませたモルタル供試体を劣化のあるモルタルとみなし、劣化のない健全供試体との破壊挙動の相違を実験的に調べている。内部亀裂の作成にはモルタル打設時に異物を予め供試体中央部に埋め込んでおくことで実現した。供試体は直径10 cm、高さ20 cmの円柱、及び一辺が10 cmの正方形断面で長さが20 cmの角柱の2種類を用いた。前者では割裂引張試験を行い、後者では1軸圧縮試験を行った。計測は通常の応力-ひずみ計測の他にAE計測を併用した。試験は異なる養生日数のものを試験することで、強度の相違の影響を含むように計画した。

この結果、劣化の影響（内部亀裂の存在）はどの供試体においても明瞭に現れ、圧縮・引張強度は減じ、さらに破壊時体積ひずみが減少することを明らかにした。またAE計測の結果、劣化供試体では引張および圧縮載荷の直後から破壊が始まるが、健全供試体では残響周波数が応力に比例して増加することを明らかにした。

第4章では、損傷理論を展開し、前2章に示した2種類の実験から、3種類の損傷モデル（①累積塑性ひずみモデル、②損傷共役力モデル、③膨張性損傷モデル）のモデル・パラメータを同定し、これを用いて応力-ひずみ履歴の再現性を評価した。損傷理論とは材料の内部亀裂が応力伝達に有効な断面積を減少させ、みかけの弾性係数を低下させると考えるものである。著者は③の膨張性損傷モデルを新たに展開し、この破壊時挙動の再現能力が高いことを示した。

第5章では、上記の3種類の損傷モデルに有限要素法を導入し、圧縮試験のシミュレーションを行い実験結果との比較検証を行っている。破壊に至るまでのシミュレーションであるため、樽型および糸巻き型の初期不整を与えた大変形解析を行った。更に載荷面での初期損傷を仮定することにより、実験結果に近い破壊状況を再現できることを示した。

第6章は、以上4～5章で得た結果の集約である。

付録として第2章で用いた、供試体表面に付したマーカーの移動量から面積ひずみを算定する手順、及び第5～6章に示した3種の損傷モデルの数値算定アルゴリズムを解説している。

論文審査の結果の要旨

この研究は岩石などの脆性材料の宿命である破壊への接近度認知の困難性に対して損傷モデルの提案などを通じ、より合理的な破壊予測法の提案を目的として行ったものである。このため凍結融解試験による反復温度負荷を受けた岩石材料および内部欠損を含むモルタルという2種類の劣化した材料と、これ等に対応する健全材料の破壊時挙動を実験的に比較した。

また損傷力学による3つの力学モデルを用いて上記実験結果を表現した。そしてこれらのモデルに有限要素法を適用し圧縮破壊試験のシミュレーションを行いモデルの適用性を論じた。特に膨張性損傷モデルは本研究で独自に開発したものである。評価できる点は以下の4点である。

1. 凍結融解試験による温度負荷の効果を岩石材料で確認した結果、花崗岩のような比較的堅硬な材料では脆性の性質が顕在化してくるが、それは内部亀裂の増大によるものであると結論づけたこと。
2. 内部欠損の有無によるモルタル供試体の圧縮および引張試験の結果、劣化供試体では圧縮および引張強度はともに低下し破壊時体積ひずみも減少することを確認した。またこの際行ったAE計測の結果から、劣化供試体では載荷直後から破壊が進行することを確認した。
3. 損傷力学に基づく損傷モデルの一つとして膨張性損傷モデルを提案したこと。このモデルの特質は破壊進展に伴う亀裂や間隙の増大が膨張ひずみに集約されるとしたものである。このモデルが岩石やモルタルの圧縮および引張破壊挙動を精度良く近似できることを示した。
4. 上記の3種の損傷モデルに有限要素法を適用し、破壊に至る大変形解析により破壊シミュレーションを行った結果、実験により確認した破壊時変形挙動がある程度再現できる結果を得た。

以上のように本論文は劣化作用を受けた岩石などの脆性材料の破壊時挙動に関して貴重ないくつかの知見を示しており、破壊力学、岩盤力学、材料力学、基礎工学、施設機能工学に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成17年12月12日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。