

学 位 論 文 題 名

温度が岩石や岩盤の力学的特性に及ぼす影響に関する研究

学位論文内容の要旨

北海道においては岩盤斜面の崩壊が頻発し、崩落防止策が早急に検討されている。これら崩壊の原因の一つは凍結を含む温度変化と考えられる。また、近年注目を浴び、多方面において研究がなされている放射性廃棄物の地層処分計画においても、岩盤は最高で $+100^{\circ}\text{C}$ 程度の高温にさらされると予想されている。このように、天然であるか人工であるかに関わらず、岩盤構造物を長期的に利用するとき、温度は、ひずみ速度、降雨、間隙水圧の変動等とならび岩盤の変形・破壊挙動に影響をもたらす重要な要因の一つとなり、その影響をより正確に把握することは今後ますます重要になると考えられる。

本論文は、各種岩石を -30°C から $+80^{\circ}\text{C}$ の温度の下で一軸圧縮試験、圧裂引張試験、破壊靱性試験、ダブルトーション試験、クリープ試験の各5材料試験に供し、強度、亀裂成長速度等の力学的特性に対する温度の影響について検討するとともに、負の温度領域における各岩石の変位挙動を、凍結融解試験、凍上試験を通して確認し、各岩石試料の細孔径分析や -20°C から 0°C までの温度範囲における各岩石試料の不凍水分量測定の結果を加えて、温度変化にともなう各試料と水（もしくは氷）との関係を考察、最後にこれらの原位置への応用として、北海道上川管内国道39号線沿いの岩盤の露頭部における水平掘削したボーリング孔を利用して変位と岩盤内温度を長期現場計測し岩盤温度を含めた環境の変化の影響について考察した研究について述べたものである。

第3章では、正の温度領域における水中での岩石の変形・破壊挙動に関する室内試験より、白浜砂岩と稲田花崗岩について行われた一軸圧縮試験、圧裂引張試験、破壊靱性試験では、温度増加とともに強度が低下することや、限界ひずみやヤング率には温度が大きくは影響しないこと等を明らかにした。また、温度の影響は稲田花崗岩についてより顕著に現れ、各強度への载荷速度の影響は 1°C と比較して 80°C で大きく生じるという知見を得た。これらの結果より、温度による強度低下の原因を、熱応力の発生、温度上昇に伴う応力腐食速度の増大、石英の応力腐食物質である水の粘性低下による亀裂への供給量増加等、岩種による影響の大きさの違いの原因を膠結物質である粘土鉱物の有無による熱応力の大きさの差異で説明している。

また、正の温度領域における水中での岩石中の亀裂成長挙動に関しては、ダブルトーション試験におい

て、温度増加に伴う同レベルの応力拡大係数の下で亀裂速度が増加すること、稲田花崗岩における応力腐食指数が減少することを明らかにした。また、鉱物粒子の線膨張率の違いを考慮した熱応力の有限要素解析を行い、結晶質の花崗岩において砂岩より2オーダー程度、熱応力が発生しやすいことを示すとともに、稲田花崗岩の薄片写真を電子顕微鏡で観察し、その亀裂形状をフラクタル解析することにより、温度増加に伴い亀裂形状が複雑になることを明らかにしている。

正の温度領域における水中での岩石の時間依存性変形挙動に関するもので、一軸圧縮クリープ試験において、温度増加に伴って寿命が短くなること、最小軸ひずみ速度と同様に最小伸びひずみ速度が増加することを確認した。高温下における稲田花崗岩では寿命のばらつきが大きくなることを明らかにし、この現象を、ダブルトーション試験の結果から説明している。また、最小ひずみ速度とクリープ寿命の関係は両対数グラフ上で温度に関わらず-1の勾配を持つ直線で近似できることを明らかにした。

第4章では、氷点下の温度領域における岩石の変形・破壊挙動に関する諸試験を実施した結果をまとめた。-30℃から-5℃の温度範囲で凍結させた稲田花崗岩、白浜砂岩、幌延泥岩の一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行い凍結の程度に伴う強度増加を示し、幌延泥岩については大きな異方性と明瞭な粘性的変形挙動が認められることを明らかにし、岩石の微視的構造と結び付けて説明している。更に、稲田花崗岩、白浜砂岩、支笏溶結凝灰岩、層雲峡溶結凝灰岩に凍結融解履歴を与え、凍結融解時の変形計測とともに、各岩石試料の比表面積測定と不凍水分量測定、顕微鏡観察により、凍結に伴う圧裂引張強度の増加割合は比表面積と正の相関を持つなど、凍結に伴って氷がもたらす岩石の微視的構造の変化と上述の力学的特性の変化を関連付けた。

第5章では、2004年8月より開始した、寒冷地の急崖における岩盤変形の長期モニタリングに関して、新たに開発した高精度測定器の説明とともに、北海道上川管内国道39号線沿いの岩盤露頭部急崖斜面の変形と温度等の気象条件の計測結果をまとめている。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果について総括した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	石島洋二
副査	教授	三浦清一
副査	教授	三田地利之
副査	特任教授	赤川敏
副査	助教授	藤井義明

学位論文題名

温度が岩石や岩盤の力学的特性に及ぼす影響に関する研究

北海道では岩盤斜面の崩壊がしばしば発生し、早急な防止策の検討が望まれる。崩壊の外因の一つに氷点以下の気温を挙げることができる。一方、近年注目を浴び、多方面において研究がなされている放射性廃棄物の地層処分に際して、岩盤は最高で100℃程度の高温に晒されると予想されている。これら2つの例が示すように、岩盤は、種々の温度の下で利用されるが、温度は、ひずみ速度、降雨、間隙水圧の変動等とならび岩盤の変形・破壊挙動に影響をもたらす重要な外因の一つであるので、この影響を正確に把握することは重要である。

本論文では、まず、各種岩石を-30℃から+80℃の温度下で次の5種の材料試験、すなわち一軸圧縮試験、圧裂引張試験、破壊靱性試験、ダブルトーション試験、クリープ試験、に供し、強度、亀裂成長速度等の力学的特性に対する温度の影響について検討している。つぎに、負の温度領域における各岩石の変形挙動を、凍結融解試験、凍上試験を通して確認し、各岩石試料の細孔径分析や-20℃から0℃までの温度範囲における各岩石試料の不凍水分量測定の結果を加えて、温度変化に伴う各試料と水(もしくは氷)との関係を考察している。最後に、原位置への応用として、北海道上川管内国道39号線沿いの崖を対象に、岩盤中に水平掘削したボーリング孔を利用して変位と温度を長期計測し、岩盤変位に及ぼす岩盤温度を含めた環境の変化の影響について調査している。以上の諸研究に関して評価すべき成果は以下の5点に要約される。

第一の成果は、氷点以上の温度領域における水中での岩石の変形・破壊挙動に関するもので、白浜砂岩と稲田花崗岩について行われた一軸圧縮試験、圧裂引張試験、破壊靱性試験では、温度増加とともに強度が低下すること、限界ひずみやヤング率には温度が大きくは影響しないことを明らかにした。また、温度の影響は試験に供した岩石の中で稲田花崗岩に最も顕著に現れ、各強度に及ぼす载荷速度の影響は1℃より80℃の方が大きいという知見を得た。温度による強度低下の原因として、熱応力の発生、温度上昇に伴う応力腐食速度の増大、石英の応力腐食物質である水の粘性低下による亀裂への供給量増加の3つの要因を挙げ、温度による強度低下の機構を詳細に検討している。また、温度の影響の大きさ

が岩種によって違うのは、膠結物質である粘土鉱物の有無により熱応力の大きさに差異が生じるためであると解釈した。

第二の成果は、氷点以上の温度領域における水中での岩石中の亀裂成長挙動に関するもので、ダブルトーション試験において、温度増加とともに同レベルの応力拡大係数の下での亀裂速度が増加することを明らかにした。さらに、稲田花崗岩の場合、温度増加に伴い応力腐食指数が減少すること、亀裂形状が複雑になることを明らかにした。なお、後者の知見は、薄片の偏光顕微鏡観察で得た亀裂形状をフラクタル解析することにより得たものである。また、鉱物粒子の線膨張率の違いを考慮した有限要素解析を行い、結晶質の花崗岩では砂岩より2オーダー程度大きな熱応力が発生することを示した。

第三の成果は、氷点以上の温度領域における水中での岩石の時間依存性変形挙動に関するもので、一軸圧縮クリープ試験を行い、温度増加に伴って寿命が短くなること、最小軸ひずみ速度と同様に最小伸びひずみ速度が増加することを確認するとともに、クリープ変形が確認できる応力レベルが狭くなること、つまり、瞬時に破壊してしまうクリープ応力と破壊まで48時間以上要するクリープ応力に差がみられなくなることを見出した。また、最小ひずみ速度とクリープ寿命の関係は両対数グラフ上で温度に関わらず約-1の勾配を持つ直線で近似できることを明らかにした。

第四の成果は、氷点下の温度領域における岩石の変形・破壊挙動に関するもので、-30℃から-5℃の温度範囲に置いた稲田花崗岩、白浜砂岩、幌延泥岩の一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行い、稲田花崗岩の一軸圧縮試験を除けば、温度の低下に伴い強度が増加することを明らかにした。また、幌延泥岩については、温度低下に伴い異方性と粘性的変形挙動が顕著になることを見出し、岩石の微視的構造と結び付けて説明している。さらに、稲田花崗岩、白浜砂岩、支笏溶結凝灰岩、層雲峡溶結凝灰岩について、凍結融解履歴を与えたときの変形挙動を調べ、これと各岩石試料の比表面積、不凍水分量、顕微鏡観察による岩石の微視的構造とを関連付けて解釈した。

第五の成果は、寒冷地の急崖における岩盤変形の長期モニタリングに関するもので、北海道上川管内国道39号線沿いの露頭部急崖斜面の変形と温度等の気象条件の計測結果をまとめている。岩盤変形の計測は、開発した高精度測定器を用いて2004年8月より開始したものである。

これを要するに、著者は、種々の岩石を-30℃から+80℃の温度下で一軸圧縮試験、圧裂引張、破壊靱性試験、ダブルトーション試験、一軸圧縮クリープ試験に供し、温度が岩石の変形・破壊挙動に与える影響を明らかにするとともに、計測器を開発して寒冷地の急崖における岩盤変形の長期モニタリングを実施して有益な多くの知見を得たものであり、岩盤工学ならびに寒冷地工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。