[別紙 2]

審 査 の 結 果 の 要 旨

論文提出者氏名　儂 学鋒

本論文は、”Laboratory reproduction and microscopic observation of mechanical weathering process of soft rocks”と題し、山地における斜面災害の軽減に向けての手法を材料科学的な視点から実験的に探究したものである。

山地の斜面が豪雨時に崩壊して多大な犠牲を生む災害は、世界的に毎年無数に発生している。これを軽減防止するための努力は各方面で行われているが、対象となる斜面は無限に存在し、対策に投入できる予算が限られていることもあり、事態はなかなか進展しない。ロックボルトや斜面補強などのハードな対策が高価であることも、その一因である。そこで本論文を含む一連の研究では、１）地質・地形の観点から危険となりうる斜面を一次スクリーニングする、２）それら斜面を簡便な方法で定期的に検査する、３）検査結果で崩壊危険性が高まったと判断された斜面に安価な観測装置を多数設置する、４）観測データが崩壊の切迫を示した場合にはすみやかに注意報・避難警報を発令する、という体系の構築を目指している。そのうち本論文は２）を構成するものであり、物理的風化現象によって岩石の剛性や強度が劣化していくプロセスを実験的に再現し、定量的評価を試みた。

本論文は九章から構成されている。第一章は導入であり、研究の動機を簡潔に説明している。

第二章は既往の研究の抄録である。風化現象は地質学でも研究されてきたテーマであるが、斜面崩壊の危険、せん断強度やせん断剛性など力学的な視点は十分ではなかったこと、超長期的な風化現象を加速して限られた研究期間で成果を得る技術の例、力学的な性質が荷重の作用方向によって変動する異方性の重要性、そして風化の進展を微視的視点から観察した研究例などを紹介している。

本研究は風化斜面の野外調査と実験室における風化過程の加速再現から構成されているが、そこで用いられる諸種のデータ分析方法をまとめたのが第三章である。

続いて第四章では、野外調査で使用した屈折波段差装置や動的コーン貫入試験装置、および実験室で使用した点載荷装置、温度制御型の三軸せん断装置、ディジタル顕微鏡および画像解析技術の説明をしている。使用した特殊な三軸せん断装置は、自然界と同様の応力が作用したままの状態で凍結融解を繰り返すことのできる特長がある。そして力学実験は、応力ひずみ条件の明確な三軸

せん断装置で行うことが望ましい。しかしこの装置のためには試験体を厳密に等質な円柱型に整形する必要があり、材質が不均質で亀裂も存在する自然岩では、これが必ずしも容易ではない。その欠点を補うために、試験体の寸法がより小さく、形状の制約も少ない点載荷試験も併用した。ただしこの方法では、材料強度の推定はできるものの、剛性などは不明確である。

第五章は研究方法の説明であり、まず、野外調査を実施した四川省の塔子坪サイト、静岡県七面山崩壊斜面、ブータンの風化崩壊斜面、高知県小北川斜面、兵庫県の六甲山の風化花崗岩斜面、そして静岡県の大崩斜面について説明している。続いて、各地で採取した自然岩のサンプルを整形して力学実験に供する前処理、さらには砂とセメントとベントナイトを混合して作成した人工軟岩の準備方法についても記述している。

本来であれば前述のように、風化再現と力学実験はすべて実際の岩石材料を以て行うべきである。しかし自然の岩石は組成や内部構造が千差万別であり、サンプルごとの実験結果のばらつきも著しく、実験結果を明快に説明することが難しい。そこで砂とセメントを主成分として同一の性質を持つ均質な人工軟岩サンプルを数多く作成し、それらを実験して相互比較と定量的評価に利用した。また力学的な風化過程の主原因として冬季の間隙水の氷結、体積膨張と岩石の引っ張り破壊を取り上げ、それの繰り返しによる岩石の劣化を実験室において短期間で再現するために、加速実験を行ったことを述べた。加速方法としては、岩石の水浸、凍結、融解のサイクルを数日周期で繰り返した。

第六章は、上述した四川省と静岡県七面山における屈折波探査と動的コーン貫入試験の結果を説明している。二つの方法の結果が風化の進展を通じて連動していること、後者の風化崩落斜面に近づくと深部にも劣化が進行していることを示した。

第七章は、加速風化させた岩石サンプルの力学実験結果に関する議論である。まず自然岩サンプルの点載荷実験を実施し、風化サイクルの進展とともに材料強度が劣化すること、層理面に対して荷重が垂直に作用するときに劣化が進行しやすいこと（異方性）を示した。第二に温度制御型の三軸試験装置で精密な実験を行った。その結果によれば、拘束応力が作用した状態で風化のサイクルを繰り返すと、強度や剛性は劣化するものの、拘束応力の無い風化サイクルに比べて、劣化の程度は小さい。これは、間隙水の凍結膨張と岩石の引っ張り破壊、亀裂開口が、拘束応力によって軽減されるためと解釈できる。したがって自然斜面で風化と劣化が進行するのは斜面の表層に限られ、表層が崩落して初めて深部に劣化が進展し、次の崩落に至るのである。さらに強度の劣化と剛性の劣化との相関に着目し、力学的に不安定なサンプル（拘束応力が低い、あるいは人工軟岩のセメント含有量が少ない）ほど材料強度の低下が先行して剛性低下が後になる、という傾向を報告している。また両対数グラフ上では強度と剛性（Ｓ波伝播速度）の劣化はおおむね一定の傾きの直線をたどることも示された。このことは、実際の風化斜面で定期的にＳ波伝播速度を計測すれば、高

価な強度測定を行うこと無く、風化進展と強度劣化を追跡できることを意味している。このことは先述した斜面災害軽減体制を構築する上で、実用上の意義が深い。

第八章は、風化の進行する岩石サンプルの表面を顕微鏡観察した結果の取りまとめである。使用した顕微鏡はディジタルレーザータイプのものが中心で、表面の凹凸を三次元ディジタル化して、表面の剥離や亀裂開口などを定量評価することができる。岩石サンプルが繰り返し風化サイクルを経験すると、剥落により質量が減少した。このことから表面形状も凹凸が増すものと予想された。この予想はおおむね正しかったが、逆に平滑化する場合もあった。これをさらに検討すると、層理面に平行な表面では平滑化が起こっていることが見出された。他方、層理面に直交する表面では、凹凸が増大した。このことは、層理面に浸入した水の凍結によって層理面に沿って亀裂が開口し、成分の剥落が起こっていることを示唆している。研究ではさらに、岩石表面画像のＰＩＶ解析を実施し、表面の変位分布の再現から亀裂開口やせん断変形なども考察した。

以上を要するに、本研究は、岩石の物理的風化の再現実験によって工学的な性質の劣化の追跡と斜面防災への応用を図ったものであり、その成果は実用的な斜面防災体系の実現を可能にしたものである。また顕微鏡観察は、風化過程の微視的機構の実証に貢献している。したがって本研究は防災技術と防災科学の分野に新しい知見を加えており、当該學術の発展への貢献が大きい。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。