氏名	UDAGEDARA DASHAN THARANGA
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 1047 号
学位授与年月日	平成 28 年 9 月 23 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Evaluation and Application of Weathering Indices Based on Geochemical and Geomechanical Approaches on Precambrian Gneiss in Samanalawewa Hydropower Project Site, South Sri Lanka (南スリランカ・サマナラウエワ水力発電地区における先カンブリア紀片麻岩の地球化学的・地盤工学的的手法に基づいた風化指標の評価と適用)
論文審査委員	委員長 准教授 小口 千明 委員 教授 川本 健 委員 准教授 長田 昌彦 委員 教授 桑野 二郎

論文の内容の要旨

This study investigates a rapid rock weathering problem at Samanalawewa hydropower project, south Sri Lanka. Evaluation of weathering grades using weathering indices and assess the relationship between rock properties and weathering indices is a main objective.

Both physical and mechanical properties correlate well with chemical weathering indices. It emphasizes the fact that using chemical weathering indices together with physical and mechanical properties on heterogeneous rocks enhances its capability of accurate classification of weathering grades. Furthermore, this study has been able to establish an inter-relationship between bulk density (ρ) and point load strength (S_p) that turns out to be an exponential relationship shown as the following equation.

$$S_p = a \cdot e^{c\rho}$$

Where a and c are constants obtained from the data plot. Upon weathering, the response of physical, mechanical and chemical properties varies as a sequence that does not deviate from that of rocks subjected to weathering under temperate climatic conditions.

The weathering rate of sillimanite-garnet gneiss at Samanalawewa is rapid in terms of engineering scale. The removal of elements from the rock within 25 years at an incomparable rate to Post Archean Average Shale is a rapid weathering. The removal of K, Fe and Al in large quantities from K-feldspar, almandine and sillimanite is a reason for this rapid weathering. The acidity generated upon the reaction between rock and water accelerates the dissolution of major ele-

ments in such a way that pH below 4.0 always promotes dissolution of Al and Fe. Additionally, pH above 4.2 promotes precipitation that would also lead to further dissolution. However, the low pH prevails during water-rock interaction hindering the dissolution of trace elements. The acidity could be generated either by dissolution of Fe-S minerals or by oxidising of Fe from other Fe bearing minerals.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、UDAGEDARA DASHAN THARANGA 氏の提出した学位論文について、平成 28 年 7 月 28 日に公開で論文発表会を開催し、論文内容の審査を行った。審査結果を以下に要約する。

南スリランカ・サマナラウエワ水力発電プロジェクトで造成されたダム材料として用いられている先カンブリア紀片麻岩は、造成からわずか 30 年足らずで顕著に風化している。ダム材料としての是非を議論するにも、片麻岩など変成岩の風化に関する研究は例が少なく評価が難しいことから、本論文では、スリランカという熱帯環境下における片麻岩の風化プロセスを明らかにした。また、これまでに多く提唱されている風化指標のうち、当材料にとって適切な指標を検証する目的で、地球化学的・地盤工学的手法に基づき風化指標の評価も行った。

第 1 章では、スリランカ・サマナラウエワ水力発電プロジェクトの概要を示し、当地域に分布する岩石のうち、とくに、シリマナイトーガーネット片麻岩が異様に風化変質していることを指摘している。熱帯モンスーン地域に属す本地域では、その風化変質の主たる要因は化学的風化と考えてよい。また、スリランカ国の広い範囲で、先カンブリア紀の片麻岩が分布している。したがって、サマナラウエワプロジェクトで明るみになったダム材料の岩石の急速風化は、他の地域でも起こる可能性があり、片麻岩の特徴とその風化過程に関する科学的知見を集積することが、今後の対策への第一歩となる。このような問題に対処するため、風化指標の評価と水-岩石相互作用について検討することを述べている。

第 2 章では、岩石の風化研究に関して、1) 風化プロセス、2) 風化指標、3) 水-岩石相互作用、4) 風化速度、の各視点から既存研究をレビューした。とくに風化指標に関する研究については、岩石のもつ諸性質を、物理的、力学的、鉱物学的、化学的性質の観点から整理し、前 3 者は一連の風化程度を呈す試料の最も風化したものと未風化のものとの比で表されるのに対し、化学的風化指標は、元素の易動度からも風化程度を判断できることを示した。

第 3 章では、試料の性状について述べられている。まず、プロジェクト地域周辺の地理的・地質学的状況について述べられた後、シリマナイトーガーネット片麻岩の露頭における風化状況を、点載荷試験結果に基づき、弱風化帯、中風化帯、強風化帯、完全風化帯に分帯した。

第 4 章では、各風化帯から入手した岩石試料について行われた、岩石物性試験およびその結果が述べられている。試料調整の方法をはじめ、物理的・力学的試験（地盤工学的試験）として、比重、かさ密度、含水率、転載荷試験、剥離試験、一軸圧縮試験などを、化学的・鉱物学的試験として、X 線粉末回折分析（XRD）蛍光 X 線分析（XRF）、電子顕微鏡、ICP-OES などによる分析を行った。

第 5 章では、水-岩石反応実験について記されている。試料の準備と実験方法のほか、とくに実験前後における固相・液相双方の分析結果についても述べられている。実験はバッチ法によるものであるが、反応の過程を電気伝導度（EC：Electric Conductivity）と pH の推移でとらえた。その結果、電気伝導度は、大きな振れ幅を示さず、徐々に値が高くなるのに対し、pH は変動幅が激しいことが分かった。これは、岩石は

複数の鉱物から構成されており、各鉱物が段階を追って溶解する過程で pH の変動が起こるためである。一般的な造岩鉱物においては実験例が多く存在するが、片麻岩構成鉱物に関する同様の研究例はほとんどなく、その観点からも貴重な実験といえる。

第 6 章では、上記 4～5 章で得られた結果をもとに、1) 各物性値に関する分析、2) 風化指標の評価、3) 水-岩石反応実験の各観点から考察されている。とくに、2) 風化指標については、既存研究で提案されている 20 種超の風化指標を計算するとともに、指標間の相関係数を求めて相互の関連性を検討した。その結果、溶解特性に特徴的な風化指標を用いるよりも、風化生成物（風化残留物）に特徴的な風化指標と地盤工学的指標（密度や強度）との相関が高いと言及している。風化残留物を示す指標に特徴がみられたことは、熱帯環境下でのフェルシック岩石起源の変成岩の風化を特色づけているものと考えられる。また、従来、新指標として提唱されるだけであった数々の風化指標について、指標の使い分けに通ずる指針にもなり、基礎研究としての風化研究および応用研究としての地盤工学的研究の双方において重要な検討結果となった。3) 水-岩石反応実験については、地球化学分野から出されている計算ソフトを利用し、溶液の飽和度を計算し、二次生成した鉱物種それぞれについて生成量を推定した。変成岩鉱物における同様の研究例は稀少であり、当該分野において重要な知見を得た。

第 7 章では、本研究から得られた成果と結論をまとめ、今後の研究動向と課題を展望した。

以上のように、本研究は、熱帯地域における変成岩の風化研究という基礎研究的な視点のみならず、種々の風化指標の特徴をも整理し、岩石の特徴と風化プロセスを考慮した風化指標の使い方にも言及するなど、実際の問題にも応用可能な知見を与えるものである。サマナラウエワプロジェクトそのものについては、既に造成された大規模構造物であるため、直ちに対策をとることは難しいが、類似の岩石が多く分布するスリランカ国で工事を行う際には、建設材料あるいは建設地盤としての岩石の反応特性や耐久性を事前に把握する必要があることを注意喚起した。これらの成果は、国際学術雑誌（Bulletin of Engineering Geology and the Environment : IF 0.760 ; Environmental Earth Science: IF 1.765 ; Asian Journal of Water, Environment and Pollution）に論文 3 編として既に公表されているほか、査読中の投稿論文が 1 編（Geosciences Journal: IF 0.922）、国際会議（Goldschmidt, EGU）での発表や国内で開催された連合大会（JpGU）の国際セッションでの発表等も 5 件にのぼる。当審査委員会では、これらを総合的に考慮し、博士（学術）の学位にふさわしいものであると認め、合格と判定した。