



第五話 劣化を考慮した斜面の安定性評価

5.1 岩石の風化速度の研究

西山 (2018) ⁴⁴⁾の総説「日本における岩石の風化研究の進展と課題」は、1990年以降の日本の岩石の風化研究の百数十編の研究論文を網羅するレビュー論文である。彼は岩石の風化研究は(1)風化のプロセス(メカニズム)に関する研究、(2)風化物質と岩石の物性変化に関する研究、(3)岩石の風化速度に関する研究に大別されると述べ、「岩石の風化速度について、実験室で計測する方法は多様であるが、山体スケールではボーリング掘削や物理探査などに限られ、広範囲における風化帯の性状を三次元的に把握することは容易ではない。」と述べている。岩石・岩盤の風化速度に関する研究の現状と課題として、斜面における物質移動速度には風化速度と侵食速度のバランスが大きく影響すること、既往の風化速度の研究は、風化環境が数万年といった長期間にわたって一定であったとした仮定の上で得られたもので、過去10万年間の気候変動をどう取り込むかという困難な課題があることを指摘している。「風化速度と侵食速度のバランスが大きく影響する」との指摘は、No.13の1.5.2で述べたシラス崖の表面崩壊に関する下川ら(1987) ²⁴⁾の研究を思い起こさせる。

西山は、風化速度研究では、建築年代が既知の石造物を利用する例、形成年代が可能な溶岩ドームを対象とする例、離水年代が既知の段丘堆積物中の礫を利用する例の三種があることを紹介している。図-24で紹介した小口ら(1994) ³⁸⁾の研究は、形成年代が特定可能な溶岩ドームを対象とした研究であり、5.2で紹介する Suzuki & Hachinohe (1995) ⁴⁵⁾の研究は海成段丘を構成する基盤岩(砂岩・泥岩)の掘削のり面とボーリングコアを用いた研究である。

5.2 岩石・岩盤の風化速度の数学モデルと検証データ

松倉(1997) ⁴⁶⁾は、解説「斜面を構成する岩石・岩盤の風化速度」で岩石・岩盤強度の低下速度の研究レビューをしている。その中に岩盤の風化速度に関する数学モデルの研究の紹介がある。Sunamura(1996) ⁴⁷⁾は岩盤表面の強度(S)の時間(t)低下を

$$dS/dt = -kS$$

なる一回の常微分方程式でモデル化し、その解

$$S = S_0 \exp(-kt) \quad (1)$$

を与えた。ここでkは次元[T⁻¹]を持つ単位時間当たりの低下係数で、S₀は風化開始時の岩石・岩盤強度である。

風化は、初期には岩盤表面でのみ起こるが、時間経過とともに岩盤内部に進行する。Sunamura(1996) ⁴⁷⁾は、上記の低下係数kを岩盤表面からの深さ(z)の関数 $k = f(z)$ として(1)式を

$$S = S_0 \exp(-f(z)t)$$

と書き換えた。



風化断面において、強度変化の勾配は風化前線 (z_c より深部では風化が起こっていない深さ、すなわち $z = z_c$ で $k = 0$) でゼロとなる関数として仮定したのが

$$f(z) = A(z - z_c)^2$$

で、深さ方向の風化速度の理論式として

$$S = S_0 \exp[-A(z - z_c)^2 t] \quad (2)$$

を導いた。ここに A は定数である。

(1) 式の検証として用いられたのが図-24 の小口ら(1994)³⁸⁾の研究で、(2) 式の検証として用いられたのが Suzuki & Hachinohe (1995)⁴⁵⁾の研究である。

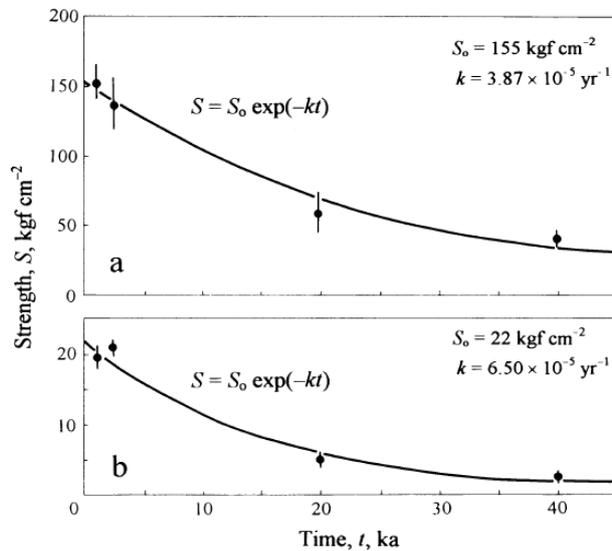


図-39 理論式(1)の計測データのフィッティング結果. 出典：Sunamura (1996)⁴⁷⁾

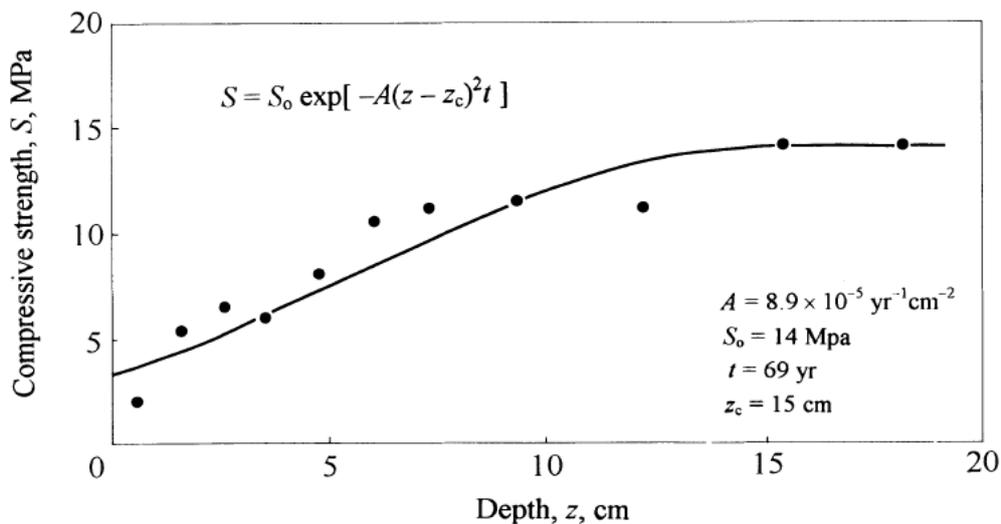


図-40 理論式(2)の計測データのフィッティング結果. 出典：Sunamura (1996)⁴⁷⁾

Sunamura はさらに岩盤表面が細粒化する時の強度を S^* 、その時の時間 t^* として定義し、タフォニの深さの式として次式を導いている。

$$z = z_c(1 - \sqrt{t^*/t}) \quad t > t^* \quad (3)$$

ここで理論の検証に用いられた小口ら(1994)³⁸⁾の研究、Suzuki & Hachinohe (1995)⁴⁵⁾の論文の後に発表された同著者による論文 Hachinohe, S, Hiraki, N. and Suzuki, T. (1999)⁴⁸⁾の概略を紹介しておく。

伊豆諸島はフィリピン海プレートと太平洋プレートの境界の海底火山が隆起したものであることは周知であるが、その一つの島が神津島である。小口らは神津島に存在する4つの溶岩円頂丘を形成する多孔質流紋岩を研究対象とした。4つの溶岩円頂丘の噴出年代はそれぞれ1,100年前、2,600年前、2万年前、4万年前とすでに調べられ既知である。それらの溶岩円頂丘の露頭から試料を採取して化学的性質、物理的性質、力学的性質を調べた。露頭でのシュミットハンマー反発値から深さ方向にほぼ一様に風化が進行していることが観察されている。力学的性質として一軸圧縮強度と圧裂引張強度を測定した。採取試料は摂氏110度で24時間炉乾燥した乾燥試料(dry)と約24時間吸水させた湿潤試料(wet)を用いた。その結果が、図-41である(図-24の再掲)。

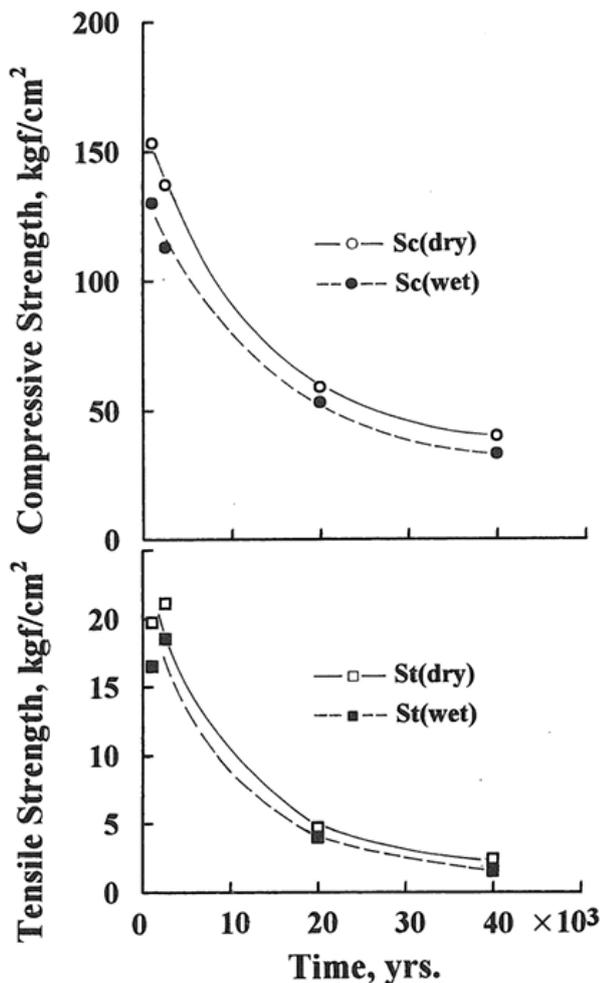


図-41 圧縮強度、引張強度の経年劣化。出典：小口ら(1994)³⁸⁾

興味深い結果の一つは、化学的特性、物理的特性、力学的特性の経年変化を示した図-42である。縦軸は最も若い1,100年の岩石の物性値に対する比である。化学的性質(Chemical properties)の変化は緩慢であるが力学的性質(Mechanical properties)は最初の2万年で急激に変化している。

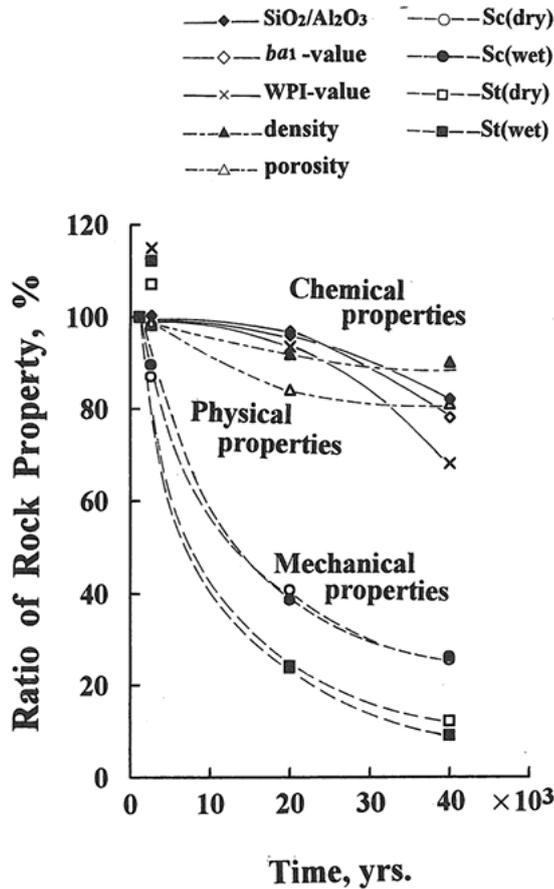


図-42 化学的特性、物理的特性、力学的特性の経年劣化. 出典：小口ら(1994)³⁸⁾

Suzuki & Hachinohe (1995)⁴⁵⁾の研究は、海成段丘を構成する基盤岩(砂岩・泥岩)の掘削のり面とボーリングコアを用いた研究である。その後に発表された同著者による同じ課題の論文 Hachinohe, S, Hiraki, N. and Suzuki, T. (1999)⁴⁸⁾に沿って研究の概要を記述する。調査地点は、過去に大地震時に急激な隆起を繰り返している房総半島南端の5つの段丘面をもつ海成段丘で砂岩と泥岩で構成されている。離水年代はそれぞれ約6150年、4350年、2850年、290年、70年と既知である。本研究では新しい3つの段丘(NUMAIII, NUMAIV, TAISHO)を対象とし、力学特性は、3段丘面の26地点で新鮮な岩盤までボーリングを行い、得られたボーリングコアに対して一軸圧縮試験と相関を持つ針貫入試験を実施し、得られた針入硬さの新鮮岩の針入硬さに対する比を残留強度比Rsと定義して表示した。

図-43は砂岩、泥岩に分けて表した3つの段丘試料の深さ方向のRsの値である。

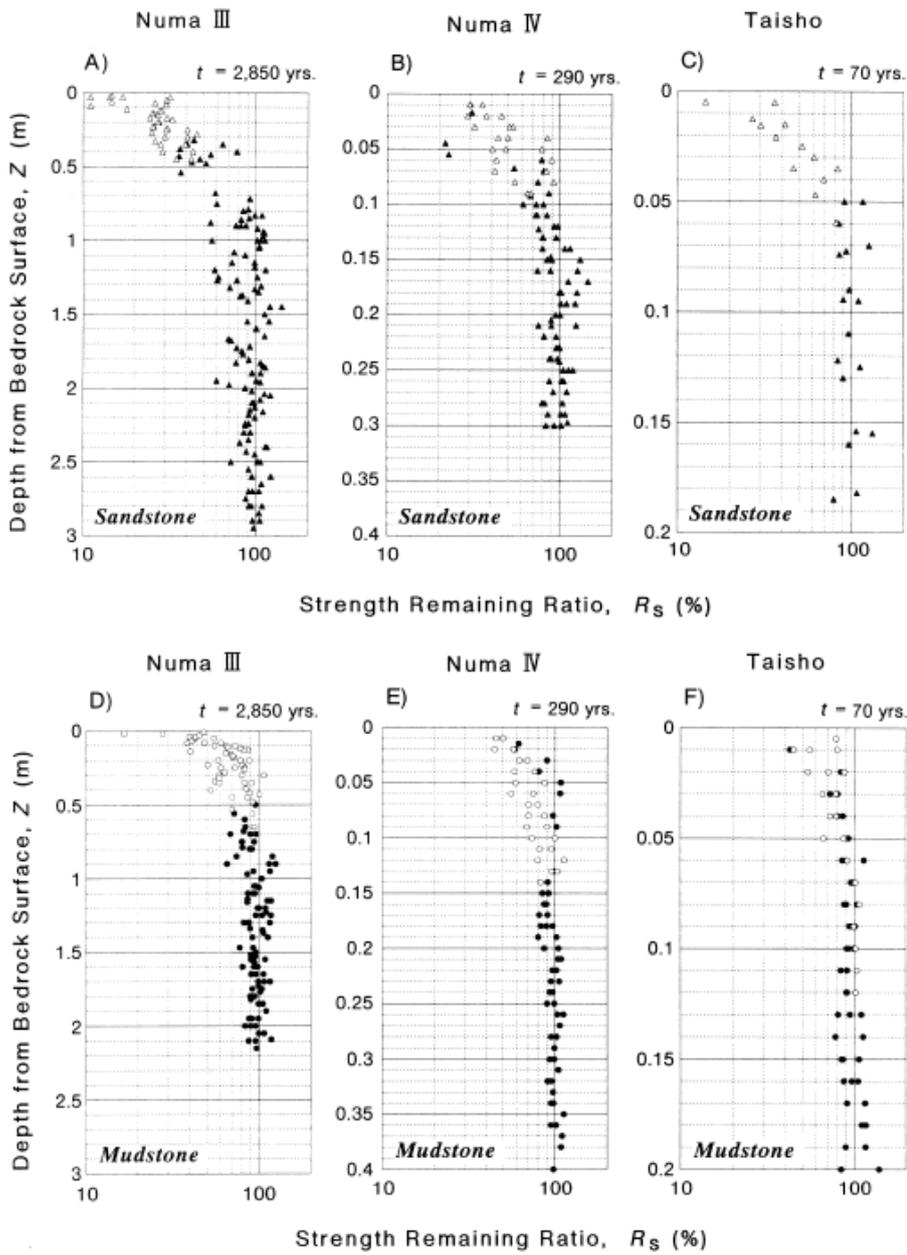


図-43 砂岩、泥岩に分けて表した3つの段丘試料の深さ方向の R_s 。

出典：Hachinohe, S, Hiraki, N. and Suzuki, T. (1999)⁴⁸⁾

彼らはこれらの傾向を次式で表現した。

$$R_s = R_{s(0)} + (R_{sf}R_{s(0)})(1 - e^{-kz}) \quad (4)$$

ここで $R_{s(0)}$ は岩盤表面の R_s 、 z は基盤面表面からの深さ、 k と R_{sf} ($=100\%$) は定数である。
式 (4) を模式的に図示すると図-44 のように描くことができる。

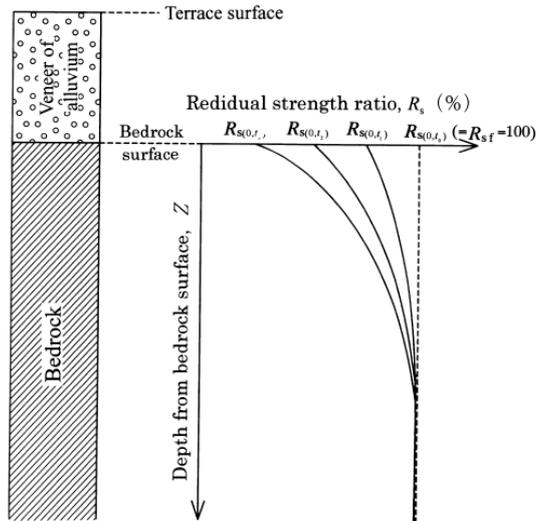


図-44 式(4)を説明する模式図.

出典：Hachinohe, S, Hiraki, N. and Suzuki, T. (1999)⁴⁸⁾

砂岩と泥岩について $R_{s(0)}$ と風化年数を両対数にプロットしたのが図-45で、データはほぼ直線関係が認められ砂岩の方が風化による劣化が激しいことがわかる。

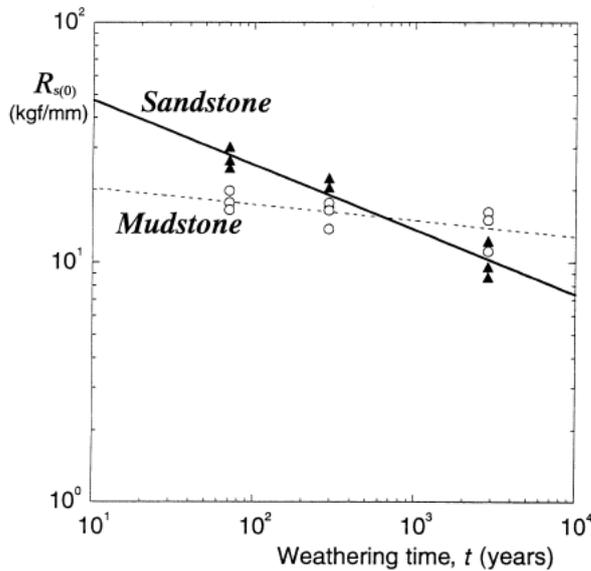


図-45 砂岩と泥岩について $R_{s(0)}$ と風化年数.

出典：Hachinohe, S, Hiraki, N. and Suzuki, T. (1999)⁴⁸⁾

このような検討を経て、砂岩、泥岩の深さ方向の風化による劣化の状況を500年間隔で示したのが図-46である。

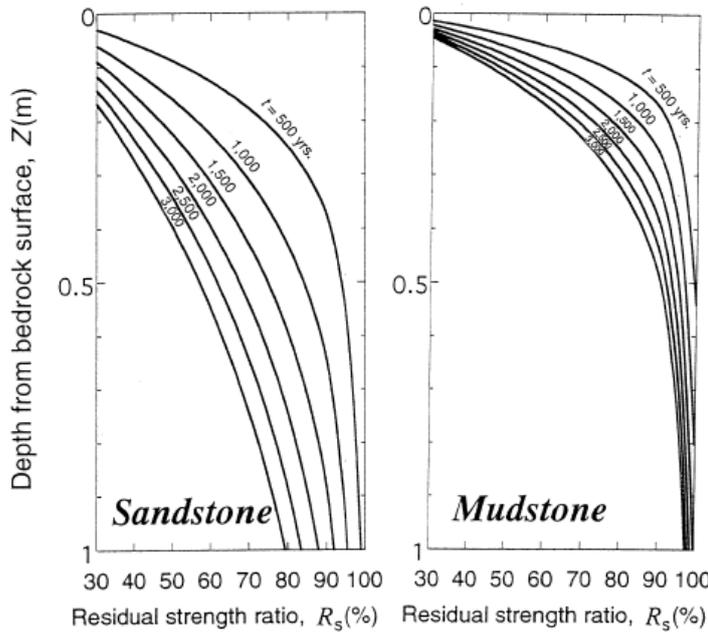


図-46 砂岩、泥岩の深さ方向の風化による劣化.

出典：Hachinohe, S, Hiraki, N. and Suzuki, T. (1999)⁴⁸⁾

参考文献

- 44) 西山賢一 (2018)：日本における岩石の風化研究の進展と課題、地質学雑誌、第 124 巻、第 11 号、877-888.
- 45) Suzuki, T. and Hachinohe, S. (1995): Weathering rates of bedrock forming marine terraces in Boso Peninsula, Japan, Trans. Japan. Geomorphological Union, 16(2), 93-113.
- 46) 松倉公憲 (1997)：斜面を構成する岩石・岩盤の風化速度、応用地質、38 巻、4 号、224-231.
- 47) Sunamura, T.(1996): A physical model for the ate of coastal tafone development, Journal of Geology, Vol.104, No.6, 741-748.
- 48) Hachinohe, S, Hiraki, N. and Suzuki, T. (1999): Rates of weathering and temporal changes in strength of bedrock of marine terraces in Boso Peninsula, Japan, Engineering Geology, 55, 29-43.



バックナンバー

シリーズ2

- No.16 2026年2月6日
- No.15 2026年1月21日
- No.14 2026年1月9日
- No.13 2025年12月19日
- No.12 2025年12月5日
- No.11 2025年11月21日

シリーズ1

- No.10 2025年11月7日
- No.9 2025年10月24日
- No.8 2025年10月10日
- No.7 2025年9月26日
- No.6 2025年9月12日
- No.5 2025年8月22日
- No.4 2025年8月 8日
- No.3 2025年7月25日
- No.2 2025年7月 4日
- No.1 2025年6月20日

