



第三話 風化に伴う物性の変化

3.1 化学的風化に伴う物性の変化

物理的・化学的風化のメカニズムを考慮すると風化に伴って物性の変化が起きているはずである。図-22は、化学的風化に伴う堆積性軟岩のN値、変形係数、弾性波速度(S波速度)の物性値の変化である。

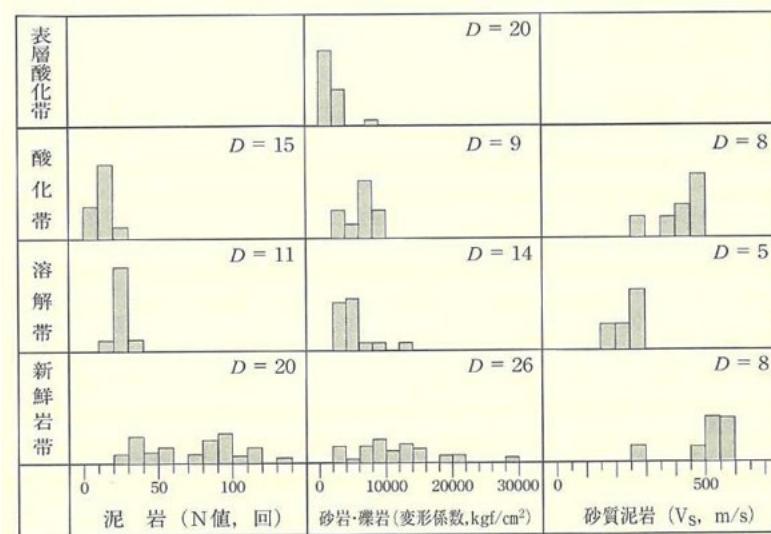


図-22 風化に伴う物性の変化. Dはデータ数、縦軸は頻度.

出典:千木良(1995)「風化と崩壊」²⁾

図-22の左端の泥岩では、深部から浅部に向けて溶解帯、酸化帯の順で岩石が劣化していることが確認できる。図中央の砂岩・礫岩、図右の砂質泥岩では酸化帯で一時的に硬くなっている。溶解帯ではいずれの岩石がいずれも新鮮岩帯に比べて柔らかくなっている。この原因を、千木良は「溶解帯では岩石の構成鉱物が溶解され、化学的成分が溶脱されていることに求められる」としている。

3.2 風化に伴う強度定数の変化

第二話では、風化に伴う弾性波速度(P波速度)の変化を主体に議論が進められていた。斜面の安定解析を行う場合、土あるいは岩の強度定数(c 、 ϕ)の値が風化によってどのように変化するかの情報は興味深い。

第三話で述べた供用40~50年経過した高速道路の切土法面の追跡調査の菊池らの報告²⁹⁾では、ベーンコーンせん断試験を実施した結果から「風化に伴い粘着力 c が低下した可能性」を指摘している。山本らの論文³⁴⁾では、緩み領域である切土部の強度定数を70%程度($c=0\text{ kN/m}^2$, $\phi=23.7$ 度)に低減して事例解析を実施し、ロンドン粘土の強度に及ぼす風化の影響に関する論文³⁵⁾では、 $\phi'=20$ 度は変化しないと仮定して、風化によって c' が28kPaから約9kPaに低減す





るとしている。高柳ら³⁶⁾は、風化によって土砂化した層の c をゼロとみなしている。このように風化に伴い強度定数について $c \rightarrow 0$ とする考えは関係者で広く採用されているようである。

伝統的な土質力学の考え方では、劣化を時間の関数としてではなく塑性ひずみによって強度定数が劣化するとする。ロンドン粘土試料の力学試験で観察される応力～ひずみ曲線は、ピーク強度を示した後ひずみ軟化傾向を示し、塑性ひずみの増加に伴い c' 、 ϕ' はともに減少する。その一つのモデルが図-23で、ピーク強度から、ポストピーク強度で c' が劣化し、残留強度では c' がゼロになると同時に ϕ' もピーク時の半分の値に劣化する。 ϕ' の減少は、板状の粘土粒子の配列が初期のランダム構造から、塑性ひずみの増加に伴って発生するせん断層（すべり面）に沿って一方向に再配列することに起因していると考えられている。

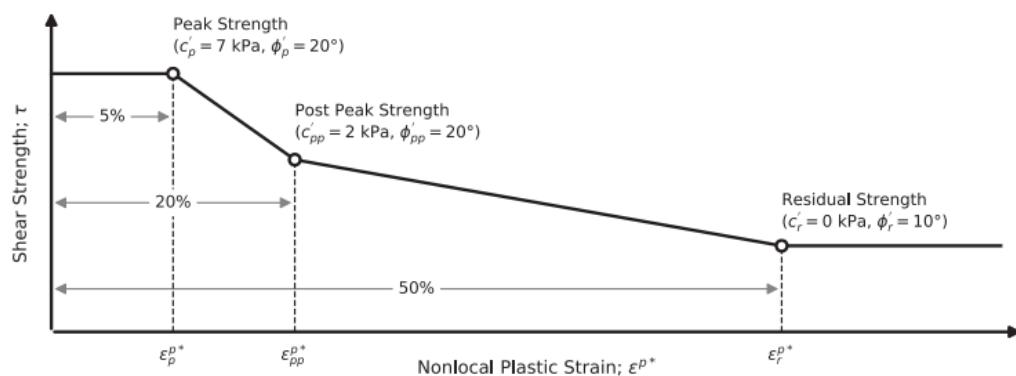


図-23 塑性ひずみの増加に伴う強度定数の変化モデル.

出典：Postill et al. (2021)¹²⁾

建設コンサルタント協会近畿支部による斜面防災研究委員会の報告書「斜面安定評価における劣化概念の導入、平成18年³⁷⁾」では、自然斜面および切土斜面の強度係数（ c' 、 ϕ' ）の時間的変化を求めており。詳細は報告書を参照していただきとして、概略の手法と結果を示す。

自然斜面の強度定数の時間的変化は、以下の手法によって求めている。多孔質流紋岩の風化調査から得られた一軸圧縮強度と一軸引張強度の時間変化の観測結果（図-24）を用いて、一軸圧縮強度と一軸引張強度が表現可能な Hoek & Brown 破壊基準式中の2つの材料定数の時間的変化に読み替える方法である。図-24の上が一軸圧縮強度、下が一軸引張強度を時間経過である。横軸の時間の単位は $\times 1000$ 年であることに注意しておく。

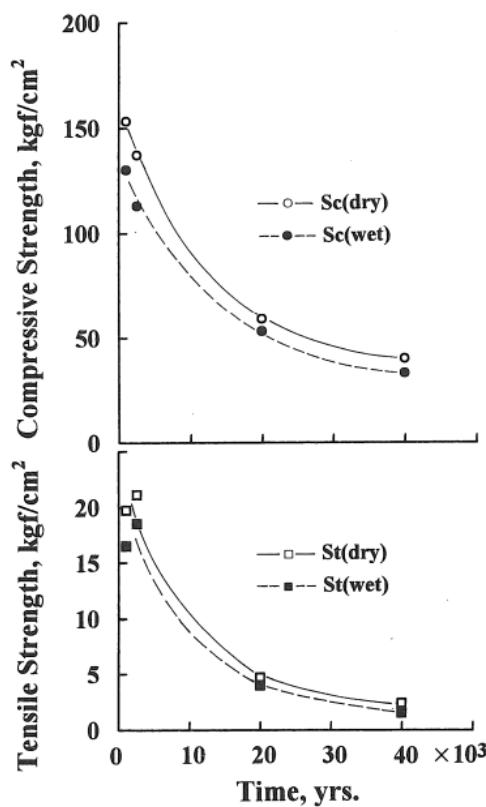


図-24 多孔質流紋岩の風化による一軸圧縮強度と引張強度の時間的変化.

出典：小口ら(1994)³⁸⁾

この手法を用いて得られた結果が図-25である。 c' は、経年に減少傾向を示しているが、 ϕ' は60度程度まで経年に増加する傾向が表れ従来の一般的に受け入れられている考えとは異質である。

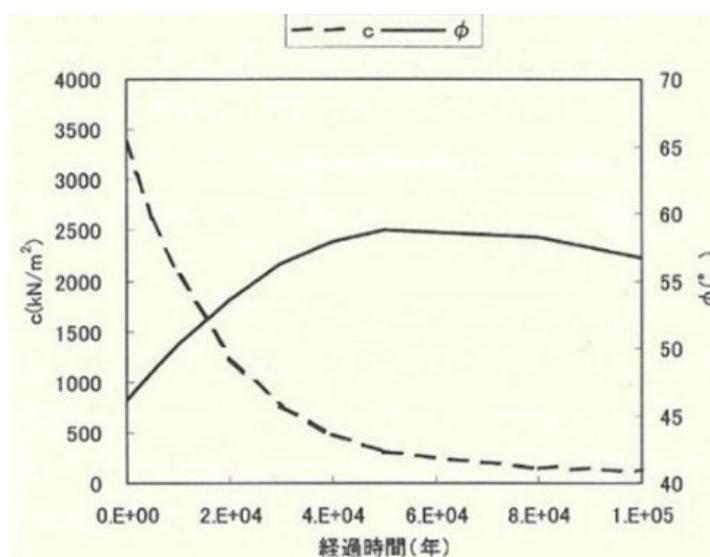


図-25 推定された自然斜面の強度定数の時間的変化. 出典：斜面防災研究委員会³⁷⁾



小口ら（1994）のデータは希少で、第五話でも触れるように他の研究者も引用していることから地質学分野では一定の信頼度を獲得しているものと考えられる。ただ先に注意した通り図-24の横軸は2万年、4万年のオーダーであり、図-25の横軸も通常の工学的スケールである100年以内とはかけ離れて長期間の結果であることに注意が必要である。

切土斜面の強度定数の時間的変化は、基本的には上記の自然斜面の手法と同様であるが、一軸圧縮強度、一軸引張強度の情報が不足しているので、斜面防災研究委員会の報告書では一軸圧縮強度、一軸引張強度を推定する前段階が加わる。前段階の手順は概略、以下のようなである。

第二話で述べた高速道路では岩種ごとに弾性波速度（P波速度）の時間的変化のデータが得られている（図-18）。シュミットハンマー反発度と弾性波速度（P波速度）の相関関係から、シュミットハンマー反発度の時間的変化を求め、更にシュミットハンマー反発度と一軸圧縮強度の相関関係を用いて、一軸圧縮強度の時間的変化を得る。次に一軸圧縮強度とショア硬さからショア硬さの時間的変化を見積り、ショア硬さと引張強度の相関関係から引っ張り強度の時間的変化を得る。このように異なる物理量に関する複数の回帰式を用いて一軸圧縮強度と引張強度を求めることで図-24と同種の情報が得られる。その後は自然斜面の手法に従って強度定数の時間的変化が推定される。火成岩に対する計算結果が図-26である。

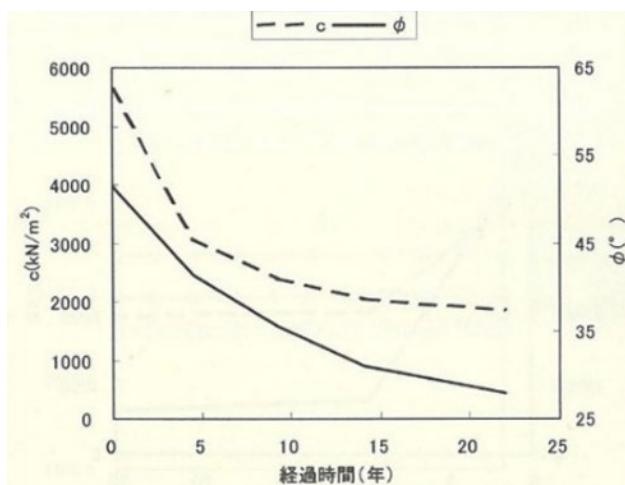


図-26 推定された切土斜面（火成岩）の強度定数の時間的変化。

出典：斜面防災研究委員会³⁷⁾

図-26によれば c' 、 ϕ' も経過時間に伴い減少をしているが、 c' は20年後でもゼロに取れんしていく傾向はみられない。また、横軸の時間軸は最大20年強まで、自然斜面の時間軸とはオーダーが異なることにも注意しておく必要がある。図-24の測定点をよく見ると、経過時間が短い場合の引張強度にはばらつきがみられ、何万年単位の傾向が数十年程度の短期間の傾向をどの程度の精度で予測できるかの判断は難しい。

風化に伴う強度定数の変化に関して、斜面防災研究委員会の提案手法は限られた情報の中での苦心の作であることは認めるものの、自然斜面の ϕ の時間変化は従来の一般的な考えとは異なる傾向を示すこと、切土斜面の劣化推定では異なる物理量間の回帰式を複数回経て得られた圧縮強



度、引張強度を用いることなど、実務への適用については更なる検証が必要であるという感想を筆者は持った。

3.3 c のない世界

先に3.2で風化にともないc'がゼロに近づくという見解が多いことを述べた。風化に伴いc'が低下することの意味はどういうことであろうか?思考実験をしてみよう。

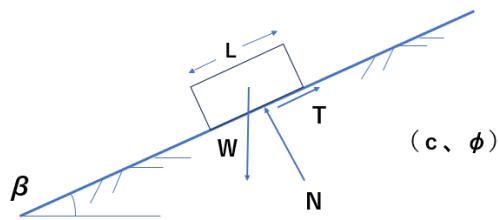


図-27 斜面上の剛体ブロックに作用する力

図-27に描いた斜面角度 β の斜面上の重さW、長さLの剛体ブロックの力のつり合いを考え、接触面でのせん断抵抗力Tは強度定数(c' 、 ϕ')で表現されるとしよう。そして、すべり安全率 F_s を接触面でのせん断抵抗力Tと剛体ブロックを滑らそうとする力 $W\sin\beta$ の比として定義すれば、

$$\begin{aligned} F_s &= (c'L + W\cos\beta \tan\phi')/W\sin\beta \\ &= c'L/W\sin\beta + \tan\phi'/\tan\beta \end{aligned}$$

と表示される。風化によって $c'=0$ となるということは、上式の第一項が消滅するので、風化前に存在していた斜面は、第二項のみで存在しうる斜面に変化(崩壊)していく。つまり $c'=0$ と劣化した場合、 $F_s > 1$ の斜面は、 $\beta < \phi'$ の範囲でのみ存在することになる。また $c'=0$ の場合、 F_s の表現式は第二項のみとなり剛体ブロックの重さWの変化は、安全率に影響を及ぼさないことになる。したがって $c'=0$ の状態で滑動している地すべり土塊の排土は、計算上すべり安全率の増加をもたらさない事にもなる。

次に $c' \rightarrow 0$ と劣化した時の直立した矢板壁に作用する土圧の変化を考える。



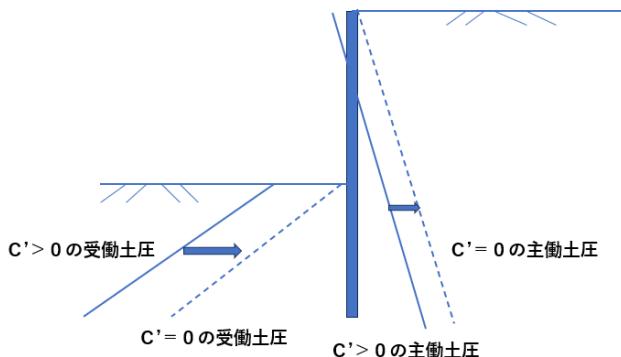


図-28 矢板壁に作用する土圧分布の変化

矢板壁の設計では図-28に示すように背面では主働土圧が掘削底部では受働土圧が作用するとして設計される。

ランキン土圧理論による有効応力表示の主働土圧分布は、主働土圧係数を K_A と表示すれば

$$\sigma'_a = \gamma' z K_A - 2 c' \sqrt{K_A}$$

と書ける。ここで γ' は土の水中重量、 z は深さを示す。

同様に受働土圧分布は、受働土圧係数を K_P と表示すれば

$$\sigma'_p = \gamma' z K_P + 2 c' \sqrt{K_P}$$

と表示される。

$c' = 0$ の場合、主働土圧、受働土圧とともに第二項が消滅するので、図-28に示すように実線で示す風化前の土圧分布から破線で示す土圧分布に変化する。すなわち背面土圧は増加し、掘削面側の受働土圧は減少する。その結果、矢板壁は前面に傾くか、あるいは掘削底部が破壊して矢板壁は転倒崩壊するか、背面にアンカー工が設置されていれば過度の力で引き抜けるかもしれない。いずれにしても不安定な状態に移行することが懸念される。土留め擁壁の場合も同様に滑動、転倒の安全性が低下することが想定される。

二つの思考実験からもわかるように風化に伴い $c' = 0$ と地山が劣化するのは怖いことなのである。

3.4 風化に伴う透水係数の変化

降雨時の切土のり面の安定を考えるときには、強度定数 (c 、 ϕ) とともに風化に伴う透水係数の変化も重要である。風化によって透水係数は、増大するのであろうか？あるいは減少するのであろうか？山本らの論文³⁴⁾では、切土法面の事例解析で砂岩強化風化帯の透水係数を 20 倍に変えて、吹付工の背面地山の浸透水の影響を検討している。

物理的風化のメカニズムからは、開口亀裂の発達によって地盤の透水係数は増大するとも考えられるし、粒子破碎などによって粒子の細粒化が進むと透水係数は低下するとも考えられる。また化学的風化の溶脱のメカニズムからは透水係数が増大すると推測される。どの要因が卓越する



のであろうか？

資料はやや古いが多数の文献調査を取りまとめた報告³⁹⁾がある。そこでは文献データベースから下表のデータを分析している。

| | 新鮮 | 弱風化 | 風化 | 強風化 | 計 |
|----------------------|----|-----|----|-----|-----|
| 結晶質岩（酸性岩） | 26 | 20 | 39 | 50 | 135 |
| 結晶質岩（塩基性岩） | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 |
| 新第三紀以降の堆積岩（砂質岩） | 2 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| 新第三紀以降の堆積岩（泥質岩・凝灰質岩） | 5 | 1 | 6 | 2 | 14 |
| 古第三紀以前の堆積岩（砂質岩） | 7 | 4 | 10 | 2 | 23 |
| 古第三紀以前の堆積岩（泥質岩・凝灰質岩） | 5 | 10 | 12 | 5 | 32 |
| その他の岩種 | 26 | 12 | 23 | 11 | 72 |

表-1 岩種区分別解析データ数一覧。出典：ダイヤコンサルタンツ（1998）³⁹⁾

その結果、データ数が多い結晶質岩（酸性岩）、新第三紀以降の堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）、古第三紀以前の堆積岩（砂質岩）、古第三紀以前の堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）、その他の岩種の5区分の岩種で、「透水係数は風化が進むほど高くなる傾向が顕著に認められる」と結論付けている。最もデータ数の多い結晶質岩（酸性岩）の結果を図-29に示す。

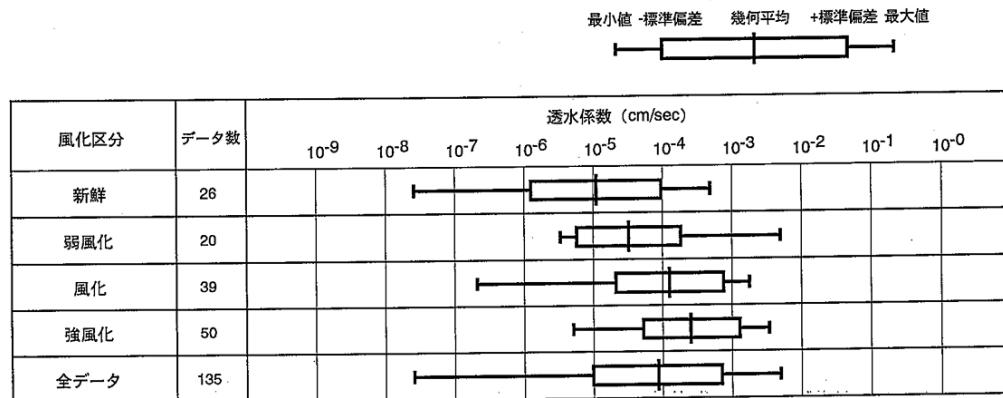


図-29 風化区分別透水係数分布：結晶質岩（酸性岩）。

出典：出典：ダイヤコンサルタンツ（1998）³⁹⁾

蛇足であるが、風化に伴う透水係数の増加がモルタル吹付工や開放型の吹付法枠工の変状である「空洞化」と何らかの関係があるのではないかと筆者は思っている。法面保護工の維持・補修に関するガイドライン（案）⁴⁰⁾では、モルタル吹付工の経年変化に伴う変状の種類として「吹付モルタルと地山の密着性の低下と変状」、空洞化対策として空洞充填工が推奨されている。空洞発生のメカニズムとして「吹付モルタル背面の地山の風化は、掘削による緩み、湧水、法肩からの浸透水などで進行する。これにより吹付モルタルは、地山との密着性を失い自重を支えきれ





なくなり、吹付モルタルの滑動や剥落が発生する。また、湧水が多いと、風化により土砂化した部分が流失し、吹き付けモルタル背面に空洞が生じる。」と説明されている。開放型の吹付法枠工でも同様な変状が発生する。

テレビの天気予報ではしばしば土砂災害の前兆として「濁った水が出てきたら警戒」と報道される。濁った水の流出は、風化土の細粒分の流出の結果であり風化土の構造の変化である。土質力学分野では、地盤内の空洞形成とも関連する土の「内部侵食」現象として現在研究⁴¹⁾が進められている。筆者は内部侵食のメカニズムの理解が、法枠工下の空洞形成メカニズムの理解を助けてくれることを期待している。

次回は、第四話季節変動による斜面の劣化について述べる予定である。

参考文献

- 34) 山本剛、中井卓巳、丸木義文、小高猛司、岸田潔、大西有三 (2009) : 長期劣化の概念を導入した道路法面の健全性評価手法の提案、地盤工学ジャーナル、Vol.4、No.1、21-33.
- 35) Chandler, R.J, and Apted, J.P. (1988) : The effect of weathering on the strength of London Clay, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 21 (1), 59-68.
- 36) 高柳剛、太田直之、杉山友康 (2010) : 地山の風化を考慮した切土のり面の健全度評価法に関する検討、土木学会第65回年次学術講演会、III-042, 83-84.
- 37) (社)建設コンサルタント協会 近畿支部 (2006) : 斜面安定評価における劣化概念の導入—斜面防災研究委員会報告書—、262p.
- 38) 小口千明、八田珠郎、松倉公憲 (1994) : 神津島における多孔質流紋岩の風化とそれに伴う物性変化、地理学評論、67A-11、775-793.
- 39) ダイヤコンサルタント (1998) : 岩盤の亀裂・風化状態と透水性との関係についての調査 (動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)、131p.
- 40) 斜面維持補修施工技術研究会 (2020) : 法面保護工の維持・補修に関するガイドライン(案)
- 41) たとえば佐藤真理、桑野玲子(2014): 内部侵食が地盤の変形・強度特性に及ぼす影響の定量的評価、生産研究、66巻4号、325-329.



バックナンバー

シリーズ2

- 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