



斜面の理解に向けて

はじめに

会長のコーナ（No.1～No.10）では、斜面構造物等の法令上の位置づけや行政が斜面防災および斜面構造物・のり面保護工をどのように捉えているか、国土の強靱化とインフラの長寿命化の視点からその動向を探った。

斜面インフラマネジメント協会は、切土のり面の健全性を維持することに特に関心を置いているが、切土のり面の劣化をどのように理解すればよいのか？斜面はどうして崩壊するのか？どのようなメカニズムで崩壊するのか？斜面インフラの維持管理に必要な知見は何か？などの視点から、第二の連載テーマとして「斜面の理解に向けて」を取り上げてみたい。

最近、地質学の知識を update したいと思い下記の書籍を読んでみた。いずれも近未来社出版、千木良雅弘著である。災害地質学ノート（2018）¹⁾、風化と崩壊（1995）²⁾、群発する崩壊（2002）³⁾、崩壊の場所（2007）⁴⁾、深層崩壊（2013）⁵⁾、地質と災害（2016）⁶⁾。筆者はこれらの著書から地質学、特に災害に係る地質学の進歩について多くを学ぶことができた。特に化学的風化のメカニズムの理解、岩盤クリープの重要性と面構造の差異による崩壊形式の違い、航空レーダによる地形判読の進歩が強く印象に残った。

筆者の執筆計画は、以下のとおりである。

- 第一話 風化のメカニズム
- 第二話 風化に関する現場データの蓄積と活用
- 第三話 風化に伴う物性の変化
- 第四話 季節変動による斜面の劣化
- 第五話 劣化を考慮した斜面安定の評価
- 第六話 面構造と岩盤クリープ
- 第七話 地すべりと流れ盤

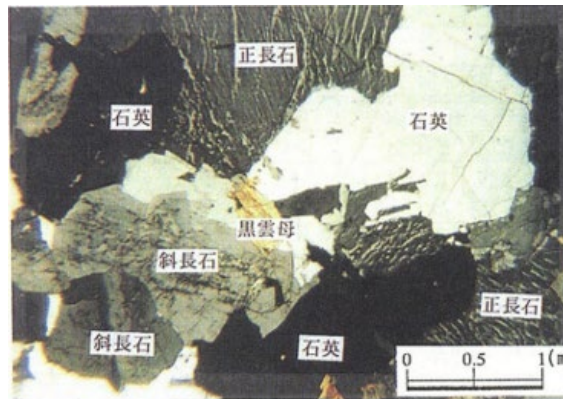
今回は、前回に比べて内容が多岐にわたりそうで2週間に一回程度の頻度で書き、半年を目安にまとめる心づもりでいる。なお図番号・参考文献番号等は、通し番号を使うので必要に応じてバックナンバーを参照していただきたい。記述内容は、当該分野の専門家から見れば初学者程度であり、文献検索も限定的でいわば筆者の勉強ノートであることをお断りしておく。誤りや誤解等あれば是非ご教示をお願いしたい。本シリーズが実務に忙しい技術者の情報収集に少しでも役に立つことがあれば幸甚である。

第一話 風化のメカニズム

1. 1 花崗岩風化のイメージ

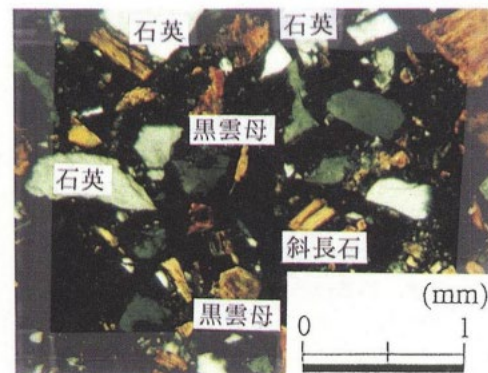
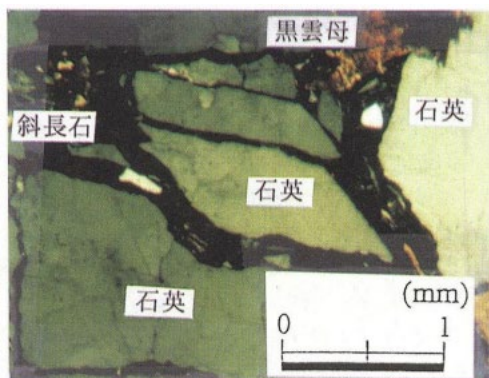
筆者は、広島大学工学部に5年間勤務していた。その間、地質学、特に花崗岩を専門とする理学部の同僚教員とともに花崗岩の力学特性を勉強した時期があった(服部ら(1998 a,b,c))^{7),8),9)}。写真-1は、深成岩に分類される広島花崗岩の未風化と考えられる試料の偏光顕微鏡写真である。





写真一 1 偏光顕微鏡写真（クロスニコル）（未風化）、出典：服部他（1998b）⁸⁾

それまで主として繰り返した粘土や乾燥砂を用いて実験を行ってきた筆者は、この写真を見て花崗岩は複数の鉱物結晶の集合体であることを再認識した。試料を採取した現場で平板載荷試験も実施した。載荷試験後の採取試料からは、鉱物結晶が破砕する様子が観察された。写真一 2 の左の写真が、載荷試験位置から離れた場所で採取した試料の偏光顕微鏡写真、右の写真が載荷版の直下の採取試料の偏光顕微鏡写真である。載荷によって鉱物結晶が破砕し細粒化しているのが確認できる。



写真一 2 試験影響外試料（左）と載荷版直下試料（右）の偏光顕微鏡写真

出典：服部他（1998b）⁸⁾

短期間ではあったが花崗岩の力学特性についての研究を通じ、地質学の専門家との議論から多くを学ぶことができた。そして、筆者は花崗岩の風化についておおよそ次のようなイメージを描くようになった。

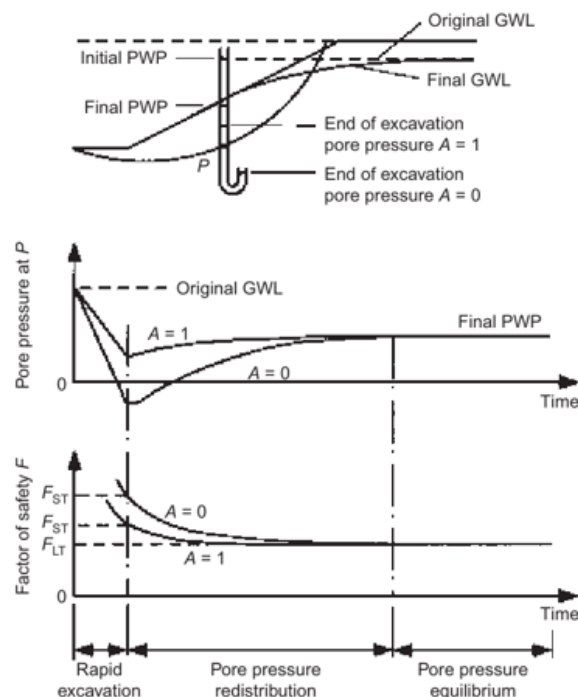
「花崗岩を構成する複数の鉱物は、それぞれ異なる物理特性、特に破砕強度、体積圧縮率や熱膨張率を有しているであろうし、化学的反応形態も異なるに違いない。隆起や沈降、断層などの地質的な運動や盛土や掘削などの建設工事等や気温変化に伴って、岩石に作用する応力が変化する。その時、各鉱物にはそれぞれの体積圧縮率に応じて異なる体積変化が発生するであろうし、温度環境の変動によってそれぞれの熱膨張率に応じて異なる膨張・収縮を繰り返すことであろう。そのため、応力変動、温度環境の変化によって異なる鉱物間の接触形態も変化するであろう。

う。時に、剥離し岩石中に亀裂が発達するかもしれない、付加的な载荷重によって鉱物結晶は破碎して細粒化するかもしれない。鉱物は酸素や他の化学成分との接触によって酸化反応や様々な化学反応が起こるであろうし、地盤内に浸透流が生じると、流体中の化学成分と鉱物との化学反応が起こり鉱物成分は別の物質に変化するかもしれない。その結果、流体の水質や化学成分も変化するかもしれない。」

自然界で起こるこのような様々な変動（応力変動、温度変動、乾湿変動、間隙流体変動）などによる岩石の変化現象は、ひっくるめて「風化」と呼ばれる。一般に風化は物理的風化と化学的風化に分けて理解される。物理的風化には、地質的活動や人為的な掘削行為などによる応力解放、温度変化に伴う鉱物の差別的膨張・収縮や地中水の凍結融解、植物の根茎発達による岩石中の割れ目の成長などの要因によって生じるとされる。

1. 2 粘土斜面の物理的風化のメカニズム

伝統的な土質力学では、ロンドン粘土を念頭に物理的風化を斜面掘削による応力除荷とそれに伴う土の吸水膨張とせん断強度の劣化として捉えて、長期的な斜面の安定予測を行ってきた。



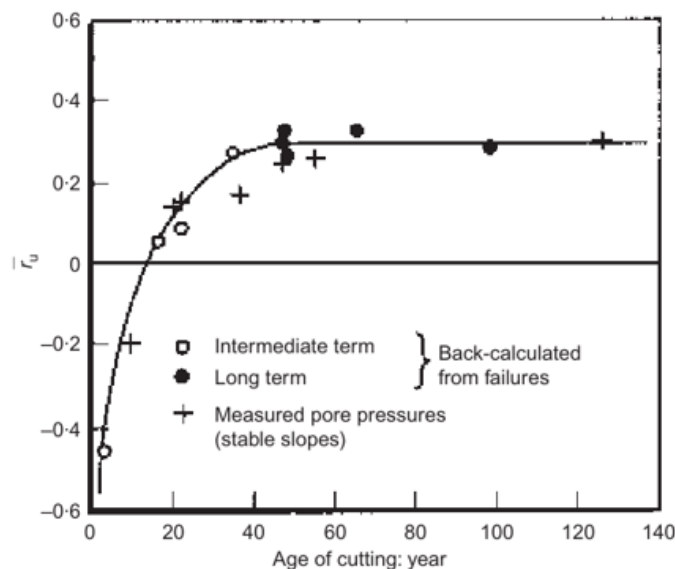
図一 1 粘土地盤の切土掘削時の間隙水圧変化と安全率の変化

出典：Leroueil, S. (2001)¹⁰⁾

斜面が掘削されると斜面内応力が除荷され、それに伴い間隙水圧が減少する。間隙水圧の減少分は、平均主応力の減少に伴う成分と、掘削によって発生するせん断応力の発生に伴う成分の和と考えられる。図一 1 は、それを模式的に表したもので、 $A = 0$ は、せん断応力に伴う水圧変化がない場合、 $A = 1$ は水圧変動がある場合である。急速な掘削によって間隙水圧の値は減少し、負

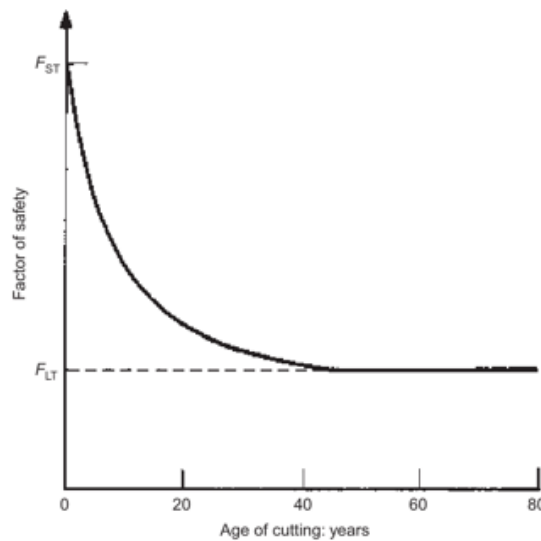
の間隙水圧が発生する場合もある。掘削後、過剰間隙水圧は水理的平衡状態に向かって変化し、最終的な定常状態の間隙水圧分布に落ち着く。負の過剰間隙水圧の変化に伴って土は吸水膨張し、せん断強度が低下する。粘土のような透水性の低い土の場合、吸水膨張およびせん断強度低下は時間経過に伴いゆっくり進行するので、斜面のすべり安全率は時間をかけて低減していく。これが、粘土地盤の掘削に伴う斜面安全率の低下に関する古典的な土質力学の考え方である。

図一2は、ロンドン粘土地盤の掘削現場の間隙水圧の計測データの経時変化である。ここで縦軸 u/σ_v は、鉛直全応力に対する間隙水圧の比で、横軸は切土からの経過年数を表している。これによると間隙水圧は約40年かけて平衡状態に回復していくと読める。もちろん回復過程は地盤の層構成や透水係数などの影響を受けるので、回復過程の速さは地盤ごと、斜面ごとに変化すると考えられるが、約40年という数値は頭に入れておいてもよい。



図一2 のり面掘削後の間隙水圧の平衡状態 出典：Leroueil, S. (2001)¹⁰⁾

上記の間隙水圧の回復過程を考慮して計算した斜面の安全率の経時的な低減傾向を示したのが図一3である。



図－3 掘削斜面の安全率の経時変化 出典：Leroueil, S. (2001)¹⁰⁾

近年、土質力学分野では、「掘削による除荷」――>「間隙水圧の新たな平衡状態への回復」――>「斜面安全率の低下」という伝統的な考え方に加えて、毎年繰り返される乾湿変動による変形の蓄積による影響が検討されている（例えば Take & Bolton (2011)¹¹⁾, Postill et al. (2021)¹²⁾）。毎年繰り返される乾湿の変動は、斜面を構成する粘性土地盤の収縮・膨張の繰返しによってのり面下部にせん断ひずみが累積し、ひずみ軟化挙動によって強度の低下を局所的に生み出す。それが斜面内部の応力の再分配につながり進行的な斜面崩壊を引き起こすと考えようになってきた。この研究の流れは、粘性土斜面の劣化のモデル化と挙動の将来予測につながる話題で、第四話および第五話で再度取り上げてみたい。

(つづく)

参考文献

- 1) 千木良雅弘 (2018)：災害地質学ノート、近未来社出版
- 2) 千木良雅弘 (1995)：風化と崩壊、近未来社出版
- 3) 千木良雅弘 (2002) 群発する崩壊、近未来社出版
- 4) 千木良雅弘 (2007) 崩壊の場所、近未来社出版
- 5) 千木良雅弘 (2013) 深層崩壊、近未来社出版
- 6) 千木良雅弘 (2016) 地質と災害、近未来社出版
- 7) 服部隆行, 瀬戸一法, 坂口賢明, 北川隆司, 日下部治 (1998a)：風化した広島型花崗岩の力学特性, 土木学会論文集, No.588/III-42, pp. 1-10.
- 8) 服部隆行, 北川隆司, 瀬戸一法, 低引洋隆, 日下部治 (1998b)：風化した広島型花崗岩での一原位置試験, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp. 359-368.
- 9) 服部隆行, M. M. GALER, 北川隆司・徐連民・小川保・日下部治(1998c)：風化花崗岩の地盤工学特性の地域比較に関する一検討、土木学会論文集、No. 610/III-45, pp.115-123.



- 10) Leroueil, S. (2001): Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms, Géotechnique, 51, No.3, pp.197-243.
- 11) Take W.A., and Bolton M.D. (2011) : Seasonal ratcheting and softening in clay slopes, leading to first time failure, Géotechnique, 61(9): pp. 757-769.
- 12) Postill, H., Helm, P.R., Dixon, N., Glendinning, S., Smethurst, J.A., Rouainia, M., Briggs, M., El-Hamalawi, A. and Blake, A.P. (2021): Forecasting the long-term deterioration of a cut slope in high-plasticity clay using a numerical model, Engineering Geology, 280:105912.

バックナンバー

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

