

まき土中の切取斜面

大阪市立大学理学部 正員 ○竹中準之介
同 大学院 学生員 渡辺興一

1) 研究の目的

まき土や風化の著しい切取は、土工が容易であるからトンネルに比較して経済性が優れている。^{花こう岩中の}このような機械化施工の可能な軟質岩において、その限界は一般にトンネル上部のかぶり深さが20m~30mまであるとされている。

したがってまき土中の切取りは、できる限り法勾配を大きくつた長大斜面として設計される場合が多い。

しかし折角の経済性も斜面崩壊を生じたときは全く無意味なものになってしまう。ところが軟岩中の長大斜面の滑りに対する安全率の査定は、現在のところ確立された方法がなく、多くの技術者は過去の工事実績を参考に法勾配を決定していた。とくにこの問題は風化花こう岩のところに多い。

以上のような軟質岩の斜面安定に対して、滑りに対する安全率査定の一方法として軟質岩の変形挙動と実際の滑り現象との比較により、2,3の考察を行った。

主として実験を行ったのは内後地方の花こう岩地帯であり、この地域の花こう岩は粗粒の黒雲母花こう岩が多く、粒径が均一であり、しかも断層による圧碎などの影響が少なく、また風化層の厚さが大きいために、花こう岩の風化作用とその工学的性質の研究地質として勝れた特性をもっている。

この地帯の花こう岩は、中国地方に広く分布する中国花こう岩と同様中生代に侵入してきた花こう岩であり、風化の状態は瀬戸内海沿岸の花こう岩と非常によく似た様相を呈する。

2) 花こう岩の風化度の尺度

花こう岩の風化は、花こう岩中にある長石が水和とか加水分解と類似の反応によってコロイド化し、このコロイドは一部地下水中に溶解して間けき比を増大する。したがって、風化の進行度合は間けき比または飽和含水比によって示すことができるし、あるいは長石の損失分によって示すこともある。

これに対して、大ざっぱな風化度の判定は弾性波の縦波速度で示される。ただし縦波速度の測定は未風化の新鮮な岩盤深度を求める場合は有効であるが、風化度の大きい軟質岩のところでの軟岩強度との対応関係は大いである。¹⁾ 著者の経験ではブルドーザーによる施工可能なまき土の縦波速度は300m/sec~1000m/secの範囲内にあり、時として2000m/secのこともある。風化花こう岩中の縦波速度は風化岩の飽和度や土かぶり荷重の影響

響に鋭敏にうけるから、軟岩の力学的性質の尺度としては不適当である。

長石の損失分による風化度の表示は最も合理的であるが、非常に手数がかり実用的ではない。この方法による風化度 X_d は下式で示される。(2)

$$X_d = (N_g - N_{g_0}) / (1 - N_{g_0})$$

$$N_g: \frac{\text{石英}}{\text{石英} + \text{長石}} \quad \text{風化岩重量比}$$

$$N_{g_0}: \frac{\text{石英}}{\text{石英} + \text{長石}}$$

標準的な花こう岩では N_g の値として $N_{g_0} = \frac{1}{3}$ をとればよい。

これに対し実用的な方法は、間けき比あるいは飽和含水比によって示す方法である。そして飽和含水比の百分率であらわしたものは風化指数 e とよばれる。

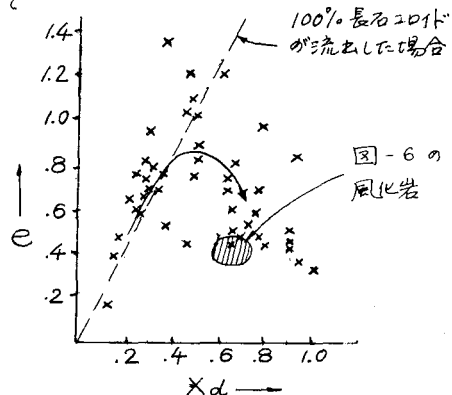
上記のような花こう岩の風化度を風化岩の力学的性質のある尺度として使用するとき、風化指数による方法は実用的であり、かつ力学的性質との対応性もかなりよい。ところが風化指数による風化度の表示は花こう岩の風化の度合いが進むにつれて風化度と力学的性質の対応性は悪くなる。この原因には以下のような二つの現象によるものがある。

- 風化の進行による間けき比の増大は、風化岩の透水性を良くするから風化生成コロイドの流出を生ずる。コロイドの流出は、地下の透水状態や水質、風化の進行速度などによって、いろいろの度合いで行われる。
- 風化の度合いが著しく進行すると、花こう岩の造岩鉱物の 50% 以上を占める長石がコロイド化し、その一部は流出する。したがって極めて弱い地中壓力によって圧縮されて間けき比が減少し、見かけ上風化指数が小さくなる。

これらの関係を香港の風化花こう岩について実験した結果を図-1に示した。

香港の花こう岩も中生代に大侵入を生じて生成された花こう岩であって、L. Peter が行った風化岩に関する一連の研究結果は、西日本一帯に分布する中生代花こう岩の風化現象に関して極めて参考になるものである。

間けき比 e と風化度 X_d の関係 図-1
(L. Peter 1962)



3) 風化度合と風化岩の力学的性質

内後地方の花こう岩地帯において、風化花こう岩中に深度 30m~50m におよぶボーリングが約 40ヶ所行われた。著者はその際のボーリング作業ならびに採取コア、附近の地質などについて研究する機会を得たので、風化花こう岩地帯の長大斜面や機械化施工の限界などについての、力学試験法につき検討した。

このときのボーリング作業や現地岩石の風化状態とその飽和含水比などを総合して図-2に示した。図中には Serafin³⁾が行ったヨーロッパの花こう岩の三軸圧縮試験結果を参考に記入した。

図-2に示したように、風化指数 $n=6\sim14$ 程度の風化花こう岩は、サンプリングが大々いから、現場せん断試験以外の方法によって力学的性質を決定することは困難である。ところが切取斜面の安定のように中程度の地中応力が作用する場合の軟岩の力学挙動は、応力状態の不明確な現場せん断試験によって求めることはできない。したがって今回は露頭よりとりうる乱さない風化岩について三軸圧縮試験を行った。

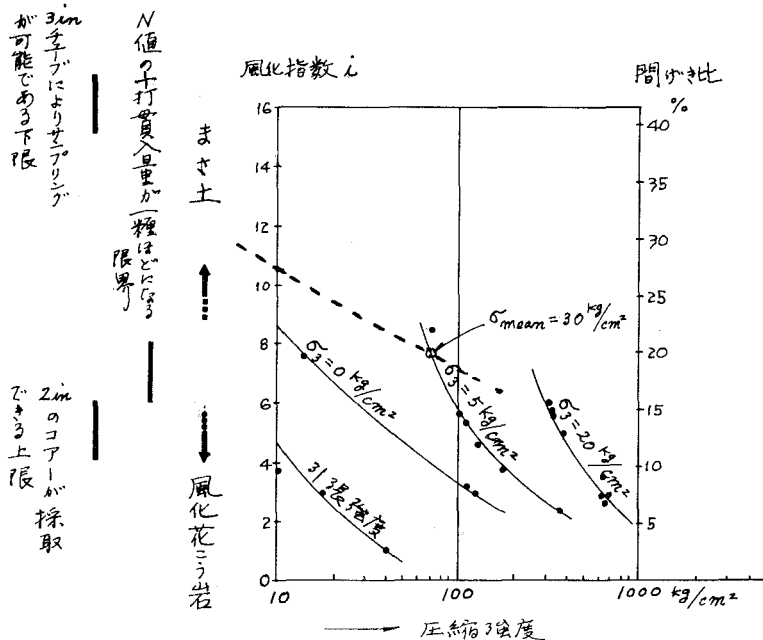


図-2 風化の度合と風化岩の性質

風化指数が 16 以上の岩石は、図-1に示したように構成物質の多様性を示し、その力学的性質もっていない。

風化花こう岩のように間けきの多い粒状体の圧縮に対する降伏点は平均有効応力について決まる値であるが、図-2において近似的な表現をすると、実線集で示したような範囲を示すことができる。この範囲より右上の領域では変形は体積圧縮とともに進行して外見上塑性流動的に変形する。

図中に示した Seraphin の実験値は、破壊規準として体積増加点をとっているから圧縮を生ずる応力領域での強度が示されていない。

4) 野外で観察された風化状態とその考察

内陸地方の花こう岩は、瀬戸内海一帯に広く分布する中国花こう岩と同様に正長石が淡紅色～肉紅色の色調をもっていることが特色である。この正長石は、へき開面から割れたとき結晶全面におよぶ大きい光澤面がでることが多い。一方斜長石は半透明～乳白色の色調であり、へき開面は光澤がある。

現場で観察された風化の状態と飽和含水比より求めた風化指数の関係をまとめると下表のような結果がえられた。

実用的な風化度の判定規準

風化指数

$i = 2-4$

斜長石が不透明白色ソフトとして眼立ってくる。黒雲母から分解した酸化鉄が斜長石の白色ソフトを一部染色して茶色となる。斜長石の白色ソフトは小刀で簡単に削り取ることができ、正長石は未風化であり、小刀で傷がつかない。

$i = 4-8$

斜長石のすべてが風化して白色ソフトの数が多くなる。ハンマーの打撃による反力発が急に弱くなる。たいていハンマーの打撃反力は岩石の各部分にかなりバラツキがあり一様でない。ブロック状のものはハンマーによって個々の粒子に分解できる。ツルハンによる貫入は弱く、正長石の大部分は未風化の状態である。

$i = 8-12$

上記風化岩と肉眼的、感覚的な識別は困難である。最も判別しやすいのはハンマーの反力発力の相異である。ハンマーを大きくして定量的に測定すればかなり識別できるものと推定される。

$i = 12-16$

極度にリーケンされたものと殆んどリーケンされていないものは同じ間けき比のものでも非常に違った物性がみられる。極度にリーケンされたものはブロックとしてとり出すことができなく、粘着性のない粗砂～礫の集合体に分解する。

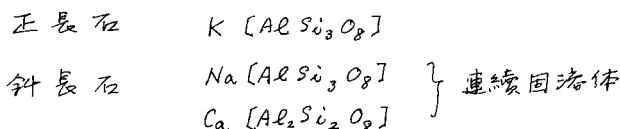
リーチングをうけていないものは、岩石の組織が殆んど分らない
 くなっていて、斜長石の風化部が全体が両酸化鉄の染色を
 うけて、全体として茶褐色～淡褐色になっている。

貫入試験のN値は 50～100以上の値におよぶ。

ソルヒンで掘ることはできるが、スコフプロの貫入はできない。

以上のように花こう岩の風化過程で斜長石の風化はきわめてあり、風化岩の力
 学的性質に重大な影響をおよぼしている。

長石類のうち正長石 斜長石は下のように示される。



の結晶において

[] 内は Si-O 構造を示す。

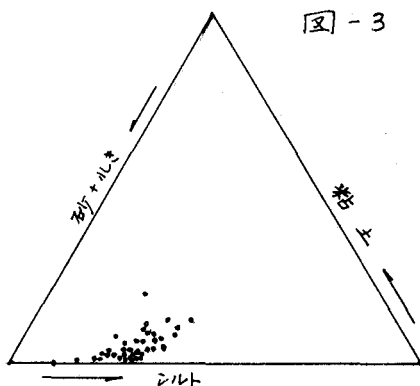
長石は $Si-O$ 構造中の Si^{4+} が一部 Al^{3+} に置換されていることは、風化
 作用という見地から特筆すべきことである。 Si^{4+} が Al^{3+} に置換されるとその酸素基の
 結合力は $\frac{4}{3}$ に減少する。⁴⁾ したがって Ca 長石の $Si-O$ 構造は長石のうちで一
 番結合力が弱い。

また Si^{4+} と Al^{3+} は、イオン半径がそれぞれ 0.39, 0.57 とかなり違っているか
 ら、 $Si-Al$ の置換がある 結晶骨格の $Si-O$ 構造は、ひずんだ状態で脆く
 塑性がない。⁵⁾ その上 Na 長石-Ca 長石のように無理な置換固溶体は結晶の
 不整合を生じやすく、結晶の不整合は化学的風化に対する一者の弱点とされている。

風化指数 $\delta=10$ 前後の花こう岩の化学的風化による生成物は、大部分が斜長石
 の分解物であり、いわゆるカオリナイトは残留していない。

風化度がさらに進行した花こう岩の分解物にも
 カオリナイトは微量しか存在しない。⁶⁾ したがって
 風化によって生成されたコロイドの大部分は、
 花こう岩のような粗粒深成岩の場合流出
 していると考えてよいであろう。

図-3 は内後地方の花こう岩中から
 採取したボーリングコアの粒度分析
 結果を示した。コアは地表面下
 5m～15m の風化岩で $\delta=10$
 前後のものである。図-3 は風化
 物中の粘土含有量が小さいことが特色である。



5) 乱さない風化岩の三軸せん断試験

風化の著しい(風化指数 $i=15$)花こう岩の乱さない資料につき三軸排水せん断試験を行った。乱さない試料の採取地質は図-4に示した。また試験結果は図-6, 図-7に示した。

花こう岩の風化は、斜長石の急速な風化と正長石の遅い速さの風化との2通りの様式で行われる。風化岩は土質力学的にみれば、応力強度の異なった種類の粒子集合体と考えることができる。しかも間隙比の大きいということは、構造的に大そう不安定な粒子集合体であることを意味する。

せん断試験から求められる変形係数 E の値は図-7に示すように段階的に増大する。この変形係数の増大は体積収縮によるものであることが分っている。⁷⁾⁸⁾ 言いかえると、今回実験した風化岩の応縮降伏荷重は $\bar{\sigma}_{man} = 1 \text{ kg/cm}^2$ 以下および $\bar{\sigma}_{mean} = 6 \text{ kg/cm}^2$ であるということになる。 図-4

風化指数の小さい花こう岩の実験値は少ないが、類似砂岩の高圧三軸圧縮試験($\sigma_3 = 600 \text{ kg/cm}^2$)によると、明らかに2つの応縮降伏荷重が認められた。

風化花こう岩の力学的特性の他の1つは風化岩は引張強度が零に近い場合でも、相手を構造依存の粘着力をもっていることである。その結果かなりの高さの直立壁が自立することができる。しかし正味の引張応力が作用するとその部分にクラックを発生する。

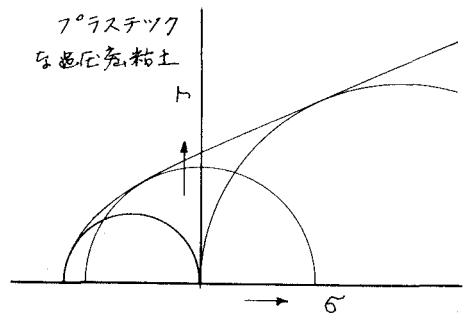
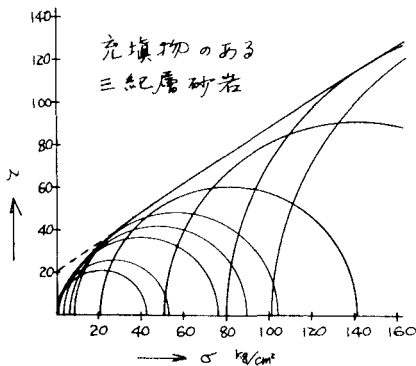
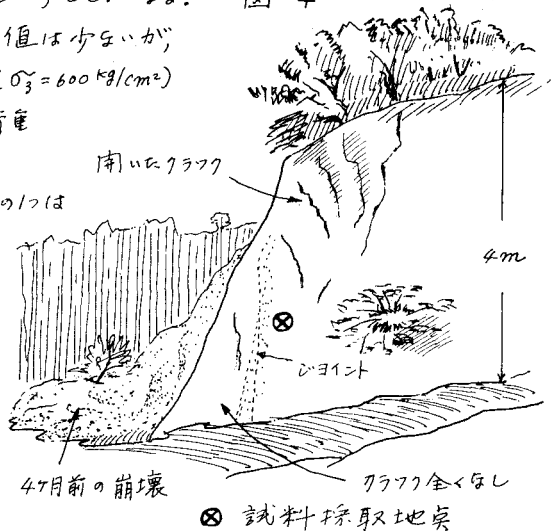


図-5 構造に依存する粘着力と化学結合力による真の粘着力

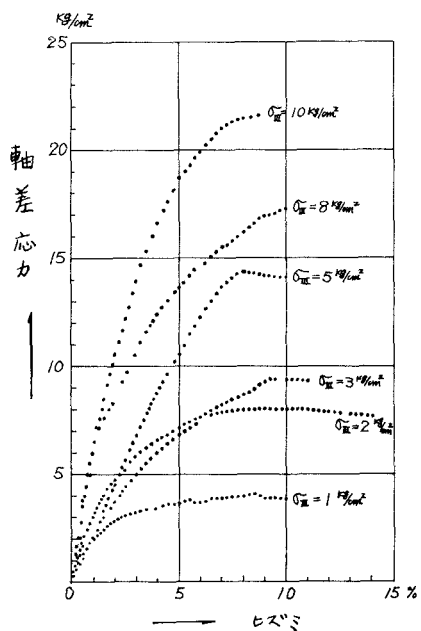


図-6

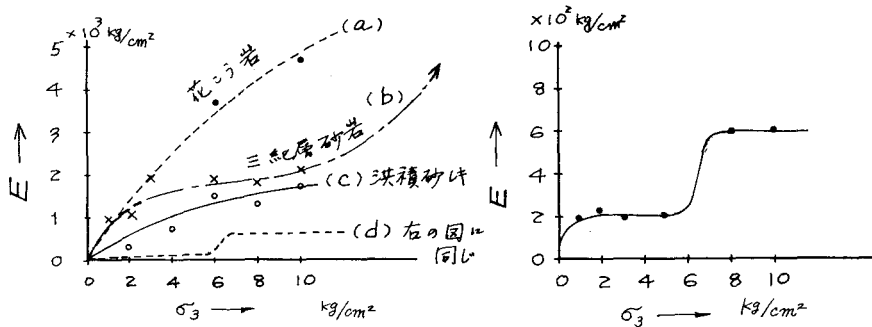
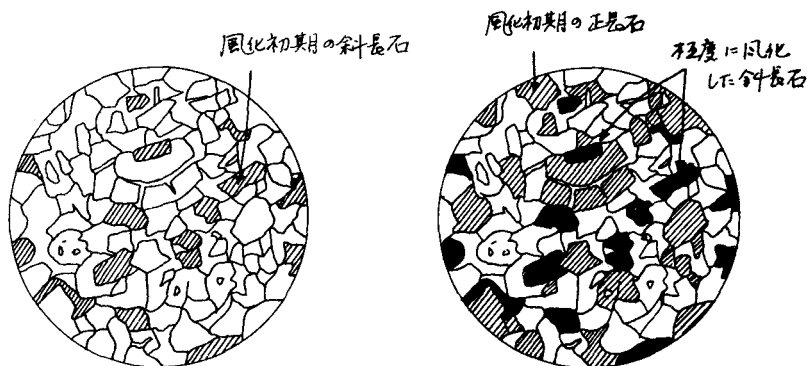
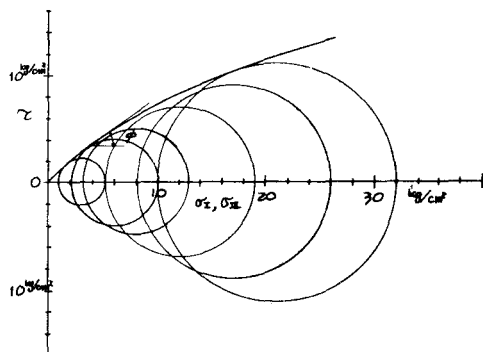


図-7 風化度合と変形係数Eの関係

6) 結論

新しい時代の複雑な断層の影響をうけていない花こう岩地帯は、大きくみると風化帯の平均深度はかなり一様に近い。

今回の調査地帯の山地ボーリングの結果を地形と比較して図-8に示した。風化の深度は岩質によってあるいは地下水の水質により異なるわけであるが、平均値が40mを超過する風化帯は温泉地帯と特殊な地帯以外にはないようである。

風化した花こう岩の斜面を走る joint などよりも、風化岩そのものの力学的性質と斜面の破壊・破壊・滑り面の進行性破壊が重要な要素である。したがって斜面内の初期応力分布と風化岩の古しきない試料の力学試験結果を知ることにより充分合理的な長大斜面の設計が可能であらう。

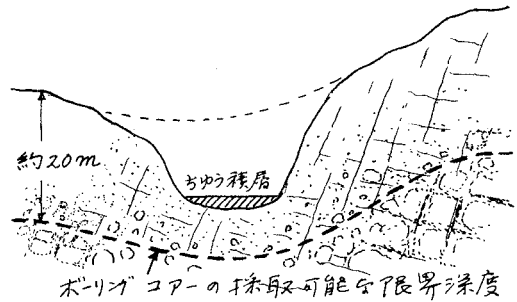


図-8

参考文献

- 1) 今西誠也, 土木技術者のための地質学, 理工図書, (1967), P185~P187
- 2) Peter, L., The properties of Decomposed Granite, Geotech, (1962)
- 3) 内羽義次, 基礎岩盤, 岩石力学とその応用, 川本兆万, 丸善, (1966), P173,
- 4) ボーリング, 化学結合論, 共立, (1960), P496, P498~P500
- 5) Augustithis, S., On the Phenomenology of Plastic Deformation of Quartz and Micas in some Granites, Tectonophysics, Vol 2, No 6, Elsevier, (1965)
- 6) 松尾新一郎, 山下新平, 西田一孝, Relation from Weathering and Argillization of Granites - Fundamental Data on Stability of Matsutsumi-Soil Slope. 愛媛大学紀要, III, 5巻, 3号, (1966)
- 7) 竹中準之介, 大段附近洪積層の土質力学的性質, 第一回土質工学研究発表会, (1966) 渡辺興一,
- 8) Bishop, A.W., The Strength of as Engineering Materials, Geotech, Vol 16, No 2, (1966).
- 9) Müller, L., Die Standfestigkeit von Felsböschungen als spezifisch geomechanische Aufgabe, Rock Mechanics and Engineering Geol Vol 1, (1966)

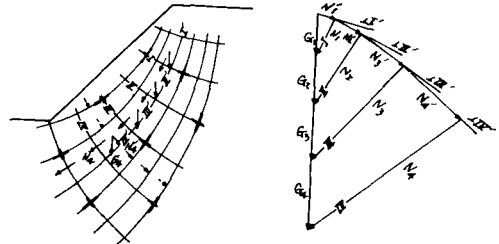


図-9 斜面内応力の図式的な求め方 9)