

講座

堆積軟岩による盛土の工学的諸問題

2. 堆積軟岩材料の物理的性質（その1）

山口 晴 幸 (やまぐち はれゆき)

防衛大学教授 土木工学教室

黒 島 一 郎 (くろしま いちろう)

三井建設(株)技術研究所

佐 藤 健 (さとう たけし)

岐阜大学助教授 工学部土木工学科

鈴 木 哲 也 (すずき てつや)

北海道開発局開発土木研究所地質研究室

2.1 はじめに

第三紀以降の比較的地質年代の新しい堆積岩は、乾燥・湿潤の外的要因に対する抵抗性が弱く、容易に脆弱化するものもある。このような材料を、地下水位変動の予想される沢筋の埋立に用いた場合には、材料の脆弱化に起因した盛土の沈下や崩壊が発生することもある。地質年代が比較的新しいこともあり土粒子間の結合力は硬岩ほど堅くはないが、土質材料ほど弱くないので、軟岩と呼ばれている。

ここでは、地質学的な視点も加えつつ、軟岩の種類と特徴、軟岩の風化とスレーキング、軟岩の物理的性質について記述する。軟岩を盛土材料に使用する際に注意すべき点はスレーキング・風化に対する配慮である。スレーキングの特性をどのようにして調べ、スレーキングに伴って軟岩の間隙構造・吸水率・鉱物組成などの物性値がどのように変化するのか、従来の研究成果も引用しながら知見をまとめる。なお、締固め特性、変形・強度特性は3.と4.で議論される。

2.2 軟岩の種類と特徴

新第三紀以降の堆積岩、変質岩、風化岩などは強度が低く変形性が大い、あるいは掘削面が急速に劣化する、などの特徴を有している。これらの岩石は割れ目の発達が少ないため、力学的性質に及ぼす割れ目の影響は少なく、力学的性質は岩石それ自体の物性に支配される傾向にある。さらに固結度の点からも土と硬岩の中間的な性質を示し、一軸圧縮強度も100~200 kgf/cm²程度以下である。このような岩石は軟岩と称されるが、その定義は必ずしも明確ではない。

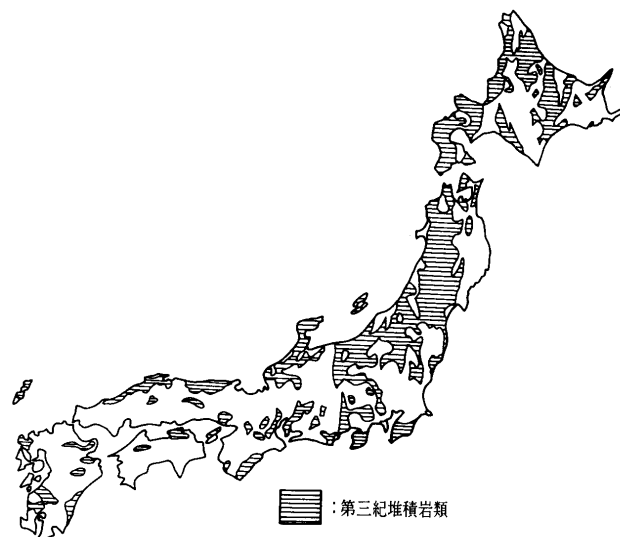
軟岩はその生成過程により、堆積軟岩、火山軟岩、風化軟岩などに分類される。堆積軟岩は土砂の圧密領域からセメンテーションの領域にいたる過程の産物であり、日本においてはグリーンタフ地域を中心に全国に分布する。火山軟岩は低溶結の溶結凝灰岩に代表される固結度の低い岩石であり、北海道、東北、九州など火山地域に分布が著しい。風化軟岩は岩が風化した土に変化する過程で生成される。すべての岩に認められるが、特に花崗岩類において顕著であり、花崗岩分布の広い西日本を中心に分布する。このように堆積軟岩および火山軟岩は固結度が低く、初生的に軟質な岩石である。一方風化軟岩は、もともと硬質であった岩石が風化作用を受け後生的

に軟質となったものである。堆積軟岩のような初生的軟岩が、風化作用のような後生的な影響を受けていることも少なくない。

堆積軟岩は主に新第三紀～第四紀の砂岩、泥岩などの碎屑性堆積岩と凝灰岩などの火山性堆積岩に2分される。堆積岩は海底等の堆積物が埋没による圧密脱水、さらに鉱物学的な変化を伴う続成作用を受けて固結したものである。堆積軟岩は生成年代が新しいため、続成作用によるセメンテーションが不十分であり、また固結が進んでいない岩石といえる。このため間隙比が大きく、吸水率も高く、さらに含水比によって力学的性質が異なる。堆積軟岩に含まれる粘土鉱物やセメント物質には化学的に不安定なものが多いため、乾・湿の繰返しなどの環境変化により力学的性質が大きく変化する。このため強度や変形性の問題だけでなく、劣化の問題も堆積軟岩を取り扱う上で重要である。

堆積軟岩は、糸魚川―静岡構造線以北の関東、東北、北海道を中心に、山陰、北陸、北西部九州、瀬戸内、東部東海地域にわたり全国に広く分布している。日本海側を中心とするグリーンタフ地域には、碎屑性堆積岩と火山性堆積岩の両者が、太平洋側を中心とする非グリーンタフ地域には碎屑性堆積岩が存在する。一般に非グリーンタフ地域の堆積岩よりグリーンタフ地域の堆積岩のほうが環境変化の影響を受けやすい。

日本において一部の中生代や古第三紀の埋没深度が浅く、応力をあまり受けていない堆積岩のなかに、新第三



図一2.1 日本の新第三紀堆積岩類の分布

表—2.1 層準が同じ地層の埋没履歴と物理的性質の関係(小島¹⁾)

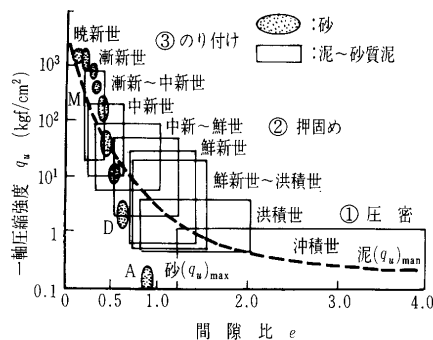
層群・累層名	地質時代	層位的深度	q_u kgf/cm ²	w %	γ_t gf/cm ³	岩相	試料採取地点
黄和田層 (上総層群)	鮮新世 (下部)	>2 500 m	100~125	35.0	1.83	泥	房総半島東岸 (御宿北方)
黄和田層	"	1 000~2 000	40~60	20.0~30.0	1.85~1.92	"	房総・君津市川俣 (小櫃川)
岩坂層	"	1 000±	10~50	20.0~35.0	1.85~2.10	"	房総半島西岸 (上総湊)
大船層	"	500+	25~50			"	三浦半島東岸 (横浜市柴町)
天津層 (三浦層群)	中新世 (中・下部)	2 500±	180~200	8.2	2.13	泥	房総・君津郡峰上 村(山中)
多井畑層 (神戸層群)	"	500±	10~90	10.0~15.0	2.00~2.55	"	明石海峡(神戸)
保田葉山層群	漸新世 (上部)	3 000±	240~340 1 000	3.8~4.7	2.43~2.47	泥 砂	房総・鋸南町保田
出山層 (大辻層群)	"	1 000+	200~400 100~1 000		2.3~2.4 2.4~2.7	泥 砂	洞海湾(戸畑)
白岩層 (みろく層群)	始新世 (下部)	>2 500	700~1 300			砂	天草上島
清澄層 (三浦層群)	中新世 (上~中部)	1 500±	150~240	6.0~8.0	2.38~2.45	砂	房総・君津郡峰上 村
田井畑層	中新世 (中~下部)	500±	10~900	5.0~20	2.50~2.65	"	明石海峡(神戸)

紀の堆積軟岩と同様の挙動を示すものが存在するが、これも堆積軟岩の一種と考えてよい。また海外においても盾状地周辺の中古生層にも同様の性状を示す堆積軟岩が認められることがあり、世界的に見れば堆積軟岩は新第三紀以降と限定されるものではない。

堆積岩が岩石に変化する過程を物性の変化でとらえるために、碎屑性堆積岩の地質年代、埋没深度(層位的深度)と一軸圧縮強度の関係の対比が行われている。一軸圧縮強度は埋没深度が深いものほど大きく、また同様の埋没深度の場合、古い地質年代のものほど大きな一軸圧縮強度を示す。このことは堆積物が上載荷重により押し固められ、それとともに強度が上昇してゆくことを示している。さらに地質年代とともに固結度が増加し、硬い岩石に変化してゆく過程を示すものである。

この過程の一部は一軸圧縮強度と間隙比の関係において、三つの領域区分により説明されている。

①は土砂の領域であり、間隙比の減少とともに、強度が上昇する。荷重増分の大部分を間隙圧が支える圧密の過程に相当する。



図—2.2 日本の新生代堆積物の物理的性質の変化(岡本ほか²⁾)

②は押固めの領域であり、上載荷重により締め固められ、間隙比の減少とともに急激に強度が増加してゆく。各粒子間に結合力が生じはじめた段階であり、軟岩の領域にあたる。

③はのり付けの領域であり、SiO₂やCaCO₃による膠結が終了し、堆積物は安定した岩石に変化する。

②の領域においては、一般に砂岩より泥岩のほうが固結度が高い。これは粒度が細かいものほど締め固まりやすいこと、さらに細粒な物質には比較的安定した砂と異なり、不安定な物質が多いため化学的な変化が生じやす

く、続成作用が進行しやすいことによる。しかし砂岩、泥岩とも安定した固体としての性質は示さない。③の領域すなわち硬岩の領域においては、一般に泥岩より砂岩のほうが固結度が高く硬い。砂岩、泥岩とも固結しており、安定した固体としての性質を示す。口絵写真—32~35参照。

一般に日本においては第四紀層は、圧密は進行しても土砂の状態からの大きな変化はない。新第三紀層は、圧密のほかに固結が始まり完全に固結した岩石になる前段の状態となる。古第三紀層以前では岩石はほぼ固結し、環境の変化により変化しにくい安定な物質となる。

2.3 風化とスレーキング

岩石の風化は広範囲にしかも長期間かけて生じ、それに伴い岩石の強度もゆっくりと低下してゆく。岩石の風化に比べ短時間で、岩石が急激にその強度を低下させる現象があり、軟岩や変質岩などに顕著に認められる。ここではその現象を劣化と呼ぶことにするが、岩石の劣化を促進する営力には応力開放、吸水膨張、乾・湿繰返し、凍結融解などがある。劣化は単独の営力で生じることは少なく、多くの要因が複雑に絡み合って生じる。

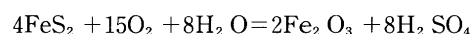
軟岩の劣化に大きな影響を与える現象に、スレーキングと膨潤がある。乾・湿繰返しにより岩石構成粒子間の結合が破壊され、岩石の強度が低下し、時には粒子が分離する現象をスレーキングと呼ぶ。吸水により体積が膨張する現象が膨潤であり、内部膨潤と外部膨潤がある。内部膨潤は層間に水が侵入可能な粘土鉱物の存在によりもたらされる。岩石のスレーキング、膨潤特性は、構成粒子が有する吸水性や固結度といった内部要因と、拘束圧や含水比といった外部条件に支配される。

一般に泥岩の場合にはスレーキングと膨潤はほとんど同時に認められるが、砂岩の場合にはスレーキングは著しいが膨潤は認められない場合が多い。このためスレーキングと膨潤は一応別の現象であり、膨潤性を示す場合に著しいスレーキングを示すと考えられる。いずれにせよ堆積軟岩の結合力は、物理的にも化学的にも不十分であり、これがスレーキングや膨潤を示す要因となっている。次節で述べるように続成作用の進行に伴い、これらの不安定な結合力をもたらししていた構成粒子間の粘土鉱物をはじめとする不安定な物質は、安定な物質へと変化することにより硬い岩石を形成する。

軟岩のスレーキングや膨潤現象については、さまざまな研究がなされているが、まだ十分に究明されたものではない。その発生機構を従来の研究成果からまとめると次のようになる。

Terzaghi and Peck (テルツァーギとペック)⁴⁾は、スレーキングのメカニズムを水浸によって間隙中に封じ込められた空気の圧力が上昇して生じる引張り破壊であると指摘した。そのことを確かめるために、仲野⁵⁾は、由比地すべり地の泥岩を用いて、大気中と真空中に浸水させてスレーキングの状態を比較した。その結果、泥岩はいずれの状態でも激しくスレーキングして崩壊し、大気中と真空中でのスレーキングに明確な差は認められなかったことを報告している。この研究では、スレーキングの原因を、物理化学的作用に求め、①泥岩の固結度は粘土粒子表面の吸着水分子の水素結合に起因し、珪酸ゲル様物質が粘土粒子の皮膜を形成して自由水との反応を抑制し、粘土粒子を不活性化している、②泥岩の乾燥や破碎などの操作によって、珪酸ゲル様皮膜に亀裂が入り、活性面が露出すると既に吸着されている水分子と自由水中の水分子との間に水素結合が形成されて、スレーキングが発生する、③土中の相対湿度のわずかな増加でも、自由水の吸着に伴う化学的自由エネルギーの放出が惹起され、その大きさは泥岩を破壊するのに必要なエネルギーの2～3倍に達する、ことを指摘した。これらの指摘は、泥岩が単に堆積状態のまま自由水に接しただけではスレーキングしないこと、乾燥による珪酸ゲル様皮膜の破壊やリップリング等によるヘアークラックの形成が活性面の露出につながり、スレーキングが発生すること、地下水位のわずかな変化による土中湿度の変化でもスレーキングが発生すること、を示唆した点で注目値する。

堆積軟岩中にわずか数%含まれる黄鉄鉱が風化に重要な役割を果たしていることもわかってきた^{6,7)}。地下水面付近までは大気が侵入可能で、それよりも浅い位置にある堆積軟岩は、常に大気中の二酸化炭素や酸素によって化学的な風化を被っている。水中に溶解した二酸化炭素は炭酸となり、軟岩中の方解石を溶解して、表層酸化帯を形成する。一方、酸素は酸化しやすい鉱物を酸化して表層酸化帯の少し深部に酸化帯を形成する。風化メカニズムのポイントは、大気中の酸素による酸化帯の最深部が地下水面の位置にほぼ一致し、地下水面付近では岩石中の黄鉄鉱の酸化が激しく進行して、



のような反応が発生していることである。酸化帯の下面では二価の鉄が激減し、三価の鉄が増加する。また、そのときに生成される硫酸が地下水面下の地盤中を下方に移動し、岩石を溶解しながら地下水面下に溶解帯を形成していることも明らかになってきた。

黄鉄鉱の酸化の仕方は、粘土分の多い泥岩と、粗粒の砂岩・礫岩とでは異なる。粘土分が多い場合は三価の鉄は遊離した形では折出しにくく、折出しても膠結すべき粒子の表面積が大きいために泥岩の強度・剛性を増加させることはできない。それに対して、砂岩・礫岩などの粗粒岩石では、三価の鉄が酸化物あるいは水酸化物として折出して粒子を膠結するので強度・剛性が増加することともわかってきた。

2.4 試験法と結果の整理法

盛土材料に堆積軟岩を利用する際には、スレーキングを事前に予測し、その可能性が懸念されるときには、盛土材料の選定をやり直したり、使用する場所を限定するなどの実際的な対応策を施すことが大切になる。スレーキングに対する抵抗性を調査するための試験法と耐スレーキング性を評価する方法をまとめると次のようになる。

(1) 試験法

試料に乾燥・湿潤の強制的な負荷を与える点で、各試験法とも共通している。しかしながら、供試体の準備方法、乾燥・湿潤の与え方、乾・湿の繰返し回数などに若干の相違がみられる。比較的良好に用いられ、参考になると思われるものに、① JIS A 1122, ② ISRM 指針, ③ 土木学会岩盤力学委員会第4分科会指針, ④ 道路公団 KODAN 110-1985, がある⁸⁾。

こうした試験は、盛土材料として用いる堆積軟岩のスレーキング特性を知る上で大変効果的ではあるが、試験の結果がその後の盛土の沈下や強度の推定に活かされていない等の問題点もある。実際の盛土内での荷重条件を考慮した試験⁹⁾、日照、降雨等の気象条件を考慮した暴露試験¹⁰⁾、紫外線照射に着目した試験¹¹⁾も実施されている。

乾・湿を多数回繰返す試験として、奥園¹²⁾、Morgenstern and Eigenbrod¹³⁾、小島¹⁴⁾の研究が見られる。試験の迅速性を考慮して1回の乾・湿でスレーキングを判定する方法もあり、(旧)国鉄の地質調査標準示方書¹⁵⁾、Morgenstern and Eigenbrod¹³⁾のRate of Slaking 試験、小島¹⁴⁾のIndex of Slaking 試験、山口¹¹⁾の方法がある。

(2) 耐スレーキングの指標

実際の建設工事における乾・湿の繰返しは、気象以外に、地下水位も考えられ、その変動はランダムである。盛土中で生じるランダムな地盤環境の変動と室内での規則的・強制的な乾燥・湿潤の負荷が、スレーキングの進行(細粒化、泥土化のスピード)とどのような対応になっているのか今のところ不明である。しかしながら、新第三紀鮮新世の泥岩を用いた④の室内試験と暴露試験の

講 座

比較から、室内での110℃24時間炉乾燥・常温24時間水浸の強制的負荷が自然条件下での乾・湿に比べてそれほど過酷な条件になっていないこともわかってきた¹⁶⁾。したがって、先述の試験法によって盛土材料に用いる堆積軟岩のスレーキングの難易はある程度判別可能である。

試験結果の表示法は、a.水浸・放置した岩片の目視によって4～5ランクに分ける方法（スレーキング指数¹⁷⁾、崩壊度ランク¹⁸⁾）、b.軟岩試料約3kgを用いて、9.50mmふるいの加積通過率で表示する方法（スレーキング率¹⁹⁾）、c.軟岩試料400～600gを用いて、2.00mmふるいの加積残留率で表示する方法（耐スレーキング指数²⁰⁾）等が提案されている。a.の方法は、試験法、表示法が簡便であり、幅広い軟岩に対応できる方法ではあるが、主観的な評価になり、個人差のはいる可能性が残されている。b., c.の方法では、客観的な数値によって表示できるが、同一のスレーキング率、耐スレーキング指数であっても、粒度分布の異なる場合が想定できる。

そのほかに、d.含水比、あるいは吸水量を測定することによって、スレーキング特性を把握しようとする試みもある^{18),21),22)}。

粒子破碎する土質、岩質材料の破碎程度を表現する方法に種々の提案がなされ、そうした粒子破碎指標をスレーキングによる細粒化の表現法に応用する試みも行われている^{16),23),24)}。研究的に行われたもので、粒度分布を計測する手間がかかり、実務での利用には改良の余地も残されている。この方法では、①50%径、②2mm通過率、③Marsalの破碎率、④均等係数、⑤負の2項分布のパラメーター、を用いてスレーキングに対する耐久性の検討が行われる。

参 考 文 献

- 1) 小島圭二：堆積物の固結過程とその工学的性質，施工技术，Vol. 5, No. 4, pp. 32～42, 1964.
- 2) Okamoto, M., Kojima, K. and Yoshinaka, R.: Distribution and engineering properties of weak rock of Japan, Proc. Int. Symp. on Weak Rock, Tokyo, pp. 89～103, 1981.
- 3) Hoshino, K.: Change of mechanical properties during solidification of sedimentary rocks, Rock Mechanics of Japan, Vol. III, Japanese Committee for ISRM, pp. 23～25, 1979.
- 4) Terzaghi, K. and Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practices, John Wiley and Sons, pp. 146～147, 1948.
- 5) 仲野良紀：由比地スベリ母岩（泥岩）の軟弱化と物性の変化について（その1）—軟弱化のメカニズムについて—，土と基礎，Vol. 12, No. 11, pp. 27～33, 1964.
- 6) 千木良雅弘：講座 建設工事における風化・変質作用の取扱い方 4.軟岩の風化作用，土と基礎，Vol. 40, No. 8, pp. 71～79, 1992.
- 7) 千木良雅弘・大山隆弘：堆積性軟岩の風化過程の工学的的重要性，電力土木，No. 241, pp. 1～6, 1992.
- 8) 土の物理的性質に関する新しい試験方法研究委員会：（委員会報告）土の物理試験に関する最近の動向，新しい土の物理試験方法に関するシンポジウム発表論文集，pp. 5～44, 1992.
- 9) 佐藤 巖・赤石 勝・竹田敏彦・杉山太宏：泥岩のスレーキングと圧縮沈下特性，第23回土質工学研究発表会，pp. 1137～1138, 1988.
- 10) 望月秋利：軟岩の風化とその評価，土木学会第45回年次学術講演会，第3部，pp. 480～481, 1990.
- 11) 山口晴幸・黒島一郎・福田 誠：スレーキング試験に関する考察，新しい土の物理試験方法に関するシンポジウム発表論文集，pp. 141～148, 1992.
- 12) 奥園誠之：切土のり面の崩壊とりのり面勾配，土と基礎，Vol. 20, No. 2, pp. 35～39, 1972.
- 13) Morgenstern, N.R. and Eigenbrod, K.D.: Classification of Argillaceous Soils and Rocks, ASCE, GT. 10, pp. 1137～1156, 1974.
- 14) Kojima, K.: Geotechnical Evaluation of Soft Rock Mass Based on Softening Characteristics, Proc. of 3rd Int. Cong. of IAEG, Vol. 1, pp. 218～228, 1978.
- 15) 日本国有鉄道：地質調査標準方書（施管第166号），1969.
- 16) 佐藤 健・板橋一雄・川邑 真：乾湿繰り返しによる泥岩の細粒化試験と結果の整理法，土木学会論文集，No. 487/III-26, pp. 69～77, 1994.
- 17) 土木学会岩盤力学委員会第4分科会：軟岩の調査・試験の指針，pp. 223～231, 1980.
- 18) 日本国有鉄道：岩石標準試験法（案），水浸崩壊度試験，pp. 92～93, 1983.
- 19) 日本道路公団：岩のスレーキング試験方法，岩の乾湿繰り返し試験方法，pp. 105～110, 1985.
- 20) 岩の力学連合会：ISRM指針（ISRM Suggested Methods），Vol. 1 pp. 21～24, 1982.
- 21) 小島圭二・斎藤保祐：軟岩の軟弱化の簡易試験法，東京大学工学部総合試験所年報，Vol. 36, pp. 193～198, 1977.
- 22) 吉川恵也・桜井 孝・立松英信：軟岩の劣化特性に関する簡易試験法及びそのトンネルへの適用，応用地質，Vol. 24, No. 2, pp. 17～29, 1983.
- 23) 福本武明：土の粒度分布に関する検討，土木学会論文集，No. 475/III-24, pp. 11～18, 1993.
- 24) 板橋一雄・佐藤 健・森 富雄・和田英孝：軟岩の室内スレーキング試験に伴う細粒化の表現法，土木学会論文集，No. 505/III-29, pp. 181～190, 1994.

次号へ続く