軟岩掘削面のスレーキング発生予測法に関する検討

Prediction method for slaking of excavated soft rock foundation

平野　勇[*]・伊藤裕之[**]・高橋一太[**]・三輪守隆[**]・木羽智洋[***]・原田光広[****]

Isamu HIRANO, Hiroyuki ITO, Ichita TAKAHASHI, Moritaka MIWA, Tomohiro KIBA and Mitsuhiro HARADA

Excavated dam foundation of the soft rock brings about various geotechnical problems by slaking, that often causes decrease of strength, increase of deformability and permeability of the excavated rock foundation of the concrete dam and also impervious core and inspection gallery of the embankment dam. To develop the prediction method for the slaking of excavated soft rock foundation, several in-situ tests of rock mass and laboratory tests of rock specimen were done on the claystone of Neogene Teradomari Formation in Niigata. Relationship between saturate ratio of soft rock at immersing water and degree of slaking were examined, and drying time of exposure that gives threshold point of saturate ratio of slaking was confirmed.

Key Words: dam foundation, soft rock, slaking, slaking test, prediction method

1. はじめに

軟岩の工学的問題点の 1 つにスレーキングがある。軟岩のスレーキングは乾燥と水浸の繰り返しによって，膨張，割れ目，崩壊，分散などを生じて，強度低下や変形性の増大を招き，さらには物体としての一体性や原形を失う現象[1]を指している。スレーキングを生じやすい軟岩にダムを建設する場合，基礎掘削面の乾燥と降雨，湧水，岩盤清掃水，フレッシュコンクリートなどの水分によってスレーキングを生じ，堤体の安全性や施工性において様々な問題を発生する。また，ダム管理設備や付替道路等の切土法面，貯水池湖岸斜面の劣化・浸食など，ダム管理や貯水池保全の面においても様々な問題を生じる。

軟岩のスレーキングは水浸されるときの岩石の飽和度に強く影響される[1]ことに着目して，新潟県の新第三紀寺泊層の泥岩からなる柿崎川ダム貯水池の岩盤を対象に原位置試験及び室内試験を行い，軟岩掘削面におけるスレーキングの発生予測法について検討した結果を報告する。

2. 基礎掘削面におけるスレーキング発生予測手法の検討

(1)軟岩のスレーキング特性

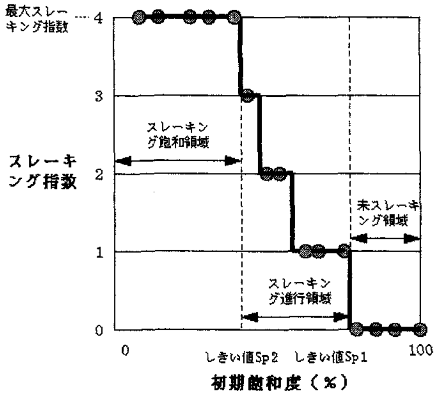
軟岩のスレーキングの物理化学的な機構として，ある限界を超えて乾燥した軟岩組織に自由水が浸入するとき，自由水と軟岩の構成粒子が結びついて自由水の持つ自由エネルギーが急激に放出され，その一部が機械エネルギーに転化することによって生じるものとされている[2][3]。また，鉱物学的な機構として，乾燥して脱水したモンモリロナイトなどの膨潤性粘土鉱物を水浸させるとき生じる膨潤によって起こるものとされている[4]。

*　正会員　京都大学工学研究科　社会基盤工学専攻
**　西松建設株式会社　関東支店
***　兵庫県淡路県民局　県土整備部
*****兵庫県企画管理部　企画調整局

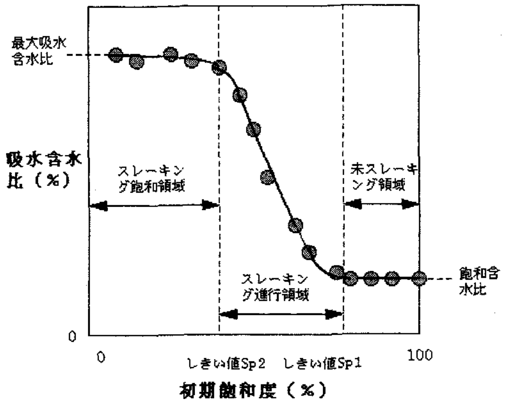
このような機構によって軟岩組織の膨潤，歪，破壊など微視的な変化を生じ，その結果として，軟岩の膨張，割れ目，崩壊，分散など巨視的な変化となって現れるものと考えられる。

図－１，**図－２**はわが国における代表的な軟岩における水浸時の岩石の乾燥度とスレーキングによる劣化度の関係を模式的に示したものである [1]。**図－１**において初期飽和度は水浸時の軟岩の乾燥度，スレーキング指数は土木学会岩盤力学委員会 [5]による指数，**図－２**の吸水含水比はスレーキングによって吸水した軟岩の含水比を示している。

軟岩のスレーキングは初期飽和度に強く影響され，初期飽和度～スレーキング曲線は軟岩のスレーキング特性をよく表現している。著しいスレーキングを生じる軟岩の場合，**図－１**，**図－２**のような S 字形の成長曲線を示す。すなわち，①初期飽和度が低下してもスレーキングを発生しない“未スレーキング領域”，②初期飽和度の低下とともにスレーキングの程度が激しくなる“スレーキング進行領域”，③さらに初期飽和度が低下してもそれ以上はスレーキングが進行しない“スレーキング飽和領域”の３領域が初期飽和度の低下につれて段階的に出現し，各領域間にはしきい（閾）値が存在する。しきい値 Sp1 はスレーキング未発生と発生の境界値，しきい値 Sp2 はスレーキング進行域と飽和領域の境界値を示している。最大スレーキング指数が３以下のそれほど激しくスレーキングを生じない軟岩では領域①，②のみが現れる。これらの初期飽和度～スレーキング曲線をもとに，これをおおむね近似できる最大値，最小値，変曲点（しきい値）などに着目した値を求め，それらをスレーキングの評価指標とすることができる [1]。



図－１　初期飽和度～スレーキング指数曲線模式図 [1]

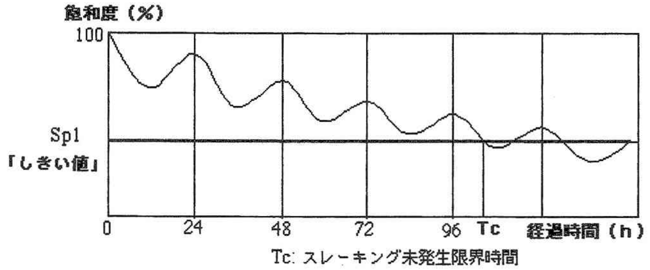


図－２　初期飽和度～吸水含水比曲線模式図 [1]

(2)基礎掘削面におけるスレーキング発生予測手法

掘削面がしきい値 Sp1 以上に保持されている場合はスレーキングは発生しないので，スレーキングの発生予測には掘削面のおかれている環境や曝露時間など掘削面の乾燥プロセスに注目する必要がある。掘削面の乾燥速度は，地形・地質条件，日射量・気温・湿度・風速など気象条件，地下水や表流水など水理条件が複合的に影響する。晴天が続き安定した気象条件のもとであれば掘削面の飽和度は 24 時間周期の日周変化を示し，**図－３**の模式図のように，昼前から夕方にかけて飽和度は下がり，夜間から明け方にかけて上昇するような正弦波を描きつつ，その変動幅が小さくなり，かつ全体として低下し，一定レベルに収束するような傾向を示すものと予想される。晴天時，飽和状態にある岩盤表面は曝露とともに飽和度が低下するが，暫くはスレーキングを発生しない“未スレーキング領域”にある。さらに乾燥が進み岩盤表面の飽和度がしきい値 Sp1 を超えて低下すれば，フレッシュコンクリートやコンタクトクレイの水分，あるいは降雨，散水等によってスレーキングを生じて劣化する恐れが出てくることになる。

したがって岩盤面の乾燥防止によってスレーキング抑止対策を考える場合，**図－３**に示すような飽和度低下の許容値と許容時間すなわち，岩盤面がしきい値 Sp1 以上の “未スレーキング領域” にある範囲で曝露可能な時間（以下“スレーキング未発生限界時間 Tc”とよぶ）を知ることがポイントとなる。Tc は言うまでもなく，対象岩盤の地形・地質，気象，水理条件等によって複合的に決まる値である。



図－３　岩盤掘削面の飽和度低下としきい値 Sp1 及び
スレーキング未発生限界時間 Tc の概念図

Tc が十分に大きければ特段の乾燥防止工は要しない。Tc が小さければ乾燥防止工が必要となる。Tc が非常に小さい場合，仕上げ掘削から乾燥防止工の施工まで，及び，乾燥防止工の中断・撤去からコンクリート打設やコンタクトクレイ施工までの曝露時間を Tc 内におさめる必要がある。このように飽和度低下に関する Tc は本体工事及びスレーキング防止工の施工計画を策定する上で極めて重要な指標となる。

３．試験方法

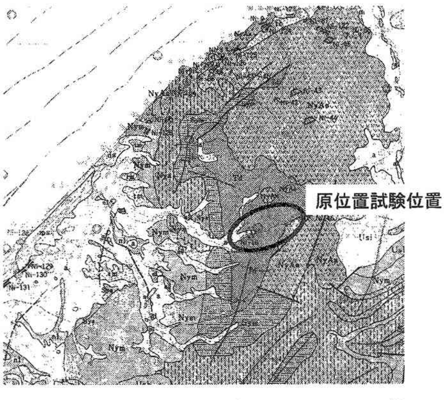
軟岩掘削面の曝露による飽和度の変化としきい値 Sp1 及びスレーキング未発生限界時間 Tc について検証するために，新第三紀寺泊層の泥岩からなる柿崎川ダムの岩盤を対象として掘削面曝露試験及び室内スレーキング試験を行った。

(1)試験掘削面の地質概要

柿崎川ダムは新潟県中頸城郡柿崎町の柿崎川上流に位置し，洪水調節・上水道用水確保などを目的とした堤高 54m，堤長 424mの中央コア型ロックフィルダムである。ダムサイト及び貯水池の地質は，細粒の砂岩と泥岩（粒度からみると粘土岩である。泥岩として一括して取り扱われがちな粘土岩とシルト岩はスレーキング特性が非常に異なるので注意する必要 [1] がある。）の細互層からなり，ダム軸とほぼ平行な N20°～30° E で下流に傾斜した同斜構造をなしている。試験ヤードは貯水池内に設定した。試験面は軽微な風化が認められた。**表－１**に粘土岩の物理・力学的性質，**図－４**に原位置試験周辺の地質図を示す。

表－１　粘土岩（微風化岩）の物理・力学的性質

湿潤密度(g/cm³)	2.24
乾燥密度(g/cm³)	1.96
有効間隙率(%)	27.6
飽和含水比(%)	14.4
針貫入強度(kgf/cm)	0.75



図－４　原位置試験地周辺の地質 [6]

最も乾燥しやすい夏期の 2000 年 7 月下旬に試験期間を設定し，連続した晴天日において掘削面の曝露試験を行い，飽和度の低減過程及びスレーキング未発生限界時間 Tc，ならびにそのときの気象条件を把握した。

①試験面の造成

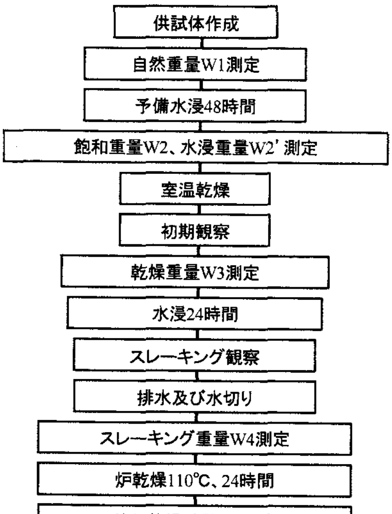
貯水池内に試験ヤードを設定して散水及び養生マットによって乾燥を防止しながら岩盤を掘削し，試験面を造成した。1 試験区画の大きさは 50×50cm とし，造成後，十分に水浸して飽和させ，曝露試験開始に備えた。

②試験時期及び測定間隔

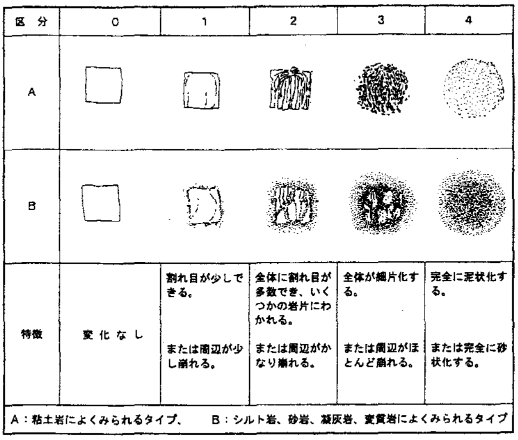
晴天が継続した 7 月 29 日～31 日にかけて曝露試験を行った。29 日 10 時の曝露開始後，一定時間ごとに岩盤面の表層 1cm 以内の部分からサンプルを採取し直ちに重量を測定した。さらに，採取したサンプルを実験室に持ち帰って絶乾重量の測定を行い，別途求めた飽和含水比をもとに岩盤面の飽和度を求めた。また，気象条件を把握するために気温，湿度，天候の観測を行った。測定間隔は 2～4 時間毎とした。

(3) 室内スレーキング試験

スレーキング発生の飽和度に関するしきい値 Sp1 及び水浸時の軟岩の飽和度とスレーキングの発生形態の関係について把握するために土木研究所において提案されている室内スレーキング試験方法 [1]を用いて行った。複数の供試体をそれぞれ飽和度 100%から長期乾燥まで飽和度を段階的に変化させて行うものであり，スレーキング試験の手順と測定項目は**図－５**の通りである。また，スレーキングの目視観察によって行うスレーキング区分については**図－６** [1)5)]によった。



図－５　スレーキング試験の手順と測定項目 [1)]



図－６　スレーキング区分判定図 [1)5)]

4. 試験結果

(1) 掘削面曝露試験

①試験期間の気象条件

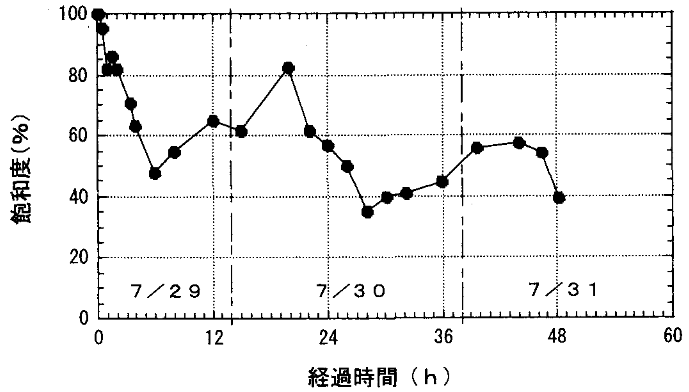
試験期間中の気象条件を以下の**表－２**に示す。試験開始後，夕立などの天候不順に見舞われ何度か試験面を再掘削して試験を再スタートさせた。結果的には試験期間は好天が続いて日中の最高気温は 40℃に達し，岩盤面の乾燥が進みやすい天候を設定することができた。

表－２　試験期間中の気象条件

日付	気温（℃）			湿度（%）			天候
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
7月29日	37	24	31	96	52	74	晴れ
7月29日	40	22	31	96	36	66	晴れ
7月29日	37	22	30	94	37	66	晴れ

②岩盤表面の飽和度の経時変化

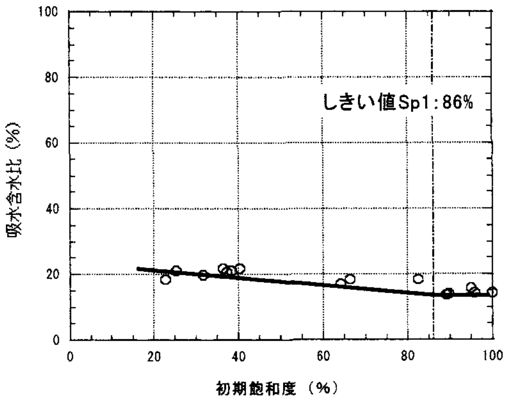
岩盤表面の飽和度の経時変化を**図－７**に示す。掘削面の飽和度は 24 時間周期の日周変化を示し，昼前から夕方にかけて飽和度は下がり，夜間から明け方にかけて上昇するような正弦波を描きつつ，その変動幅が小さくなり，かつ全体として低下し，一定のレベルに収束するような**図－３**の模式図に示す傾向が確認できた。



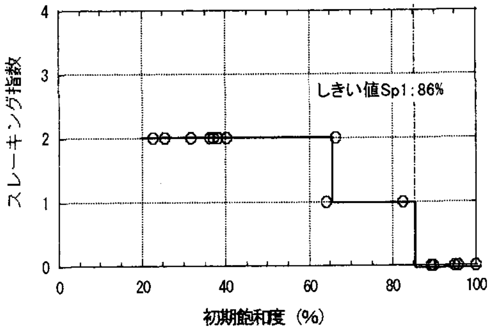
図－７　岩盤面の飽和度変化曲線（7/29～7/31）

(2)室内スレーキング試験

図－８，**図－９**に室内スレーキング試験結果を示している。これによるとしきい値 Sp1 は 86%，最大吸水含水比 22%，最大スレーキング指数 2 となった。したがって岩盤表面の飽和度が 86%以下に低下するとスレーキングを発生する可能性が出てくる。なお，ここで求めたスレーキング試験の値は，別報告 [7]のダムサイトロック敷きの粘土岩よりもスレーキングを生じにくい傾向を示している。この理由として，曝露試験を行った貯水池の位置が層序的に下位の地層であり幾分かより続成作用が進んでいること，軽微であるが風化によってわずかに酸化し硬化しているように見えることなどにより，スレーキングを生じにくくなっているものと考えられる。



図－８　初期飽和度～吸水含水比の関係

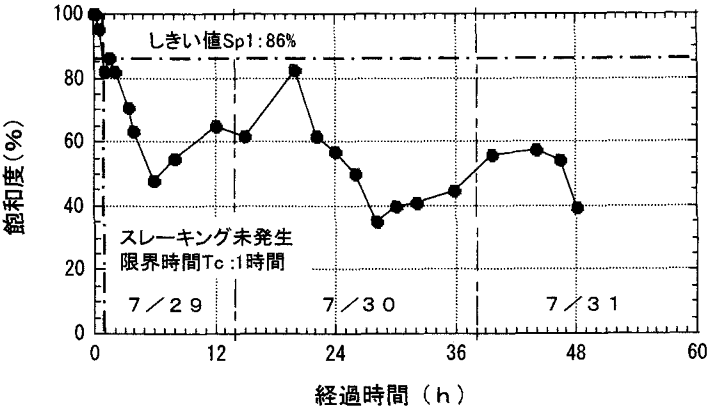


図－９　初期飽和度～スレーキング指数の関係

5．スレーキング発生予測

曝露試験によって得られた飽和度変化曲線にしきい値 Sp1 を対応させるとスレーキング未発生限界時間 Tc は約 1 時間程度（図－１０）となり，盛夏の炎天下においては極めて厳しい施工を強いられることが確認された。

なお，曝露試験における飽和度計測の完了後，乾燥した岩盤面を多量の水で水浸したところ，スレーキング指数 2 程度のスレーキングが岩盤表面に発生した。



図－１０　岩盤掘削面のスレーキングの発生予測

6．おわりに

今後種々の軟岩掘削面及び気象条件下において同様な試験を実施して，岩種・岩質及び気象条件とスレーキングの関係を明らかにするとともに，これらの関係から，しきい値 Sp1 及びスレーキング未発生限界時間 Tc を推定できるようにする必要がある。

原位置試験の実施に当たっては新潟県上越土木事務所柿崎川分室に多大なご支援とご協力を頂いた。ここに厚く御礼を申し上げる。

参考文献

1)平野 勇：軟岩のスレーキング特性の評価試験法についての提案，第 10 回岩の力学シンポジウム講演論文集，pp43-48，1998.

2)仲野良紀：由比地すべり母岩（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，pp27-33，1964.

3)仲野良紀：由比地すべり母岩（泥岩）の軟弱化と物性の変化について（その 2），-軟弱化に伴う物理的，力学的変化と泥岩の結合力の本性について-，土と基礎，Vol.12，No.12，pp3-9，1964.

4)石田良二・神藤健一：スメクタイトを含む軟岩の劣化防止に関する研究，応用地質，Vol.35，No.5，pp1-14，1994.

5)土木学会岩盤力学委員会：軟岩の調査・試験の指針（案）改訂版，pp64～72，1991.

6)北陸地方土木地質図編纂委員会：北陸地方土木地質図，国土技術研究センター，1990.

7)平野　勇・伊藤裕之・高橋一太・三輪守隆・原田光広・志賀淳二：粘土岩からなる掘削面のスレーキング抑制法に関する検討，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，No.38，地盤工学会，2003.