

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

Restraint method for slaking of excavated soft rock foundation of claystone

平野 勇*・伊藤裕之**・高橋一太**・三輪守隆**・原田光広***・志賀淳二****

Isamu HIRANO, Hiroyuki ITO, Ichita TAKAHASHI, Moritaka MIWA, Mitsuhiro HARADA and Junji SHIGA

Excavated rock surface of soft rock brings about various geotechnical problems by slaking. To develop the restraint method for the slaking of soft rock dam foundation, several in-situ tests of the excavated rock mass and laboratory tests of rock specimen were done on the soft rock of claystone of Neogene Teradomari Formation in Niigata. Ion exchange method on the swelling mineral by immersing of KCl water, wetting method by curing mat cover and water sprinkling, and controlling the water absorption rate on dried claystone were examined, and fairly good restraining effect of those methods were confirmed.

Key Words: dam foundation, soft rock, slaking, restraint method, ion exchange, swelling mineral

1. はじめに

軟岩からなるダム基礎掘削面のスレーキングの発生要因として、(a)岩種・岩質など素因的な条件、及び、地山に封じ込められていた軟岩が掘削によって大気に曝露されたり人為的な作用を被ったりすることによる誘因的な条件、すなわち、(b)日射・気温・湿度・風力など気象に関連した乾燥条件、(c)降雨・表流水、散水・フレッシュコンクリートまたはコンタクトクレイ施工、湛水など気象及び人為による水浸・加湿条件などが挙げられる。本研究は軟岩掘削面のスレーキングの抑制は要因(a)~(c)を可能な方法によって人工的に変化させればよいと考えられることに着目し、新第三紀寺泊層の泥岩からなる新潟県柿崎川ダムの基礎岩盤(ロック敷き)における原位置試験及び室内試験を行い、ダム基礎掘削面のスレーキング抑制法について検討したものである。

2. ダム基礎掘削面におけるスレーキングのプロセス

軟岩からなるダム基礎掘削面のスレーキングによる劣化及び浸食プロセスはダムの施工計画に関連して次の2つが起ころうる(図-1)。

(1) 粗掘削面における長期的プロセス

粗掘削から仕上げ掘削までの間、一般に数ヶ月から数カ年の長期にわたり掘削面が曝露されることになる。その間の日射、気温変化、風、降雨、降雪等によって乾燥・湿潤が繰り返され、進行性のスレーキングと浸食が発生する。すなわち、粗掘削後、掘削面を放置すれば乾燥クラックやスレーキングによって、粗掘削面の深度方向の劣化が進み、堅岩線(仕上げ掘削線)の後退、表面浸食やガリー浸食が発生する。さらには仕上げ掘削面、コンクリート打設面、コア盛立面などへの浸食土砂の流入・堆積を生じて、施工に著しい支障をきたす。

* 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

***兵庫県企画管理部 企画調整局

****日本放送協会

(2) 仕上げ掘削面における短期的プロセス

仕上げ掘削施工中、及びその完了後からコンクリート打設またはコンタクトクレイ施工まで、もしくはスレーキング対策工の施工までの間に掘削面が一定の時間曝露されることになる。この曝露時間内に掘削面が乾燥して飽和度が、しきい値 $Sp1^{(1)(2)}$ 以下に低下するとフレッシュコンクリートやコンタクトクレイの水分によって吸水しスレーキングを起こして岩盤面が劣化する可能性が出てくる。

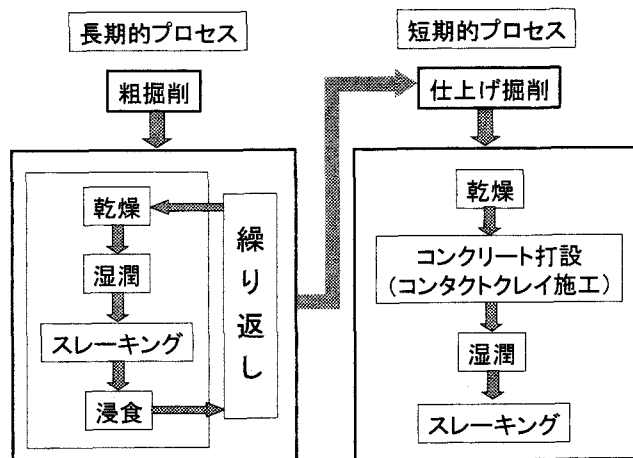
2. ダム基礎掘削面におけるスレーキング抑制の基本的な考え方

ダム基礎掘削面におけるスレーキング抑制の基本的な考え方としては、スレーキングのプロセス（図－１）を遮断あるいはコントロールすること、及びスレーキングを生じないように岩質そのものを改変することの２つがある。

短期的プロセスにおいては、まず、(a)岩盤面をしきい値 $Sp1^{(1)(2)}$ 以下に乾燥させないことが挙げられる。また、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水の持つ自由エネルギーが熱となって急激に放出されることになり、その自由エネルギーの一部が機械エネルギーに転化することによってスレーキングが生じるものとされている³⁾⁽⁴⁾ことから、(b)水浸・加湿速度を低減する、同じく(c)自由エネルギーの急激な放出を抑制するために高温水で水浸・加湿するなどが考えられる。さらに、(d)イオンの吸着・交換、高温加熱による焼成などによって岩質そのものを物理的・化学的に改変し、スレーキングを生じにくい岩石に改質することが考えられる。

なお、長期的プロセスにおいては、短期的プロセスの(a)、(b)の効果を緩やかに発揮する方法として、深さ50cm～1m程度の仕上げ掘削の余裕しる、密閉型のり面保護工であるコ

ンクリート吹付工、乾燥・湿潤過程の緩和とスレーキング物質を岩盤面に残留させて進行性の浸食防止を図る厚層基材吹付工などの対策方法が適用されている。



図－１ 軟岩からなるダム基礎掘削面のスレーキングによる劣化プロセス

3. 試験方法及び結果

2. における考察をもとに幾つかの方法を考案し、そのスレーキングの抑制効果について検証するために、新第三紀寺泊層の泥岩（粒度からみると粘土岩である）からなる柿崎川ダムのロック敷きにおける原位置スレーキング抑制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

柿崎川ダムの諸元と地質概要については、別報告²⁾にゆずる。図－２にダムサイトの地質断面図、表－１にロック敷きにおける粘土岩の物理的性質を示す。

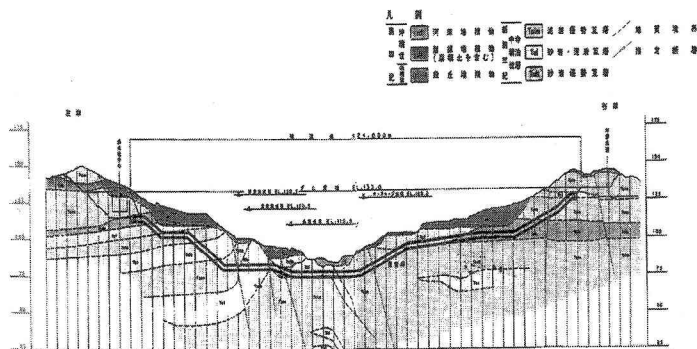


図-2 ダムサイトの地質図⁶⁾

表-1 粘土岩の物理的性質

湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	有効間隙率 (%)	飽和含水比 (%)	収縮率 (%)
2.169	1.837	33.13	18.05	1.87

(2) 室内試験

①スレーキング試験

ロック敷きの試験ヤードの粘土岩について室内スレーキング試験¹⁾を行った。その結果を図-3, 4に示す。この粘土岩は最大吸水含水比約80%, 最大スレーキング指数4, しきい値Sp1は96%となり, きわめてスレーキングを生じやすい軟岩であり, わずかの乾燥によってもスレーキングを発生しやすくなることが確認された。なお, 図-3のしきい値Sp1は図-4におけるスレーキング指数から求めた値を記入したものである。

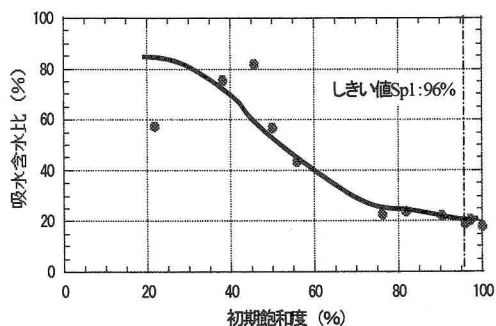


図-3 初期飽和度～吸水含水比の関係

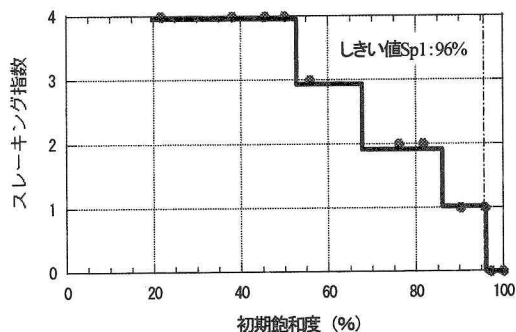


図-4 初期飽和度～スレーキング指数の関係

②スレーキング抑制試験

室内において2週間以上乾燥させた, すなわちしきい値Sp1を超えて著しく乾燥した試料(飽和度30%前後)について, 水浸温度, 加湿・吸水方法, 水浸水の水質を変えるなどして室内スレーキング試験¹⁾をアレンジした室内スレーキング抑制試験を行った。その方法及び結果は表-2と図-5, 6のとおりである。

(a) 緩速吸水法: 養生マット法, コンタクトクレイ法の効果が認められた。噴霧法は若干効果が認められた。

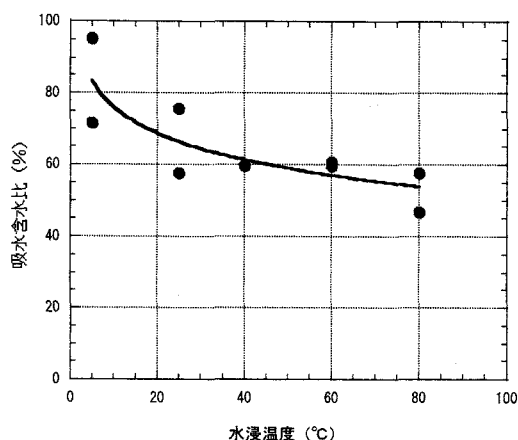
(b) イオン交換法: モンモリロナイトなど粘土鉱物の交換性陽イオンを置換⁵⁾するものでKClを用いた。長期乾燥試料を低濃度のKCl溶液に水浸したKイオン交換法2-0.5以外の方法については顕著な抑制効果が認められ, イオン交換法の有効性が確認された。

(c)併用法：顕著な抑制効果が認められた。

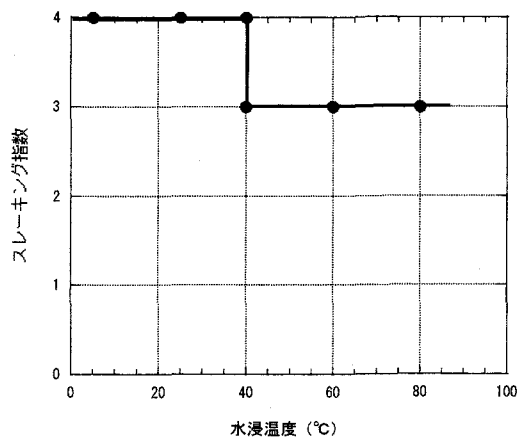
(d)高温水浸法：水浸温度が高くなるにつれてスレーキングが抑制される傾向が認められた。このことから軟岩の飽和度が同じであれば夏期の方がスレーキングは抑制されるものと思われる。

表－２ 室内におけるスレーキング抑制試験の方法と効果

スレーキング抑制法		試験方法（室内スレーキング試験法 ¹⁾ の変更点）	吸水含水比（％）	スレーキング指数
無処理		変更なし	75.66	4
緩速吸水法	噴霧法	長期の室温乾燥後に霧吹きによって十分に加湿したのちに水浸	64.88	3
	養生マット法	長期の室温乾燥後にスポンジ及びタオル地を介して徐々に加水し、ビニール袋内で養生ののちに水浸	52.74	2
	コンタクトクレイ法	長期の室温乾燥後にコンタクトクレイに包んで突き固め、ビニール袋内で養生ののちに水浸	52.74	2
改質法	Kイオン交換法 1-0.5	0.5NのKCl溶液に96時間予備水浸後に長期の室温乾燥	23.00	1
	Kイオン交換法 1-1	1NのKCl溶液に96時間予備水浸後に長期の室温乾燥	21.72	1
	Kイオン交換法 1-2	2NのKCl溶液に96時間予備水浸後に長期の室温乾燥	20.67	1
	Kイオン交換法 2-0.5	長期の室温乾燥後に0.5NのKCl溶液に24時間水浸	44.49	3
	Kイオン交換法 2-1	長期の室温乾燥後に1NのKCl溶液に24時間水浸	29.15	1
	Kイオン交換法 2-2	長期の室温乾燥後に2NのKCl溶液に24時間水浸	20.55	1
改質＋緩速吸水法	併用法 1	Kイオン交換法 1-1と養生マット法の併用	21.05	1
	併用法 2	Kイオン交換法 1-1とコンタクトクレイ法の併用	21.32	1
高温水浸法		長期の室温乾燥後に水浸温度を5～80℃まで5段階に調整して水浸	（図－5，6に示す）	



図－５ 水浸温度によるスレーキングの吸水含水比の変化



図－６ 水浸温度によるスレーキング指数の変化

(3) 原位置試験

ダムサイトのロック敷きに試験ヤードを設定し、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て試験面を造成した。地質は砂岩の薄層を挟む粘土岩である。1 試験区画の形状は一辺 100cm の正方形とした。造成後、十分に水浸して飽和させ曝露試験に備えた。

原位置試験は曝露した岩盤面の経時観察、飽和度計測、シュミットハンマーテスト、及び養生マット、コンタクトクレイを用いた緩速吸水法によるスレーキング抑制試験を行った。

① 気象調査

安定した晴天が継続した 9 月 3 日～7 日にかけて曝露試験を行った。試験期間中の気象条件を表－3 に示している。朝方は 15～16℃ と気温は低めであったが、日中の最高気温は 39℃ に達する高温となり、極めて岩盤の乾燥が進みやすい天候であった。

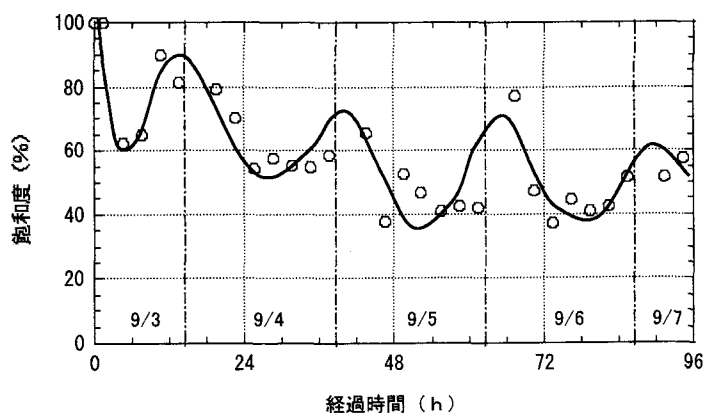
表－3 曝露試験期間中の気象条件

日付	気温 (℃)			湿度 (%)			天候
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
9 月 3 日	38.8	15.7	26.7	97	31	64.8	晴れ
9 月 4 日	39.0	16.1	27.1	97	25	61.0	晴れ
9 月 5 日	39.2	16.4	27.9	91	21	57.7	晴れ
9 月 6 日	38.1	16.8	26.0	96	25	67.1	晴れ
9 月 7 日	34.5	17.3	26.0	97	36	66.6	晴れ

② 岩盤面の経時計測

曝露開始後、一定時間ごとに岩盤面の観察を行った。その結果を表－4 に示す。試験対象とした粘土岩は表－1 に示すように間隙率、含水比、収縮率が大きく、乾燥過程において岩盤面の収縮クラック、岩片の剥離や細片化を生じ、水浸によるスレーキング以前に、乾燥によってかなり劣化した。

また、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。岩盤表面の飽和度の経時変化を図－7 に示す。曝露開始後 1 時間程度でしきい値 Sp1 (96%) を下回るような岩盤表面の急激な乾燥が確認された。また、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、一定のレベルに収束するような傾向がうかがわれる。



図－7 岩盤面の飽和度変化 (9/3～9/7)

表－４ 曝露乾燥による岩盤面の目視性状の変化

日時	観察事項
9/3 AM9:00 (曝露開始)	割れ目もほとんどなく新鮮な岩盤をなしている。
9/3 PM2:00	岩盤表面の乾燥が速く、乾燥によって生じた微小なクラックが所々で見られ、一部のクラックは開口して長いものが見られる。
9/4 PM2:00	クラックの発生が進み、開口幅、延長もさらに大きくなっている。
9/5 PM2:00	全体にわたってクラック数が増加し、開口幅が拡大し、延長も長くなっている。岩盤表面の剥離が一部確認できる。
9/6 PM2:00	さらにクラックの増加、伸張、開口が著しくなっている。岩盤表面の剥離が至るところに認められる。
9/7 PM2:00	岩盤表面の劣化はさらに進行している。クラックの増加、伸張、開口、岩盤表面の剥離と細片化が著しい。

③乾燥防止法

柿崎川ダムの本体工事において、基礎岩盤の仕上げ掘削後、時間を置かずに養生マット＋散水工を実施して乾燥防止による抑制効果を実証済みであるので乾燥防止法に関する試験は実施していない。

④緩速吸手法

一旦、しきい値 Sp_1 を超えて乾燥した岩盤に対して、徐々に加湿することによってスレーキングを抑制しながら飽和させようという試験である。飽和させた試験面を炎天下に約3日間曝露して岩盤面が乾燥(飽和度50%程度)した後、(a)直接散水、(b)養生マット敷設上の散水、(c)コンタクトクレイ(含水比52.2%)施工の3つの方法で水浸・加湿を行った。翌日、試験面を観察した結果は表－5のとおりである。養生マット＋散水、コンタクトクレイ施工による緩速吸手法の効果がある程度認められた。

表－５ 原位置スレーキング抑制試験の方法と効果

スレーキング抑制法	岩盤面性状	効果
無処理	スレーキング指数2～3相当のやや激しいスレーキング	－
養生マット・散水工	スレーキング指数2相当の中程度のスレーキング	○
コンタクトクレイ工	スレーキング指数2相当の中程度のスレーキング	○

4. おわりに

スレーキング発生のしきい値 Sp_1 を超えて乾燥した岩石及び岩盤について、養生マット＋散水工、コンタクトクレイによる緩速吸手法、及びイオン交換法によるスレーキング抑制効果が認められた。

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) 平野 勇・伊藤裕之・高橋一太・三輪守隆・木羽智洋・原田光広：軟岩掘削面のスレーキング発生予測法に関する検討，第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，No.37，2003。
- 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 西松・フジタ・加賀田特定共同企業体柿崎出張所：柿崎川総合開発事業柿崎川ダム建設工事パンフレット。