

碓井川河床軟岩を対象とした乾湿繰り返しによる細粒化の実験†

土倉泰*, 重原妃那*

Laboratory measurements of the slaking depth on the surface of soft rocks sampled at the Usui River†

Toru Tsuchikura* and Hina Shigehara*

In the Usui River, where sediment accumulation has been reduced due to the dam upstream, the soft rocks at the bottom of the river have been exposed. As a result, the riverbed soft rocks have been eroded resulting from slaking and the level of the river bottom is getting lower. This is the cause of problems such as damage to river banks and difficulties in agricultural water intake. In this study, we measure the slaking depth on the soft rock surface happened as a consequence of repetitive drying and water immersion using soft rock samples collected in this area. The results are as follows. One cycle of dry/wet repetition make about 3 mm of granulation on the soft rock surface. The thickness of this granulation become smaller if sufficient drying conditions are not provided. Remaining particles on the soft rock surfaces after slaking seem to delay granulation. The soil classification of disintegrated particles is also shown.

Key words : Stream bed erosion, Soft rock, Slaking

1 はじめに

碓氷川では、上流にダムが存在するため河道を流れる土砂が減りその堆積が少なくなった影響で、より深いところに存在していた軟岩が露出するようになった。この露出した軟岩はスレーキングという細粒化現象にもなっており、容易に浸食され、大きな河床低下を引き起こす。河床の低下は、川の護岸を底部から破損させたり、農業用水の取水障害や魚類などの生育環境の悪化といった問題を引き起こしたりする。現地の状況を Fig.1 に示す。

本研究では、碓井川流域で採取した軟岩を対象として、乾湿の繰り返しにより生じるスレーキングで岩の表面を細粒化させる実験を行う。この実験は、軟岩の細粒化が進行する程度を把握するとともに、細粒化に及ぼすいくつかの影響因子をとらえ、河床低下問題への対策を検討するための参考となる情報を得ることを目的とする。

2 軟岩試料の物理的性質

2・1 促進スレーキング試験

本研究で用いる試料は、安中市松井田町の広谷橋において、橋脚付近から採取したものである。この軟岩のスレーキングに関わる性状を、JGS2125-2009 岩石の促進スレーキング試験方法を適用して調べた。供試体には 50mm×50mm×20mm 程度に割った軟岩 2 断片を使用



Fig. 1 Erosion of soft rocks at the bottom of the Usui River

した。24 時間の水浸と炉乾燥を繰り返し、スレーキング区分を判定する。スレーキング区分は上記の地盤工学会の基準に従う。

促進スレーキング試験の結果、軟岩 2 断片とともにスレーキングが発生した。両断片に A と B の記号を割り振ることとする。スレーキングの進行にともなう断片 A と

† 原稿受理 令和 3 年 2 月 26 日 Received February 26, 2021

* 社会環境工学科(Department of Civil and Environmental Engineering)

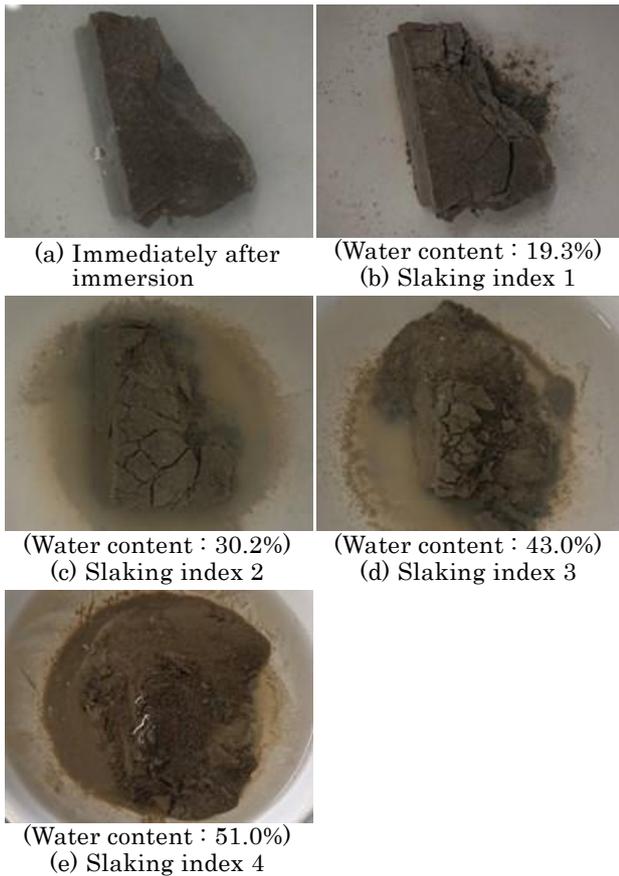


Fig. 2 Changes in form of Specimen A

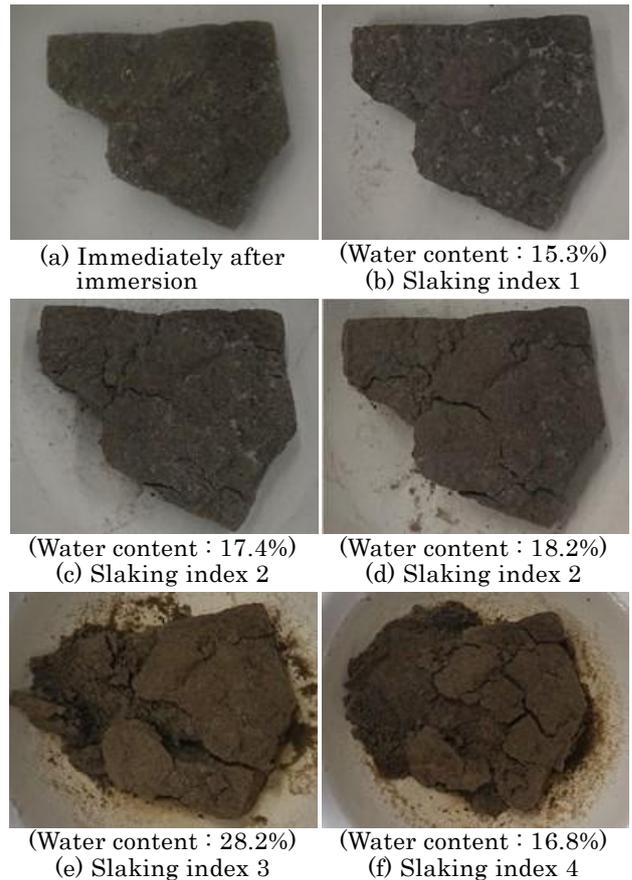


Fig. 3 Changes in form of Specimen B

B の変化状況をそれぞれ Fig.2 と Fig.3 に示す。図の中には、各状態で測定された含水比も合わせて示す。断片 A においては、泥状化とみられるような変化があったが、断片 B は砂状となって崩壊した。

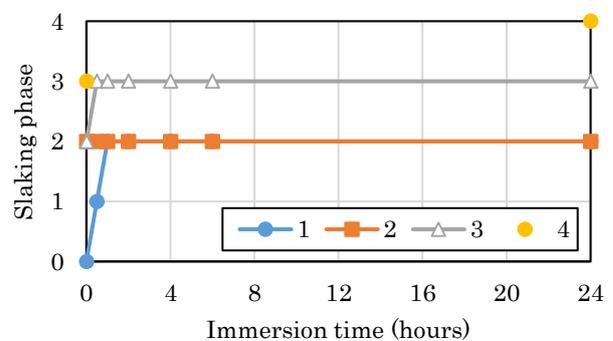
スレーキング区分を判定した結果を Fig.4 に示す。基準に従い 3 回目の繰り返しまで時間を追って判定した。4 回目以降は水浸 24 時間後に判定した。断片 A では、浸水直後に割れ目ができて 1 時間で幾つかの岩片に分かれたので、早い段階でスレーキング区分が 2 となった。断片 A は 4 回、断片 B は 5 回の水浸で区分 4 に達した。

文献²⁾では、スレーキングのメカニズムが以下のように説明される。すなわち、'土塊を水中につけると水は毛管現象で毛管中に吸い込まれて、毛管中にある空気を圧縮する。このときの空気圧は土塊に引張応力を与え、土粒子間の結合力を弱める。このほかに土粒子は水分を吸収して、粒子間隔が広がり結合力が低下する。その結果、毛管中の圧力の高くなった空気が結合力の弱いところから吹き出し、土塊は破壊される'という説明である。

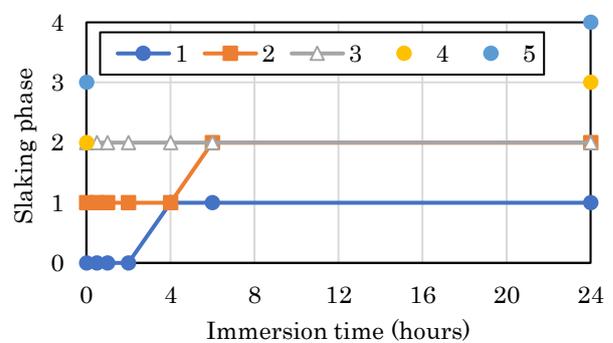
実際に、水浸時に細かな空気が吹き出すところが観察された。このとき表面から細粒化し、次第に内部に達していき、最終的に全体が細粒化すると考えられる。

2・2 細粒化後の土の粒度とコンシステンシー

促進スレーキング試験を行って細粒化した土粒子を集



(a) Specimen A



(b) Specimen B

Fig. 4 Relationship between slaking category and time in slaking test

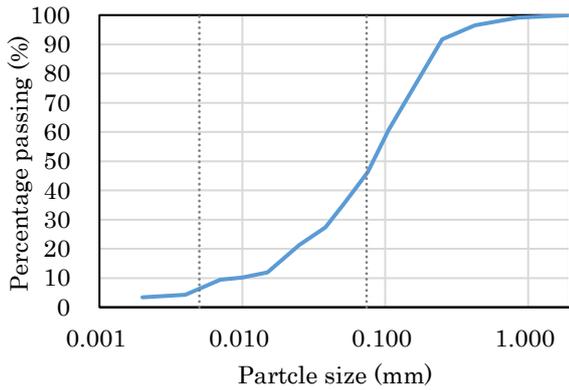


Fig. 5 Particle size distribution curve obtained with the conversion to sandy form of soft rock

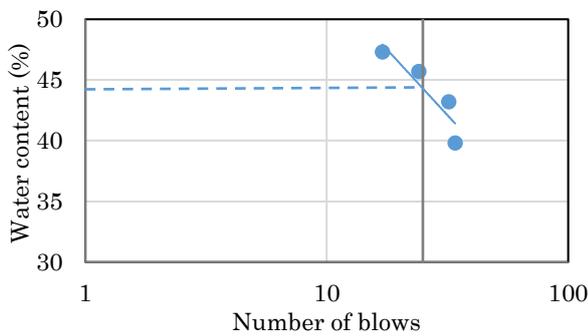


Fig. 6 Flow curve obtained with the conversion to sandy form of soft rock

め、粒度試験を行った結果を Fig.5 に示す。砂分が 54%、細粒分が 46%であった。したがって、この土を工学的に分類すると細粒分まじり砂である。なお、細粒分をシルト (5~75 μ m) と粘土 (5 μ m 未満) に分けて全質量中の割合を示すと、シルトが 40%、粘土が 6%であった。

また、コンシステンシー試験を行ったところ、液性限界 44.3%、塑性限界 31.0%であった。流動曲線を Fig.6 に示す。この結果をもとに塑性図上でこの土を分類すれば低圧縮性シルトに相当する。

3 軟岩表面のスレーキング深さを調べる実験

3・1 実験方法

前章の促進スレーキング試験において、試料とした軟岩は 4~5 回の乾湿繰り返しでスレーキング区分 4 に達した。これと同じ場所で採取した試料を対象として、1 回の乾湿繰り返しで表面がどの程度の厚さで細粒化するかを計測する。碓井川の河床低下を数値で推定するときの基礎資料になると考えたためである。

15cm \times 15cm \times 15cm 程度の大きさに切断した軟岩を 6 個用意して供試体とする、それぞれは平面上に置いた際にぐらつかないことを確認した。側面からの崩壊を防ぐため、水を通す上下面以外には溶かした蠟を 3,4 回重ねて刷毛で塗った。こうして準備した供試体をコンテナに入れ、コンテナ内に水を入れるかどうかによって供試

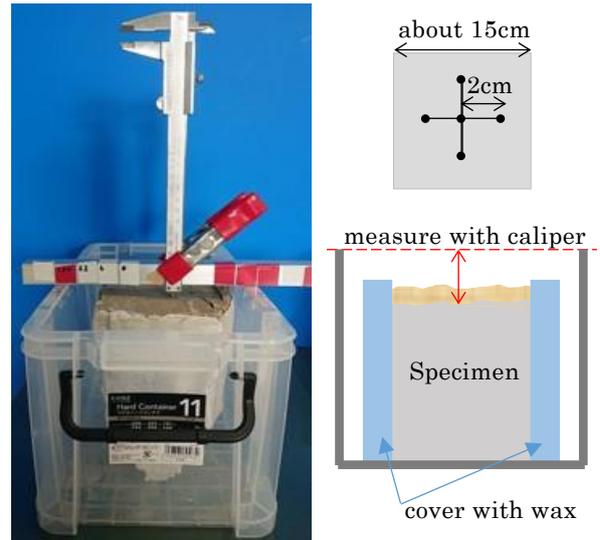


Fig. 7 Slaking depth measurement method

体の浸水・乾燥状態を設定する。なお、コンテナ内の水の出し入れは、後述する計測の直後に行う。

水浸させる際は、供試体上面を上まわるまでコンテナに静かに水を注入する。乾燥させる際は、排水ポンプを用い、これで排水しきれなかったコンテナ内の水はスポイトで残らず吸い取って、その後、自然乾燥させる。促進スレーキング試験のときは異なり、乾燥炉を使用せず、軟岩を浸した水をとるだけとして自然に乾燥させた。

計測方法を Fig.7 に示す。金属棒に固定したノギスのデプスバーを軟岩に押し当て、コンテナ上面からの距離を 0.05mm まで計測する。計測は、供試体上面に 2cm の間隔であらかじめ決めた 5 点において行う。コンテナ上面および金属棒につけた目印をつかって、図に示すように並んだ 5 点を特定した。

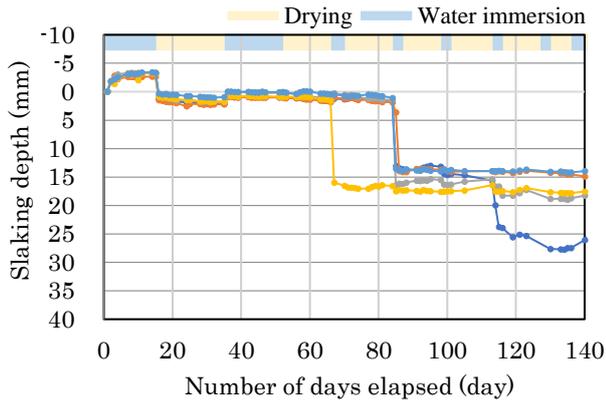
スレーキングによって軟岩表面が細粒化すると、細粒化している厚さの範囲でデプスバーを供試体に突き刺すことができる。デプスバーがこれ以上入らなくなるまで押し込んでから距離を計測した。初期の計測値との差により細粒化厚さをもとめる。これをスレーキング深さと称することとする。本研究では、スレーキング深さをを用いて、軟岩表面における細粒化している厚さを評価する。

なお、細粒化後の土粒子はそのまま供試体上に残った。河床において、軟岩の細粒化した部分は流されることもあろうが、急激な水の流れや流石等の衝突がなければ、そのまま軟岩表面にとどまるとも考えられる。細粒分が表面に残る場合を想定してスレーキング状況を調べる。

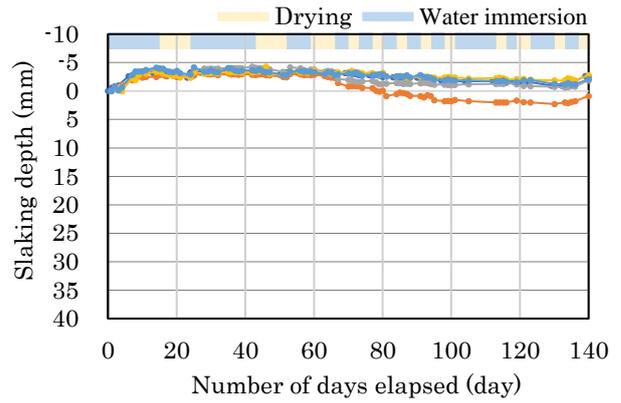
実験は、2 グループに分け、供試体 3 個ずつで行う。一方のグループでは、12 日間の自然乾燥期間を設ける。もう一方のグループでは自然乾燥期間を 3 日に設定し、供試体が十分乾燥する前にコンテナに水を入れる。ただし、日程の都合等で乾湿の切替日を変更する場合もある。

3・2 実験結果

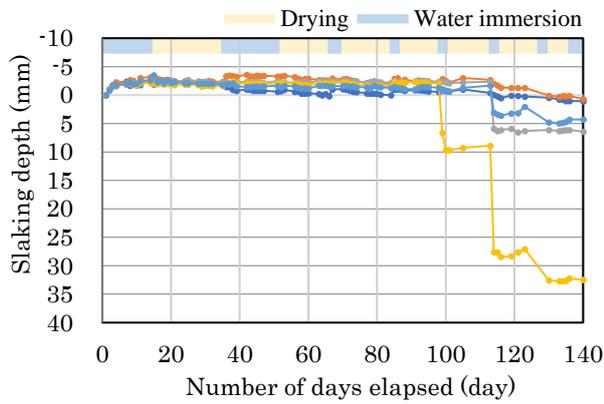
スレーキング深さを計測したこの実験においても、す



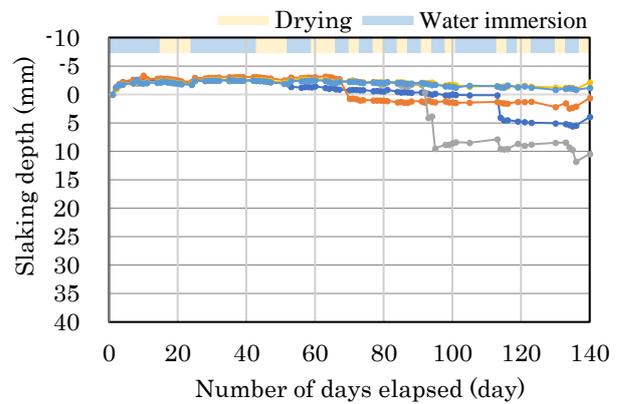
(a) Specimen 1



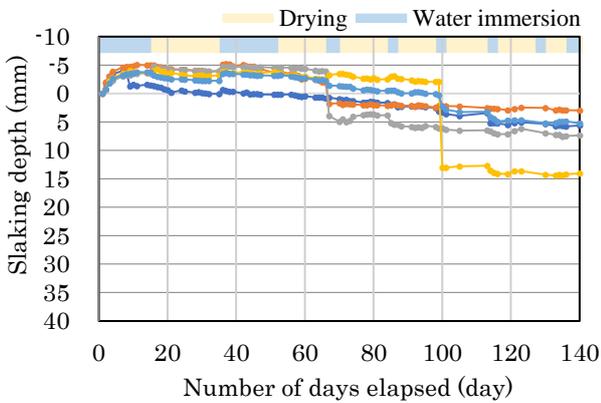
(a) Specimen 4



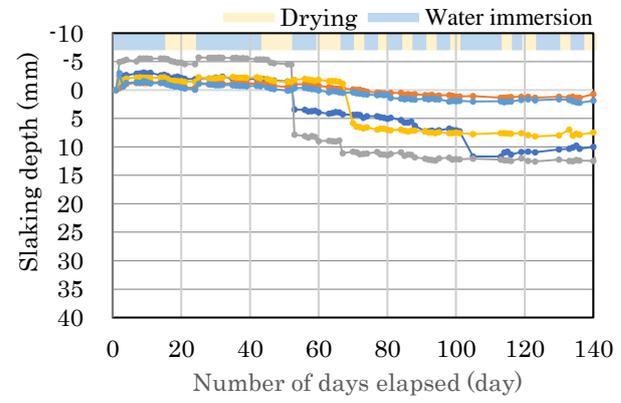
(b) Specimen 2



(b) Specimen 5



(c) Specimen 3



(c) Specimen 6

Fig. 8 Results of 12-day drying measurement

すべての供試体でスレーキングが発生した。経過日数とスレーキング深さとの関係を Fig.8 と Fig.9 に示す。140日間の計測結果である。5点で計測しているの、それぞれの図に5つの結果が描かれている。図中のプロットが計測値であり、プロット間を直線で結んでいる。

両図において、同一供試体内の5点で計測値が異なり、Fig.8 (b)では、最大値と最小値の間に経過日数113日以降に30mm程度の差が存在する。ばらつきはみられるものの、日数の経過とともにスレーキング深さが全体的に

Fig. 9 Results of 3-day drying measurement

増大している。供試体の上面の細粒化がその原因である。

計測結果を描いた Fig.8 と 9 の上部に示す色分けは、乾燥期間と水浸期間を表している。供試体は初期状態では乾燥しており、それを水深させたところから実験を始めている。すべての図で初期にスレーキング深さが負の値となっているのは、供試体が吸水膨張するためである。

12日間の自然乾燥期間を設けた実験結果を示す Fig.8 では、水浸期間が8回設けられている。スレーキング深さが急増するのは、供試体1の経過日数15日における

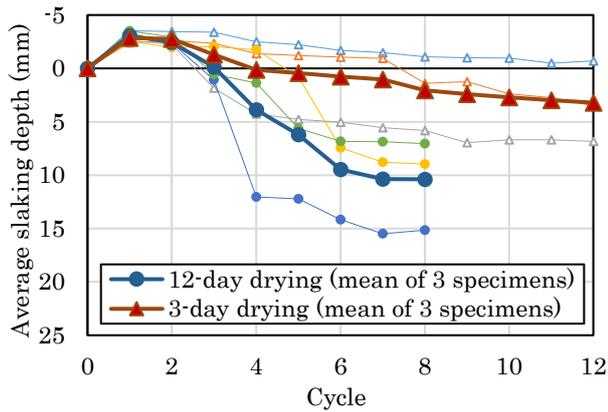


Fig. 10 Relationship between slaking depth and number of repetition

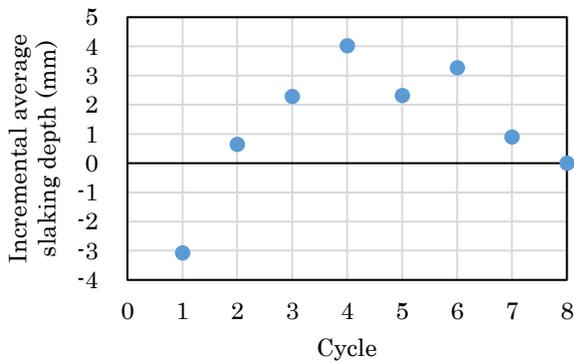


Fig. 11 Slaking depth produced by one dry/wet cycle

増大を除いてほとんどが水浸期間の初期である。この急増のために、供試体 1 と 2 ではスレーキング深さが 30mm 程度となる計測点がある。

一方、3 日間の自然乾燥期間を設けた実験結果を示す Fig.9 では、水浸期間が 12 回設けられている。スレーキング深さが急増するのは水浸期間であることが多いが、供試体 5 の経過日数 92 日に 1 点、113 日に 2 点で、乾燥期間中にもかかわらずスレーキング深さの急増がみられた。この現象は、乾燥期間中ではあっても水抜後 1~2 日なので、まだ供試体は湿っていて軟らかく、ノギスのデプスバーを突き刺したのがきっかけとなって結合が弱いところが崩れて生じたと考えられる。また、最も大きな変化を示した供試体 6 で供試体 3 と同等のスレーキング深さが得られているが、供試体 4 と 5 のほとんどの計測点でスレーキング深さが 5mm 以内であり、供試体 6 でも 2 点が 2.5mm 以内に収まり、Fig.8 に比べ小さい。

供試体を十分に乾燥させないときに細粒化する厚さが小さいことを明確化するため、乾湿の繰り返し回数を横軸にしてスレーキング深さの平均値の変化を調べた。その結果が Fig.10 である。スレーキング深さは、供試体ごとの 5 計測点の平均値をとって示す。図の中の太線は、グループごとの 3 供試体の値を平均した結果である。自

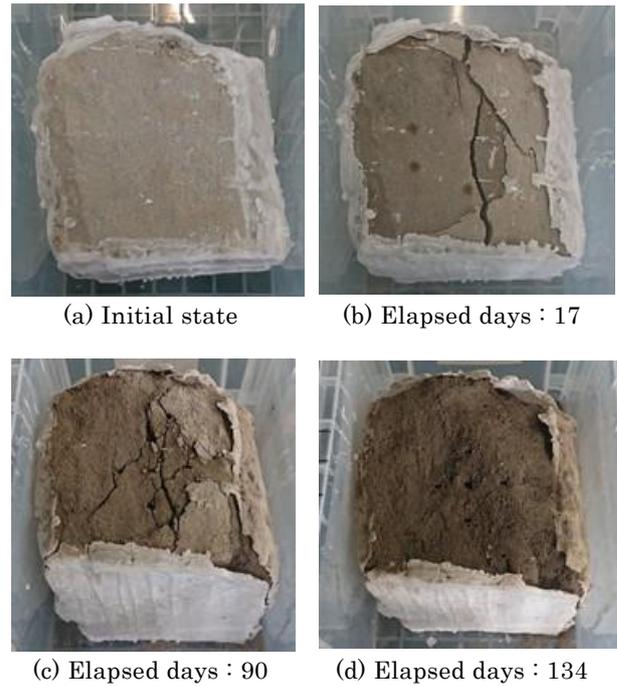


Fig. 12 Observation of surface changes (Specimen 1)

然乾燥の期間を 3 日とした実験では、供試体の乾燥が十分でないため細粒化の進行が遅くなるのを確認できる。

Fig.10 の太線の傾きに相当する変化の度合いを、前後 2 点間の増分値でとらえたのが Fig.11 である。12 日間の乾燥期間を設けた供試体のデータで算定している。同図より、乾湿 1 回ごとの細粒化厚さを数値で把握できる。前章の促進スレーキング試験でスレーキング区分 4 となった回数に対応する 4~5 回目の繰り返し時の値をグラフで読み取り平均すると、その厚さは 3mm 程度である。

ところで、Fig.10 をみると、乾湿の繰り返し回数が増加して平均スレーキング深さがある値以上になると細粒化が抑えられている。すなわち、12 日間の乾燥期間を設けた 3 供試体で、5 計測点の平均スレーキング深さの増え方が、繰返し数 4、5 あるいは 6 回目以降に小さい。この理由は、細粒化の後に供試体表面に残った粒子がスレーキングを抑制するためではないかと考えている。

供試体 1 の表面変化を Fig.12 に示す。1 回目の水浸で (b) のように割れ目ができ、4 回目の水浸では (c) のように全体に割れ目が多数できる。ところが、7 回目の水浸後の状態を示す (d) では、割れ目がふさがっている。細粒化した土粒子が表面に存在することによりスレーキングが生じにくくなる可能性がある。

4 おわりに

本研究では、碓井川で採取した軟岩供試体を対象として、水浸・乾燥を繰り返したときの高さ変化を計測し、スレーキングによる細粒化の発生状況を調べた。細粒化後の試料を集めて土の工学的分類をしたところ、この軟岩は細粒分まじり砂からできていることがわかった。

水浸・乾燥の繰り返しによって発生する細粒化の厚さを、軟岩表面にノギスのデプスバーを押し当てることによって計測し、スレーキング深さと称して結果を示した。1回の乾湿繰り返しで細粒化する厚さは3mm程度であること、乾燥期間を3日に設定した供試体において乾燥が不十分なために細粒化厚さが減少することを把握した。また、細粒化後に供試体表面に残った土粒子はスレーキングを抑制するのではないかと推察される計測結果が得られた。

謝辞

本研究で用いた試料は、群馬県県土整備部安中土木事務所に提供いただいた。また、細粒化厚さを調べる実験は、パシフィックコンサルタンツ株式会社の浜口憲一郎氏、吉武央気氏が提案された方法を参考にそれを簡略化して行ったものである。以上記してここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 地盤工学会，“地盤材料試験の方法と解説—二分冊の1—”
地盤調査法改訂編集委員会編(2009)，丸善，pp. 287-296.
- 2) 岩生周一編，“粘土の事典”(1985)，朝倉書店，p.195.