

乾燥・湿潤履歴が粘着性土の浸食速度に 及ぼす影響に関する研究

EFFECT OF DRY-WET HISTORY ON THE EROSION RATE OF COHESIVE SEDIMENT

関根正人¹・西森研一郎²・安藤史紘²

Masato SEKINE, Ken-ichiro NISHIMORI and Fumihiko ANDO

¹ 正会員 工博 早稲田大学理工学部社会環境工学科 (〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

² 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

The effect of dry-wet history on the erosion process of cohesive sediment was investigated experimentally in the present study. Detailed discussion on the mechanism of this process was conducted here on the basis of enormous number of experimental data. In this experiment, the test sample keeps under dry or wet conditions every 6 hours, and erosion test was conducted just after each period. It was found that this process can be classified into two parts in their mechanisms according to the total period of this history. The erosion rate of test sample which experienced this history more than one day keeps almost constant value which agrees well with the predicted value of the erosion rate formula.

Key words : cohesive sediment, dry-wet history, erosion rate, compaction.

1. はじめに

粘着性土の浸食過程には、未解明の部分が極めて多く残され、工学的に必要とされる浸食速度の予測に関しても必ずしも十分な成果が挙げられているとは言いがたい。こうした状況に鑑みて、著者らは、水と粘土ならびに砂を一定の比率で練り混ぜた「均質な粘着性土」を対象とした一連の実験的研究を進めてきており、その浸食進行過程の理解と浸食速度式の誘導とを目指してきた。このうちの主要な成果については前論文¹⁾にまとめられている。ただし、このような均質な粘着性土を対象とした一連の研究の成果がどの程度の普遍性をもつかについては、今後の検討を待たなければならない。しかし、これまで以上に現象の理解が深まり、今後の更なる研究を進めていく上での道筋をつけることはできたのではないかと考えている。

著者らの一連の研究が目指すところは、実はさらに先にあり、実河川に自然堆積した粘着性土の浸食速度を実用的に十分な精度をもって予測可能とすることにある。このような観点からすると、これまでの成果はあくまでもその第一歩に過ぎず、たとえば

以下に示すような更なる検討が必要となる。すなわち、これまでのいわば理想的な均質状態にある粘着性土から実河川に実際に堆積しているものへとその対象を移していくことが必要となる。本研究では、その手始めとして「乾燥・湿潤の履歴」を受けた不均質な粘着性土を対象とすることにし、この履歴が粘着性土の浸食過程ならびに浸食速度に与える影響を系統的に調べることにした。ここで念頭においているのは、河川感潮域や干潟などに堆積した粘着性土であり、潮の干満の影響によって海面が12時間周期で上下動を繰り返すことから、そこに堆積した粘着性土は水に浸る湿潤期間と大気に曝される乾燥期間とを交互にしかも周期的に経験することになる。本論文では、まず第一にこのような履歴効果について論じる。

粘着性土の浸食を特徴づけるパラメータは浸食速度であることは言うまでもないが、著者はこのような定量的な議論と平衡して、粘着性土が浸食を受ける素過程についても注目し、そのメカニズムを明らかにすることにも努めてきている。これまでの検討により、粘着性土が浸食を受ける際には、その表面に波状の凹凸が生じ、これが下流方向に移動して

いくことがわかってきた¹⁾。本論文では、ここで注目した「乾燥・湿潤の履歴」がこの浸食のプロセスに及ぼす影響についても論じている。特に、ここではこの浸食の形態を三つに区分し、その発生要因を供試体の表面状態と関連づけて説明することを試みる。

2. 乾燥・湿潤履歴の影響評価

(1) 供試体の準備と乾燥湿潤履歴の与え方

本研究では、これまでの研究と同様にカオリンを供試体材料として用いる。その粒度分布は図-1に示す通りである。供試体に「乾燥・湿潤の履歴」を与えることを除けば、基本的な供試体の準備の仕方はこれまでのものと同一であり、均質な粘土とすることができる。すなわち、あらかじめ所定の含水比（著者らはこれまで粘土に対する水の重さの比を表す値として水含有率を定義してきたが、粘土含有率100%の場合にはこれは含水比と一致する）になるように用意された粘土と水を、機械的に攪拌し均質に練り混ぜたものを用意し、これを縦10cm×横70cm×深さ5cm、壁厚5mm（実質容積は縦9cm×横69cm×深さ4.5cm）の亚克力製の容器に流し込んで整形したものを用いる。ここでは実験装置の関係から、ある時間にわたって浸食を受けた供試体をそのまま用いて、その後の浸食過程を調べることができない。そのため、同一の条件下で複数の供試体を作成した後、その各々を6時間毎の同じサイクルで湿潤・乾燥の状態におくこととし、6時間毎の区切りの時間においてひとつずつ順に取り出し、実験に供するものとした。ひとつひとつの供試体は基本的には同質であるが、その作成あるいは湿潤・乾燥過程において全く同一とは言えないため、結果にばらつきが現れる恐れがある。なお、この6時間という時間は、実際の潮汐が12時間周期であることを考慮し、そのサイクルに合わせるように設定したものである。

湿潤と乾燥の履歴は次のようにして与えることにした。まず、湿潤過程は、これまで通り静水中に静置することとした。また、乾燥過程については以下の通りとした。本論文で報告する検討は、主として夏場に行われたものであり、室温を25℃に保ちつつ自然乾燥させ、圧密により表面に浮き出てきた間隙水については適宜除去することにした。このように、供試体表面が常に大気に接する状態を保ちつつ乾燥させており、熱を加えるなどして強制的に乾燥を促進させるようなことはしなかった。浸食実験は、これまでの室内実験装置を用いており、その詳細については別論文を参照されたい¹⁾。また、ここでは、

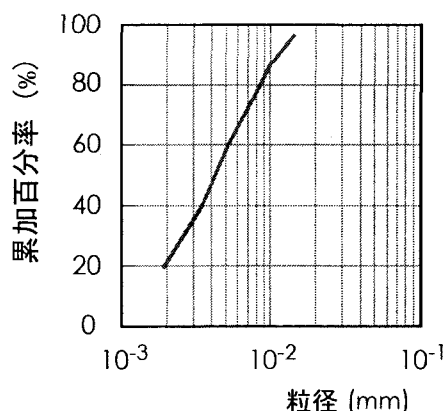


図-1 粘着性土として用いたカオリンの粒度分布

この履歴による含水比の時間変化についても調べることとし、含水比測定用の供試体を別途容器に作成し、浸食実験のための供試体と同じ履歴を与えた後にその含水比ならびに圧密度を測定した。この測定に当たっても複数の供試体を用意し、浸食実験と同様のやり方をとることとした。

(2) 含水比試験

含水比測定は、直径5cm、深さ3.5cmの容器に満たされたサンプルを用意し、その容器内の全ての粘土を対象として行なわれた。供試体作成時の含水比は、これまでの検討と同一の80%とした。また、ここでは、前述の通り「6時間にわたる湿潤」と「6時間にわたる乾燥」を交互に与えることにし、最大4日間までこの履歴を繰り返すことにした。

その結果について以下考察を加えていく。図-2には、湿潤・乾燥に伴う含水比の時間変化を示した。図の見方は以下の通りである。まず、図中の●印、▲印ならびに◆印は、6時間毎に湿潤・乾燥を与えられた供試体の含水比の計測値を示しており、順に最大4日間、2日間ならびに1日間にわたって行われた一連の実験の結果を表している。なお、同一時刻におけるこの3つの記号は、厳密には一致するはずであるがそうなるではない。これは、データのばらつきによるものであり、この程度の誤差が生じることを意味する。また、図の横軸には太線が付されている期間と付されていない期間とがあるが、これが各々湿潤あるいは乾燥の過程を表す。以上の表記法は後掲する図-3、図-4においても適用されている。また、図-2には、乾燥のみあるいは湿潤のみ3日間連続して与えた場合の結果を、あくまでも参考までに併記してある。

図-2より、乾燥・湿潤履歴を与えた場合には、経過時間1日程度までは含水比が急速に低下することがわかる。また、同一時刻で比較するとそのばらつき

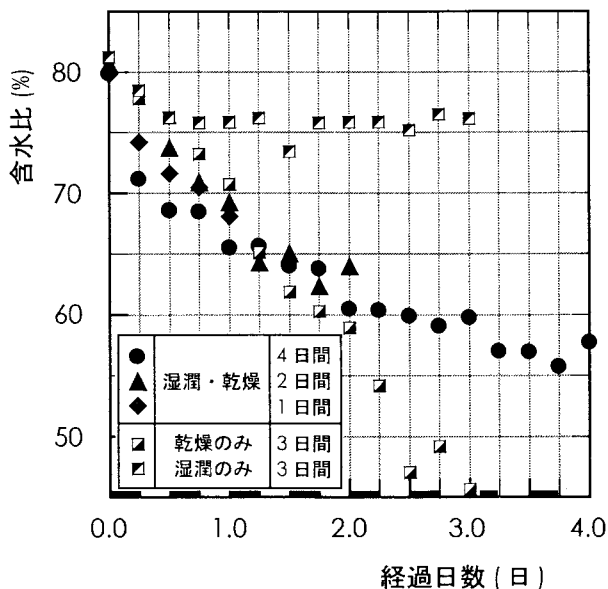


図-2 含水比の時間変化：

図の横軸上に太線を付した期間では湿潤状態、付していない期間では乾燥状態とすることで、乾燥・湿潤履歴を繰り返して与えてある。図中には、乾燥のみあるいは湿潤のみとした実験結果も参考までに併記してある。

きが大きいこともわかる。これに対して、1日以上の日数を経過すると、含水比の低下は緩やかになり、ばらつきも小さくなる。これは、湿潤・乾燥状態におかれた日数が1日に到るまでは、その履歴の影響が急激に及ぶものの、供試体全体にわたって一様に進行していくわけではないことを意味する。一方、繰り返し日数が1日程度になると、含水状態のばらつきがならされ、時間的にも場所的にも大きく変化しなくなるものと考えられる。さらに日数が経過すると、含水比は一定の値に収束する傾向にあり、カオリンの場合にはその値が55～60%程度に落ち着くようである。このことは、数日からそれ以上の日数にわたって乾燥・湿潤履歴を受けた粘土材料の浸食を考える上では、含水比（水含有率）はもはや変数とはならず、浸食速度が摩擦速度のみの関数として評価できることを示唆している。これについては後述する。なお、参考までに、湿潤履歴のみを与えた場合の含水比は75%程度に落ち着き、しかも乾燥・湿潤を交互に与えた場合より早くその収束値に達する。この含水比の収束値については、粘土毎に異なる固有のものと考えられることができるが、その意味するところは未だ明らかではない。

(3) 圧密現象と沈下量測定

このような履歴を与える場合には、乾燥と同時に供試体の圧密が進行することになる。そこで、ここでは、供試体表面の沈下量の計測と状態の観察を

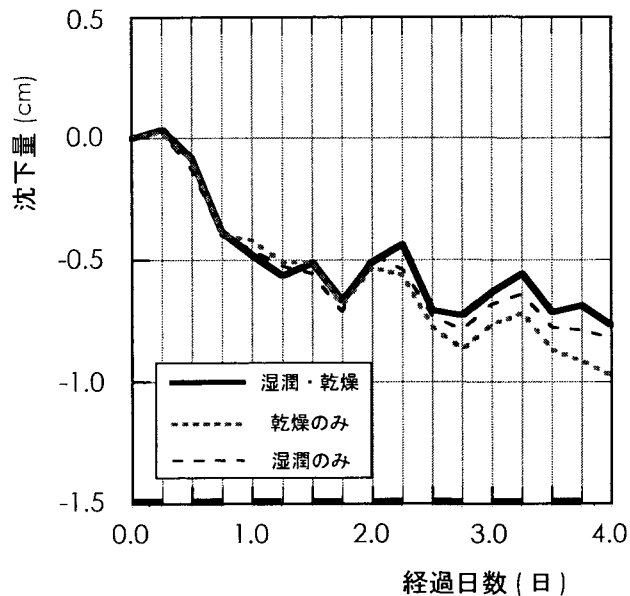


図-3 供試体表面の沈下量の時間変化

行った。図-3には沈下量の時間変化を示した。図中には、湿潤ならびに乾燥を6時間毎に4日間繰り返した場合の結果を実線で示してある。図中には、参考までに、乾燥のみあるいは湿潤のみ与えた結果も併記してある。この図より、経過日数が1日程度までは単調に沈下するが、それ以降は大きくうねりながら変動を繰り返し、やがて一定値に漸近するように見える。

含水比と沈下量の時間変化を相互に見比べながら、供試体の乾燥と圧密の進行の仕方について検討したところ、次のようなことが理解された。まず、1日までの変化に関しては、表面に水が浮き上るような現象が進んでいくことが観察された。これは、粘土自体に作用する重力の影響により沈下することで、供試体作成時の余分な水分が間隙水として表面に排出されたことを表し、乾燥よりも圧密の影響が顕著であると判断される。一方、1日から2日位の日数にかけては、供試体表面に浮上する水が少量になり、2日を過ぎると水の浮き上がりは確認されなかった。この過程における変化は、粘土粒子同士を結びつける吸着水の蒸発により水分量が低下することで生じ、粘着性土が収縮することにより沈下が生じたものと解釈される。

以上のように、湿潤と乾燥の履歴を受け始めてから間もない（ここでは1日未満の）供試体の場合には、その履歴を受ける際に圧密の影響を顕著に受けるものと推察される。そして、上記の履歴効果に圧

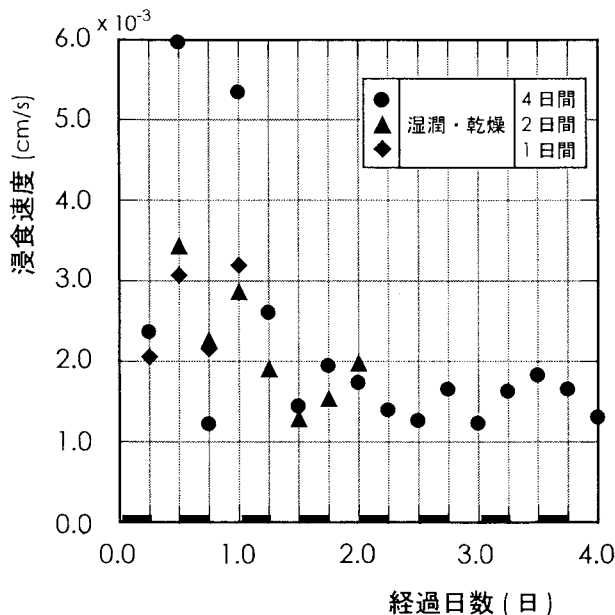


図-4 通水 10 分における浸食速度の時間変化

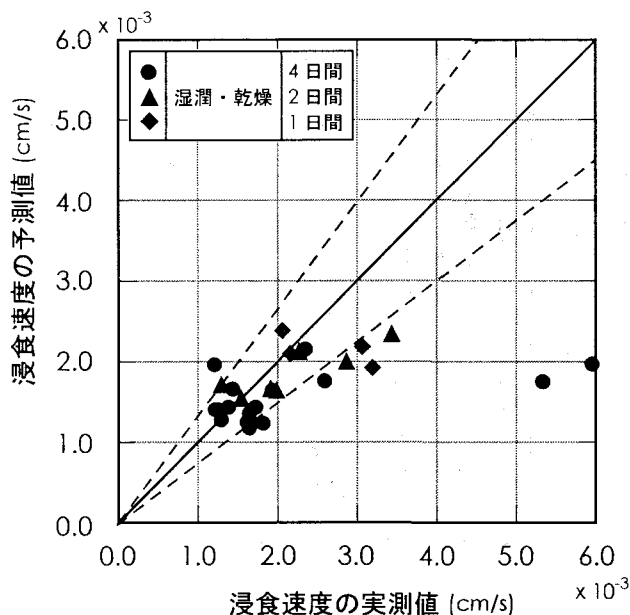


図-5 浸食速度の実測値と予測値の比較

密の影響をあわせて受けることで、供試体内部の間隙水の表面への浮上が促進され、水の蒸発と毛細管現象による水移動、さらには、湿潤過程における水圧による圧密と供試体内部への吸水、などが同時並行的に生じる。そのため、供試体表面に存在する粘土粒子をめぐる水の動きは活発であり、結果として粘土粒子間の十分な粘着力の発現が妨げられるものと推察される。この期間における浸食速度が大きくばらつくことになるのはそのためであるが、これについては次節で説明する。一方、作成されてから 1 日程度の履歴を受けた供試体の場合には、沈下量はある幅でばらつきを見せるものの、圧密はほぼ収束しつつあると判断される。

なお、参考までに図-3 の 2～4 日の期間に注目すると、乾燥・湿潤履歴を受けた供試体の沈下量の方が他の二つの履歴を受けたものより小さくなっていることがわかる。これは次のように説明される。まず、乾燥のみ与えた場合との比較から、湿潤過程を経ることで内部に水分を回復する分だけ沈下が抑えられる。また、湿潤のみ与えた場合には、長時間一定の水圧下に置かれるため、わずかながらでも圧密を受けることになる。この場合の沈下量が大きくなる原因はこの点にあると考える。

(4) 通水浸食実験

次に、浸食実験の結果について説明する。すべての実験は、流速 80cm/s (摩擦速度 u_* は 7.59cm/s)、平均水温 25℃ の条件下で行われた。図-4 には、このような繰り返し履歴を与えた経過日数と浸食速度

との関係を示した。この図より、経過日数 1 日までの供試体に関しては、浸食速度のばらつきが大きいことがわかる。とりわけ、乾燥直後の値を表す 0.5 日後と 1 日後の結果については、相対的に大きな値となっている。これは、供試体の状態が一様になっておらず、弱点となる箇所が形成されるためではないかと考えられる。これに対して、経過日数が 1 日以上供試体に関しては、浸食速度は時間および直前の履歴によらずほぼ一定の値となることがわかる。これは、1 日程度経過した供試体の場合には、履歴を受け始めた当初の供試体に比べて供試体内の水分状態の一樣化が進み、全般的に高い粘着力が発揮されるようになったことを意味する。

また、後述する浸食形態について簡単にふれておくと、経過日数 1 日未満の乾燥直後の供試体の場合には、著者らが前報²⁾で報告した「大規模な破壊浸食」がさらに顕著な形で発生していることが多く見られた。図-4 において浸食速度が 3.0×10^{-3} cm/s 以上となった場合のほとんどはこの浸食パターンであると考えてよい。これは、前述の通り、供試体表面が自重により沈下する際に間隙水の浮上が生じ、その折に供試体表面に微小な水の通り道が形成されたことにより、その後の供試体表面における粘土粒子間の粘着力の低下を誘起したためと考えられる。

次に、浸食速度そのものについて、著者らがこれまでに導いた浸食速度の予測式

$$E_s = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} \cdot u_*^3 \quad (1)$$

との比較を試みる。本研究により得られた実測値と式 (1) との比較結果を図-5 に示す。ここに、式中の

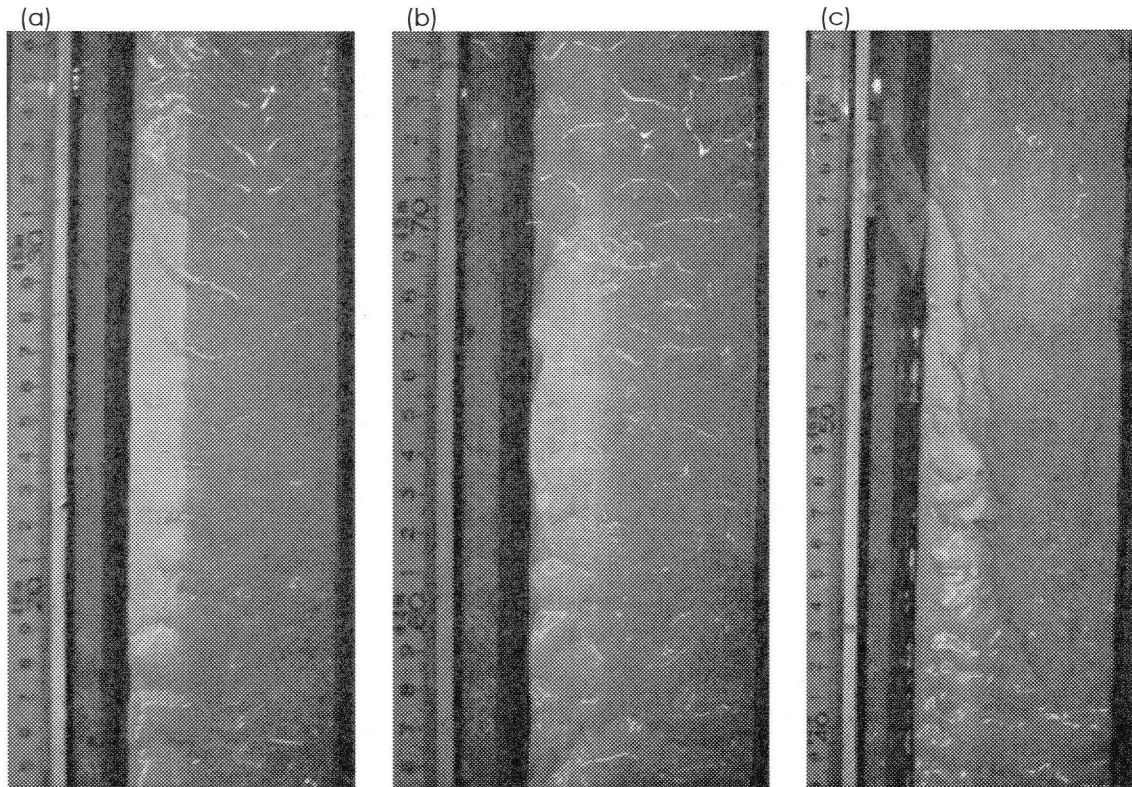


写真-1 浸食形態；(a) 弓状の波，(b) スタンダードな魚鱗状の波，(c) 大規模な破壊浸食

α は $1.15 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})^2$ ， R_{wc} は水含有率であり，本実験の場合には含水比に等しい．図中の太線は適合度が100%であることを示し，破線は誤差が $\pm 25\%$ であることを示している．この図より，経過日数1日未満の場合により顕著な形で生じた大規模な破壊浸食に対応する2つのデータを除けば，実測値と予測値との適合度は概ね良好であり，従来の均質な粘土のものと同等であると判断される．とりわけ，経過日数1日以上データのに関しては，含水比も大きく変化しないため，式(1)との適合度は高い．このことより，実河川に堆積した粘土の場合には，ある程度の日数以上乾燥・湿潤履歴を受けると，浸食速度を支配するパラメータのひとつである水含有率が一定値に収束するため，浸食速度自体が一定値に向かって漸近すること，また，その値についても式(1)によって評価可能であること，などが理解された．

3. 浸食形態

ここでは，前論文^{1),2)}において報告した粘着性土の浸食の素過程ならびに浸食形態について，改めて考察を加える．なお，前論文では，供試体表面に波状の模様が浮かび上がることや，大規模な破壊浸食が生じる可能性があることなどを報告している．その後の検討を通じて，このような浸食形態がどのよ

うな場合に生じるかについて論じる．まず，浸食後の供試体表面の写真などから，浸食形態を大きく次の3通りに分類する．すなわち，浸食量の小さなものから順に，

(a) 弓状の波が形成される浸食 (写真-1 (a))

(b) 魚鱗状の波が形成される浸食 (写真-1 (b))

(c) 大規模な破壊を伴う浸食 (写真-1 (c))

である．これらについて具体的に説明すると，以下のようになる．すなわち，

(a)は横断方向に弓状の波を形成しつつ生じる浸食であり，掃流力に比べて粘着性土の表面抵抗力が大きい場合に生じる．波の振幅は2mm程度と比較的小さく，この際に生じる浸食は粘土表面からの煙状浸食と判断される．この場合の波は，二次元的で横断方向に一様となるのが特徴的である．

(b)は魚鱗状の波を形成しつつ生じる浸食を表し，著者らがこれまでに最も多く確認してきた浸食形態である．その振幅は5～7mm程度であり，煙状の浸食に加えて，大きさが数mm程度の粘土塊が剥離浸食が並行して生じる．浸食後の供試体表面にはスプーンでえぐり取られたような跡が全面にわたって残され，極めて三次元性が強い．

(c)は大規模な陥没を伴う破壊浸食を指し，供試体内の水分状態が不均一となり，浸食を受けやすい弱点箇所が現れるような場合に生じるものと推察され

る。表面の一部が大きさ1～2cmの粘土塊として剥ぎ取られ、そこに流水が集中することで新たな浸食の起点となり、下流方向に亀裂が伝播していくように破壊が生じる。結果として、流水の向きと平行に深さ2cm程度、長さ20cm程度の規模にわたってえぐりとられるように浸食することもある。本論文で説明してきた乾燥・湿潤履歴が1日に満たない供試体の場合に、この形式の浸食が生じることが確認されている。

4. おわりに

本研究では、粘着性土の浸食に及ぼす乾燥・湿潤履歴の影響について検討した。本研究により得られた主な成果は以下の通りである。(1)粘着性土に乾燥・湿潤の履歴を与えると、圧密による含水比の低下と、この履歴による水分量の変化とが同時並行的に進む。しかし、このプロセスは最初の1日ほどで完了し、その後は一様な耐浸食性を発揮する。(2)この最初1日ほどは圧密が卓越する変化を起し、供試体表面の沈下により急激に水分量が低下し、それに伴い供試体内部の水分量の不均一さと表面における不安定さゆえにその浸食速度が大きくばらつくことが理解された。(3)一方、1日以上にわたって乾燥・湿潤を経験した粘着性土の場合には、含水比の低下も止み、沈下も生じなくなることもあって、浸食速度は一定値に漸近する。この値は、先の浸食速度式によく適合することも確認された。

この結果を基に以下のような推論を組み立てる。すなわち、ダム貯水池や河川感潮域あるいは沿岸域に自然堆積した粘着性土を、水流の作用によって浸食させようとするならば、乾燥・湿潤という攪乱の

影響が顕著に残った堆積後の早い時期にそれを試みる事が望ましく、もしある日数にわたって乾燥・湿潤が進めば、粘着性土自体が均質で十分な粘着力を発揮するものへと変化するため、相対的には浸食を引き起こし難くなるのではないかと考えられる。

今後は、ここで与えた履歴を経ることで到達した供試体の含水比の収束値の持つ意味に注目して、現象の理解を深めていきたいと考えている。すなわち、ある程度の日数を経過した粘着性土について考える場合には、これまで著者がパラメータとして変化させつつ検討してきたほどにはその含水比(あるいは水含有率)が変化することはなく、カオリンやベントナイトといった粘土鉱物毎にほぼ一定の値をとるものと予想される。この点についてさらに検討していく予定である。また、ここで対象とした粘着性土の物性と実際に自然堆積しているものとの違いについても明らかにしていく必要がある。

謝辞:本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究C(研究代表者:関根正人, No.14550516)の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 関根正人, 西森研一郎, 藤尾健太, 片桐康博: 粘着性土の浸食進行過程と浸食速度予測式に関する考察, 水工学論文集, 第47巻, pp.541-546, 2003.
- 2) 関根正人, 西森研一郎, 安藤史紘: 粘着性土の浸食過程とそれに与える乾燥湿潤履歴の影響, 水工学論文集, 第48巻, pp.937-942, 2004.

(2004.9.30 受付)