

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

EROSION PROCESS OF COHESIVE SEDIMENT AND THE EFFECT OF DRY-WET HISTORY

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 早稲田大学教授 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)

Erosion process of soft cohesive material was investigated experimentally in the present paper. Detailed discussion on the mechanism of this process was conducted here on the basis of enormous number of experimental data. It was found that the sediment waves form on the surface of clay sample, and they migrate downstream. And the erosion process of this sample is closely correlated with this wave propagation. Another investigation was started here to reveal the effect of dry-wet history on the erosion rate. Interesting feature of the dried clay samples were obvious that the erosion rate does not affect considerably by the period of such a dry history. This means that the erosion rate formula derived in the previous work by the authors can be effective approximately to the dried clay samples.

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

1. はじめに

粘着性土の浸食過程は、これまでのいくつかの研究にもかかわらず未解明な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。こうした現状を鑑みて、著者らは、研究の第一段階として、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研究を行い、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。その成果は、前論文¹⁾までに報告した通りである。本研究では、次の二点に焦点を絞り、その詳細を明らかにすることを目的とする。まず第一に、粘着性土の浸食の際にその表面に生じる「波」の存在^{1), 2)}についてさらに詳細に論じるとともに、この波の生成・発達との関係で浸食のメカニズムに迫る。第二に、研究の対象となる粘着性土を均質なものから「乾燥・湿潤の履歴」を受けたものへと発展さ

せ、この履歴がその浸食過程ならびに浸食速度に及ぼす影響について明らかにする。

2. 粘着性土の浸食過程のシナリオ

本章では、これまでの一連の実験結果を基に、粘着性土の浸食進行過程の本質に迫ることを目指す。ここでは、水含有率80%、粘土含有率100%のTAカオリンからなる供試体を対象とし、前報¹⁾までと同様に水中で一昼夜静置した後の粘着性土の浸食過程について考える。なお、以下に示す図および写真は摩擦速度が7.59cm/sの場合に得られたものであり、ここでの議論は主としてこれらを参照しながら進めていく。それでは、浸食の素過程ならびにメカニズムについての説明に入ることにしよう。

まず最初に、このプロセスの初期段階に注目する。粘着性土を水中で一昼夜静置している際には、供試体と水との境界面における微量の粘土粒

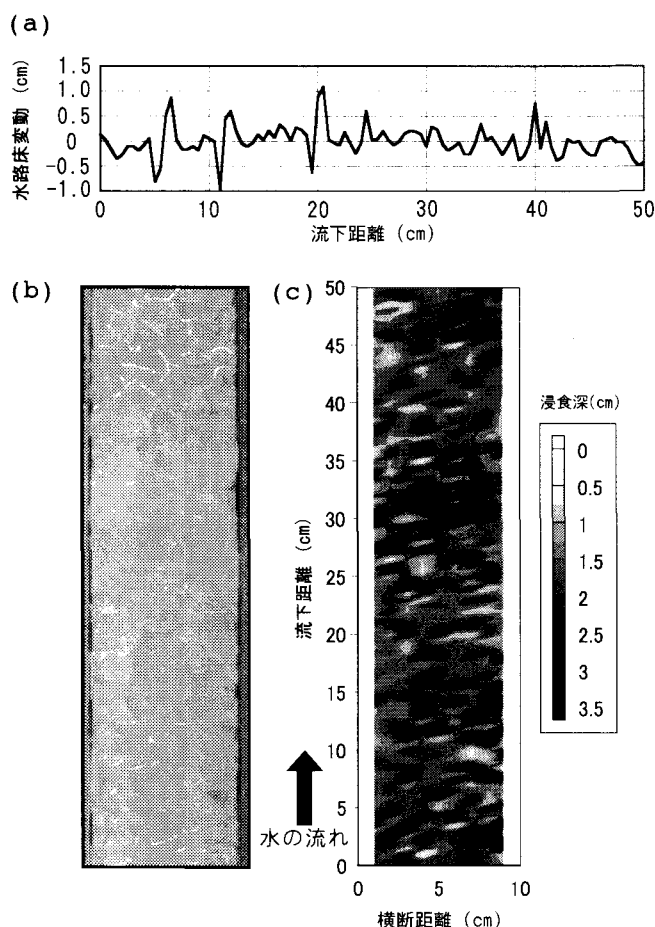


図-1 浸食を受けた供試体表面の状態：
 (a) 水路中心軸上の縦断面図
 (b) 供試体表面写真，(c) 供試体高さの等値線図

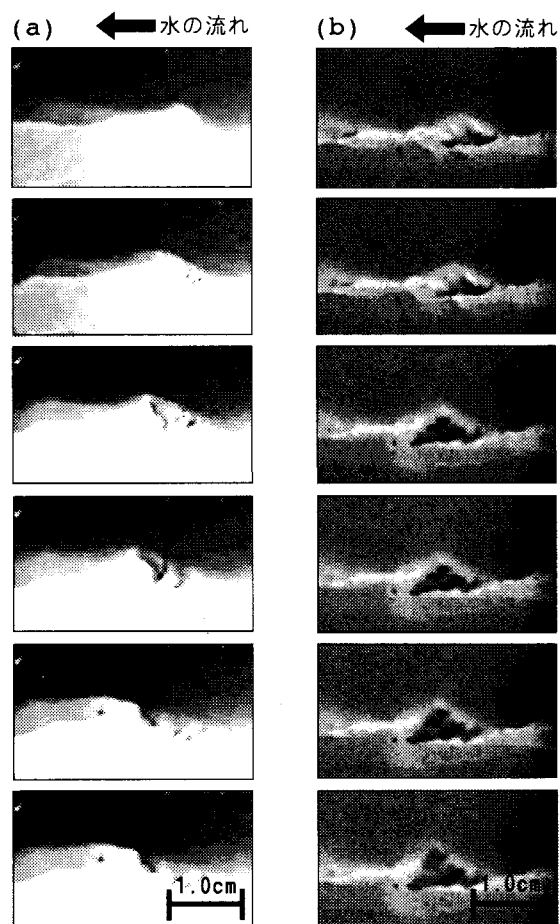


写真-1 供試体の浸食の素過程：
 (a) 波の頭が浸食される様子，(b) 塊状に剥離していく様子

子の溶け出しと水の供試体内部への進入とが生じ、この状況下で力学的な平衡を保っているものと考えられる。そして、通水を開始すると、その直後に供試体表面に浮いていた粘土粒子が流れによって運び去られ、表面には粘土粒子径かあるいはその何倍程度かのスケールの凹凸が形成される。そこで、通水初期の粘土粒子の水中への溶け出しは必ずしも供試体全面にわたって均一に進むわけではなく、これがその後の浸食にとっての供試体表面の「初期擾乱」を生み出す原因である。

流水による浸食が生じている最中の粘土粒子は、著者らのこれまでの説明の通り、「溶出」と「塊状の剥離浸食」の形式をとる。このうち溶出に関しては、表面の粘土粒子が単体で溶け出す場合と、ある程度の粒子が一团となって溶け出す場合とに分けて考えるべきであろう。このうち、前述の静置時間中の「溶け出し」や顕著な浸食を伴わずに生じる低流速下での浸食は、前者

の「単体での溶出」に当たり、「煙状の溶出」といった規模のものとは区別する。一方、「塊状の剥離浸食」に関しては、周辺の粒子同士が一体となって粘着力を発揮するため、浸食が起こるとすればその塊の弱点箇所に亀裂が入るなどして破壊に到るものと判断される。著者らの一連の検討の範囲内では、供試体は飽和状態にあるため、水含有率が大きくなると、粘土粒子間に十分過ぎるほどの水が存在するため、粘着力が低下する。このような場合、供試体は水流の作用に対して塊をなして抵抗できるほどの粘着力を発現できず、結果的に溶出が引き起こされる傾向にある。なお、この粘着力の低下は、前報の引張試験の結果によって裏付けられている。

以上の素過程に関する考察を踏まえて、浸食が進行していくプロセスについて考える。通水後しばらくは、初期擾乱の影響を受けた溶出形式の浸食が卓越し、微視的な凹凸が徐々に発達を遂げ、波状形状を呈する状態へと成長していく。さら

に、時間が経過すると、ある程度の大きさに成長した波には抗力・揚力といった組織的な流体力が作用するようになる。そして、これが粘土粒子塊として発揮できる粘着力を越えるようになると、これまで溶出することなく抵抗してきた供試体表面の弱点箇所にも亀裂が入り、ついには「塊状の剥離浸食」が生じるようになる。この間、供試体表面の波は下流方向に伝播していき、間断なく発生する「煙状の溶出」と間欠的に生じる「剥離浸食」とが同時進行し、これに伴い波の変形も進んでいくことになる。

次に、実測結果を基に、ある程度の規模にまで成長した波がどのように浸食されるかについて説明する。図-1(a)は、前掲の条件下で行った実験の際に、供試体表面の高さの縦断分布をレーザ式変位センサーを用いて計測した結果である。この図より、波長1.5cm程度、波高数mmの波が規則的に形成されていることがわかる。図-1(b)は供試体表面を上空から撮影した写真で、図-1(c)は供試体表面全域を変位センサーを用いて計測した結果を表面高さの等値線図としてまとめた結果を、それぞれ表している。このような一連の画像データからも波の存在が確認できるほか、この波全体が徐々に下流方向に移動する様子も理解された。なお、この進行速度は結果として平均浸食速度程度であった。また、写真-1は供試体の浸食の素過程を説明するために撮影された連続写真である。たとえば、写真-1(b)を見ると、形成された波は、その風上側において顕著な流体力を受け、これが粘着力をはるかに越えるようになると亀裂を生じ易くなり、その地点から引きちぎられるように浸食されることがわかる。これが「塊状の剥離浸食」である。一方、このような浸食が生じないときには、写真-1(a)のように、波頭付近で次第に下流側に倒れ込むような変形を遂げ、その頂部からは煙状の溶出が発生している。

ここで対象とする粘着性土の浸食は、概ね以上のような素過程を経て進行する。そして、流速が相対的に大きい場合や、水含有率が高い条件下では、この一連のプロセスが頻繁に繰り返されることになり、その結果としてその浸食速度が増大するものと推察される。

なお、参考までに付言すれば、このような波は供試体表面の至る所から発生することを確認しており、これらが供試体設置区間の上下流側の固定床部分の影響を受けて生成されたわけではない。

3. 乾燥湿潤履歴の影響評価

本研究では、著者らのこれまでの浸食実験(以下こ

れを「スタンダード試験」と呼ぶ)において用いてきた「均一に練り混ぜた粘着性土」を、これまで通り水路に設置した後1日～4日の期間にわたって自然乾燥させたものを供試体として新たな検討を行った。ここでの乾燥方法は以下の通りである。大気に曝された状態の供試体は乾燥と同時にゆるやかな圧密を受けるため、水が表面に浮き出てくる。そこで、この水を除去しつつ乾燥を進めることとし、熱を与えて乾燥を促進するようなことはしない。ここでの検討は、主として、供試体の乾燥状況を調べる「含水比試験」と、この供試体を一昼夜水中に静置した後に行う「浸食実験」である。

まず最初に、乾燥の進行に伴う水含有率(ここでは粘土含有率100%の供試体を対象とするため、この値は「含水比」と同値である)の変化について見ていくことにしよう。図-2には、供試体内の水含有率のばらつき状況をコンター図として示した。この水含有率の測定は、12 cm × 50 cmの供試体のうち中央部の10 cm × 40 cmを対象として行われ、この区域を24区画に分け、その各々について厚さ2 cm程度のサンプルをとって行われた。なお、ここでは、深さ方向に上下1つずつのサンプルを採取しており、図-2に示された結果は供試体表面に近いサンプルの水含有率である。参考までに記すと、各々のサンプルの水含有率の値は、表面に近い上層のサンプルの方が下方のものより数ポイント程度大きいことがわかっている。さて、図-2を見ると次のことが理解される。すなわち、(1)供試体の全域にわたって乾燥はほぼ均一に進んでいるものの、水含有率の値にはばらつきが生じ、その規模はこれまでのスタンダード試験に用いた供試体よりも数ポイント程度大きな値となること、(2)乾燥を経た供試体の水含有率の分布には、組織的な構造が現れているように見受けられること、などである。

次に、乾燥日数と水含有率との関係について見てみることにする。図-3にその結果を示す。なお、スタンダード試験の結果との比較を容易にするため、ここでの浸食実験に用いる供試体についても、乾燥後一昼夜にわたって水中に静置することにした。そこで、図-3には乾燥直後の供試体の平均水含有率とあわせて、その後さらに一昼夜静置した後の値も示してある。この図より、乾燥日数の増加につれて、供試体の水含有率は単調に減少していくことがわかる。また、乾燥後一昼夜静置することで湿潤状態に戻すと、乾燥日数が3日未満の供試体に関しては、この間に水を吸い戻すためかその水含有率がわずかながら回復する。これに対して、4日乾燥の供試体に関しては、逆に水含有率を低下させる結果となった。この点に関しては、あくまでも推測に過ぎないが、ある日数以上にわたって乾燥させ

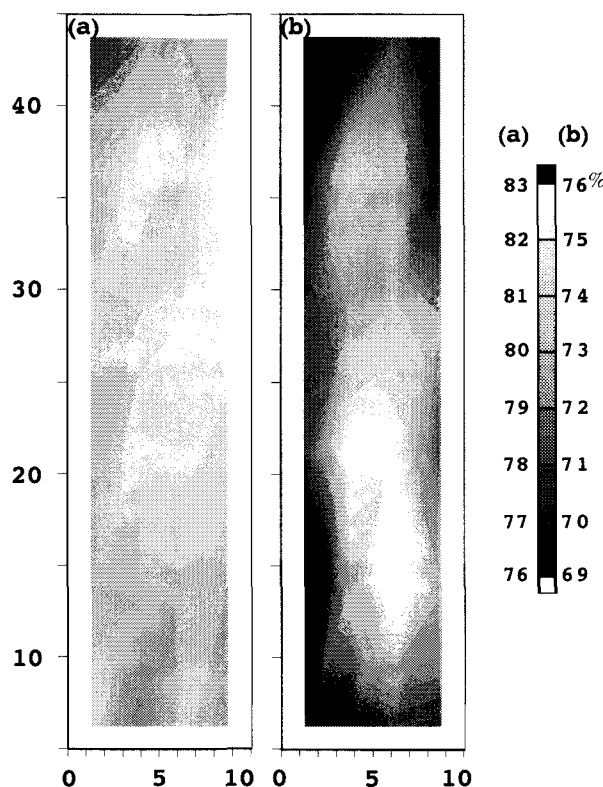


図-2 水含有率の等値線図：
(a)一昼夜水中静置後，(b)4日間にわたる自然乾燥後
(いずれの場合も供試体作成時の水含有率は80%)

ると、供試体はその表面が固くなり短時間で水を吸収することが難しくなるばかりでなく、その表面に水圧がかかることで引き起こされる圧密に十分に抗することができず、含有水をさらに失うことになるのではないかと解釈している。なお、乾燥日数が0日の場合に相当するスタンダード試験の結果について見ると、一昼夜静置を経て水含有率が低下していることがわかる。この圧密に関してこれまでのスタンダード試験の結果を整理したところ、水中に長時間静置するだけで供試体から水分が排出され締め固まるため、その層厚が小さくなり、含水比も低下することがわかっている。ここでの乾燥の過程においては、水圧こそかかっていないものの自重に伴う圧密が同時に進行するものと予想される。そこで、この圧密の影響については更なる検討が必要であり、ここでは今後の課題と捉えている。

次に、乾燥湿潤履歴を受けた供試体の浸食過程について見ていく。図-4に浸食深の時間変化について示した。図の横軸は通水時間を表す。図中には、同じ条件下で得られた計測結果を併記してあり、取りうる値のばらつきの程度を窺い知ることができるようになっていく。3分程度の時間で見えた浸食初期段階における浸食深は、乾燥日数が大きいものほど小さくなることが

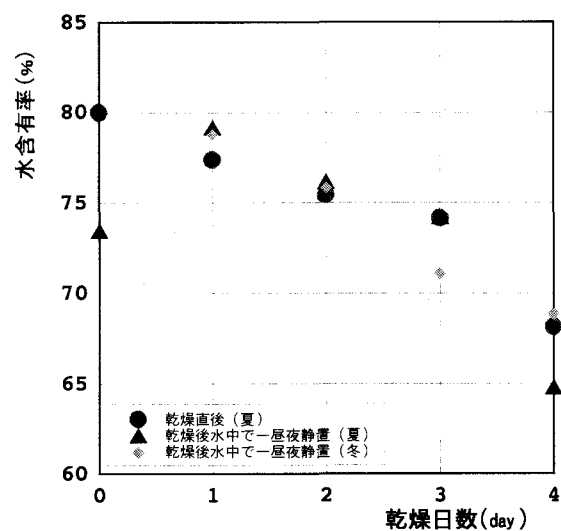


図-3 乾燥日数と水含有率の関係

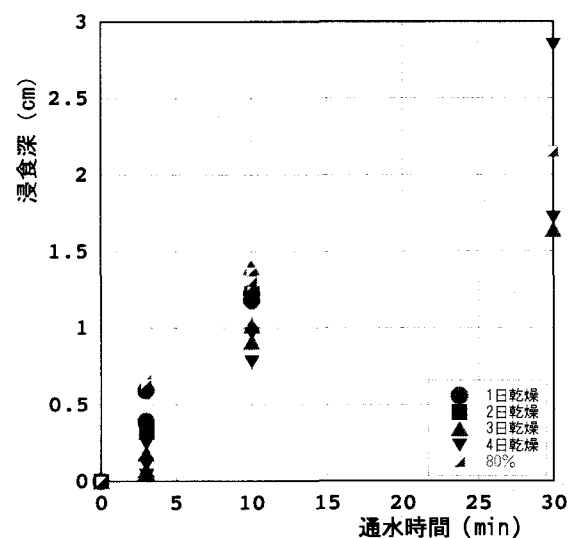
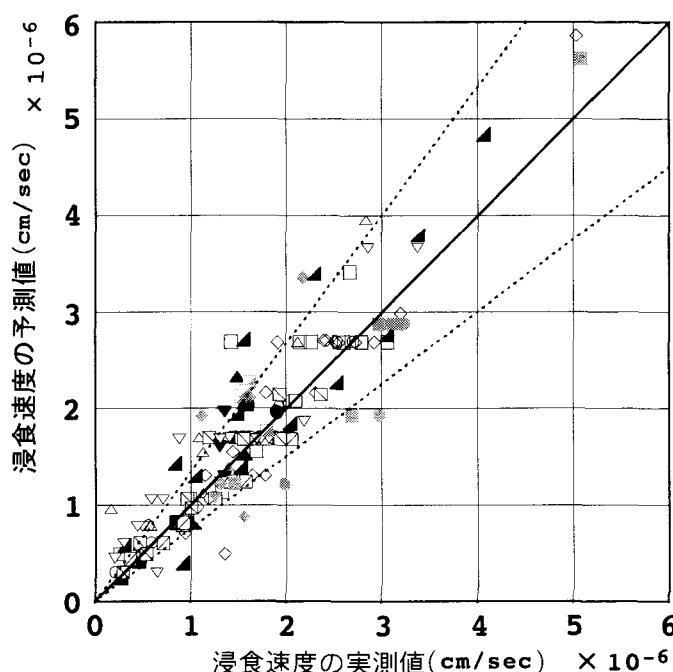


図-4 浸食深の時間変化

わかる。これは、通水直後の供試体の耐浸食力が、乾燥日数が大きいものほど高いということを表す。しかし、この後10分に至るまでの間の浸食深の変化を見ると、その浸食速度が乾燥日数の影響を大きく受けるものではないこともわかる。ここに、浸食速度は浸食深の時間変化率を表し、図の二点を結ぶ直線の傾きと捉えたとわかり易い。

そこで、著者らのこれまでの解析同様に、10分後の供試体の浸食速度を算定し、これを前論文¹⁾までに誘導してきた浸食速度式と比較してみることにした。浸食速度は以下の通りであり、これとの比較結果をまとめたものが図-5である。

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



凡例					
凡例	粘土の種類	水温	粘土含有率	水含有率	乾燥日数
○ □ ◇ △	SA クレー	高	0.4 0.6 0.8 1.0	0.5-0.7	0
○ □ ◇ △			0.4 0.6 0.8 1.0		
○ □ ◇ △		低	0.4 0.6 0.8 1.0	0.5-0.6	0
○ □ ◇ △			0.4 0.6 0.8 1.0		
● ■ ◆ ▲ ▼ ◀ ▶ ◀ ▶ ◀ ▶	TA カオリン	高	0.6 0.8 1.0	0.8-1.0	0
● ■ ◆ ▲ ▼ ◀ ▶ ◀ ▶ ◀ ▶			1.0	0.7 0.75 0.8	0
● ■ ◆ ▲ ▼ ◀ ▶ ◀ ▶ ◀ ▶			1.0	(0.8)*	1日 2日 3日 4日
● ■ ◆ ▲ ▼ ◀ ▶ ◀ ▶ ◀ ▶			0.6 0.8 1.0	0.6-1.0	0

* 最初に設定した水含有率が0.8であることを示す。

図-5 浸食速度の実測値と浸食速度式との比較

図-5には、これまでの著者らの実験結果をも併記してある。また、式(1)からの予測値を算定する際には、実験終了時に測定された供試体の水含有率を用いている。この図より、乾燥履歴を受けた供試体の浸食速度は、均質に作成された供試体のものよりも大きめの値を示す傾向にあるものの、式(1)からのずれは前論文までの測定における誤差の範囲内にあることがわかる。これは、ここで対象とした供試体の浸食速度に関しても式(1)が有効であることを示唆するものと判断している。また、これまでの認識の通り、水含有率が浸食速度にかなり強い影響力を持つパラメータであることが再確認された。

4. 乾燥履歴を受けた供試体の浸食形態

第2章では均質な湿潤状態にある供試体の浸食形態について説明し、主として「煙状の溶出」と「塊状の剥離」という2種類の浸食が見られることを説明した。ここでは、前章で説明した乾燥履歴を受けた粘着性土を対象として、その浸食形態について改めて検討した結果について論じる。検討の結果、乾燥履歴を受けた供試体に関しても、そのほとんどが上記のいずれかの形態をとって浸食されることが確認されたが、稀にこれとは異なる浸食形態が現れることがわかった。最後にこれについて説明する。この浸食は「塊状の剥離浸食」よりも規模が大きいため、ここでは仮に「大規模な破壊浸食」と呼ぶことにする。

写真-2には、第2章で説明した「塊状の剥離浸食」

を受けた供試体表面の写真と、この「大規模な破壊浸食」後のものとを並べて示した。色の濃淡は写真撮影時の照明によるものである。後者の場合、幅数cm、深さ2cm程度の陥没部が写されており、波状の凹凸と言うよりも裂くようにえぐり取られた状態といえる。この場合の剥離粘土塊の大きさは最大で2cm程度と推定される。

このような浸食が発生する条件については、現時点では未だ明確になっていないが、主たる要因として次の二点を挙げることができる。まず第一に、供試体の含水状態が不均一であり、その水含有率の分布に組織的な構造が現れることが挙げられる。これについては前章でも触れた。たとえば周囲より水含有率が小さな箇所がまとまりを見せるならば、そこは供試体にとって粘着力の小さな弱点箇所となり、水流が集中することで一挙に浸食が進行しまう恐れがある。第二に、乾燥期間中に供試体表面に形成される空気孔の存在が挙げられる(写真-2参照)。乾燥を受けた供試体の場合には、内部から水が蒸発する際に、水みちが形成される。また、この水みちを通して供試体内部に空気が混入することもある。ここでの実験では数日の乾燥の後、水中に一昼夜静置させる手順をとっているが、この際にも混入した空気が浮き上がり、供試体内部を縫うようにこれが抜け出るために、空気の通りみちができる。このため、その跡が「空気孔」となって供試体表面に残ることになる。空気孔近傍は水含有率が周囲に比べて大きくなり、この辺りが周囲に比べて粘着力の小さな弱点箇所となる可能性もある。このような状態にある

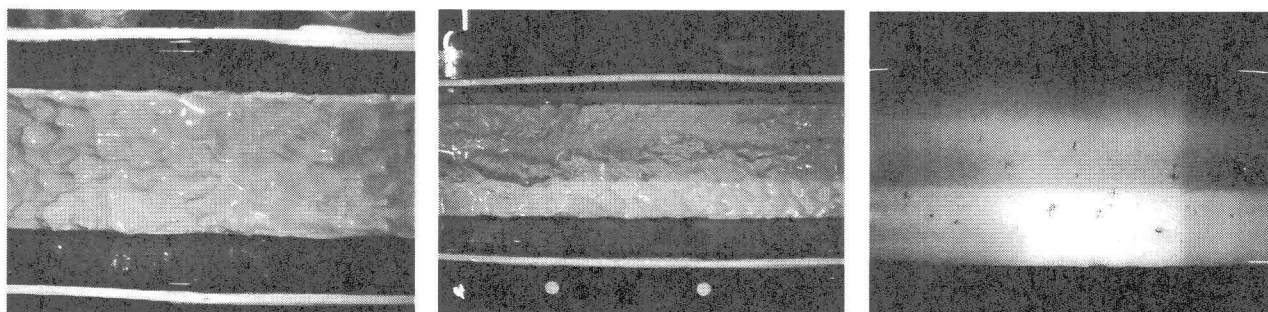


写真-2 供試体表面の写真：

左：典型的な波状形状 中：大規模な破壊浸食が起こった後の表面写真 右：乾燥に伴う空気孔の形成

供試体を流れに曝すと、水がこの空気孔に潜りこみ、供試体内部で大きな圧力変動が生じることも考えられ、条件によっては空気孔が生じた地点を起点として、規模の大きな浸食が生じる可能性もある。

ただし、このような大規模な破壊浸食による浸食量を、スタンダード試験による均質に作成された供試体の浸食量と比較すると、前述の通り、その浸食速度に大きな差が見られないことがわかった。このように、いずれの浸食形態をとっても最終的な浸食量(浸食速度)に大きな違いがないという結果は興味深い。

今後は、このような「大規模な破壊浸食」が発生するメカニズムを明らかにすることを目指して、更なる検討を進めていく予定である。

5. おわりに

本研究では、次の二点に焦点を当てて検討を行った。まず最初に、前論文までと同様の「均質に練り混ぜられた供試体」を対象として、粘着性土が浸食を受けるプロセスについて検討した。通水初期において供試体表面に微細な擾乱が形作られ、時間の経過とともにこれが波状の凹凸へと成長することを示したほか、その浸食形態についても考察を加えた。第二に、前論文までの供試体の代わりに、乾燥履歴を受けた供試体を対象とした

検討を行い、乾燥に伴う供試体内の水含有率の変化や、耐浸食性における違いなどについても考察した。本研究の範囲内に限定するならば、これまで通り10分程度の時間にわたっての浸食速度を評価すると、乾燥後の供試体といえどもその値に大きな変化は見られず、これまでに得られている浸食速度式によってその近似値を予測することが可能ではないかと考える。

しかし、この乾燥履歴に関して、未だ不明の点が多く、今後も引き続き検討を続けていく必要がある。

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。また、実験の遂行にあたっては、藤尾健太氏(当時、早稲田大学大学院)ならびに坂本拓哉氏(当時、早稲田大学理工学部)の協力を得た。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式に関する考察, 水工学論文集, 第47巻, pp541-546, 2003
- 2) 大坪国順, 村岡浩爾: 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第363号/II-4, pp.225-234, 1985.

(2003. 9. 30 受付)