

粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究

Experimental study on the erosion of cohesive soils

東北大学大学院 学生員 青木美樹
東北大学工学部 正 員 首藤伸夫

1. 序 論

粘性を有する細粒土の貯水池、湖沼、河口などにおける沈降・堆積・洗掘は水質や水深および航路維持等に大きな影響を与える問題である。^{1,2}しかしながらその粘性が電気化学的な力に起因するために、その挙動を砂粒土と同様にとり扱うことはできない。特に粘性土堆積層の洗掘は土の性質や堆積条件などにより、同じ水理条件の下でも異なった状態を呈する。従って、洗掘開始時の水理量と塑性指数など土の物性値、あるいは含水比など堆積条件を示す諸量との関係を知ることが必要であり、従来このような研究が主に行なわれてきた。^{3,4}しかし、限られた指標のみによって限界状態を規定するには至っていない。

本研究では現象のメカニズムを力学的に明らかにすることを目的とし、一種類の土についてその限界状態を実験を通して詳細に調べた。特に、含水量の小さい堆積層では土が塊状に剥離することから、剥離後の痕跡の大きさを測定した。また、この剥離現象をモデルによって明らかにすることを試みた。さらに、以上に述べた結果を基に洗掘量を計算し、実験値との比較を行なった。

2. 実 験

(1) 装置と方法

実験は測定対象に従って二通り行なった。はじめに図-2に示す装置を用いて洗掘が開始する限界状態の観察、その時の試料面に働く剪断力と粘土粒子塊が剥離した後の痕跡の大きさを測定を行なった。水路は断面 10×10 cmの矩形管路で、側壁は透明なアクリル板、上・下面はそれぞれ木製および鉄製である(試料設置部上面は透明アクリル板)。粘土堆積層表面よりやや大きな粗度を持つ剪断力計により底面に作用する剪断力 τ_m を測定した結果、図-1に示すように動水勾配より算定される平均剪断力 $\bar{\tau}$ の1.5倍程度の値をとることから、実際に堆積層に働く力は平均的には $\bar{\tau}$ と τ_m の間であると考えられる。以下の実験結果の整理には剪断力として $\bar{\tau}$ を用いた。

粘土試料はカオリン(比重2.71, 平均径 $3.1 \mu m$)を使用し、含水量を調整したものを容器に一昼夜静置した後、実験を行なった。静置することにより、わずかながら圧密のため堆積層に深さ方向の含水量低下が生じるので、文献 5)に述べた方法により限界掃流力を定めた。含水比は実験終了後、試料を採取して測定した。痕跡の大きさを測定は焦点距離105 mmのマイクロ・レンズを取り付けたカメラで堆積層直上約40 cmより流水力作用下の層表面を時々刻々撮影して行なった。

次に、幅10 cmの開水路を用いて洗掘量の変化を測定した。長さ3 mの水路の中央部1 mに含水量を調整した試料を置き、その上・下流に光電管式濁度計を各1台設置して、等流状態下で洗掘した試料の濃度変化を測定した。作用剪断力は予め行なった検定実験の値を基に $\bar{\tau}$ を底面

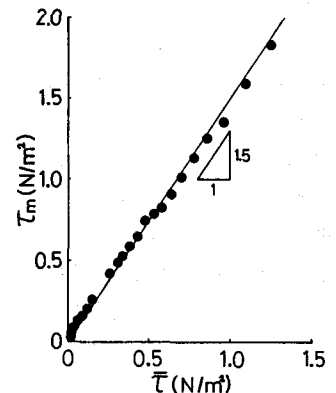


図-1 各方法による底面剪断力の比較

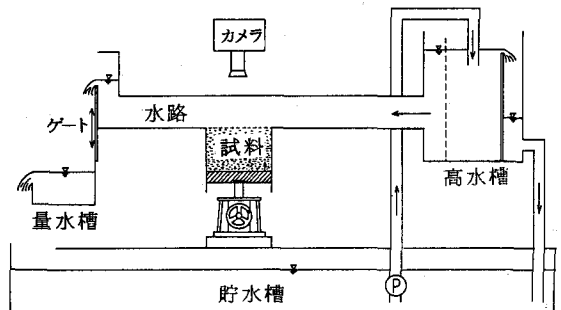


図-2 実験装置

に働く平均剪断力に換算して求めた。

(2) 結果と考察

限界掃流力 $\bar{\tau}_{cr}$ と含水比 w との関係を図-3 に示す。含水比の増加に伴い限界掃流力は急激に低下している。粘土粒子が粘着性を持つ、すなわち粒子間に電気化学的な力が生じるためには粒子表面に水が吸着されることが必要であるが、この吸着水量を越える水分（この量が含水量と呼ばれる）は粒子間の距離を増加し、その結合を弱める。自然沈降して堆積した粘性土層では圧密により深さ方向に含水量が減少しており、これに従って限界掃流力は増加している。⁹ 図には剪断強度の機械的測定例として、ベーン剪断強度 τ_v の変化をあわせて示した。 τ_v は $\bar{\tau}_{cr}$ のおよそ 1000 倍にも達するが、含水比に伴う変化は両者はよく似たものとなっている。流水による剪断力は堆積層表面にのみ作用し、堆積層の破壊は流動的または脆性的に起る。このため、破壊に対する抵抗は粘着力が支配的である。他方、ベーン試験における土は塑性体として破壊し、粒子間の摩擦力と剪断変形に伴う体積の増加、すなわちダイレイタンスによる応力が強度を支配する。¹⁰ この強度は脆性的に破壊するときの粘着力に比べ非常に大きなものであり、この結果、限界掃流力は機械的剪断強度よりはるかに小さくなる。なお、 $\bar{\tau}_{cr}$ はほぼ $w^{-0.5}$ に比例している。

カオリンを用いた本実験、および貯水池底質を用いた実験⁵において、堆積層の洗掘に2つの形態が観察された。比較的含水量の大きな場合、表層に流れ方向に小さく隆起した筋が見られる。この筋は底部の流れの変動に従って動き、蛇行する。粘土粒子はこの筋に沿って運ばれ、水流速の変動により作用力が大きくなると巻き上げられ浮遊する。含水量が大きいために粘土粒子は単体、あるいは数個の粒子が集合した二次粒子が分散した状態で堆積しており、これが比較的小さな掃流力で巻き上がり、運ばれる。従って、洗掘量は少なく、堆積層厚の変化もごくわずかである。これに対し、含水量が比較的小さくなると土は塊状に層表面から剥離する。このとき掃流力も大きく、剥離した後、粒子塊はただちに破壊し、単粒子、あるいは二次粒子として運ばれる。粒子が粘着力により凝集・会合して堆積しており、剥離した後はその痕跡が観察される。この剥離後にできたくぼみは流水力作用下でしだいに大きくなる。すなわちここからさらに洗掘が進行する。しかし、本実験においてはこのくぼみの成長は遅く、顕著な洗掘の進行は見られなかった。このような剥離による洗掘量は多く、堆積層の変化をもたらす。カオリンでは含水比が70%以下ではこの剥離が顕著になる。実際の堆積層では含水量の変化により、ある深さを境に2つの洗掘状態を示す領域が存在していると考えられる。

含水量が大きく、土が単粒子、あるいは二次粒子として洗掘・移動する場合、堆積層は流動体としてとり扱うことができ、粘度や流動を開始するときの降伏値が限界を定めるパラメタとなる¹¹。これに対し、含水量が小さく、塊状に剥離する場合には堆積層は流動体とはみせず、脆性、あるいは塑性体の破壊に類似したものとなる。従って、このような立場から洗掘現象の力学的メカニズムを明らかにする必要がある、剥離塊の大きさとその分布が重要であると考えられる。しかし、剥離した粒子塊は前述のように流水中で破壊するため、この大きさを測定することは困難である。そこで、剥離した後に堆積層表面に残る粒子塊の痕跡の成長が遅いことから、この大きさを粒子塊の大きさに対応するものとして測定した。痕跡はほぼ円形、あるいは楕円形に近く、その直径、あるいは長軸方向の径を測定した。測定値の頻度分布の例 図-4 に示す。 $\bar{d}$ は平均値、 N はサンプルの数である。 $\bar{\tau}$ は痕跡の径 d の測定中に作用している剪断力であるが、文献⁵で定義したように $\bar{\tau}_{cr}$ が堆積層深さ方向の含水比低下のために洗掘がほとんど生じなくなった時に層表面に働く剪断力であるから、 $\bar{\tau}$ は洗掘の起っている面の $\bar{\tau}_{cr}$ よりわずかに大きな値である。図に示したものの以外の例も含めて、痕跡の大きさ d は剪断力 $\bar{\tau}$ が大きくなるに従って小さなものの割合が増加し、平均値が小さくなる。 $\bar{\tau}$ は限界掃流力 $\bar{\tau}_{cr}$ に近い大きさであるから、

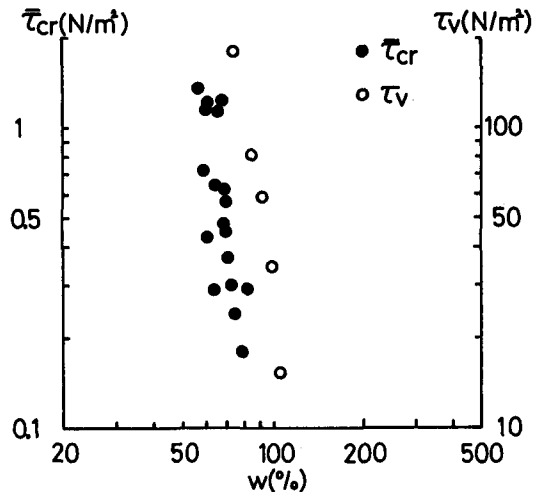


図-3 含水比と限界掃流力の関係

堆積層の強度が大きくなるほど、すなわち含水量が減少するほど剥離する d は小さくなる傾向が見られる。従って、大きな含水量のときは密度の低い大きな粒子塊が、また、小さな含水量のときは高密度の小さな塊が剥離することがわかる。サンプルの数 N は写真からの判読が可能であったものの数であり、剥離した総数とは無関係である。また、 d の分布の幅、すなわち分散は $\bar{\tau}$ の大きさに従うような変化の傾向は示さなかった。削落全面積の露出全面積に対する比率は写真によると0.5～1%の範囲であり、含水比 w に対する依存性は認められなかった。肉眼で観察する方が写真での判定より多くの剥落部分が認められたが、現象が時々刻々と変化するので確認には不便であった。剥離後再び埋め戻されてしまうこともあり、写真判定で全ての剥落部を捕捉したとは言えない。しかし、以上のことは i) 判定基準として0.5～1%の移動をもって移動開始と定義したと言ってもよく、あるいは ii) 移動個数を N とすると $Nd^2 \neq \text{const.}$ という関係が成立しているとも言える。

図-5に $\bar{d}$ と $\bar{\tau}$ の関係を示す。多少のばらつきはあるが、 $\bar{\tau}$ の増加(含水比の低下)に伴い $\bar{d}$ が小さくなる傾向が見られる。 $\bar{\tau}$ ($\geq \bar{\tau}_{cr}$)はほぼ $\bar{d}^{-5.7}$ に比例する。 d は0.5～1.5mmであり、単粒子の径($d_{50} = 3.1\mu m$)に比べて非常に大きい。堆積している粘土粒子は粘着力により凝集・会合して粒子塊を形成しているが、粒子間の結合の強さは均一ではなく、強く結合・凝集している部分と、その弱い部分、すなわち間隙が堆積層全体にわたって不規則に分布している。含水量が大きい場合には粒子間の結合が比較的弱い大きな粒子塊と、それらの間に大きな間隙とが存在し、この粒子塊の剥離により大きな痕跡が残るのに対し、含水量が小さくなると団粒が密になり、間隙も小さくなるために痕跡も小さく考えられる。

粘性土構造における団粒(ここでの粒子塊)は物理化学的な力の作用する上限の単位であり、団粒間においては単に機械的な力のみが作用すると考えられていることから⁸⁾、粒子塊の剥離に対する抵抗力がその周囲との摩擦力のみに依存するかどうかを検討するために $\bar{d}$ を用いたレイノルズ数とシールズ数の関係を示したの

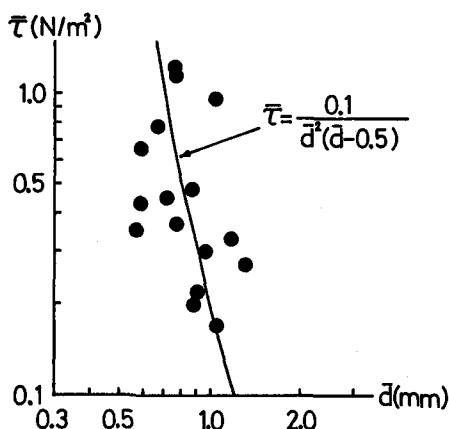


図-5 痕跡の大きさと掘流力の関係

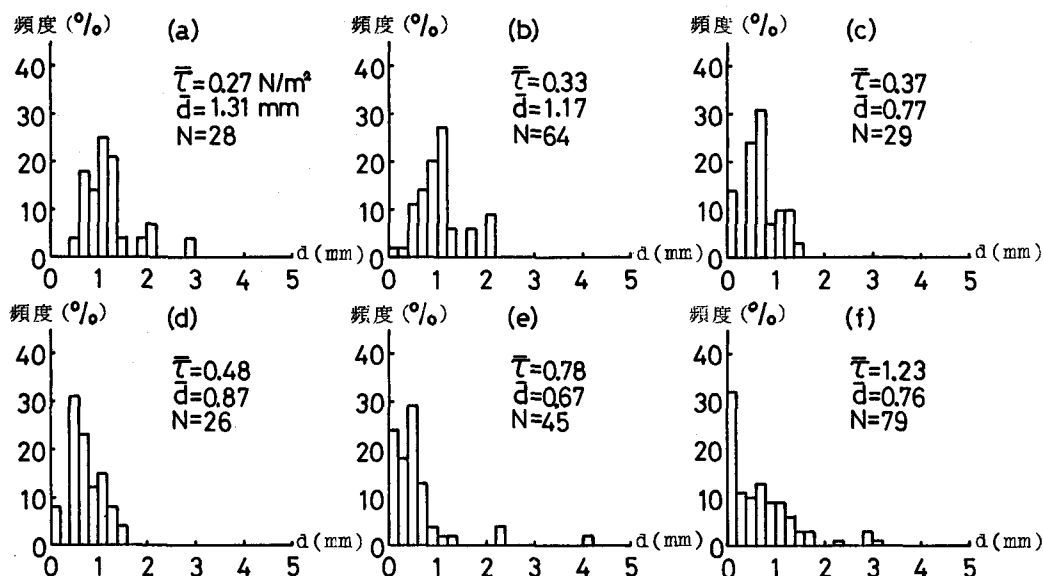


図-4 痕跡の大きさの頻度分布

が図-6である。図からわかるようにシールズ数は一定しておらず、砂粒より大きな値をとる。また、作用力 $\bar{\tau}$ の大きなものはシールズ数も大きくなる傾向があり、粒子塊に対しても摩擦力以外の力が働いているものと考えられる。従って、シールズ数の分母に粘着力の効果を表わすものを加える必要がある。

次に開水路における実験の結果について述べる。開水路実験においては限界状態を越えた後の洗掘量とその時間的推移を測定することを目的とした。実験は流量、すなわち掃流力を徐々に増加させ、表面のわずかな巻き上げが観察された後、表層の限界値を越える掃流力を与えて洗掘後浮遊した土の濃度を測定したもので、一例を図-7に示す。測定部での水深は約16cmであった。濁度の鉛直方向分布は測定していないが、目測によると下方半分(約8cmの厚さ)に濁度物質は集中し、それより上にあがることは極めて稀であった。濁度計は下面より上方1cmの個所に固定してある。濃度は急激に増加した後、減衰している。およそ5分後には一定値に達し、変動も小さくなっており、洗掘はほぼおさまっている。堆積層の含水量が深さ方向に低下し、それに伴って強度が増加していることがわかる。なお、堆積層にその強度を越える掃流力が急激に加わり洗掘が生じたため、洗掘終了後の堆積層表面は平坦ではなく、砂質土における砂連、あるいは砂堆に相当する形態が観察された(大きさは4~5cm)。このように、堆積層の強度に比べ大きな力が働くと洗掘に伴い層表面に起伏が生じ、これがさらに洗掘を助長することになる。

3. 洗掘現象の力学モデル

前述のように粘性土堆積層の洗掘には、その含水量によって2つの形態が見られる。高含水域での流動と低含水域での脆性、あるいは塑性体の破壊に類した洗掘である。ここでは後者についてモデルを設定し、堆積層からの粘土粒子塊の剥離現象を力学的にとり扱い、実験結果と比較することにする。

含水量の異なる2つの場合を考える。図-8において、(a)は含水量が多く(b)は少ない場合の堆積層の断面図である。間隙は水で満されている。間隙の多い(a)では(b)に比べて粒子塊(破線で囲まれた部分)は周囲の堆積層との結合が弱く、引き離され易い。また、はく離した後に残る凹部も(a)のほうが(b)より大きくなる。しかし、剥離した塊に占める土の量は(a)と(b)でそれほど差がないと考えられる。

図-9のようなモデルを考える。土粒子の凝集体からなる径 a の部分厚さ h の間隙がとりまいているとする。この間隙をも含めたひとつの標準粒子塊の径を d とする。 a, h, d ともある程度不規則な分布をする量であろうが、ここではその事は問題とせず、平均的に扱うこととする。

厚さ h の間隙には中心の土粒子凝集体と周辺とを結合する橋

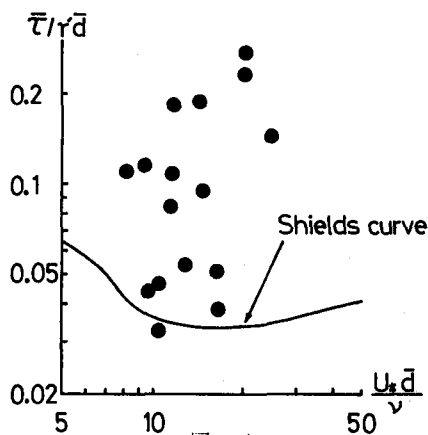


図-6 痕跡の大きさを基にした Shields 関数

濃度 (g/l)

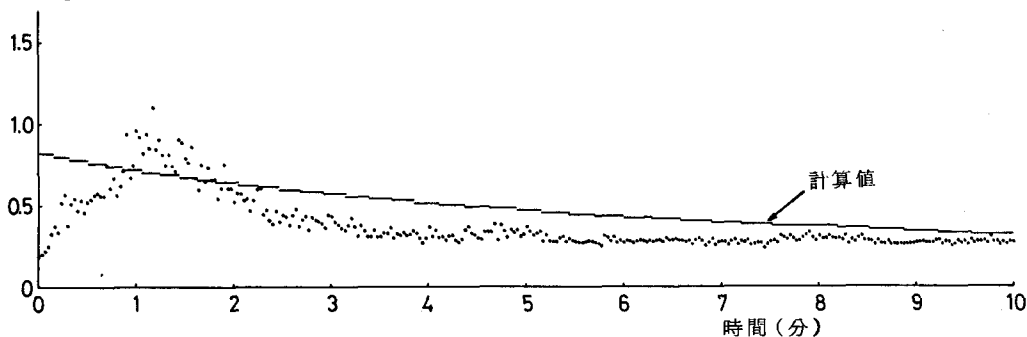


図-7 浮遊粘土の濃度変化

が存在する。この橋の数および大きさは土粒子凝集体の表面積 $S (=k_1 a^2)$ に比例するであろう。また、 h が大きいほどこの結合部の強さは弱くなるに違いない。従って、土粒子凝集体をつなぎとめる力 σ は定数 k_2 、 m を使って、

$$\sigma = k_2 \left[\frac{S}{h} \right]^m = k_2 k_1^m \frac{a^{2m}}{h^m} = k_2 (2k_1)^m \frac{a^{2m}}{(d-a)^m} \quad (1)$$

と書いてよい。

流水による剪断力が上の値を越えたときに土粒子凝集体は剥離するであろう。剪断応力 τ も時空間的にある分布をもつものであるから、どの大きさの作用面積に関してその和を考えるかにより平均剪断強度も変化しなければならない。しかし、図-5の実験結果より、対象となるべき d の寸法は大きくは変化しないので、平均化面積の効果はいまのところ無視してよいだろう。作用する剪断応力を $\bar{\tau}$ とすると、

$$\bar{\tau} \frac{\pi}{4} d^2 \cong k_2 (2k_1)^m \frac{a^{2m}}{(d-a)^m} \quad (2)$$

が洗掘開始の条件である。図-5を平均的に表わすには、

$$\bar{\tau} = \frac{0.1}{d^2(d-0.5)} \quad (3)$$

とすればよい。図-5中の実線はこの関係を示している。ここで、 $m=1$ 、 $a=0.5$ 、 $8k_1 k_2 / \pi = 0.4$ としたことに相当する。

以上において考えたような標準的な欠陥が堆積層全体を隙間なく占めている訳ではない。いま、単位表面積あたり N 個の、径 d の欠陥があるとする。厚さ $d/2$ とすると全体積 $V = d/2 \times 1 \times 1$ の内の空隙の体積は $V_v = N k_3 (d^3 - a^3)$ であるから空隙比 e ($= G_s w / S_r$ 、 G_s : 粒子比重、 S_r : 飽和度、 w : 含水比) は、

$$e = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{G_s}{S_r} w \quad (4)$$

これから、

$$\frac{G_s w / S_r}{1 + G_s w / S_r} V = \frac{c_1 w}{1 + c_1 w} \frac{d}{2} = N k_3 (d^3 - a^3) \approx N k_3 d^3 \quad (5)$$

$$N d^3 \sim \left\{ 1 - \frac{1}{1 + c_1 w} \right\} \quad (6)$$

となる。含水比が大きい範囲では、

$$N d^3 \cong \text{const.} \quad (7)$$

と考えてよい。さきに図-4に関連して述べた事実を裏付けているとも言える。

ところが図-3には実験の事実として $\bar{\tau}_{cr} \propto w^{-8 \sim -9}$ という結果が得られていた。これは、図-5の事実 $\bar{\tau} (\approx \bar{\tau}_{cr}) \propto d^{-5 \sim -6}$ とから、 $d \propto w^{1.3 \sim 1.8}$ のように欠陥の寸法が含水比によって変化すること、および欠陥の寸法が増加するに従ってその数は $N \propto w^{-2.5 \sim -3.5}$ のように減少することを意味しているであろう。

次に、掃流力を大きくし、洗掘が進行していく状態を考える。洗掘は基本的には上に考えたような標準の凝集体ごとの剥離によって生じるものとする。掃流力がある大きさ以上になると洗掘が始まり、ある程度堆積層が洗掘されて下部の剪断強度の大きな層があらわれると洗掘はほぼ終了する。ただし、粘土の剥離は水に接する層の強度がしだいに弱くなるために、厳密な意味では進行するが、ここでは洗掘され巻き上げられた粘土による濁度が急激に減少する時点で洗掘は終了したと見なすこととし、この時の掃流力を対象として計算する。堆積粘性土の含水比および剪断強度は別の試料(四十四田ダム堆積土)から深さ方向にほぼ指数的に変化することが知られているので、ここでも同様であると仮定する。ある層での剥離はその層の強度によって決まる標準寸法(式(3))の径をもつ凝集体を単位として生ずるものと仮定し、さらにその層での洗掘開始より終了までの時間は強度に比例するものと仮定する。このような

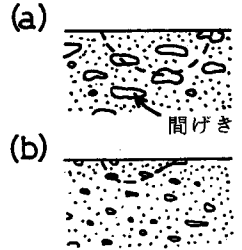


図-8 堆積層断面図

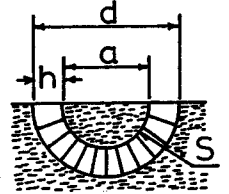


図-9 剥離粒子塊のモデル

凝集体が隙間なく集まっており、剥離後は堆積層表面上約8 cmの水の層に集中して流下するものとして濃度変化を求めた。図-7の線がこの計算値を示す。実験値と異なりピークが生じないことは堆積層の深さ方向の強度変化の仮定に無理があること、また、2分経過以後において計算値が実測値を上まわることは標準寸法の凝集体が隙間なく集まっているという仮定に無理があり、凝集体寸法に分布を導入する必要があることを示唆している。

4. 結 論

カオリンを沈降させた堆積層では含水比70%程度を境として、移動開始時の表面の状態が異なっている。含水量が大きい場合、表面には不安定な、流れに平行な縦筋が生じ、含水量の小さい場合には土粒子凝集体として剥落していく。ここで扱ったのは主に後者の場合である。

移動開始時の剥落部分の平均径は含水量が小さいほど小さい。また、径の分布も含水量が小さくなるほど小さい方にかたよってくる。その一例を図-4に示した。

移動開始時の掃流力 $\bar{\tau}_{cr}$ は、含水比 w の小さい堆積層のほうが大きく、実験的には $\bar{\tau}_{cr} \propto w^{-8.5}$ であった。

移動開始時の掃流力と剥落部分の平均径の間には $\bar{\tau} \propto d^{-5.7}$ の関係があった。

土粒子実質部分を厚さ h の間隙がとりまく模型を考えると、実験結果を説明する関係として $\bar{\tau} = 0.1/d^2 (d - 0.5)$ を得た。ここで $\bar{\tau}$ は (N/m^2)、 d は (mm) の単位である。この模型に従う欠陥が単位面積あたり N 個あるとしたところ、含水比がある程度大きければ移動初期においては $Nd^2 = \text{const.}$ としてもよいことがわかった。これは、観察事実とも一致するようである。

また、洗掘の進行は、上のような欠陥部分が単位となって剥落していくものであると想定して濃度の時間的变化を計算したところ、実測値に近い結果を得た。しかし、詳細については不一致も認められるので、今後の模型の改良が望まれる。

本研究における実験・資料整理にあたり、東北大学技官 山路弘人氏、ならびに同学部生 遠藤吉宣君の協力を得た。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小暮・首藤：貯水池における濁度物質の堆積と洗掘，第24回水講，1981
- 2) コルドロビッチ・入江：ESCAP 域内途上国港湾における海岸工学上の諸問題，第28回海講，1981
- 3) Report of the Task Committee on Erosion of Cohesive Materials, Hyd. Div. Proc. ASCE, 1968
- 4) 大坪・村岡：底泥の物性と限界掃流力の関連について，第25回水講，1981
- 5) 青木・首藤：粘性土の洗掘に関する実験的研究，第36回水講，1981
- 6) Lambe : A Mechanistic Picture of Shear Strength in Clay , Proc. ASCE Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils , 1960
- 7) Allen : Erosional Current Marks of Weakly Cohesive Mud Beds , J. Sedimentary Petrology Vol. 39 , No. 2 , 1969
- 8) 土壌物理研究会編：土の物理学 — 土質工学の基礎 — (森北)，pp. 72 - 96