

# 流水による粘性土材料の侵食速度

道上 正規・鈴木 幸一・檜谷 治

土木工学科

(1986年9月1日受理)

Erosion Rate of the Cohesive Material due to the Flow

by

Masanori MICHIEUE, Kouichi SUZUKI, Osamu HINOKIDANI

Department of Civil Engineering

(Received September 1, 1986)

Erosion rate of the cohesive material, which is made of clay and sand, due to the flow is investigated experimentally, and application of the theoretical model proposed by Sawai is discussed using the experimental results.

Key words : Erosion, Cohesive material, Flow.

1 緒言

一般に、砂と粘土で構成されている材料の侵食速度は、粘土分が少量含まれるだけで、砂だけの材料に比べ非常に小さくなることが知られているが、その侵食速度は粘土の性質や含水比など多くの要因に左右され、定量的に評価することは困難である。しかしながら、河川堤防の越流時の侵食特性などを検討する上で、この粘性土材料の侵食速度を明らかにすることは非常に重要な問題であると言える。

流水に対する粘性土材料の侵食速度は、その侵食機構がいまだ十分解明されていないので、それを規定する水理量および土質に関するパラメータも明らかとなっていない。従来の研究では、澤井[1]が簡単な侵食モデルより侵食速度の推定式を提案し、実験によって検証を行っているが、実験の条件が粘土含有率数%の材料で行ったものであり、粘土含有率が大きい場合に適用できるかどうかは疑問である。また、推定式中の実験定数の決定方法にも問題があると思われる。そこで、本研究はこれらの点に鑑み、流水に対する粘性土材料の侵食を実験的に明らかにするとともに、澤井の提案式の妥当性について検討しようとするものである。

2 粘性土材料の侵食速度に関する実験的考察

2.1 実験の概要

実験水路は、図-1に示すような長さ198cm、幅10cm、高さ5cmの透明アクリル性の長方形断面の管路で、上流側100cmの地点で水路底部から長さ20cm、幅10cm

の試料を出し入れできるように作られている。流量調節は上流部の水槽で行ない、下流部水槽の四角環で流量測定を行なう。また、管内の摩擦速度  $u_*$  を求めるためにマンメーターを合計8ヶ所に取り付けた。

試料の侵食速度を測定する部分は、図-2に示すような構造となっている。つまり、試料の侵食量に応じて目視により侵食面の平均的な高さが管路床と同じになるように、随時油圧ジャッキで上昇できるようにしている。

実験に用いた粘性土材料は宇治市藤の森で得られた粘土と中央粒径が異なる2種類の砂を乾燥重量比で適当に混合したものであり、それらの粒径加績曲線を図-3に示す。すなわち、実験に用いた粘性土材料は、図-3中の(c)(d)(e)および(g)で示されている粘土と砂の混合材料と(b)で示されている粘土の合計5種類である。また、材料に混入している砂は(a)と(f)の2種類である。それらの材料の土質定数を表-1に示す。表中の最大乾燥密度  $\rho_{d, max}$  と最適含水比  $w_{opt}$  は、J I S A 1210-1978 に準じた締固め試験より求め、粘着力の測定には一面せん断試験機(改良型)を使用し、ひずり制御法で急速(1mm/min)非排水で行った。

実験の手順としては、まず、材料を最適含水比となるように調節し、この試料を長さ20cm、幅10cm、高さ5cmの鉄製の枠(図-2参照)に入れ、5cm角の角材で突固める。試料の表面を整形した後、試料の入った枠を実験水路にセットする。つぎに、管路内の摩擦速度  $u_*$  が所定の値となるように流量を調節した後、試料表面と管路床とを同じ高さにセットする。実験はこの時点  $t=0$  とし、10分毎に1時間後まで侵食量とマンメータの読みを記録する。

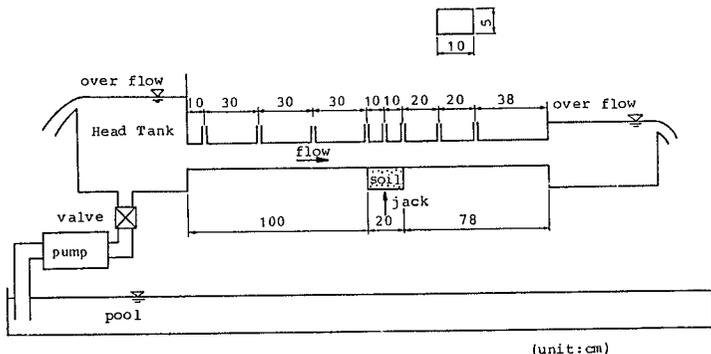


図-1 実験装置概略図

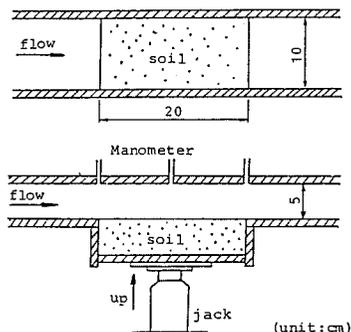


図-2 侵食速度測定部分の構造

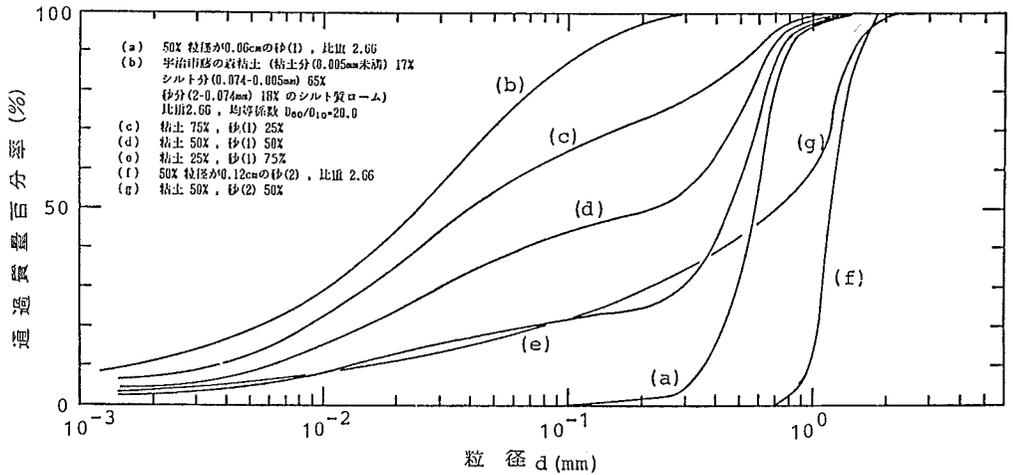


図-3 粒径加積曲線

表-1 粘性土の土質定数

種類	Clay (%)	最適含水比 (%)	最大乾湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粘着力 (N/cm <sup>2</sup> )
(b)	100	24.8	1.530	10.19
(c)	75	19.8	1.679	8.82
(d)	50	14.6	1.835	5.10
(e)	25	11.5	1.938	2.55
(g)	50(d <sub>50</sub> =0.12)	13.0	1.902	11.68

実験条件は、実験装置の関係で単位幅流量として52~930cm<sup>2</sup>/sec (摩擦速度  $u_*$  では0.68~12.6cm/sec) の範囲であり、その範囲で各材料に対して12~55ケースの実験を行っている。

2.2 実験結果及び考察

図-4(a)~(e) は各材料に対する摩擦速度  $u_*$  と侵食速度  $u_s$  との関係を示したものである。図中の○印で示されているのが実験値を表わしているが、かなりのばらつきはあるものの、全体的には図中の曲線で示した関係にあるものと推定される。また、図中には試料に混入した砂の限界摩擦速度  $u_{*c}$  の値も書き示している。

これらの図から、全ケースとも  $u_*$  が大きくなるにつれて試料の侵食速度  $u_s$  も飛躍的に大きくなるが、 $u_*$  が5cm/s より大きい領域では  $u_s$  と  $u_*$  がほぼ比例関係にあることが認められる。さらに、粘土含有率100%を除いた4ケースについては、その試料の砂の限界摩擦速度  $u_{*c}$  付近で  $u_s$  が急激に小さくなる様子が明らかで

ある。粘土100%の試料は砂粒を含んでいないため  $u_{*c}$  の推定は不可能であるが、実験結果より今回実験に用いた粘土の  $u_{*c}$  は約1.35cm/sと推定される。しかしながら、粘土含有率100%の試料の場合には、同一粘土であっても含水比あるいは締固めの度合によってこの  $u_{*c}$  の値は大きく異ってくるものと思われる。

図-5は図-4(a)~(e)中の曲線を一つにまとめて示したものである。図中の凡例を参照して各曲線を比較すると、 $u_*$  が小さい領域では粘土含有率100%の  $u_s$  が砂混じり試料よりも大きい。逆に、 $u_*$  が大きい領域では粘土分含有率100%の  $u_s$  が最も小さく、中央粒径  $d_{50} = 0.6mm$  の砂を混入した試料では粘土含有率が少なくなるほど  $u_s$  が大きくなる傾向が認められる。また、 $d_{50} = 1.2mm$  の砂50%含んだ試料の  $u_s$  は  $d_{50} = 0.6mm$  の砂を50%含んだ試料のそれよりも小さく、粘土含有率100%の試料の  $u_s$  とほぼ近い値となっている。したがって、 $u_*$  がある程度大きい領域では、一定の  $u_*$  に対しては粘土含有率が大きいほど、また、粘土含有率が等しくても含まれている砂の粒径が大きいほど侵食速度は小さくなり、流水に対する侵食抵抗力が大きくなることがわかる。

3 理論的考察

3.1 粘性土材料の侵食機構

澤井[1] は、これからの流砂の堆積を無視した場合の

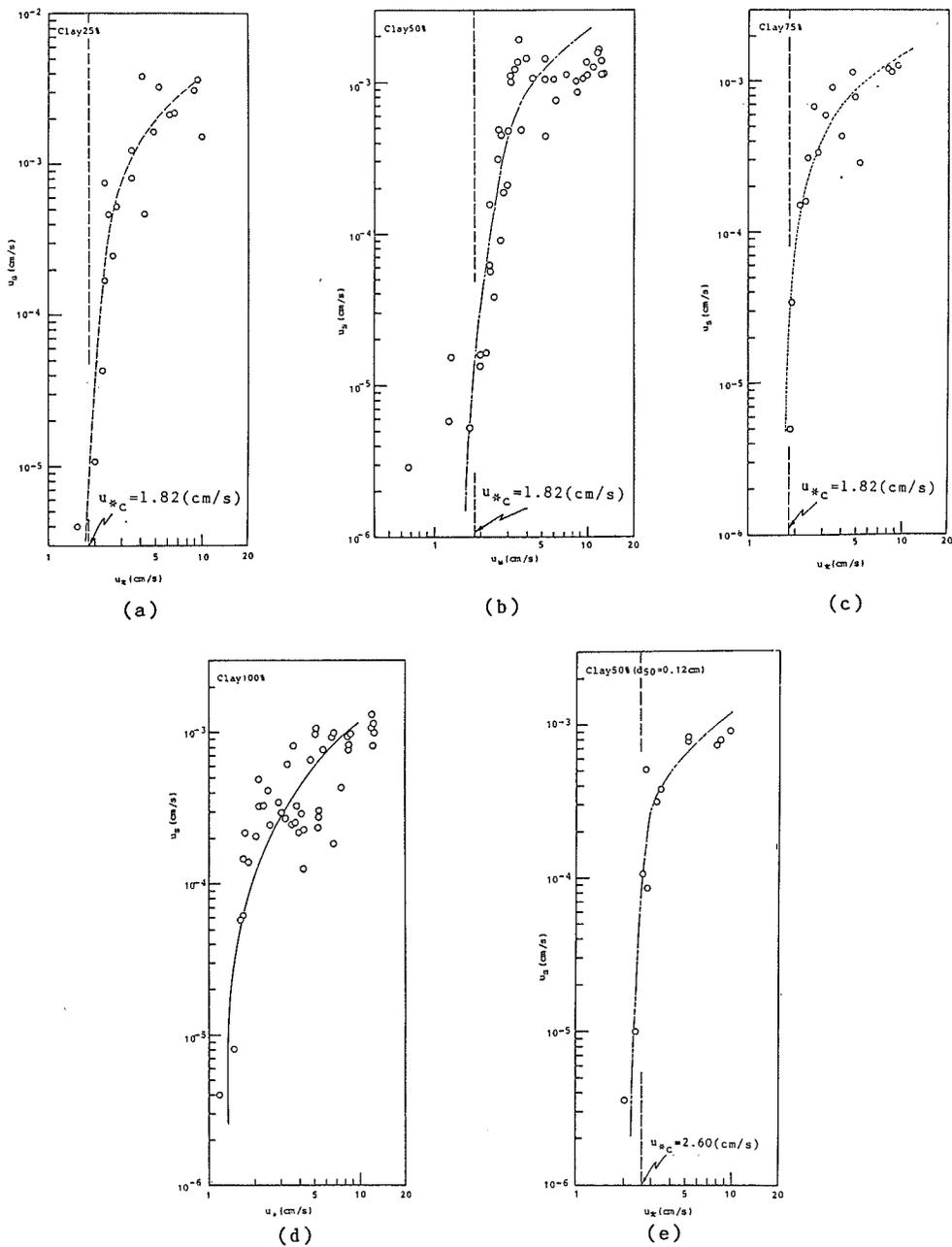


図-4 侵食速度と摩擦速度の関係

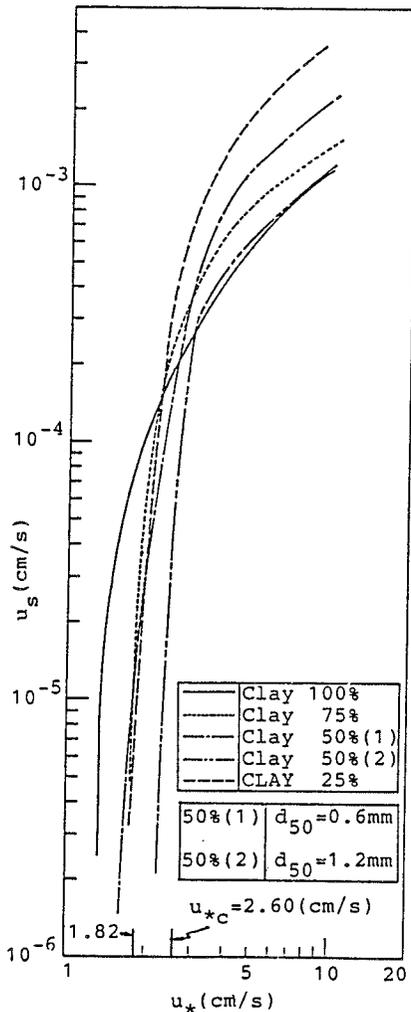


図-5 侵食速度と摩擦速度の関係

粘土分を有する砂れき床の侵食過程を図-6のように考え、このモデルを基に侵食速度の式を提案している。すなわち、砂れきの間隙には粘土分が存在し、粘土分のはく離と砂粒子のはく離とが交互に生じるものとする。ひとつの砂れき粒子のはく離過程に要する時間をT、周囲の粘土が侵食されて砂れきが移動しやすい状態になるまでの時間をT'、そのような状態になった後、実際に砂れきが移動するまでの時間をT''で表わして

$$T = T' + T'' \quad (1)$$

とし、さらに、T' および T'' を次式のように表わした。

$$T' = k_1 d / E \quad (2)$$

$$T'' = (1 - \lambda) \lambda d / q_b \quad (3)$$

ここに、k<sub>1</sub>：砂れきの存在が粘土の侵食に及ぼす効果ならびに砂れきの存在間隔によって決まる係数、d：砂れきの直径、E：粘土の侵食速度、λ：砂れき床の空隙率、λ：砂れきの平均移動距離、q<sub>b</sub>：砂れき床の平衡流砂量である。そして、砂れきの存在間隔をα' d、河床面の高さをz、時間をもととるとき、粘土分を含有する砂れき床の侵食速度u<sub>s</sub>は

$$U_s = \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\alpha' d}{T} = \frac{\alpha'}{k_1/E + (1-\lambda) \lambda d / q_b} \quad (4)$$

で与えられるとした。また、ベントナイト・砂混合物の粘性流路床の侵食実験ではλ = 100d、α' = 1、k<sub>1</sub> = 1とおくことによって実験結果を比較的よくシミュレートできると指摘している。

### 3.2 解析結果および考察

式(4)は粘土含有率100%の侵食速度Eがわかりさえすれば、α' およびk<sub>1</sub>を適当に与えることによって、その粘土分を有する砂れき床の侵食速度u<sub>s</sub>が計算できることを意味している。ここでは、この式を用いて実験に用いた材料の侵食速度について検討する。

まず、式(4)を用いるためには、係数α' およびk<sub>1</sub>を各材料によって決める必要がある。澤井によれば、α' = 1、k<sub>1</sub> = 1を用いることによって実験結果をシミュレートできるとしているが、図-5に示した実験結果からわかるように、侵食速度は各材料で大きく異っており、このα'、k<sub>1</sub>を用いて実験結果を表現することはできない。

α' は砂粒の存在間隔α' dを表わす係数であるから、各材料における砂粒子の幾何学的構成を図-7のように仮定すれば、試料は最適含水比で締固められているので、最大乾燥密度ρ<sub>d,max</sub>を用いて評価できる。すなわち、今、一辺の長さがα' dの立方体を考え、その各

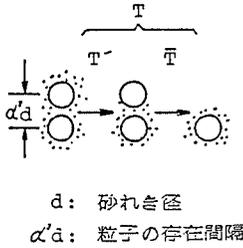


図-6 粘性土の侵食過程

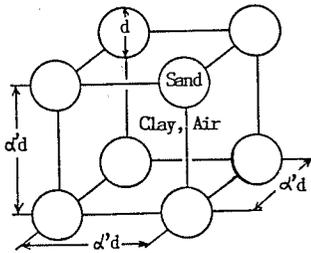


図-7 砂粒子の幾何学的構造

頂点に直径  $d$  の砂粒が図-7のように存在すると仮定する。この立方体に含まれる砂1つ分の質量を  $M_s$ 、粘土のそれを  $M_c$  とおくと、 $\rho_{d, \max}$  は次式のように表わされる。

$$\rho_{d, \max} = (M_s + M_c) / (\alpha' d)^3 \quad (5)$$

ここで、粘土含有率  $i\%$  の材料の  $\alpha'$  について考えると、 $M_s$  を砂の比重  $S$  と粒径  $d$  で表わせれば、 $\alpha'$  は式(5)を変形することにより次式で表現できる。

$$\alpha' = \left( \frac{(1+i(100-i)) \cdot 4/3 \cdot \pi}{\rho_{d, \max}} \right)^{1/3} \quad (6)$$

式(6)により計算した  $\alpha'$  の値を表-2に示す。この表より  $\alpha'$  の値は1程度であるが、粘土含有率が大きくなるほど  $\alpha'$  の値は大きくなっている。

つぎに、 $k_1$  について考える。 $k_1$  は式(3)を用いて次のように表わされる。

$$k_1 = E \cdot T' / d \quad (7)$$

表-2  $\alpha'$  および  $k_1$

Clay (%)	$\alpha'$	$k_1$ (実験値)	$k_1$ (粘着力比)
75	1.492	1.067	1.119
50	1.149	0.617	0.575
25	0.986	0.300	0.247
50 ( $d_{50}=0.12$ )	1.136	1.075	1.244

ここで、摩擦速度が砂の限界摩擦速度よりずっと大きい領域では  $T' \gg T$  と考えられるので、 $T'$  は式(2)における  $T$  とほぼ等しいと仮定できる。したがって、式(7)を  $\alpha'$  と  $u_s$  を導入して変形することができ、 $k_1$  は次式のように表わされている。

$$k_1 = \alpha' \cdot E / u_s \quad (8)$$

ここに、 $u_s$  は摩擦速度が大きい領域での各材料の侵食速度を表わしている。この領域では、どの材料においても  $u_s / u_{s, \max}$  が一定となっており、実験結果より  $E / u_s$  の推定が可能である。そこで、式(7)によって  $\alpha'$  と  $E / u_s$  の実験結果を用いて、式(8)から  $k_1$  の値を推定した。その結果は表-2に示した通りであって、粘土含有率が25%と75%とでは  $k_1$  の値は3倍も異っている。この  $k_1$  の値は侵食実験から得られたものであり、実験の粘性土材料に式(4)を適用して侵食速度を評価する場合何らかの方法でこの  $k_1$  を推定する必要がある。

表-1に示す各材料の土質特性と表-2に示す  $k_1$  の実験値を見比べると、 $k_1$  は各材料の粘着力  $C$  に比例していることが認められる。そこで、この粘着力  $C$  を用いて  $k_1$  の推定を試みる。粘土含有率  $i\%$  の材料の粘着力を  $C_i$  と表わすと、式(8)より粘土100%の場合  $k_1 = \alpha'$  となるので、 $k_1$  は次式のように表わすことができる。

$$k_1 = \alpha' \cdot C_i / C_{100} \quad (9)$$

上式で計算した  $k_1$  の値を表-2に示す。前に評価した  $k_1$  の実験値と式(9)による計算値は多少の違いはあるものの比較的よい一致を見せている。したがって、本実験で用いた材料の場合、式(9)を用いることによって各材料の  $k_1$  の値を十分表現できると思われる。

図-8は、式(7)で計算した  $\alpha'$  と式(9)で計算した  $k_1$  を式(4)に代入して各材料に対する侵食速度を求め、実験結果と比較したものである。なお、式(4)中の粘土

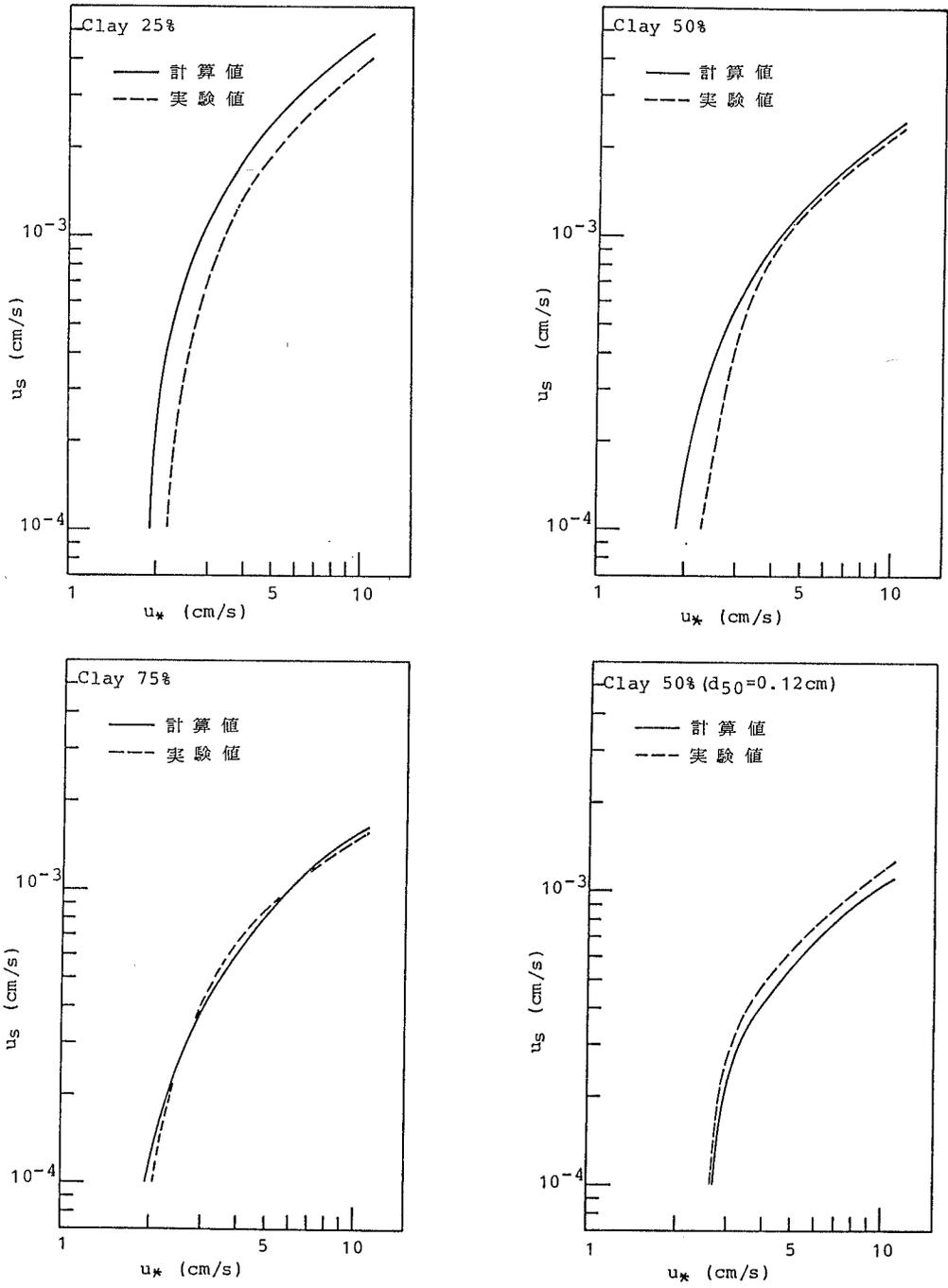


図-8 実験結果と計算結果の比較

100%の侵食速度Eは、実験結果をもとに近似的に次式で与えた。

$$\frac{E}{U_*} = 1.23 \times 10^{-4} \left(1 - \frac{U_{*c}^3}{U_*^3}\right) \quad (10)$$

ここに、 $u_{*c}$ は侵食限界摩擦速度で、本実験の場合は1.35cm/sである。また、平衡状態の流砂量 $q_b$ は芦田・道上式[2]を用いて評価した。

$$\frac{q_b}{\sqrt{sgd^3}} = 17 \left(\frac{U_{*c}^2}{sgd}\right)^{3/2} \left(1 - \frac{U_{*c}^2}{U_*^2}\right) \left(1 - \frac{U_{*c}}{U_*}\right) \quad (11)$$

ここに、 $u_{*c}$ は有効摩擦速度であるが、ここでは便宜的に $u_*$ と等しいと仮定した。粘土25%の材料では全体的に計算値が実験値をやや上回っているが、他の材料については比較的よい一致を示している。したがって、今回の実験に用いた粘性土材料に関しては、その材料中の粘土自体の侵食速度Eがわかれば、係数 $\alpha$ および $k_1$ を上記の方法で評価することにより、その粘性土材料の侵食速度 $u_s$ は式(4)を用いて十分計算できると考えられる。

#### 4. 結 語

本研究では、粘性土の侵食速度と流れの掃流力との関係を実験的に明らかにするとともに、従来の提案式の妥当性について検討を行なった。以下、本研究で得られた結果を要約すると、次のとおりである。

1) 実験結果より粘性土材料の侵食速度 $u_s$ は、その粘土含有率に関わらず摩擦速度 $u_*$ が大きくなるにつれて増加する。 $u_*$ がある程度大きくなると(本実験の場合5cm/s以上) $u_s$ と $u_*$ とはほぼ比例関係にある。そして、粘土含有率100%を除いたケースについては、その試料に混入している砂の限界摩擦速度 $u_{*c}$ 付近で $u_s$ が急激に小さくなる。また、 $u_*$ が大きい領域では、その材料の粘土含有率が大きくなるほど、さらに粘土含有率が同じでも混入している砂の粒径が大きいかほど $u_s$ が小さくなることが明らかとなった。

2) 上流からの流砂の堆積を無視した場合に対して、粘性土材料の侵食速度 $u_s$ を推定する式として式(4)が

澤井によって提案されているが、粘土100%の侵食速度Eが既知であること、砂粒子の存在間隔を表す係数 $\alpha'$ および係数 $k_1$ の値を与えてやる必要がある。本実験の結果より、この $\alpha'$ に関しては土の最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$ 、また $k_1$ に関しては土の粘着力Cに関係づけてこれらの係数値を求める方法を提示した。さらに、この方法で得られた高粘土含有率の粘性土材料の侵食速度の計算結果は、侵食実験結果を比較的良好にシミュレートできた。

以上が主要な結果であるが、推定式における係数 $k_1$ の決定方法に物理性がなく、粘性土100%の粘着力Cと侵食速度が既知であることという前提条件があるため、この推定方法にはまた問題点があり、今後さらに検討する必要があると思われる。

最後に、本研究の遂行にあたり、御協力頂いた澤田俊和氏(当時鳥取大学大学院、現在日本上下水道(株)勤務)ならびに岡芳幸氏(当時鳥取大学工学部学生、現在出雲市役所勤務)に感謝いたします。なお、本研究は文部省科学研究費補助金、自然災害特別研究(I)『洪水時における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究』(研究代表者:村本嘉雄)の一環として行ったものであることを記して、関係者各位に謝意を表します。

#### (参考文献)

- [1] 田中(澤井)健二：粘着性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究、1979。
- [2] 芦田和男：道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号、1972、PP. 59-69。