

鳥取大学工学部 正員 道上 正規
 鳥取大学工学部 正員 鈴木 幸一
 鳥取大学工学部 正員 ○檜谷 治
 日本上下水道設計(株) 正員 澤田 俊和

1. はじめに 従来より、砂礫のような非粘着性の土砂の流水による侵食特性は水理学的に詳細に検討されているが、粘性土の侵食特性に関する研究はあまりなされていない。しかし、河川堤防に対する法面あるいは河岸侵食など粘着性の土砂の侵食特性を考慮しなければならない問題も数多い。本研究は、掃流力を変化させて砂および粘土を混合した数種類の粘性土の流水による侵食速度を実験によって求めるとともに、澤井¹⁾が提案した粘土分を含有する砂れき床の侵食速度を計算する式の適合性を検討したものである。

2. 実験の概要 粘性土の侵食速度の測定は、図-1に示すような幅10cm、高さ5cmの断面をもつ矩形管路を用いて行なった。この装置は、水路中央の底部から資料をセットでき、油圧ジャッキによって上昇できるようにしている。管路内に

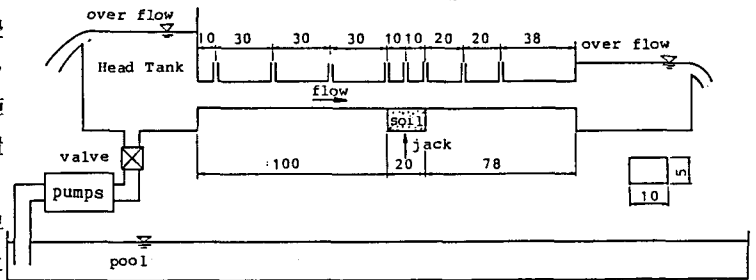


図-1 侵食実験装置概略図 (unit:cm)

通水した後、試料を侵食量に応じて目視によって試料の侵食面が管路床と同じ高さとなるように上昇させ、同時に、侵食量および管路内の水頭差を記録する。摩擦速度 u_{*c} は管内と試料侵食面の粗度を一定とみなし、管路上・下流部の水頭差から求めた。一方、侵食速度 u_s は記録した時間と侵食量を用いて最小二乗法で求めた。試料の作成は、最適含水比となるように材料の含水

表-1 粘性土の性質

試料	Clay (%)	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	粘着力 (N/cm ²)
(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($d_{50}=0.12$)	13.0	1.902	11.68

比を調整し角材で突固める。粘性土には、中央粒径 $d_{50}=0.6\text{mm}$ の砂と藤の森の粘土とを乾燥重量比で粘土含有率100%,75%,50%,25%となるように混合したものと、粘土含有率が50%で $d_{50}=1.2\text{mm}$ の砂を混合した計5種類を用いた。各粘性土の性質は表-1に示している。実験条件は、摩擦速度 u_{*c} が0.68~12.56cm/sec の範囲であり、実験の再現性を考慮して各試料に対して12~55ケースの実験を行なっている。

3. 粘性土の侵食特性 図-2は実験によって得られた各粘性土試料の侵食速度と摩擦速度との関係を表わしたものである。図中の曲線は実験結果の傾向を示したものであり、実際の結果はかなりのバラツキが見られた。また、図中に示している $u_{*c}=1.82\text{cm/s}$ および 2.60cm/s の値はそれぞれ試料に混入にしている砂の移動限界摩擦速度を表している。図より u_{*c} が大きくなるにつれて試料の侵食速度が u_s も大きくなり、 u_{*c} が5cm/sより大きい領域では u_{*c} と u_s がほぼ比例関係にあることがわかる。さらに、粘土含有率が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} 付近で侵食速度 u_s が急激に小さくなる様子が明らかである。つぎに、各曲線を比較すると、 u_{*c} が小さい領域では粘土含有率100%の侵食速度が砂混じり試料のそれよりも大きい、逆に u_{*c} の大きい領域では粘土含有率100%の試料が最も侵食速度が小さく、 $d_{50}=0.6\text{mm}$ の砂を含んだ試料については粘土含有率が少ないほど侵食速度が大きくなる傾向がある。また、 $d_{50}=1.2\text{mm}$ の砂を含んだ試料の侵食速度は $d_{50}=0.6\text{mm}$ の砂を含んだ試料よりも小さくなっている。したがって、 u_{*c} がある程度大きい領域では、一定の u_{*c} に対して粘土含有率が大きいほど、また粘土含有率が同じでも含まれている砂の粒径が大きいほど流水による侵食速度が小さくなることがわかる。

つぎに、実験結果と対応させることによって、澤井によって提案された粘性土の侵食速度を表す式(1)の適合性について検討する。

$$u_s = \frac{\alpha' d}{T + \bar{T}} = \frac{\alpha' d}{k_1 d/E + (1-\lambda) \bar{l} d / \bar{p}_b} \quad (1)$$

式中、 T' : 砂のまわりの粘土が侵食される時間、 \bar{T} : 砂が移動するまでの時間、 E : 粘土のみの試料の侵食速度、 \bar{l} : 砂れきの平均移動距離、 λ : 砂れき床の空隙率、 \bar{p}_b : 平衡流砂量、 k_1 : 砂礫の存在が粘土の侵食に及ぼす効果を表わす係数、 α' : 砂の存在間隔を表す係数である。澤井は粘土分を有する砂礫床の侵食過程を図-3のように考え、侵食速度の推定式として上式を提案しており、 $k_1=1$ 、 $\alpha'=1$ と置くことによって実験結果を良くシミュレートできるとしている。しかしながら、図-2に示した実験結果より侵食速度は各試料で大きく異っており、この k_1 、 α' を用いて本実験結果を表現することはできない。したがって、それぞれの試料に対してこれらの係数を決定することが必要となる。

まず、 α' は砂の存在間隔を表す係数であるから、試料中の砂の幾何学的構成を立方体と仮定すると試料の最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$ と粘土含有率 i より α' は次式によって評価できる。

$$\alpha' = \sqrt[3]{(1+i/(100-i)) \cdot \frac{4}{3}\pi / \rho_{d,max}} \quad (2)$$

つぎに、式(1)より、摩擦速度が大きい領域では $T' \gg \bar{T}$ であると推測されるので係数 k_1 は $k_1 = \alpha' E / u_{*c}$ と表すことができる。図-2より、この領域ではどの試料でも u_s / u_{*c} が一定となっているので実験結果より k_1 の推定が可能である。 α' と実験より求めた k_1 の値を表-2に示しているが、 α' はほぼ1程度である。しかし、 k_1 は各試料によって大きく異っている。 k_1 の実験値と表-1の粘着力 C を比較すると、粘着力と k_1 が比例関係にあることが認められる。そこで、粘土含有率 i の試料の k_1 はその試料の粘着力 C_i を用いて $k_1 = \beta C_i$ とおくと、粘土含有率100%の試料との関係より、次式ようになる。 $k_1 = \alpha' \cdot C_i / C_{100}$ (3)
上式より求めた k_1 の値を表-2に示しているが、多少の違いはあるものの比較的よく実験値を表現していると思われる。図-4は式(2)より求めた α' と式(3)より求めた k_1 を式(1)に代入して試料の侵食速度を求めた結果の一例を示したものであり、実験値と計算値は良い一致を見せている。ただし、式(1)中の \bar{l} は100d、 \bar{p}_b は芦田・道上式を用いている。

4. おわりに 粘性土の侵食速度に関して、澤井による提案式の適用性について検討したが、式中の k_1 について試料の粘着力との関係から評価することによってよいシミュレートができた。しかしながら、本実験は試料に関して同一の粘土でしかも最適含水比で突固めた実験であるので、粘土の種類、含水比の影響など今後さらに検討する必要があると思われる。

<参考文献>

1) 澤井 健二: 粘性性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究, 1977.

表-2 α' および k_1

Clay (%)	α'	k_1 (実験値)	k_1 (計算値)
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

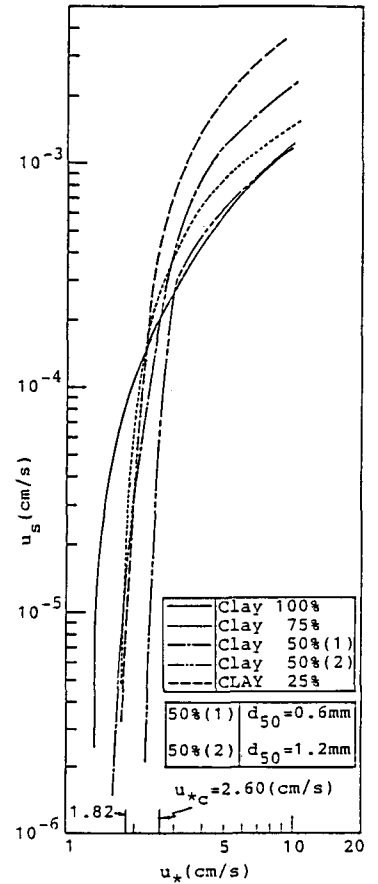


図-2 粘性土の侵食速度

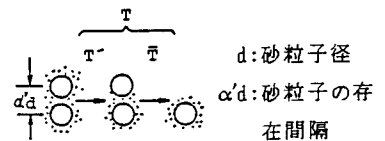


図-3 粘土分と砂の交互はく離

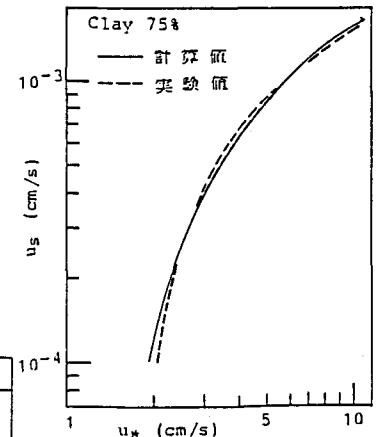


図-4 実験値と計算値