

# 砂・粘土混合材料の侵食速度測定と室内越流破堤実験

藤澤和謙\* 村上 章\*\* 西村伸一\*

\* 岡山大学大学院環境学研究所, 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1

\*\* 京都大学大学院農学研究所, 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

## 要 旨

本論文では、砂と粘土の混合土の侵食特性（土の侵食速度と流体から土表面に作用するせん断応力の関係）を測定した侵食速度測定試験と、同試験で用いた材料と同じ材料から作製した模型堤体の室内越流侵食実験の結果を示し、考察を行う。侵食速度測定試験では、土供試体の粘土の含有率と乾燥密度を変えて、土の侵食速度に対する粘土の含有量や密度の影響を明らかにした。堤体が越流による侵食を受ける際、その頂上での限界流によって侵食が生じる場合には堤体侵食の進展速度（堤高の低下速度）は堤体材料の侵食速度に相当する。堤体の越流侵食実験では、越流水の流れが限界流となる天端において堤体の侵食を実現させた。同実験の結果からは、堤高が低下する速度は侵食速度測定試験から得られた堤体材料の侵食速度とほぼ一致することが確かめられた。この結果により、堤体材料の侵食特性が把握されれば、限界流が堤体表面に作用するせん断応力を見積もることで、越流による堤体侵食の進展速度や破堤に至る時間が推定できることを示した。

キーワード：堤体, 越流, 侵食, 侵食速度, 室内実験

## 1. はじめに

近年、台風や集中豪雨時に防水や利水を目的とする堤防やため池等の土構造物が決壊に至る事例が多く報告されている。その主要な原因として越水が挙げられ、それは貯水位及び河川水位が堤高を上回り、水が溢れ出す現象を意味する。実際に2004年（平成16年）には台風23号により兵庫県淡路島において181個ものため池が決壊に至り、その多くは越流が原因であった（平成16年台風23号による淡路ため池被害調査団, 2005）。また同年には福井県福井市においても集中豪雨により足羽川の堤防が越水により破堤した（平成16年7月福井豪雨による地盤災害の緊急調査団, 2005）。最近では2009年8月に台風9号の通過に伴い、兵庫県西播磨地域の堤防が多くの箇所越水破堤に至ったなど、国内の越水被害は継続的に発生している。Foster et al. (2000) は過去に起きた世界中のフィルダムの決壊を統計的に分析した結果、全体の約48%が越水、約46%がパイピングによる決壊であったことを報告している。

このように、堤防、フィルダム、ため池等の土で造られた水利構造物にとって越水は破堤に至る可能性の高い脅威である。それらの構造物が越水を被ると堤体を構成する土が越流水によって侵食を受け、土粒子が流亡することで破堤に至る。現在では堤防やため池の越流対策が進められようとしている段階にあるが、いかに土材料の耐侵食性を評価して、越流被害についての効果的な対策を講じるかが重要な課題と考えられる。

表面の土粒子は水流からの摩擦力を受けることで、水中に取り込まれ流亡する。単位面積あたりに作用する摩擦力はせん断応力と呼ばれ、侵食が生じ始めるせん断応力は限界せん断応力と呼ばれる。この限界せん断応力とあるせん断応力下での侵食速度を知ることが土の侵食特性の把握となる（本論文では侵食速度を水流を受けている土の単位面積あたりから単位時間の間に侵食される土の体積と定義する）。越流破堤を考える上で、堤体材料の侵食速度を把握することは基礎的かつ重要な研究課題であるが、現在のところ侵食と越流破堤に関する研究では以下の問題がある。

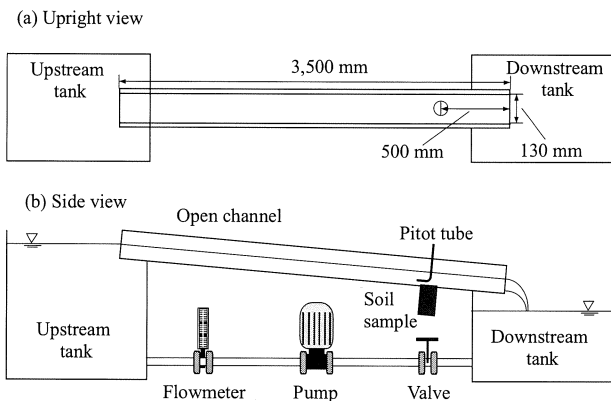
1. 土の侵食速度の測定にはいくつかの試験法（e.g., Sargunam et al., 1973; Shaikh et al., 1988; Briaud et al., 2001）が存在し、土の侵食試験法が確立していない。また、砂などの非粘着性の材料に比べて、細粒分を含む粘着性を有する材料の侵食に関する研究は少ない（Briaud et al., 2001）。
2. 侵食特性が既知である材料を用いた越流破堤実験はこれまで行われていない。そのため、越流破堤現象について侵食特性の測定値を基にした実験的研究が進んでおらず、材料の侵食特性と越流による堤体侵食の関連性が明らかになっていない。

堤防やため池には細粒分を15~50%程度含んだ弱い粘着性を有する材料がよく用いられる。堤体の越水対策を考えるにあたっては、このような材料の侵食特性を適切な試験方法を用いて測定を行い、その結果を越流対策に活かす必要がある。以上の観点から、本論文の目的は以下の2点に

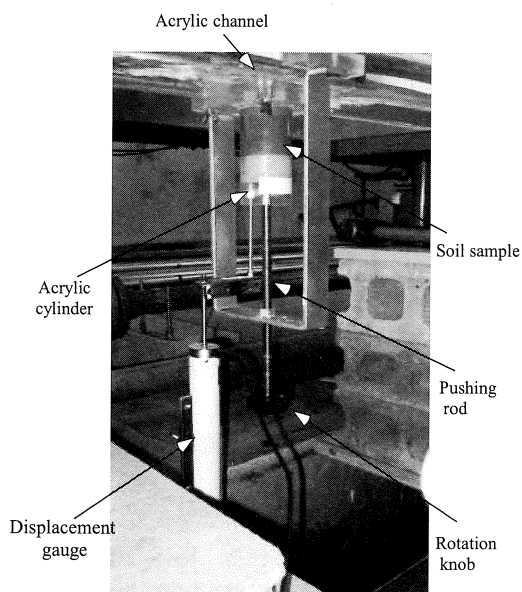
ある。

1. 粘着性を有する材料の侵食特性を把握するのに適した侵食速度測定法を提案し、粘土を混合した砂の侵食特性を調査する。
2. 侵食特性を把握した弱い粘着性を有する材料を用いて越流破堤実験を行い、堤体の越流破堤現象について、侵食の観点から実験的な考察を行う。

本論文ではまず、土の侵食速度を測定する方法について既往の研究と比較して説明を行う。侵食速度の測定では、流体が土表面に作用するせん断応力と試験対象である土材料の侵食速度との関係を求めることが目的であり、試験法によってせん断応力と侵食速度の測定方法が異なる。本論文では粘土を混合した砂を用い、土供試体を可動式にして行った侵食速度測定試験（以後、「侵食試験」と呼ぶ）の結果を示す。この試験により砂・粘土混合材料の侵食特性を把握する。その後、侵食試験と同じ土材料で作製した堤体



**Fig.1** 侵食試験装置の概要  
Schematic diagram of experimental apparatus with an open channel for measuring erosion rates



**Fig.2** 土供試体の設置状況  
The soil sample attached beneath the test channel

模型を用いた室内越流破堤実験（以後、「堤体の越流侵食実験」と呼ぶ）を行った結果について報告を行う。その中には、土質材料の侵食特性から越流破堤現象を考察し、堤体侵食の進展速度を推定する方法を提案する。

## 2. 侵食速度測定試験

### 2.1 試験装置と既往の侵食速度試験法

土の侵食速度の測定では土表面に作用するせん断応力と対象となる土質材料の侵食速度の関係を明らかにする。試験では水流によるせん断応力が土供試体表面に対して一様に作用したとき、均一に侵食される土の体積を計測する。

**Fig.1**に侵食試験装置の概要を示す。厚さ 10mm の透明アクリルを使って長さ 3,500mm, 幅 130mm の開水路を作製した。水路の上下流に貯水タンクを設け、ポンプにより下流側タンクから上流側タンクへと水（水道水）を汲み上げることで水路内に水を循環させた。本試験装置には水路下流端から 500mm 上流の水路底面部に直径 50mm の円形の穴を開け、この部分に侵食される土供試体を設置した。供試体の設置場所は水路入口から十分下流側にあるため、そこを流れる水流はほぼ等流の状態が実現する。後述するように、供試体近傍の流速分布をピトー管を用いて測定し、それにより供試体表面に作用するせん断応力を推定した。このせん断応力の算定方法は Shaikh et al. (1988), Briaud et al. (2001), 関根ら (2001) と同様の方法である。水路を流れる流量と水路の勾配を調節することで、供試体表面に作用するせん断応力を変化させた。本試験に用いたポンプは最大 400ℓ/min の流量を流すことが可能であり、ピトー管によって流速が測定できるように流速の速い場合でも 3~4cm 程度の水深を確保した。

既往の研究では、水路一面に計測対象の土を敷き詰める試験方法 (Partheniades, 1965 ; Murray, 1977) やせん断応力を流速分布から推定するのではなく直接的に計測する試験方法 (Sargunam et al., 1973) も存在する。Partheniades (1965) や Murray (1977) が水路の底面部に粘土を敷き詰めた後、水路に水を流して水路底面部の土を侵食させ、流れ出した土砂量から侵食速度を求めている。しかし、Partheniades (1965) の報告にあるように、水路底面部に敷き詰められた土が均一に侵食されない。そのため、水流のエネルギー損失（水頭損失）は土表面に対する摩擦によるエネルギー損失以外にも、不均一な侵食によって形成された凸凹な底面形状によるエネルギー損失を含んでいるため、エネルギー勾配から正確なせん断応力を算定することが困難である。Sargunam et al. (1973) は粘土を対象として、試験機セル内の流体中で円筒供試体を円筒中心軸に対して回転させることで供試体表面を侵食させ、回転に必要なトルクから土供試体表面に加わるせん断応力を測定した。彼らの試験法は直接的にせん断応力を測定できる点で優れているが、供試体を水中で回転させるため砂分を多く含む材料には適用が難しい。

以上の理由から、本試験では水路底面の一部のみに土供

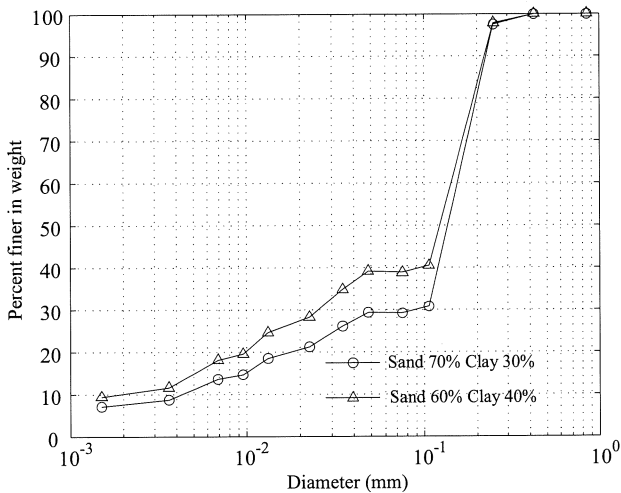


Fig.3 試験試料の粒径加積曲線  
Particle distribution curves of test materials

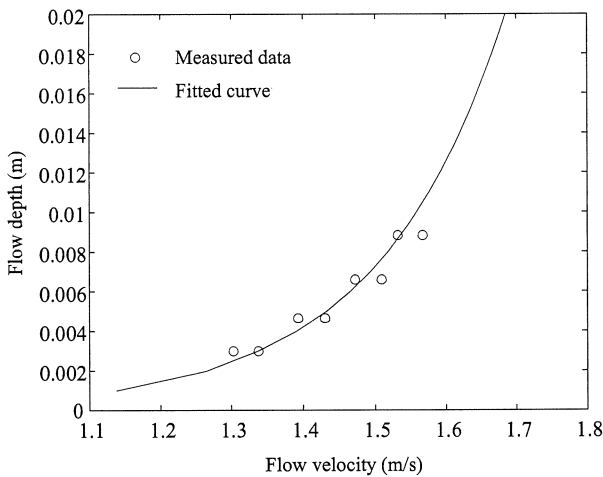


Fig.4 流速測定結果の一例  
An example of measured flow velocities

試体を設置し、せん断応力は流速分布から推定する方法を採用した。Fig.2には開水路の底面部に設置された土供試体の様子を示す。本試験では土試料の侵食は比較的速く進行し、侵食の進展によって土供試体表面と水路底面部に高低差が生じる。供試体の下部には押し上げ用のロッドが取り付けられており、ロッド下端のつまみを回すことで供試体を上方向に移動可能とした。Briaud et al. (2001)も砂質土の侵食速度を測定する方法として供試体が可動式の侵食試験装置を提案し、それを用いて行った侵食試験結果を報告している。

## 2.2 試験材料

試験材料には豊浦砂と細粒土の混合土を用いた。豊浦砂は平均粒径 0.2mm、土粒子密度 2.62g/cm<sup>3</sup>の粒径の整った砂であり、細粒分を含まない。試験に用いた細粒土（細粒分含有率 100%）は液性限界 35%、塑性限界 25%、塑性指数 10%のコンシステンシーを有し、土粒子密度 2.69g/cm<sup>3</sup>の低液性限界の粘土である。本試験では混合割合として豊浦砂

と粘土の質量比が 7:3 と 6:4 の 2 種類の試料を用意した。Fig.3 に混合土の粒径分布を示す。締め固め試験の結果から、砂と粘土の混合比が 7:3 の試料の最適含水比は 12.3%、最大乾燥密度は 1.86g/cm<sup>3</sup>、混合比が 6:4 の試料の最適含水比は 12.9%、最大乾燥密度は 1.88g/cm<sup>3</sup>と求められた。侵食試験に必要な供試体は水路底面部に設置されるアクリル円筒内 (Fig.2 参照) で毛管作用によって飽和させた試料を圧密することで作製した。アクリル円筒は内径 50mm、外径 60mm、高さ 130mm であり、その内部で圧密により作製される供試体は直径 50mm、高さは約 90mm となった。圧密による供試体の圧縮量を調節することで作製される供試体の乾燥密度を調整した。

## 2.3 試験方法

侵食試験ではまず、土供試体の入ったアクリル円筒を開水路底面部に Fig.2 に示すように設置する。水路底面部と供試体の上面は同じ高さに合わせ、供試体表面に作用するせん断応力を求めるため、水路を流れる水の流速を測定する。流速測定の間は供試体が侵食されることのないよう、その表面をビニールフィルムで覆った。流速の測定地点は供試体のすぐ上流地点であり、130mm の幅を持つ水路の中央において水深方向の流速分布をピトー管（管径 6mm）により測定した。Fig.4 に測定された流速分布の一例を示す。アクリル水路を流れる水の流速は、水路底面部付近では以下の対数則が成立する（福津・富永, 2000）。

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{U_* y}{\nu} \right) + A \quad (1)$$

ここに、 $u$  は流速、 $U_*$  は摩擦速度、 $y$  は水路底面部からの高さ、 $\nu$  は水の動粘性係数、 $\kappa$  はカルマン定数 ( $\approx 0.41$ )、 $A$  は実験定数 ( $\approx 5.29$ ) である。測定した水深方向の流速分布が式 (1) に合致するよう、最小二乗法によって摩擦速度  $U_*$  を決定し、式 (2) に示す摩擦速度の定義式から水路底面部に作用するせん断応力  $\tau$  を算定した。

$$U_* = \sqrt{\tau / \rho} \quad (2)$$

ここに、 $\rho$  は水の密度である。

流速測定を終えた後、土供試体の侵食速度の測定を行う。流速測定の際に供試体上部を覆ったビニールフィルムを取り去ることで供試体上面の侵食を開始した。侵食開始前は水路底面部と同じ高さであった土供試体の上面は、侵食によって低下し始める。本試験では水路底面部と供試体上面に高低差が生じることのないように、つまみを手動で回すことで慎重に供試体を押し上げ、その変位を変位計によって計測した (Fig.2, 5 参照)。この際、押し上げ速度が遅く、供試体上面が水路底面部よりも低くなると、Fig.6 (a) に示すように供試体表面の下流側に著しくせん掘が生じ一様な侵食が実現されない。一度せん掘が始まると、供試体の下流部は 4cm 程掘り下げられる。また、押し上げ速度が速い場合には Fig.6 (b) に示すように水流が衝突することによって供試体上面は、下流側に比べて上流側の方で侵食が卓越

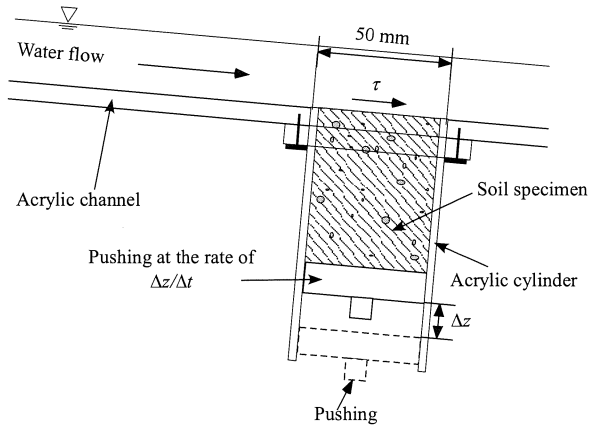


Fig.5 土の侵食測定の概略図

Schematic diagram of the measurement of erosion rates

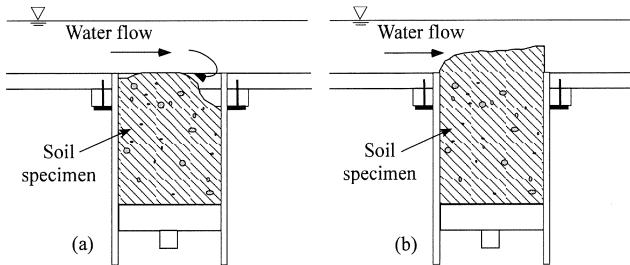


Fig.6 供試体の押し上げ速度の違いによる侵食の様子  
Erosion profiles dependant on the pushing rate

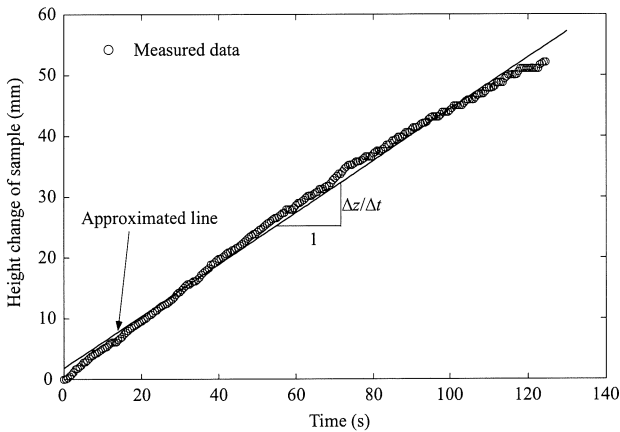


Fig.7 侵食による供試体高さの時間変化

Temporal alteration of the height of a soil specimen

し、供試体表面で一様な侵食は生じない。そのため、供試体の押し上げは一様な侵食が生じるように、侵食の速さに応じて慎重に行う必要がある。具体的には水路底面と供試体表面が同じ高さになると 0.3~0.4mm ほど (ハンドル 1/2 回転程度) を押し上げ、侵食により供試体表面が水路底面まで低下するとまた同様に供試体の押し上げを行うことを繰り返した。一様な侵食が実現されなかった場合は試験を中止することとした。時間間隔  $\Delta t$  の間に押し上げられた供試体の変位を  $\Delta z$  とすると、侵食速度  $E$  は以下の式 (3) で

Table 1 侵食速度測定結果

Results of measured erosion rates and shear stresses

混合比 (%)	乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	せん断応力 (Pa)	侵食速度 ( $\text{mm}/\text{s}$ )
70/30 (○)	1.580	9.1	1.93	0.083
	1.580	9.1	1.93	0.082
	1.580	8.0	0.84	0.012
	1.580	8.7	1.51	0.035
	1.580	8.7	3.26	0.317
	1.582	9.1	4.54	0.549
	1.578	9.3	2.81	0.189
70/30 (▽)	1.686	13.0	1.68	0.031
	1.696	12.9	2.28	0.062
	1.683	11.8	0.87	0.003
	1.691	10.8	4.55	0.258
	1.681	10.5	6.19	0.623
	1.686	10.5	5.59	0.488
	1.686	10.5	5.59	0.509
	1.683	10.5	3.64	0.211
	1.691	10.1	1.86	0.053
60/40 (●)	1.587	9.0	5.66	0.255
	1.587	9.9	4.19	0.138
	1.586	9.7	3.03	0.078
	1.586	10.0	2.03	0.029
	1.584	11.2	0.90	0.010
	1.587	9.7	7.28	0.458
	1.588	9.7	7.16	0.504
	1.588	9.7	7.16	0.504
60/40 (▼)	1.678	9.1	2.73	0.016
	1.678	9.1	2.73	0.024
	1.682	9.1	4.12	0.037
	1.686	9.3	5.73	0.077
	1.693	8.6	7.30	0.091
	1.676	8.8	7.36	0.128
	1.684	9.3	9.40	0.245
	1.684	9.3	9.40	0.245
60/40 (■)	1.783	10.3	7.25	0.100
	1.784	10.9	8.30	0.143
	1.781	11.0	9.21	0.151
	1.780	11.4	5.90	0.084
	1.783	11.3	4.55	0.049
	1.782	11.9	2.97	0.024
0/100 (×)	1.667	9.1	9.41	0.015

与えられる (Fig.5 参照).

$$E = \frac{\Delta z}{\Delta t} (1 - n) = \dot{z} (1 - n) \quad (3)$$

ここに、 $n$  は土供試体の間隙率である.

Fig.7 に供試体の押し上げ変位と経過時間の関係の一例を示す. 式 (3) にある  $\dot{z}$  は Fig.7 に示すプロットの傾きで与えられる. 同図に示す測定データを最小二乗法によって直線近似し, その傾きを  $\dot{z}$  の値とし, 式 (3) を用いて侵食速度を決定した.

### 2.4 侵食試験の結果と考察

試験に用いた材料は, 豊浦砂と粘土を質量比にして 7:3 と 6:4 の割合で混合した 2 種類の試料である. 侵食速度の測定に当たっては, 砂と粘土を 7:3 で混合した試料については供試体の乾燥密度がおよそ  $1.58 \text{ g/cm}^3$  と  $1.68 \text{ g/cm}^3$  となるように調節し, 混合比が 6:4 の試料については乾燥密度がおよそ  $1.58, 1.68, 1.78 \text{ g/cm}^3$  の供試体を作製して試験を行った. それら試料の侵食速度の測定結果を Table 1 にまとめる. 既往の研究から粘土の侵食速度が温度に依存することが知られている (関根ら, 2001). 本試験は冬季に集中的に行うことで温度の影響を最小限に抑えた (Table 1 に示すように, 試験中の水温はほとんどの試験において  $9 \sim 12^\circ\text{C}$  である). Table 1 の最下行には砂を全く混合していない材料の侵食速度を参考のため示している. 粘土のみの供試体の場合は,  $9.41 \text{ Pa}$  のせん断応力が作用しても, その侵食速度は砂が混合された材料のそれに比べて極めて小さい.

Fig.8 は試験から得られた侵食速度とせん断応力の関係を示したものである. 同図中の試験データのマーカーは混合比と乾燥密度に応じて整理した Table 1 の第 1 列目に示すマーカーに対応している. Table 1 および Fig.8 から, 粘土を含む材料の侵食速度について以下の事実が見てとれる.

1. 乾燥密度が同じ供試体であれば, 粘土の含有率が大きいほど侵食速度が小さくなる.
2. 粘土の含有率が同じ材料では乾燥密度が大きくなるにつれて侵食速度が小さくなる傾向にある. しかし, 粘

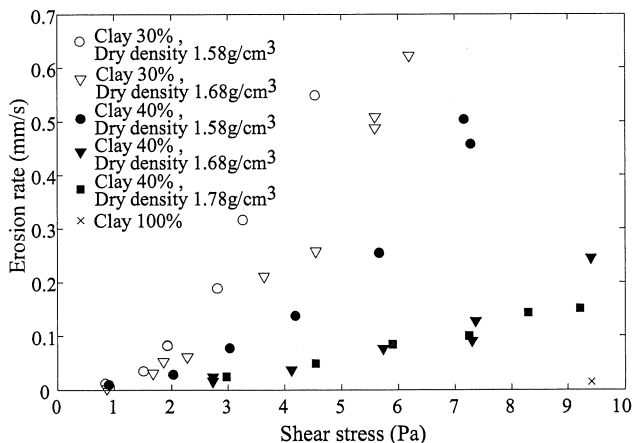


Fig.8 流体によるせん断応力と侵食速度の関係  
The relationship between shear stress and erosion rates

土含有率が 40% の供試体の結果から分かるように, ある程度密度が大きくなると, 侵食速度の変化はほとんどなくなる.

3. 侵食が開始するせん断応力 (=限界せん断応力) の変化は小さい. 砂と粘土を 7:3 で混合した材料においては  $1 \text{ Pa}$  程度であり, 砂と粘土が 6:4 の材料では  $1 \sim 2.5 \text{ Pa}$  程度となる (なお, 砂と粘土が 6:4 の材料では密度が大きくなると  $1 \text{ Pa}$  程度のせん断応力ではほとんど侵食は発生しない).

粘土は基本的に砂に比べて侵食速度が小さい. したがって, 材料に含まれる粘土の量が多くなれば侵食速度が小さくなる. また, 乾燥密度の増加に伴って砂粒子周辺の間隙が少なくなり, 粘土によって砂粒子が拘束されるため, 密度の増加とともに侵食速度は減少する傾向にあると考えられる.

### 3. 模型堤体を用いた室内越流侵食実験

ここでは, 前章で報告した侵食試験で用いたものと同じである豊浦砂と粘土を 7:3 で混合した材料から作製した堤体の越流侵食実験の結果を報告する. その後, 侵食速度に関する測定データを基にして, 堤体の越流侵食について考察を進める.

#### 3.1 堤体の越流侵食について

堤体を流れる越流水は天端で限界流となり, 下流側斜面では流速を増加しながら射流となって流下する (Fig.9 参照). 堤防やため池等の堤体が越流による侵食を受ける際,

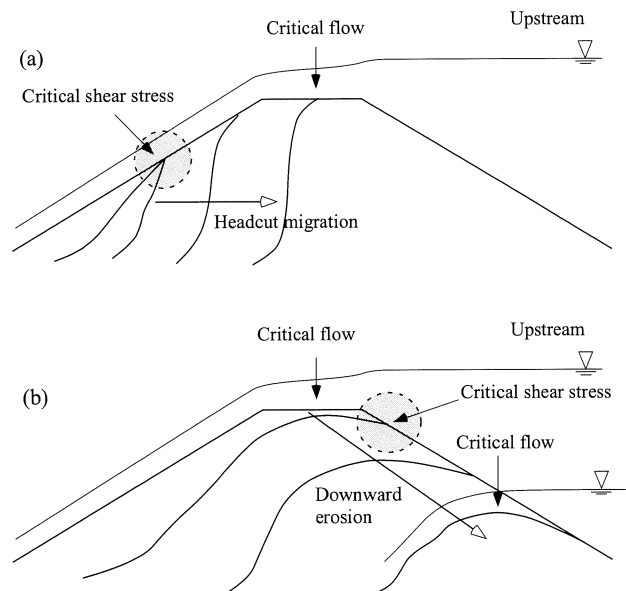


Fig.9 堤体の侵食過程 ((a) 射流域のみで侵食が生じる場合, (b) 常流域でも侵食が生じる場合)  
Erosion processes of embankments: (a) Erosion starts at the downstream slope in the supercritical region, (b) Erosion occurs in the subcritical region as well as the supercritical region

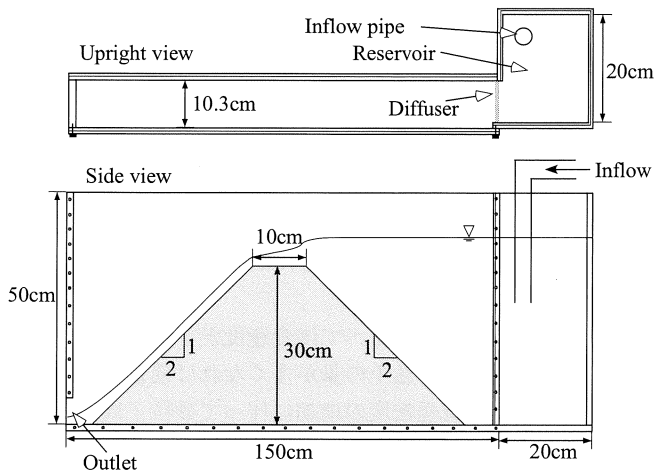


Fig.10 実験水槽と模型堤体の概略図

Schematic diagram of the experimental aquarium and the model embankment for the overflow erosion test

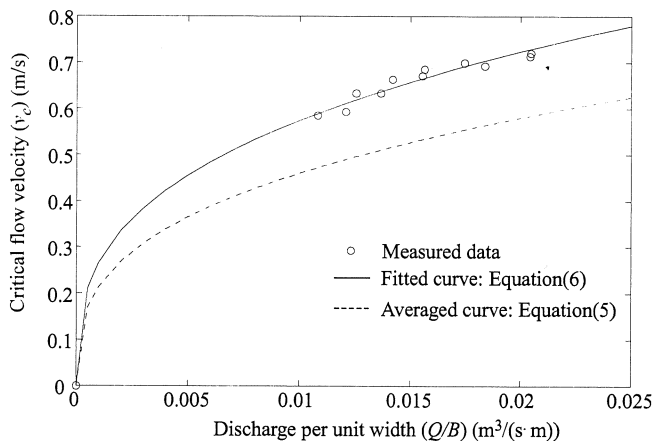


Fig.11 限界流速測定結果

The measured critical flow velocities and the fitted curve

その侵食過程は大きく 2 つに分類される。1 つ目は、流速が大きくなる下流側斜面の法尻側から侵食が始まるケースである (Fig.9 (a) 参照)。これは、下流側斜面にて越流水から堤体表面に作用する摩擦力が限界せん断応力に達する場合に対応する。この場合、侵食は射流域で生じるため堤体形状の変化は上流に伝播せず、侵食によって下流側斜面の一部がほぼ鉛直な面に変化する。この鉛直面はその底部が落下流による侵食を受けることで上流側へと進展していくことで決壊に至る (e.g., Hanson et al., 2005; Hanson et al., 2001; Bennett et al., 2000)。この場合、堤体の幅が大きければ、侵食によって形成された鉛直面が上流側斜面に到達するのに時間を要するため、破堤時間は堤体幅に左右される。この侵食過程は、粘性土を多く含む侵食に対する抵抗性を有する材料で造られた堤体が越流を被る時や、越水量が少ない場合に見られる。2 つ目は、下流側斜面だけでなく天端でも侵食が生じるケースである (Fig.9 (b) 参照)。これは、限界流においても侵食が発生し、流速が比較的小さな常流域にて水流による摩擦力が限界せん断応力に達している場合に対応する。この場合は、下流側斜面 (射流域)

だけでなく天端 (常流域+限界流) でも侵食が生じるため、堤体の形状は全体的に変化する。限界流による侵食は下方へと進行することで堤高が減少し、決壊に至る。そのため、破堤に要する時間は堤高に左右される。この侵食過程は細砂等の侵食が容易に生じる材料 (限界せん断応力が小さな材料) でできた堤体が越水を被る時や、越水量が多い場合に見られる (e.g., Coleman et al., 2002)。

前者の侵食過程では鉛直面の底部に作用するせん断応力を見積もることが難しいため、鉛直面の進行速度を予測することが困難である。後者の場合は堤体が侵食される間、堤体の頂上では常に限界流が生じており、堤高が低下し続ける。したがって、限界流における侵食速度を見積もることによって堤体侵食の進行速度 (堤高の低下速度) を推定することが可能である。以下に述べる堤体の越流侵食実験では、侵食速度の測定値を利用し、上述した後者の侵食過程に関して堤体侵食の進行速度の推定を行う。

### 3.2 実験内容

Fig.10 に堤体の越流侵食実験に用いた実験装置の概略を示す。厚さ 1.5cm の透明なアクリルを用いて、同図に示すような幅 150cm、高さ 50cm、奥行き 10.3cm の実験水槽を作製した。水槽の上流端には整水網を介して幅 20cm、高さ 50cm、奥行き 20cm の貯水槽を付設した。作製する模型堤体の大きさは高さ 30cm (奥行きは水槽幅と同じ 10.3cm)、上下流に 1 : 2 の法面勾配と有するものとした。

模型堤体を作製するのに用いた材料は、豊浦砂と粘土を質量比にして 7 : 3 で混合したものであり、前章の侵食試験で用いた材料と同じである。堤体は実験水槽の中で 6 層に分けて突き固めを行い、Fig.8 に示すせん断応力と侵食速度の関係を利用する目的で乾燥密度がおおよそ  $1.6\text{g/cm}^3$  になるように調節した。締固め時の含水比はおおよそ 11% に調整した。堤体の乾燥密度は締固めの後に成形した模型堤体の質量と含水比から算出した。各締固め層の上部は下部に比べて密度が大きくなる傾向にある。砂と粘土の混合材料は前章の結果から分かるように、乾燥密度が侵食速度に大きく影響する。そのため、1 層毎に締固め層の上部を取り除きながら締固めを進めることでなるべく均一な密度を持つ模型堤体を作製した。堤体の越流侵食実験を行う際は、ポンプにより貯水槽へと送水し、実験中は送水量をほぼ一定に保ちながら、その流量の値は流量計を用いて 0.5 秒間隔でデジタルデータとしてコンピュータに取り込んだ。また、実験中の堤体の侵食過程はデジタルビデオカメラを用いて記録した。

### 3.3 限界流速

本実験では、Fig.9 (b) に示すように堤体の頂上での限界流において堤体侵食を生じさせ、その進行速度を観察する。堤体侵食の進行速度について考察を行うには、限界流において発生しているせん断応力を見積もる必要がある。本実験では堤体の粗度と堤体表面近傍の平均流速を用いて、堤

体表面に作用するせん断応力の推定を行う。長方形水路における限界水深  $h_c$  は以下の式 (4) で与えられる (禰津・富永, 2000)。

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} \quad (4)$$

ここに、 $Q$ 、 $B$ 、 $g$  はそれぞれ流量、水路幅、重力加速度の大きさである。式 (4) から限界流速  $v_c$  を求めると

$$v_c = \frac{Q}{B h_c} = \sqrt[3]{\frac{Qg}{B}} \quad (5)$$

となる。しかし、式 (5) は奥行き方向にも、水深方向にも平均化された限界流速である。越流水の水路幅は実験水槽の奥行き 10.3cm と狭いため、側面の摩擦の影響から式 (5) では流速の卓越する水路幅中央付近における堤体表面付近の流速を正確に見積もることができない。そこで、限界流速での流速を把握するため、表面に試験材料を張り付けた耐侵食性の発砲スチロール堤体を実験水槽に設置し、ピトー管 (管径 6mm) を用いてその天端において限界流速の測定を行った。この限界流速測定実験に用いた発砲スチロール堤体の大きさは Fig.10 に示すものと同一である。限界流速の測定場所は水深が式 (4) で与えられる限界水深と一致するところであり、実験水槽の奥行き方向には中央部とした。

Fig.11 に流量と限界水深における流速の関係を示す。流速測定は水深毎に堤体表面の近傍を重点的に行ったが、深さ方向には顕著な差はなく、同図には堤体近傍の平均流速を示している。Fig.11 からは測定された限界流速は式 (5) よりも大きくなるのが分かる。これは、実験水槽の側面では流速が小さいため、水路中央部では相対的に流速が大きくなるためである。得られた測定データを最小二乗法によって近似曲線を求めて式 (5) を補正すると

$$v_c = \alpha \sqrt[3]{\frac{Qg}{B}} \quad , \quad \alpha = 1.25 \quad (6)$$

となる。式 (6) から水路幅中央部では式 (5) に比べて 25% 程度大きな流速が生じていることが分かる。本実験では式 (6) を用いて流量から限界流速を求めることとした。

### 3.4 実験結果と考察

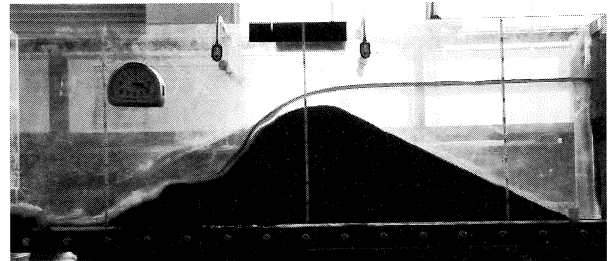
#### 3.4.1 堤体の侵食過程

ここでは、まず堤体の越流侵食実験の結果を報告する。実験はほぼ同様の条件で 2 回行った。Table 2 にそれぞれの実験での実験条件 (堤体の乾燥密度、越流水の水温、越流量) をまとめる。Fig.12, 13 には 2 回の越流侵食実験における堤体断面の変化を示す。2 回の実験ともに堤体の断面形状はほぼ同様の変化をすることが見てとれる。両図の下部に示す堤体断面の形状変化図は撮影したデジタル画像をトレースして作成したものである。越流初期には下流側法面の侵食が卓越しながら、天端も侵食を受けて堤高は少しずつ低下を始める (Fig.12, 0~1min ; Fig.13, 0~2min)。

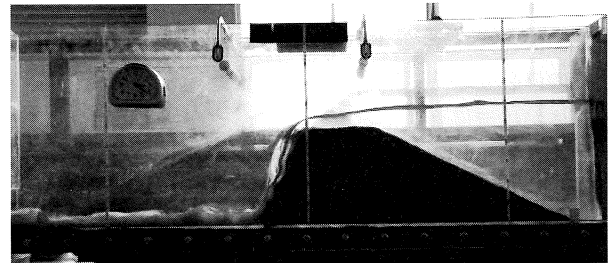
Table 2 堤体の越流侵食実験における実験条件

Experimental conditions of embankment erosion tests

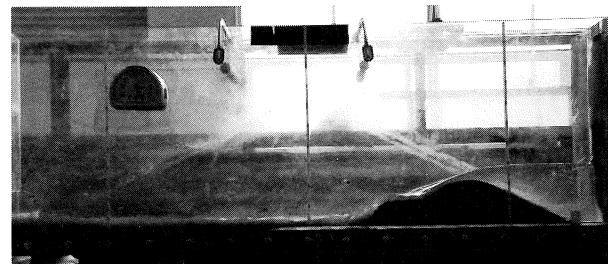
実験 No.	乾燥密度 $g/cm^3$	越流量 $m^3/s$	水温 $^{\circ}C$
1	1.597	$2.14 \times 10^{-3}$	11.1
2	1.656	$2.13 \times 10^{-3}$	12.1



1 min after overflow



3 min after overflow



8 min after overflow

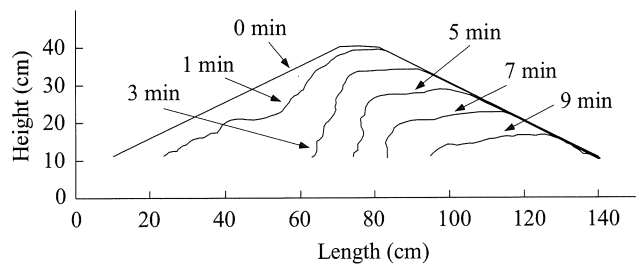


Fig.12 越流侵食による堤体断面の変化 (実験 1)

The alteration of the embankment profile due to overflow erosion (Experiment 1)

越流による侵食が進むにつれて、下流側斜面はほぼ垂直な形状となる (Fig.12, 3min ; Fig.13, 4min)。このようなほぼ鉛直な侵食断面はヘッドカット (Headcut) と呼ばれ、既往の堤体の越流侵食実験でも多く報告されている (e.g., Fujisawa et al., 2009 ; Hanson et al., 2005 ; Zhu, 2006)。その後、堤体は頂上部が侵食され、堤高を失うことで決壊に



至る (Fig.12, 3~9min ; Fig.13, 4~12min). この堤体の侵食過程は, 天端の限界流域においても侵食が生じる Fig.9 (b) に示した侵食過程に対応し, 堤高の低下とともに堤体断面の面積は急激に減少する. この侵食過程では堤体の頂上部で生じる限界流によって常に堤体侵食が生じているため, 堤高は低下し続ける. したがって, 堤体の低下速度と限界流における堤体材料の侵食速度は基本的に同等のものである.

### 3.4.2 堤体の低下速度と堤体材料の侵食速度

時間間隔  $\Delta t$  の間に, 天端が侵食を受けて  $\Delta h$  だけ低下したとすると, 式 (3) を参考にして限界流における侵食速度  $E_c$  は以下の式で計算される.

$$E_c = \frac{\Delta h(1-n)}{\Delta t} \quad (7)$$

ここに,  $n$  は堤体の間隙率である. 堤体材料の侵食特性が既知の場合は, 限界流におけるせん断応力から侵食速度  $E_c$  を算出し, 式 (7) を  $\Delta t$  について解くことで堤高が  $\Delta h$  低下するのに必要な時間を求めることができる. 例えば堤高  $H$  の堤体が越流侵食によって堤高がなくなる (完全に決壊に至る) のにかかる時間  $T$  は式 (7) において  $\Delta h \rightarrow H$ ,  $\Delta t \rightarrow T$  とすることで

$$T = \frac{H(1-n)}{E_c} \quad (8)$$

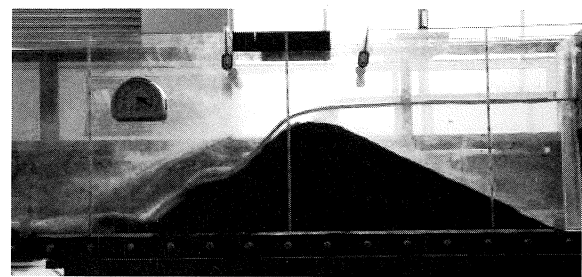
となる. ここでは, 限界流におけるせん断応力は摩擦損失係数  $f$  を与えることで, 限界流速  $v_c$  から

$$\tau = \frac{1}{8} \rho f v_c^2 \quad (9)$$

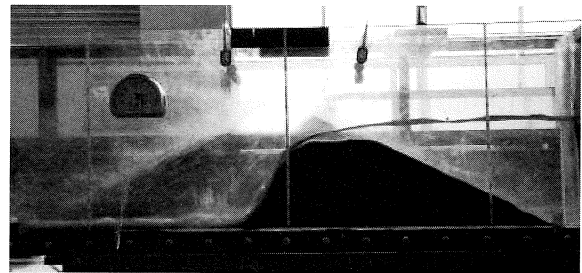
と推定する. 本実験で作製された堤体の乾燥密度は Table 1 に示す侵食試験に用いた供試体のそれとは若干異なる. そこで, 式 (7) 及び式 (8) から得られる限界流における侵食速度とせん断応力の関係が Fig.8 上のどこに位置するかを調べることで, 堤体侵食の進展速度 (堤体の低下速度) と堤体材料の侵食速度の関係を考察する.

限界流における堤体の侵食速度について考えると, 実験番号 1 の越流侵食実験 (以下, 実験 1 と呼ぶ) では高さ 300mm の堤体が侵食を受けて 566 秒後に 50mm となった. 模型堤体の間隙率は 0.395 であり, この結果を式 (7) に代入することで限界流における侵食速度は 0.267mm/s と算定される. 実験番号 2 の越流侵食実験 (以下, 実験 2 と呼ぶ) では, 堤体の間隙率は 0.373 であり, 堤高は 685 秒かけて 300mm から 50mm となった. 先ほど同様に式 (7) から限界流における侵食速度は 0.229 mm/s と推定された.

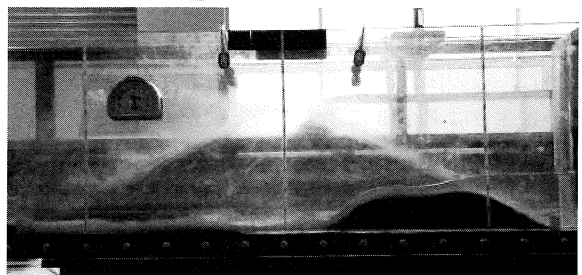
限界流におけるせん断応力は堤体表面の粗度高さを与えることで, 表面流速の対数分布速から推定する. 堤体の作製に用いた砂分の粒径は約 0.2mm と整っているが, 締固めの際に加水すると細粒分の存在によって団粒化する. Fig.14 には堤体作製時の土材料の写真を示す. 同図からは 1mm 程の団粒が多く存在することが見てとれる. 一般に, 侵食にさらされる自然材料の等価粗度高さは, その材料の粒径よりも大きくなる (e.g., Yen, 2002; Julien, 1998). Yen (2002)



2 min after overflow



4 min after overflow



9 min after overflow

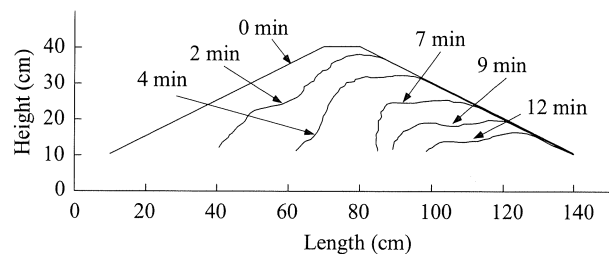


Fig.13 越流侵食による堤体断面の変化 (実験 2)  
The alteration of the embankment profile due to overflow erosion (Experiment 2)

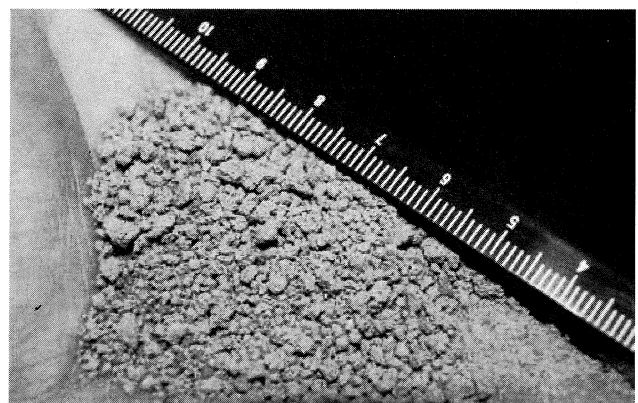


Fig.14 締固め時に団粒化した堤体材料の粒径  
Aggregate structure of embankment material during compaction



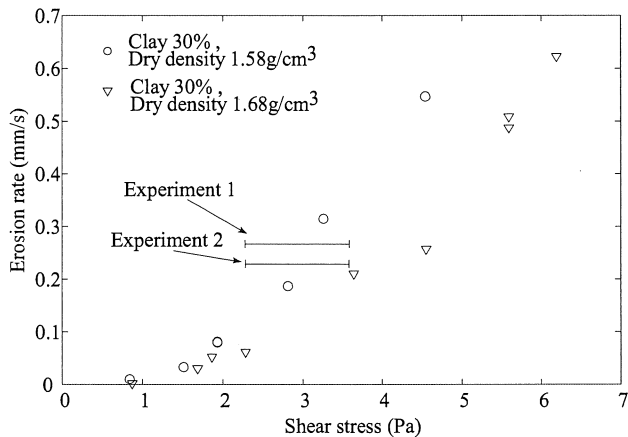


Fig.15 堤高の低下速度と堤体材料の侵食速度

The rate of decrease of the embankment height and erosion rates of the embankment material

がまとめた粗度についての既往の研究結果からは、自然な粗面の等価粗度高さは代表的な粒径（例えば粒径加積曲線の約85%に対応する粒径）のおおよそ1~3倍になることがわかる。

そこで本研究では堤体の等価粗度高さは1~3mmにあるとして摩擦損失係数 $f$ を求め、せん断応力 $\tau$ を式(9)から算定した（摩擦損失係数 $f$ の算定方法の詳細を付録に記す）。その結果、実験1では限界流におけるせん断応力は2.28~3.59kPa、実験2では2.28~3.58kPaと推定された。

Fig.15には砂と粘土の混合比が7:3の材料についての侵食試験の結果に加えて、堤体の越流侵食実験から得られた限界流での侵食速度とせん断応力の関係を示す。同図からは第2章で報告した1.58g/cm<sup>3</sup>と1.68g/cm<sup>3</sup>の乾燥密度の供試体を用いて行った侵食試験結果と約1.6g/cm<sup>3</sup>の乾燥密度をもつ堤体の越流侵食速度はほぼ一致することが分かる。この事実は、限界流におけるせん断応力を特定することで、堤体材料の侵食速度から越流侵食の進展速度を概算でき、さらには式(8)を用いることで破堤に至る時間が予測できることを示している。ただし、第2章の侵食試験結果から得られる侵食速度に比べて、堤体の越流侵食速度の方がやや大きめに評価される傾向がある。これは、一つに堤体の越流侵食の場合は限界流におけるせん断応力を確定的に求めることができず、その値がいくらかの幅を持って推定されている点が考えられる。またもう一つに、著者らの観察によれば、堤体の侵食では時折堤体表面の土が塊となって侵食を受けることがある。土が塊となって侵食されると、土供試体の侵食試験で生じる侵食に比べて速く堤体の侵食が進行する可能性がある。なお、実験1に比べて実験2の越流侵食速度が小さくなっているが、これは堤体の乾燥密度が実験2の方が大きいためである。

#### 4. 結論

本論文ではまず、砂と粘土を混合した材料について侵食試験を行い、その侵食特性について調査した。その後、侵

食試験と同じ材料を用いて堤体の越流侵食実験を実行した。堤体の越流破堤を侵食の観点から分析し、限界流で侵食が生じる場合には、越流侵食の進展速度が予測できることを示唆し、実際に模型実験を通して堤高の低下速度から越流侵食の進展速度が予測可能であることを示した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

1. 砂と粘土の混合材料の侵食速度は粘土の混合率が大きいほど小さい。また乾燥密度が大きいほど侵食速度は小さくなる傾向にあるが、ある程度乾燥密度が大きくなると侵食速度はほぼ一定となる。侵食の開始する限界せん断応力については、粘土の混合率や供試体の乾燥密度に大きな影響を受けない。
2. 越流による堤体侵食では、限界流で侵食が生じる場合と射流域のみで侵食が生じる場合では侵食過程が異なる。限界流で侵食が生じる場合、堤高の低下速度は限界流における堤体材料の侵食速度に相当するため、越流侵食の進展速度を推定できる。
3. 侵食特性を把握した材料を用いた堤体の越流侵食実験では、堤高の低下速度と限界流でのせん断応力の関係は、堤体材料の侵食特性とおおよそ一致することが実験的に示された。これは、堤体材料の侵食特性が既知であれば、限界流におけるせん断応力を推定することで越流侵食の進展速度が予測できることを示している。

越流による堤体侵食の進展速度を推定するには、堤体材料の侵食特性（せん断応力と侵食速度の関係）を把握するとともに、堤体上の水流によるせん断応力（土表面に作用する流体からの摩擦力）を評価する必要がある。本論文で報告した実験結果では、侵食試験から得られた材料の侵食速度と堤体の越流侵食実験から得られた堤体土の侵食速度はおおよそ一致した。実際の堤体の越流侵食過程を予測するには、侵食試験で用いる土供試体の堤体土の再現性と自然な粗面におけるせん断応力の算定方法の向上が根本的な課題であると考えている。

謝辞：本研究を遂行するに当たって科学研究費補助金（若手（スタートアップ）、課題番号20880017）の支援を頂いた。また、本研究に関する実験を精力的に行ってくれた村上亮太君（岡山大学大学院環境学研究所博士前期課程修了）、辻林厚一君（岡山大学大学院環境学研究所博士前期課程）に心よりお礼申し上げます。

#### 付録 摩擦損失係数の算定方法

摩擦損失係数 $f$ の値は壁面近傍の流速を表す対数分布式から得られる。粗度を有する壁面の流速分布は以下で与えられる。

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y}{k_s^+} \right) + B(k_s^+) , \quad k_s^+ = \frac{U_* k_s}{\nu} \quad (\text{A1})$$

ここに、 $k_s$ は粗度高さを意味し、 $B$ は $k_s^+$ の関数である。式(A1)に現れる $B$ の関数形はこれまでに実験的に調べられており、いくつかの経験式が提案されている（e.g., Ligrani and Moffat, 1986; Cheng and Chiew, 1998; Yalin and Da Silva, 2001）。ここでは、Cheng

and Chiew (1998) によって提案された以下の式を用いる.

$$B = 8.5 + (2.5 \ln k_s^+ - 3) \exp[-0.11 (\ln k_s^+)^{2.5}] \quad (\text{A2})$$

式 (A1) を水深方向に積分すると

$$\frac{v}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{h}{k_s} \right) - \frac{1}{\kappa} + B(k_s^+) \quad (\text{A3})$$

が得られる. ここに  $h$  は水深,  $v$  は平均流速である. 摩擦損失係数  $f$  の定義式である

$$f = 8 \left( \frac{U_*}{v} \right)^2 \quad (\text{A4})$$

とレイノルズ数  $R_e = vh/\nu$  を用いて式 (A3) を書き改めると

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{h}{k_s} \right) - \frac{1}{\kappa} + B(R_e \cdot k_s / h \cdot \sqrt{f/8}) \quad (\text{A5})$$

と変形される. 式 (A5) を摩擦損失係数  $f$  について陽に解くことはできないため, 式 (A5) にレイノルズ数 ( $R_e = vh/\nu$ ), 水深  $h$ , 粗度高さ  $k_s$  を与えて繰り返し計算により摩擦損失係数  $f$  を求める. 本文で述べたような, 限界流における摩擦損失係数  $f$  を求めるには水深  $h$  に限界水深, 平均流速  $v$  に限界流速を与えればよい.

#### 引用文献

- Bennett, S.J., Alonso, C.V., Prasad, S.N. and Romkens, M.J.M. (2000) : Experiments on headcut growth and migration in concentrated flows typical of upland areas, *Water Resources Research*, **36**(7), 1911-1922.
- Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W. and Kwak K.W. (2001) : Erosion function apparatus for scour rate prediction, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **127**(2), 105-113.
- Cheng, N.S. and Chiew, Y.M. (1998) : Modified logarithmic law for velocity distribution subjected to upward seepage, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **124**(12), 1235-1241.
- Coleman, S.E., Andrews, D.P. and Webby, M.G. (2002) : Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **128**(9), 829-838.
- Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M. (2000) : The statistics of embankment dam failures and accidents, *Canadian Geotechnical Journal*, **37**, 1000-1024.
- Fujisawa, K., Kobayashi, A. and Aoyama, S. (2009) : Theoretical description of embankment erosion owing to overflow, *Geotechnique*, **59**(8), 661-671.
- Fujisawa, K., Kobayashi, A. and Yamamoto, K. (2008) : Erosion Rates of Compacted Soils for Embankments, *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, **64**(2), 403-410.
- Hanson, G.J., Cook, K.R. and Hunt, S.L. (2005) : Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments, *Transactions of the ASAE*, **48**(5), 1783-1794.
- Hanson, G.J., Robinson, K.M. and Cook, K.R. (2001) : Prediction of headcut migration using a deterministic approach, *Transaction of the ASAE*, **44**(3), 525-531.
- 平成 16 年 7 月福井豪雨による地盤災害の緊急調査団 (2005) : 平成 16 年 7 月福井豪雨による地盤災害調査報告書, 地盤工学会.
- 平成 16 年台風 23 号による淡路ため池被害調査団 (2005) : 平成 16 年台風 23 号による淡路ため池被害調査報告書, 農業土木学会京都支部.
- Julien, P.Y. (1998) : *Erosion and sedimentation*, Cambridge University Press.
- Ligrani, P.M. and Moffat, R.J. (1986) : Structure of transitionally rough and fully rough turbulent boundary-layers, *Journal of Fluid Mechanics*, **62**, 69-98.
- Murray, W.A. (1977) : Erodibility of coarse sand-clayey silt mixtures, *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE*, **103**(HY10), 1222-1227.
- 瀬津家久, 富永晃宏 (2000) : 水理学, 朝倉書店, 129-133.
- Partheniades, E. (1965) : Erosion and deposition of cohesive soils, *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE*, **91**(HY1), 105-139.
- Shaikh, A., Ruff, J.F. and Abt, S.R. (1988) : Erosion rate of compacted Na-montmorillonite soils, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **114**(3), 296-305.
- Sargunam, A., Riley, P., Arulanandan, K. and Krone, R.B. (1973) : Physico-chemical factors in erosion of cohesive soils, *Journal of Hydraulic Division, Proceedings of the ASCE*, **99**(HY3), 555-558.
- 関根正人, 飯塚暢明, 藤尾健太 (2001) : 粘着性土の浸食速度予測に向けた実験的研究, 水工学論文集, 土木学会, **45**, 667-672.
- Yalin, M.S. and Da Silva, A.M.F. (2001) : *Fluvial processes*, IAHR.
- Yen, B.C. (2002) : Open channel flow resistance, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **128**(1), 20-39.
- Zhu, Y. (2006) : *Breach growth in clay dikes*, Delft University of Technology, The Netherlands, PhD thesis.

[2010. 9. 8. 受稿, 2011. 5. 9. 閲読]

[この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業農村工学会論文集編集委員会あて)は, 2011年12月24日まで受け付けます.]

## Experimental Investigation of Erosion Rates of Sand-clay Mixtures and Embankment Failure Caused by Overflow

FUJISAWA Kazunori\*, MURAKAMI Akira\*\* and NISHIMURA Shin-ichi\*

\* *Graduate School of Environmental Science, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama 700-8530, JAPAN*

\*\* *Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, JAPAN*

### Abstract

This paper presents a series of erosion tests of sand-clay mixtures, which investigated the relationship between erosion rates of the soils and shear stress exerted onto the soil surface, and laboratory experiments of embankment erosion due to overflow, where the same sand-clay mixture was used as the embankment material. The effects of the dry density and the clay content on the erosion rates of the soils were investigated in the erosion tests. When an embankment is subjected to overflow, the height of the embankment decreases while the erosion occurs at the crest, where the water flow is Froude-critical. The experiments of embankment erosion have revealed that the decrease rates of embankment height corresponded to the erosion rate of the embankment material under the critical flow. This fact has shown that the estimation of the shear stress under the critical flow enables the temporal development of embankment erosion to be predicted with erosion rates of the embankment material.

**Key words :** *Embankment, Overflow, Erosion, Erosion rate, Laboratory test*