

## 越水破壊のメカニクスを考慮したため池堤体の越水保護工

Overtopping protection of embankment dams effectively based on mechanics of overtopping failure

小林龍平\*・小林秀一\*・板垣知也\*・高橋直哉\*\*・青木勇武\*\*・小林千佳子\*\*・○森井俊廣\*\*\*

Kobayashi R., Kobayashi S., Itagaki T., Takahashi N., Aoki I., Kobayashi C. and Morii T.

### 1. はじめに

豪雨時のため池の決壊は、浸透破壊、すべり破壊および越水破壊が単独にあるいは複合して起きることが多いとされている。越水保護工は、このうち越水破壊が生じないようにため池堤体を保護する。これを効果的なものとするには、越水破壊に至る初期段階の堤体損傷のメカニクスを知る必要がある。浸透流解析および応力変形解析を用いた数値実験により越水損傷を引き起こしうる物理要因と対応策を明らかにするとともに、細粒土を用いた傾斜水路実験によりその有効性を検証する。

### 2. 越水損傷のメカニクス

#### 2.1 土の侵食に起因する越水損傷

洪水が貯水池に流入し、洪水吐の流下能力を上回ると、やがて堤頂を越え越水が起きる。図1は、堤高5m、堤頂幅3mのため池堤体において、貯水位が堤頂標高まで上昇したのち、2時間をかけて越水量 $q_f=0.4\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ に至るまでの越水流れを示したものである。堤頂下流端を支配断面とした漸変流の標準逐次計算により算定し、その水面形を青線で示している。

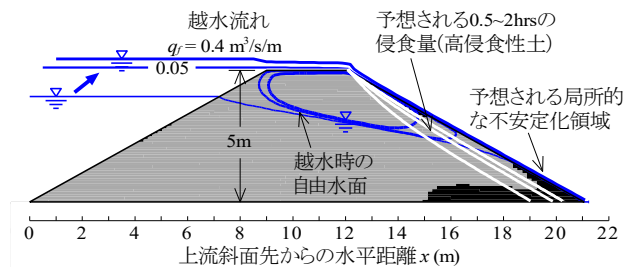


図1 越水流れに伴う浸透、土の侵食および局所的な不安定化の予想 (図は浸透流解析、応力変形解析等の重ね合わせによる。)

広く河川堆積土の侵食の予測に用いられる Excess Shear Stress モデル<sup>2)</sup>によると、越水流れにより堤体表面に水理せん断応力 $\tau_s$  ( $=\rho_w \cdot C_f \cdot v^2$ , ここで $\rho_w$ :水の密度,  $v$ :水深平均流速,  $C_f$ :抵抗係数 $=n^2g/R^{13}$ ,  $n$ :マンニングの粗度係数,  $R$ :径深,  $g$ :重力加速度)が作用し、これが土粒子の分離が始まる土の限界せん断応力 $\tau_c$ より大きくなると、一定の割合(受食係数 $k_d$ )で侵食が進んでいくとされる。ロックフィルダムの破壊解析<sup>3)</sup>に採用されたパラメータ値( $\tau_c=0.04\text{ kN}/\text{m}^2$ ,  $k_d=1.8 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{kN}/\text{s}$ )を用いて侵食深さを算定すると、図1の白線となり、越水により大きな侵食損傷が生じるのがわかる。

#### 2.2 越水流れによる堤体斜面の局所的な不安定化

越水の際には、貯水位の上昇と降雨浸透により浸潤面が上昇し下流斜面上の浸出面が広がったところに、越水流れの水深の負荷に伴い堤体表面から浸潤が生じ、堤体内の浸透流動と飽和度分布が複雑に変化する。それに伴って堤体土に作用していた浸透力と浮力、そして嵩重量が変化し、加えて越水流れによる $\tau_s$ が堤体表面に作用する結果、堤体内の応力状態が大きく変化する。貯水位の上昇と越水深を考慮した飽和飽和浸透流解析により浸透力、浮力および自重を算定し、次いで、これらの物体力と $\tau_s$ を堤体に負荷して応力変形解析を行ったところ、図1の結果を得た。下流側斜面の陰影部は局所的な不安定化領域を表す。越水が始まり $\tau_s$ が作用すると、もともと拘束力が小さい斜面表層部では動員される主応力差が大きくなって不安定化し、越水損傷につながっていくと考えられる。初期の越水損傷が下流斜面の中腹から斜面先に生じる小規模な侵食・洗堀を起点に進行するとの調査報告<sup>1,4,5)</sup>に、図1に示す局所不安定化領域はよく符合する。

#### 2.3 越水損傷を防ぐ技術要諦

越水損傷を防ぐには、堤体表面に越水流れを接触させない、あるいは接触が避けられないとすれば流速を極力小さくすることが必須となる。ガビオンを用いた越水保護工<sup>6,7)</sup>では、通常、粒径100~200mmほどの石材粒子を用いる。斜面傾斜30°、想定される最大レベルの $q_f=0.04\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の条件で、ガビオン内の流量流速は0.5 m/s程度であり、有効間隙率を考慮すると浸透流速は1~2 m/s程度となって、かなり大きな水理せん断応力が生じることになる。流速を抑制でき、しかもそれ自体は構造的に侵食されることがない不織布ジオテキスタイル(以下、不織布マットという。)を、ガビオン底面と堤体表面との間に設置するのが現実的な対応策

\* (株)水倉組 Mizukura-Gumi Co. Ltd., \*\* 東網工業(株) Tomo-Kogyo Co. Ltd., \*\*\* 新潟大学名誉教授 Niigata University

キーワード: ため池堤体, 越水保護工, 越水破壊, ガビオン, 不織布マット, 水理せん断応力, 土の限界せん断応力

となる。図2に、裸地状態、ガビオン敷設およびガビオン底面に不織布マットを設置した3つの場合で算定した $\tau_c$ を比較する。2.1節のロックフィル材の $\tau_c$ および広く細粒土で想定<sup>2,9,10)</sup>される $\tau_c$ に対し、不織布マットを設置することにより $10^3\sim 10^7$ 倍ほど小さくでき、土の侵食に対するリスクは確実に解消される。

### 3. 傾斜水路実験による効果検証

前述の浸透流速レベルを再現できる傾斜アクリル製水路(水路幅0.05m, 傾斜30°)を用いて、不織布マットの効果を検証した。着脱式のソイルボックスに細粒土を締固め、これを水路底の中央部に装着したのち、厚さ0.01mの不織布マットを敷き循環水を30分間流下させた。次に、マットを取り外し再び流下させ、ソイルボックス内の土の侵食状況を観察した<sup>8)</sup>。表1に示す砂まじりシルトを用いた。 $\tau_c$ は、表1の土質特性値をもとに4~20Pa程度と推定した。

表2に傾斜水路実験の結果をまとめる。不織布マットの透水係数は $1.33\times 10^{-3}$  m/sで、動水勾配を近似的に傾斜角の正接とすると、ソイルボックス表面の土に作用する $\tau_s$ は $3.84\times 10^{-5}$  Paとなり、供試土の $\tau_c$ より十分に小さくなる。したがって、不織布マット表面上の流れ(これは、越水保護工ではマットの上部に敷設されるガビオン内の流れに相当する。)の速さ $V_{of}$ がいかにも大きくなっても侵食は生じないはずであり、表2のように、実際にもまったく侵食が起きることはなかった。表2の実験1~3では、不織布マットを取り外したのち再び循環水を流下させた。 $\tau_c$ をはるかに上回る、流下水による大きな $\tau_s$ がソイルボックス表面の土に作用するようになるため、いずれにおいても、またたく間に侵食が生じる結果となった。

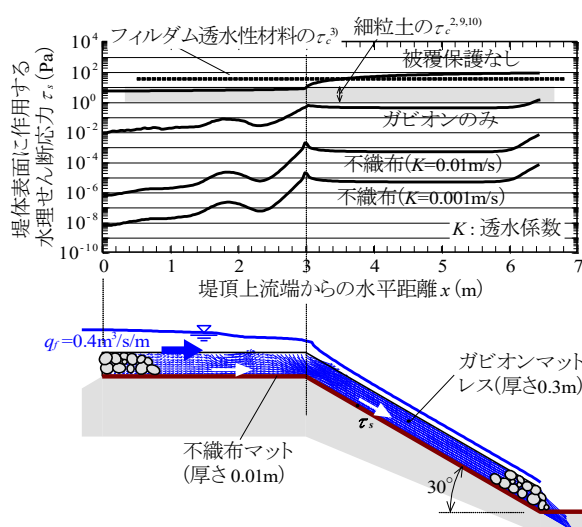


図2 越水流れにより堤体表面に作用する水理せん断応力

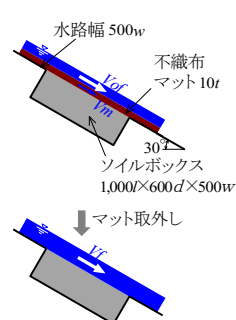
表1 土質特性と推定 $\tau_c$

分類名	MH-S
土粒子の密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	2.71
50%粒径 (μm)	6.5
細粒土含有率 (%)	89.3
塑性指数 (%)	38.4
嵩密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	1.620
間隙率 (%)	59
内部摩擦角(°)	13.8
限界せん断応力 $\tau_c$ (Pa)	4~20
$\tau_c$ by Yuan et al. <sup>9)</sup>	19.9
$\tau_c$ by Clark et al. <sup>2)</sup>	3.4~20.8
$\tau_c$ by Julian et al. <sup>10)</sup>	16.0

表2 傾斜水路実験による不織布マットの水食防止効果の検証

実験番号	1	2	3	4	5
$D_c$ (%)	101	95	85	87	92
$V_{of}$ (m/s)	1.70	1.66	1.93	3.45	3.62
$V_m$ (m/s)	0.00077	0.00077	0.00077	0.00077	0.00077
$\tau_s$ (Pa)	$3.84\times 10^{-5}$	$3.84\times 10^{-5}$	$3.84\times 10^{-5}$	$3.84\times 10^{-5}$	$3.84\times 10^{-5}$
流下時間 (分)	30	30	30	40	40
侵食の有無	無し	無し	無し	無し	無し
$V_f$ (m/s)	1.72	1.61	1.30		
$\tau_s$ (Pa)	2963.2	2596.5	1677.4		
侵食の有無	徐々に侵食	急速に侵食	急速に侵食		

$D_c$ : 締固め度  
 $V_{of}$   $V_m$   $V_f$ : 表の右側の副図参照



### 4. まとめ

ため池堤体は越水に対してきわめて脆弱である。不織布マットをガビオン底面に敷設することにより、堤体表面土に接する越水流れの流速と水理せん断応力を大幅に低減することができ、越水破壊のトリガーである土の侵食と局所不安定化破壊を確実に抑制できることを確認した。

### 参考文献:

- 堀俊和: 農業用ため池の豪雨災害に関する研究, 農村工学研究所報告, 44, pp. 139-247, 2005.
- Clark, L.A. et al.: Methods for determining streambank critical shear stress and soil erodibility, *Transactions of ASABE*, 50(1), 95-106, 2007.
- Rickel, A. et al.: Overtopping erodibility analysis for a steep-sloped rockfill embankment dam, *Fourth International Seminar on Dam Protections against Overtopping*, pp. 1-16, 2022.
- Powledge, G. R. et al.: Mechanics of overflow erosion on embankments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8), pp. 1056-1075, 1989.
- 国土技術政策総合研究所・土木研究所: 粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料(案), Ver 1.1., 2023.
- 小林秀一他: スマートガビオンを用いたため池堤体の越水保護工の開発, 農業農村工学会誌, 92(4), 2024.
- 小林秀一他: スマートガビオンを用いたため池堤体の越水保護工の設計・施工技術試案, 第73回農業農村工学会講演会, 2024.
- 小林龍平ら: ため池堤の越水時におけるスマートガビオンによる水食防止効果の実験検証, 第79回京都支部研究発表会, 2022.
- Yuan, X., et al.: Estimating the critical shear stress for incipient particle motion of a cohesive soil slope, *Scientific Reports*, 12, 1-13, 2022.
- Julian, J. P. et al.: Hydraulic erosion of cohesive riverbanks, *Geomorphology*, 76(1-2), 193-206, 2006.