

## 越流に伴う堤体の破壊現象に関する研究

### Failures of Earth Dam due to Flooding

重野輝貴\*・成田国朝\*\*・奥村哲夫\*\*

Terutaka SHIGENO, Kunitomo NARITA and Tetsuo OKUMURA

**ABSTRACT** : Centrifuge model tests were carried out in this paper to investigate behavior of pore-water pressure and hydraulic fracturing in earth dams caused by a rapid increase of the reservoir water during flooding. Focus is placed on discussing how earth dams behave at failure during flooding; sliding of soil mass?, interior erosion (piping) of fill materials? or exterior erosion by the action of over-flow water?, and which of these causes is the most influential in the process of embankment failure. Transmission of pore-water pressure in the fill associated with its permeability and the rate of reservoir filling is another important subject to be discussed; how and to what extent it is related to cause such catastrophic damages.

#### 1. はじめに

フィルダムや河川堤防のような水理構造物が決壊したときの被害は、人的にも経済的にも多大であり、その社会的損失は極めて大きいと考えねばならない。ダムや堤防を用途とした盛土構造物が台風や集中豪雨時の洪水に伴って越流を起こすと、その崩壊は極めて短時間に、かつ破局的に生じることが実例として幾つか報告されている<sup>1)2)</sup>。しかし、越流崩壊時に堤体内でどのような応力・変形挙動が起こり、それが破局的な崩壊に如何に結びつくかなど、崩壊のメカニズムに関しては未だ十分に議論が進んでおらず、その防護策についても殆ど検討されていないのが現状である。

本研究では、ダムや堤防等の盛土構造物が異常洪水時に越流崩壊する現象を遠心模型実験で再現し、

水位上昇に伴う堤体内の間隙水圧や変形の挙動を観察しながら、越流して堤体破壊に至るまでの崩壊メカニズムを明らかにし、その防護策を検討するための設計・施工上の基礎資料を得ることを目的としている。

#### 2. 実験概要

図-1に実験装置及び計測機器の配置の概要を示す。460×460×200 mmのアルミ製土槽コンテナ内に高さ15.5cm、天端幅3cm、斜面勾配45°の模型堤体を作製し、これを遠心加速度20Gまで加速した状態(実物にして3m程度の盛土を想定)で上流側に注水して越流実験を行う。

模型堤体内には破堤前後の間隙水圧の変動を調べるために堤底部と中高部に合計6個の間隙水圧計を、上流側には貯水圧を測るための水圧計を設置する。また下流側斜面全面を俯瞰できるように図示の位置と堤体横断面を観察するためにCCDカメラを設

\* 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻

\*\* 愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

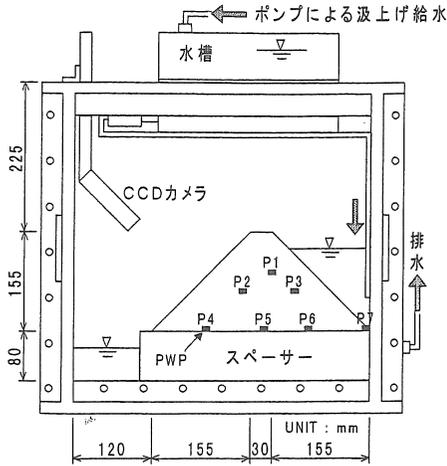


図-1 実験装置および計測機器の配置概要

表-1 実験試料の性質

日本統一分類		SM	
れき	0 %	最大粒径	2.0 mm
粗砂	61 %	平均粒径	0.55 mm
細砂	26 %	均等係数	217
シルト分	2 %	曲率係数	53
粘土分	11 %		
土粒子密度		2.622 g/cm <sup>3</sup>	
最大乾燥密度		1.902 g/cm <sup>3</sup>	
最適含水比		12.7 %	
透水係数 (D97)		8.3 × 10 <sup>-3</sup> cm/s	

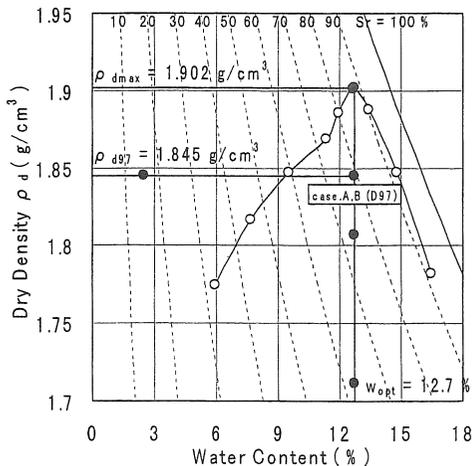


図-2 試料の締め固め特性と試験条件

置して崩壊状況を観察した。

堤体上流側が空虚時に急激な水位増加により越流破壊に至らしめる場合 (case. A) と、定常浸透状態から水位を更に上昇させ越流破壊に至らしめる場合 (case. B) の2種類の実験について検討を行った。

実験に用いた試料は全て共通で、細粒分を若干含む砂質土であり、その粒度組成と締め固め特性を表-1, 図-2にまとめた。試料の締め固め度や初期飽和度の違いが越流崩壊にどの様に影響を及ぼすかについても検討を行った。

実験手順は、①計器を埋設しながら、一定条件の下で試料土を締め固めて (3cm×4層+3.5cm×1層) 盛土堤体を作製し、②天端面の一部を若干削って越流部を作製する。③土槽を遠心載荷装置に搭載し、各種計器等の接続、CCDカメラ設置等の準備が整い次第、遠心加速度20Gを付与する。

### 3. 越流による堤体の破壊形態

土槽内に設置したCCDカメラによって観測した一連の越流の崩壊過程を、図-3に模式的に表した。

まず、(a)越流の初期段階では下流側斜面の表面に越流水の浸食作用によって生じた幾つかの浅い溝が現れる。そして、(b)越流が継続すると、これらの浅い溝は深部まで徐々にえぐられ、特に斜面中腹部から下腹部にかけて多量の土砂が浸食される。この時点では天端部は法肩を含めて浸食がほとんど見られない。(c)中腹部がある程度まで浸食されると、最終的には法肩が下流方向に崩れ落ちるように流亡して、堤体は全体的に崩壊する。

これらの崩壊過程やその状況は、全ての実験において同様な特性として見られた。

次に、越流直前の堤体内の飽和領域が異なる2つの実験ケースに対して、堤体横断面から見た越流崩壊の過程を比較したものが図-4である。case. Aは遠心加速度が安定した後、土槽上部に設置した水槽から一定流量で上流側に注水し、堤体を越流破壊に至らしめる。case. Bはcase. Aと同様に上流側に注水するが、HWLで定常浸透状態を再現し堤体内の飽和度を高めたのち、堤体を越流破壊に至らしめる。

越流初期の段階では斜面表面の洗掘によるガリ浸食が支配的 (A-①, B-①) であるのに対し、越流開始前の堤体内部の浸透領域 (飽和域) の形成状況の相違によって時間とともに崩壊過程に変化が見られて

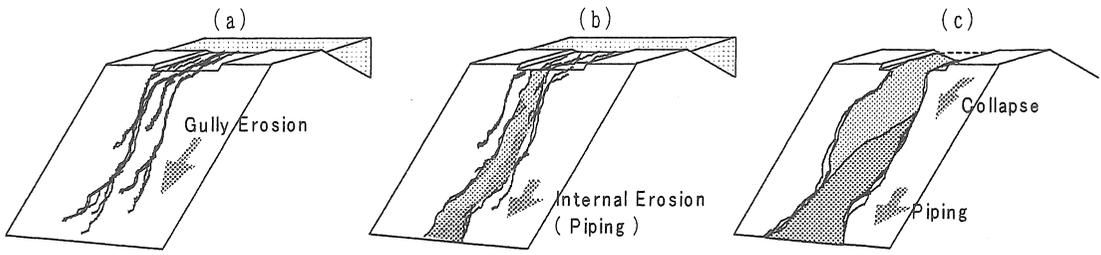


図-3 越流崩壊過程の模式図

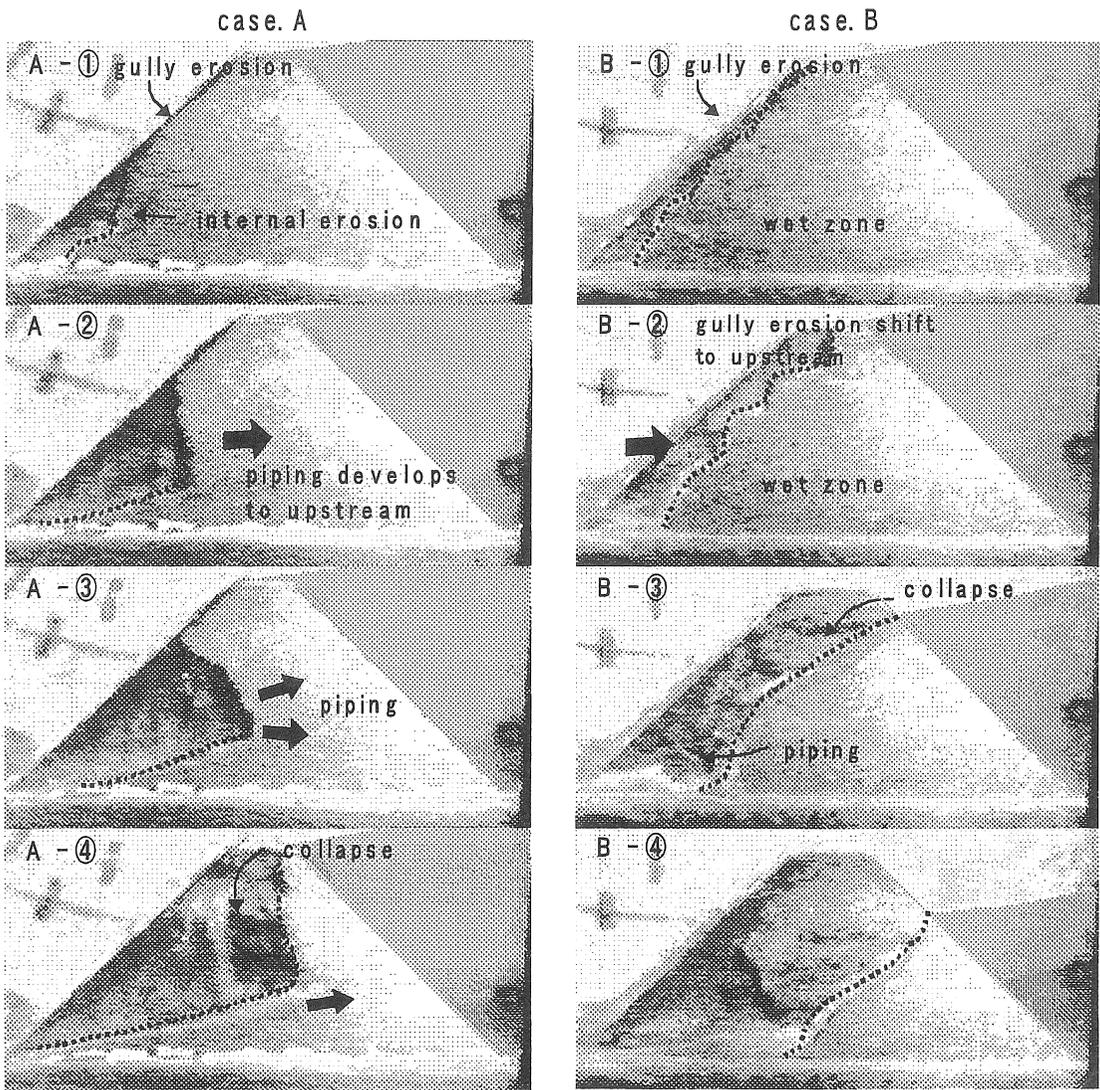


図-4 堤体横断面から見た越流崩壊過程(D97)

いる。

すなわち、越流前の飽和域が小さいcase. Aでは、下流側の斜面中腹部から下部にかけてパイピングによる破壊が上流側に向かって進行している(A-②, ③)のに対し、飽和域が大きいcase. Bでは下流側斜面にほぼ平行してガリ浸食による破壊が存続する(B-②)。そして、最終的にパイピングを併発して堤体破壊が生じている(B-③, ④)ことが推察される。

4. 越流崩壊時における堤体内の間隙水圧特性

case. Aにおける貯水圧と堤体内の間隙水圧の変動の経時変化を図-5に示す。

貯水圧が上昇するにつれ堤体内の間隙水圧値もそれに付随して上昇している。注水開始から約150秒後(t=150s)に越流が始まっているが、洗掘や浸透によって破壊が進行し、流亡せずに残った堤体の内部には応力が残留しているため、最終的には崩落による破壊を誘発していることが見受けられる。また、P7に着目すると越流破壊が進行しているにも関わらず約30秒間に渡り水圧値が一定である。これは、堤頂部がほとんど破壊されていないためであり、乾燥側で作成した模型ではこの時間が著しく短いという結果が得られた。つまり乾燥側ほど短時間で破局的な崩壊に至るといえることが考えられる。

一般に、土質材料の飽和強度と不飽和強度を比較した場合において、不飽和強度の方が飽和強度を上回る傾向を示すことが分かっている(図-6)。越流崩壊時には上述したように、堤体の破壊メカニズムがそのような強度特性に依存していないことから

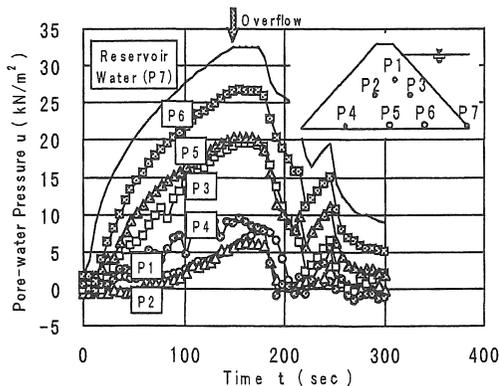


図-5 堤体内の間隙水圧の経時変化

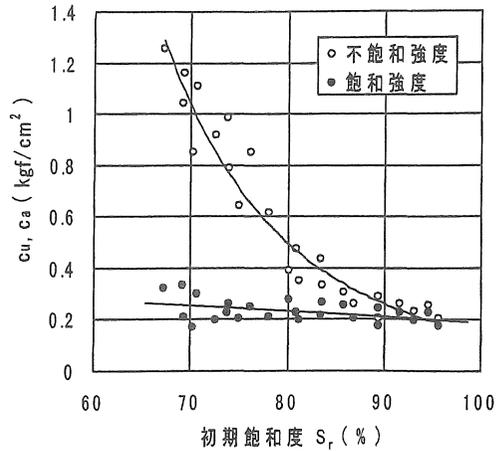


図-6 飽和前 (ca)・飽和後 (cu) の強度<sup>3)</sup>

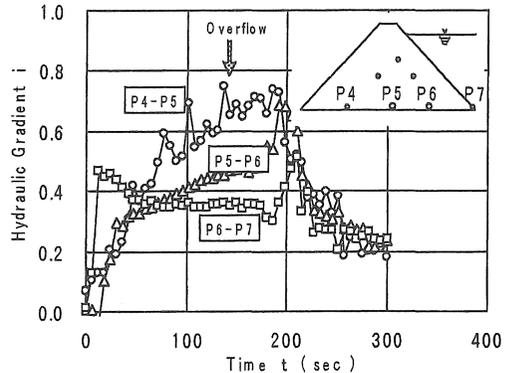


図-7 堤底部における動水勾配の経時変化

も、従来より土の強度定数として用いてきた粘着力 c やせん断摩擦角  $\phi$  を用いて越流による堤体の破壊メカニズムを説明することは困難であると考えられる。

図-7は堤体底部に設置した間隙水圧計から得られた計測値をもとに簡易的に算出した動水勾配 ( $i = \Delta h/L$ ) の経時変化を示したものである。越流開始後にP4-P5間がピークとなる時刻(t=190s)はP4近傍まで浸食が進行していることを表し、この時刻において堤頂部が殆ど崩れていないことは図-5からも分かる。同様にP5-P6間の動水勾配がのピーク値となる時刻(t=200s)には、P5近傍まで浸食が進行し多量の土砂が既に流亡してしまったことを伺わせる。また、これらの動水勾配の大きな変化はパイピング

に起因する破壊を誘発していることが推察される。

図-8は締固め度の異なる場合の浸潤面の進行過程を模式的に示したものである。

貯水位の上昇に伴い浸潤面が下流側斜面方向に進行するが、D95の場合は透水係数が大きいため満水位における浸潤面形状が定常浸透時の浸潤面形状に類似する。また、同実験における越流開始後の破壊の進行状況を模式的に表したものを図-9に示す。

前述したようにD95の場合は、越流前の浸潤面形状が定常浸透状態に近いために破壊の進行過程においても図-4のCACE. Bに類似した結果となる。また、D100の場合は越流が開始されても堤頂部が崩れずに残存していることから、土粒子構造が密な飽和していない領域においてはガリ浸食等の洗掘破壊に対して壊れにくいということが十分に考えられ得る。

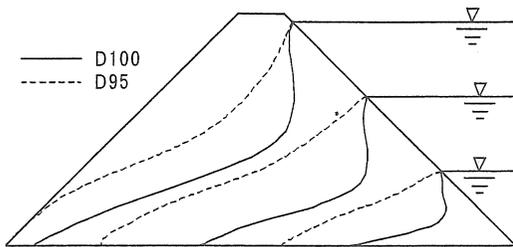


図-8 浸透浸潤面の変化

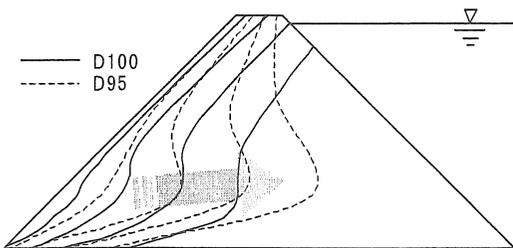


図-9 破壊前線の変化

## 5. FEM飽和～不飽和浸透解析による定性的評価

遠心模型実験で得られた結果をもとに、FEM飽和～不飽和浸透解析を用いて越流前の堤体内の浸透領域（飽和域）形成過程について2, 3の検討を行った。

一般に飽和～不飽和領域における浸透流の理論は

は、ダルシー則で表される運動方程式と浸透流の水量保存則から導かれる連続の式から基礎方程式を導き出し、不飽和領域におけるサクション（毛管ポテンシャル）を考慮し導出したものが飽和～不飽和領域における支配方程式となる。

### (1) 運動方程式（ダルシーの式）

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

ここに、 $v$ ：流速， $k$ ：透水係数， $h$ ：全水頭

### (2) 連続の式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = q$$

ここに、 $q = q' / \rho$

$\rho$ ：水の単位体積質量

$q'$ ：要素内に生ずる水源

$\theta$ ：体積含水率

### (3) 基礎方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q \end{aligned}$$

### (4) 支配方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\theta) \frac{\partial h_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\theta) \frac{\partial h_p}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\theta) \frac{\partial h_p}{\partial z} + k_z(\theta) \right) + q \\ = (C(h_p) + \alpha S_s) \frac{\partial h_p}{\partial t} \end{aligned}$$

ここに、 $\alpha = 0$ ：不飽和領域

$\alpha = 1$ ：飽和領域

また、 $S_s = \partial n / \partial h_p$ は非貯留係数、 $C(h_p) = \partial \theta / \partial h_p$ は比水分容量である。 $C(h_p)$ は圧力

水頭の変化に対する体積含水率の変化の割合を表し、浸透が進行して飽和状態になると  $C = 0$  で、(4) 式は飽和領域内の浸透の支配方程式となる。

次に、解析に用いた不飽和領域における透水特性曲線（圧力水頭－体積含水率（飽和度）－比透水係数の関係）を図-10に示す。実験ではシルト質砂を使用しているが、不飽和領域の透水特性が不明なため、Neuman<sup>9)</sup>によって提示されている透水特性曲線を準用した。

解析に用いたその他のパラメータは、基本的には模型実験における遠心場での換算値を使用し、上流側水位が空虚状態から満水位に至るまで等速度で上昇するものとした。

表-2, 図-11には (I) 堤体内が乾燥し、初期水頭がない場合、(II) 堤底部に若干の初期水頭を有する場合のそれぞれにおいて、解析条件および湛水時の浸潤面形状の変化を表したものである。

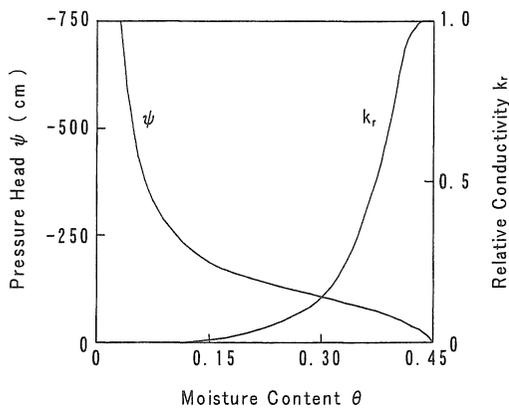


図-10 解析に用いた不飽和透水特性 (仮定)

表-2 解析条件

	I	II
堤 高	3.1 m	
天 端 幅	0.6 m	
斜面 勾 配	45°	
飽和透水係数	0.001 cm/s	
貯水位の上昇速度	0.2 m/hour	
節 点 数	x 方向 51 y 方向 22	
許 容 誤 差	0.1 m	
貯水前の堤体条件	体積含水率一定 $\theta_0 = 0\%$	初期水頭一定 $h_0 = 0.1\text{ m}$

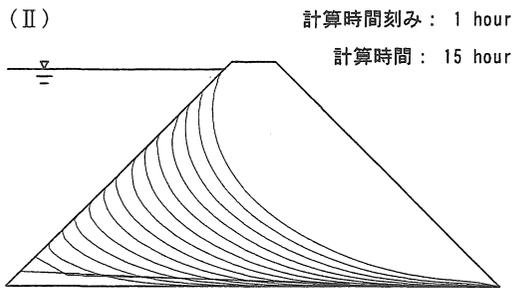
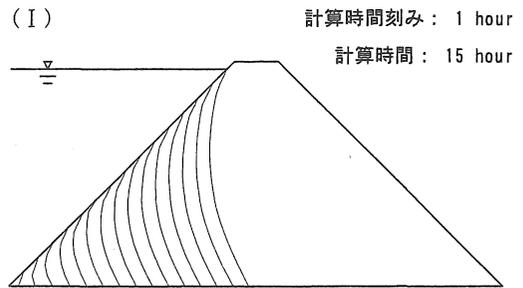


図-11 初期状態の違いによる浸透浸潤面形成過程の違い

堤体内が乾燥している場合は、形成される浸潤面が下流側斜面に平行して進行していくのに対し、堤底部に若干の初期水頭を有する場合は、貯水位が低い段階から下流側に浸透領域が存在し、貯水位の上昇に伴い堤底部から徐々に浸透領域が拡大する。

遠心模型実験の結果から乾燥領域（不飽和）においては洗掘による浸食が比較的速く進行することが分かっている。このことより (I) のような場合、例えば枯渇したダムに豪雨による越流が生じるようなケースでは、満水位時に浸透していない領域が大きいため、流失する土砂の量が多く、洗掘による浸食を受けた後、飽和領域が残存すると仮定すると、残存する領域は崩落を伴い短時間で破堤に至ることが予想される。反対に (II) の場合は、満水位時の飽和領域が大きいため、越流の初期段階では洗掘による破壊が進行するものの、(I) の場合に比べ流失する土砂量も少なく、不飽和領域が浸食された後も残存する領域が大きいため、(I) の場合ほど、短時間で破堤に至ることは考え難い。

図-12は、満水位に堤体内に形成される飽和領域の面積比率と上流側水位の上昇速度の関係を透水係数ごとに比較したものである。透水係数が小さい場

合は、水位の上昇速度と形成された飽和領域の関係は対数的な変化を示すのに対し、透水係数が大きくなるにつれて直線的な変化を示す。乾燥した堤体においては優れた強度特性を有しているにもかかわらず越流、特に洗掘による破壊が生じてしまった場合はその優れた強度特性に関係なく短時間で破堤に至る。むしろある程度（小さすぎない）の透水係数を確保した飽和強度を考慮した設計が必要であると思われる。

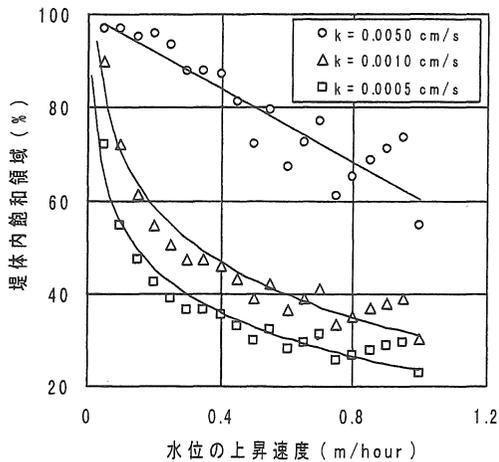


図-12 水位の上昇速度と飽和領域の関係

## 6. 結論

研究の結果、以下のことが判明した。

(1) 堤体の越流破壊は、その初期段階では斜面表面のガリ浸食が支配的であるが、その後は水位上昇前の堤体内部の浸透領域（飽和域）の形成状況によって崩壊過程に変化が見られる。すなわち、貯水池が空虚に近く飽和域が小さい場合は、下流側の斜面中腹部から下部にかけてパイピング破壊が上流側に向かって進行するのに対し、常時満水位に近い定常浸透状態のように初期飽和域が大きい場合は、下流側斜面にはほぼ並行してガリ浸食による破壊が進行し、最終的にパイピングを併発して堤体破壊を生じる。

(2) これらの破壊形態は堤体内部に設置した間隙水圧計の計測結果にも反映されており、空虚時からの越流では下流側の浸食されやすい不飽和領域の残存と、上流側での浸潤面の急激な変化（大きな動水

勾配）が主としてパイピングに起因する破壊を誘発したものと推察される。

(3) 上記の模型実験に対するFEM飽和・不飽和浸透解析では、水位の急上昇に伴う堤体内の間隙水圧の動向を定性的によく説明できる結果を得たが、浸透破壊の定量的な評価については、材料特性の表現方法の改良を含めて未だ十分とは言い難く、今後の検討課題として残された。

以上を総括すると、本研究で対象とした越流崩壊現象では、ていたいの透水性と貯水位の上昇速度の関係が飽和域の形成や浸潤面形状の変化に深く影響し、その組み合わせにより崩壊のメカニズムやその進展状況が大きく変化することが判明した。

本研究は文部省科学研究費補助金の援助を受けた研究であることを付記し、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 知久 徳：フィルダムの事故とその対策，ダム日本，No. 388，1977
- 2) 山口柏樹・大根義男：フィルダムの設計および施工，技報堂出版，1973
- 3) 大根義男：フィルダム設計上の問題点とその考察，ダム技術，No. 77，PP. 4～13，1986
- 4) Neuman, S. P. : Saturated unsaturated seepage by finite elements, Proc. , ASCE, HY, Vol. 99, No. 12, PP. 1629-1653, 1973
- 5) 土質工学会：講座・遠心模型実験，土と基礎，vol. 35～36，1987～1988
- 6) 土質工学会：地盤工学における模型実験入門，1982
- 7) 山口柏樹：遠心モデル実験における相似則について，1989
- 8) 重野輝貴・成田国朝・奥村哲夫：盛土堤体の越流破壊に関する遠心模型実験，第32回地盤工学研究発表会論文集，PP. 1977～1978，1997
- 9) 重野輝貴・成田国朝・奥村哲夫：盛土堤体の越流破壊に関する遠心模型実験（その2），平成9年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，P. 491～492，1998
- 10) 村瀬祐司：土質コアを有するロックフィルダムの水理的破壊現象に関する研究，愛知工業大学学位請求論文，1996
- 11) 幸繁宜弘：フィルダムの水理的破壊現象に関する遠心模型実験，愛知工業大学修士論文，1996

（受理 平成10年3月20日）