

文章编号: 0559-9350 (2001) 03-0092-06

## 河堤内非稳定渗流的实测与分析

朱 伟<sup>1</sup>, 刘汉龙<sup>1</sup>, 高玉峰<sup>1</sup>, 山村和也<sup>2</sup>

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 日本大学生产工学部土木工学科)

**摘要:** 在长期洪水渗透的作用下, 堤防内的浸润线上升并到达背水坡脚, 这会引发堤防内的孔隙水压力上升和非饱和状态土的强度下降, 经常由此而导致堤防发生塌陷和滑动破坏。本文通过原尺寸堤防的洪水渗透试验对堤防内洪水渗透的过程和特征进行了观测, 并通过对大型河堤长期洪水渗透试验的饱和-非饱和渗流的有限元分析, 研究了洪水渗透的过程和特征, 分析了各种条件对河堤内渗流的影响。

**关键词:** 河堤; 洪水渗透; 浸润线; 有限元法; 饱和-非饱和渗流; 稳定性

**中图分类号:** TV223.4

**文献标识码:** A

在 1998 年我国长江流域发生的大洪水中, 虽然长江干堤唯一的决口事故是由管涌所引起, 但是我们也不能忽略由其他原因<sup>[1]</sup>所发生的堤防破坏。作者从人民日报 1998 年 7 月 3 日到 8 月 11 日关于洪水记载资料中找到许多由于洪水渗透所诱发的背坡面滑动破坏。例如, 6 月 27 日在长沙市开福区的苏托垸堤, 7 月 31 日在湖南岳阳麻塘垸大堤等地先后发生了堤身滑坡破坏。和管涌一样, 由于背坡面滑动破坏多发生在洪水持续高水位渗透期间, 会直接导致河堤决口, 一旦发生其危害性很大。

我国堤防工程设计规范<sup>[2]</sup>规定在考虑背坡面的稳定性时, 针对大江大湖采用稳定渗流方法计算浸润线和出口比降。这是考虑最坏渗透条件下河堤的稳定性, 具有一定安全度上的富裕。但是由于河堤土质情况, 断面条件, 地下水条件, 降雨多少, 洪峰特性的不同, 有些条件下河堤会很快到达稳定渗流阶段, 并在这种最坏渗透条件下长期工作, 容易发生各种渗漏及堤身管涌, 诱发河堤的破坏。而在另一些条件下, 河堤很难达到稳定渗流阶段, 河堤的稳定性就比较高。从这种意义上, 即使根据稳定渗流计算得到相同的安全度, 如果达到稳定渗流阶段所需时间上的差异较大的话, 实质上的堤防安全度是完全不同的。因此研究洪水渗透达到稳定渗流的过程, 研究达到稳定渗流所需的时间长短对于堤防稳定性评价也是非常重要的。

为了研究洪水渗透时河堤内从非稳定渗流到稳定渗流的过程, 我们实施了实地大尺寸河堤的长期洪水渗透试验, 并通过饱和-非饱和渗流的有限元分析, 研究了地下水条件、水分条件对洪水的渗透过程的影响。

### 1 河堤的洪水渗透试验

本试验由山村和也主持, 与日本建设省合作在日本江户川堤防实施。试验在江户川的新堤与旧堤平行存在的地段, 垂直地筑造了两个试验堤, 围成一个大型水池。通过在水池蓄水而形成对试验堤的洪水渗透条件。试验堤高 7.0m, 宽为 34.0m (见图 1), 筑堤土主要为粉质土, 局部可以见到粉质粘土, 其压实度为 85% 左右。土的基本性质见表 1。筑堤前, 在池底以及试验堤底用粘土作了一个 0.3m 厚的遮水垫层。其下部地基的地质构成见表 2 的钻孔取样调查结果。利用 4 组大型水泵, 将江

收稿日期: 2000-01-28

作者简介: 朱伟 (1962-), 甘肃人, 河海大学教授。主要研究方向: 堤防的稳定性、非饱和渗流、非饱和土力学性质。

户川河水引入水池，调节储水水位上升，以模拟洪水的渗透。水位上升到设计高水位（6.2m）后，一直保持高水位渗透，直到洪水渗透基本达到稳定流阶段并在 300h 河堤背坡面发生滑坡破坏为止。试验洪水持续水位见图 2。试验时通过预先设置的水位测定仪，RI 中子水分仪对浸润线以及饱和度的变化进行了实测。并根据变位桩，倾斜仪对河堤的变位作了观测。

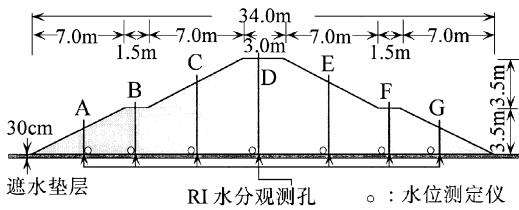


图 1 洪水渗透试验河堤

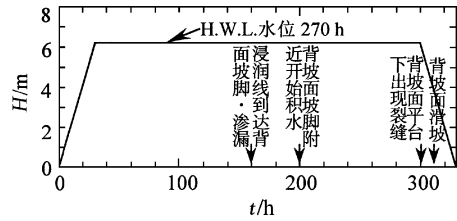


图 2 洪水渗透试验外力

表 1 试验河堤的基本土性

天然密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	干密度 d <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	含水量 w (%)	饱和度 S <sub>r</sub> (%)	孔隙比 e
1.43 ~ 1.68	0.95 ~ 1.20	25 ~ 54	60 ~ 85	1.17 ~ 1.78

表 2 地基的土性及分布

深度/m	0 ~ 0.3	0.3 ~ 0.7	0.7 ~ 4.0	4.0 ~ 6.0
土性	遮水垫层	砂土	粉质粘土	砂土

## 2 饱和 - 非饱和非稳定渗流的有限元解析

2.1 基本方程式 一般认为支配土中饱和 - 非饱和状态水分运动的基本方程式符合达西定理和连续性方程。常用的是 Neuman 所提出的饱和与非饱和耦合计算的数学模型，对于二维饱和 - 非饱和渗流来说其支配方程式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} + k(\theta) \right] = (C(\theta) + S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

在这里  $S_s = dn/d$  是储留系数， $C(\theta) = d/d$  是比水分容量。如图 3 所示，当  $S_w = 1$  时  $C(\theta) = 0$ ，式 (1) 成为针对饱和渗流的基本方程式。是判断饱和与非饱和状态的参数， $= 0$  时计算非饱和渗流， $= 1$  时计算饱和渗流。因此使用此式可对饱和 - 非饱和渗流同时进行解析。但是要取得正确的计算结果，必须采用附和河堤土质的水分特征曲线 ( $\theta - \psi$ ) 和非饱和透水系数 ( $\theta - k_r$ )，也就是如图 3 所示的非饱和渗透特性<sup>[3]</sup>。

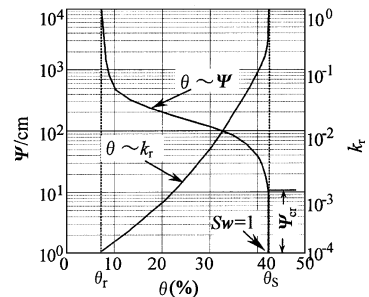


图 3 土的非饱和渗透特性

2.2 土的非饱和渗透特性 一般来讲，水分特征曲线  $\theta - \psi$  可以通过实测<sup>[4]</sup>决定，而非饱和透水系数  $\theta - k_r$  的测定方法<sup>[5]</sup>比较复杂，一般根据水分特征曲线来推定。这里的  $k_r$  为相对传导系数，是非饱和透水系数  $k(\theta)$  和饱和透水系数  $k$  的比。Van Genuchten<sup>[6]</sup>将  $\theta - \psi$  的关系使用一个数值模式（以后称为 VG 模式）来表示

$$S_e = \left[ \frac{1}{1 + (\frac{\psi}{\psi_s})^n} \right]^m \quad (2)$$

式中： $m = 1 - 1/n$ ， $S_e$  是有效饱和度。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

式中： $\theta_s$  是最大体积含水率； $\theta_r$  是最小体积含水率。

将式 (2) 代入 Mualem<sup>[7]</sup>提出的水分特征曲线和非饱和透水系数的数值模式中，可以得到比透水系数  $k_r$ 。

$$k_r = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (4)$$

我们可以根据实测的水分特征曲线来求得 VG 模式的 4 个参数  $s$ ,  $r$ ,  $n$  并依此来反映土的非饱和和渗透特性。

2.3 初始条件和边界条件 作为初始条件应该知道初始的压力水头,

$$h(x, z, 0) = h_0(x, z) \quad (5)$$

而边界条件则分为压力水头已知和流量已知的边界。

$$h(x, z, t) = h_b(x, z, t) \quad (6)$$

$$q_b = -V_b(x, z, t) \quad (7)$$

对式 (1) 进行有限元的定式化可对土中渗流求解。

2.4 长期洪水渗透试验的解析 河堤的洪水渗透试验的解析使用了图 4 所示的有限单元计算网络。并从试验河堤采取试料对筑堤土的水分特征曲线进行了实测。测定使用了土柱法和离心法, 并根据实测数据对 VG 模式的参数进行了推定, 其结果见表 3。地基和遮水垫层的参数采用了同类土的结果<sup>[8]</sup>。河堤的垂直方向的透水系数  $k_v$  采用实验值, 填土的水平方向的透水性一般比垂直方向大, 这里考虑为  $k_h = 2k_v$ 。初始的地下水位根据实测在地表下 2.0m, 而河堤初始的负的压力水头则根据实测的饱和度由水分特征曲线而获得。

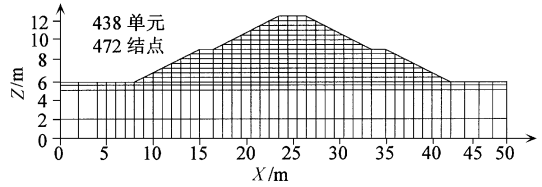


图 4 试验河堤的有限元解析网络

地基和遮水垫层的参数采用了同类土的结果<sup>[8]</sup>。河堤的垂直方向的透水系数  $k_v$  采用实验值, 填土的水平方向的透水性一般比垂直方向大, 这里考虑为  $k_h = 2k_v$ 。初始的地下水位根据实测在地表下 2.0m, 而河堤初始的负的压力水头则根据实测的饱和度由水分特征曲线而获得。

表 3 试验河堤以及地基的非饱和和渗透特性

土性	透水系数			VG 模式的参数		
	$k_v / (\text{cm/s})$	$k_h / (\text{cm/s})$	$\theta / (\text{cm}^{-1})$	$n$	$s$	$r$
河堤	$5.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	0.019	2.1	0.541	0.162
遮水垫层	$5.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.010	1.2	0.541	0.200
地粉质粘土	$1.0 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$	0.010	1.2	0.541	0.200
基砂土	$1.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$	0.0575	1.6	0.541	0.000

### 3 长期洪水渗透时河堤内的渗流

3.1 非稳定渗流解析结果的验证 首先依据实测和解析所得到的浸润线以及饱和度的变化对解析结果的可信性进行了验证。洪水渗透时浸润线的变化的实测结果见图 5 (a), 根据有限元计算得到的结果见图 5 (b)。通过对两者进行比较, 可以看出, 除洪水上升过程中计算值的浸润线稍晚于实测值以

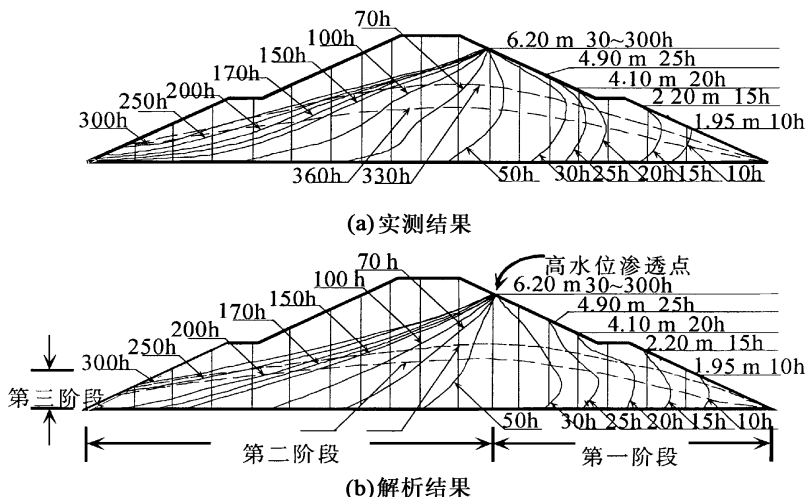


图 5 洪水渗透时浸润线变化的实测和解析结果

外，解析结果基本上与实测结果一致。另外，对洪水渗透时河堤饱和度的变化进行了对比，其解析结果也比较准确地反映了实测结果。由此可见只要正确地把握土的非饱和渗透特性和初始的水分状态，利用上述的有限元法可以对河堤内的饱和 - 非饱和渗流进行比较符合实际情况的解析。因此我们就可以通过计算研究实测中未能明确的渗流问题。

**3.2 河堤内渗流的进展过程** 通过长期洪水渗透试验及其解析所得到的结果，可以认为洪水渗透时浸润线的进展存在着三个阶段（图 5）。第一阶段是浸润线到达高水位渗透点以前的渗透过程。由于洪水不仅由水平方向渗透，而且产生由上至下的垂直渗透，所以浸润线的形状表现为凹形。本试验河堤在此阶段渗透了大约 40h。第二阶段是从高水位渗透点到背面坡脚之间的渗透过程，浸润线以斜线的形状向背面坡脚伸展。根据测定试验河堤在洪水渗透 160h 后，背坡脚开始出现渗漏，所以此阶段渗透了大约 120h。第三阶段是渗出点由坡脚向坡面上方上升最后达到稳定渗流的阶段。随着渗出点的上升，渗流出口比降逐渐变大，坡面的稳定性明显下降。在洪水渗透试验时，此阶段伴随了坡脚的渗漏，背坡脚土体变得非常泥泞，发生了明显的土体软化。当洪水渗透 300h 左右，背坡脚平台下部出现裂缝，背坡脚土体发生蠕动。渗透 306h，下游出逸点高度达到 1.5m 时坡面发生了滑动破坏。根据延长洪水渗透时间的有限元计算结果，此坡面破坏时尚未达到稳定渗流阶段。达到稳定渗流的渗透时间大约需要 400h 左右，届时，出逸点高度将达到 2.0m 左右。洪水渗透的第三阶段是明显影响坡面稳定性的阶段，对试验河堤来说，大约需要 240h 左右方能达到稳定渗流阶段。

另外，我们对洪水渗透时非饱和领域的水分变化也进行了测定。图 6 总结了河堤饱和度的变化。由于试验在冬季实行，在初期河堤处于相对干燥状态 [图 6 (a)]。从整个过程来看，洪水渗透所引起的水分增加主要出现在浸润线以内的范围。除第一阶段 [图 6 (b)] 水分的增加范围比较大以外，浸润线前方非饱和领域的水分增加都局限在很狭窄的范围内 [图 6 (c), (d)]。由此可以认为洪水时浸润线的变化对河堤稳定性的影响是主要的，而由洪水渗透所引起的饱和度上升对稳定性只产生次要的影响。

洪水回落后，浸润线在迎水坡面附近开始下降，形成一个中间高，两边低的弧形浸润线。弧形浸润线的中央最高点最初出现在迎水坡附近，而后逐渐转移到河堤中心部。此后弧形浸润线基本保持平行下降。但是需要指出的是，洪水回落后河堤在相当长的时期内难以摆脱高浸润线，高饱和度的状态。

#### 4 洪水前期浸润条件、水分条件对非稳定渗流的影响

在长期洪水渗透试验时，试验河堤的破坏是在洪水渗透 306h 后发生的。虽然试验河堤采用了比较松散、易于破坏的压实施工，但仍然承受了将近 12d 设计高水位的渗透。作者对近 20 年日本所发生的河堤破坏进行统计，从中发现由渗透所引起的河

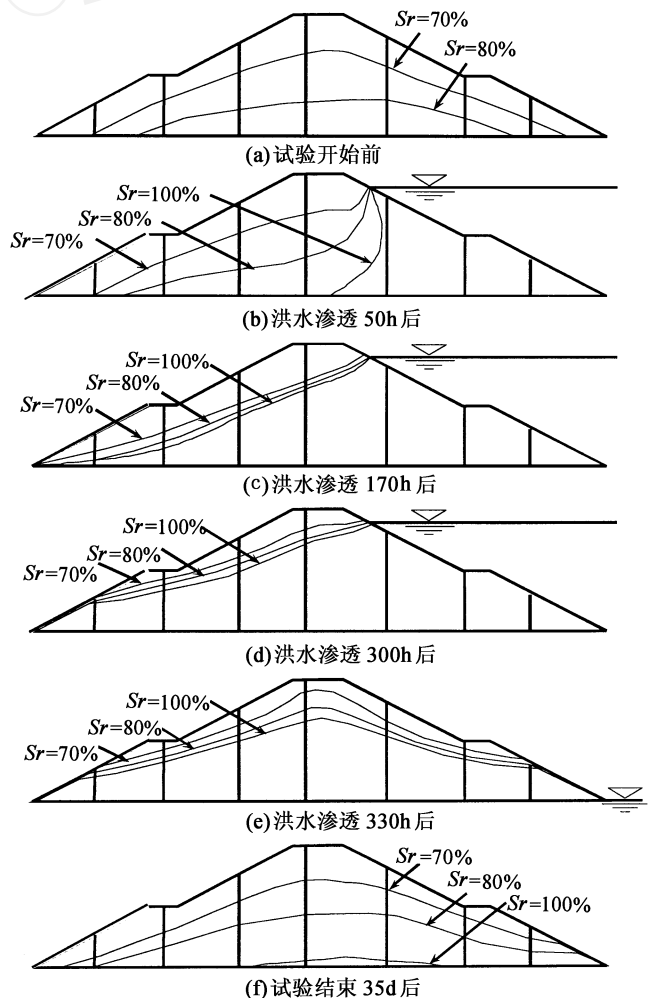


图 6 河堤饱和度变化的实测结果

堤破坏一般发生在洪水渗透 100h 以内，这个时间远远短于试验堤的渗透破坏时间。对其原因进行分析，我们发现长期洪水渗透试验是在冬季实施，因此河堤水分状态处于相对干燥时期，试验前堤身中没有形成浸润线而且地下水位分布位置也比较深。这与一般洪水渗透前期的条件有所不同。一般河堤在洪水到来之前，堤身内已形成一定高度的浸润线，也就是说初步完成了上述第二阶段的渗透过程。而且，由于洪水前期降雨的作用堤身土体也处于较为湿润的水分状态。这些不同点对洪水渗透会产生多大的影响呢，作者使用有限元饱和 - 非饱和渗流计算进一步对这一问题进行了分析。

**4.1 地下水位对洪水渗透的影响** 洪水渗透试验前的地下水位在地表下 2.0m。为了明确地下水位对渗流的影响，在计算时对地下水位的位置进行变化，以 0.5m 的间隔使其上升。有限元计算的其它条件与试验河堤的计算一样。

通过计算，发现在地下水位较低的情况下，地下水面和河堤底面之间存在着一个非饱和带。洪水的渗透在河堤和地基内同时进行，浸润线向前推进时首先要使地基内的非饱和带饱和。所以地基内的非饱和带对浸润线的伸展有着一定的制约作用。其厚度越大浸润线向前推进的速度越慢。图 7 是各种地下水条件时洪水渗透结果的比较。破坏时的洪水渗透时间是根据浸润线的位置，也就是说浸润线达到试验河堤破坏状态时的时间而获得。从计算结果可以看出初期的地下水的上升大大缩短了洪水渗透的第一阶段、第二阶段所需时间，对非饱和渗流产生很大的影响。如果试验河堤的初期地下水位在地表附近的话，河堤的破坏时间将会缩短到 170h 左右，是试验堤的一半。

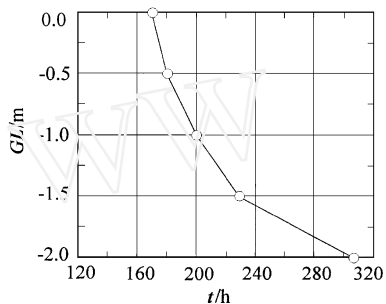


图 7 地下水位的位置与洪水渗透的关系

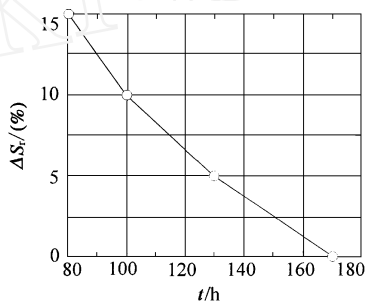


图 8 河堤的初期饱和度与洪水渗透的关系

**4.2 前期饱和度对洪水渗透的影响** 为了分析前期饱和度的影响，将河堤的初期饱和度以 5 % 的间隔使其上升，通过计算了解其影响。解析时地下水位设定在地表面。另外，在 5 % 以内的增加就达到饱和的部分采用了 100 % 的饱和度。

初期饱和度的增加，使浸润线的伸展明显加快。河堤非饱和部分的水分量的增加不但使达到饱和所需的水分量减少，而且使非饱和土的透水系数大大增加，加快了非饱和状态水分的移动速度。结果，洪水渗透的第三阶段所需时间大幅度缩短，浸润线在短时间内到达背面坡脚后，出渗点以较快的速度上升。图 8 是各种饱和度时洪水渗透结果的比较。同样，破坏时的洪水渗透时间是根据浸润线达到试验河堤破坏状态时的时间。从计算结果可以看出初期饱和度对洪水渗透有很大的影响，如果试验河堤的初期饱和度平均增加 15 % 的话，河堤的破坏时间会进一步缩短到 80h，大约只是试验堤的四分之一。

## 5 结 论

通过实地大尺寸河堤的长期洪水渗透试验以及有限元饱和 - 非饱和渗流计算，对长期洪水渗透时河堤内由非稳定流到稳定流的过程进行了研究，并对河堤内渗流的影响因素作了分析。从中可以得知：(1) 河堤的渗透破坏多是在大出口比降条件下洪水长期出渗所引起。长时间的出渗会引起堤身发生渗漏，管涌和土体软化从而发展为坡面滑动以至决堤。所以大出口比降条件下的出渗时间也是判断

河堤稳定性的重要因素之一。使用稳定流计算虽然可以反映洪水渗透的最坏条件，但难以表达达到这种最坏条件所需的时间和过程，所以研究洪水渗透的从非稳定流到稳定流的过程是评价河堤稳定性的另一个重要方面。(2) 洪水渗透由非稳定流到稳定流的过程主要可以分为三个阶段。洪水渗透进行到第三阶段后，开始出现渗漏，土体软化。随着出渗点的上升，坡面稳定性下降，进而发展成坡面失稳。(3) 洪水在每个阶段的渗透时间是与河堤的各种条件密切相关。经过分析表明，洪水前期浸润线位置较高，堤身比较湿润时，洪水渗透很快完成三个阶段的过程到达稳定渗流阶段。这是河堤的稳定性会大大降低。(4) 根据本文的思路，我们认为在评价河堤稳定性时应适当考虑到达稳定流所需的时间，对于很快就会达到稳定流而且出渗点较高的河堤应该优先采取加固措施。(5) 河堤加固时不但要采取降低出口比降的措施，也可辅助采用延长洪水渗透达到稳定流所需的时间的方法，比如保持堤身干燥状态，抑制前期浸润线位置等方法。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 朱伟, 山村和也. 雨水 洪水渗透时河堤的稳定性 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21 (4).
- [ 2 ] 堤防工程设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.
- [ 3 ] 赤木浩一, 大西有三, 西垣诚. 有限要素法による饱和-不飽和浸透流の解析 [C]. 土木学会論文報告集, 1977, 264.
- [ 4 ] 地盘工学会. 土の試験実習書 [M]. 地盘工学会发行. 1991.
- [ 5 ] 中野政诗, 等. 土壤物理环境测定法 [M]. 东京: 东京大学出版社. 1995.
- [ 6 ] Van Genuchten, M. Th: A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Am. J., Vol. 44, No. 5, 1980. 892 - 898.
- [ 7 ] Mualem Y. Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media: Generalized Macroscopic Approach [J]. Water Res., 1978, 14 (2).
- [ 8 ] 西垣诚, 楠见和纪. 不飽和土の浸透特性の評価に関する考察 [C]. 不飽和土の工学的性質研究现状シンポジウム发表论文集, 土质工学会, 1987.

## Observation and analysis of unsteady seepage flow in river embankment

ZHU Wei<sup>1</sup>, LIU Han-long<sup>1</sup>, GAO Yu-fen<sup>1</sup>, YAMAMURA Kazuya<sup>2</sup>

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nihon University, Japan)

**Abstract:** Under the long-term action of flood, the phreatic line rises and reaches the toe of the landslide slope. This results in an increase of pore pressure and a decrease in strength of unsaturated soil. Consequently, a slide or collapse of river embankment occurs. In this paper, the process of infiltration in a prototype river embankment and its flow characteristics are observed and analyzed by FEM.

**Key words:** river embankment; flood infiltration; phreatic line; finite-difference equation; saturated-unsaturated flow; stability.