

# 双层堤基管涌破坏过程中上覆层渗透破坏发生发展的试验与分析

陈建生<sup>1, 2</sup>, 何文政<sup>1, 2\*</sup>, 王 霜<sup>1, 2</sup>, 何海清<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 利用室内试验模拟了刚性盖板下双层堤基渗透破坏的过程, 研究了堤基发生管涌破坏后对上覆黏土层的影响。通过肉眼观察, 照相机辅助拍摄及试验过程中测压管水位, 流量和出砂量等的变化, 分析了管涌过程中刚性盖板下黏土层破坏的发生及发展过程。堤基发生管涌破坏后, 砂层上部细颗粒逐渐流失, 形成强渗流通道并逐步向上游发展。渗流通道与上层黏土之间形成脱空, 黏土层发生轻微沉降变形, 在水流作用下产生不均匀变形导致黏土层中裂纹的产生并在水力劈裂作用下裂纹逐渐变成裂缝并越来越大, 水流通过裂缝在塌陷黏土与刚性盖板之间急速流动, 产生冲刷, 破坏范围随管涌的发生向上游发展。黏土层的破坏促进了管涌的发生, 而管涌通道不断向上游发展也加速了黏土层的破坏, 两种过程相互作用, 相互影响。

**关键词:** 管涌; 双层堤基; 黏土层; 渗流通道; 室内试验

**中图分类号:** TU41      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2013)10-1777-07

**作者简介:** 陈建生(1955-), 男, 江苏泗阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事同位素水文学、渗流理论与示踪探测技术的研究。E-mail: jschen@hhu.edu.cn。

## Laboratory tests on development of seepage failure of overlying layer during piping of two-stratum dike foundation

CHEN Jian-sheng<sup>1, 2</sup>, HE Wen-zheng<sup>1, 2</sup>, WANG Shuang<sup>1, 2</sup>, HE Hai-qing<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The piping erosion process in two-stratum dike foundation is simulated by means of laboratory tests to study the influence on the overlying clay layer after piping of the dike foundation. Through the macroscopic observation, camera auxiliary shooting and change of piezometric level, flow rate and sand production during the tests, the occurrence of damage and developing process of clay layer under the rigid plate are analyzed. After piping, the fine sand particles on the top are gradually eroded, and a concentrated leakage passage gradually developing upstream is formed. Due to the gap between the leakage passage and the clay layer, slight settlement and flows lead to inhomogeneous deformation in the clay layer, so cracks are produced and become larger and larger under the action of hydraulic fracturing. So water rapidly flows between the collapsed clay and the cover through the crack. Under this effect, the clay layer is scoured and the range of damage develops upstream with the piping. The destruction of the clay layer promotes the occurrence of piping, and the piping passage continuously developing upstream also accelerates the destruction of the clay layer. Two kinds of processes are interactive.

**Key words:** piping; two-stratum dike foundation; clay layer; leakage passage; laboratory test

## 0 引言

江河上的堤坝工程很多都坐落于双层堤基上, 这种堤基的典型特点是由弱透水性的上覆层(一般为自然堆积的黏土层)和强透水性的下伏砂层组成。汛期水位上涨, 水压力逐渐增大, 打破上覆层底部的静力平衡, 在水压力的作用下顶破上覆层薄弱处, 发生管涌。下伏层大量细颗粒的流失形成集中渗漏通道, 造

成渗透破坏, 给堤坝工程带来了巨大的损失<sup>[1]</sup>。1998年大洪灾以后, “管涌”一词被广泛使用, 人们也充分认识到对双层堤基渗透破坏过程研究的重要性。国内众多学者对管涌的发展机理, 发展过程及管涌模型的

基金项目: 科技部“973”项目(2012CB417005)

收稿日期: 2013-01-06

\*通讯作者

建立, 有限元模拟等开展了大量的深入研究, 如李广信等<sup>[2]</sup>、姚秋玲等<sup>[3]</sup>、梁越等<sup>[4]</sup>通过砂槽模拟试验分别研究了管涌发生及发展过程; 周健等<sup>[5-6]</sup>通过对不同砂样在各渗透坡降下管涌发展过程的研究, 揭示了管涌发展过程中土体几何特性和水利特性的复杂变化; 刘忠玉等<sup>[7]</sup>根据可动颗粒在骨架颗粒中的受力和运动情况, 建立了无黏性土管涌发生发展的毛管模型; 陈建生等<sup>[8]</sup>根据井流理论对堤防管涌发生后产生的集中渗漏通道的机理进行了详细的分析探讨; 介玉新等<sup>[9]</sup>通过渗流-管流耦合的方法对管涌的发展规律进行描述并提出管涌通道随时间发展变化的计算方法; 李守德等<sup>[10]</sup>提出一维通道嵌入三维块体的方法, 对均质土坝管涌发展过程进行了有限元模拟, 得出较好的结论。

目前对管涌发生后下伏砂层的破坏过程研究较多, 而对砂层破坏后与之带来的上覆黏土层的破坏情况研究较少。刘杰等<sup>[11-12]</sup>在对不同渗透系数比、不同砂层细颗粒含量的双层堤基进行研究时, 发现管涌破坏会导致黏土层的破坏并向堤脚发展且当细颗粒含量大于20%时, 渗流通道形成后将会影响上部土层的稳定性。但其只是在对不同试验方案下试验现象的描述, 并未对黏土层的破坏机理及发展方式进行科学的解释。本文通过室内模拟试验, 采用管涌型土且细料含量占29% (研究渗流通道形成后对上部土层稳定性的影响), 通过逐级增加水头的方式, 记录试验过程中沿程测压管水位、流量、出砂量等参数变化及观察黏土层在此试验过程中的破坏情况, 对刚性盖板下部堤基管涌破坏过程中上覆黏土层渗透破坏的发生及发展过程进行了初步的分析, 并对黏土层的破坏机理做了初步的探讨。

## 1 试验模型与试样

### 1.1 试验模型

试验在长方形有机玻璃槽内进行, 其构造见图1, 该模型槽长为100 cm, 宽为30 cm, 高为30 cm, 模型左侧为一进水室, 在砂样与进水室之间设置一层隔砂网, 使水流均匀的流入砂样内。模型槽顶面为一刚性玻璃盖板, 模拟刚性坝体, 试验时可用胶水及螺丝将其与砂槽密封, 起到隔水的作用。盖板下面设置厚度为5 cm黏土层模拟弱透水的上覆层。盖板右端指定位置开有直径为5 cm的出水口, 模拟上覆层被冲破后形成的管涌口。模型槽侧壁布置7根测压管, 以便测得试验中试样内部孔压在试验过程中的变化情况。由于模型尺寸的限制及内部试样不能达到绝对的均匀, 所以沿程测压管只能反映大致的水头分布变化趋势。试验中以模型槽顶面为零势面。本试验的试样是由砾

石和细砂按一定比例混合而成, 混合砂砾料的物理参数为 $d_{10}=0.2$  mm,  $d_{30}=0.85$  mm,  $d_{60}=4.1$  mm,  $C_c=0.84$ ,  $c_u=19.5$ 。其中砂粒 $\rho_{s1}=2.53$  g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{d1}=1.52$  g/cm<sup>3</sup>; 砾石 $\rho_{s2}=2.56$  g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{d2}=1.54$  g/cm<sup>3</sup>。混合砂砾层渗透系数 $k=2.18\times 10^{-2}$  cm/s,  $n=0.22$ ; 混合后的试样颗粒级配曲线及黏土的颗粒组成如图2所示, 其中细粒含量为29%, 黏土 $w_L=30\%$ ,  $w_p=17.5\%$ ,  $I_p=12.5$ 。

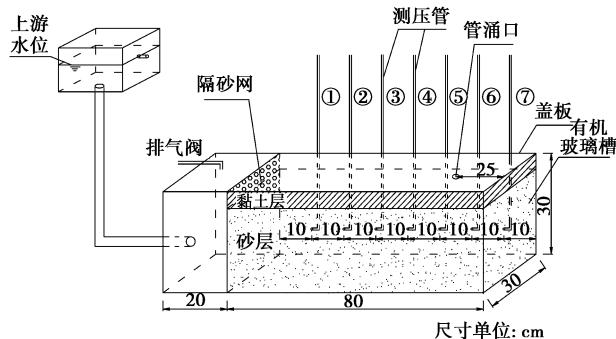


图1 模型构造及测压管布置

Fig. 1 Structure of model and distribution of piezometer tubes

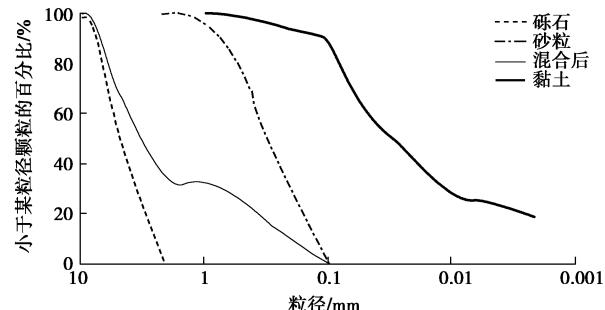


图2 试验颗粒组成及混合后的颗粒级配

Fig. 2 Grading curves of samples before and after mixing

### 1.2 试验步骤

①装样并饱和。设置试验颗粒级配, 采用水下分层抛填并压实的方法进行填筑, 每层装填的厚度约5 cm, 每装完一层砂, 将水注其对应高度压实刮平后继续填砂, 直至设计高度, 再在试样上部覆盖黏土垫层, 抹平压实后盖上玻璃盖板, 向试样内加水至试样顶面以上, 饱和24 h以上; ②分级增加上游水头开始试验; ③试验开始后记录每级上游水头下相应的流量, 测压管水位等参数; ④收集渗透破坏过程中涌出的砂; ⑤在渗透破坏后, 静置一段时间, 分别揭开盖板和黏土层。

## 2 试验过程

试验开始后采用逐级增加上游水头的方式来驱动渗流及渗透破坏的发生过程, 当某一级水头下渗流稳定后, 再抬高水头进行下一级水头下的试验。判断渗

流稳定的标准: 渗流量和测压管基本稳定, 管涌口水流清澈且无砂粒涌出。试验过程中记录各级水头的数值及测压管读数, 同时记录给定水力梯度下流量的情况。表1为各级水头下的试验结果,  $N$ 为水头级数,  $T$ 为各级水头距试验开始时的时间,  $H$ 为上游水位与管涌口位置高度之差,  $Q$ 为每级水头下管涌口处的流量,  $J$ 为水平平均比降  $J=H/L$  ( $L$ 为最短渗径, 即为管涌口到进水面的最短距离)。本模型中  $L$  为 55 cm。图5为沿程各测压管随上游水头升高的变化曲线。施加上游水头, 结合流量曲线(图3)及试验过程中的现象, 试验过程可分为下面几个阶段:

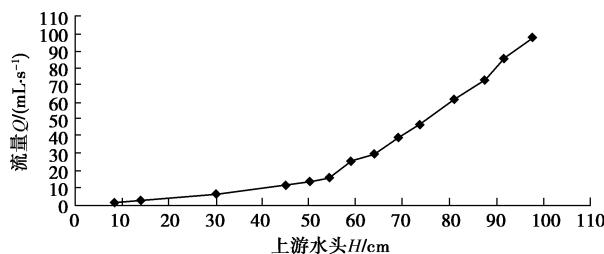


图3 流量随上游水头的变化曲线

Fig. 3 Variation of flux with hydraulic head

表1 试验结果

Table 1 Test results

$N$	$T/min$	$H/cm$	$Q/(mL\cdot s^{-1})$	$J$
1	20	8.5	0.99	0.154
2	50	14.0	2.50	0.254
3	80	30.0	6.30	0.545
4	110	45.0	11.40	0.818
5	140	50.0	13.30	0.909
6	185	54.2	15.80	0.985
7	240	58.9	25.30	1.071
8	320	63.8	30.00	1.160
9	390	69.0	39.20	1.254
10	460	73.6	46.90	1.338
11	530	80.9	61.90	1.471
12	610	87.5	72.70	1.591
13	650	91.6	85.30	1.665
14	700	97.5	97.70	1.772

(1) 初期渗流稳定阶段(0~185 min)。这一阶段水力梯度  $J$  开始时为 0.154, 预设孔口变得浑浊, 夹杂着一些细小的黏土颗粒溢出孔口, 并冒有气泡; 10 min 后管涌口水流变的清澈且流量也较为稳定, 维持一段时间后继续增加上游水头, 管涌口处的细小砂粒开始出现轻微的翻滚, 但是并未被带出孔口, 此时堤基内部砂层已经发生渗透变形。这一阶段试样内部水头随上游水头的增加而增加且保持很好的一致性, 渗流量也很小, 流速缓慢, 随上游水头的上升呈线性增长(如图3), 沿程各测压管水位值也随平均水力比降的升高而升高(如图5)。

(2) 砂层局部渗透破坏阶段(185~240 min)。当  $H$  升高到 58.9 cm, 此时  $J$  为 1.071, 渗流量突然增

大与上游水头开始偏离线性关系(如图3), 测压管水位值也发生突变, 且距预设管涌口越近突变越明显(如图5), 砂粒在孔口剧烈翻滚, 管涌口变的浑浊, 达到起动流速的颗粒随水流一起流出孔口, 此时堤基内部已经发生局部的管涌破坏, 管涌口附近颗粒正逐渐流失。管涌破坏发生后, 沿程测压管水位值降低, 靠近孔口的测压管降幅较大, 越远离孔口测压管水位降幅越小(如图5), 而离上游水箱附近的测压管则有小幅上升。在这一阶段水平向的强渗流通道已经初步形成, 但向上游的发展范围仅限于管涌口附近, 此时上覆黏土层还未见明显破坏且渗透破坏也局限于下伏砂层管涌口附近。

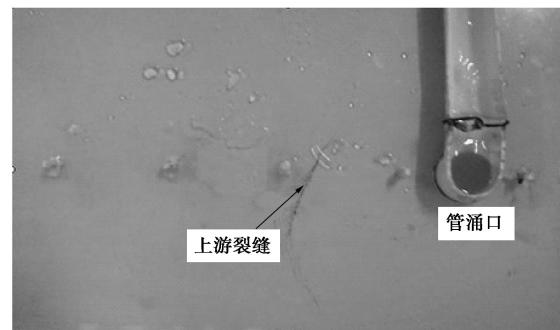


图4 管涌口上游裂缝

Fig. 4 Crack in upstream of piping mouth

(3) 上覆层渗透破坏至堤基整体破坏阶段(240~700 min)。涌砂过后, 出水口水流由浑浊逐渐变清澈, 渗流进入了一个相对稳定的时期, 水头稳定约 5 min 后, 在管涌口附近上游不远处出现了一条纵向的细小裂缝(如图4), 有小股水流不断的从裂缝中往上冒, 在水流的作用下, 裂缝逐渐纵向发展, 到一定程度停止, 这时裂缝中的水流从黏土层上部逐渐流向管涌口。当  $J$  为 1.16 时, 裂缝继续纵向发展且变宽, 急速水流在裂缝中部形成突破口, 大量砂粒从此处涌出, 之后在距预设管涌口上游 5 cm 处又产生另一条裂缝。急速水流通过突破口从黏土层上部流向管涌口, 在盖板与黏土层之间发生了强力冲刷, 黏土层一点点侵蚀, 黏土颗粒被逐步带出管涌口, 渗流变为泥浆, 然而部分较大点的黏土颗粒在管涌口处沉积, 此时预设管涌口上游测压管水位开始上升(如图5), 不久又造成预留管涌口发生涌砂。黏土层上部在持续的水流作用下被冲刷成一条浅浅的沟槽, 且在沟槽附近的黏土也发生程度不等的破坏。此时沿程的测压管水头均下降且降幅很大。继续增加上游水位, 管涌口不断地涌砂, 黏土层上部裂缝不断在上游出现, 黏土层的破坏也逐步向上游发展, 最终造成堤基整体破坏, 渗流通道与上游水箱发生贯通。此时各测压管水位都变得很低, 流量也很大, 再升高上游水位测压管变化幅度

也不大, 此时降下水头, 结束这一阶段试验。

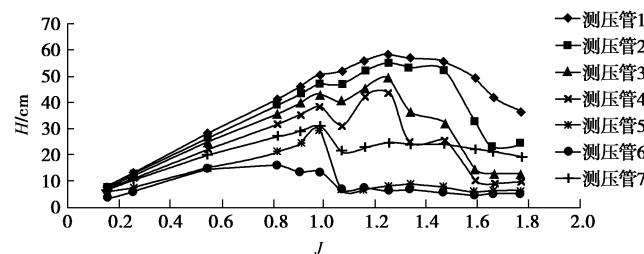


图 5 不同水平平均水力比降下各测压管水位的变化

Fig. 5 Variation of piezometric level under different hydraulic gradients

### 3 试验结果分析

#### 3.1 测压管水位在渗透破坏发展过程中的变化

图 6 为堤基渗透破坏过程中沿程部分测压管水位的变化曲线。试验初, 渗流较稳定, 流量及流速均较小, 管涌口可视为一减压井, 水头损失主要集中在其附近, 距离管涌口越远压力水头越大, 测压管水位值也越高, 当发生管涌破坏后, 砂粒的流出和水压力的突然释放使得测压管水位下降, 但距管涌口越远降幅越小。如当  $J$  从 0.985 变为 1.071 时, 距管涌口越远测压管水位降幅越小, 但接近进水室位置的测压管水位升高, 其原因是距离管涌口较远, 管涌的发生对该处测压管影响值小于上游水位的升高值, 从而可知砂层的颗粒流失对测压管水位的影响很大。当上游出现裂缝后, 加剧了砂粒的流失, 裂缝与预设管涌口之间的测压管水位明显降低, 且随着上游水位的升高测压管水位变化不大。如图在距上游 50 cm 处, 继续增加  $J$  其测压管水位变化不大, 说明下部砂层强渗流通道已经发展到该位置。当黏土层破坏位置逐渐向上游发展接近进水室后, 沿程所有测压管水位都降的很低, 这时流量剧增且再升高上游水位测压管变化幅度很小。这时堤基内部已经发生贯通, 发生整体的渗透破坏。从图 6 的测压管水位变化过程可知, 随着渗流通道的发展测压管水位线的陡坡段在不断前移, 强渗流通道内的水头损失逐渐减小, 而未见破坏段的水头损失在不断增大<sup>[13]</sup>。因此沿程测压管水位的变化可以大致反映渗流通道的发展情况及堤基的破坏范围。

#### 3.2 堤基破坏的加速过程

试验中发现, 同一上游水位下, 由于管涌口上游黏土层中裂缝的出现, 集中水流通过裂缝在玻璃盖板与黏土层之间发生冲刷, 完整的黏土层被逐步侵蚀, 细小的黏土颗粒会被水流带出管涌口而较大一点颗粒在管涌口淤积, 致使管涌口处砂层的渗透系数变得越

来越小, 承受的渗透压力变得越来越大, 如图 7 (a) 所示。此时该附近的测压管水位不断上升, 当渗透压力大于其所能承受的水压力时就会被再次冲破, 管涌口再次发生涌砂并夹杂着黏土颗粒, 流量变大, 此过程中测压管水位持续降低最后趋而稳定。在释放压力的同时裂缝处水流流量变大, 流速变快, 加速了黏土层上部接触冲刷的速度, 同时也有大量的砂粒从裂缝中涌出, 加快了砂层被淘空的速度, 如图 7 (b) 所示。黏土层的持续冲刷会使得黏土颗粒再次淤积在管涌口, 这样循环往复发生间歇性涌砂, 当该水位下的渗透压力不足以再次冲破管涌口砂粒时, 间歇性涌砂将不再会发生, 直至增加上游水位。图 8 为管涌发生后的涌砂量统计, 线性拟合后, 黏土层破坏后的涌砂量的斜率是未破坏之前的约 23 倍, 可知黏土层的破坏促进了管涌的发生, 加速了堤基的破坏过程。

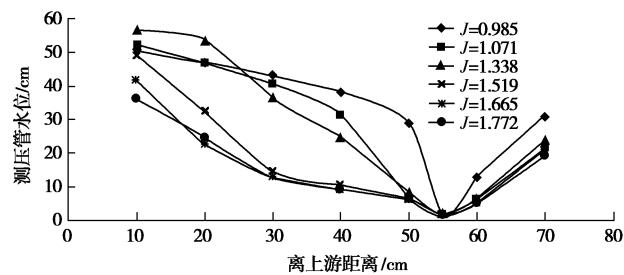


图 6 部分水平平均水力比降下沿程测压管水位变化曲线

Fig. 6 Variation of piezometric level under in part of hydraulic gradient

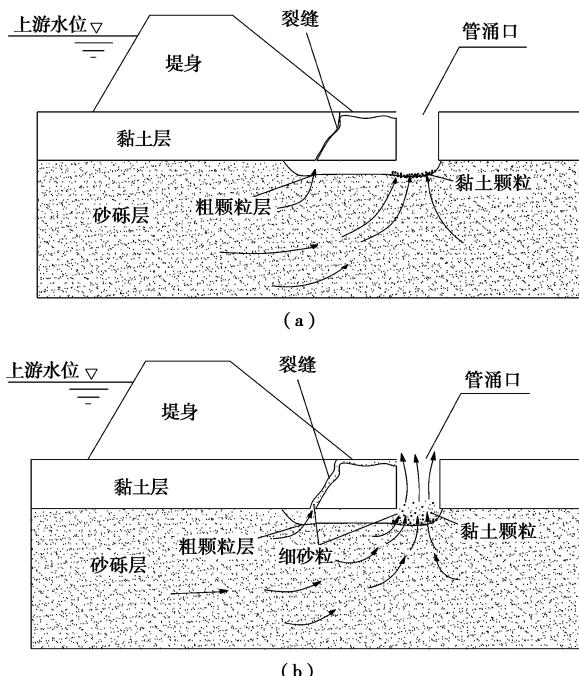


图 7 堤基加速破坏示意图

Fig. 7 Accelerated erosion process of embankment

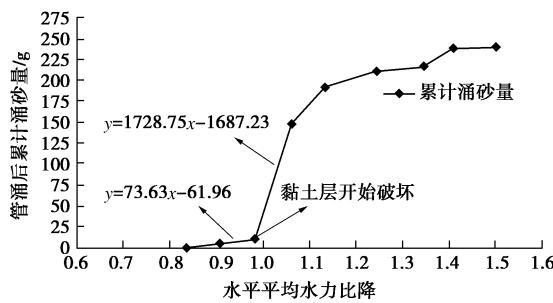


图 8 管涌破坏后各水平平均比降下的累计涌砂量

Fig. 8 Variation of cumulative sand production under various hydraulic gradients after piping

### 3.3 上覆层渗透通道位置分析

试验结束后依次揭开盖板和黏土层进行拍照, 发现黏土层下部, 砂层顶面已经形成一条强渗流通道, 通道上面的细颗粒已基本全部流失, 且发现砂层上部渗流通道的位置和黏土层上部冲刷所形成的沟槽位置基本保持一致 (如图 9)。其主要原因: ①破坏后出口附近在沿层界面并指向堤外方向上渗透比降最大, 且沿该方向的临界比降取决于强透水层的水平临界比降, 所以水平方向即为渗透变形的优先方向<sup>[14]</sup>, 渗流通道的位置也将在界面处沿水平方向向上游发展; ②渗漏通道水平向发展, 界面处渗透系数变大, 流量变大, 砂粒更容易流出; ③砂粒流失形成强渗流通道, 造成黏土层破坏向上游发展。

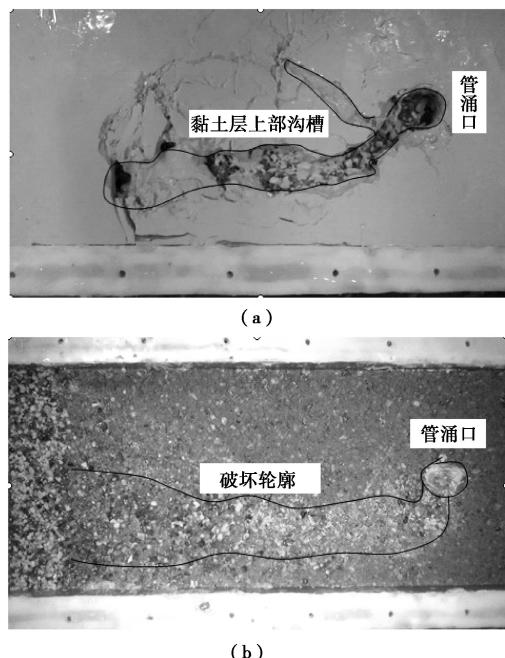


图 9 渗透破坏形成的集中渗漏通道

Fig. 9 Centralized leakage passage induced by seepage erosion

### 3.4 上覆层渗透破坏的发生及发展过程

对于双层堤基, 渗透破坏是先从上覆层流土破坏开始的。在渗透破坏前上覆黏土层的渗透系数比砂层的渗透系数小得多, 因此上覆层底面会承受很大的水压力。当上游水位升到一定高度时, 不断增大的水压力打破了上覆层底部的静力平衡, 黏土层薄弱地段被水流穿破, 发生流土破坏, 形成管涌口, 管涌口及其附近的颗粒因达到起动流速而被带出, 且随着上游水位的升高, 堤基不断发生管涌, 砂砾层顶部大量细颗粒的流失导致渗流通道不断地向上游发展。由于两层堤基界面处细颗粒的大量流失使得黏土层与砂层之间接触不紧密产生局部脱空: 一方面在重力的作用下, 脱空部位顶部的黏土层会发生轻微的沉降变形, 产生塌陷, 塌陷处与水平方向产生倾角, 导致水流对上覆黏土层的水平拉裂作用增强; 另一方面脱空处渗透系数变大, 流速也显著增大, 黏土层的不均匀变形作用增强导致裂纹的产生, 在不断增大的水压力下水流在黏土裂纹处产生水力劈裂致使裂缝产生并逐渐变大。在水平力和竖向力共同持续的作用下, 最终在黏土层中产生了一条纵向的裂缝。裂缝的产生导致黏土颗粒之间的粘聚力降低, 土体抗剪强度降低, 随着  $H$  的升高, 裂缝不断纵向发展并扩大, 水流通过裂缝不断的往上顶, 而刚性玻璃盖板的变形协调能力较差, 局部黏土层的塌陷使其与玻璃盖板之间形成了缝隙, 水流通过裂缝从黏土层上部逐渐流向管涌口, 裂缝到管涌口处的黏土层与盖板之间形成宽为  $b$  的张开裂隙, 由裂隙立方定理<sup>[15]</sup>知

$$q = -\frac{g}{\mu} J b^3,$$

式中,  $q$  为单裂隙流量,  $\mu$  为流体运动黏滞系数,  $g$  为重力加速度,  $J$  为水力坡降。

黏土层上部在水流的作用下慢慢被侵蚀,  $b$  变得越来越大, 导致裂隙中流量变得很大, 流速很快, 冲刷作用更加明显, 随着管涌的发生黏土层的破坏不断向上游发展。砂层的管涌与黏土层的破坏这两个过程相互作用, 相互影响, 可表示为砂层破坏—黏土层破坏—砂层破坏。最终裂缝发展到进水室一侧后, 砂层渗流通道与进水室贯通, 水流在玻璃盖板与黏土层之间快速的冲刷, 最终导致堤基整体破坏。坐落于双层堤基上的堤坝工程, 当两层堤基界面处细砂粒发生管涌破坏全部流失后, 其坝体下部坝基渗透破坏过程与上述过程类似, 其渗透破坏过程示意图如图 (10) 所示。

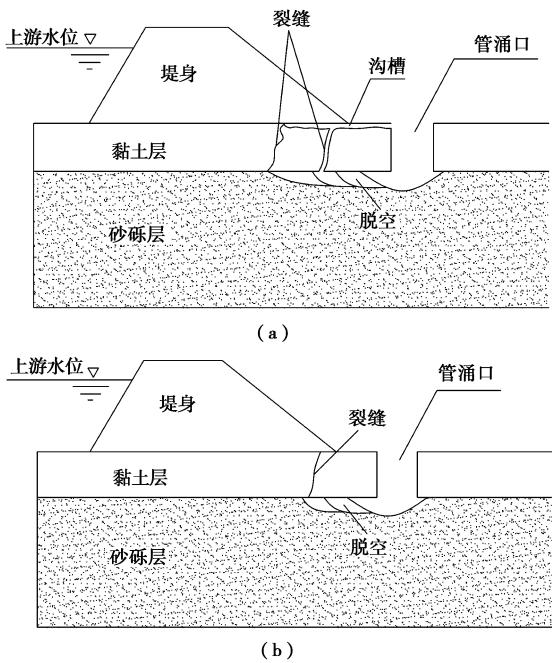


图 10 堤基下部黏土层的渗透破坏过程示意图

Fig. 10 Seepage erosion process of clay stratum under embankment

## 4 结 论

本文采用室内试验装置, 模拟了刚性坝体下的双层堤基在发生管涌后, 上覆黏土层渗透破坏的发生及发展过程, 从试验中可以得到以下结论:

(1) 双层堤基在发生渗透破坏时, 一旦上覆黏土层被顶破发生管涌破坏后, 砂层的涌砂以垂直方向为主转变为水平方向为主, 之后随着上游水位的升高在水平渗透力的作用下导致颗粒的大量流失。

(2) 双层堤基砂层渗透破坏位置主要位于顶部, 砂层发生管涌破坏后顶部形成一条强渗流通道, 使得流量剧增, 在水平拉力和竖向力的共同作用下加剧了上层黏土的破坏并随着强渗流通道开始向上游发展, 而黏土层的破坏会加大涌砂量, 加快堤基被淘空的速度, 因此若控制砂层发生管涌后其通道不会向上游发展, 则黏土层的破坏也将停止, 这与文献[11]的结论相符。

(3) 堤基土的结构各异, 管涌型土的渗透破坏可能会影响上部结构及土层的稳定性, 因此要控制好砂层细颗粒的含量, 不允许其发生流失, 可采用保护滤料不允许流失的原则设置反滤层。

(4) 刚性坝体的变协调能力差, 当上部土层发生沉降变形时导致土层与坝体之间产生间隙, 当黏土层发生破坏后, 水流会通过此间隙流向管涌口, 加速了上部土层的破坏, 因此在实际施工时, 针对不同地方的土层结构要考虑好坝体与堤基之间有很好协调能力

的方法, 当土体发生管涌破坏后, 应及时做好减压和灌浆等工作, 避免管涌通道向上游发展, 保护坝体的稳定。

## 参考文献:

- [1] 姜付仁, 程晓陶, 向立云, 等. 美国 20 世纪洪水损失分析及中美 90 年代比较研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 384 - 388. (JIANG Fu-ren, CHENG Xiao-tao, XIANG Li-yun, et al. Review on the flood losses of the 20th century in the United States and comparative study on flood damages between China and USA in 1990s[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 384 - 388. (in Chinese))
- [2] 李广信, 周晓杰. 堤基管涌发生发展过程的试验模拟[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 12 - 15. (LI Guang-xin, ZHOU Xiao-jie. Laboratory simulation on generation and evolution of piping in embankment foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 12 - 15. (in Chinese))
- [3] 姚秋玲, 丁留谦. 单层和双层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 31 - 36. (YAO Qiu-ling, DING Liu-qian. Experimental studies on piping in single-and two-stratum dike foundations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(2): 31 - 36. (in Chinese))
- [4] 梁越, 陈建生, 陈亮, 等. 双层堤基管涌发生发展的试验模拟与分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 624 - 629. (LIANG Yue, CHEN Jian-sheng, CHEN Liang, et al. Laboratory tests and analysis on piping in two-stratum dike foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 624 - 629. (in Chinese))
- [5] 周健, 姚志雄, 白彦峰, 等. 砂土管涌的细观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 733 - 737. (ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, BAI Yan-feng, et al. Meso-mechanical study on piping in sandy soils[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(6): 733 - 737. (in Chinese))
- [6] 姚志雄, 周健, 张刚. 砂土管涌机理的细观试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1604 - 1610. (YAO Zhi-xiong, ZHOU Jian, ZHANG Gang. Meso-experimental research on piping mechanism in sandy soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1604 - 1610. (in Chinese))
- [7] 刘忠玉, 乐金朝, 苗天德. 无黏性土中管涌的毛管模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3871 - 3876. (LIU Zhong-yu, LE Jin-chao, MIAO Tian-de. Capillary-tube model for piping in non cohesive soils and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2004, **23**(22): 3871 - 3876. (in Chinese))
- [8] 陈建生, 李兴文, 赵维炳. 堤防管涌产生集中渗漏通道机理与探测方法研究[J]. 水利学报, 2000, **31**(9): 48 - 54. (CHEN Jian-sheng, LI Xing-wen, ZHAO Wei-bing. Study on piping leakage mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, **31**(9): 48 - 54. (in Chinese))
- [9] 介玉新, 董唯杰, 傅旭东, 等. 管涌发展的时间过程模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 215 - 219. (JIE Yu-xin, DONG Wei-jie, FU Xu-dong, et al. Modelling of developing course of piping with time[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 215 - 219. (in Chinese))
- [10] 李守德, 徐红娟, 田军. 均质土坝管涌发展过程的渗流场空间性状研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(12): 2001 - 2004. (LI Shou-de, XU Hong-juan, TIAN Jun. Researches on 3-dimensional seepage fields of soil dam under piping erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(12): 2001 - 2004. (in Chinese))
- [11] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤双层地基渗透破坏机理模型试验研究[J]. 水利学报, 2008, **39**(11): 1211 - 1220. (LIU Jie, XIE Ding-song, CUI Yi-hao. Failure mechanism of seepage in levees with double-layer foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **39**(11): 1211 - 1220. (in Chinese))
- [12] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤堤基砂砾石层管涌破坏危害性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1188 - 1191. (LIU Jie, XIE Ding-song, CUI Yi-hao. Destructive tests on piping failure of sandy gravel layer of river dikes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1188 - 1191. (in Chinese))
- [13] 丁留谦, 姚秋玲, 孙东亚, 等. 三层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, **38**(2): 19 - 22. (DING Liu-qian, YAO Qiu-ling, SUN Dong-ya, et al. Experimental studies on piping development in three-stratum dike foundations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, **38**(2): 19 - 22. (in Chinese))
- [14] 张家发, 吴昌瑜, 朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002(9): 108 - 112. (ZHANG Jia-fa, WU Chang-yu, ZHU Guo-sheng. Experimental study on seepage deformation propagation control using impervious wall of suspension type[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 108 - 112. (in Chinese))
- [15] 周创兵, 熊文林. 岩石节理的渗流广义立方定理[J]. 岩土力学, 1996, **17**(4): 1 - 7. (ZHOU Chuang-bing, QIONG Wen-lin. A generalized cubic law for percolation in rock joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, **17**(4): 1 - 7. (in Chinese))