

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.011



# 含浅层强透水层堤基的上覆砂层 管涌破坏试验研究

毛海涛<sup>1,2</sup>, 王正成<sup>1</sup>, 王晓菊<sup>3</sup>, 吴恒滨<sup>1</sup>

(1. 重庆三峡学院 土木工程学院, 重庆 404100; 2. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072;  
3. 河海大学 环境学院, 南京 210098)

**摘要:** 堤基中往往存在局部浅层强透水层并形成渗流优先通道, 该通道不能大幅度削减流体的水头势能, 易引起堤基管涌破坏, 此类堤基管涌破坏机理的研究尚不明朗, 仍需进一步研究。采用砂槽试验模拟堤基渗流, 试验中通过抬升水箱水位, 观察砂土中细颗粒流失现象, 并分析渗流量、渗透坡降、测压管水头、砂土颗粒级配、锥头阻力、沉降量等关键参数。试验结果表明, 水箱水位增大至 48 cm, 浅层强透水层上覆砂层被“击穿”发生管涌破坏, 管涌破坏分为稳定渗流阶段、细颗粒流失阶段( $0.05 < d \leq 0.075$  粒级砂土流失)、较细颗粒流失阶段( $0.075 < d \leq 0.1$  粒级砂土流失)、管涌破坏扩大阶段( $0.1 < d \leq 0.25$  粒级砂土流失)。管涌破坏过程中, 细颗粒砂土流失, 锥头阻力降低, 砂土层发生沉降, 且较细颗粒流失阶段的沉降较为突出。细颗粒砂土流失导致砂土层孔隙率和渗透系数上升, 渗流量和渗透坡降随之增大。

**关键词:** 堤基; 强透水层; 管涌; 砂土; 锥头阻力; 沉降

**中图分类号:** TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)03-0073-08

## Experimental analysis of piping failure of sand in dike foundation contains shallow and strong permeable stratum

Mao Haitao<sup>1,2</sup>, Wang Zhengcheng<sup>1</sup>, Wang Xiaoju<sup>1,3</sup>, Wu Hengbin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, P. R. China;  
2. Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China;  
3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

**Abstract:** There is shallow and strong permeable stratum in dike foundation, which can form a prior seepage channel, and fluid head potential isn't weakened by this channel, it is easy to cause dike foundation piping failure, and the study of failure mechanism of dike foundation piping is not clear, it still needs further

**收稿日期:** 2017-07-04

**基金项目:** 国家自然科学基金(51309262、41602367); 重庆市科委基础与前沿研究计划(cstc2015jcyjA1204、cstc2015jcyjA00022); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601024); 重庆三峡学院校企合作项目(15XQ01)

**作者简介:** 毛海涛(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事土石坝渗流机理研究, E-mail: maohaitao1234@163.com.

**Received:** 2017-07-04

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51309262, 41602367); Chongqing Science & Technology Commission Basic and Frontier Research Projects (No. cstc2015jcyjA1204, cstc2015jcyjA00022); Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1601024); School Enterprise Cooperation Project of Chongqing Three Gorges University (15XQ01)

**Author brief:** Mao Haitao (1980-), associate professor, PhD, main research interest: earth-rock dam percolation mechanism, E-mail: maohaitao1234@163.com.

study. Sand tank test is used to simulate embankment foundation influent in this paper, water block stage is driven up in test, and observing the phenomenon of fine particle loss in sand, and the key parameters of seepage discharge, seepage gradient, piezometric tube head, grain composition of sand, cone resistance and settlement are analysed. The test results show that sand on the shallow and strong permeable stratum occur piping failure when water block stage increases to 48 cm. Piping failure is divided into steady seepage stage, internal erosion of fine particles stage, internal erosion of relative fine particles stage and piping failure expansion stage. The internal erosion of fine particles in process of piping failure, and cone resistance has reduced, sand has settled, and settlement heavily focus on internal erosion of relative fine particles stage. The porosity and permeability coefficient of sand, seepage discharge and seepage gradient increase when fine particle loss. This research results can offer theory reference for similar projects.

**Keywords:** dike foundation; strong permeable stratum; piping; sand; cone resistance; settlement

管涌是指地基土体在渗流作用下,填充在土体骨架中的细颗粒被渗流水带走并形成集中渗流通道的地质现象。大量洪灾资料表明,在大堤洪灾中,管涌险情数量最多,分布范围广,且易诱发重大险情,甚至导致大堤溃口,是江河大堤在汛期危害最大的险情之一<sup>[1]</sup>。1998年,长江干流和洞庭湖区堤防分别出现险情 698 和 626 处,其中,管涌分别为 366 和 343 处,分别占 52.44%、54.79%<sup>[2]</sup>。因此,研究堤基上覆土层管涌破坏的发生、发展及破坏机理,优化管涌的预防及治理措施具有重大意义。由于江河上的堤坝工程多坐落于双层堤基上,学者们意识到有必要针对双层堤基管涌破坏进行研究。通过有限元、离散元等数值模拟软件或砂槽模拟试验研究管涌破坏过程及机理,如罗玉龙等<sup>[3]</sup>、陈建生等<sup>[4]</sup>、李广信等<sup>[5]</sup>、梁越等<sup>[6]</sup>借助砂槽模拟试验分别观察了管涌的破坏过程,通过分析试验中的参量研究管涌的破坏机理。胡亚元等<sup>[7]</sup>、陈生水等<sup>[8]</sup>、周晓杰等<sup>[9]</sup>、周健等<sup>[10]</sup>、刘昌军等<sup>[11]</sup>分别采用 Galerkin、FEG、PFC<sup>3D</sup>、GWSS 等数值模拟软件建立双层堤(坝)基管涌动态破坏过程,得出管涌破坏与堤身长度、各层堤基的厚度、堤坝两侧水头差的关系。此外,美国<sup>[12]</sup>、日本<sup>[13]</sup>、德国<sup>[14]</sup>、荷兰<sup>[15]</sup>等国学者也针对双层堤基的管涌机理进行试验研究,并取得部分成果。但上述学者们主要研究对象为单、双和多层堤基,目前针对局部区域存在埋藏较浅的强透水层的堤基管涌破坏过程及机理的研究还较少见。经大量调查资料显示,堤基中局部区域含有浅层强透水层的情况亦较为普遍,如长江中下游堤防<sup>[5]</sup>、珠江的北江大堤<sup>[16]</sup>、江西省九江市城防堤、湖南省安造垸堤防、湖北省孟溪垸堤防、湖北省簪洲湾堤防<sup>[17]</sup>、湖北洪山武金堤和安徽鲁港大堤<sup>[18]</sup>,亟待深入研究。

以局部存在浅层强透水层的砂土堤基为研究对象,借助室内砂槽模型试验,观察堤基管涌破坏的过程,并通过筛分试验和静力触探试验探讨研究管涌破坏的机理,从而提出防治方案及治理措施。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料特性

室内管涌试验共计 3 种材料:砂卵砾石、砂土、聚乙烯透明塑料纸,其中砂卵砾石和砂土构成局部区域含有浅层强透水层的堤基结构,垂直防渗体和堤身采用聚乙烯透明塑料纸代替。土体均取自长江堤防重庆万州段左岸,经室内筛分试验,作砂卵砾石和砂土的颗粒级配曲线,如图 1 所示。

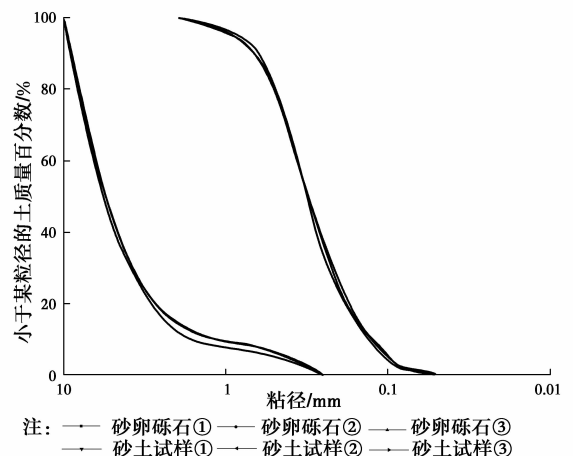


图 1 砂卵砾石和砂土的颗粒级配曲线

Fig. 1 The grading curve of sand and cobble and gravel

由图 1 可得,砂土的有效粒径  $d_{10} = 0.15$ 、中值粒径  $d_{30} = 0.24$ 、限制粒径  $d_{60} = 0.37$ ,不均匀系数  $C_u = d_{60} / d_{10} = 2.47$ ,曲率系数  $C_c = d_{30}^2 / (d_{10} d_{60}) = 1.04$ 。砂卵砾石的不均匀系数  $C_u$ 、曲率系数  $C_c$  参照同样方法求得。

通过烘干法测得土体的含水率、干密度,将土样的基本物理性质指标列入表1。

表1 试验用土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property indexes of soil used in test

土类	含水率/%	孔隙率/%	干密度 $\rho_d/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	有效粒径 $d_{10}/mm$	中值粒径 $d_{50}/mm$	限制粒径 $d_{60}/mm$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	渗透系数 $k/(m \cdot s^{-1})$
砂土	8.94	33	2.42	0.15	0.24	0.37	2.47	1.04	$5.07 \times 10^{-5}$
砂卵石	9.42	42	1.98	1	3.8	7.4	7.4	1.95	$5.18 \times 10^{-3}$

由表1可知,砂土和砂卵砾石的渗透系数分别为  $5.07 \times 10^{-5} m \cdot s^{-1}$ 、 $5.18 \times 10^{-3} m \cdot s^{-1}$ ,砂卵砾石的渗透系数为砂土的102.17倍,砂土为相对弱透水层,砂卵砾石为相对强透水层(下文简称强透水层)。

## 1.2 试验方法

1.2.1 试验装置 试验装置用于模拟局部含有浅层强透水层的堤基渗流过程,观察管涌破坏过程和该特定堤基的管涌破坏机理。砂槽模型试验布置如图2所示。

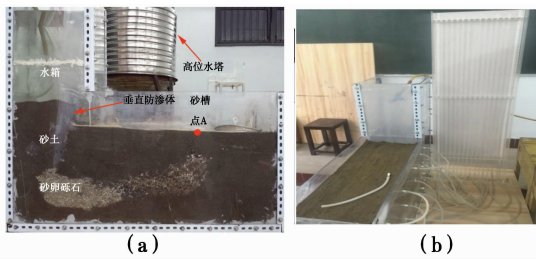


图2 砂槽模型试验布置图

Fig. 2 Arrangement plan of sandbox model test

由图2可得,试验装置由砂槽、测压板、高位水塔组成。砂槽由透明的有机玻璃板和角钢构成,试验砂槽呈“鞋形”,左端为水箱,高于右端。砂槽为长100 cm,宽30 cm,左端高90 cm,右端高50 cm,将砂槽底部高程记为 $\pm 0$  cm。砂土和砂卵砾石分层填筑,构成含有局部浅层强透水层的地基,砂卵砾石厚度为15 cm,砂卵砾石底部高程为5 cm,距离砂槽右壁25 cm。砂卵砾石上覆砂土层厚度为8~20 cm。聚乙烯透明塑料纸深入堤基中,底端高程为20 cm,顶端与水箱侧壁相连接。

高位水塔蓄水量为  $0.85 m^3$ ,借助进水管向左端水箱引水,模拟河堤靠近河道一侧的河流水位。水箱的侧壁上设置了水位调节管,高程为40 cm。砂槽右端设置有排水管,高程为40 cm,为避免在排水过程中将表层细砂带走,排水管用纱布包裹。砂槽中布置22个多孔进水型铝管测压计,并与测压管相连接,得出各监测点的孔隙水压力值<sup>[10]</sup>。测压监测点的编号分别为  $A_1-A_4$ 、 $B_1-B_4$ 、 $C_1-C_4$ 、 $D_1-D_4$ 、 $E_2-$

$E_3$ 、 $F_1-F_4$ 。

水箱水位  $h$  分别为42~60 cm,每隔2 cm设置一水头,共计10个。试验主要观察含有局部浅层强透水层堤基的管涌破坏过程,研究堤基管涌破坏机理,不考虑堤身的渗流,堤身用聚乙烯透明塑料纸和有机玻璃板代替。水位调节管和进水管共同调控水箱的水位。测压管中滴入红色试剂,便于精确读数。

### 1.2.2 试验步骤

1) 布置垂直防渗体。采用透明胶水将聚乙烯透明塑料纸两侧固定在水箱侧壁,并用透明胶带加固,防止接缝处渗漏。

2) 堤基填筑及多孔铝管测压计的安装。堤基填筑通过干密度、土料含水率控制,按照图2(a)所示进行分层压实;填筑过程中,在22个测压监测点安装多孔进水型铝管测压计。

3) 蓄水及测压管排气。打开进水阀,开始蓄水,将水箱调控至预设水位。读数前应将测压管(透明橡胶管、硬塑料管)中的气泡排净,精确读数。

4) 读数。通过烧杯量测排水管的流量(即渗流量)。为减小孔隙水压力读数误差,进行多次读数,求取均值。同理,读取3次测压监测点的水头,求取平均值。

5) 观察渗透管涌破坏过程。观察上覆砂层渗透破坏的发生及发展,借助高清照相机拍摄强透水层上覆砂土在各水头下的渗流情况。

6) 试验对比分析。取A点区域的砂土进行静力触探试验和颗粒筛分试验,测出锥头阻力和各粒径砂土所占的百分比。

7) 多次测量点A的高程,求取平均值。

8) 改变水箱水位  $h$ ,重复步骤1)~7)。

## 2 理论计算及试验结果

### 2.1 理论计算

采用Koenders模型为理论基础,基于工程实际和物理模型,发展了Sellmeijer的模型,推导得出临界水力梯度公式见式(1)。

$$i_c = \frac{H_{crit}}{L} = c \left( \frac{\gamma_p}{\gamma_w} - 1 \right) \tan \theta (1 - 0.65c^{0.42}) \quad (1)$$

$$c = \frac{1}{4} \pi \eta^3 \sqrt{\frac{d^2}{k} \frac{d}{\frac{1}{2}L}} \quad (2)$$

$$i_c = \frac{1}{4} \pi \eta^3 \sqrt{\frac{d^2}{k} \frac{d}{\frac{1}{2}L}} \left( \frac{\gamma_p}{\gamma_w} - 1 \right) \tan \theta \left[ 1 - 0.65 \left( \frac{1}{4} \pi \eta^3 \sqrt{\frac{d^2}{k} \frac{d}{\frac{1}{2}L}} \right)^{0.42} \right] \quad (3)$$

试验中,  $L$  取 75 cm,  $\gamma_p$  取 28.7 kN/m<sup>3</sup>,  $\gamma_w$  取 9.8 kN/m<sup>3</sup>,  $\theta$  取 35°,  $d$  取 0.42 mm,  $k$  取  $5.07 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 将参数带入式(3), 计算得到砂土的临界水力梯度  $i_c = 0.152$ 。

## 2.2 试验结果

试验中采用逐级升高水箱水位的方式来驱动渗流及渗透破坏的发生过程, 从 42 cm 一直增大至 60 cm, 观察渗流现象。当在该级水头下渗流稳定后, 再抬高至下一级水头进行试验, 每次抬升 2 cm。根据渗流量和各测压管读数是否发生变化, 判定堤基渗流是否达到稳定状态。当各级水头达到稳定状态下, 记录各级水位值、测压管读数和堤基渗流量, 将结果列入表 2。  $J$  为平均渗透比降  $J = h/L$ , 式中  $L$  为最短渗径, 即为管涌口到进水面的最短距离, 试验中  $L$  取 75 cm。

表 2 渗流量  $Q$  及渗透坡降  $J$

Table 2 Seepage discharge and seepage gradient

水箱水位 $h/\text{cm}$	渗流量 $Q/10^{-4} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$J_A$
42	0.578	0.034
44	1.146	0.067
46	1.714	0.100
48	2.282	0.133
50	2.85	0.166
52	3.418	0.199
54	3.986	0.232
56	4.554	0.265
58	5.122	0.298
60	5.69	0.331

## 3 试验现象分析

借助高清照相机对管涌发生前、管涌发展过程进行拍照, 利用图像观察细砂颗粒在砂土颗粒间的移动现象, 各水位下拍摄得到的典型图像如图 3 所示。

由图 3 可得, 砂土层渗流过程可以分为几个

式中:  $H_{crit}$  为临界水头;  $L$  为渗流长度;  $\gamma_p$  为土粒重度;  $\gamma_w$  为水的重度;  $\theta$  为休止角;  $d$  为土颗粒平均粒径;  $k$  为渗透系数;  $\eta$  为阻力系数。

将式(2)带入式(1)可得

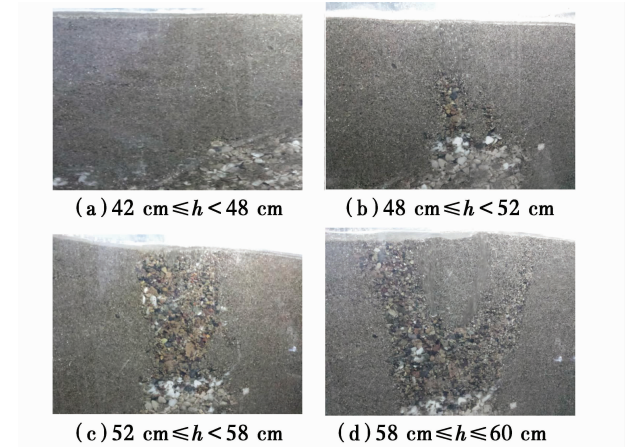


图 3 表层砂土管涌图

Fig. 3 The piping graph of medium sand on surface layer

阶段:

1) 稳定渗流阶段 ( $42 \text{ cm} \leq h < 48 \text{ cm}$ ), 如图 3 (a) 所示。在该阶段 A 点的渗透坡降从 0.034 逐渐升高至 0.133, 小于砂土的临界水力梯度  $i_c = 0.152$ 。渗流初期砂土表层有浑水冒出, 在砂土颗粒骨架间有气泡在移动, 一些细小的粉土颗粒随着渗流水移出土体骨架颗粒, 15 min 后渗水逐渐清澈。将水箱水位升高至 48 cm 时, A 处砂土骨架颗粒间有细小砂粒开始出现轻微的翻滚, 但由于渗透坡降较小, 细颗粒并未随渗水流走。

2) 细颗粒流失阶段 ( $48 \text{ cm} \leq h < 52 \text{ cm}$ ), 如图 3 (b) 所示。A 点的渗透坡降由 0.166 升高至 0.199,  $J_A$  大于临界水力梯度  $i_c = 0.152$ , 砂层发生管涌破坏, 管涌范围相对较小, 靠近强透水层的砂土中的细颗粒在渗透力的作用下翻滚“沸腾”, 细颗粒随渗水从管涌口逐渐流失。从图 3 不难看出, 靠近砂卵石表层的砂土只剩下粗颗粒, 能清晰的反映出砂土层的骨架颗粒。

3) 较细颗粒流失阶段 ( $52 \text{ cm} \leq h < 58 \text{ cm}$ ), 如图 3 (c) 所示。A 点的渗透坡降在上一阶段的基础上进一步增大至 0.289, 从图中清晰可见, 管涌通道呈“V”型, 较细颗粒随着渗水进一步流失, 砂土骨架颗粒与砂卵石层联通成一优先渗流通道。

4) 管涌破坏扩大阶段 ( $58 \text{ cm} \leq h \leq 60 \text{ cm}$ ), 如图

3(d)所示。渗透坡降升高到 0.331,为临界水力梯度的 2.18 倍。对比图 3(c)和图 3(d)可得,在该水利梯度下管涌破坏范围进一步扩大,管涌破坏仍呈现“V”型。

## 4 堤基渗流场与颗粒级配分析

### 4.1 堤基渗流场分析

通过烧杯量测排水管的流量,即得到堤基渗流量,作渗流量随水箱水位的变化曲线如图 4 所示。

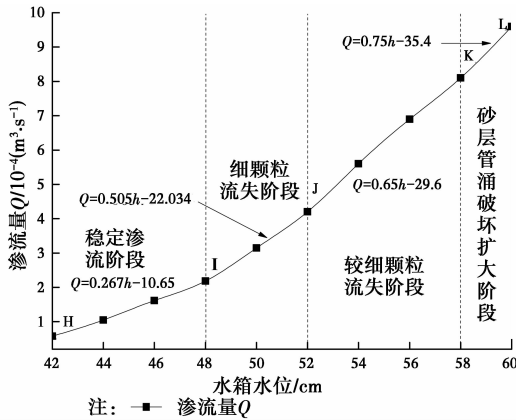


图 4 堤基渗流量随水箱水位的变化曲线

Fig. 4 The change curve of seepage discharge of dike foundation under different water block stage

当处于稳定渗流阶段(H-I)时,渗流量很小,流速缓慢,随上游水头的上升呈线性增长,经拟合  $Q$  随  $h$  变化的函数表达式为: $Q=0.267h-10.65$ ,可见在稳定渗流阶段其渗透系数未发生改变。随着水箱水位进一步升高,砂土层发生管涌破坏,渗流进入细颗粒流失阶段(I-J),渗流量突然增大,偏离 H-I 阶段的线性函数,砂土的渗透系数明显增大。

最后进入较细颗粒流失阶段(J-K)和砂层管涌破坏扩大阶段(K-L)。在后 3 个阶段中,渗透系数相比稳定渗流阶段都有较为明显的增大趋势, $Q$  随  $h$  变化的函数表达式分别为: $Q=0.505h-22.034$ 、 $Q=0.65h-29.6$ 、 $Q=0.75h-35.4$ 。

根据测压管水头(多次读数求取平均值)计算得出图 2(a)中点 A 的渗透坡降  $J_A$ ,作渗透坡降  $J_A$  随水箱水位  $h$  的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可得,渗透坡降  $J_A$  随水箱水位  $h$  的变化规律同图 4 一致,同样分为渗流稳定阶段、细颗粒流失阶段、较细颗粒流失阶段、砂层管涌扩大阶段,各阶段近似呈线性变化,其表达式分别为: $J_A=0.016h-0.624$ 、 $J_A=0.03h-1.3$ 、 $J_A=0.038h-1.738$ 、 $J_A=0.055h-2.685$ ;每一阶段的变化规律

在此不再赘述。

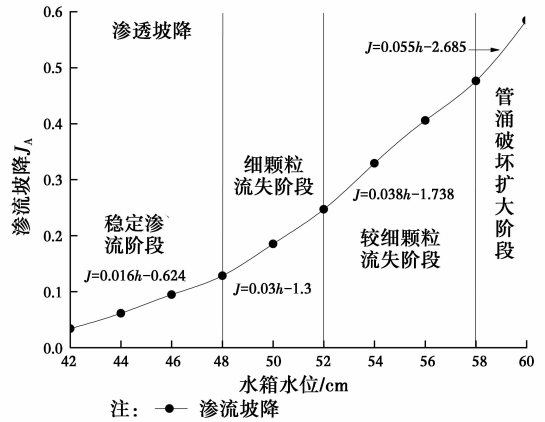


图 5 渗透坡降随水箱水位的变化曲线

Fig. 5 The change curve of seepage gradient of dike foundation under different water block stage

### 4.2 管涌处砂土颗粒级配分析

第 3 节已经针对试验过程的现象进行了详细描述,4.1 小节中针对渗流量  $Q$  和砂土表层 A 点处的渗透坡降  $J_A$  进行分析,分析得到在渗流稳定阶段未发生渗透破坏,随着水箱水位的升高,表层砂土逐渐发生管涌破坏。由此可知,渗透系数的增大导致渗流量增加,砂土骨架颗粒间的间隙决定了渗透系数的大小。在不同水箱水头下,取 A 点附近区域的砂土层进行筛分试验,将结果列入表 3。

表 3 砂土各粒径所占百分比

Table 3 The percentage of particle size sand

粒径	42 cm ≤ h < 48 cm	48 cm ≤ h < 52 cm	52 cm ≤ h < 58 cm	58 cm ≤ h ≤ 60 cm
≤ 2 mm	100	100	100	100
≤ 1 mm	97.5	97.46	97.44	96.6
≤ 0.5 mm	87.41	87.18	87.11	82.85
≤ 0.25 mm	26.61	25.23	24.89	0
≤ 0.1 mm	2.29	0.45	0	0
≤ 0.075 mm	1.85	0	0	0
≤ 0.05 mm	0	0	0	0

基于表 3 中各粒径砂土所占百分比,作 A 点处砂土在试验前后的颗粒级配曲线,如图 6 所示。

结合表 3 和图 6 可得,当堤基处于稳定渗流阶段(42 cm ≤ h < 48 cm)时,0.034 ≤ J < 0.128, J < i\_c = 0.152,由于该阶段渗透坡降小于允许值,不发生管涌破坏。对比图 6 曲线 1 和图 1 砂土试样曲线可得,在试验前和稳定渗流阶段,砂土试样的颗粒级配未发生改变。

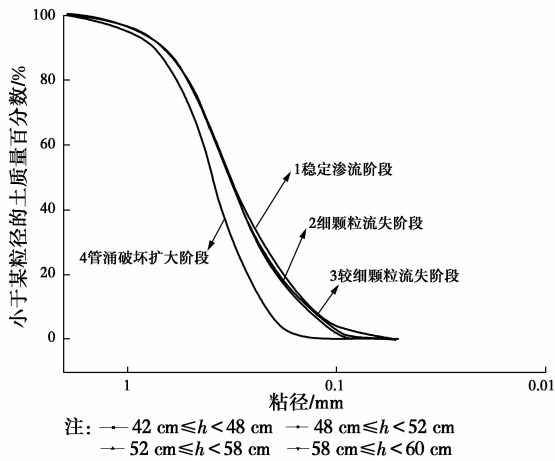


图 6 试验前后砂土的颗粒级配曲线

Fig. 6 The grading curve of sand before and after the test

当堤基处于细颗粒流失阶段 ( $48 \text{ cm} \leq h < 52 \text{ cm}$ ) 时,  $0.128 \leq J < 0.247$ , 超过允许值, 在该阶段随着水箱水位的升高, 逐渐发生管涌破坏, 由表 2 和图 6 可得  $0.05 < d \leq 0.075$  粒级砂土颗粒所占比例由 1.85% 降低至 0%, 可见在管涌破坏过程中,  $0.05 < d \leq 0.075$  粒级的砂土颗粒通过管涌通道并被带出砂土层。

同理, 当堤基处于较细颗粒流失阶段 ( $52 \text{ cm} \leq h < 58 \text{ cm}$ ),  $0.247 \leq J < 0.476$ , 对比曲线 2 和曲线 3 可得,  $0.075 < d \leq 0.1$  粒级的砂土颗粒流失。堤基处于管涌破坏扩大阶段 ( $58 \text{ cm} \leq h \leq 60 \text{ cm}$ ),  $0.476 \leq J < 0.585$ , 对比分析曲线 3 和曲线 4 可得,  $0.1 < d \leq 0.25$  粒级的砂土颗粒进一步流失, 砂土渗流骨架颗粒发生改变, 管涌通道进一步扩大。

## 5 堤基应力场分析

### 5.1 锥头阻力分析

锥头阻力在静力触探试验中扮演重要角色, 通过锥头阻力能获得岩土体力学参数, 能表征土体的级配状况。采用静力触探试验获取试验前后砂土层的锥头阻力值, 作砂土层锥头阻力随深度的变化如图 7 所示。

砂土属粗颗粒土, 没有内聚力, 其抗剪强度的大小主要取决于内摩擦角, 锥头阻力的表达式为

$$q_c = \sigma_{v0} N_q \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{v0}$  为土层上覆压力, kPa, 和土层的深度有关;  $\sigma_{v0} = \gamma h$ ;  $N_q$  为对砂土的无量纲锥头阻力系数。

由图 7 可得, 各阶段下砂层的锥头阻力都随着贯入深度的增加而增大, 同式(4)的规律相符。对比各阶段的锥头阻力的变化规律可得, 随着管涌破坏

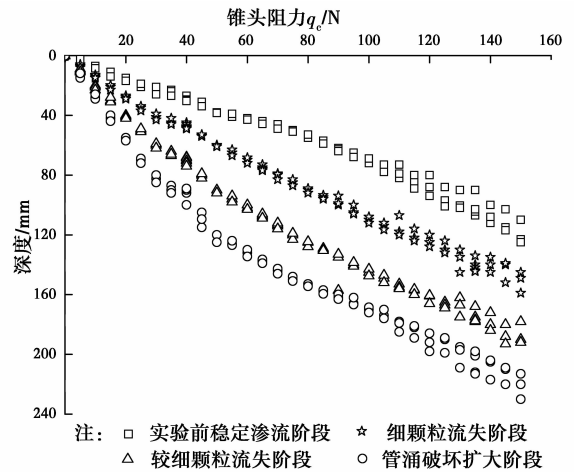
注: □ 实验前稳定渗流阶段 \* 细颗粒流失阶段  
△ 较细颗粒流失阶段 ○ 管涌破坏扩大阶段

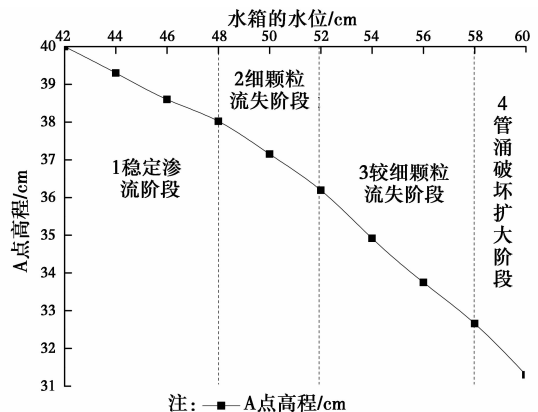
图 7 管涌前后砂土的锥头阻力

Fig. 7 Cone resistance of sand before and after internal erosion

的发展, 砂土骨架颗粒间的细颗粒逐渐流失, 锥头阻力逐渐变小。由此可见, 由于管涌破坏, 砂土层中的细颗粒被带走, 土体颗粒间的相互作用力发生改变, 锥头阻力下降。

### 5.2 管涌处砂土沉降分析

随着水箱水位的升高, A 点区域砂土的渗透坡降随之增大, 砂土层逐渐发生管涌破坏, 改变砂土骨架颗粒的应力状态, A 点高程逐渐减小, 作点 A 的高程随水箱水位的变化曲线, 如图 8 所示。



注: —■— A 点高程/cm

图 8 点 A 的高程随水箱水位的变化曲线

Fig. 8 The change curve of elevation of point A under different water block stage

由图 8 可得, 在各阶段 A 点高程随水箱水位变化的规律一致, 都是随着水箱水位的升高而降低, 总沉降为 8.67 cm。但也存在不同, 其沉降速度存在明显的区别, 1~4 阶段的沉降量分别为: 1.97、1.82、3.53、1.35 cm, 分别占总沉降的 22.72%、20.99%、40.72%、15.57%。由此可见, 管涌出口处砂层的主要沉降发生在较细颗粒流失阶段。

## 6 结论与建议

1)局部浅层强透水层易形成优先渗流通道,其上覆较薄砂土层易被“击穿”,即发生管涌破坏。管涌破坏分为稳定渗流阶段、细颗粒流失阶段、较细颗粒流失阶段、管涌破坏扩大阶段;其中,稳定渗流阶段无砂颗粒流失,后3个阶段分别流失 $0.05 < d \leq 0.075$ 、 $0.075 < d \leq 0.1$ 、 $0.1 < d \leq 0.25$  粒径砂土。

2)随着管涌破坏的发展,砂土中的细颗粒流失,砂土渗透系数上升,渗流量和渗透坡降快速增大,且在各阶段近似呈线性变化;锥头阻力逐渐变小,砂土层发生沉降,且最大沉降发生在较细颗粒流失阶段。

堤基中若存在强透水层时,应给予足够的重视,采取增大防渗墙深度截断强透水层或设置反滤等措施,防止发生管涌破坏。

### 参考文献:

- [1] 张刚. 管涌现象微观机理的模型试验与颗粒流数值模拟研究[D]. 上海:同济大学, 2007.  
ZHANG G. Research on meso-scale mechanism of piping failure by means of model test and PFC numerical simulation [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [2] 王霜, 陈建生, 黄德文, 等. 土层结构对管涌发展影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2334-2341.  
WANG S, CHEN J S, HUANG D W, et al. Experimental study on piping development considering effect of foundation structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2334-2341. (in Chinese)
- [3] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 渗流-侵蚀-应力耦合管涌试验装置的研制及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2108-2114.  
LUO Y L, WU Q, ZHAN M L, et al. Development of seepage-erosion-stress coupling piping test apparatus and its primary application[J]. Chinese Journal of Rock, Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2108-2114. (in Chinese)
- [4] 陈建生, 何文政, 王霜, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1777-1783.  
CHEN J S, HE W Z, WANG S, et al. Laboratory tests on development of seepage failure of overlying layer during piping of two-stratum dike foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1777-1783. (in Chinese)
- [5] 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): 21-24.  
LI G X, ZHOU X X. Laboratory simulation on generation and evolution of piping in embankment foundation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 21-24. (in Chinese)
- [6] 梁越, 陈亮, 陈建生. 考虑流固耦合作用的管涌发展数学模型研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1265-1270.  
LIANG Y, CHEN L, CHEN J S. Mathematical model for piping development considering fluid-solid interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1265-1270. (in Chinese)
- [7] 胡亚元, 马攀. 三相耦合渗流侵蚀管涌机制研究及有限元模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 913-921.  
HU Y Y, MA P. Mechanism study and finite element simulation of three-phase coupling seepage erosion piping [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 913-921. (in Chinese)
- [8] 陈生水, 钟启明, 任强. 土石坝管涌破坏溃口发展数值模型研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 653-657.  
CHEN S S, ZHONG Q M, REN Q. Numerical study on break development due to piping failure for earth-rock dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 653-657. (in Chinese)
- [9] 周晓杰, 介玉新, 李广信. 基于渗流和管流耦合的管涌数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3154-3158.  
ZHOU X J, JIE Y X, LI G X. Numerical simulation of piping based on coupling seepage and pipe flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3154-3158. (in Chinese)
- [10] 周健, 周凯敏, 姚志雄, 等. 砂土管涌-滤层防治的离散元数值模拟[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 17-24.  
ZHOU J, ZHOU K M, YAO Z X, et al. Numerical simulation of piping-filter prevention in sandy soil by discrete element method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 17-24. (in Chinese)
- [11] 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚, 等. 双层堤基管涌模型试验尺寸效应的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(Sup1): 3110-3116.  
LIU C J, DING L Q, SUN D Y, et al. Numerical simulation of size effect in piping erosion model test for double-startum dike foundations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 3110-3116. (in Chinese)
- [12] SCHMERTMANN J H. No-filter factor of safety against piping through sands [J]. Geotechnical Special Publication, 2000, 111: 65-132.

- [13] KOHNO I, NISHIGAKI M, TAKESHITAY. Levee failure caused by seepage and preventive[J]. *Natural Disaster Science*, 1987, 9(2): 55-76.
- [14] MULLER-KIRCHENBAUER H, RANKL M, SCHLOTZER C. Mechanism for regressive erosion beneath dams and barrages [C]// *Proceedings of the 1st International Conference on Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*. Balkema, Rotterdam, Netherlands:[s. n.], 1993: 369-376.
- [15] DE WIT J M, SELMEIJER J B, PENNING A. Laboratory testing on piping[C]// *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm, Sweden:[s. n.], 1981: 517-521.
- [16] 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 J, XIE D S, CUI Y H. Failure mechanism of seepage in levees with double-layer foundation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(11): 1211-1220. (in Chinese)
- [17] 姚秋玲, 丁留谦, 孙东亚, 等. 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): 13-18.  
YAO Q L, DING L Q, SUN D Y, et al. Experimental studies on piping in single and two-stratum dike foundations [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(2): 13-18. (in Chinese)
- [18] 陈祖煜. 对长江干堤加固工程中一些问题的思考[J]. *水利水电科技进展*, 2003, 23(4): 4-7.  
CHEN Z Y. Reflection on some problems in Yangtze River embankment reinforcement project [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2003, 23(4): 4-7. (in Chinese)

(编辑 胡玲)