

DOI: 10.11779/CJGE2017S2059

堤(坝)基中浅层强透水层上覆砂层侵蚀试验与分析

王正成¹, 毛海涛^{*1, 2}, 王晓菊^{1, 3}, 黄海均⁴, 胡洪浩⁴

(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, 湖北 武汉 430072; 3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 4. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 新疆 830052)

摘要: 堤(坝)基中往往存在局部浅层强透水层, 其削减水头能力较弱, 易发生管涌等侵蚀破坏, 其破坏机理仍需深入探究。文中采用砂槽模拟堤(坝)基中浅层强透水层上覆砂层侵蚀情况, 通过改变水位来观测堤(坝)基中砂土细颗粒流失现象, 获取渗流量、渗透坡降、土体颗粒级配、锥头阻力等参数。试验表明, 水位增至 48 cm 时浅层强透水层上覆砂层被“击穿”发生管涌破坏, 破坏过程分为稳定渗流阶段、细颗粒流失阶段、较细颗粒流失阶段、管涌破坏扩大阶段。此外还发现, 随着砂土中细颗粒砂土的流失, 堤(坝)基的锥头阻力降低而发生沉降; 细颗粒砂土流失导致其孔隙率和渗透系数增大, 渗流场和应力场发生较大变化, 研究成果能为堤(坝)基中浅层强透水层情况提供理论支撑。

关键词: 堤(坝)基; 强透水层; 管涌; 砂土; 锥头阻力; 沉降

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0244-05

作者简介: 王正成(1991-), 男, 硕士, 主要从事土石坝渗流机理研究。E-mail: wangzhengcheng194@163.com。

Laboratory tests on erosion of overlying sand layer on shallow and strong permeable stratum in dike (dam) foundation

WANG Zheng-cheng¹, MAO Hai-tao^{1, 2}, WANG Xiao-ju³, HUANG Hai-jun⁴, HU Hong-hao⁴

(1. College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China; 2. Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Xinjiang 830052, China)

Abstract: There is local shallow and strong permeable stratum in dike (dam) foundation, and its head dissipating capacity is weak. It is easy to cause piping failure, and the failure mechanism still needs further studies. The erosion of overlying sand layer on shallow and strong permeable stratum in dike (dam) foundation is simulated by sand tank tests, by changing water block stages, observing phenomena of fine particle loss in sand, obtaining parameters of seepage discharge, seepage gradient, grain composition of soils and cone resistance. The test results show that piping failure occurs in the sand layer on shallow and strong permeable stratum when the water block stage increases to 48 cm. The failure process is divided into stages of steady seepage, internal erosion of fine particles, internal erosion of relative fine particles and piping failure expansion. Besides, the fine particles in sand are lost, the cone resistance of dike (dam) foundation decreases, and the foundation settles. The porosity and permeability coefficient of sand increase when the fine particles are lost, and the seepage and stress fields have great change. The research results may offer theoretical reference for dike (dam) foundation which contains shallow and strong permeable stratum.

Key words: dike (dam) foundation; strong permeable stratum; piping; sand; cone resistance; settlement

0 引言

管涌是指填充于土骨架间的细颗粒在渗水的作用下被带走, 逐渐形成优先渗流通道的现象。堤(坝)基中管涌破坏机理及防治措施亟待探明, 学者们开展了大量的试验研究。

堤基的管涌破坏往往是从堤基的薄弱环节开始的, 如堤后坑塘或薄覆盖层位置处, 在高水头的作用

下发生为砂沸和浮动等现象。Bant^[1]开展了尺寸模型

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309262); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA0300, 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)

收稿日期: 2017-08-02

***通讯作者** (E-mail: maohaitao1234@163.com)

试, 提出每个土颗粒的不可逆位移都对应一个临界水力梯度; 罗玉龙等^[2]、WANG 等^[3]、李广信等^[4]借助砂槽模拟试验观测管涌侵蚀的过程, 将管涌破坏划分为几个阶段, 试图探明管涌破坏的机理。此外, 国外学者^[5-8]也针对双层堤基的管涌机理进行试验研究, 对当前管涌破坏机理进一步完善。目前针对局部地区含有埋藏较浅的强透水层的堤基管涌破坏研究较少, 且堤基中局部区域含有浅层强透水层的现象较为常见, 如珠江的北江大堤、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、湖北洪山武金堤和安徽鲁港大堤^[9-10]。

本文以局部含有浅层强透水层(堤基的薄弱环节)的堤基为试验对象, 借助透明砂槽试验装置, 观察堤基管涌破坏的过程, 划分堤基破坏阶段, 结合筛分试验和静力触探试验探讨该特殊堤基管涌破坏的机理。以期该类堤基提出防治方案及治理措施, 防止发生管涌破坏。

1 材料特性与试验方法

1.1 材料特性

试验共有 3 种材料: 砂卵砾石、砂土、聚乙烯塑料纸, 砂卵砾石和砂土构成分层坝基, 聚乙烯塑料纸代替防渗墙。土体经室内筛分试验, 作颗粒级配曲线如图 1 所示。

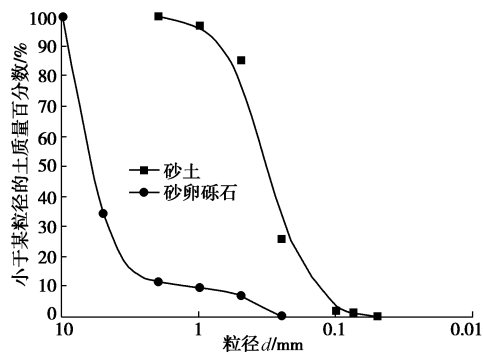


图 1 土体颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curves of soils

根据图 1 可求得土体的不均匀系数 C_u 和曲率细数 C_c , 土体的物理性质指标如表 1 所示。

表 1 土体物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of soils

土体	含水率	孔隙率	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	不均匀 系数 C_u	曲率系数 C_c	渗透系数 $k / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
砂土	8.94	33	2.42	2.47	1.04	5.07×10^{-3}
砂卵砾石	9.42	42	1.98	7.4	1.95	5.18×10^{-1}

砂卵砾石的渗透系数是砂土的 102.17 倍, 砂卵砾石为相对强透水层, 简称强透水层。

1.2 试验方法

(1) 试验装置

试验装置如图 2 所示。

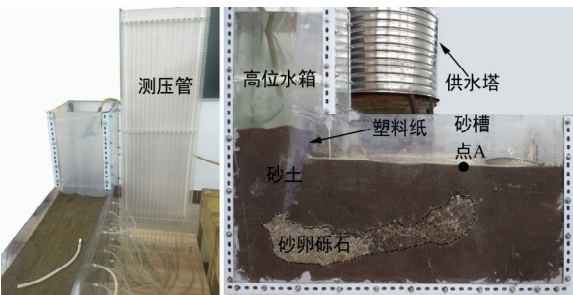


图 2 砂槽试验装置

Fig. 2 Sandbox test device

砂槽长、宽分别为 100, 30 cm, 左端和右端高度分别为 90 cm 和 50 cm, 将砂槽底部高程记为 ± 0 cm。砂卵砾石厚度约为 15 cm, 砂卵砾石底部高程为 5 cm, 上覆砂土层厚度为 8~20 cm。聚乙烯塑料纸底端高程为 20 cm, 顶端与水箱侧壁相紧密连接。供水塔借助进水管向高位水箱供水, 水位调节管用于调节水箱水位, 排水管位于砂槽右端, 水位调节管和排水的高程皆为 40 cm。砂槽中布置 22 个测压计(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), 测出各监测点的孔隙水压力值。水箱水位 $h=42\sim 60$ cm, 间隔为 2 cm。

(2) 试验步骤

试验的具体步骤: ①聚乙烯塑料纸的布置; 采用透明胶水将塑料纸和砂槽粘贴为一个整体。②土料填筑及测压计的安装; 分层压实土料, 安装测压计。③水箱蓄水及测压管排气; 通过进水管向水箱蓄水, 排除测压管中的气体。④观察管涌侵蚀过程及读数; 借助照相机拍摄管涌侵蚀过程, 测出渗流量和监测点孔隙水压力。⑤静力触探试验及筛分试验; 取 A 点区域的土体进行静力触探试验和颗粒筛分试验。

2 砂土临界坡降及试验现象分析

2.1 理论计算

采用 Sellmeijer 模型, 推导得出临界水力梯度公式:

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

式中 H_{crit} 为临界水头; L 为渗流长度; γ_p 为土粒重度; γ_w 为水的重度; θ 为休止角; d 为土颗粒平均粒径; k 为渗透系数; η 为阻力系数。式 (1) 的适用条

件为： $\frac{1}{4}\pi\eta^3\sqrt{\frac{2d^3}{kL}}<0.44$ ，精度能达到约 3%。

试验中， $d=0.42\text{ mm}$ ， $k=5.07\times10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $L=75\text{ cm}$ ， $\gamma_p=28.7\text{ kN/m}^3$ ， $\gamma_w=9.8\text{ kN/m}^3$ ， $\theta=35^\circ$ ；将参数带入上式，得出砂土的临界水力梯度 $i_c=0.152$ 。

2.2 试验现象分析

利用摄像机拍摄管涌侵蚀过程，观察细砂颗粒在土骨架间的移动路径，不同水位下土体的典型构造如图 3 所示。

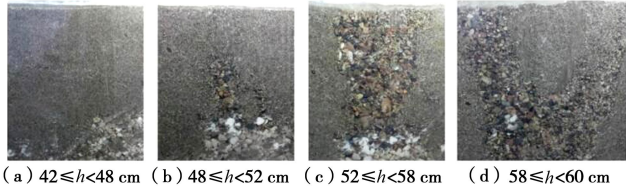


图 3 表层砂土管涌图

Fig. 3 Piping graphs of medium sand on surface layer

根据管涌侵蚀现象及土体骨架构造，将砂土渗流过程分为 4 个阶段：①稳定渗流阶段（ $42\text{ cm}\leq h<48\text{ cm}$ ）。砂土表层有浑水冒出，土体骨架间有气泡移动，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。②细颗粒流失阶段（ $48\text{ cm}\leq h<52\text{ cm}$ ）。A 点处细颗粒砂土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，靠近砂卵砾石表层的砂土仅剩下粗颗粒。③较细颗粒流失阶段（ $52\text{ cm}\leq h<58\text{ cm}$ ）。较细颗粒流失，砂土骨架颗粒与砂卵砾石层连接成优先渗流通道，管涌通道出口呈“V”型。④管涌破坏扩大阶段（ $58\text{ cm}\leq h<60\text{ cm}$ ）。管涌破坏范围进一步扩大，管涌破坏出口仍呈“V”型。

3 堤基渗流场分析

通过烧杯和测压管分别测出渗流量和渗透坡降，作渗流量 Q 和 A 点渗透坡降 J_A 随水箱水位 h 的变化曲线如下图 4 所示。

由图 4 (a) 可得，处于稳定渗流阶段 ($H-I$) 时，渗流量 Q 随水箱水位 h 的上升呈线性增长，函数表达式为： $Q=0.267h-10.65$ ，可见土体渗透系数未发生改变。后 3 个阶段渗流量 Q 随水箱水位 h 变化的函数表达式分别为： $Q=0.505h-22.034$ ， $Q=0.65h-29.6$ ， $Q=0.75h-35.4$ ，偏离上阶段的线性函数，渗透系数 k 逐渐增大。

由图 4 (b) 可知，渗透坡降 J_A 随水位 h 的变化规律同渗流量一致，不再赘述。同样分为上述 4 个阶段，各阶段的线性表达式分别为： $J_A=0.016h-0.624$ ， $J_A=0.03h-1.3$ ， $J_A=0.0386h-1.738$ ， $J_A=0.055h-2.685$ 。

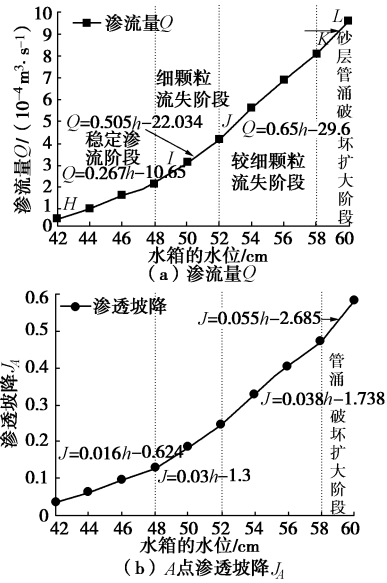


图 4 渗流量和 A 点渗透坡降随水箱水位的变化曲线

Fig. 4 Change curves of seepage discharge and seepage gradient at point A under different water block stages

4 砂土颗粒流失分析

4.1 锥头阻力分析

锥头阻力能表征土体的级配状况，通过静力触探试验测得 A 点周围砂土的锥头阻力值，作砂土层锥头阻力随深度的变化如下图 5 所示。

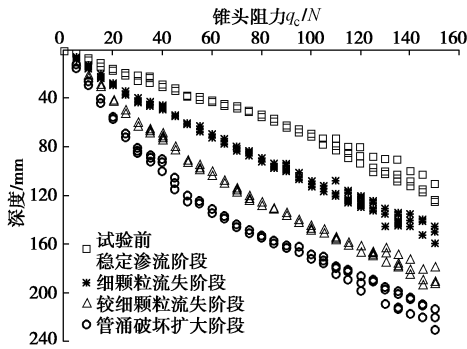


图 5 砂土的锥头阻力

Fig. 5 Cone resistances of sand

砂土颗粒间没有内聚力，锥头阻力的表达式为

$$q_c = \sigma_{v0} N_q \quad (2)$$

$$\sigma_{v0} = \gamma h \quad (3)$$

式中 σ_{v0} 为土层上覆压力； h 为土层的深度； γ 为重度； N_q 为锥头阻力系数。

由图 5 可得，砂层的锥头阻力随着贯入深度的增加而增大，变化规律符合式 (2)。随着水箱水位增大，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，管涌破坏过程中砂土中的细颗粒被带走，颗粒间的相互作用力发生改变，锥头阻力下降。

4.2 管涌处砂土颗粒级配分析

4.1 节对砂土进行锥头阻力分析, 得出砂土中细颗粒流失。为研究各阶段流失砂土颗粒的粒径, 取 A 点附近区域的砂土层进行筛分试验, 得出各粒径砂土所占百分比, 作砂土的颗粒级配曲线, 如图 6 所示。

由图 6 和图 4 可得: ①处于稳定渗流阶段时, $0.034 \leq J < 0.128$, $J < i_c = 0.152$, 不发生管涌破坏, 土体颗粒不会流失; ②处于细颗粒流失阶段时, $0.128 \leq J < 0.247$, 超过临界梯度 i_c , 发生管涌破坏, $0.05 < d \leq 0.075$ 粒级砂土颗粒所占比例由 1.85% 降低至 0, 可见该粒级的砂土颗粒流失; ③处于较细颗粒流失阶段时, $0.247 \leq J < 0.476$, 大于临界梯度, $0.075 < d \leq 0.1$ 粒级的砂土颗粒流失; ④管涌破坏扩大阶段 $0.1 < d \leq 0.25$ 粒级的砂土颗粒流失。

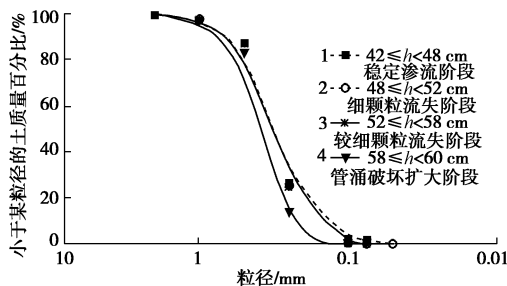


图 6 砂土的颗粒级配曲线

Fig. 6 Grading curves of sand

5 管涌处砂土沉降分析

A 点区域砂土在管涌侵蚀作用下, 土体颗粒逐渐被带走, 导致砂土骨架颗粒的应力状态发生改变, A 点高程随之改变, 点 A 的高程随水箱水位的变化曲线如图 7 所示。

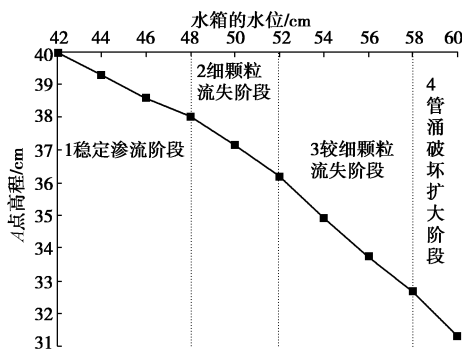


图 7 点 A 的高程随水箱水位的变化曲线

Fig. 7 Change curves of elevation at point A under different water block stage

分析图 7 可得, A 点高程随着水箱水位的升高而降低, 总沉降为 8.67 cm。但各阶段的沉降速度也存在差异, I ~ IV 阶段的沉降量分别为 1.97, 1.82, 3.53,

1.35 cm, 占总沉降的 22.72%, 20.99%, 40.72% 和 15.57%。由此可见, 砂土沉降主要发生在较细颗粒流失阶段。

6 结 论

(1) 堤(坝)基局部浅层强透水层易形成优先渗流通道进而发生管涌破坏。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。

(2) 随着管涌破坏的发展, 细颗粒流失逐渐, 堤(坝)基局部渗透系数增大, 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。

参考文献:

- [1] BANT Z. Measuring soil deformation caused by the pressure of the seepage[J]. 17th Int Navig Congr Lisbon Sect, 1949(1): 195 - 198.
- [2] 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 Yu-long, WU Qiang, ZHAN Mei-li, 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))
- [3] WANG S, CHEN J S, HE H Q, et al. Experimental study on piping in sandy gravel foundations considering effect of overlying clay[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(2): 165 - 171.
- [4] 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 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): 21 - 24. (in Chinese))
- [5] ZHI C O, ENG H C, NOROOZI S. Non-destructive testing and assessment of a piping system with excessive vibration and recurrence crack issue: An industrial case study[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 12(7): 1 - 18.
- [6] SHARIF Y A, ELKHOLY M, CHAUDHRY M H, et al. Experimental study on the piping erosion process in earthen embankments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(7): 04015012.

- [7] RYU Y, GUPTA A, JUNG W Y, et al. A reconciliation of experimental and analytical results for piping systems[J]. International Journal of Steel Structures, 2016, **16**(4): 1043 - 1055.
- [8] LEONARDS G A, HUANG A B, RAMOS J. Piping and erosion tests at conner run dam[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(1):108 - 117.
- [9] 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))
- [10] 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 Jian-sheng, HE Wen-zheng, WANG Shuang, 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))

(本文责编 黄贤沙)