

DOI: 10.11779/CJGE2019S1021

# 基于尖端坡降变化的双层堤基渗透破坏通道上溯研究

贾 恺<sup>1, 3, 4</sup>, 汤连生<sup>\*1</sup>, 曹 洪<sup>2</sup>, 杨光华<sup>2, 3, 4</sup>

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640,  
3. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510625, 4. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610)

**摘要:** 双层堤基渗透破坏集中渗流通道产生后, 有继续上溯和保持稳定两种可能, 传统方法中外江与管涌口之间的整体水力坡降只能判定渗透破坏发生与否, 无法判定已有通道是否会继续上溯。是否继续上溯关键在通道尖端坡降的发展趋势, 其根源是尖端土体颗粒在尖端坡降作用下的稳定性。当通道上溯后, 其内沿程各处断面会发生冲淤变化, 进而影响尖端坡降, 在此作用下对尖端处土体颗粒进行稳定性计算, 分析在进一步上溯后, 尖端坡降的变化趋势。若尖端坡降随着通道的上溯持续增长, 则说明该上溯会进一步发展, 若通道上溯后尖端坡降维持稳定, 则说明该通道不会持续上溯。编制有限元程序, 同时考虑通道断面扩展和上溯与尖端坡降之间的相互影响, 判定通道发展趋势。有限元程序中, 对集中渗流通道断面进行等效代替, 以加快计算速度。在室内进行模型试验, 观测预设渗流通道的发展, 通过数值模拟与室内试验数据对比, 证明本理论方法及所编制程序可行可用。

**关键词:** 管涌通道; 通道扩展; 通道上溯; 尖端水力坡降

中图分类号: TV131 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0081-04

作者简介: 贾 恺(1985—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事地下水渗流、基坑工程和边坡工程方面的工程和科研。  
E-mail: kai.jia@foxmail.com。

## Upstream movement of piping channel of double-layer dike foundation based on tip hydraulic gradient

JIA Kai<sup>1, 3, 4</sup>, TANG Lian-sheng<sup>1</sup>, CAO Hong<sup>2</sup>, YANG Guang-hua<sup>2, 3, 4</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Guangdong Institute of Water Resources and Hydropower Research, Guangzhou 510625, China; 4. Technical Research Center of Geotechnical Engineering in Guangdong Province, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** After piping channel appears, the length of the channel may elongate or remains stable. The traditional method is to calculate the hydraulic gradient between river and piping port, and it is not precise enough. In fact, the hydraulic gradient at the tip of the channel determines the results. Considering the effects of the channel expansion, the stability of particles at the tip of the channel is analyzed, and change of the hydraulic gradient at the channel tip after channel elongation is also investigated. If the hydraulic gradient continues to grow with the channel elongation, the channel will be extended. If the hydraulic gradient keeps steady, the channel will be stable. The finite element program is compiled, to simulate the cross-section expansion and up-tracking of the channel. The program speed is accelerated by the equivalent substitution of the channel section for concentrated seepage. The model tests are carried out to observe the development of the piping channel. By comparing with the laboratory test data, it is proved that the theoretical method and the finite element program are feasible and usable.

**Key words:** piping channel; channel expansion; axial expansion; tip hydraulic gradient

## 0 引言

中国在20世纪50年代就开始了渗透破坏的探索性研究, 60年代已经对渗透破坏中的管涌、流土等形式进行了划分<sup>[1]</sup>, 并且给出了明确的区分方法, 现行规范方法与该方法非常相似, 同时该阶段的多数成果以经验总结为主, 70年代发展缓慢, 80年代到90年代初, 理论为主导的研究逐渐增多<sup>[2-3]</sup>, 并且出现了针

对性试验研究<sup>[4]</sup>。“九八”大洪水以后十余年, 渗流破坏受到空前的重视, 相关研究进入了繁盛期, 新的测试方法<sup>[5]</sup>、试验方法<sup>[6]</sup>、计算方法<sup>[7]</sup>逐渐涌现。近

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572277, 41877229); 广东省自然科学基金项目(2018B030311066)

收稿日期: 2019-04-30

\*通讯作者(E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn)

5 a 来的研究更趋向于精细化、细观化<sup>[8-9]</sup>。

目前成果来看<sup>[10]</sup>, 双层堤基管涌通道在形成后可分两部分进行研究, 通道的扩展(横断面的扩大)和上溯(长度的增加)。在几何尺度上, 通道的扩展与上溯相比是可以忽略的, 这也是传统的研究内容多集中在通道上溯上的原因, 但实际上, 通道扩展会对通道尖端的坡降造成影响, 进而影响通道尖端土体颗粒的稳定性, 这也就决定了通道上溯是稳定还是持续。这正是本文的关注点。

## 1 通道上溯试验模拟

### 1.1 试验模型

通道上溯的室内试验模型箱装砂部分长600 mm, 宽200 mm, 高240 mm。模型上游设置稳水箱, 与定水头供水装置连接。

覆盖层根据模拟土层的不同分为两种, 分别标记为A和B。A类覆盖层为水袋, 模拟柔性覆盖层, 管涌通道位于砂槽中部; B类覆盖层为砂袋, 具有一定的刚性, 预设管涌口位于砂槽壁。模型如图1所示。



图1 室内试验模型箱

Fig. 1 Laboratory test model box

共进行3组试验。编号#1试验和#2试验采用A类覆盖层, 同时在砂层顶面放置柔性尺, 以测量通道发展长度; #3试验采用B类覆盖层, 该试验可以观测通道剖面的发展情况。试验中, 通过逐级提高上游水头的方式增加上下游之间的水头差。

### 1.2 通道上溯与尖端坡降的试验关系

#1试验~#3试验的上下游水头差、通道上溯长度、与尖端坡降的关系如图2~4所示。

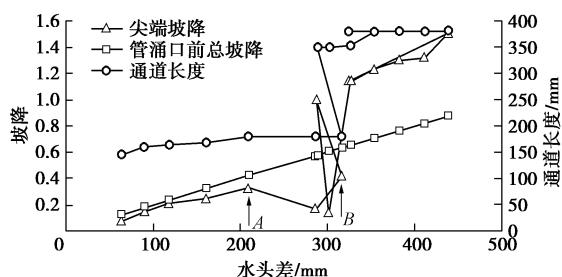


图2 #1试验通道长度 - 尖端坡降关系图

Fig. 2 Relationship between channel length and tip gradient of experiment 1

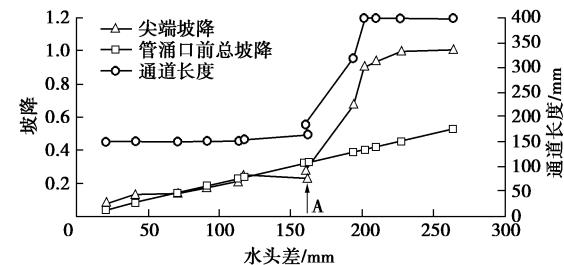


图3 #2试验通道长度 - 尖端坡降关系图

Fig. 3 Relationship between channel length and tip gradient of experiment 2

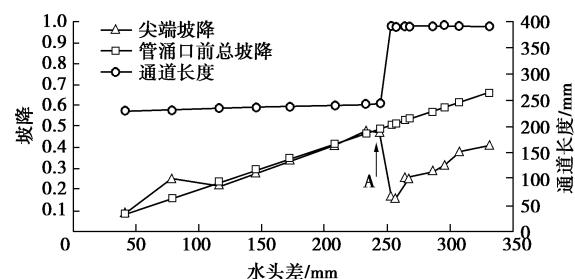


图4 #3试验通道长度 - 尖端坡降关系图

Fig. 4 Relationship between channel length and tip gradient of experiment 3

在水头差逐级加大的过程中总坡降是逐级加大的, 但从图2~4可以看到尖端坡降的变化与水头差的变化并不一致。在各图中A点以前, 总水头差较小, 此时尖端坡降与水头差(总坡降)的变化基本一致, 对应此时的试验现象为通道上溯非常缓慢; 随着尖端坡降的增长, 会出现一个临界值(图2中的B点, 图3, 4中的A点), 在该临界值以后通道的长度迅速增长, 试验现象为管涌通道快速上溯, 最终贯穿堤基。

在#1试验中, 通道长度急速增加以前, 尖端坡降就有一个明显的下降点(A点), 但是图中看到通道长度并未明显增加, 这说明堤基内产生了新的上溯通道, 与预设通道未重合。A点以后尖端坡降下降, 随和总水头差的增加, 尖端坡降再度达到了临界点(B点), 此时预设通道发生急速上溯。所以#1试验中看到的急速上溯点虽为B点, 但其值与A点基本一致。

从图2~4可以明显的看到通道的迅速上溯与尖端坡降密切相关, 与总坡降关联性不强。

## 2 通道上溯数值模拟

### 2.1 通道断面的等效代替

通道断面实际是类弓形断面, 但类弓形断面进行有限元计算时节点数过多, 可采用矩形断面进行等效代替, 以减少模型节点数, 进而加快计算速度。但是通道边壁的颗粒与通道的边壁坡度是密切相关的, 因此在等效的同时需要兼顾通道边壁颗粒稳定性计算的

准确性。断面等效需要满足两个条件: ①等效前后通道内渗流量一致, 以满足渗流场一致; ②通道稳定计算时可提取真实断面的边壁形状参数及通道内冲刷流速, 以满足通道断面稳定性计算的要求。

(1) 条件①等效性验证。建立半圆形剖面, 剖面半径  $40a$  ( $a$  为等效矩形的高度, 其长度是高度的 2 倍), 模型外侧边界水头设为  $12a$ , 通道内设置水头为 0, 该工况对应总坡降为 0.3。定义  $\Lambda$  为渗流场中某点等效前后地下水水头变化衡量系数:

$$\Lambda = \frac{H_F - H_G}{H_G - H_T}, \quad (1)$$

式中,  $\Lambda$  为渗流场内某点等效前后变化衡量系数,  $H_F$  为等效渗流场某点水头,  $H_G$  为原渗流场某点水头,  $H_T$  为管涌通道内的水头值。

按式(1)计算得到的  $\Lambda$  等值线如图 5 所示。

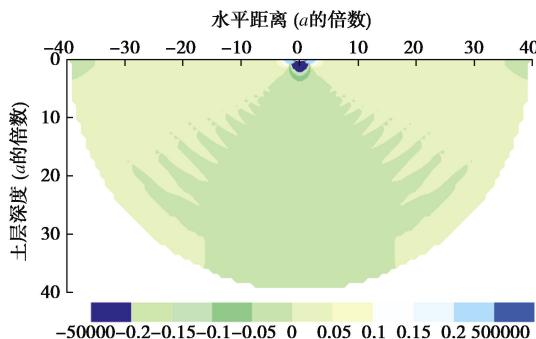


图 5  $\Lambda$  等值线图

Fig. 5  $\Lambda$  equipotential line

从图 5 中可以看到, 以通道中点为圆心, 半径大于  $4a$  处水头基本一致,  $\Lambda$  为  $\pm 5\%$ , 在  $3a \sim 4a$  区域,  $\Lambda$  为  $\pm 5\% \sim 15\%$ 。这说明在通道中点  $4a$  以外处渗流场基本一致。即其可以作为通道断面的远端边界进行研究。

(2) 条件②等效性的实现。针对某确定渗透系数的砂层, 设定不同的渗流场最大水头差  $H_j$  和通道内冲刷流量  $Q_i$ , 以此为基础计算出通道稳定时的形状参数, 包括: 类弓形通道面积  $A_j$ 、类弓形通道周长  $C_j$ , 等效矩形通道的深度  $a_j$ 。将上述成果存储为数据库, 进行其他复杂三维渗流场计算时, 可以采用矩形等效通道计算得到的  $H_j$ ,  $Q_i$  为指针, 查询得到其对应的类弓形通道实际应有的断面形状, 从而减少复杂渗流场计算时通道断面扩展的迭代次数。数据库制成等效表, 如表 1 所示。

## 2.2 计算参数与模型

以前述室内试验模型为原型, 建立三维渗流场有限元计算模型。模型平面网格、预设初始通道及边界如图 6 所示。

## 2.3 计算流程

采用有限元进行数值模拟。

(1) 初始数据。将通道设为矩形, 假设通道有一个很小的初始深度  $a_{0i}$ , 并将通道内赋予任意的初始渗透系数  $k_{0i}$ 。

(2) 求解等效渗透系数。计算(1)的渗流场, 利用上述查表方法, 求得各段管涌段对应形状参数, 按照类弓形几何参数计算等效渗透系数  $k_i$ , 判定是否满足  $k_{0i} = k_i$ , 若不满足将  $\sqrt{k_i k_{0i}}$  代替  $k_{0i}$  进行迭代求解。

(3) 根据(2)中计算的管涌通道的渗流量与(2)中迭代结果对应的查表流量进行比较, 若实际流量小于查表流量, 则断面稳定, 否则将断面以一定步长进行上溯, 上溯后返回(1)继续计算, 直至该断面稳定。

(4) 当各段断面均稳定后读取尖端处的坡降值。

表 1 通道断面面积周长等效深度表

Table 1 Equivalent depths of perimeter of channel section

流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	水头差/m				
	$H_1$	$H_2$	$\dots$	$H_j$	$\dots$
$Q_1$	$A_{11}/C_{11}/a_{11}$	$A_{12}/C_{12}/a_{12}$		$A_{1j}/C_{1j}/a_{1j}$	
$Q_2$	$A_{21}/C_{21}/a_{21}$	$A_{22}/C_{22}/a_{22}$		$A_{2j}/C_{2j}/a_{2j}$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$
$Q_i$	$A_{i1}/C_{i1}/a_{i1}$	$A_{i2}/C_{i2}/a_{i2}$		$A_{ij}/C_{ij}/a_{ij}$	

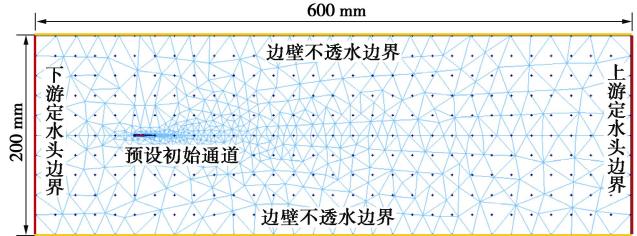


图 6 上溯试验数值模拟模型俯视图

Fig. 6 Numerical simulation model

## 3 分析与讨论

计算不同的总坡降  $i$  下, 通道各断面稳定后尖端的坡降值。结果如图 7 所示。

图 7 中可以明显的看到,  $i=0.1, 0.2, 0.24$  时通道上溯在 9 mm (A 点)、7 mm (B 点) 和 3 mm (C 点) 范围内, 通道稳定;  $i=0.26$  时不存在稳定上溯范围。图中的 A, B, C 和 D 点对应的通道长度逐渐减小, 说明同一位置出现管涌口时, 水头差的增加会导致通道稳定长度范围的减小, 直至为 0 ( $i=0.24$  对应的 D 点)。

在图 7 中标出<sup>#1</sup>试验~<sup>#3</sup>试验的测量结果, <sup>#2</sup>试验尖端坡降的试验值与计算值吻合较好, 测量值与计算值都在 0.2 左右, 具有相似性; <sup>#1</sup> 和 <sup>#3</sup> 试验的临界值均大于计算值; 3 个试验的稳定通道长度均大于计算值, 该现象可能是室内试验砂槽边壁以及覆盖层的模拟造成的, 导致该砂样具有更好的通道上溯稳定性。

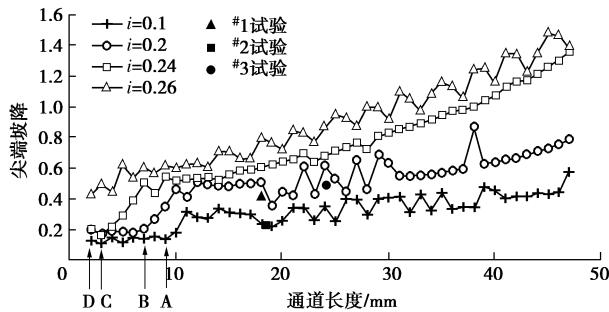


图 7 管涌通道上溯结果图

Fig. 7 Results of piping channel expansion

## 4 结 论

本文通过管涌通道尖端坡降的发展趋势,探讨了已有通道的上溯问题。通过室内试验与数值方法的对比验证得出以下结论:

(1) 尖端坡降可用来判定已有管涌通道是否继续发展,该方法较传统的整体坡降判别更加直接有效。  
 (2) 管涌通道尖端坡降的变化与通道沿程各处断面的扩展密切相关。通道沿程各断面的扩展可能造成通道上溯后尖端坡降无明显上升,从而使已有通道不再继续上溯。

(3) 采用通道断面等效代替法进行有限元仿真计算,提高了有限元数值模拟的计算效率。该法在计算中保证了渗流场的一致性和通道沿程各处断面扩展的准确性。

## 参 考 文 献:

- [1] 蒋国澄, 刘宏梅. 砂砾地基上土坝的渗流控制[J]. 水利学报, 1962(1): 33 - 43. (JIANG Guo-cheng, LIU Hong-mei. Seepage control of earth dam on gravel foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1962(1): 33 - 43. (in Chinese))
- [2] 沙金煊. 多孔介质中的管涌研究[J]. 水利水运科学研究, 1981(3): 89 - 93. (SHA Jin-xuan. Piping study in porous media[J]. Hydro-Science and Engineering, 1981(3): 89 - 93. (in Chinese))
- [3] 刘杰. 土的渗透变形特性和控制[J]. 人民黄河, 1984(5): 24 - 28. (LIU Jie. Soil seepage deformation characteristics and control[J]. Yellow River, 1984(5): 24 - 28. (in Chinese))
- [4] 屈智炯, 吴剑明. 压实石碴料渗透变形的试验研究[J]. 成都科技大学学报, 1984(2): 67 - 76. (QU Zhi-jiong, WU Jian-ming. Experimental study on seepage deformation of compacted stone[J]. Advanced Engineering Sciences, 1984(2): 67 - 76. (in Chinese))
- [5] 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(9): 48 - 54. (CHEN Jian-sheng, LI Xing-wen, ZHAO Wei-bing. Study on piping leakage mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(9): 48 - 54. (in Chinese))
- [6] 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(6): 21 - 24. (LI Guang-xin, ZHOU Xiao-jie. Experimental simulation of the development process of the embankment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005(6): 21 - 24. (in Chinese))
- [7] 张刚, 周健, 姚志雄. 堤坝管涌的室内试验与颗粒流细观模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2007(6): 83 - 86. (ZHANG Gang, ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong. Study on mesomechanical simulation of piping with model tests and PFC<sup>2D</sup>[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007(6): 83 - 86. (in Chinese))
- [8] 陈建生, 张华, 王霜, 等. 多层堤基中土层结构变化对管涌影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2213 - 2219. (CHEN Jian-sheng, ZHANG Hua, WANG Shuang, et al. Experimental researches on effect of foundation structure on piping in multilayer embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2213 - 2219. (in Chinese))
- [9] 刘昌军, 姚秋玲, 丁留谦, 等. 堤基管涌小尺寸模型的细观试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(增刊 2): 90 - 97. (LIU Chang-jun, YAO Qiu-ling, DING Liu-qian, et al. Mesoscale experimental research on piping failure with small size model test for dike foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S2): 90 - 97. (in Chinese))
- [10] 贾恺, 曹洪, 李兴华. 双层堤基管涌通道扩展机制和计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(11): 2368 - 2376. (JIA Kai, CAO Hong, LI Xing-hua. Research on mechanism and computational method of piping channel expansion of double-layer dike foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(11): 2368 - 2376. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)