

文章编号:1671-6833(2012)05-0077-05

## 非均质堤基管涌小尺寸试验模拟与预测模型研究

姚秋玲<sup>1</sup>,丁留谦<sup>1</sup>,Vera van Beek<sup>2</sup>,孙东亚<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 防洪抗旱减灾研究所,北京 100038;2. 荷兰三角洲研究院,代尔夫特,荷兰 2628CN)

**摘要:**采用小尺寸模型对层状非均质堤基管涌发展过程进行了试验模拟,对非均质堤基管涌发展过程、管涌破坏临界水头进行了分析,并采用 Mseep 程序对试验结果进行验证.结合模型试验和 Mseep 程序计算,验证了 Sellmeijer 管涌预测模型对非均质堤基的适用性,推导了非均质堤基管涌预测模型公式.通过两次施加水头的试验方法,初步分析了历史管涌对堤基整体抗渗能力的影响.

**关键词:**管涌;非均质堤基;预测模型;历史管涌

**中图分类号:**TV223.4;TV871.3 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.017

### 0 引言

根据1998年洪水期间长江中下游干堤较大险情统计资料分析,堤基管涌占较大险情总数的52.4%,居各种险情之首<sup>[1]</sup>.堤基管涌问题因事关堤防及保护区内人民生命财产安全,一直是相关研究领域的热点问题.对于均质堤基管涌,学者们进行了大量的试验研究<sup>[2-3]</sup>,较为清晰地阐述了管涌发生发展的过程,并建立了均质堤基管涌预测模型<sup>[4-5]</sup>,可以预测均质堤基管涌溃堤破坏的临界水头.非均质透水堤基也是管涌多发的堤基类型之一.目前对非均质堤基管涌的研究较少,仅进行了一些初步研究<sup>[6-7]</sup>.笔者将对层状非均质透水堤基(细砂层下卧透水性更强的粗砂层)管涌进行小尺寸模型试验研究,阐述非均质堤基管涌的发展过程,分析堤基的非均质性对管涌发展及破坏临界水头的影响,并对 Sellmeijer 管涌预测模型对于非均质堤基的适用性进行验证分析;同时对历史管涌通道对堤基抗渗能力的影响进行了初步研究.

### 1 小尺寸非均质堤基管涌模型试验

#### 1.1 试验装置

为模拟天然透水堤基无表土覆盖层或部分表土覆盖层裸露(堤后沟渠等)和有表土覆盖层两种情况,设计了两种试验装置,分别如图1(a)、(b)所示.

试验模型槽尺寸为0.5 m×0.3 m×0.1 m,试样渗径长度约0.35 m(图1).试验采用逐级增加水头的方法,每5 min增加水头1 cm,直至管涌通道形成,此时应等到管涌通道停止发展约2 min后,再增加水头.

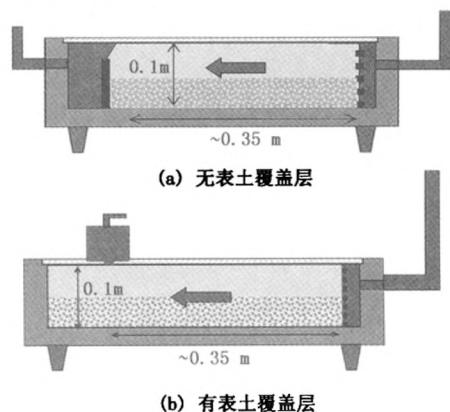


图1 试验装置示意图

Fig.1 Test setup

试验模拟的非均质堤基透水层由不同厚度的细砂层和粗砂层组成,粗砂层的透水性约为细砂层的5倍.两种砂样的物理性质如表1.

#### 1.2 试验过程

##### 1.2.1 无表土覆盖层非均质堤基试验模拟

采用图1(a)所示的试验装置,已进行过约100组的均质堤基管涌模拟.这些试验表明,管涌通道一旦形成就会持续向上游发展,直至与上游连通<sup>[3]</sup>.因此,作者试验中,当管涌通道发展至渗

收稿日期:2012-04-05;修订日期:2012-06-01

基金项目:国家国际科技合作项目(2010DFA74520);中国水利水电科学研究院科研专项(防集1132)

作者简介:姚秋玲(1981-),女,安徽桐城人,中国水利水电科学研究院工程师,在读博士生,主要研究方向为堤防安全 and 渗流分析控制, E-mail: yaoql@iwhr.com.

表 1 砂样物理性质  
Tab.1 Sand characteristics

	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{60}/\mu\text{m}$	$d_{70}/\mu\text{m}$	$d_{60}/d_{10}$	渗透系数/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}(D_r\approx 85\%)$	最小孔隙度/%	最大孔隙度/%
细砂	132	142	154	1.6	$5.58\text{E}-05$	34.0	46.9
粗砂	355	420	430	1.5	$2.82\text{E}-04$	34.0	44.5

径长度的一半时,即认为已达到管涌破坏临界水头,暂停试验.

共进行了 4 组试验,试验的堤基组成见表 2 所示.试验过程及观察到的试验现象可概况为以下三步:

(1)下游水体变浑,说明堤基中极细颗粒在渗透水流作用下被带走,该现象是肉眼难以观察到的.

(2)增加水头至一定高度,下游端土体中细颗粒向下游移动,在砂样表面形成一系列形似网状的细通道(通道宽度和深度均小于 1 mm),此时并无大量砂样带走.保持水头不变,此阶段渗透变形将趋于稳定.

(3)继续增加水头,一系列形似网状的管涌通道一起向上游发展,且比上阶段更明显,通道宽度和深度均略有增加,约 1 mm;或是形成一条集中的较大的管涌通道(宽约 5~10 mm,深 1~2 mm).此阶段有较多的砂颗粒被携带至下游.保持水头不变,管涌通道持续向上游发展,直至超过渗径长度一半的距离(图 2),此时暂停试验.

图 3 为 B\_C109 试验过程中水头与渗流量的关系曲线,基本呈线性关系.

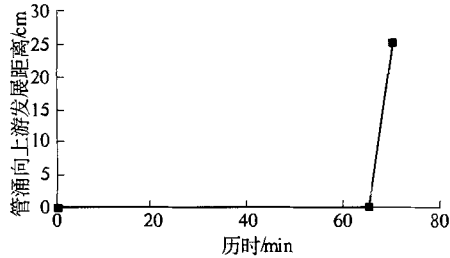


图 2 管涌向上游回溯发展过程(B\_C109)

Fig.2 Piping developing backwards to upstream

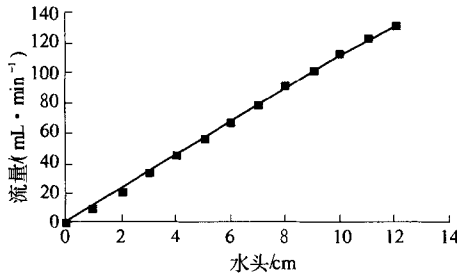


图 3 渗流量与水头关系(B\_C109)

Fig.3 The relationship between water head and flow (B\_C109)

1.2.2 有表土覆盖层的非均质堤基试验模拟

共进行了 3 组试验,试验堤基条件如表 2 所示.试验过程和现象简单概括为:

(1)预留管涌孔口砂沸.砂颗粒在孔内上下翻腾,但未被水流带出口口.

(2)增加水头至一定高度,砂沸加剧且有一些砂颗粒随水流带出口口,形成砂环.随着水头的增加,管涌通道形成并向上游发展,砂环略有增大.保持水头不变,孔口出沙逐渐减少并最终停止,管涌通道也停止向上游发展.继续增加水头,砂沸加剧、通道向上游发展、砂环增大.至水头提升至临界水头前,该阶段发展过程能最终稳定下来,此时管涌通道的长度仅约为 10 cm(约为渗径长度的三分之一,图 4 所示),宽度约 1~2 mm.

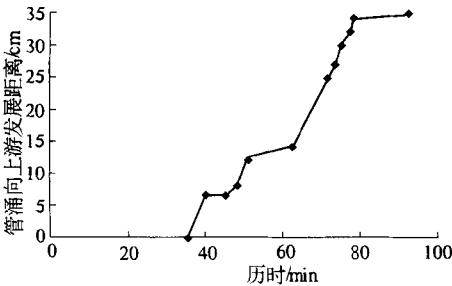


图 4 管涌向上游回溯发展过程(B\_115)

Fig.4 Piping developing backwards to upstream (B\_115)

(3)提升至下一级水头,一条集中的管涌通道持续向上游发展直至与上游连通.该水头即为管涌破坏临界水头.此时管涌通道约 5 mm 宽.

(4)管涌通道一旦与上下游连通,通道前端土体被水流加速冲刷并向下游输送,因此管涌通道变宽(从几毫米增加至几厘米),渗流出口流量也剧增.在通道变宽的过程中,通道内偶尔有淤堵和疏通的过程交替.最终通道加宽,流量加大,若无抢救措施,将发生溃堤洪灾.

1.3 临界水头

试验得到的管涌破坏临界水头见图 5 和表 2.

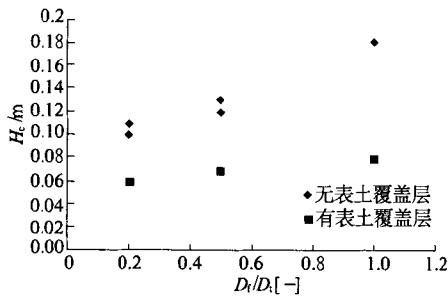


图 5 试验得到的管涌破坏临界水头  
Fig.5 The critical water heads from tests

表 2 各试验条件及两阶段管涌破坏临界水头  
Tab.2 test conditions and the critical water heads  
for both two parts

编号	$D_f/D_c$	$H_{c1}/H_{c2}$	临界水头 降低/%	备注
B_C109	5	13	7.69	无表土覆盖层
B_C110	5	12	16.67	无表土覆盖层
B_C111	2	11	9.09	无表土覆盖层
B_C112	2	10	20.00	无表土覆盖层
B_115	10	8	—	有表土覆盖层
B_C116	5	7	14.29	有表土覆盖层
B_C117	2	6	16.67	有表土覆盖层

由图 5 可见,随着细砂层厚度的增加,管涌破坏的临界水头增大.由于砂颗粒的起动很大程度上取决于堤基的渗透性,因此粗砂层越厚,细砂层越薄,堤基的渗透性越强,因而管涌破坏临界水头越低.有表土覆盖层的非均质堤基相对无表土覆盖层的非均质堤基,管涌孔口处渗流更集中,因此管涌破坏临界水头低.

## 2 模型验证

### 2.1 试验与数值模拟结果对比

在模型试验观察的基础上,基于堤基土体内渗流、管涌通道内管流以及通道底部土体颗粒极限平衡理论,建立了 Sellmeijer 模型<sup>[5]</sup>.该模型是二维的,可用来预测均质细砂堤基的管涌破坏临界水头. Mseep 程序基于该模型开发,并可以计算任意结构堤基的管涌破坏临界水头<sup>[8]</sup>.采用 Mseep 程序,对上述无表土覆盖层堤基的试验条件进行模拟,得到的临界水头与试验结果十分相近,如图 6 所示.

### 2.2 非均质堤基管涌预测模型

上述模型验证结果表明, Mseep 可以预测试验条件下的无表土覆盖层非均质堤基管涌临界水头.但 Sellmeijer 预测模型目前仅适用于均质砂基.

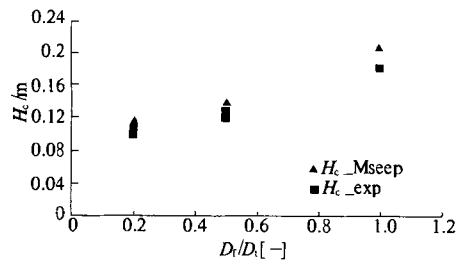


图 6 Mseep 模拟与试验结果比较  
Fig.6 The comparison of critical water heads between tests and Mseep calculation

由于管涌通道底部砂粒的起动很大程度上取决于堤基土体内向管涌通道的入渗能力,结合 Sellmeijer 模型分析可知,相对于均质堤基,非均质堤基的管涌临界水头主要取决于堤基土体的渗透系数.堤基含渗透性强的粗砂层时,向管涌通道入渗能力更强,因而导致管涌破坏临界水头减小.

由水平渗流方向的层状堤基的等效渗透系数<sup>[9]</sup>的求解可知,堤基的等效渗透系数可写为

$$k_{h,avg} = \sum_{i=1}^n \frac{k_{h,i} D_i}{D}, \quad (1)$$

式中:  $k_{h,avg}$  为水平渗流方向的非均质堤基等效渗透系数, m/s;  $D$  为透水层堤基的总厚度, m;  $D_i$  为第  $i$  层土层的厚度, m;  $k_{h,i}$  为第  $i$  层土层的渗透系数, m/s.

因此,均质堤基(由非均质堤基中的细砂层组成)与非均质堤基的管涌临界水头比值  $F$  可写为

$$F = \frac{H_{c,mi}}{H_{c,hom}} = \frac{\sqrt[3]{k_f}}{\sqrt[3]{k_{h,avg}}} = \sqrt[3]{\frac{k_f}{k_{h,avg}}}. \quad (2)$$

对试验中的堤基条件,

$$F = \sqrt[3]{\frac{k_f}{k_{h,avg}}} = \left( \frac{D_f}{D} + \frac{k_c}{k_f} \left( 1 - \frac{D_f}{D} \right) \right)^{-\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

由式 3 可知,均质堤基与非均质堤基的管涌临界水头比值  $F$  取决于细砂层与堤基总厚度之比以及粗砂层与细砂层渗透系数之比.采用 Mseep 程序对公式 3 进行验证,得到的结果如图 7 所示.经验证可知,当  $D/L < 0.3$ 、粗砂层与细砂层渗透系数比值小于 10 时,公式 3 的计算结果与 Mseep 程序计算结果较符合,误差在 5% 以内.对深厚堤基或粗砂层的渗透性远大于细砂层的渗透性时,公式 3 计算结果与 Mseep 程序计算结果偏离,此时仍推荐采用 Mseep 程序进行计算.

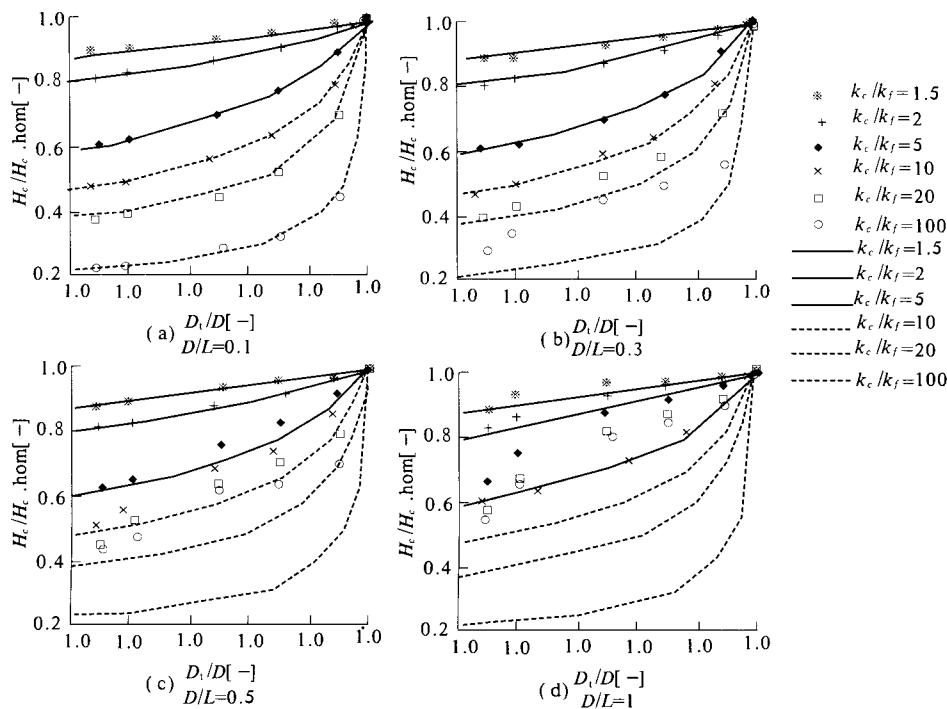


图 7 Mseep 程序计算结果与公式 3 对比

Fig. 7 The comparison between Mseep and formula (3)

因此,Sellmeijer 管涌预测模型可适用于非均质堤基,其中渗透系数应为非均质堤基等效渗透系数,即非均质堤基管涌预测模型可表达为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{H_c}{L} &= \frac{1}{c} = F_R F_S F_G; \\ F_R &= \eta \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan \vartheta \left( \frac{RD}{RD_m} \right)^{0.35} \left( \frac{U}{U_m} \right)^{0.13} \left( \frac{KAS}{KAS_m} \right)^{-0.02}; \\ F_S &= \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa_{h,avg}} L} \left( \frac{d_{70m}}{d_{70}} \right)^{0.6}; \\ F_G &= 0.91 \left( \frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{\frac{D}{L} - 1} + 0.04}; \\ k_{h,avg} &= \sum_{i=1}^n \frac{k_{h,i} D_i}{D_{tot}}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

该模型仅适用于  $D/L < 0.3$ 、粗砂层与细砂层渗透系数比值小于 10 的情况。

### 3 历史管涌对堤基抗渗能力的影响

堤基管涌是由渗透水流引起的在堤基内部形成集中的管状渗流通道现象. 由于汛期抢险时受时间、人力及物力的限制,可能仅在管涌出口处做反滤或排水处理. 因此实际堤防基础内,可能存在历年洪水期所形成的管涌通道. 上述试验中当达到管涌破坏临界水头、管涌通道发展至渗径一半

或即将与上游连通时(阶段一),停止试验,将水头降低为 0,重新逐级施加水头(阶段二),观察此阶段管涌通道的扩展以及渗流量的变化,比较两阶段管涌破坏临界水头,以此来判断历史管涌通道对堤基抗渗能力的影响.

各试验第二阶段,管涌发展过程与第一阶段相似;管涌通道表现为一条集中渗流通道,宽度比第一阶段增加 5~10 倍;渗流量增加幅度较小,约 10%,如试验 B\_C109 渗流量与水头关系曲线见图 8;第二阶段管涌破坏临界水头相比第一阶段略有降低,降低幅度最大为 20%(表 2).

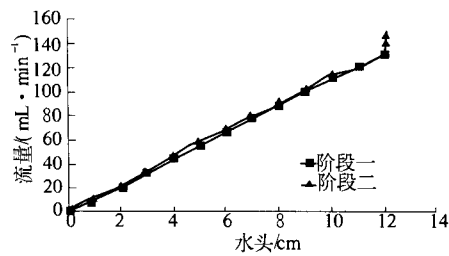


图 8 试验过程中两阶段渗流量与水头关系(B\_C109)

Fig. 8 the relation between flow and water head for both parts (B\_C109)

试验结果说明,已有的历史管涌通道对堤基整体抵抗渗透破坏的能力影响不大. 这也解释了每年汛期高水位时,以前出现过管涌的地方因没有得到有效治理,又复发管涌的现象,如荆江大堤

观音寺堤段蔡老渊内的管涌已存在 70 多年<sup>[10]</sup>。

#### 4 结语

通过小尺寸物理模型试验,对非均质堤基管涌发展过程进行了模拟,并采用 Mseep 程序对试验结果进行了验证。试验结果表明,非均质堤基管涌的临界水头与粗细砂层厚度分布以及它们的渗透系数比值有关。细砂层越薄,粗砂层越厚,则堤基越容易发生管涌破坏。

采用 Mseep 程序对非均质堤基管涌临界水头计算,结合试验结果,验证了 Sellmeijer 模型对于非均质堤基的适用性,拓展了 Sellmeijer 模型,但该模型仅适用于  $D/L < 0.3$ 、粗细砂层渗透系数比值小于 10 的范围内。超过该范围,仍推荐采用 Mseep。

对试验模型进行重复施加水头,结果表明历史管涌通道对堤基整体抗渗能力的影响不大。但由于该结论基于小尺寸模型试验,受尺寸、砂样性质的限制,因此尚需大尺寸模型以及多种砂样的试验来验证。

#### 参考文献:

- [1] 长江水利委员会. 1998 年长江防汛总结[R]. 1999.
- [2] 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.
- [3] BEEK VM van, KNOEFF J G, SELMEIJER J B. Observations on the process of backward piping by un-

derseepage in cohesionless soils in small -, medium - and full - scale experiments[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Erosion in geomaterials, 2011, 15(8): 1115-1137.

- [4] SELMEIJER J B. On the mechanism of piping under impervious structures[D]. Delft: Delft University of Technology, 1988.
- [5] SEKKNEUHER H, LÓPEZ DE LA CRUZ J, VAN BEEK V, et al. Fine - tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Erosion in geomaterials, 2011, 15(8): 1139-1154.
- [6] MULLERR-KIRCHENBAUER, RANKL M, SCHLOTZER C. Mechanism for regressive erosion beneath dams and barrages[C]. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Heibaum & Schuler (eds), Balkema, Rotterdam, 1993, 369-376.
- [7] 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.
- [8] SELMEIJER J B. Numerical computation of seepage erosion below dams (piping)[C]. Third International Conference on Scour and Erosion, 2006: 596-601.
- [9] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1994.
- [10] 王理芬,曹敦履. 荆江大堤堤基管涌破坏[J]. 长江科学院院报, 1991, 8(2): 44-51.

### Small Scale Experiments and Prediction Rule for Piping in Dike Foundations with Heterogeneity

YAO Qiu-ling<sup>1</sup>, DING Liu-qian<sup>1</sup>, Vera van Beek<sup>2</sup>, SUN Dong-ya<sup>1</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Deltares, Delft, 2628CN, The Netherlands)

**Abstract:** Small scale experiments are performed to simulate piping in dike foundations with heterogeneity. The influence of the heterogeneity on the dike safety has to be investigated by experiments. An addition to the rule of Sellmeijer for the heterogeneous configurations has been derived by model validation based on these experimental works. The influence of present piping channels on dike safety has also been analyzed.

**Key words:** piping; heterogeneity; prediction rule; present piping channel