

双层堤基管涌溃堤砂槽模型试验及渗流场特点研究

刘昌军¹, 丁留谦¹, 吴梦喜², 姚秋玲¹, 孙东亚¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

【摘要】 对双层堤基管涌溃堤进行了砂槽模型试验, 对模型试验的流量和时间比尺进行了分析和讨论。通过有限元数值模拟, 研究了管涌溃堤过程中渗流场变化的特点, 分析并解释了砂槽模型试验中出现的难以理解的现象, 对管涌发展机理和渗流场变化特点有了更深入的认识。

【关键词】 有限元分析; 渗流场; 双层堤基; 管涌; 模型试验

中图分类号: TV871 文献标识码: A 文章编号: 1000-0860(2007)02-0040-04

Model test on piping of two-stratum dike foundations with flume and study on its seepage field characteristics

LIU Chang-jun¹, DING Liu-qian¹, WU Meng-xi², YAO Qiu-ling¹, SUN Dong-ya¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: In-door flume test was conducted to simulate piping under one-stage high hydraulic head to induce dike breach. Discussions are carried out in the aspects of seepage flow quantity and temporal scale effects. FEM analysis is performed to study the characteristics of seepage field changes in the test. Analytical results give proper explanations on the phenomena in the test that are difficult to be understood by ordinary knowledges. This will promote the recognitions on piping mechanisms and the characteristics of seepage field changes.

Key words: FEM analysis; seepage fields; two-stratum dike foundations; piping; flume test

1 引言

堤基管涌是江河大堤汛期常见且危害严重的险情之一, 管涌溃堤的发展机理和特点是大家关心和研究的焦点问题。为此, 一些学者对堤基管涌发展的机理、过程、临界水力比降、有限元数值模拟等开展了大量研究工作^[1~11]。本文在文献[1]的试验结果基础上, 采用一次增加水头至临界水头的方式, 对管涌溃堤过程进行了试验研究, 重点对流量和时间比尺进行了初步分析和讨论。另外, 在模型试验中观察到一个难以理解的现象: 一次将水头加到超过临界水头后, 管涌破坏会持续发展, 但管涌发展速度并不是我们直观想象的那样会逐渐加速发展。为此, 我们通过有限元数值模拟, 研究了管涌溃堤过程中渗流场变化的特

点, 尤其是管涌发展前端锋面土体渗透比降的变化过程, 从而解释了发生这一现象的原因, 提高了对管涌溃堤机理和过程的认识。

2 对管涌溃堤砂槽模型试验比尺的讨论^[12]

管涌溃堤砂槽模型试验主要是研究在渗透力作用下堤基砂层的渗透变形发展过程, 因此模型材料一般取原型天然材料, 这样可以使模型与原型的水力比降和材料的抗渗强度完全相等, 以便最大限度地反映原

收稿日期: 2006-12-19

基金项目: 水利部科技创新项目(SCX 2000-02和SXC 2001-09); 水利部重大项目“防洪减灾重大技术问题研究”。

作者简介: 刘昌军(1978—), 男, 硕士。

型情况。

取模型的长度比尺 $L = L_N / L_M$, 其中 的下标表示物理量, 下标 N 代表原型量, 下标 M 代表模型量。若渗流符合达西定律 $V = kJ$, 则有压渗流的正态模型比尺关系为:

几何比尺 $L = H$ (水平与垂直长度比尺相等)

流速比尺 $v = \frac{V_N}{V_M} = k = \frac{k_N}{k_M} = 1$

流量比尺 $Q = \frac{Q_N}{Q_M} = \frac{2}{L} k = \frac{2}{L}$

时间比尺 $t = \frac{t_N}{t_M} = \frac{L}{k} = L$

应当指出, 上述模型比尺是基于达西定律导出的, 而实际上在管涌破坏区(管涌通道)内水流已不符合达西定律, 而是处于紊流或过渡区流态。对紊流状态, 流速比尺 $v = \frac{1}{L^{1/2}}$, 流量比尺 $Q = \frac{2}{L} v = \frac{2}{L^{3/2}}$, 因此, 按照达西定律模型比尺所得试验结果, 流速和流量比实际的小, 而真实的流量比尺 Q 应在 $\frac{2}{L} \sim \frac{2}{L^{3/2}}$ 之间。时间比尺就更复杂, 也很难准确, 管涌通道内的水流挟带泥沙向管涌出口运动, 按照泥沙输移的模型比尺关系^[2,13], 当模型砂与原型砂相同时, 输沙与紊流的时间比尺 $t = \frac{1}{L^{1/2}}$, 因此, 按照达西定律所得试验结果, 管涌破坏时间比实际的长, 而真实的时间比尺 t 应在 $\frac{1}{L^{1/2}} \sim L$ 之间。

管涌溃堤砂槽模型试验的流量和时间比尺是一个非常复杂的问题, 目前尚难有理想的结论。比较可行的办法是, 进行不同比尺的模型试验, 尤其是大比尺模型试验, 经过理论和统计分析, 有望找到不同比尺试验结果之间的关系和规律, 从而使流量和时间比尺更加可信。

3 砂槽模型试验结果和现象

为了获得比较准确的临界比降(水头), 绝大多数研究者都是采用逐级增加水头的方式进行试验, 只有文献[2]采用固定水头、改变管涌口位置(渗径)的方式进行试验。应当说, 这些试验对获得临界水力比降(水头)是合适的, 但是, 对研究管涌溃堤的真实过程和时间就显得不尽合理。为此, 我们采用一次增加水头至临界水头的方式进行了管涌溃堤砂槽模型试验。

3.1 砂槽模型参数

模型尺寸如图 1 所示, 砂样长 2.25 m, 宽 0.8 m, 高 0.6 m。用有机玻璃板模拟堤身和表土层, 仅在中

心线上距进水口 1.4 m 处预留一个管涌口。砂槽模型采用水下分层抛填的方式制做, 砂料为永定河粉细砂, 模型的详细制作过程参见文献[1]。

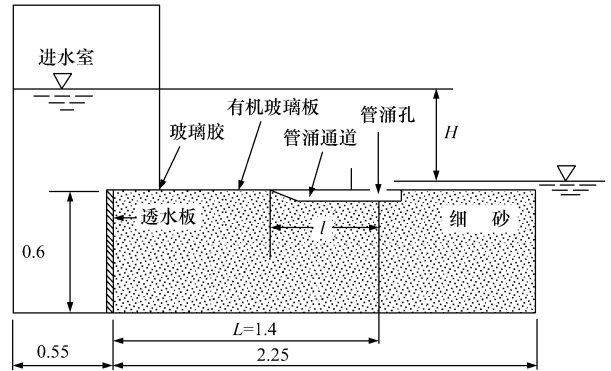


图 1 双层堤基砂槽模型示意(单位: m)

3.2 试验结果和现象

根据文献[1]的试验结果, 模型的临界水头为 30 cm。为此, 试验时一次增加水头至 30.8 cm, 待模型测压管水位稳定后, 拔掉密封管涌口的胶塞进行试验, 直至管涌通道与进水口连通时结束试验。试验结果见表 1 和图 2。

表 1 管涌溃堤砂槽模型试验结果 ($L = 25$)

模 型			原 型				
t_M /min	h_M /cm	Q_M /mL · s ⁻¹	k_N/h		k_N/m	$Q_N/L \cdot s^{-1}$	
			$t = \frac{1}{L^{1/2}}$	$t = L$	$L = 25$	$Q = \frac{2}{L}$	$Q = \frac{2}{L^{3/2}}$
5	18	5.20	0.42	2.08	4.50	11.25	56.25
10	24	5.50	0.83	4.17	6.00	15.00	75.00
15	29	5.90	1.25	6.25	7.25	18.13	90.63
20	31	6.15	1.67	8.33	7.75	19.38	96.88
25	34	6.15	2.08	10.42	8.50	21.25	106.25
30	36	6.15	2.50	12.50	9.00	22.50	112.50
35	40	—	2.92	14.58	10.00	25.00	125.00
45	43.5	6.15	3.75	18.75	10.88	27.19	135.94
55	59	6.35	4.58	22.92	14.75	36.88	184.38
65	63	6.45	5.42	27.08	15.75	39.38	196.88
70	67	6.80	5.83	29.17	16.75	41.88	209.38
75	76	6.90	6.25	31.25	19.00	47.50	237.50
80	78	—	6.67	33.33	19.50	48.75	243.75
90	84	7.00	7.50	37.50	21.00	52.50	262.50
100	90	7.25	8.33	41.67	22.50	56.25	281.25
110	100	7.50	9.17	45.83	25.00	62.50	312.50
117	108	7.75	9.75	48.75	27.00	67.50	337.50
120	112	7.75	10.00	50.00	28.00	70.00	350.00
125	118	8.00	10.42	52.08	29.50	73.75	368.75
140	—	8.00	11.67	58.33	—	—	—
145	—	8.40	12.08	60.42	—	—	—
150	120	8.60	12.50	62.50	30.00	75.00	375.00
160	—	8.75	13.33	66.67	—	—	—
165	—	9.00	13.75	68.75	—	—	—
168	140	—	14.00	70.00	35.00	87.50	437.50

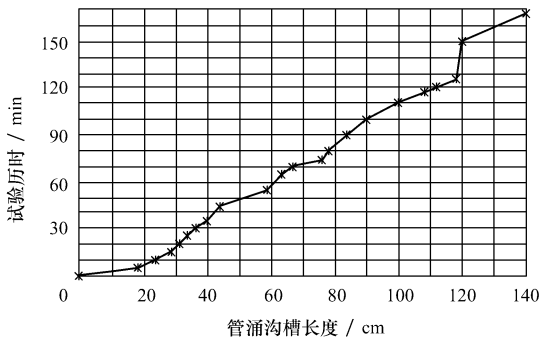


图 2 管涌通道长度与试验历时的关系曲线

试验发现，刚拔掉管涌口的密封胶塞后，管涌口的砂层先是被水流顶起（鼓胀），浑水带砂涌出，管涌口周围砂层迅速发生水平向渗透破坏，并在管涌口周围形成较大的近似椭圆形的破坏区，之后管涌破坏呈沟槽状通道向进水口方向沿砂层顶面浅层发展，沟槽尖端锋面发展主要是水平向渗透力作用下砂颗粒失稳、移动并被水流输送的结果，同时，沟槽周边也有细颗粒被水流起动和输送的现象，管涌通道的宽度比逐级增加水头时要宽，深度也稍大。

如果模型几何比尺 l 按 25 计算，则原型尺寸相当于：堤基砂层厚度 $0.6 \text{ m} \times 25 = 15 \text{ m}$ ，作用水头 $0.308 \text{ m} \times 25 = 7.7 \text{ m}$ ，堤基宽度 $1.4 \text{ m} \times 25 = 35 \text{ m}$ 。由表 1 可知，管涌溃堤时间在 14 ~ 70 h 之间，管涌最大流量在 437.5 ~ 87.5 L/s 之间，由于管涌通道为紊流状态，因此，实际的溃堤历时和流量可能更接近紊流比尺的结果。

按照直观理解，随着管涌通道的发展，进水口到管涌通道前端的渗径在逐渐减小，管涌前端锋面土体的渗透比降相应也会增大，因此，管涌发展会逐渐加速。但是，试验过程并非如此，见表 1 和图 2，当管涌通道发展至距进水口 22 ~ 20 cm ($l = 118 \sim 120 \text{ cm}$) 时，管涌发展速度反而最慢，之后又加速发展直到与进水口连通。为了解释这一现象，又对模型试验进行了数值模拟。

4 砂槽模型试验的数值模拟与分析

采用扩大管涌破坏区渗透系数的方法对模型试验进行了近似模拟^[7]，管涌通道的渗透系数为砂层的 1 000 倍，土体临空面水平向破坏的临界比降按 0.9 考虑，垂直向的临界破坏比降按 1.0 考虑。网格剖分如图 3 所示。图 4 为刚拔掉管涌口密封胶塞时的渗流场，图 5 为管涌发展过程中的典型渗流场，图 6 为管涌前端锋面面临空土体的水平渗透比降。从图 6 可以看

出，拔掉管涌口密封胶塞并发生水平向管涌破坏以后，管涌通道前端锋面临空土体的水平渗透比降 J_F 在不断减小，但始终都大于土体水平向破坏的临界比降。在距离进水口约 20 cm 处 J_F 的值最小，因此管涌发展的速度也最小，这与试验现象和试验结果吻合很好。为了验证这一计算结果，固定管涌通道断面尺寸，假定不同的管涌通道长度，采用常规的有限元计算程序进行计算，得到的 J_F 随管涌通道长度的变化趋势基本一致。分析这一现象的原因，应当主要是管涌破坏区的扩大加大了排水能力，从而使管涌通道前端的三维渗流场得到调整的结果，但对其更加直观的物理概念上的解释仍需深入思考。

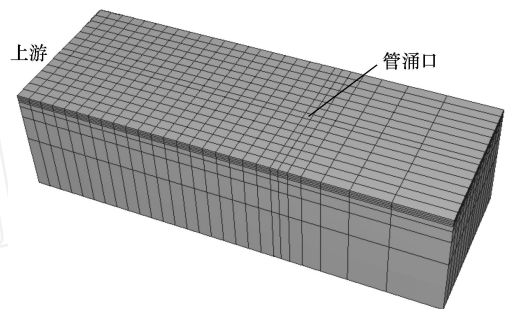


图 3 网格剖分示意

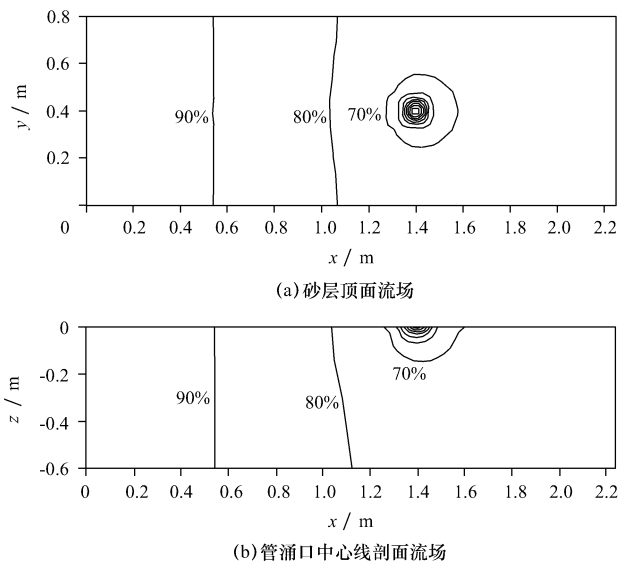


图 4 未发生破坏时的初始流场等值线

5 结 论

双层堤基管涌溃堤砂槽模型试验表明，一旦表层被顶穿而发生管涌流砂后，除了刚开始为垂直向砂沸破坏以外，之后的管涌发展主要是水平向渗透力作用下的颗粒失稳、移动和水流输送并带出管涌口的结果，双层堤基管涌溃堤主要是砂层顶面浅层破坏并最

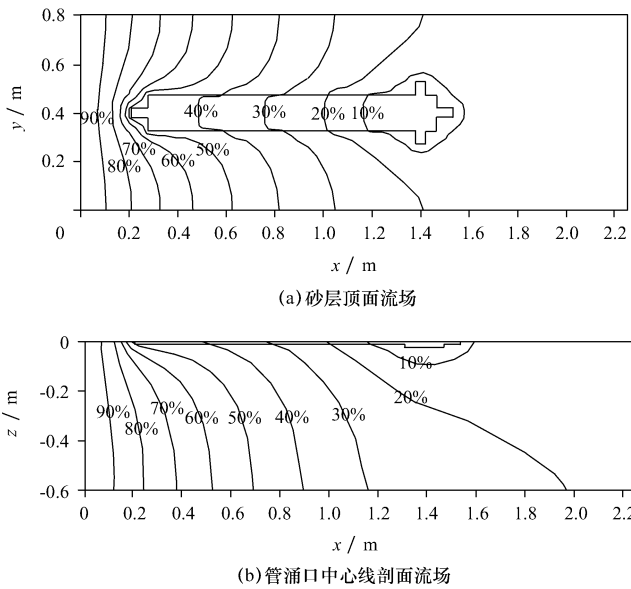


图 5 管涌发展过程中的流场等值线

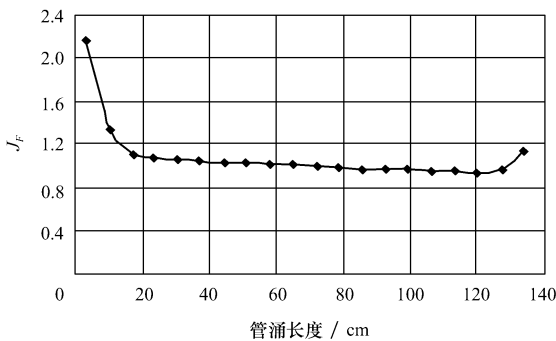


图 6 管涌前端锋面凌空土体的水平渗透比降

终与进水口连通造成的。管涌通道的发展速度并不是直观想象的那样会逐渐加速，而是先快、后慢再加速发展的过程。

参考文献:

- [1] 姚秋玲, 丁留谦, 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).
- [2] 毛祖熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤基渗流无害管涌试验研究 [J]. 水利学报, 2004, (11): 46-53.
- [3] 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.
- [4] J M de Wit, J B Sellmeijer, A Penning. Laboratory testing on piping, Proc [A]. 10th Int Conf on Soil Mech. and Found. Eng. [C]. Part 1, Stockholm, 1981. 517.
- [5] H M Uler-Kirchenbauer, M Rankl, C Schlötzer. Mechanism for regressive erosion beneath dams and barrages [J]. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & and Schuler (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 3426, 1993.
- [6] J H Schmertmann. The No-filter Factor of Safety Against Piping through Sand, Judgment and Innovation [A]. The Heritage and Future of the Geotechnical Engineering Profession [C]. Geotechnical Special Publication, NO. 111.
- [7] 丁留谦, 吴梦喜, 刘昌军, 等. 双层堤基管涌动态发展的有限元模拟 [J]. 水利水电技术, 2007, 38(2).
- [8] YN Jian-hua. FE Modeling of seepage in embankment soils with piping zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 679-686.
- [9] 张家发, 朱国胜, 曹敦履. 堤基渗透变形扩展过程和悬挂式防渗墙控制作用的数值模拟研究 [J]. 长江科学院院报, 2004, 21(6): 46-50.
- [10] 李守德, 张晓梅, 刘志祥. 基坑开挖过程管涌发生过程的模拟 [J]. 工程勘察, 2003, (2): 14-17.
- [11] 周 建, 张 刚. 管涌现象的进展与展望 [J]. 地下空间, 2004, (4): 536-541.
- [12] 南京水利科学研究所、北京水利科学研究所合编. 水工模型试验 [M]. 北京: 水力电力出版社, 1985.
- [13] 李光敦, 刘奕良. 泥沙运动试验之模型比尺 [J]. 台湾水利, 2002, 50(1): 60-68.

(责任编辑 聂建平)

· 简 讯 ·

2007年“中国水周”活动宣传主题：水利发展与和谐社会

水利部发布文件，明确 2007年我国纪念“世界水日”和开展“中国水周”活动的宣传主题为“水利发展与和谐社会”。2007年 3月 22日是第十五届“世界水日”，3月 22~28日是第二十届“中国水周”。联合国确定 2007年“世界水日”的宣传主题是“应对水短缺”。3月 22日将由水利部在部内举行纪念“世界水日”和开展“中国水周”宣传活动座谈会。届时将邀请全国人大农委、环资委、国务院法制办、国务院有关部委、全国普法办、部内有关司局和有关专家(出席，并邀请部分参会代表发言。

2007年“世界水日”、“中国水周”宣传口号：1. 加快水利发展，促进社会和谐。2. 建设节水型社会，促进人水和谐。

3. 节约为本，治污优先。4. 节约用水，从我做起。5. 保障饮水安全，维护生命健康。6. 珍惜水，保护水，让水造福人类。7. 保护水资源，保护水环境，防治水污染。8. 防治水土流失，保护水土资源。9. 保护植被，涵养水源，防治水土流失。10. 加强农村水利工作，建设社会主义新农村。11. 加强河道管理，维护河湖健康生命。12. 防御水旱灾害，促进经济发展。13. 加强洪水管理，保障防洪安全。14. 推进依法行政，实现依法治水。15. 贯彻执行《中华人民共和国水法》。16. 贯彻执行《中华人民共和国防洪法》。17. 贯彻执行《中华人民共和国水土保持法》。18. 贯彻执行《中华人民共和国水污染防治法》。(摘自“中国水利 国际合作与科技网”2007年 1月 16日)