

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.03.003

# 大型管涌物理模型设计及应用

曾浩, 张伟, 吴庆华, 张亚辉, 王珂, 李玉子

(长江水利委员会长江科学院, 湖北武汉 430010)

**摘要:** 管涌是堤防主要险情之一,在总结前人管涌砂槽模型的基础上,针对尺度效应问题在传统砂槽模型的基础上对模型进行改进:将模型尺寸扩大到 $10.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ ;对模型结构和防水止水进行了特殊设计;在管涌口周围不设置约束。随后开展了一组大尺度物理模型试验,试验结果表明:管涌发生过程中管涌口的扩大会起到消减水头的作用;管涌险情在其临界水力梯度时,险情可在长时间内处于稳定状态,随着管涌口的扩大管涌有休止的趋势。

**关键词:** 大尺度;堤防;管涌;模型试验

中图分类号: TV149

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)03—0016—05

## Design and Application of Physical Model for Large Scale Piping

ZENG Hao, ZHANG Wei, WU Qinghua, ZHANG Yahui, WANG Ke, LI Yuzi

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,  
Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** Piping is one of the main dangerous situations of embankment. Based on the summary of previous piping sand tank models, an improved model is proposed to reduce the size effect, the size of the model is expanded to  $10.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ . The model structure and waterproof water stop are specially designed and no restriction is set around the pipe orifice. Then a group of large-scale physical model tests are carried out. The test results show that the expansion of the pipe orifice will reduce the water head in the process of piping, when the piping dangerous situation is in its critical hydraulic gradient, the dangerous situation could be in a stable state for a long time, and the piping tends to stop with the expansion of the piping orifice.

**Keywords:** large scale; embankment; piping; model test

我国洪涝灾害问题突出,防洪减灾关系人民生命财产安全、社会稳定与可持续发展。堤防工程是我国防洪体系的重要基础,已建堤防总长达41万km,其中长江中下游堤防30000km,干堤3600km<sup>[1]</sup>。由于堤身不均匀,堤基结构复杂,河流冲刷、人类与动植物活动、极端气候条件等众多因素的影响,导致堤防存在安全隐患,汛期险情频发。堤防管涌险情是我国四大主要典型险情之一。

国内外学者对堤防管涌险情机理开展了大量研究工作,Foster等<sup>[2]</sup>分析了历史上由管涌造成堤坝破坏的事故,提出了一种估算管涌导致堤坝破坏的可能性的方法。Lanzafame<sup>[3]</sup>采用可靠度分析方法

研究了覆盖层的渗透系数、厚度和抗剪强度对堤防安全的影响,认为相比于覆盖层的渗透系数,其厚度和抗剪强度的影响更大。文献[4-8]通过试验对双层堤基、三层堤基管涌的扩展过程进行了研究,根据试验结果讨论了盖重最大、最小宽度和管涌抢险的合理范围,为堤防设计和抢险工作提供了参考。文献[9-15]采用数值模拟和模型试验的方法对堤身堤基渗流场规律进行了分析,研究了堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用,研究得出了悬挂式防渗墙渗流控制效果并不显著的结论。刘洪辰等<sup>[16]</sup>选取二元堤基作为对象设计了3种密实度

收稿日期:2022-01-28

修稿日期:2022-03-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502602);国家重点研发计划项目(2019YFC1510803)

作者简介:曾浩(1996—),男,硕士研究生,研究方向为渗流及地下水环境。E-mail:zenghao967274@16.com

通讯作者:张伟(1964—),男,正高级工程师,主要从事渗流与地下水环境方面的工作。E-mail:zhangwei@mail.crsri.cn

与3种覆盖层厚度以及2种接触面情况下的砂槽试验,得出了覆盖层密度越大临界比降和破坏比降越大;覆盖层厚度与临界比降和破坏比降之间没有明显相关性,上述研究一定程度上揭示了管涌破坏的机理,分析得到了影响管涌发生、延展的影响因素,对工程领域有积极的指导作用。

但长期以来的研究都集中于中小尺度的物理模型试验,前人研究中开展的砂槽模型试验存在模型尺寸较小、试验过程中需要在黏土覆盖层上添加盖板并预留管涌孔,让管涌只能发生在固定位置,以及试验过程中管涌口大小不可变化等限制条件,这些条件可能导致试验结果与实际条件中堤防管涌的演化机理存在差异。因此开展大尺度堤防管涌险情演化机理物理模型试验对揭示管涌的演化机理具有重要意义。

本次研究构建了国内目前最大的管涌试验物理砂槽模型,通过观察流量、测压管水位、等参数,对比分析在对管涌口不加以约束的情况下管涌发生、发展的特性及破坏后的结果,以期揭示尺度效应对管涌发生发展的影响。

## 1 试验模型设计特点

为尽可能真实地模拟出管涌发生、发展的情况,本研究采用了数值模拟方法探究了管涌通道贯通即致溃时模型中渗流场分布情况,分析模型边界对渗流场的影响。结合缩尺原理及模型成本,提出了模型最优尺寸。

模型槽主体尺寸为长10.0 m×宽3.0 m×高2.5 m,顶面敞开。模型上游为进水室,尺寸为长1.0 m×宽3.0 m×高2.5 m,顶面封闭;模型下游为排水室,尺寸为长1.0 m×宽3.0 m×厚2.5 m,顶面敞开。模型2.2 m嵌入地下,模型顶面高出地面0.3 m。模型整体(底部与侧壁)能承受10.0 m高水头与3.0 m厚度的砂土压力之和的挤压而不发生变形,避免模型开裂。模型结构图见图1。

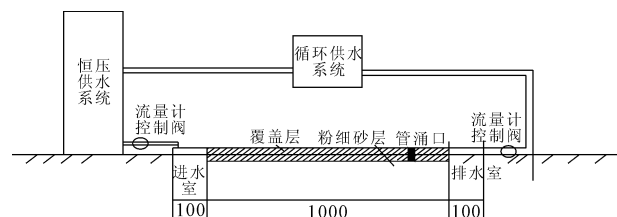


图1 模型结构示意图(单位:cm)

(1) 供排水系统。供水系统为长2.7 m×宽

2.7 m×高5.0 m水箱,在水箱顶部设置一个直径为30 cm、高1.0 m的钢管,以提供最高6 m的供水水头。供水系统与进水室由1个直径为40 cm的供水管连接,提供足量供水量。供水系统固定在长3.0 m×宽3.0 m×厚80 cm的钢筋混凝土基座上。供水室与模型主体通过19个直径为15 cm孔相连,在模型主体一侧,采用多孔有机玻璃板对模型砂土层供水。排水室水体进入1个尺寸为3 m×2 m×2 m混凝土的回收池,通过自动水泵抽控制系统将水抽至供水箱,循环利用水资源。抽水量能力不低于10 m<sup>3</sup>/h,扬程不低于8 m。

(2) 模型主体表面压重与止水系统。在加工完成的模型主体内填筑砂土,模型主体顶面需要用厚6 mm钢板材料与“⊥”钢板进行压重,防止压重盖板被5 m高水头压力顶起。由于管涌口及其通道随时间将发生变化,则模型盖板设计成可拆换的组装模式,即将整个盖板分割成若干块(40 cm×90 cm、40 cm×50 cm),每一块均采用螺丝与盖板横梁骨架固定,同时采用橡胶垫密封止水。根据管涌扩展情况,在管涌扩展的上游依次揭开盖板块,以实现试验过程中对管涌扩展、致溃过程的真实观测。

(3) 测压管安装与防水设计。根据管涌口设置、管涌险情渗流场特征,共布置了3层、3排测压管,共93个测点,主要用于监测砂层中压力水头变化。具体布设情况如图2所示。整个模型共布设12个垂直水流方向的监测断面,从上游进水端到管涌口,按1.0 m~0.4 m不等间距布设监测断面,距离管涌口越近,断面间距离越小,且根据渗流场,每个监测断面上布置9个监测点(1~3个,平面上);在沿着水流方向上,共布设了3个主要的监测断面,断面之间的间距为80 cm,其中模型中心监测断面共布设了12个监测点(平面上)。在上述平面监测布置点的垂直方向上,每一个点共布置3个不同深度的测压管(见图2(b)),即剖面上监测点距模型底面的距离分别为1.00 m、1.70 m和2.15 m。

## 2 试验方案

### 2.1 试验材料

为了模拟实际堤基的地质条件,本次试验砂样采用取自汉江流域的细砂,试验土样采用取自湖底的淤泥质黏土,将其破碎筛分后取其细颗粒用于模拟覆盖层。砂样和土样的颗粒级配组成如图3所示。试验砂样和土样物理力学指标见表1,材料本身的破坏比降由室内垂直渗透试验得到,反映材料发生破坏的难易程度。

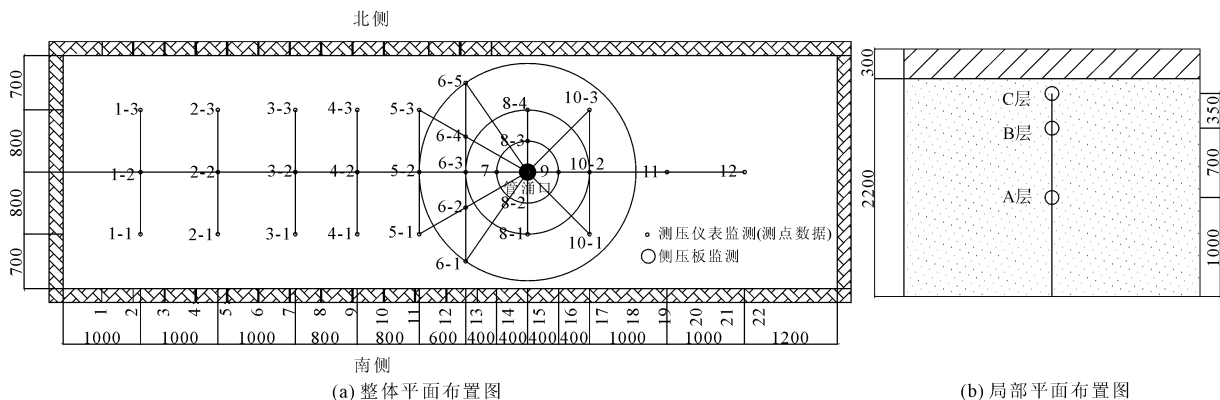
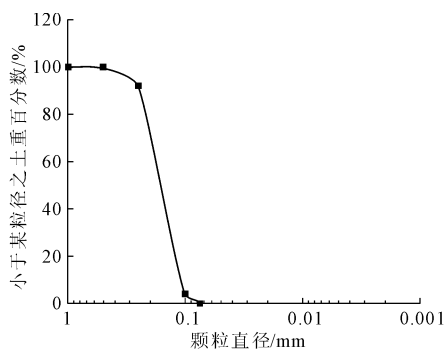
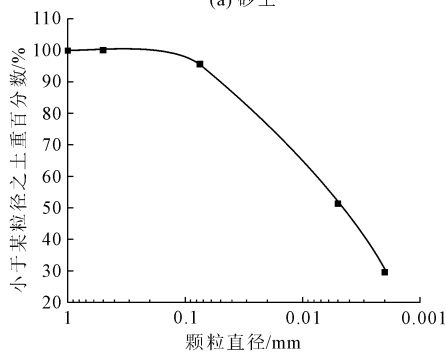


图 2 模型测压管布置图(单位:mm)



(a) 砂土



(b) 黏土

图 3 试验土样的颗粒级配曲线

表 1 试验用土的物理力学性质

土料	$d_{60}$ /mm	$d_{50}$ /mm	干密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	渗透系数 /( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	破坏 比降
细砂	0.190	0.140	1.4	$8.70 \times 10^{-3}$	0.9
黏土	0.008	0.002	1.2	$8.24 \times 10^{-3}$	1.2

## 2.2 模型填筑

选取黏土覆盖层干密度为  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , 含水率为 20%, 填筑高度为 30 cm; 砂层干密度为  $1.4 \text{ g/cm}^3$ , 含水率 10%, 填筑厚度为 220 cm, 砂层和覆盖层均按 10 cm 一层填筑, 每填筑一层, 模型四周垂直方向每隔 10 cm 交叉涂抹结构胶和粘贴防渗橡胶带做防水处理, 防止水向边壁上渗流。

在模型顶面, 采用可拆换式盖板系统进行密封, 该系统可约束 8 m ~ 10 m 高水头的顶托力, 并能保持良好的水密封性, 模拟堤基黏土覆盖层, 抵抗高压水头, 保证在管涌口至上游进水端之间不会出现黏土覆盖层被高水头击穿而导致试验失败的情况发生。但为了研究管涌险情发展过程中管涌口尺寸扩展及其向上游发展的影响, 可根据测压板水位数据识别管涌通道发展情况, 并逐一揭开盖板, 为管涌口发展提供不受约束的自然条件。

## 2.3 试验过程

(1) 浸润饱和, 向模型槽进水室中每次升高水位 10 cm, 待水渗过试样到达出水室且与进水室水位基本保持齐平时继续升高水头, 最终加水直至水位与试样顶面齐平, 浸润饱和 24 h 以上。

(2) 饱和完毕后缓慢逐级升高水头至水从管涌口流出, 测量其初始流量, 渗流量和测压管水位基本稳定后记录第一组数据, 此时管涌口水流清澈且没有泥沙带出, 管涌发展尚未产生, 水头每级升高 10 cm。

(3) 试验进行至管涌口发生大量涌砂, 管涌通道与进水室贯通时即视为试样发生整体破坏, 此时结束试验。

## 3 试验结果分析与讨论

### 3.1 试验过程

在物理模型充分饱和后, 逐渐升高上游进水端水头, 观察预留管涌口排水量、管涌口大小尺寸、管涌口涌砂等现象, 在上游水头上升至 76.20 cm (水平比降为 0.127, 管涌口上游临近区垂直比降为 0.623) 时, 预留管涌口才出现集中水流, 泥土团块跳动并伴有浑水出现的现象, 此时模型处于临界启

动状态。

图4为试验过程中管涌口流量过程线。从图中可知,在管涌险情发生致溃之前,管涌口流量随上游水头增加而增加,但在管涌口出现集中水流,即模型达到临界水力梯度之前时(上游水位低于80 cm时),相同上游水位条件下,管涌口流量基本上维持不变,这说明,砂土颗粒结构尚未发生调整,模型整体稳定。但当在上游水位持续上涨至80.0 cm并持续660 min,管涌流量与涌砂情况均处于稳定状态,但在此水头作用下,管涌口流量与含沙量均出现了间歇性调整,管涌口流量由3.06 L/min逐渐增加至4.00 L/min,增加幅度高达30.72%,管涌集中涌水与泥沙情况也随时间逐渐增强,而在之后的8 h内,管涌口流量由4.00 L/min逐渐减小至3.65 L/min,减小幅度为8.75%,但在1200 min时,流量又略有增加。在此阶段,从管涌口涌水-排水通道中可明显观测到少量粉细砂被带出而残留,表明砂土和黏土样均有颗粒启动与流失。

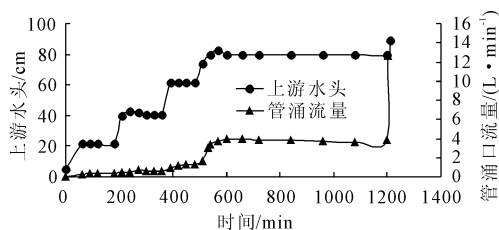


图4 管涌口流量随时间变化曲线

在上游水头为80.0 cm时,管涌流量出现了增加-减小-增加-减小-增加的反复过程,表明管涌险情发生的临界水头情况下,经过长时间砂土层颗粒结构调整,维持了地层结构的整体稳定。但当上游水头持续增加至90.0 cm时,即模型整体平均水平水力梯度增至0.15时(垂直比降增至1.0),管涌口流量与泥沙含量显著增加,在10 min内,管涌口流量由3.88 L/min骤增至135.0 L/min,增加了34.8倍,且随着管涌通道贯通,流量进一步增加。

图5为管涌险情发展致溃过程图。从图5可知,管涌险情在其临界水力梯度时,险情可在长时间内处于稳定状态,管涌通道在渗流力的作用下,其颗粒结构可发生多次调整以抵抗管涌险情破坏或恶化。但水力比降一旦突破其渗透破坏比降时,管涌险情迅速恶化,并迅速向上游扩展,且在极短时间内向模型上游快速扩张,是极危险的高致溃性管涌。



图5 管涌险情致溃全过程

### 3.2 渗流场变化特征

由于模型四周由钢筋混凝土构成,试验过程中不便于观察实时现象,因此主要依据模型安放的93根测压管分析试验结果,依据管涌发生发展至破坏的临界比降、破坏比降、流量和浊度变化来分析不同试验条件对管涌发展的影响。地层渗流场变化是控制堤防管涌险情发生、发展全过程的重要外部条件,一旦渗透比降超过其临界或破坏渗透比降,管涌险情将发生。

(1) 水平方向特征。图6为上游水头上升过程中,模型中心断面不同位置测点的压力水头动态变化曲线。从图中可知,模型测压管水头值随上游水头上升而上升,且响应时间短,小于30 min(数据观测频率),表明模型砂层的导水能力强,对上游水位响应显著。图7为典型时刻模型中心断面测压水头沿程变化曲线,从图中可知,距离管涌越近,测压线越密集,渗流越集中,C层测压管影响最为强烈。图8为模型中心断面距离进水端不同距离的平均水力梯度分布图,从图中可知,在0.0~4.2 m和7.3 m~8.3 m范围内,A、B和C层砂土的平均水力梯度值接近,但存在不同时刻、不同位置三个不同深度位置的水力梯度发生变化,表明模型渗流场为三维渗流。在管涌口附近,C层砂土层渗透比降高达0.35(负值表示管涌口下游地层水向管涌口运动,并排泄),渗流场集中现象明显。

(2) 垂直方向特征。图 9 为典型测点垂直方向上测压水头随时间变化曲线,从图中可知,总体上,从下至上,测压水头呈递增趋势,随距进水端距离越远,水头递增趋势增加越大,表明物理模型的渗流场方向是由上游向下游、由下向上的三位流,且在管涌或表层无覆盖层区域,地下水从下向上流动更加显著。

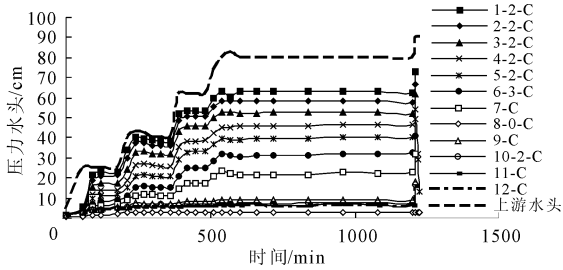


图 6 模型中心断面水头随时间变化曲线

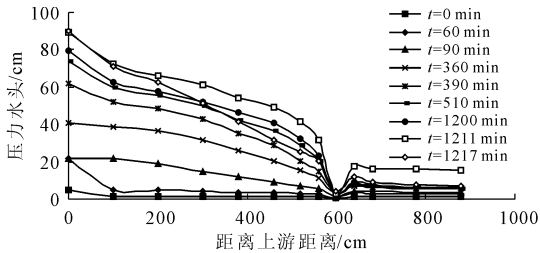


图 7 典型时刻模型中心断面测压水头沿程变化曲线

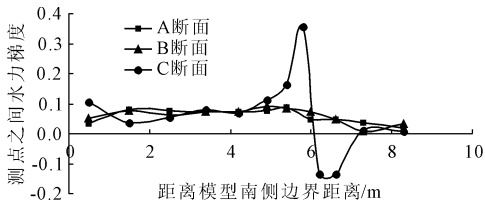


图 8 模型中心断面水力梯度分布

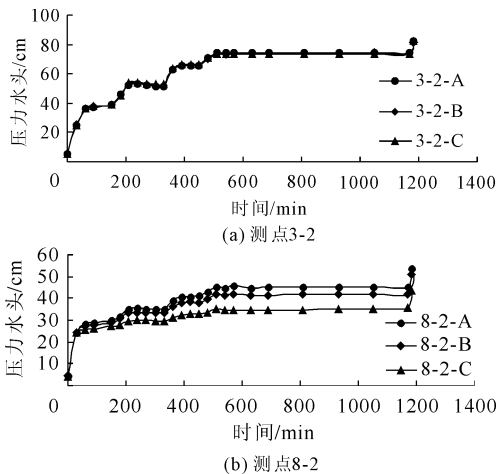


图 9 典型测点垂直方向上测压水头随时间变化曲线

### 3.3 模型尺度对管涌影响的分析

以往大多数模型试验都预设了管涌口,其规模在试验进程中不会变化,试验成果只能在一定程度上说明规律性,有的文献认为观测到初期管涌口水头上升。实际上,管涌口与管涌通道一样,应该不受模型制约而自由扩展,管涌口的扩大,会起到消减水头的作用,管涌周围一定范围内的水力比降有可能会降低。本模型在管涌口后留有 4 m 无盖板,让其管涌口减少制约任其扩展,使其尽可能符合实际情况。图 10 可看出在发生管涌破坏之后由于管涌口的扩大引起了水头的削减从而导致管涌口水力坡降降低,但继续增加水头其水力坡降迅速上升继而破坏。本次试验所得破坏比降为 0.17。本课题组已有研究中,刘洪晨采用小尺度模型,与本研究相同的土层分布和结构、同样的监测方法,得到的破坏比降在 0.10~0.15 之间。两项研究相对比,表明管涌破坏比降的测定存在尺度效应,小尺度的砂槽模型试验测得的管涌破坏比降较小。如果在实际工程中采用小尺度模型试验得到的参数,可能偏于保守。

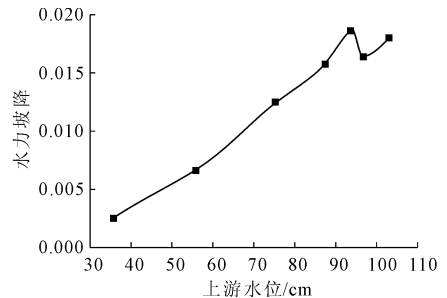


图 10 水力坡降随上游水位的变化曲线

## 4 结论

(1) 管涌发生过程中管涌口的扩大,会起到消减水头的作用,导致管涌口水力坡降降低,类似于一个没有设置滤层的减压井,因此管涌实际发生的破坏比降要大于传统的砂槽模型所得出的数据。

(2) 本文构建了国内最大的堤防管涌物理模型试验系统,提出了可拆换式盖板模拟系统,克服了传统物理模型试验中,管涌口大小不能随险情发生发展而发生变化的难题。

(3) 管涌口附近渗透比降较高,明显大于破坏比降,并且其渗流集中明显。

### 参考文献:

- [1] 吴庆华,张 伟,邬爱清,等.堤防管涌险情研究进展[J].长江科学院院报,2019,36(10):39-44.

- [6] 陈从春,冯毅,陈晓冬. 钢纤维体积掺量对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2016,43(5):54-56.
- [7] 鞠彦忠,王德弘,康孟新. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土力学性能的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013,21(2):299-306.
- [8] Yoo D, Lee J H, Yoon Y S, et al. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites [J]. Composite Structures, 2013,106:742-753.
- [9] 黄雪林,罗东志,徐习宝,等. 不同纤维及掺量对混凝土的强度影响规律分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021,19(2):166-171.
- [10] 程鹏,吴方红,曾彦钦,等. 含粗骨料的超高性能混凝土受弯试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019,17(2):41-45.
- [11] 梁兴文,胡翱翔,于婧,等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018,35(3):722-731.
- [12] 郭志强. 不同钢纤维含量对超高性能混凝土结构的抗弯性能影响研究[J]. 四川建筑科学研究, 2020,46(2):95-102.
- [13] 超高性能混凝土试验方法标准: T/CECS 864—2021 [S]. 北京:中国建材工业出版社, 2021.
- [14] 余睿,范定强,孙美娟,等. 钢纤维掺量及其 3D 空间结构对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021,49(11):2313-2321.
- [15] Yu R, Spiesz P, Brouwers H J H. Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): Experiments and modeling[J]. Construction & Building Materials, 2014,68(15):158-171.
- [16] Wu Z, Shi C, He W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Construction & Building Materials, 2016,103:8-14.
- [17] 曹明莉,李黎,李志文,等. 晶须对钢-聚乙烯醇混杂纤维增强水泥基复合材料板弯曲性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017,34(11):10.
- [18] 张文华,张仔祥,刘鹏宇,等. 多尺度纤维增强超高性能混凝土的轴心抗拉和抗压行为[J]. 硅酸盐学报, 2020,48(8):1155-1167.
- [19] Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete: ASTM C 1609 [S]. USA. 2012.
- [20] 丁一宁,董香军,王岳华. 钢纤维混凝土弯曲韧性测试方法与评价标准[J]. 建筑材料学报, 2005,43(5):54-56.

(上接第 20 页)

- [2] Mark Foster, Robin Fell, Matt Spannagle. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000,37(5):1025-1061.
- [3] Robert Lanzafame. Reliability analysis of the influence of seepage on levee stability [J]. Environmental Geotechnics, 2018,6(5):284-293.
- [4] 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(2):13-18.
- [5] 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(2):19-22.
- [6] 丁留谦,姚秋玲,孙东亚,等. 双层堤基中悬挂式防渗墙控渗效果的试验研究[J]. 水利水电技术, 2007(2):23-26.
- [7] 丁留谦,姚秋玲,孙东亚,等. 关于盖重宽度和管涌抢险范围的讨论[J]. 水利水电技术, 2007(2):27-29.
- [8] 陈建生,袁克龙,王霜,等. 细砂层埋深对堤基管涌影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015,36(3):653-659.
- [9] 张家发,吴昌瑜,朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002(9):108-111, 116.
- [10] 李广信,周晓洁. 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.
- [11] 李广信,司富安,白晓明. 中国堤防工程地质[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [12] 刘杰,谢定松,崔亦昊,等. 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, 2008,11(39):1211-1220.
- [13] 张家发,吴昌瑜,朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002,30(9):108-111.
- [14] 张家发,王满星,丁金华. 典型条件下堤身堤基渗流规律分析[J]. 长江科学院院报, 2000,24(5):23-27.
- [15] 陈建生,张超,王霜,等. 悬挂式防渗墙对不同细料含量堤基管涌的影响[J]. 人民黄河, 2017,39(1):41-46, 50.
- [16] 刘洪辰,吴庆华,苏怀智,等. 覆盖层及其与砂层接触面特性对堤基管涌影响试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020,18(4):165-170.