

二元堤基结构堤防管涌机理模型试验

李火坤¹, 王文韬¹, 王姣^{2,3}, 唐义员¹, 王萱子², 胡强^{2,3}, 熊威^{2,3}, 黄伟¹, 朱慧琪¹

(1. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029;
3. 江西省水工程安全工程技术中心, 江西 南昌 330029)

摘要: 为了科学解释二元堤基结构堤防管涌致灾机制并揭示其形成、演化过程和致溃规律, 在考虑堤基强、弱透水层之间壤土过渡层作用的基础上, 通过室内模型试验完整地模拟了二元堤基管涌从单个泡泉发展至管涌群并最终造成堤基塌陷溃决的全过程。试验结果表明: 上部黏土及壤土层在渗流的顶托作用下向上隆起并在堤基内部产生层间水平渗漏通道, 导致发生潜层砂沸, 最终向上发展为表面砂沸的渗透破坏; 二元堤基结构管涌发展可分为裂缝发展、潜层破坏、上覆层破坏、管涌通道上溯、堤基破坏和堤基溃决6个发展阶段; 表面砂沸由潜层砂沸发展而来, 潜层砂沸是由于土层内竖向坡降所引起的渗流力大于上部土体浮容重时造成的土层结构破坏所致, 临界竖向坡降处于0.9~1之间; 壤土层的存在会加快堤后自由边界区域管涌群的发展速度, 但可以延缓管涌通道的上溯, 对堤基具有保护作用。

关键词: 堤防; 二元堤基; 管涌机理; 潜层砂沸; 模型试验

中图分类号: TV871.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2024)01-0079-10

Model test study on piping mechanism of binary dike foundation structure// LI Huokun¹, WANG Wentao¹, WANG Jiao^{2,3}, TANG Yiyuan¹, WANG Xuanzi², HU Qiang^{2,3}, XIONG Wei^{2,3}, HUANG Wei¹, ZHU Huiqi¹ (1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 3. Jiangxi Water Engineering Safety Engineering Technology Center, Nanchang 330029, China)

Abstract: To scientifically explain the mechanism of piping disaster and reveal its formation, evolution process and burst law on the basis of considering the action of loam transition layer between the strong and weak permeable layers of dike foundation, the whole process of piping of a binary dike foundation structure from single bubble spring to piping group and finally resulting in collapse of dike foundation was completely simulated by indoor model test. The results show that the overlying soil layer uplifts upward under the jacking effect of seepage and produces horizontal channels between layers inside the dike foundation, leading to submerged sand boiling and eventually develops upward to the seepage failure of surface sand boiling. The piping development of binary dike foundation structure can be divided into six stages, including crack development, latent layer failure, overlay damage, upward development of piping channel, damage of dike foundation and dike break. The surface sand boiling is developed from the submerged sand boiling. The submerged sand boiling is caused by the damage of the soil structure induced by the seepage force due to the vertical slope in the soil layer greater than the floating bulk density of the upper soil. The critical vertical slope is between 0.9 and 1. The existence of loam layer accelerates the development of piping group in the free boundary area behind the dike, but it can delay the upstream of piping channel and protect the dike foundation.

Key words: dike; binary dike foundation; piping mechanism; submerged sand boiling; model test

在危害我国主要流域堤防安全的诸多险情中^[1-6], 管涌是分布最广、危害最大的险情之一^[7]。罗玉龙等^[8-9]将管涌细分为向后侵蚀管涌和潜蚀。向后侵蚀管涌是指土颗粒在渗流作用下运移离开堤

坝下游或背水侧无保护的渗流出口, 并逐渐形成从下游或背水侧向上游或迎水侧发展的集中渗漏通道的现象; 潜蚀是指渗流携带内部不稳定土体中的细颗粒在粗颗粒的骨架孔隙中运移流失, 逐渐在地基

基金项目: 江西省水利厅科技项目(202224ZDKT07, 202124ZDKT01, 202123YBKT02)

作者简介: 李火坤(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事水工水力学与工程安全检测研究。E-mail: lihuokun@ncu.edu.cn

通信作者: 王姣(1978—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水工程安全和防灾减灾研究。E-mail: 47691992@qq.com

内形成局部被掏空、被充填的现象^[9]。本文研究的为堤防工程基础中最常见的向后侵蚀管涌(下文简称“堤基管涌”)。

堤基管涌致溃机理复杂,一直以来是国内外学者的研究重点^[10-11],其中物理模型试验是最主要的研究方法之一,根据模拟的堤基土层结构不同大致可分为单层、双层和多层堤基管涌物理模型试验。在单层堤基管涌试验研究方面,刘昌军等^[12]研究了堤基管涌侵蚀过程的破坏机理;姚志雄等^[13]研究了颗粒级配对管涌发展的影响;Robbins 等^[14-15]研究了逆向侵蚀型管涌的水平临界水力梯度等水力条件以及管涌发展速度与渗流流速之间的关系;倪小东等^[16]研究了侵蚀型管涌的发展规律以及外部因素或渗流稳定因素造成的“扰动”作用对侵蚀型管涌发展过程的影响;Vandenboer 等^[17]研究了临界和超临界水力荷载在小型管涌试验中对管涌通道及侵蚀颗粒的影响。单层堤基管涌试验较好地模拟了管涌土层内细颗粒的侵蚀运移过程,揭示了管涌土土体性质与管涌临界水力条件的关系。在双层堤基管涌试验研究方面,毛昶熙等^[18]得到了双层堤基粉细砂层发生管涌通道时影响堤防安全的水平平均临界水力坡降约为 0.1 的结论;李广信等^[19]研究了二元堤基结构的渗透破坏模式以及悬挂式防渗墙深度、堤基土密度与管涌发展之间的定量关系;刘杰等^[20]研究了上下土层渗透系数比值大小对堤基渗透破坏的影响;梁越等^[21]研究了刚性及柔性上覆层对堤基渗透破坏的影响;Wang 等^[22]研究了上覆不透水层厚度对堤基管涌发展的影响;贾恺等^[23]研究了管涌通道尖端坡降对通道上溯的影响。双层堤基管涌试验考虑了上覆弱透水层作用,模拟了管涌通道沿强弱透水层接触面发展的现象。在多层堤基管涌试验研究方面,丁留谦等^[24]的研究表明强透水砂砾层的存

在会降低堤基管涌破坏的水平平均临界比降;陈建生等^[25-26]研究了不同堤基土层结构以及细砂层埋深对堤基管涌的发展和临界水力梯度的影响;王霜等^[27]研究了细砂层厚度对管涌临界水力梯度、涌砂量和通道发展速度的影响。多层堤基管涌试验对复杂堤基结构的管涌进行了更为深入的研究。

现有的管涌物理模型试验均很好地模拟了管涌的发生及发展过程,但实际工程中具有壤土过渡层的堤基结构较为多见,如黄河流域^[28]堤基土层上部弱透水层为壤土,下部强透水层为细砂和中砂,中间夹有砂壤土过渡;长江流域^[29-31]堤基土层自上而下多为黏土、壤土、砂土和卵石层的上细下粗二元结构,强弱透水层间也有壤土作为过渡。因此,关于考虑过渡层的堤基管涌模型试验还需要进一步深入研究。本文考虑堤基中壤土层的过渡作用,通过室内物理试验模拟二元堤基结构的管涌发展全过程,分析堤基土层细粒侵蚀、结构破坏及失稳溃决等管涌破坏现象的发展趋势及其与水力条件之间的相互联系,揭示管涌发展及致溃的机理。

1 试验方法

1.1 试验装置

试验在一个长 2.031 m、宽 0.32 m、高 2.2 m 的有机玻璃模型槽中进行(图 1)。模型槽上游设置一个内径长 0.19 m、宽 0.3 m、高 2.1 m 的水箱,用来模拟堤防上游水头,其侧壁自 0.375 m 至顶部每隔 5 cm 开有一个溢流孔,以维持不同高度的恒定上游试验水头,外设溢流水箱,内置潜水泵以实现上游水箱的水循环。模型槽中部为主体部分,内径长 1.61 m、宽 0.3 m、高 0.375 m,其中上游段设有长为 0.11 m 的首部进水段,两端设有栅格滤板,中间填充砾石,以实现各土层试样的全断面均匀进水,用以模

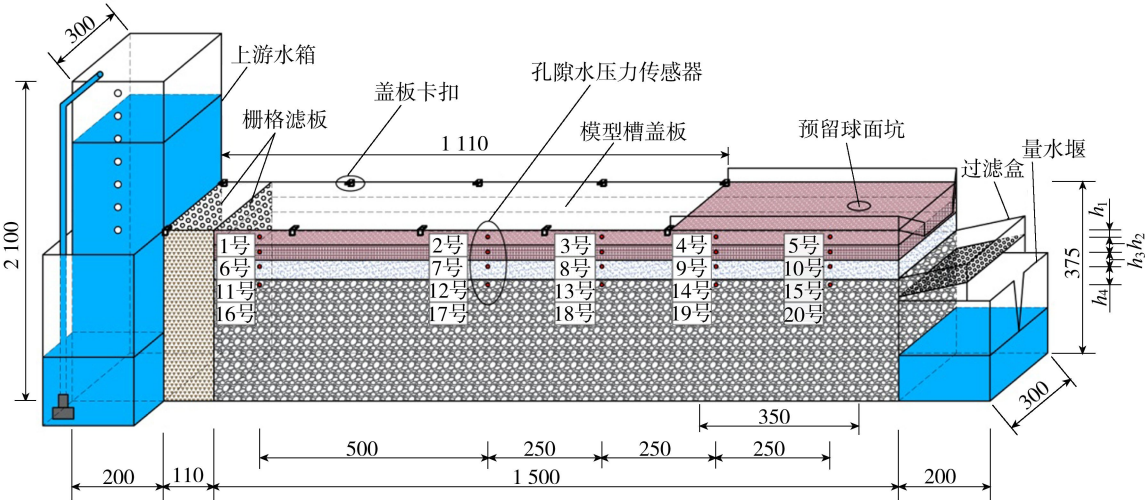


图 1 试验模型槽示意图(单位:mm)

拟河床切割砂层;下游段为管涌试验段,总长1.5 m,可根据设计工况填入不同性质的土料,用于模拟堤基土层,其侧边留有 20 个小孔,用于布置孔隙水压力传感器(共布置有 5 列,自上游至下游分别命名为左一側位(1 号、6 号、11 号、16 号传感器)、左二側位(2 号、7 号、12 号、17 号传感器)、左三側位(3 号、8 号、13 号、18 号传感器)、左四側位(4 号、9 号、14 号、19 号传感器)、左五側位(5 号、10 号、15 号、20 号传感器)),顶部紧靠上游设有总长1.1 m 的有机玻璃盖板,盖板两侧设有卡扣,填料完成后可将盖板与模型槽侧板固定连接,用于模拟不透水堤底;主模型槽下游区域顶端为敞开式自由边界。模型槽下游为尾水收集段,其上部为铺有过滤网的渗流逸出颗粒收集盒,用于过滤和收集试验尾水中的固体颗粒;下部为设有三角堰的水箱,用于计算渗流量。

1.2 试验材料

为模拟实际工程中的二元堤基结构,试验共用 4 种土料,自下而上分别为砂砾石、砂、壤土和黏土。砂砾石层由粒径 2 ~ 20 mm 的石子(其中粒径 5 ~ 10 mm 的石子占 81.87%)作为骨架颗粒,采用粒径小于 2 mm 的河砂作为填充颗粒。砂层采用粒径小于 1 mm 的河砂。壤土层采用砂壤土,其砂粒含量为 69.46%。黏土层采用粉质黏土。砂砾石、砂和壤土层的级配曲线见图 2,各土层的物理力学性质见表 1 和表 2。

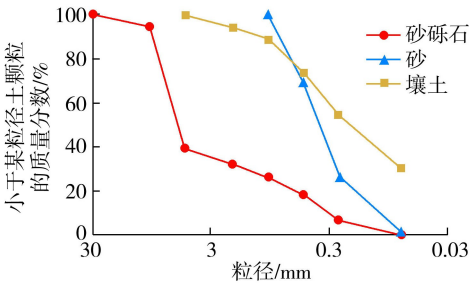


图 2 砂砾石、砂及壤土级配曲线

表 1 强透水层土料物理力学性质

土料	d_{60}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	不均匀系数	曲率系数
砂砾石	6.479	1.525	0.303	21.40	1.19
砂	0.429	0.265	0.114	3.77	1.44

土料	比重	干密度/ (g/cm^3)	孔隙率	渗透系数/ (cm/s)
砂砾石	2.65	1.90	0.281	4.18×10^{-1}
砂	2.62	1.62	0.378	6.31×10^{-3}

注: d_i 为粒径级配曲线上纵坐标为*i*%对应的粒径。

1.3 试验步骤

步骤 1 孔隙水压力传感器布设。在模型槽的右侧板预留孔上安装孔隙水压力传感器,传感器与预留孔间用玻璃胶密封,每层堤基土层自上游至

表 2 弱透水层土料物理力学性质

土料	$w_{11}/\%$	$w_{12}/\%$	塑限/ $\%$	塑性指数
壤土	26.17	30.53	16.39	9.78
黏土	33.76	38.37	22.90	10.86

土料	比重	干密度/ (g/cm^3)	孔隙率	渗透系数/ (cm/s)
壤土	2.66	1.51	0.427	1.84×10^{-4}
黏土	2.70	1.53	0.433	2.87×10^{-7}

注: w_{11} 和 w_{12} 分别为 10 mm 液限和 17 mm 液限。

下游各布置 5 枚,除砂砾石层中传感器布置在靠近砂层分层处外,其他层中布置在各土层的中部。详细布置及传感器编号如图 1 所示。

步骤 2 土料铺填。铺填方式为分层铺填密实,首先将自然风干的砂砾石称重后分层铺填至模型槽中,并按预设的孔隙率将铺填后的砂砾石进行压实。再将风干后的砂按预设的孔隙率一次性铺填并压实至设计高程。壤土和黏土在铺填前先将含水率分别提高至 12% 和 20%,然后再按照预设孔隙率进行铺填压实。在黏土层纵向轴线距离模型槽盖板 35 cm 处设置直径为 5 cm 的球面坑,坑底直达黏土层底部,以模拟实际工程中堤后上覆层薄弱区域。各组试验土层铺填厚度如表 3 所示。

表 3 各组试验土层铺填厚度及传感器埋深

试验 工况	土层厚度/cm				各层传感器埋深/cm			
	黏土层	壤土层	砂层	砂砾石层	h_1	h_2	h_3	h_4
1	3.3	3.3	4.2	26.7	1.5	5	8	14
2	3.3	6.7	4.2	23.3	1.5	8	12	19
3	3.3	0	4.2	30.0	1.5	5	12	19

步骤 3 饱和土料。向上游水箱内缓慢注水至与黏土层顶部齐平,使土样充分饱和。

步骤 4 确定初始上游水头。试验采用初始上游水头为 0.1 m,之后逐级提高水位。

步骤 5 开始试验。连续提升上游水位至初始水位,即 0.475 m(高于土样顶部 0.1 m),观察管涌口渗水情况,待渗出水流清澈后再逐级提高上游水头,每级水头提升 5 cm。

步骤 6 试验记录。记录各个渗流发展节点的时间。每隔约 1 min 读取一次渗流量。

步骤 7 结束试验。待集中渗漏通道形成后停止供水,观察并记录管涌通道横向发展情况后即可结束本组试验。

2 试验结果与分析

2.1 堤基管涌发展过程

根据模型试验观测,可将堤基管涌的发展分为表面裂缝发展、潜层破坏、上覆层破坏、管涌通道上溯、堤基破坏、堤防溃决 6 个阶段。

2.1.1 工况 1

a. 裂缝发展阶段(上游水位为 0.475 ~

<0.525 m)。该阶段堤后自由边界区域上覆层在渗流的顶托作用下逐渐向上隆起张拉产生表面裂缝,并逐步发展形成泡泉,渗水清澈(图3(a))。

b. 潜层破坏阶段(上游水位为 0.525 ~ <0.625 m)。该阶段堤后自由边界区域的泡泉进一步发展,发生渗水携砂现象,上部土层持续向上隆起导致砂层内形成层内通道,随后在砂层与砂砾石层交界处出现潜层砂沸(图3(b))。

c. 上覆层破坏阶段(上游水位为 0.625 ~ <0.725 m)。该阶段潜层砂沸不断向上发展形成贯穿砂层的竖向涌水通道,同时在预留球形坑下游边缘出现表面砂沸,砂层和壤土层的细颗粒随管涌口渗流涌出表面,堆积在坑周围呈围井状,多处裂缝和泡泉眼出现不同程度的涌水携砂形成管涌群(图3(c))。

d. 管涌通道上溯阶段(上游水位为 0.725 ~ <0.875 m)。该阶段表面砂沸口逐渐淤堵并形成新的管涌口,管涌群各出口涌水愈发剧烈,上覆黏土层隆起加剧,表面裂缝向堤基蔓延,并在堤脚出现泡泉(图3(d))。

e. 堤基破坏阶段(上游水位为 0.875 ~

<1.025 m)。该阶段潜层砂沸向上贯穿地表演变成表面砂沸,堤基出现横向裂缝且持续向两侧延伸,堤脚处土体大幅度隆起产生较大裂隙,大量浑水涌出(图3(e))。

f. 堤防溃决阶段(上游水位达到 1.025 m 后)。该阶段堤脚出现竖向管涌通道,堤脚下黏土层整体被掀起,涌水量巨大,同时堤基黏土层不断向上游坍塌直至堤基土层完全破坏,试验结束(图3(f))。

2.1.2 工况 2

a. 裂缝发展阶段(上游水位为 0.475 ~ <0.575 m)。该阶段堤后自由边界区域上覆层缓慢隆起形成表面裂缝和泡泉(图4(a))。

b. 潜层破坏阶段(上游水位为 0.575 ~ <0.625 m)。该阶段随着上部土层向上隆起而在砂层与壤土层间产生层间涌水通道,且迅速向上发展贯穿表面形成渗水携砂现象。失去上覆层约束的砂层产生潜层砂沸(图4(b))。

c. 上覆层破坏阶段(上游水位为 0.625 ~ <0.675 m)。该阶段管涌口涌水剧烈并产生表面砂沸,随着管涌通道的横向发展,管涌口也向相同的方向发展,即旧管涌口淤堵而沿管涌通道发展方向形

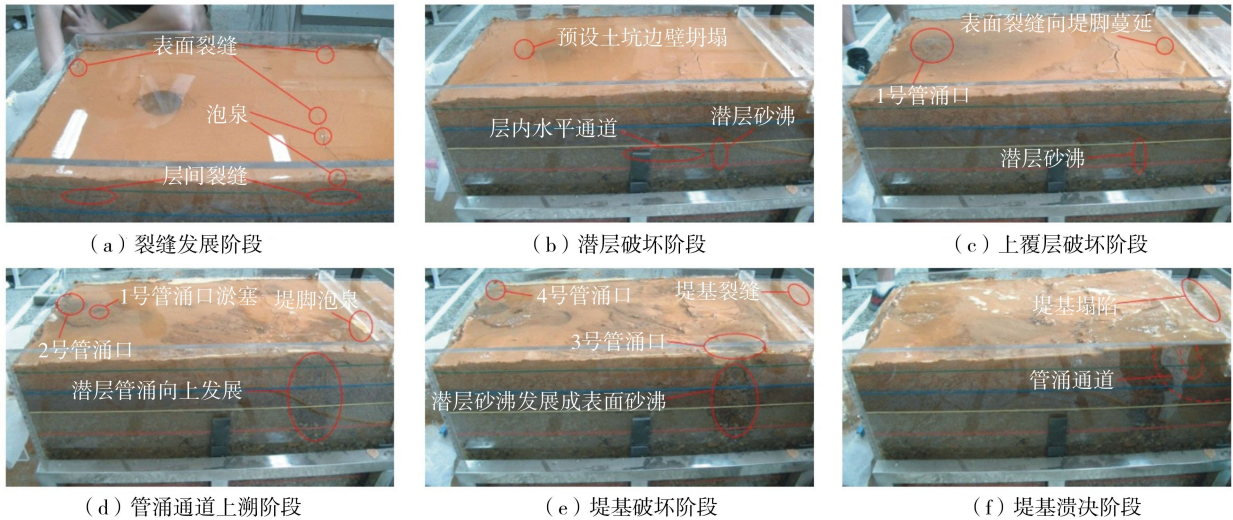


图3 工况 1 堤基管涌发展过程

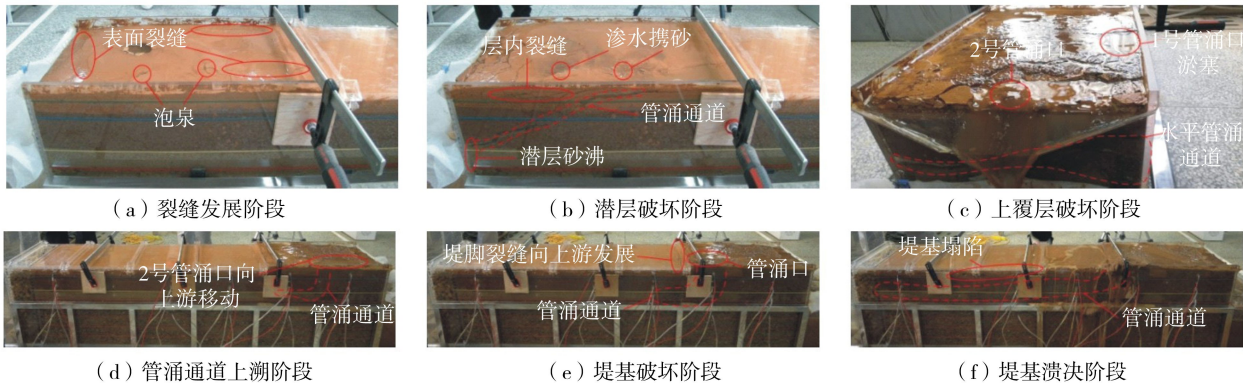


图4 工况 2 堤基管涌发展过程

成新的管涌口(图4(c))。

d. 管涌通道上溯阶段(上游水位为0.675~<0.925 m)。该阶段管涌通道开始向上游发展,且表面管涌口也随着通道的上溯而向上游移动(图4(d))。

e. 堤基破坏阶段(上游水位为0.925~<1.025 m)。该阶段随着管涌通道的上溯,堤脚黏土层不断开裂坍塌而形成巨大涌水出口,同时堤基产生裂缝并迅速拓宽延伸(图4(e))。

f. 堤基塌陷溃决阶段(上游水位达到1.025 m后)。该阶段管涌通道快速向上发展彻底贯通上下游,下游堤脚管涌口涌水呈喷射状,堤基黏土向下塌陷,试验结束(图4(f))。

2.1.3 工况3

该工况试验的堤基结构未设置壤土层,其管涌发展过程与堤基设置了壤土层的前两个工况的试验有所不同,堤脚和堤基的破坏时序提前了。

a. 裂缝发展阶段(上游水位为0.475~<0.575 m)。该阶段堤后自由边界区域上覆层隆起缓慢,先在堤脚处出现泡泉,随后黏土层被拉裂产生表面裂缝(图5(a))。

b. 潜层破坏阶段(上游水位为0.575~<0.725 m)。该阶段砂层内逐渐形成层内水平通道后产生潜层砂沸,细砂颗粒也开始被渗流带出表面(图5(b))。

c. 堤基破坏和管涌通道上溯阶段(上游水位为0.725~<0.825 m)。相较于前两个工况的试验,工况3的堤基破坏阶段和管涌通道上溯阶段同时发生,且先于上覆层破坏阶段。该阶段堤基开始产生裂缝,管涌通道开始向上游发展,并在堤脚砂层处形成了层内涌水通道(图5(c)(d))。

d. 上覆层破坏阶段(上游水位为0.825 m~<0.925 m)。潜层砂沸向上贯通发展成为表面砂沸,而管涌通道的上溯变得缓慢(图5(e))。

e. 堤基塌陷溃决阶段(上游水位为0.925 m~

<1.175 m)。该阶段随着上游水位不断提高,管涌通道继续向上游发展,堤脚处上覆层逐步失稳,导致堤基黏土层开始坍塌,在堤脚处形成较大的管涌出口,随后管涌通道持续上溯直至贯通(图5(f))。

2.2 潜层砂沸机理分析

根据多孔介质流体动力学理论^[32],饱和渗流场内的多孔介质除了受到重力 F_1 、浮托力 F_2 以外,还受到渗流力 F_3 的作用。 F_3 可表示为

$$F_3 = n\gamma_w J \tag{1}$$

式中: n 为土体的孔隙率; γ_w 为水的容重; J 为水力坡降。

李广信^[33]指出,渗流力不仅包括渗流在土体颗粒空隙中流动产生的切力,还应包括渗流对土体颗粒的推力,则渗流力应修正为

$$F_3 = \gamma_w J \tag{2}$$

则本试验中饱和渗流场内的土体在竖直方向受到的合力 F 为

$$F = \gamma_w J^* V - \sum_{i=1}^3 (\gamma_i - \gamma_w)(1 - n_i) V_i \tag{3}$$

式中: J^* 为砂砾石层以上土层的竖向平均坡降; V 为黏土层、壤土层、砂层的总体积; γ_i 、 n_i 、 V_i 分别为土层 i ($i = 1, 2, 3$,分别代表黏土、壤土和砂)的容重、孔隙率、体积。

当 $F=0$ 时,土体处于竖向稳定的临界状态;当 $F<0$ 时,土体竖向稳定;当 $F>0$ 时,土体竖向失稳。以工况2和工况3为例进行计算,达到竖向临界状态 $F=0$ 时, $J_{c2}^*=0.971$, $J_{c3}^*=0.980$ (J_{c2}^* 、 J_{c3}^* 分别为工况2、3 J^* 的临界值)。由图6可知,当黏土层出现局部水平层内裂缝时,左四和左五测位的 J^* 都已经非常接近其临界值 J_c^* ,可以确定在产生层内裂缝的部位其 J^* 大于 J_c^* ,而当 $J^* \geq J_c^*$ 后,造成了上部土层的竖向失稳,向上隆起明显,产生层间水平通道,为潜层砂沸的发生提供了必要的临空面。工况2中,层间裂缝发生后,随着管涌通道竖向贯穿表面—淤堵—贯穿表面的不断交替,渗透压力得以释放,

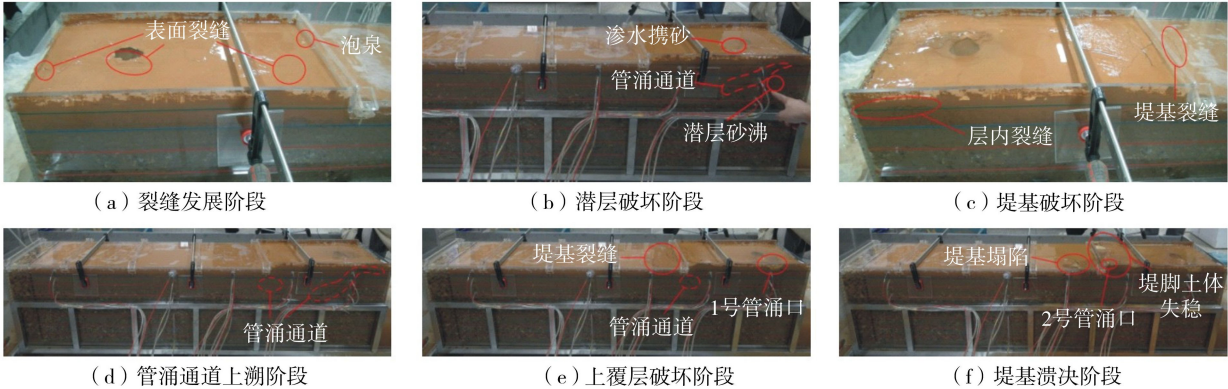


图5 工况3 堤基管涌发展过程

J^* 出现震荡下降的趋势(图 6(a))。当 $t>32\text{ min}$ 时左四测位 J^* 再次高于 J_c^* , 导致靠近堤脚部分土体的再次隆起, 并且随着管涌口的上移, 堤脚土体破坏, J^* 再次下降至低于 J_c^* 。工况 3 中, 层间裂缝发生后没有形成非常剧烈的涌水出口, J^* 呈缓慢上升趋势, 当 $t = 28.55\text{ min}$ 时发生表面砂沸, J^* 微弱下降, 而当 $t = 35.62\text{ min}$ 时发生堤脚土体失稳, 剧烈涌水后, 渗透压力得到释放, J^* 骤降(图 6(b))。经对比, 试验现象与理论计算结果较为吻合。

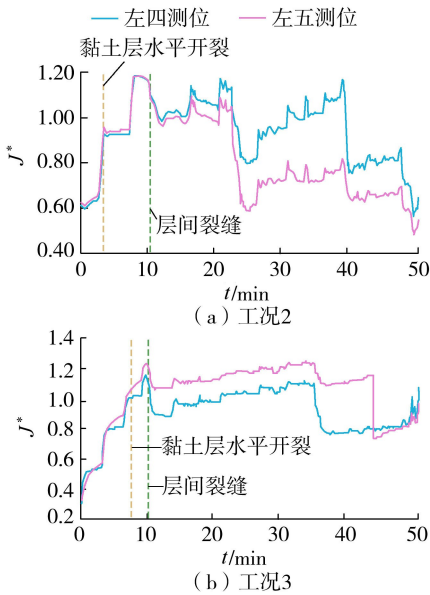


图 6 上部土层竖向平均坡降曲线

2.3 管涌临界水力条件分析

2.3.1 水平向水力坡降分析

不同工况下各管涌发展节点的水平向平均水力坡降如表 4 所示(正值表示坡降方向由上游指向下

表 4 不同工况下各管涌发展节点的水平向平均水力坡降

工况	管涌发展节点	上游水位/m	水平向平均水力坡降			
			黏土层	壤土层	砂层	砂砾石层
1	渗水携砂	0.525	0.098	0.101	0.095	0.081
	潜层砂沸	0.575	0.134	0.136	0.135	0.127
	表面砂沸	0.675	0.206	0.212	0.210	0.205
	堤脚出现泡泉	0.775	0.283	0.294	0.289	0.289
	堤基沉降开裂	1.025	0.465	0.479	0.479	0.475
	堤基溃决	1.025	0.465	0.481	0.481	0.494
2	渗水携砂	0.575	0.120	0.085	0.175	0.036
	潜层砂沸	0.575	0.120	0.085	0.175	0.037
	表面砂沸	0.575	0.123	0.091	0.184	0.048
	堤脚出现泡泉	0.875	0.324	0.324	0.417	0.289
	堤基沉降开裂	1.025	0.435	0.436	0.533	0.412
	堤基溃决	1.075	0.472	0.472	0.576	0.465
3	堤脚出现泡泉	0.525	0.099		0.169	0.067
	渗水携砂	0.625	0.162		0.242	0.123
	潜层砂沸	0.625	0.166		0.243	0.125
	堤基沉降开裂	0.725	0.251		0.310	0.202
	表面砂沸	0.825	0.324		0.413	0.268
	堤基溃决	1.175	0.577		0.687	0.537

游), 其中渗水携砂是发生管涌的标志, 堤脚出现泡泉、堤基沉降开裂是标志堤基发生破坏的关键节点。

对比工况 1 和工况 3 可知, 在堤基设置壤土层后管涌发生时的临界上游水位以及砂层的临界水平坡降都有明显下降。其中临界上游水位的下降是由于堤基未设置壤土层时, 渗流能够通过渗透性更强的砂层从预留球形坑中排出地面, 使得堤基中竖向渗透压力更容易释放所致; 而临界水平坡降的下降, 除受相应节点上游水位降低的因素影响外, 主要是由于壤土层的存在分担了一部分水平方向渗透压力所致。这两组数据的对比在试验过程中表现为设置了壤土层的堤基的堤后自由边界区域更易发生管涌破坏, 且破坏现象更为剧烈, 这也导致了壤土层和砂层内渗透压力的释放, 使设置了壤土层后堤基发生破坏的临界上游水位和砂层的临界水平坡降均有大幅提高。

对比设置了壤土层的工况 1 和工况 2 可以发现, 增加壤土层厚度前, 壤土层和砂层的水平坡降较为接近, 而增加壤土层厚度后, 砂层的水平坡降比壤土层高出约 0.1, 且比工况 1 砂层水平坡降高出 0.04~0.12, 说明增加壤土层的厚度可以提高砂层水平方向的临界坡降, 并使水平方向的侵蚀更加集中于砂层中。增加壤土层厚度后, 堤基发生破坏的临界上游水位和砂层的临界水平坡降明显提高, 说明壤土层厚度的增加对管涌通道的上溯有延缓作用。

2.3.2 竖向水力坡降分析

不同工况下壤土层和砂层各管涌发展节点的竖向平均水力坡降如表 5 所示(正值表示坡降方向由土层底部指向表面)。工况 1 和工况 2 各管涌发展节点的壤土层竖向平均坡降基本为负值, 这是由于发生管涌后, 竖向管涌通道由地表贯通至砂层, 壤土层内的渗流涌向渗透性更强的砂层所致; 工况 2 壤土层竖向平均坡降的绝对值明显高于工况 1, 说明增加壤土层厚度会导致渗流向砂层集中, 使堤基内部的渗透压力集中由砂层承担。

对比工况 1 和工况 3 砂层的竖向平均坡降可知, 设置壤土层的堤基发生管涌时砂层的临界竖向平均坡降略微下降, 但壤土层的存在可大幅提高堤基发生破坏时砂层的临界竖向平均坡降。对比工况 1 和工况 2 砂层的竖向平均坡降可知, 增加壤土层厚度致使发生管涌和堤基发生破坏时砂层的临界竖向平均坡降均大幅提高。因此, 结合前文水平向水力坡降和各发展节点临界上游水位的分析以及试验现象观测可知, 壤土层的存在可以提高堤基发生破坏的临界水力条件, 对堤防具有保护作用。

表 5 不同工况下各管涌发展节点的竖向平均水力坡降

工况	管涌发展节点	上游水位/m	竖向平均水力坡降	
			壤土层	砂层
1	渗水携砂	0.525	-0.044	0.104
	潜层砂沸	0.575	-0.075	0.086
	表面砂沸	0.675	-0.050	0.102
	堤脚出现泡泉	0.775	-0.056	0.145
	堤基沉降开裂	1.025	0.041	0.231
	堤基溃决	1.025	-0.176	0.102
2	渗水携砂	0.575	-0.175	0.204
	潜层砂沸	0.575	-0.181	0.200
	表面砂沸	0.575	-0.183	0.172
	堤脚出现泡泉	0.875	-0.365	0.183
	堤基沉降开裂	1.025	-0.474	0.145
	堤基溃决	1.075	-0.563	0.185
3	堤脚出现泡泉	0.525		0.032
	渗水携砂	0.625		0.127
	潜层砂沸	0.625		0.123
	堤基沉降开裂	0.725		0.170
	表面砂沸	0.825		0.251
	堤基溃决	1.175		0.086

2.4 管涌通道发展分析

根据 3 个工况试验结果可以看出,管涌通道的发展大致分为以下 3 个阶段:

a. 横向发展阶段:主要为管涌通道发展至左五测位前的阶段。工况 1 和工况 2 在这一阶段表现为管涌通道发生在堤后区域的砂层,上溯发展缓慢且以水平横向发展为主,伴有潜层砂沸发生,并在上覆层薄弱处向上竖向贯通击穿表土形成表面砂沸。这是因为局部水平坡降低于层内竖向坡降(图 7,图中 A、B、C、D、E 代表管涌通道发展到的断面位置,分别为左五测位、左四测位、左三测位、左二测位、左一测位)。而工况 3 在这一阶段局部水平和层内竖向坡降较为接近,其通道的横向发展现象并不明显。

b. 缓慢上溯阶段:主要为管涌通道从左五测位发展至左四测位的阶段。进入这一阶段,局部水平坡降开始高于层内坡降(图 7),这也导致了管涌通道开始纵向上溯,但发展缓慢,从左五测位发展至左四测位过程中要经历较长的相对稳定期,这是由于堤后区域没有上部堤防的约束,使得土层内的渗透压力能够通过竖向通道释放所致。

c. 快速上溯阶段:主要为管涌通道从左四测位向上发展直至贯通上下游的阶段。当管涌通道发展至堤基底部后,由于堤防的制约,表面管涌口随下部管涌通道发展至堤脚后无法继续上移,导致通道内的渗透压力难以竖向释放,通道顶端承受了几乎所有的渗透压力,并且随着通道与上游间距不断减小而使径径迅速减小,通道上溯速度快速增长。由于各个工况试验上游水位提升速度不同,各级水位持续时间不同,因此在进行管涌通道上溯速度的对比

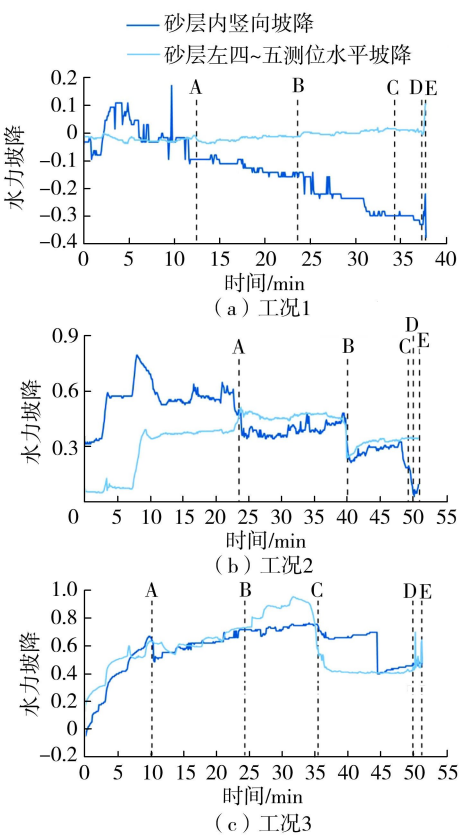


图 7 左五测位砂层层内竖向和水平坡降

时需要消除水位上升的影响,按式(4)计算后得到 3 个工况试验管涌通道上溯平均速率随时间变化曲线(图 8)。由图 8 可知,工况 1 和工况 2 的管涌通道发展表现为进入堤基后加速向上贯通,这与前述提到的受堤防约束导致竖向渗透压力难以释放相吻合;相较于工况 1,工况 2 的管涌通道从开始上溯至发展进入堤基区域的时间间隔更长,说明增加壤土层厚度能够延缓管涌通道的上溯。而未设置壤土层的工况 3 的管涌通道在进入堤基后还经历了一个相对稳定的阶段,并未快速向上发展,这是由于没有壤土层的束缚,砂层内的渗流能够更顺畅地排出地面所致。

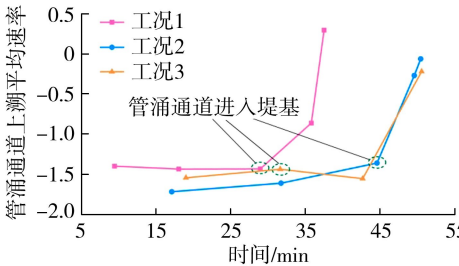


图 8 消除水位上升影响的管涌通道上溯平均速率

$$v^* = \lg [\bar{v}_i(1 + \bar{v}_{us})^{-1}] \tag{4}$$

式中: v^* 为消除上游水位上升影响的管涌通道上溯平均速率; $\bar{v}_i$ 为管涌通道上溯平均速度; $\bar{v}_{us}$ 为上游水位上升平均速度。

通过对比堤基内形成的管涌通道(图 9 和表 6)

可知,3 种工况下所形成的通道形状较为相似,呈现出两边宽、中间窄、上游深、下游浅的形状,通道位置均处于易侵蚀土层(壤土层和砂层)内且均靠近布设了传感器的模型槽边壁侧,这是由于传感器表面与土体接触面阻力较小而存在局部薄弱区域所致。对比堤基管涌通道的体积可知,工况 3 明显低于工况 1 和工况 2,这是由于管涌侵蚀的主要为砂层和壤土层,工况 3 的可侵蚀层厚度小于工况 1 和工况 2。

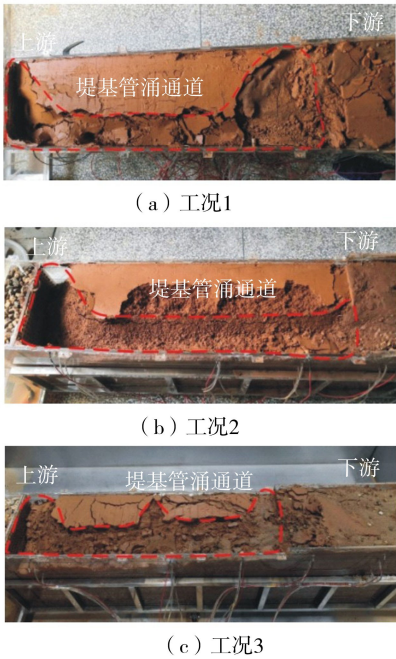


图 9 管涌通道示意图

表 6 管涌通道侵蚀范围

工况	宽度/cm			深度/cm			体积/cm ³
	上游	中部	下游	上游	中部	下游	
1	30	10.0	30	13.0	7	3.3	11 529.6
2	30	13.0	30	16.5	6	4.0	11 403.5
3	30	26.5	30	12.3	7	3.4	9 294.2

2.5 渗流量增长率分析

对比 3 个工况试验渗流量增长率(图 10)发现,未设置壤土层的工况 3 渗流量增长率明显低于其他两个工况,且长期维持在较低水平,至堤脚土体整体

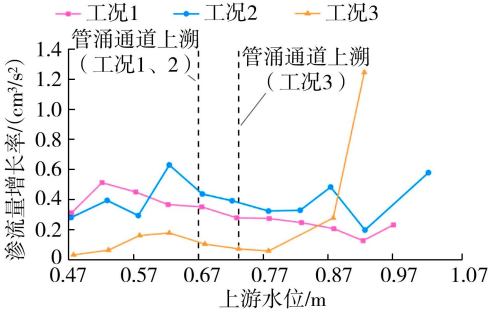


图 10 渗流量增长率对比图

失稳形成巨大涌水通道后才急速上升。这与第 2.3 节所述未设置壤土层时砂层内渗透压力更易释放,堤后自由边界区域破坏较小相吻合。

设置了壤土层的两个工况在管涌发展初期,管涌通道以横向发展和竖向贯通为主,增加壤土层厚度提高了整体的竖向抗侵蚀性,并对管涌初期渗流量增长有明显的抑制作用。而在管涌通道上溯阶段前后,工况 2 的渗流量增长率开始超过工况 1,这是由于工况 2 的可侵蚀层(砂层、壤土层)的厚度更大所致($d_{e2}=10\text{ cm}$, $d_{e1}=6.6\text{ cm}$, 其中 d_{e1} 、 d_{e2} 分别为工况 1、2 的可侵蚀层厚度),说明在二元堤基结构管涌中,壤土层厚度的增加可以延缓管涌通道的上溯;但管涌通道进入上溯阶段后,在较大的水平方向水力坡降作用下,较厚的可侵蚀层有利于管涌通道的拓展,致使管涌通道上溯速度加快。

3 结 论

a. 上覆土层在渗流的顶托作用下向上隆起并在堤基内部产生层间水平通道,导致发生潜层砂沸,最终向上发展为表面砂沸的渗透破坏。二元堤基结构管涌发展可分为裂缝发展、潜层破坏、上覆层破坏、管涌通道上溯、堤基破坏和堤基溃决 6 个发展阶段。

b. 堤基管涌是从上部土体在渗流的作用下被顶起,并在堤基土层内部出现水平管涌通道进而形成潜层砂沸开始的,而表面砂沸则是由潜层砂沸发展而来。土层内竖向坡降的变化是造成潜层砂沸的主要因素,竖向坡降所引起的渗流力大于土体的浮容重时会引发上部土体的失稳,为潜层砂沸创造条件。在渗透性自上而下逐层增大的二元堤基结构中,发生上部土体失稳的临界竖向坡降值处于 0.9~1 之间。

c. 堤基中的壤土层虽会一定程度增加堤后自由边界区域管涌群的发展速度,但壤土层的存在可以延缓管涌通道的上溯,使管涌发展前期的渗透破坏集中在堤后自由边界区域,对堤基具有保护作用,并为堤基管涌的应急抢险提供更为充裕的时间。

参考文献:

[1] 王肖鑫,岑威钧,晏成明,等. 基于改进赋权的山区堤防安全云模型评价方法[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5): 58-63. (WANG Xiaoxin, CEN Weijun, YAN Chengming, et al. Cloud model evaluation method of levee safety in mountain area based on improved weighting [J]. Advances in Science and Technology of Water

- Resources,2022,42(5):58-63. (in Chinese))
- [2] 包承纲,唐燕燕. 长江堤防加固工程中的一些技术问题[J]. 水利水电科技进展,2004,24(2):41-43. (BAO Chenggang, TANG Yanyan. Some technical problems in Yangtze River embankment reinforcement project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004,24(2): 41-43. (in Chinese))
- [3] 骆辛磊. 堤防险情严重程度划分与识别方法探讨[J]. 水利水电科技进展,2003,23(2):21-24. (LUO Xinlei. Discussion on the classification and identification method of dike danger severity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(2): 21-24. (in Chinese))
- [4] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6): 117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(6):117-122. (in Chinese))
- [5] 黄中发,黄浩智,蒋水华,等. 堤防工程系统风险因子量化及风险评价[J]. 自然灾害学报,2018, 27(4): 171-177. (HUANG Zhongfa, HUANG Haozhi, JIANG Shuihua, et al. Quantification of risk factors and risk assessment for levee engineering system [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27 (4): 171-177. (in Chinese))
- [6] 陈亮,滕耀宗,蔡国栋,等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):82-88. (CHEN Liang, TENG Yaozong, CAI Guodong, et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(5):82-88. (in Chinese))
- [7] 刘胜,王媛,冯迪. 堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):10-16. (LIU Sheng, WANG Yuan, FENG Di. Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):10-16. (in Chinese))
- [8] 罗玉龙,速宝玉,盛金昌,等. 对管涌机理的新认识[J]. 岩土工程学报,2011, 33(12): 1895-1902. (LUO Yulong, SU Baoyu, SHENG Jinchang, et al. New understandings on piping mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011, 33(12): 1895-1902. (in Chinese))
- [9] 罗玉龙,张兴杰,张海彬,等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学,2022, 43(11): 3094-3106. (LUO Yulong, ZHANG Xingjie, ZHANG Haibin, et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3094-3106. (in Chinese))
- [10] 王霜,陈建生,钟启明. 多层堤基结构管涌动态发展的数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):39-45. (WANG Shuang, CHEN Jiansheng, ZHONG Qiming. Numerical study on dynamic development process of piping in multi-stratum dike foundations[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6):39-45. (in Chinese))
- [11] 明攀,耿晓明,陆俊,等. 基于声发射监测的堤防管涌试验[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):33-38. (MING Pan, GENG Xiaoming, LU Jun, et al. Experimental study on monitoring embankment piping based on acoustic emission technology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):33-38. (in Chinese))
- [12] 刘昌军,丁留谦,孙东亚,等. 单层堤基管涌侵蚀过程的模型试验及数值分析[J]. 土木工程学报,2012, 45(8): 140-147. (LIU Changjun, DING Liuqian, SUN Dongya, et al. Model test and numerical analysis of piping erosion process in single-stratum dike foundations [J]. China Civil Engineering Journal. 2012, 45(8): 140-147. (in Chinese))
- [13] 姚志雄,周健,张刚,等. 颗粒级配对管涌发展的影响试验研究[J]. 水利学报,2016, 47(2): 200-208. (YAO Zhixiong, ZHOU Jian, ZHANG Gang, et al. Experimental study of particle grading impact on piping mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 200-208. (in Chinese))
- [14] ROBBINS B A, STEPHENS I J, LEAVELL D A, et al. Laboratory piping tests on fine gravel [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(11): 1552-1563.
- [15] ROBBINS B A, VAN BEEK V M, LÓPEZ-SOTO J F, et al. A novel laboratory test for backward erosion piping [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2018, 18(5): 266-279.
- [16] 倪小东,左翔宇,孙达明,等. 堤基侵蚀型管涌的砂槽试验研究[J]. 工程科学与技术,2018, 50(2): 24-31. (NI Xiaodong, ZUO Xiangyu, SUN Daming, et al. Study on the piping erosion in levee foundation by sand box model test [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(2): 24-31. (in Chinese))
- [17] VANDENBOER K, CELETTE F, BEZUIJEN A. The effect of sudden critical and supercritical hydraulic loads on backward erosion piping: small-scale experiments[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 783-794.
- [18] 毛昶熙,段祥宝,蔡金傍,等. 堤基渗流无害管涌试验研究[J]. 水利学报,2004,35(11): 46-53. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al.

- Experimental study on harmless seepage piping in levee foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35 (11): 46-53. (in Chinese))
- [19] 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 Guangxin, ZHOU Xiaojie. 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))
- [20] 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 Dingsong, CUI Yihao. Failure mechanism of seepage in levees with double-layer foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1211-1220. (in Chinese))
- [21] 梁越, 陈建生, 陈亮, 等. 双层堤基上覆层对堤基渗透破坏影响的试验[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(6): 15-19. (LIANG Yue, CHEN Jiansheng, CHEN Liang, et al. Effect of superstratum on seepage failure in two-stratum dike foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(6): 15-19. (in Chinese))
- [22] WANG S, CHEN J, HE H, 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.
- [23] 贾恺, 汤连生, 曹洪, 等. 基于尖端坡降变化的双层堤基渗透破坏通道上溯研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 81-84. (JIA Kai, TANG Liansheng, CAO Hong, et al. Upstream movement of piping channel of double-layer dike foundation based on tip hydraulic gradient [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2019, 41(Sup1): 81-84. (in Chinese))
- [24] 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. (DING Liuqian, YAO Qiuling, SUN Dongya, et al. Experimental studies on piping development in three-stratum dike foundations [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(2): 19-22. (in Chinese))
- [25] 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. (CHEN Jiansheng, YUAN Kelong, WANG Shuang, et al. Experimental research on piping development considering buried depth of fine sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 653-659. (in Chinese))
- [26] 王霜, 陈建生, 黄德文, 等. 土层结构对管涌发展影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2334-2341. (WANG Shuang, CHEN Jiansheng, HUANG Dewen, et al. Experimental study on piping development considering effect of foundation structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2334-2341. (in Chinese))
- [27] 王霜, 陈建生, 周鹏. 三层堤基中细砂层厚度对管涌影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2847-2854. (WANG Shuang, CHEN Jiansheng, ZHOU Peng. Effect of thickness of fine sand layer on piping development in three-stratum dike foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2847-2854. (in Chinese))
- [28] 沈细中, 兰雁, 赵寿刚, 等. 黄河标准化堤防工程淤背的合理设计宽度[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(10): 197-201. (SHEN Xizhong, LAN Yan, ZHAO Shougang, et al. Reasonable design width of the back of silt area in the standardization dike project of Yellow River [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 197-201. (in Chinese))
- [29] 赖跃强, 吴浩, 罗国庆. 九江市长江堤防地基处理[J]. 湖北水力发电, 2001(1): 20-22. (LAI Yueqiang, WU Hao, LUO Guoqing. Treatment of Yangtze River embankment foundation in Jiujiang City [J]. Hubei Water Power, 2001(1): 20-22. (in Chinese))
- [30] 邹爱清, 吴志广, 尹健民, 等. 钻孔压浆成墙法用于鄱阳湖区圩堤防渗墙施工[J]. 人民长江, 2001, 32(5): 15-16. (WU Aiqing, WU Zhiguang, YIN Jianmin, et al. Construction of dike cutoff wall in Poyang Lake District by drilling grouting method [J]. Yangtze River, 2001, 32(5): 15-16. (in Chinese))
- [31] 陆付民, 李建林, 郭永成. 荆南长江干堤堤基防渗加固措施[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 37-39. (LU Fumin, LI Jianlin, GUO Yongcheng, et al. Measures for seepage control and reinforcement of Jinnan dike foundation on Yangtze River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(2): 37-39. (in Chinese))
- [32] BEAR Jacob. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: American Elsevier Publishing Company, 1972.
- [33] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1522-1528. (LI Guangxin. On soil skeleton and seepage force [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1522-1528. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-01-20 编辑: 雷燕)