

堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟

刘 胜¹,王 媛¹,冯 迪²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:采用数值模拟方法研究了管涌发生后堤防渗流场响应特征,探究了堤防不同深度和不同水平位置处的孔隙水压力变化规律,分析了管涌位置和管涌通道尺寸对堤防孔隙水压力变化的影响,提出了基于孔隙水压力变化特征快速识别堤防管涌险情的思路,得到了可用于堤防管涌监测的孔隙水压力测量设备合理布设区域。结果表明:管涌发生后,堤防不同位置处的孔隙水压力均出现一定程度的降低,管涌通道底部及其上部1m深度范围内孔隙水压力有较大幅度的降低,可作为监测管涌发生的孔隙水压力测量设备埋设深度范围;管涌发生后,同一水平面上与管涌通道距离相同的位置孔隙水压力变化基本一致;管涌通道与堤脚的距离越远,管涌发生后管涌通道周边位置孔隙水压力降低值和降低率越小;随着管涌通道直径的增大,管涌发生后管涌通道周边位置孔隙水压力降低值和降低率显著增大。

关键词:堤防;管涌;渗流场;孔隙水压力

中图分类号:TV223.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)06-0010-07

Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping //LIU Sheng¹, WANG Yuan¹, FENG Di² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The seepage field of embankment after piping was calculated by numerical simulation, and the variation law of pore water pressure at different depths and horizontal positions in the embankment was studied. The influence of piping locations and piping channel sizes on pore water pressure after piping was analyzed, and the idea of rapid identification of embankment piping based on the variation characteristics of pore water pressure was put forward. The reasonable layout area of measuring equipment of pore water pressure for embankment piping monitoring was obtained. The results show that after piping, the pore water pressure at different positions of the embankment decreases to a certain extent. The pore water pressure at the bottom of the piping channel and within a range of 1m above decreases greatly, which can be used as the buried depth range for pore pressure measuring equipment used for monitoring the occurrence of piping. After the occurrence of piping, the changes in pore water pressure at the same distance from the piping channel on the same horizontal plane are basically identical. The longer the distance between the piping channel and the embankment foot, the smaller the reduction value and reduction percentage of pore water pressure around the piping channel. With the increase of the diameter of the piping channel, the reduction value and percentage of pore water pressure around the piping channel increase significantly after piping.

Key words: embankment; piping; seepage field; pore water pressure

堤防工程是我国防洪体系的重要基础,在保护沿岸人民生命财产安全方面起到了重要作用。管涌作为一种主要的堤防渗透破坏形式,严重威胁堤防的安全运行。狭义的管涌是指在渗流作用下土体中的细土粒在粗土粒形成的孔隙通道中发生移动并被带出的现象^[1]。工程中常将堤防背水侧地面被其

下承压水顶穿形成孔洞冒水涌沙的现象称为管涌^[2],为了说明方便,本文中的管涌指工程中堤防冒水涌沙的渗透破坏行为。

国内外学者针对堤防管涌开展了大量的研究^[3]。例如,刘洪辰等^[4]采用管涌砂槽模型试验研究了覆盖层及其与砂层接触面特性对堤基管涌发生

基金项目:国家自然科学基金项目(U2240210,52179100);江苏省水利科技项目(2021075);江苏省卓越博士后计划项目(2022ZB182)
作者简介:刘胜(1994—),男,助理研究员,博士,主要从事岩土渗流破坏与控制研究。E-mail:liusheng3131@163.com
通信作者:王媛(1969—),女,教授,博士,主要从事岩土渗流破坏与控制研究。E-mail:wangyuanhhu@163.com

发展的影响;倪小东等^[5]基于透明土技术与颗粒流方法联合开展了管涌细观机理的研究;Akrami 等^[6]研究了粗砂屏障对管涌发生发展机理的影响。目前对堤防管涌的研究主要关注管涌发生发展的机理,对管涌发生前后堤防渗流场变化的研究较少。管涌发生后周围土体的渗流场会发生相应变化^[7-8],研究管涌发生后孔隙水压力(简称孔压)的响应特征,对于进一步认识管涌机理和监测识别管涌险情具有重要意义。

管涌险情的识别和预测对防汛抢险至关重要。明攀等^[9]研究了管涌发生过程中声发射信号的变化规律,发现在管涌发生时声发射信号参数存在明显的特征变化,可据此对管涌进行预报;Bersan 等^[10]研究了光纤分布式温度传感器在堤防管涌监测中的应用。一些学者研究了基于红外热成像技术的堤坝渗漏险情探测方法^[11],但这些方法大多处于研究阶段。目前汛期堤防管涌险情的巡查主要靠人海战术,不仅消耗大量人力,而且效率较低。研究基于孔压响应特征的管涌监测方法,对于快速识别管涌险情、提升抢险效率具有重要意义。

为了减小室内试验带来的尺寸效应,本文采用数值模拟方法研究管涌发生后堤防的渗流场响应特征,研究管涌发生后堤防不同深度和水平位置处的孔压变化规律,分析管涌位置和管涌通道尺寸对管涌发生后堤防孔压变化的影响,以期提出基于孔压变化特征快速识别堤防管涌险情的思路,得到可用于堤防管涌监测的孔压测量设备合理布设区域。文中将堤基内形成竖向管涌通道后的堤防渗流场作为管涌发生后的渗流场。

1 模拟方法

对堤防发生管涌后的渗流场计算已有了大量的研究。张健等^[12-13]将管涌通道看作完整井或非完整井,推导管涌发生后的堤防渗流场理论公式,这些理论公式使用方便,但适用性有限,无法考虑复杂的地质条件和堤身结构对渗流场的影响。王霜等^[14-15]将管涌通道的渗透系数进行放大,在整个计算区域采用达西渗流理论计算堤防的渗流场,这种方法操作简单,但是管涌通道渗透系数的科学确定比较困难。王大宇等^[16]在管涌通道区域采用管流理论,在其他区域采用达西渗流理论计算,管流和达西渗流区域公共边界上水头相等、流量大小相等且方向相反,这种计算方法更加精确,但是需要耦合计算,计算代价较大。

管涌发生后,由于与地表连通的竖直管涌通道内水流流速较小,为兼顾计算效率和精度,本文不考

虑管涌发生后竖直管涌通道内的水头损失,以地面为零位置水头面,管涌通道边界的总水头为零,删除管涌通道内的介质,其余区域采用达西渗流理论计算堤防的渗流场。

1.1 方法验证

以王霜等^[17-18]的管涌模型槽试验为参考进行数值模拟,验证所提出模拟方法的合理性。数值模拟中模型参数的选取参考文献^[17-18],数值计算模型如图 1 所示,模型长 73 cm,宽、高均为 30 cm。模型顶部为厚 5 cm 的黏土层,渗透系数为 5.0×10^{-6} m/s,下部为砂土层,渗透系数为 8.7×10^{-5} m/s。模型左侧为进水室,以模型顶面为零位置水头面,模型左侧的总水头为 23.4 cm。模型顶面预设一管涌通道,管涌通道直径和深度均为 5 cm,管涌通道中心与模型右侧边界的距离为 20 cm。模型中设置 7 个测压点,测压点与模型顶面和侧边间的距离均为 10 cm。模型左侧设置为总水头为 23.4 cm 的边界条件,管涌通道边界设置为总水头为 0 的边界条件,其余边界均为不透水边界,进行稳态达西渗流计算。

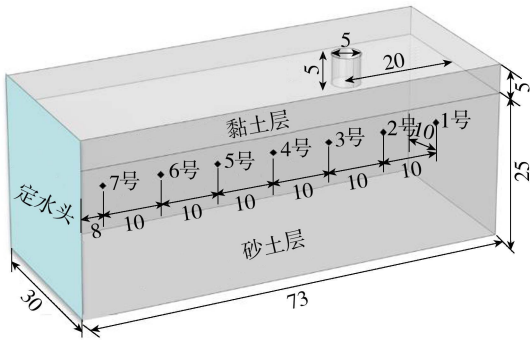


图 1 数值计算模型(单位:cm)

不同测压点处总水头的试验值和数值解如表 1 所示。由表 1 可知,测压点处总水头的试验值和数值解基本一致,仅在 4 号测压点处两者有一定偏差,在该测压点处总水头的数值解比试验值低 5.7%,仍在可接受的范围内,因此本文中采用的数值模拟方法在管涌发生后的堤防渗流场的模拟上是可行的。

表 1 测压点处总水头的试验值和数值解

测压点编号	总水头试验值/cm	总水头数值解/cm	数值解与试验值相对偏差/%
2	11.471	11.013	-4.0
4	15.857	14.956	-5.7
5	17.260	17.304	0.3
6	19.190	19.507	1.7
7	21.646	21.673	0.1

1.2 模型设置

为减小尺寸效应给渗流场计算带来的影响,建立场地尺度的堤防数值模型,如图 2 所示。选用典

型的二元堤基堤防结构,具体尺寸参考 GB 5028—2013《堤防工程设计规范》和文献[19],堤顶宽 6 m,堤身高 8 m,堤身迎水坡和背水坡的坡度均为 1 : 3,堤基长 320 m、宽 100 m,背水坡堤基长度为 4 倍的堤身底部宽度。覆盖层厚 3 m,渗透系数为 3.0×10^{-6} m/s,下卧层厚 25 m,渗透系数为 3.0×10^{-4} m/s。在堤脚附近管涌口位置设置竖向管涌通道,管涌通道位于模型宽度的中间位置。

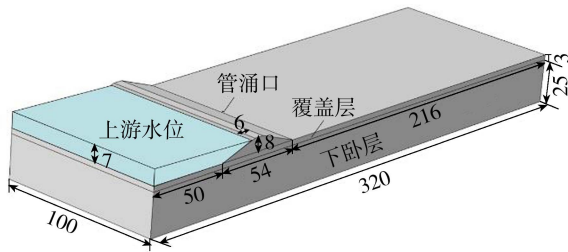


图2 堤防场地尺度数值模型(单位:m)

渗流场计算中边界条件的设置如下:以堤基表面为零位置水头面,将堤防迎水坡和迎水坡侧堤基顶面设置为总水头为 7 m 的边界条件,模拟设计洪水位的情况,将堤防背水坡侧堤基顶面和管涌通道边界设置为总水头为 0 的边界条件,将堤防背水坡设置为自由溢出边界,其余边界设置为不透水边界。将管涌通道周边位置网格进行加密,计算管涌发生后堤防稳定渗流场。上覆黏土层被承压水顶穿后渗流场是一个非稳定渗流的过程,最终趋于稳定,本文采用稳定渗流分析,模拟的是上覆黏土层被承压水顶穿后渗流场稳定的工况。

2 结果与分析

分别计算堤防发生管涌前后的渗流场,分析堤防不同位置处孔压的变化规律。为了解管涌通道周

围不同位置处孔压的响应规律,以堤防的截面 A 和截面 B(图 3(a)(b))为代表(截面 A 为通过管涌通道中心的轴向截面,截面 B 为通过管涌通道中心的横向截面),分析不同位置处的孔压变化规律。截面 A 上设置测线 I 和测线 II 两条水平测线(图 3(c))。截面 B 上设置 4 条测线(图 3(d)),测线 III 和测线 IV 为竖向直线,测线 V 和测线 VI 为水平直线。

2.1 管涌发生后不同深度处孔压变化规律

管涌通道直径设置为 1 m,深度设置为 3 m,完全贯通覆盖层,管涌通道边缘与堤脚的距离设置为 1 m,计算该工况下堤防的渗流场。选用截面 B 上的两条竖向直线为测线,测线 III 通过管涌通道中心,测线 IV 位于管涌通道右侧,距管涌通道右边缘 1 m。管涌发生后两条测线上不同深度处孔压变化情况如图 4 所示。管涌发生后,堤防不同位置处的孔压均出现一定程度的降低。在测线 III 上,随着测点深度的增加,孔压降低值不断减小,且减小幅度逐渐降低。越靠近管涌通道底部,孔压降低值越大,管涌发生后管涌通道底部孔压降低了 2.199 m,降低 42.3%;孔压降低率(指管涌发生后的孔压相对于没有发生管涌时孔压降低的百分比)变化规律与孔压降低值变化规律相似。

在测线 IV 上,随着测点深度的增大,孔压降低值先增大后减小,管涌通道底部上侧 1 m 处(距离地表 2 m)孔压降低值最大,为 0.557 m,降低 16.1%。管涌通道底部对应的深度处(距离地表 3 m)孔压降低 0.538 m,降低 10.4%。随着测点深度的增大,孔压降低率逐渐减小。相同深度处测线 III 上测点的孔压降低值大于测线 IV,两条测线上管涌通道底部以下

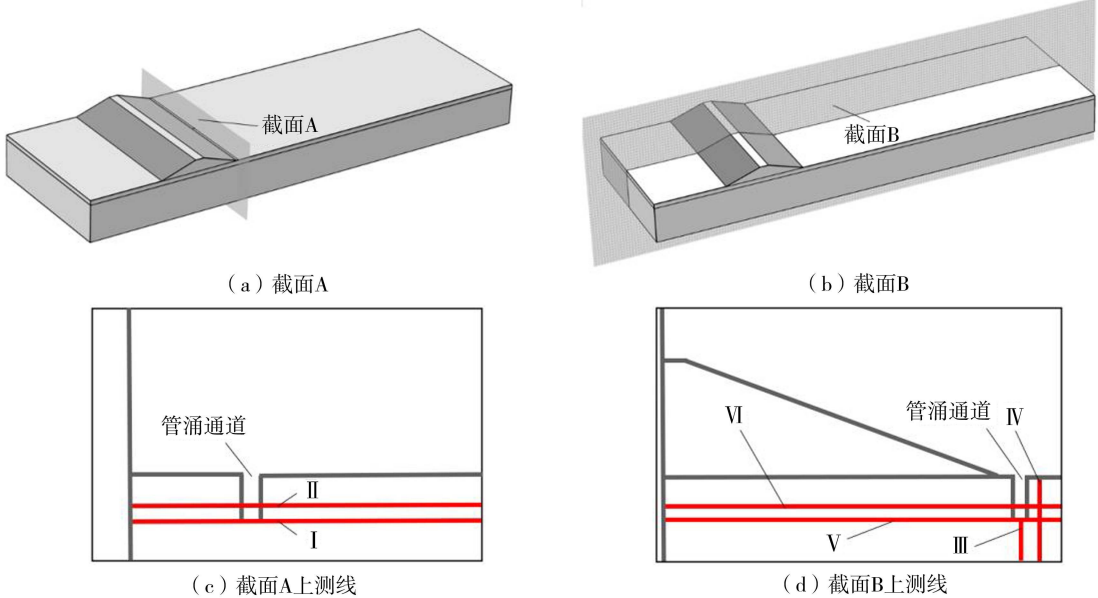


图3 堤防典型截面及测线示意图

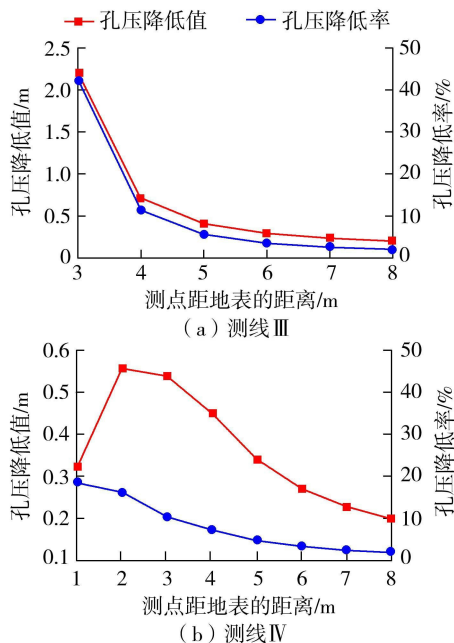


图4 管涌发生后堤防不同深度处孔压变化

4.9 m 范围内的孔压降低值均大于 0.2 m。综上所述,当管涌通道贯通覆盖层后,管涌通道底部及其上部 1 m 范围内孔压有较大幅度的降低,可作为监测管涌发生的孔压测量设备埋设深度范围。

2.2 管涌发生后不同水平位置处孔压变化规律

管涌通道直径设置为 1 m,深度设置为 3 m,完全贯通覆盖层,管涌通道边缘与堤脚距离设置为 1 m,计算该工况下堤防的渗流场。选用截面 B 上两条水平直线为测线,测线 V 通过管涌通道底部,测线 VI 位于管涌通道底部以上 1 m 处。管涌发生后两条测线上不同位置处的孔压变化如图 5 所示,当测点位于管涌通道左侧时,测点与管涌通道边缘的距离设为负值。管涌发生后,越靠近管涌通道位置孔压降低值越大,随着测点与管涌通道距离的增大,孔压降低值的减小逐渐变缓。管涌通道两侧与管涌通道距离相同位置处的孔压变化基本一致。

对管涌发生后截面 B 上两条测线不同位置处孔压变化数据进行分析,管涌通道左侧测点的孔压降低值稍大于右侧距离相同位置处,但孔压降低率稍小于右侧距离相同位置处。当测线位于管涌通道底部时(测线 V),管涌通道边缘处孔压降低值为 2.213 m,降低率为 42.5%;管涌通道边缘两侧 3 m 范围内孔压降低值大于 0.26 m,降低率不小于 5%;管涌通道边缘两侧 16 m 范围内孔压降低值不小于 0.1 m。当测线位于管涌通道底部以上 1 m 时(测线 VI),管涌通道边缘处孔压降低值为 1.567 m,降低率为 43.9%;管涌通道边缘两侧 3 m 范围内孔压降低值大于 0.19 m,降低率不小于 5.8%;管涌通道边缘两侧 7 m 范围内孔压降低值大于 0.1 m。

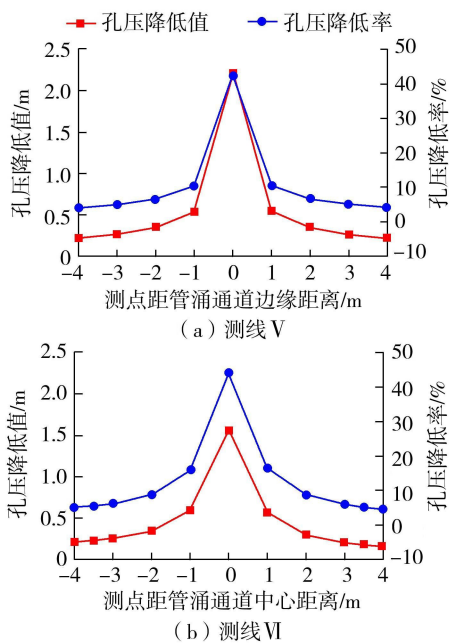


图5 管涌发生后堤防截面 B 上不同水平位置处孔压变化

当测点与管涌通道边缘距离大于 1 m 时,与测线 VI 上测点相比,测线 V 上测点的孔压降低值更大,但降低率更小。对于测线 V 和测线 VI 上的测点,管涌通道两侧孔压降低率不小于 5% 的范围分别为 3.0 m 和 3.6 m,测线 VI 上测点的范围比测线 V 大 0.6 m。

选用截面 A 上的两条水平直线为测线,测线 I 通过管涌通道底部,测线 II 位于管涌通道底部以上 1 m 处。管涌发生后两条测线上不同位置处孔压变化情况如图 6 所示,当测点位于管涌通道左侧时,测点与管涌通道边缘的距离设为负值。管涌发生后,越靠近管涌通道位置孔压降低值越大,随着测点与

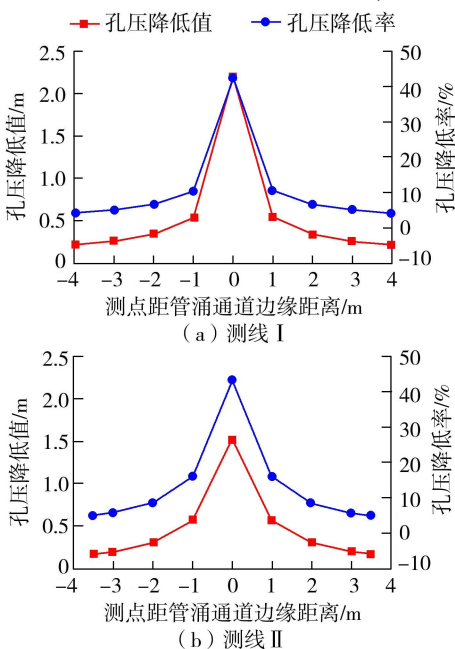


图6 管涌发生后堤防截面 A 上不同水平位置处孔压变化

管涌通道距离的增大,孔压降低值的减小逐渐变缓;管涌通道两侧与管涌通道距离相同位置处的孔压变化基本一致。

对管涌发生后截面 A 上两条测线不同位置处的孔压变化数据进行分析,当测线位于管涌通道底部时(测线 I),管涌通道边缘处孔压降低值为 2.199 m,降低率为 42.3%;距管涌通道边缘3 m 位置处孔压降低值为 0.264 m,管涌通道边缘两侧3 m 范围内孔压降低率大于 5%;管涌通道边缘两侧19 m 范围内孔压降低值不小于 0.1 m。当测线位于管涌通道底部以上 1 m 时(测线 II),管涌通道边缘处孔压降低值为 1.524 m,降低率为 43.2%;距管涌通道边缘3 m 位置处孔压降低值为 0.201 m,管涌通道边缘两侧 3.5m 范围内孔压降低率大于 5%;管涌通道边缘两侧 8 m 范围内孔压降低值大于 0.1 m。

当测点与管涌通道边缘距离大于 1 m 时,与测线 II 上测点相比,测线 I 上测点的孔压降低值更大,但降低率更小。对于测线 I 和测线 II 上的测点,管涌通道两侧孔压降低率不小于 5% 的范围分别为 3.1、3.5 m,测线 II 上测点的范围比测线 I 大 0.4 m。以孔压降低率阈值作为判别管涌发生的指标时,将孔压监测设备置于测线 II 上监测范围更大,以孔压降低值阈值作为判别管涌发生的指标时,将孔压监测设备置于测线 I 上监测范围更大。

2.3 管涌位置的影响

改变管涌通道与堤脚的距离计算堤防渗流场,分析管涌通道位置对管涌发生后堤防不同位置孔压变化的影响。管涌通道直径设为 1 m,深度设为3 m,管涌通道完全贯通覆盖层。定义管涌通道边缘与堤脚的距离为 d , d 分别取为 1、5、10、20、50 m。选用堤防截面 A 测线 I 上测点作为代表分析管涌发生后孔压的变化规律,管涌通道距堤脚不同距离时测线 I 上测点孔压降低值如图 7(a) 所示。管涌通道与堤脚距离不同时,测线上孔压变化规律相似,越靠近管涌通道,孔压降低值越大。当 d 分别为 1、5、10、20、50 m 时,测线 I 上距管涌通道边缘 3 m 处孔压降低值分别为 0.264、0.249、0.233、0.204、0.144 m;管涌通道距堤脚越远,与管涌通道距离相同位置处孔压降低值越小。

管涌通道与堤脚距离不同时,管涌发生后堤防截面 A 测线 I 上测点孔压降低率见图 7(b)。管涌通道两侧距离相同位置处孔压变化基本一致,越靠近管涌通道,孔压降低率越大。随着管涌通道与堤脚距离的增大,与管涌通道距离相同位置处孔压降低率逐渐减小,当 d 从 1 m 增大到 50 m 时,与管涌通道边缘相距 3 m 位置处的孔压降低率从 5.1% 降

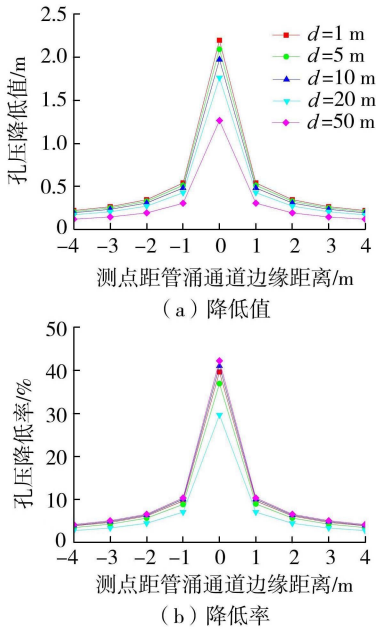


图7 管涌通道与堤脚距离不同时管涌发生后测线 I 上测点孔压变化

低到3.4%。当 d 分别为 1、5、10、20、50 m 时,管涌通道两侧孔压降低率不小于 5% 的范围分别为 3.1、2.9、2.7、2.4、1.7 m(截面 A 测线 I 上测点)。管涌通道与堤脚的距离越大,发生管涌后管涌周边位置孔压降低值和降低率越小,使用孔压监测设备监测管涌发生的监测范围就越小。

2.4 管涌尺寸的影响

改变管涌通道直径计算堤防渗流场,分析管涌通道尺寸对管涌发生后堤防不同位置孔压变化的影响。数值模拟中管涌通道边缘与堤脚的距离设为 1 m、深度设为 3 m,管涌通道完全贯通覆盖层。管涌通道直径分别取 0.5、1、2 m。选用堤防截面 A 测线 I 上测点作为代表分析管涌发生后孔压的变化规律,不同管涌通道直径条件下管涌发生后测线 I 上测点孔压降低值如图 8(a) 所示。管涌通道直径不同时,测线上孔压变化规律相似,越靠近管涌通道,孔压降低值越大。当管涌通道直径分别为 0.5、1、2 m 时,测线 I 上距管涌通道边缘 3 m 处孔压降低值分别为 0.136、0.264、0.510 m,管涌通道直径越大,与管涌通道距离相同位置处孔压降低值越大。当管涌通道直径分别为 0.5、1、2 m 时,测线 I 上管涌通道两侧孔压降低值大于 0.2 m 对应的范围分别为 1.6、4.6、16.8 m。

不同管涌通道直径条件下,管涌发生后测线 I 上测点孔压降低率见图 8(b)。越靠近管涌通道,孔压降低率越大。随着管涌通道直径的增大,与管涌通道距离相同位置处孔压降低率显著增加,当管涌通道直径从 0.5 m 增大到 2 m 时,与管涌通道边缘

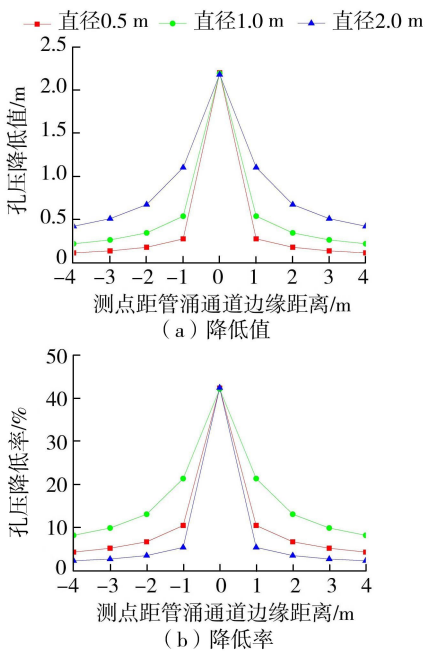


图8 不同管涌通道直径下管涌发生后测线 I 上测点孔压变化

相距 3 m 位置处的孔压降低率从 2.6% 增加到 9.8%。当管涌通道直径分别为 0.5、1、2 m 时,管涌通道两侧孔压降低率不小于 5% 的范围分别为 1.1、3.1、9.2 m (截面 A 测线 I 上测点)。管涌通道直径越大,发生管涌后管涌通道周边位置孔压降低值和降低率越大,使用孔压监测设备监测管涌发生的监测范围就越大。

3 讨论

目前我国汛期堤防管涌险情的巡查主要靠人海战术,管涌险情抢险效率低,如何根据管涌险情关键参数的响应特征对其进行快速识别,提升防汛抢险效率,是工程中亟须解决的难题。当堤防外水位不变时,管涌发生后,堤防不同位置处的孔压会发生一定程度的降低。因为管涌险情的出现一般具有突发性,若埋设在堤防周边的渗压计读数突然降低,可能是由于附近区域发生了管涌,可利用堤防孔压的监测数据快速识别管涌险情的发生。

由前文分析可知,当管涌发生后,管涌通道底部及其上部 1 m 范围内的孔压有较大幅度的降低,可将覆盖层底部及以上 1 m 范围作为监测管涌发生的孔压测量设备埋设深度范围。管涌发生后,与管涌通道底部以上 1 m 深度处相比,管涌通道底部所在深度的孔压降低值更大,但孔压降低率更小。以孔压降低率的阈值作为判别管涌发生的指标时,将孔压测量设备置于管涌通道底部以上 1 m 深度时,监测效果更好;以孔压降低值的阈值作为判别管涌发生的指标时,将孔压测量设备置于管涌通道底部深

度时监测效果更好。

管涌发生后,同一水平面上与管涌通道距离相同的位置处孔压降低值近似相等,管涌通道与堤脚的距离越大,发生管涌后管涌周边位置孔压降低值和降低率越小。可根据此规律对管涌的发生进行监测。例如:在本文数值模拟设置的条件下,当管涌通道边缘与堤脚距离为 5 m,且管涌通道的直径为 1 m 时,在管涌通道底部所在的平面内,管涌发生后以管涌通道中心为圆心,四周 2.9 m 范围的孔压降低率均不小于 5%;以孔压降低率大于等于 5% 为管涌发生的阈值,将渗压计埋设在覆盖层下侧,若距堤脚 2.1 m 处渗压计孔压降低率均大于 5%,说明渗压计方圆 2.9 m 范围内有直径 1 m 以上的管涌发生。

4 结论

a. 管涌发生后,堤防不同位置处的孔压均出现一定程度的降低。管涌通道底部及其上部 1 m 深度范围内孔压降低幅度较大,可作为监测管涌发生的孔压测量设备埋设深度范围。

b. 管涌发生后,同一水平面上与管涌通道距离相同的位置孔压变化基本一致,越靠近管涌通道位置孔压降低值越大,随着测点与管涌通道距离的增大,孔压降低值的减小逐渐变缓。

c. 管涌通道与堤脚的距离越大,发生管涌后管涌周边位置孔压降低值和降低率越小。管涌通道尺寸对管涌后堤防渗流场影响较大,随着管涌通道直径增大,发生管涌后管涌通道周边位置孔压降低值和降低率显著增大。

参考文献:

- [1] 卢廷浩. 土力学[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社, 2005.
- [2] 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))
- [3] 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, 110. (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, 110. (in Chinese))
- [4] 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. (LIU Hongchen, WU Qinghua,

- SU Huaizhi, et al. Experimental study on piping considering cover layer and its contact surface with sand layer characteristics [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18 (4): 165-170. (in Chinese))
- [5] 倪小东,寇恒绮,左翔宇,等. 基于透明土技术与颗粒流方法联合开展管涌微观机理研究[J]. 水利学报,2021, 52(12): 1482-1497. (NI Xiaodong, KOU Hengqi, ZUO Xiangyu, et al. Research on meso mechanism of piping based on transparent soil technology and particle flow method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (12): 1482-1497. (in Chinese))
- [6] AKRAMI S, BEZUIJEN A, VAN BEEK V, et al. Influence of a permeable sand layer on the mechanism of backward erosion piping using 3D pipe depth measurements [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(12): 3881-3898.
- [7] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 85-90. (GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 85-90. (in Chinese))
- [8] 邱昊天,王媛,巩佳琨,等. 泡沫流体对堤基土体渗流特性影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 70-78. (QIU Haotian, WANG Yuan, GONG Jiakun, et al. Effect of foam fluid on seepage characteristic in embankment foundation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 70-78. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] BERSAN S, KOELEWIJN A R, PUTTI M, et al. Large-scale testing of distributed temperature sensing for early detection of piping [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9): 4019052.
- [11] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 1-10. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 1-10. (in Chinese))
- [12] 张健,翟剑峰,王仙美,等. 基于球状井非稳定井流理论的管涌流场分布研究[J]. 水利水运工程学报, 2014 (1): 49-55. (ZHANG Jian, ZHAI Jianfeng, WANG Xianmei, et al. Analysis of piping field distributions based on unsteady spherical well flow theory [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(1): 49-55. (in Chinese))
- [13] 毛祖熙,段祥宝,蔡金榜,等. 堤基渗流管涌发展的理论分析[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 46-50. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Theoretical analysis on piping development of levee foundation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(12): 46-50. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 刘昌军,丁留谦,孙东亚,等. 双层堤基管涌模型试验尺寸效应的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 3110-3116. (LIU Changjun, DING Liujian, SUN Dongya, et al. Numerical simulation of size effect in piping erosion model test for double-stratum dike foundations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 3110-3116. (in Chinese))
- [16] 王大宇,傅旭东,冯晴枫. 悬挂式防渗墙在管涌过程控制中的作用机制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(2): 164-169. (WANG Dayu, FU Xudong, FENG Qingfeng. Effects of suspended cut-off walls on preventing piping development in levees [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(2): 164-169. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 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))
- [19] 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))

(收稿日期:2022-11-30 编辑:俞云利)