

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.11.009

基于临界水力梯度接近度的 工程管涌危险程度量化研究

钱叶琳¹, 苏颖¹, 张振华², 李长春¹, 王磊磊², 徐阳²

(1. 安徽省路港工程有限责任公司, 安徽 合肥 230031; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:工程中管涌发生严重时会导致工程失稳。文章基于土体发生管涌的水力条件, 提出临界水力梯度接近度指标, 以定量分析土体管涌发生的危险性, 进而划分出管涌危险区并提出相应的防治建议。以施工过程中发生 2 次管涌事故的某船闸基坑为工程实例, 采用 FLAC3D 软件构建三维数值计算模型, 利用 FISH 语言编程并分析该基坑施工过程中水力梯度以及临界水力梯度接近度分布随管涌产生和基坑防渗加固的演化规律, 进而探讨该基坑涌水机制。结果表明: 基坑发生管涌时, 坑底发生管涌位置土体的水力梯度以及临界水力梯度接近度数值均表明该处发生了管涌, 此外临界水力梯度接近度还可以划分出除管涌位置外整个场地内其他管涌危险区域; 基于管涌危险区分布提出的防渗加固建议, 可以有效降低坑底土体发生管涌的风险。该临界水力梯度接近度的提出为工程中管涌预测以及防治提供了一种新的管涌危险性评价的量化方法。

关键词:管涌; 水力梯度; 临界水力梯度接近度; 防渗加固; FLAC3D 软件; FISH 语言

中图分类号:TV698.233

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)11-1492-09

Quantitative study on hazard degree of engineering piping based on approach degree of critical hydraulic gradient

QIAN Yelin¹, SU Ying¹, ZHANG Zhenhua²,
LI Changchun¹, WANG Leilei², XU Yang²

(1. Anhui Province Highway and Port Engineering Co., Ltd., Hefei 230031, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Serious piping will lead to instability of engineering. Based on the hydraulic condition of soil piping, the approach degree of critical hydraulic gradient is proposed to quantitatively analyze the risk of soil piping, which can distribute the piping risk area and put forward corresponding prevention suggestions. Taking a ship lock foundation pit with two piping accidents during construction as an engineering example, FLAC3D software is used to construct a three-dimensional numerical model, FISH language programming is used to analyze the evolution law of the hydraulic gradient and the approach degree of critical hydraulic gradient distribution with piping and foundation pit anti-seepage reinforcement during construction, and then the water inflow mechanism of the foundation pit is explored. The results show that when piping occurs in the foundation pit, both the hydraulic gradient and the approach degree of the critical hydraulic gradient of the soil at the location where piping occurs indicate that piping occurs there, in addition, the approach degree of the critical hydraulic gradient can divide other piping risk areas in the whole site except the piping location; the anti-seepage reinforcement suggestions based on the distribution of piping risk areas can effectively reduce the risk of piping in the soil at the bottom of the pit. The proposed approach degree of critical hydraulic gradient provides a new

收稿日期:2022-06-21; **修回日期:**2022-07-27

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(202103a05020035); 安徽省自然科学基金资助项目(1808085QE145)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA2021KCPY0031)

作者简介:钱叶琳(1980—), 男, 安徽合肥人, 安徽省路港工程有限责任公司高级工程师;

张振华(1977—), 男, 福建政和人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail:2014800031@hfut.edu.cn.

quantitative method of piping risk assessment for the prediction and prevention of piping in engineering.

Key words: piping; hydraulic gradient; approach degree of critical hydraulic gradient; anti-seepage reinforcement; FLAC3D software; FISH language

水利工程在建设或者运行期间时常发生管涌。1998 年长江全流域发生特大洪水,中下游堤防险情 73 800 余处,长江流域干堤发生较大管涌 872 处,占较大险情的 51.2%,直接经济损失达 1 500 亿元^[1]。2016 年全国大范围地区出现的持续强降雨汛情中,湖北、湖南、江西、安徽、四川等多地共发现并治理了 608 处堤坝管涌决口,并对长达 37.5 万余米的堤防大坝进行了加固^[2]。某基坑在开挖过程中坑内涌水涌砂 2 800 m³,地面塌陷 500 m²,深 6~8 m,抢险历时 6 d,动用抢险人员累计 2 000 余人次,不仅影响施工工期,而且严重影响到附近高层建筑的安全,造成了巨大的经济损失^[3]。

目前对于管涌的研究主要集中在土体发生管涌的临界条件以及工程中管涌发生危险性的研究上^[4-5]。文献[6]以单个土颗粒为研究对象,按照渗透力与土颗粒浮重间的极限平衡推导出砂砾土临界水力梯度计算公式;文献[7]考虑多孔介质中的流动,并与伯努利方程和临界牵引应力条件耦合,建立了计算临界水力梯度的模型;文献[8]采用泥沙颗粒滚动理论,同时考虑土壤颗粒的相对暴露程度和渗流方向建立二维渗流模型,预测了土壤颗粒运动的临界水力梯度;文献[9]利用多个方程构建层流管道模型,得出反向侵蚀导致堤坝破坏的临界水力梯度公式;文献[10]根据相对运动原理,推导出考虑周围粒子受水流拖拽力影响的无黏性土临界水力梯度;文献[11]将蒙特卡罗法与有限差分法相结合进行程序开发,用于预测蓄水后土石坝发生管涌的可能性,并通过案例对程序进行验证;文献[12]考虑水力参数的不确定性,开发了一种基于简单脆弱性指数的程序,并通过工程实例论证了该程序的可行性;文献[13]基于微震链阵列调查结果可揭示滑坡与堤坝的内部结构以及自电位调查结果可显示异常渗流带的路径,采用微震链阵列与自电位测量方法来预测滑坡以及大坝发生管涌的可能性;文献[14]通过研究管涌发展过程中声发射特征,得出声发射信号的活动与管涌不同阶段有关的结论,据此将声发射信号作为监测管涌发展的指标来判断管涌发生的危险程度。

然而在工程上临界水力梯度通常用于判定出

险部位是否发生了管涌,但不能对管涌区以外区域进行管涌危险性识别;现有的管涌危险性预测方法不能达到定量预测的效果,在工程中应用具有一定的局限性。因此有必要提出一种可以定量判别工程中发生管涌危险程度的方法,以此为防渗加固措施的实施提供科学依据。本文基于土体发生管涌的水力条件^[2]提出临界水力梯度接近度指标,该指标可以定量判别土体发生管涌的危险程度,从而得出管涌危险区分布,并结合工程实例对该指标进行合理性论证。

1 工程概况

某船闸基坑东西长 457.0 m,南北宽 112.0 m,基坑上闸首底部设计开挖高程为 17.0 m,临近河道水位高 32.5 m。基坑在开挖之前沿四周实施一道高压摆喷墙形成防渗体系。基坑在开挖至高程 24.2 m、17.0 m 时出现了 2 次涌水事故。基坑现场及涌水路线如图 1 所示。



图 1 船闸基坑现场及涌水路线图

根据钻探资料和实测资料,将该船闸地层划分为 5 层含水层和 2 层隔水层:第 1 含水层为潜水,分布在①层素填土、②层壤土中(标高 32.5 m);第 2 含水层为承压水,分布在③层砂壤土夹粉质壤土中(标高 23.0~29.0 m);第 3 含水层为承压水,分布在④层砂壤土中(标高 15.0~20.0 m);第 4 含水层为承压水,分布在⑤层轻粉质壤土夹砂壤土、⑥层砂壤土中(标高 2.0~10.0 m);第 5 含水层为承压水,分布在⑦层粉砂、⑧层砂壤土中(标高-11.0~<2.0 m);第 1 隔水层为③-1 层壤土;第 2 隔水层为④-1 层壤土。某船闸基坑地层及含水层分布如图 2 所示。

▽ 34.5			
▽ 32.0	①素填土	}	(含水层:潜水)
▽ 29.0	②壤土		
	③砂壤土夹粉质壤土	}	(含水层:承压水)
▽ 23.0			
▽ 20.0	③-1壤土	}	(隔水层)
▽ 15.0	④砂壤土	}	(含水层:承压水)
▽ 10.0	④-1壤土	}	(隔水层)
▽ 8.0	⑤轻粉质壤土夹砂壤土	}	(含水层:承压水)
▽ 2.0	⑥砂壤土	}	(含水层:承压水)
▽ 0	⑦粉砂		
	⑧砂壤土	}	(含水层:承压水)
▽ -11.0			

单位:m

图 2 某船闸基坑地层及含水层分布

2 临界水力梯度接近度

管涌的发生与土体水力梯度息息相关,土体的水力梯度越大,发生管涌的危险程度就越大,当土体水力梯度大于临界水力梯度时,管涌就会发生^[15]。以往工程中对于管涌危险性的识别结果因缺少界定标准而无法准确判别工程发生管涌的危险程度,工程此时可能处于安全状态,也可能处于接近发生管涌的状态。本文依据不同土体的临界水力梯度不同以及土体水力梯度大于其临界水力梯度时会发生管涌,提出临界水力梯度接近度指标(无量纲参数),即土体水力梯度与临界水力梯度的比值。记临界水力梯度接近度为 D_i^* ,计算公式为:

$$D_i^* = i/i_c \quad (1)$$

其中: i 为土体的水力梯度; i_c 为土体临界水力梯度。

由临界水力梯度接近度定义可知:当 $D_i^* > 1$ 时,土体的水力梯度大于其临界水力梯度,土体发生管涌;当 $D_i^* = 1$ 时,土体的水力梯度等于其临界水力梯度,土体处于发生管涌的临界状态;当 $D_i^* < 1$ 时,土体的水力梯度小于其临界水力梯度,土体不会产生管涌。由临界水力梯度接近度的定义知,当土体的水力梯度越接近临界水力梯度时,即 D_i^* 越接近 1,发生管涌的风险就越大。

3 数值模拟

3.1 基本理论

3.1.1 渗流控制方程

饱和-非饱和渗流理论假定水在非饱和土中仍然服从 Darcy 定律,然后根据水流的连续性条件以及孔隙水压力不随时间变化的假定,在不考虑不同流体的流动与土体结构平衡条件之间相互作用的条件下(即不考虑孔隙水与孔隙水的流动对土体结构变形的影响),通过土体非饱和区域内的地下水控制方程式^[16]为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial x} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

本文渗流计算是在土体饱和状态下进行的,此时地下水的控制方程式为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial x} \right) + Q = 0 \quad (3)$$

其中: k_x 、 k_y 分别为土体 x 、 y 方向的渗透系数; H 为位置水头与孔隙水压力两者之和; Q 为微元体的边界流量; m_w 为体积含水量变化系数; γ_w 为水的容重。

3.1.2 定解条件

初始条件为:

$$H(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_0(x, y, t_0) \quad (4)$$

边界条件为:

$$H(x, y, t) \Big|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, t) \quad (5)$$

其中: $H_0(x, y, t)$ 为点 (x, y) 处初始水位; Γ_1 为一类边界条件; $H_1(x, y, t)$ 为点 (x, y) 在 t 时刻的边界已知水位。

3.2 数值计算模型及边界条件

基坑涌水位置发生在上闸首处,因此取该区域为研究对象,根据图纸以及现场情况确定该基坑研究范围为长 120.0 m,宽为 42.0 m,深度为 17.0~34.5 m。为减小边界范围选取过小给计算结果带来误差,选取研究对象最大几何尺寸的 3~5 倍确定

计算范围,最终确定整体模型尺寸为 900.0 m×540.0 m×134.5 m,网格类型为 4 节点 SOILD181 以及 8 节点 SOILD185,如图 3 所示。

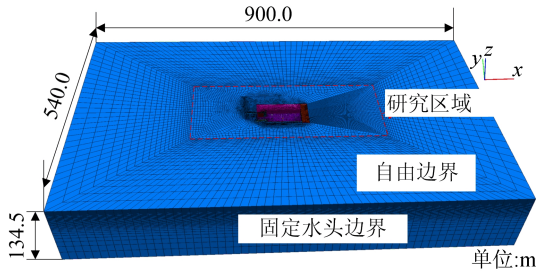


图 3 基坑整体数值计算模型

数值模型的渗流边界条件为:顶面、底面为不透水边界;前、后、左、右边界为透水边界(水位 32.5 m);防渗结构均不透水。沿基坑轴线方向剖面边界条件如图 4 所示。基坑最初防渗体系数值模型如图 5 所示。

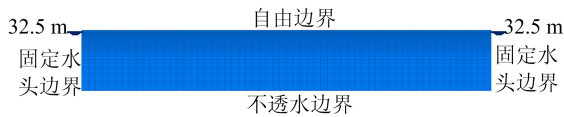


图 4 沿基坑轴线方向剖面边界条件



图 5 基坑最初防渗体系数值模型

3.3 计算参数

在 FLAC3D 软件中对计算模型进行渗流计算^[17],以每个网格为研究对象,根据上文提出的临界水力梯度接近度计算公式,利用 FISH 语言进行二次开发,计算获得基坑涌水剖面的水力梯度以及临界水力梯度接近度分布。计算时将土层赋予摩尔库伦模型^[18-19],防渗结构赋予线弹性模型^[20-21],同时将防渗结构赋予各向同性不透水模型^[22]。根据计算时的参数需求,在该船闸基坑处取样进行三轴试验并结合参考现场《地质勘查报告》,确定计算参数,其中各地层的临界水力梯度计算公式参考文献[6]。

计算参数见表 1 所列。

表 1 各土层计算参数

地层	弹性模量/ MPa	泊松比	容重/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	孔隙率	渗透系数/ (cm/s)	临界水力梯度
填土	27	0.320	18.7	16	18	0.58	5.09×10 ⁻⁷	0.465
壤土	34	0.270	19.1	18	21	0.59	8.05×10 ⁻⁶	0.421
砂壤土夹粉质壤土	40	0.330	19.4	24	13	0.48	5.53×10 ⁻⁴	0.287
壤土	45	0.280	19.8	18	20	0.56	5.37×10 ⁻⁶	0.389
砂壤土	53	0.300	20.1	16	24	0.43	4.91×10 ⁻⁴	0.246
壤土	62	0.300	20.2	20	20	0.54	6.32×10 ⁻⁶	0.400
轻粉质壤土夹砂壤土	73	0.290	20.4	26	15	0.45	4.57×10 ⁻⁵	0.324
砂壤土	81	0.290	20.6	18	25	0.40	4.13×10 ⁻⁴	0.255
粉砂	90	0.280	21.4	19	22	0.39	2.11×10 ⁻³	0.180
砂壤土	96	0.270	22.0	13	26	0.39	6.07×10 ⁻⁴	0.260
防渗结构	30 000	0.167	250.0			0.30	1.00×10 ⁻¹²	

3.4 计算步骤

为分析该基坑施工过程中水力梯度以及临界水力梯度接近度分布随管涌产生与基坑防渗加固的演化规律,本文确定了以下 4 个计算步骤:

- 1) 基坑开挖至坑底高程为 24.2 m,发生第 1 次涌水。
- 2) 针对基坑第 1 次涌水事故进行防渗加固。
- 3) 基坑开挖至坑底高程为 17.0 m,发生第

2 次涌水。

- 4) 针对基坑第 2 次涌水事故进行防渗加固。

4 数值模拟结果及分析

4.1 第 1 次涌水剖面计算结果

基坑第 1 次涌水剖面水力梯度与临界水力梯度接近度计算结果如图 6 所示,此时坑底土层为砂壤土夹粉质壤土。

从图 6a 可以看出,此时坑底涌水剖面出水口处的水力梯度为 0.460,大于该土层临界水力梯度 0.287,说明此处发生了管涌;从图 6b 可以看出,涌水剖面的管涌危险区主要分布在防渗结构与其周围土体以及防渗结构底部绕渗区。

根据计算结果,涌水部位的临界水力梯度接近度大于 1,基坑发生管涌的原因是在防渗结构

处出现了绕渗,形成了渗流破坏贯通区,造成在基坑底部发生管涌。通过以上对比得出,临界水力梯度用于判定浅表层涌水位置土体是否发生了管涌,对于涌水部位以外的土体无法进行管涌危险性判定;而临界水力梯度接近度可以依据土体发生管涌的危险程度划分出管涌危险区,可以判定整个场地内土体发生管涌的危险性。

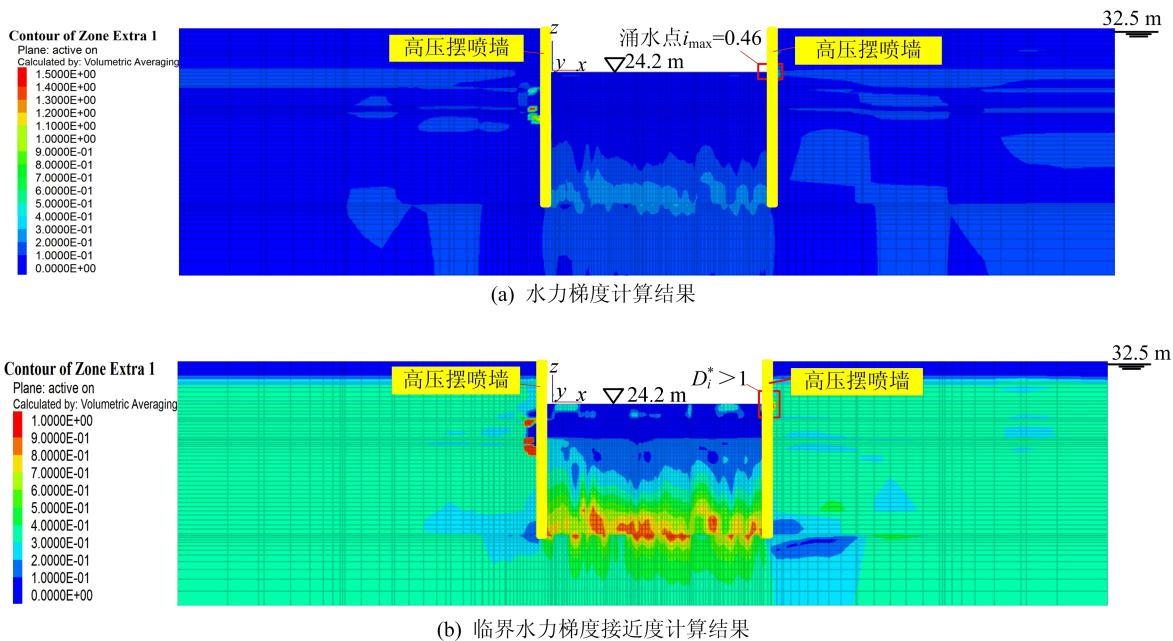


图 6 基坑第 1 次涌水剖面水力梯度与临界水力梯度接近度计算结果

根据基坑第 1 次涌水时管涌危险区分布,需要对管涌危险区进行防渗干预。结合工程现场,

在涌水处原高压摆喷墙外侧新增高压摆喷墙,如图 7 所示。

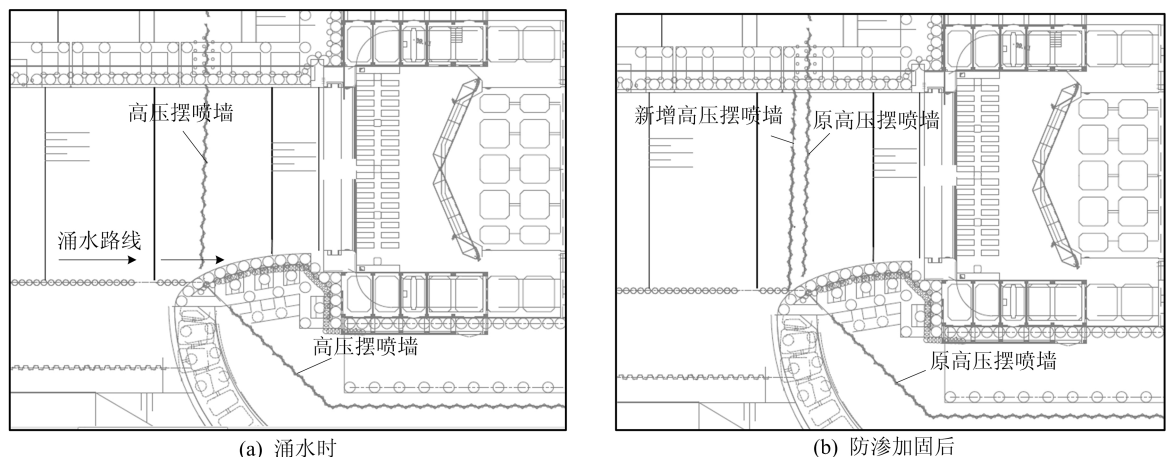
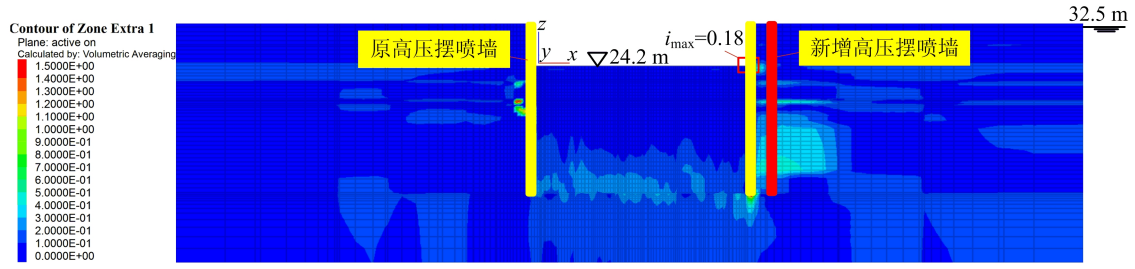


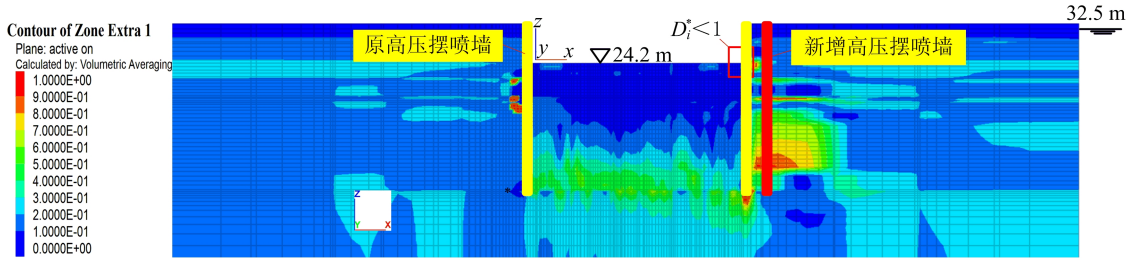
图 7 基坑第 1 次防渗加固

基坑第 1 次涌水剖面在防渗加固后水力梯度与临界水力梯度接近度分布的计算结果如图 8 所示。由图 8 可知,坑底涌水部位的水力梯度自涌水时的 0.460 降至 0.180,低于该土层的临界水

力梯度 0.287,此处不再发生管涌;坑底涌水口的临界水力梯度接近度较加固前降低至小于 1,渗透破坏贯通区域远离坑底,说明针对本次涌水时管涌危险区分布而提出的防渗加固建议有效。



(a) 水力梯度计算结果



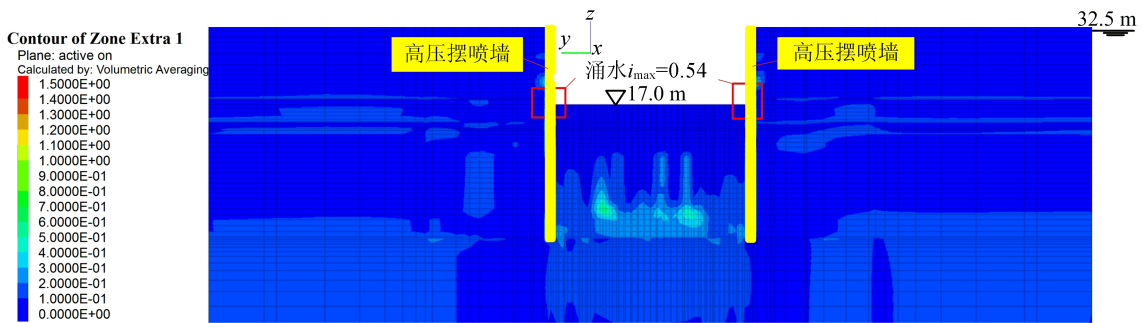
(b) 临界水力梯度接近度计算结果

图 8 基坑第 1 次涌水防渗加固后涌水剖面水力梯度与临界水力梯度接近度计算结果

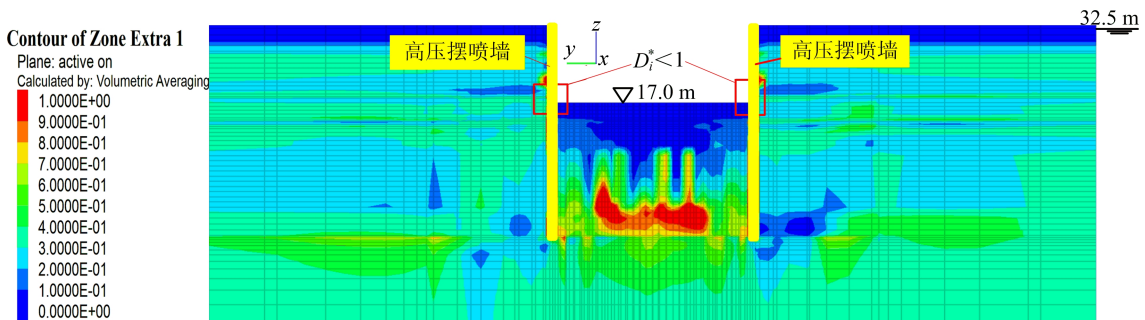
4.2 第 2 次涌水剖面计算结果

基坑第 2 次涌水剖面水力梯度与临界水力梯

度接近度计算结果如图 9 所示,此时基坑已开挖至设计高程,坑底土层为砂壤土。



(a) 水力梯度计算结果



(b) 临界水力梯度接近度计算结果

图 9 基坑第 2 次涌水剖面水力梯度与临界水力梯度接近度计算结果

从图 9a 可以看出,此时坑底涌水剖面出水口处的水力梯度为 0.540,大于该土层临界水力梯度 0.246,说明此处发生了管涌;从图 9b 可以看出,此时涌水部位的临界水力梯度接近度大于 1,基坑发生管涌的原因是在防渗结构处出现了绕渗,形成了渗流破坏贯通区,最终造成在基坑底部

发生管涌。经过对比得出临界水力梯度无法对涌水部位以外区域的土体进行管涌危险性判定,而临界水力梯度接近度可以依据土体发生管涌的危险程度划分出管涌危险区,可以判定整个场地内土体发生管涌的危险性。

根据基坑第 2 次涌水时土体管涌危险区分

布,需要对管涌危险区进行防渗干预。结合工程现场,在原高压摆喷墙外侧新增混凝土截渗墙,针对出水部位利用钢筋混凝土截渗墙进行防渗补

强,如图 10 所示。基坑第 2 次涌水剖面在防渗加固后水力梯度与临界水力梯度接近度分布计算的结果如图 11 所示。

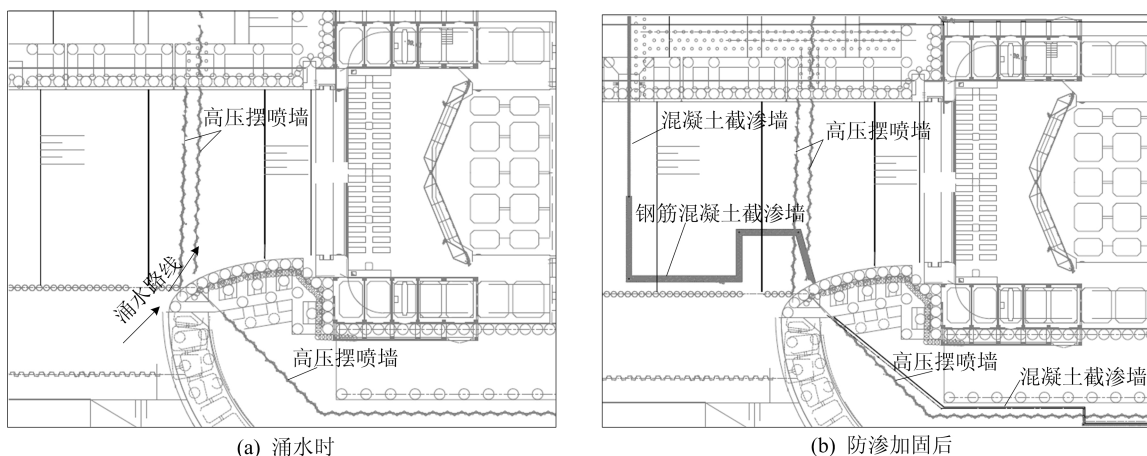
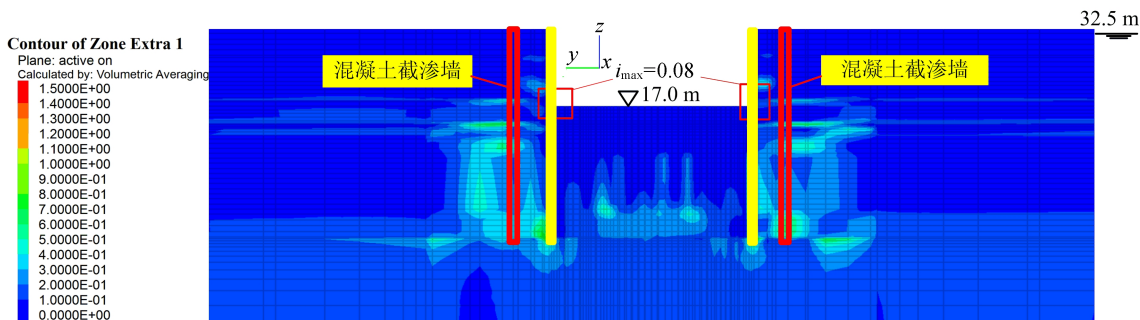
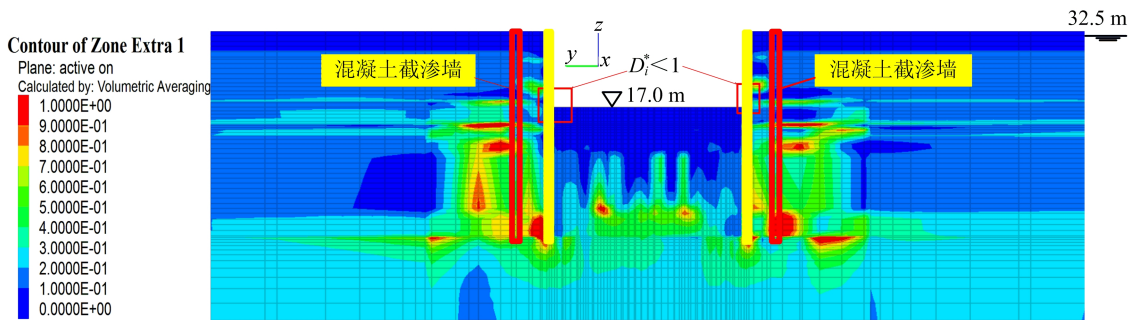


图 10 基坑第 2 次防渗加固



(a) 水力梯度计算结果



(b) 临界水力梯度接近度计算结果

图 11 基坑第 2 次涌水防渗加固后涌水剖面水力梯度与临界水力梯度接近度计算结果

从图 11a 可以看出,此时坑底涌水部位的水力梯度自涌水时的 0.540 降至 0.080,低于该土层的临界水力梯度 0.246,此处不再发生管涌;从图 11b 可以看出,此时坑底涌水口的临界水力梯度接近度较加固前降低至小于 1,渗透破坏贯通区域远离坑底,说明针对基坑本次涌水时管涌危险区分布而提出的防渗加固建议有效。

4.3 讨论

以往工程中对于管涌区的判定只针对浅表层出

险区域,如图 12 所示,但伴随管涌区的出现,管涌潜在危险区也会存在,这些潜在危险区在外界条件或工程结构失稳的进一步影响下就会发展为管涌区,因此能够有效识别管涌潜在危险区同等重要。

以往方法因为不能定量预测管涌危险性,所以不能对管涌潜在危险区进行准确识别。文献 [6, 23-25] 通过室内渗透试验依据土样发生管涌的危险程度不同,将土体发生管涌的动态过程定量划分为若干个区间。

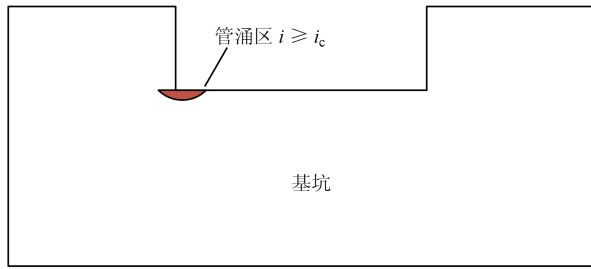


图 12 以往管涌研究区域

本文统计了上述文献得出的不同土体临界水力梯度及其发生管涌潜在危险时(细颗粒普遍流失)的水力梯度,换算得出土体处于管涌潜在危险时的临界水力梯度接近度经验取值,如图 13 所示。由图 13 可知,不同土体处于管涌潜在危险时临界水力梯度接近度整体位于 0.6~0.8 之间,考虑到实际工程安全性,选取临界水力梯度接近度为 0.6 作为土体处于管涌潜在危险时的判断依据。

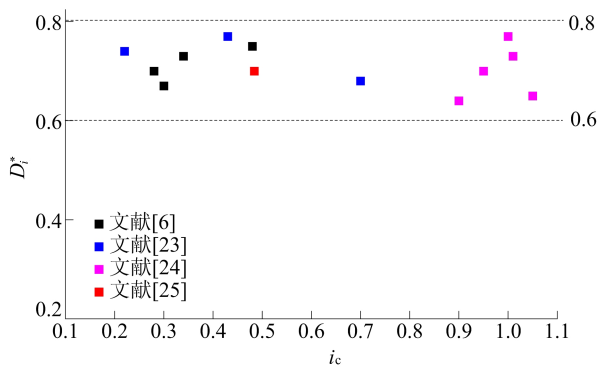


图 13 相关文献土样临界水力梯度接近度转化结果

据此假定:当 $D_i^* \geq 1$ 时,土体已发生管涌,如图 14 区域 1;当 $D_i^* \in [0.6, 1)$ 时,土体处于管涌潜在危险区,如图 14 区域 2,该区域发生管涌的可能性很大,工程中应采取相应的防渗措施防止该区域发生管涌;当 $D_i^* \in [0, 0.6)$ 时,土体处于管涌相对安全区,如图 14 区域 3,工程中暂时不需要对此区域进行防渗干预。对于具体工程可通过试验确定各个土层处于管涌潜在危险时临界水力梯度接近度的精确值。

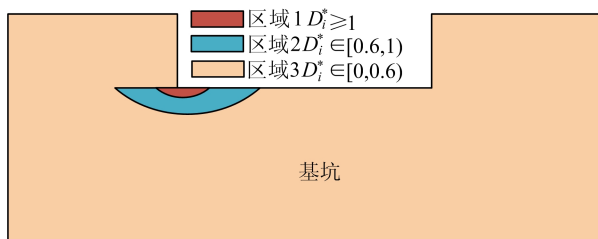


图 14 本文临界水力梯度接近度管涌研究区域

通过以上分析得出,临界水力梯度接近度可以根据土体发生管涌的危险程度定量划分区域,通过及时识别管涌危险区以及潜在危险区的分布并提供防治建议,可以有效避免工程发生管涌,具有重要的工程意义。

5 结 论

本文基于土体发生管涌的水力条件,提出可以定量判别工程发生管涌危险性并提供防渗建议的临界水力梯度接近度指标,根据工程实例采用数值模拟方法对该指标进行合理性论证,得出以下结论:

1) 临界水力梯度接近度指标通过表示土体水力梯度与其临界水力梯度的接近程度来定量判定土体发生管涌的危险程度,不仅可以用来判定浅表层涌水位置土体是否发生了管涌,还可以识别复杂土层场地内土体发生管涌的危险性。

2) 根据临界水力梯度接近度分布的计算结果,得出发生管涌的危险区以及潜在危险区,据此分析工程涌水机制,并提供合理的防渗建议,通过提前的防渗干预达到消除管涌的目的。

通过以上研究表明,临界水力梯度接近度指标的提出为土木工程中管涌的预测以及防治提供一种新的管涌危险性评价的量化方法。

[参 考 文 献]

- [1] 吴庆华,张伟,邹爱清,等.堤防管涌险情研究进展[J].长江科学院院报,2019,36(10):39-44.
- [2] 刘紫蕊,江克证.堤防大坝管涌问题的研究[J].中国水运,2017,17(5):197-199.
- [3] 智慧渊,厉风,高金铭.地铁站富水砂层地连墙施工风险分析[J].工程技术研究,2020(21):169-170.
- [4] 毛昶熙.管涌与滤层的研究:管涌部分[J].岩土力学,2005,26(2):209-215.
- [5] 施倩,钟启明,吕晓倩,等.土石坝管涌溃坝过程数学模型及应用[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):511-519.
- [6] 毛昶熙,段祥宝,吴良骥.砂砾土各级颗粒的管涌临界坡降研究[J].岩土力学,2009,30(12):3705-3709.
- [7] OJHA C S P, SINGH V P, ADRIAN D D. Determination of critical head in soil piping[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(7): 511-518.
- [8] HUANG Z, BAI Y C, XU H J, et al. A theoretical model to predict the critical hydraulic gradient for soil particle movement under two-dimensional seepage flow[J]. Water, 2017, 9(11): 828.
- [9] HOFFMANS G, RIJN L V. Hydraulic approach for predicting piping in dikes[J]. Journal of Hydraulic Research,

- 2018,56(2):268-281.
- [10] ZHANG C H,JI E Y,WANG B T, et al. Research on a critical hydraulic gradient of piping in noncohesive soils [J]. *Soils Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021:6217101.
- [11] ROHANINEJAD M,ZARGHAMI M. Combining Monte Carlo and finite difference methods for effective simulation of dam behavior[J]. *Advances in Engineering Software*, 2011,45(1):197-202.
- [12] BARBETTA S,CAMICI S,BERTUCCIOLI P, et al. Levee body seepage: a refinement of an expeditious procedure for fragility curves and vulnerability diagrams assessment[J]. *Hydrology Research*,2017,48(3):763-775.
- [13] WANG F W, OKEKEUSTIN A C U, KOGURE T, et al. Assessing the internal structure of landslide dams subject to possible piping erosion by means of microtremor chain array and self-potential surveys[J]. *Engineering Geology*, 2018,234:11-26.
- [14] MING P, LU J, CAI X, et al. Multi-particle model of the critical hydraulic gradient for dike piping[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*,2020,57(3):200-210.
- [15] 梁越,陈建生,陈亮,等. 双层堤基管涌发生发展的试验模拟与分析[J]. *岩土工程学报*,2011,33(4):624-629.
- [16] 黄翔. 三峡库区马家沟滑坡抗滑桩变形机制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
- [17] 杨启贵,林学锋,郭志华. 极端冰雪灾害对边坡工程稳定性影响分析研究[J]. *人民长江*,2010,41(24):67-71.
- [18] 胡建林,孙利成,崔宏环,等. 基于修正摩尔库伦模型的深基坑变形数值分析[J]. *科学技术与工程*,2021,21(18):7717-7723.
- [19] 胡建林,孙利成,崔宏环,等. 修正摩尔库伦模型下的深基坑变形数值分析[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*,2021,40(2):134-140.
- [20] 刘鹏,李祥祥,李剑锋,等. 临地铁结构物桩基施工技术研究[J]. *公路*,2019,64(12):89-96.
- [21] FU Z Q,SU H Z,WEN Z P. Multi-scale numerical analysis for linear elastic behavior of clay concrete[J]. *International Journal of Solids and Structures*,2020,203:23-45.
- [22] 邹育麟,何川,胡雄玉,等. 富水区隧道合理防排水型式及注浆加固参数研究[J]. *防灾减灾工程学报*,2014,34(4):485-491.
- [23] 王宇,谷艳昌,王士军,等. 基于雷诺数的砂砾石管涌过程判别[J]. *水利水运工程学报*,2022(6):113-120.
- [24] 陶高梁,李进,崔惜琳. 不同颗粒级配的砂土渗流破坏特性[J]. *土木工程与管理学报*,2019,36(2):90-97.
- [25] 魏勇,赵安文,许开立. 尾矿库坝基管涌破坏试验[J]. *金属矿山*,2015(9):157-160.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 1446 页)

- [6] GOMES M D F A, ALMIR C M L, ELIZABETH A D M B, et al. Infrared spectroscopy combined with random forest to determine tylosin residues in powdered milk [J]. *Food Chemistry*,2021,365:130477-130477.
- [7] SINGH A K, SREENIVASU S, MAHALAXMI U S B K, et al. Hybrid feature-based disease detection in plant leaf using convolutional neural network, bayesian optimized SVM, and random forest classifier [J]. *Journal of Food Quality*,2022,2022:1-16.
- [8] DONG X, LI G L, JIA Y C, et al. Multiscale feature extraction from the perspective of graph for hob fault diagnosis using spectral graph wavelet transform combined with improved random forest[J]. *Measurement*,2021,176:109178.
- [9] 王兰兰,朱捷,周正平,等. 基于随机森林的滚动轴承故障辨识方法研究[J]. *机电工程*,2021,38(12):1599-1604.
- [10] HATWELL J, GABER M, AZAD R, et al. CHIRPS: Explaining random forest classification [J]. *Artificial Intelligence Review*,2020,53(8):5747-5788.
- [11] AISHWARYA K, KUMAR B S, RAJU S V, et al. Facial recognition using aggregation and random forest classification method [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019,1362(1):12078.
- [12] ARCHANA C, SAVITA K, RAJ K, et al. An improved random forest classifier for multi-class classification [J]. *Information Processing in Agriculture*, 2016, 3 (4): 215-222.
- [13] 杨美洁,唐建军. 基于随机森林算法的糖尿病预测研究 [J]. *医学信息学杂志*,2019,40(9):47-49.
- [14] KAMAL S, URATA J, CAVASSINI M, et al. Random forest machine learning algorithm predicts virologic outcomes among HIV infected adults in Lausanne, switzerland using electronically monitored combined antiretroviral treatment adherence [J]. *Aids Care*,2021,33(4):530-536.
- [15] ASADI S, ROSHAN S, KATTAN M W, et al. Random forest swarm optimization-based for heart diseases diagnosis [J]. *Journal of Biomedical Informatics*,2021,115:103690.
- [16] LEO B. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1):5-32.
- [17] THOMAS M H, JULIAN F P K, FRED A H, et al. End-to-end learning of decision trees and forests [J]. *International Journal of Computer Vision*,2019,128:997-1011.
- [18] SEYED A N, KOUROSH A, ALIREZA D, et al. Application of support vector machine, random forest, and genetic algorithm optimized random forest models in groundwater potential mapping [J]. *Water Resources Management*, 2017,31(9):2761-2775.
- [19] 赵澄,陈君新. 基于隐马尔可夫模型的反射型 XSS 检测技术 [J]. *浙江工业大学学报*,2019,47(4):442-447.

(责任编辑 胡亚敏)