

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.012



深层排水孔堵塞对富水岩质高边坡稳定性的影响

高春君¹, 张学富¹, 向立辉¹, 乔丹²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072)

摘要:高边坡施工或运营期间常因多种因素作用导致排水孔堵塞,从而抬升地下水位,影响边坡稳定性和支护结构的安全。基于渗流折射定律,采用空气单元法模拟排水孔,开展了岩质高边坡渗流-应力耦合分析,重点研究了排水孔不同堵塞工况下的坡后地下水位变化及支护结构力学响应。计算结果表明:排水孔堵塞对坡后地下水位影响显著,坡内位移整体变化不大,坡趾位置岩体变形最大;坡体锚杆轴力明显增加,最大增长幅度达到 45%。对于布设深层排水孔的岩质高边坡,排水孔堵塞后边坡支护结构的位移变化明显,对支护结构的影响不容忽视,尤其体现在坡趾剪出口位置。此外,排水孔接近完全堵塞时,边坡安全系数显著降低。提出了以框架式格构和锚杆共同作为支护体系的高边坡处理措施,即下部边坡加强格构支护强度,上部边坡增加锚杆锚固长度。

关键词:高边坡;排水孔;空气单元法;渗流应力耦合

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)05-0092-10

Impact of deep drainage hole blockage on high slope stability in rich water formation

Gao Chunjun¹, Zhang Xuefu¹, Xiang Lihui¹, Qiao Dan²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;

2. Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, P. R. China)

Abstract: The groundwater level rises once the drainage hole of high slope is blocked during construction or operation, affecting the slope stability and safety of the supporting structure. Based on the law of seepage refraction, this paper focuses on the changes of groundwater level and the mechanical response of supporting structure in cases of different blockage conditions. The calculation results firstly demonstrate that the impact of the drainage hole blockage on pore water pressure development is significant, and that the displacement change within the slope is less obvious. Secondly the axial force along the anchor rod of

收稿日期:2017-09-07

基金项目:重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ1705144、KJ1400310、KJ1404102、KJZH17120);贵州省交通运输厅科技项目(2017-123-011);重庆市科委基础与前沿研究资助项目(cstc2014jcyjA30023);重庆建筑工程职业学院青年科研基金(16QK3)

作者简介:高春君(1980-),男,博士生,高级工程师,主要从事岩土工程、地下工程研究,E-mail: 349037418@qq.com.

Received:2017-09-07

Foundation item: Chongqing Municipal Education Commission Project (No. KJ1705144, KJ1400310, KJ1404102, KJZH17120); Science and Technology Project of Guizhou Provincial Transportation and Department (No. 2017-123-011); Chongqing Science and Technology Commission Project (No. cstc2014jcyjA30023); Chongqing Jianzhu College Youth Research Foundation(No. 16QK3)

Author brief:Gao Chunjun (1980-), PhD candidate, senior engineer, main research interests: geotechnical engineering and underground engineering, E-mail: 349037418@qq.com.

the slope increases obviously with the maximum growth rate of 45%. In addition, for the high slope in the rock formation arranged with the deep drainage hole, the displacement and stress of the support structure changes significantly after the drainage hole blockage. Therefore, the impact on the supporting structure should not be ignored, especially in the position of the shear outlet on the slope toe. Safety factor of the slope decreases significantly when the drainage hole is almost completely clogged. This paper also introduces a high slope treatment method of the supporting system adopting the frame type and anchor rod, that is, for the lower part of the slope, strengthening the lattice support strength; and for the upper part of the slope, increasing the anchorage length of the anchor rod.

Keywords: high slope; drainage hole; air element method; hydro-mechanical coupling

山区工程建设中,高边坡是一种重要的工程载体,在富水区,其稳定性是工程建设首要解决的工程地质问题和岩土力学问题^[1]。发生在山区的地质灾害中,水毁灾害发生频率最高,其中边坡区段尤为突出,根据陕西、四川等地统计,在公路水毁地质灾害中,边坡路段约占全路段的 40%~55%^[2]。可见,富水区边坡宜设置合理的排水系统,以确保边坡工程的安全。对于岩质高边坡工程,布置深层排水孔是一种简单实用且较为普遍的方法。岩质高边坡排水过程中,由于细小颗粒沉积^[3],地下水渗流结晶^[4]、微生物生长^[5-6]等,常导致排水管道堵塞,进而抬升坡内地下水位,严重威胁边坡的稳定性和支护结构的安全,有必要开展排水孔堵塞对边坡稳定性影响的研究。

关于排水管道堵塞问题,科研工作者采用理论推导、实验等方法进行过诸多研究,取得了一系列成果。例如, Pedescoll 等^[7]、Hua 等^[8]、Morvannou 等^[9]分析了人工湿地堵塞的机理并提出了一系列处置措施。刘璐等^[3]利用内镶片式斜齿形迷宫流道灌水器进行堵塞实验,确定了灌水器最易堵塞的泥砂粒径和含砂量。周卓^[4]利用经验公式,模型试验研究了地下水结晶导致隧道排水管堵塞的机理。Li 等^[10]利用滴灌试验研究了不同水质条件下滴管的堵塞规律。Oaselles-Osorio 等^[5]、Zhong 等^[6]研究发现,微生物生长会在汇水处形成一层生物膜,其扩散会导致附近的孔隙率和渗透系数持续减小,进而造成排水管道堵塞。总结起来,排水管堵塞的原因可以归纳为物理、化学、生物几个方面。深层排水孔堵塞常常涉及多种因素综合作用,很难通过上述方法进行研究,采用数值方法进行边坡渗流场与应力场耦合分析是一种有效的辅助措施。现阶段,排水孔模拟的主流方法有“以管代孔”法^[11]、汇线单元法^[12]、排水子结构法^[13]、空气单元法^[14]等。已有研究中,通常对排水孔上各点给定水头来计入排水孔

的作用;然而,在高边坡工程中,各排水孔中的水头并不相等,甚至有部分零水头排水孔,通过赋予水头来模拟排水效果并不完全合理。“空气单元法”依据水头等效的原则,确定排水孔等效渗透系数,即将排水孔视为一种强渗透介质,模拟其排水效果;通过调整排水孔的渗透系数,即可计算排水孔不同堵塞工况下的应力场和渗流场。

如何真实反映富水岩质高边坡(下文简称边坡)深层排水孔(下文简称排水孔)堵塞对边坡稳定性的影响,是笔者研究的重点。依托大湾沟 2 号深路堑边坡工程,基于排水孔模拟的空气单元法,利用有限元软件进行数值计算,开展排水孔不同工况下的坡内水位变化以及支护结构的力学响应研究,并计算各种堵塞工况下的安全系数,定量评价排水孔堵塞对边坡稳定性的影响,提出富水区边坡支护结构的设计新思路。

1 计算理论

1.1 渗流折射定律

由渗流基本理论可知,流体在不同介质中的渗流速度不同,穿越不同介质时渗流方向也会随之改变。假设介质 I 的渗透系数为 k_1 , 介质 II 的渗透系数为 k_2 , 界面上某一点附近的渗透速度和水头在两介质中的值依次为 v_1 、 v_2 和 H_1 、 H_2 ; v_1 、 v_2 与分界面法向夹角分别为 θ_1 、 θ_2 , 图 1 为渗流折射示意图。界面上按照水头相等和法向分速度相等的原则,其渗流折射定律为^[15]

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{k_1}{k_2} \quad (1)$$

从式(1)可以看出,折射角 θ_2 随 k_2 增大而增大, $k_2 \gg k_1$ 时, θ_2 接近 90° , 表明强渗透介质可以改变渗流的方向从而达到导水的目的。基于上述理论,采用空气单元法模拟排水孔的排水效果,若 k_1 、 k_2 分别表示岩体和排水孔的渗透系数,在 k_2 从等效渗透

系数逐渐减小过程中,排水孔的排水作用不断减弱,这一过程物理可描述为排水孔的堵塞过程;当 $k_2 = k_1$ 时,排水孔成为和岩体一样的弱透水介质,表明排水孔堵塞失效。

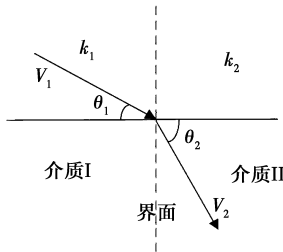


图 1 渗流折射示意图

Fig. 1 Diagram of seepage refraction

1.2 边坡岩体渗透系数

岩体的渗透系数与饱和度、孔隙水压力相关,为研究三者之间的关系,学者们提出了多种数学模型进行拟合,其中,经典 Van Genuchten 模型在工程中得到了广泛的应用^[16],其表达式为

$$\begin{cases} \theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|^n)^m} \theta_r \\ m = 1 - \frac{1}{n}, 0 < m < 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (3)$$

式中: θ 为体积含水率; θ_r 为残余含水率; θ_s 为饱和含水率; h 为水头高度; K_s 为饱和渗透系数; m 、 n 为水力学特征曲线形状参数。模型中有 4 个独立的参数:残余含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 、经验拟合参数 a 和 n 。已有人^[17-19]对这些参数取值进行过研究,并针对不同性质的岩层给出了一系列经验值。

1.3 岩体抗剪强度参数

实验测定的粘聚力、摩擦角一般为岩石的强度参数,实质上岩体本身存在节理和裂隙,需要参数进行修正。修正的方法为:在一定范围内,按照 Hoek-Brown (H-B)强度准则和 Mohr-Coulomb (M-C)强度准则覆盖的面积相等的原则(见图 2),选取相应的最大围压上限 $\sigma_{3\max}$ 和抗拉强度 σ_t ,然后在 $(\sigma_t, \sigma_{3\max})$ 范围内基于 M-C 强度准则进行拟合。表达式为^[20]

$$c = \frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{\frac{1+6am_b(s+m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (4)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)6am_b(s+m_b \sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小压应力; σ_c 为岩石单轴抗压强度; m_b 、 s 、 a 为反映岩体特征的经验参数,其中 m_b 、 a 为针对不同岩石的量纲为 1 的经验参数, s 反映岩体的破碎程度,取值范围 0.0~1.0,对于完整岩体(即岩石), $s=1$; $\sigma_{3n} = \sigma_{3\max} / \sigma_c$ 。

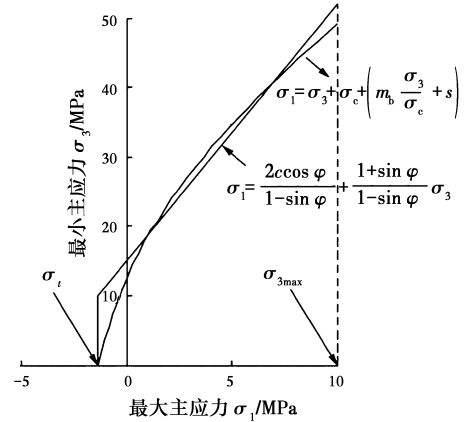


图 2 等效 H-B 和 M-C 准则中最小主应力和最大主应力的关系

Fig. 2 Relationship between minimum principal stress and maximum principal stress in equivalent M-C and H-B criterion

1.4 安全系数

边坡的失稳常常是由于外界因素的影响导致边坡岩体的力学性质改变,工程实践表明,利用强度折减法计算边坡的安全系数是一种较合理的方法,已被国际工程界广泛认可。当强度折减时,将岩体的粘聚力和摩擦角同时折减后进行数值计算,折减的方法为^[21]

$$\tau = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (6)$$

式中: c' 、 φ' 分别为折减后的岩体粘聚力和摩擦角,其起算格式为

$$\begin{cases} c' = \frac{c}{F_s} \\ \tan \varphi' = \frac{\tan \varphi}{F_s} \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_s 为达到极限平衡状态的折减系数,即安全系数,数值计算中,定义特征点位移发生突变时的折减系数为安全系数。

2 数值计算模型

2.1 工程概况

以大湾沟 2 号深路堑边坡工程为依托,工程地点岩层分为两层:第 1 层为粉质黏土,黄褐色,厚约 1 m;第 2 层为微风化灰岩,深灰色、浅肉红色,厚层

状构造;方解石脉发育,节理裂隙较发育,裂隙面富有铁质;岩芯局部溶蚀、溶隙发育。

边坡分为 4 级,从下往上依次是 1 级、2 级、3 级和 4 级,坡度依次是 1 : 0.75、1 : 0.5、1 : 0.5、1 : 0.5。各级边坡高度均为 10 m。边坡最大高度 43.3 m。由于地下水位较高,第 1、2、3 级边坡设平孔排水,每级边坡设两层排水孔,长度为 15 m,仰角为 10°,横向布置间距为 6 m,排水孔直径为 100 mm,采用 FH100 软式透水管,在靠近出水口距离 60 cm 长度范围内用粘性土或止水材料堵塞钻孔与排水孔之间的空隙。边坡开挖后及时进行防护封闭,以防止表层岩体风化剥落。

边坡以框架式格构(下文简称格构)和锚杆共同作为边坡的支护体系,格构横梁间距为 2.5 m,竖梁间距为 3 m,底部采用 M7.5 浆砌片石进行镶边,格构断面采用 0.3 m × 0.3 m 钢筋混凝土;锚杆为全长粘结式结构,采用 Φ25 螺纹钢筋制作,与水平面成 23°夹角,锚固于格构框架节点位置。

2.2 数值模型

利用 ABAQUS 有限元软件进行渗流场与应力场耦合分析,取边坡延伸方向 6 m 进行三维数值建模。整个模型尺寸大小为 100 m(长) × 6 m(宽) × 77 m(高),岩体和排水孔采用 C3D8RP 孔压单元,

格构采用 C3D8R 三维应力单元,锚杆采用 T3D2 嵌入式桁架单元。三维模型见图 3。

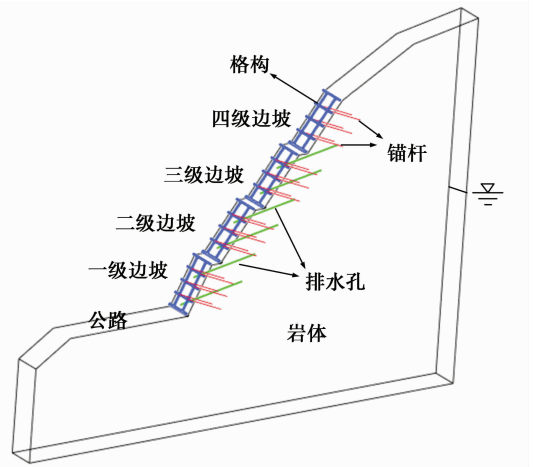


图 3 三维数值模型

Fig. 3 Three-dimensional numerical model

模型中岩体为服从 M-C 屈服准则与非关联流动法则的理想弹塑性材料,格构支护采用 Drucker-Prager (D-P)理想弹塑性模型,排水孔和锚杆支护结构视为理想线弹性体。边界条件为:坡面及路面为自由边界,模型左右两侧以及边坡延伸方向施加法向约束,模型底部约束所有方向的自由度,地下水位采用定水头边界。模型计算参数见表 1。

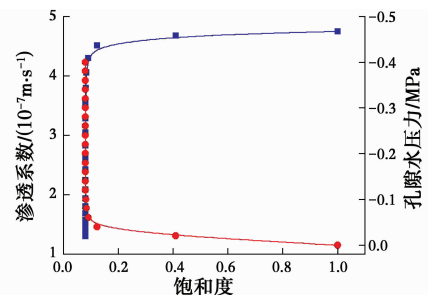
表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

材料	材料模型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	饱和渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	粘聚力/MPa	摩擦角/(°)
岩体	Mohr-Coulomb	2 450	0.9	0.35	4.75×10^{-7}	4.168	35.23
排水孔	线弹性	1	0.9	0.35	4.75×10^{-1}		
格构	Drucker-Prager	2 550	28.0	0.30			
锚杆	线弹性	7 800	210.0	0.20			

根据工程勘察地质报告,由室内常规试验、矿物组成和不连续面描述确定岩石的强度参数,其中 $m_b = 2.923$ 、 $s = 0.0063$ 、 $a = 0.502$;经计算可得,岩体的粘聚力为 4.168 MPa,内摩擦角为 35.23°。

计算中涉及的边坡岩体渗透系数、饱和度和孔隙水压力之间的关系利用 Van Genuchten 模型拟合得到,结合已有研究成果和工程实际情况,4 个拟合参数的取值为:残余含水率 θ_r 为 0.057,饱和含水率 θ_s 为 0.269,经验拟合参数 a 、 n 分别为 0.023、3.441,将拟合结果绘制成曲线,如图 4 所示。



注: —■— 渗透系数随饱和度的变化曲线
—●— 孔隙水压力随饱和度的变化曲线

图 4 岩体的水力学特征曲线

Fig. 4 Hydraulic characteristic curve of rock mass

3 等效渗透系数确定

采用等效的方法模拟排水孔的排水效果,实质是利用强渗透性介质的强导水作用,只需确定排水孔的等效渗透系数,便可模拟排水孔的排水效果,并用于后续堵塞工况分析。为得到排水孔等效渗透系数,操作流程为:首先按照正常排水条件计算边坡的渗流场,即排水孔单元不参与数值计算,仅在排水孔内赋予排水边界;然后利用空气单元法模拟排水孔,即赋予排水孔单元较大的渗透系数。两种方法各得出一个地下水位线,对两种计算结果进行对比分析,然后调整排水孔渗透系数,直至两种方法计算得出的地下水位线近似重合,此时对应的排水孔渗透系数即为等效渗透系数。

基于坡内水位等效的原则,确定排水孔等效渗透系数,详细计算过程见文献[14]。排水孔正常排水工况下,等效渗透系数的计算结果为 0.475 m/s。图 5 为边坡不排水与排水状况的孔隙水压力云图。

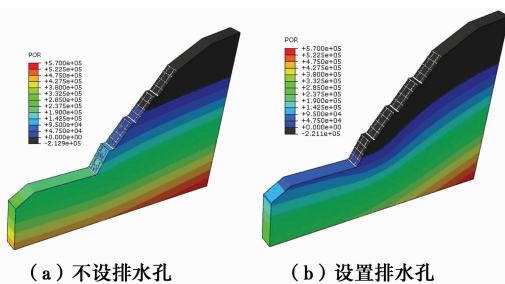


图 5 孔隙水压力云图

Fig. 5 Nephogram of pore pressure

由计算结果可知,不设排水孔时,坡内地下水位呈一个近似水平面;计入排水孔的作用后,靠近排水孔附近坡内地下水位显著降低;取边坡的一个横断面进行分析,坡内水位线整体上呈近“S”曲线,最低水位出现在一级边坡下部排水孔孔口附近。图 6 为边坡局部排水孔流速矢量图,由图 6 可以看出,岩体内渗流方向指向排水孔,并通过排水孔排出坡体,说

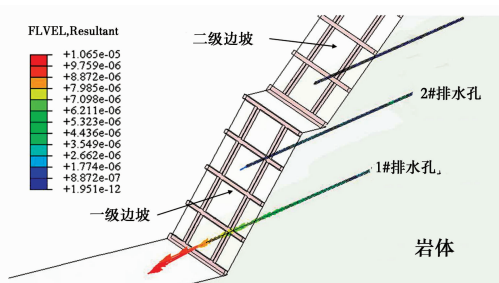


图 6 局部排水孔流速矢量图

Fig. 6 Vector diagram local drainage holes

明上述方法模拟边坡排水过程能达到预期效果。然而,排水孔在长期排水过程中,不可避免地会出现不同程度的堵塞,有必要研究排水孔堵塞对边坡稳定性的影响。

4 数值计算结果

4.1 地下水位分析

在数值模型的基础上,赋予排水孔相应的渗透系数,模拟不同堵塞工况。为了便于描述排水孔的堵塞状态,引入相对渗透系数 R 的概念^[13],其表达式为

$$R = \frac{k_2}{k_1} \quad (8)$$

式中: k_1 、 k_2 分别为岩体和排水孔的渗透系数。此外,定义排水孔堵塞系数 B ,用以反映排水孔的堵塞程度,其表达式为

$$B = \left| 1 - \frac{\lg R}{\lg \frac{k_m}{k_1}} \right| \quad (9)$$

式中: k_m 为排水孔正常排水情况下的等效渗透系数; B 在物理上可表示为排水孔的堵塞状态,变化范围是 0~1,0 和 1 分别表示排水孔正常排水和堵塞失效的工况;从 0 到 1 变化反映排水孔堵塞程度逐渐增大的过程。不同的堵塞系数 B ,对应于不同的排水孔渗透系数,排水孔单元渗透系数减小,则其中的渗流速度也相应地减小,宏观上表现为排水量减小,这与排水孔堵塞的实质相吻合。为了便于后续研究,每一种工况都将所有排水孔的渗透系数赋予相同的值,由渗流折射定律可知,各排水孔在同一工况下堵塞程度相同。

计算出排水孔在不同堵塞工况的地下水位后,取一个横断面,绘制不同堵塞系数对应的坡内地下水位曲线,得出图 7 所示的结果。从下往上依次对应排水孔堵塞系数 B 逐渐增大的地下水位曲线。由图 7 可见,随排水孔堵塞程度增大,坡内地下水位明显上升;比较排水孔正常排水和完全堵塞两种工况,坡表水位由 1 级边坡上升至 3 级边坡,水位变化最大为 21.15 m,约为边坡总体高度的一半。由此可见,排水孔堵塞对坡内地下水位的影响不容忽视。

以坡表孔隙水压力变化作为辅助分析,深入探究这一问题。在 1 级边坡临空面上取两个横向监控路径,分别位于排水孔上方,将沿路径的距离表述为格构的横向跨度 D 。记录监控路径上各点在不同堵塞工况下的孔隙水压力,图 8 为监控路径示意及孔隙水压力变化图。

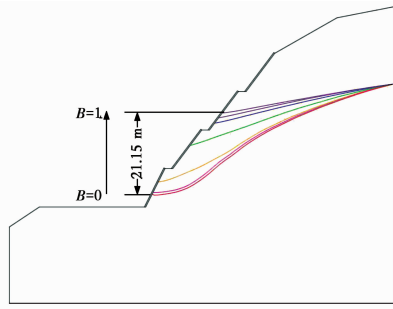


图 7 排水孔在不同堵塞状态下的坡内地下水变化
Fig. 7 Variation of groundwater level after the slope drainage holes in different blockage state

均呈现出不同的规律。

取边坡一个横断面(位于两列排水管中间位置),分析排水孔堵塞后边坡整体水平位移。将排水孔堵塞工况下各点水平位移绘制成等值线图,结果如图 9 所示。坡趾区域为岩体最大水平位移的位置;在坡面上,从坡趾往上,水平位移递减,在边坡岩体顶部出现了反方向的位移,整个坡体形成了一个“顺时针”旋转的下错变形机制。由此可以证明,接近坡趾剪出口部位的岩体最容易发生破坏,这与 Cao 等^[22]的计算结果基本一致,可以在此基础上进行格构变形响应分析。

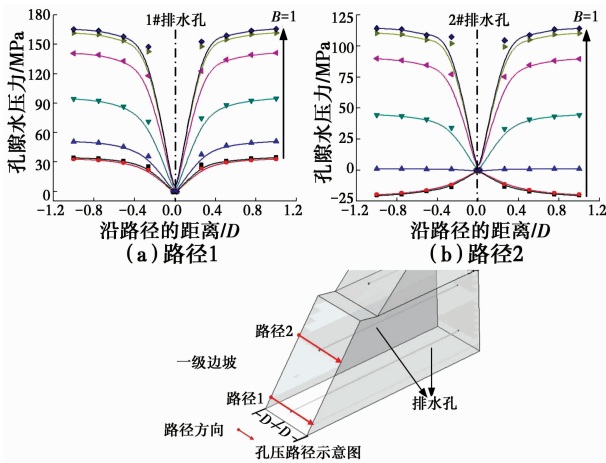


图 8 孔隙水压力路径示意图及其变化规律
Fig. 8 Paths and change law of pore water pressure

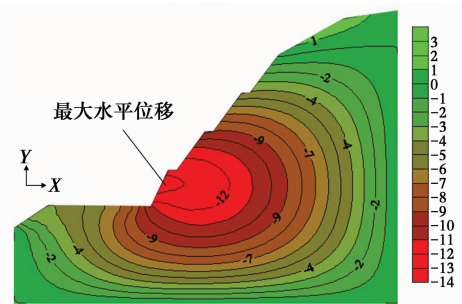


图 9 岩体水平位移等值线图(单位:mm)
Fig. 9 Contour map of horizontal displacement of rock mass

图 8 中,从下往上依次是排水孔堵塞系数逐渐增大过程中路径上孔隙水压力曲线。从图 8 可以直观地看出,两个路径的结果表现出一些相似的规律。堵塞系数增大,临空面上孔隙水压力增加较为明显;此外,在排水孔孔口附近,两个路径上的孔隙水压力均出现突变,尤其在路径 2 上出现了负压区,进一步证明了排水孔对坡体的排水降压作用。

从边坡格构支护的水平位移 U_x 和竖向位移 U_y 两个角度出发,研究排水孔堵塞对边坡格构支护位移的影响。取 3 种排水孔工况进行分析,工况 1:正常排水($B=0$);工况 2:局部堵塞($B=0.5$);工况 3:完全堵塞($B=1$)。每一级边坡格构上分别建一条监控路径,记录各点位移,图 10 为所取路径示意图。取格构的一个竖梁,按箭头所示方向从底部到顶部建立路径。每级边坡均在相同位置建立路径,取 1 级边坡格构作为示意。位移计算结果如图 11 所示。

由路径 2 的计算结果可知,随排水孔堵塞系数增大,排水孔周围坡表的孔隙水压力由负值过渡为正值,说明排水孔正常排水工况下,坡表水位位于 2 号排水孔之下;随排水孔堵塞程度的发展,临空面上的孔隙水压力增加,最后发展到正压状态,表明坡表水位上升到 2 号排水孔上部,这与图 8 的坡内水位变化结果吻合。

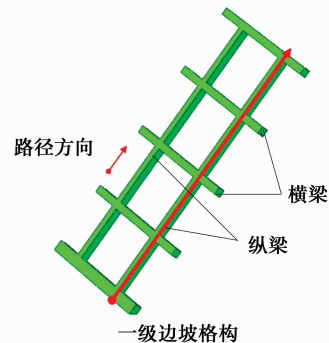


图 10 1 级边坡格构路径示意图

4.2 格构变形响应

设置支护结构是边坡稳定的重要保障,支护结构与边坡岩体相互作用,相互制约,可用支护结构的位移变化间接表现岩体的变形。由于多级边坡的特殊性,坡面各点的位移变化特征在数值上与方向上

Fig. 10 Diagram of path of the lattice in 1st-stage slope

从整体上看,格构水平位移从下往上依次减小;排水孔堵塞对各级格构水平位移的影响顺序为:1

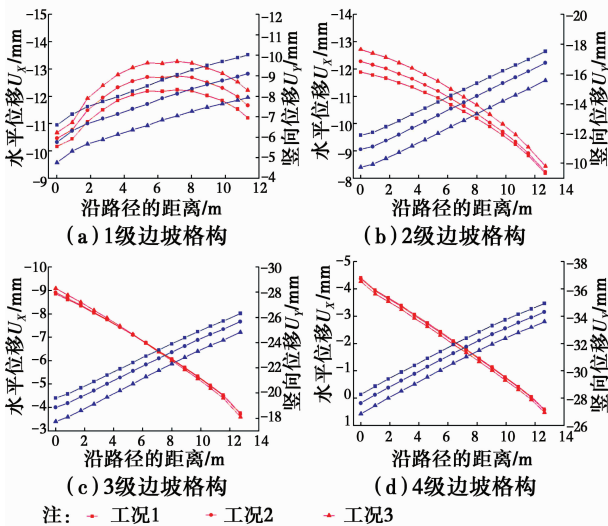


图 11 支护结构位移的变化

Fig. 11 Variation of displacement of supporting structure

级 > 2 级 > 3 级、4 级 (由于 3 级和 4 级边坡格构变化较小, 故不做单独比较)。对于 1 级边坡格构, 最大水平位移位于格构中部, 说明 1 级边坡岩体最大位移出现在 1 级边坡中部剪出口位置, 并且随着排水孔堵塞系数增大, 这种现象表现更为显著。其原因是, 边坡开挖后坡脚岩体的抗力不足, 排水孔堵塞又导致坡内地下水位抬升, 进而边坡岩体下滑力增大, 因此, 不难解释坡趾水平位移增大的现象; 对于 2 级边坡格构, 随边坡高度的增加, 排水孔堵塞对格构水平位移的影响逐渐减小。这是因为, 排水孔正常排水工况下, 地下水位在 2 级边坡之下, 随排水孔堵塞的发展, 地下水位先上升到 2 级边坡底部, 使得底部水平位移增大, 水位持续抬升, 2 级边坡上部岩体水平位移也受其影响而增大, 但相比于下部岩体, 这种影响并不明显; 对于 3 级和 4 级边坡格构, 排水孔堵塞对其水平位移的影响较小, 与 1 级和 2 级边坡不同的是, 在 3 级边坡格构上部, 排水孔堵塞后格构水平位移减小, 这是因为, 排水孔完全堵塞后, 坡表水位在 3 级边坡格构中部, 导致其下部岩体和格构的水平位移增大, 潜在滑体下错变形导致上部岩体和格构产生了方向变形。

与水平位移不同, 随排水孔堵塞系数增大, 各级格边坡构的竖向位移减小。从图中可知, 格构竖向位移与排水孔堵塞系数呈负相关关系。这是由于排水孔堵塞导致坡内地下水位抬升, 坡内孔隙水压力增加与岩体吸水体积膨胀二者共同作用, 从而使边坡岩体的竖向位移出现了反向增长。需要指出的是, 这并非说明边坡的稳定性更佳, 相反, 这会导致

边坡岩体的变形程度恶化, 对边坡的稳定性造成严重威胁。

综合以上分析结果可知, 边坡的最不利位置为坡趾剪出口附近岩体, 位移有较大幅度的增长, 因此, 在支护结构支护结构设计时, 应加强 1 级边坡格构支护强度。

4.3 锚杆轴力分析

以上分析仅仅是从表层支护结构变形的角度阐述排水孔堵塞的影响, 在此基础上, 进一步分析排水孔堵塞对锚杆的影响, 研究排水孔堵塞对边坡深部岩体的危害。提取 3 个典型位置的锚杆作为研究对象, 1# 和 2# 锚杆分别位于 1 级边坡的底部和顶部, 3# 锚杆位于 2 级边坡的顶部。将排水孔不同堵塞工况的锚杆轴力结果绘制成曲线, 图 12 为不同堵塞工况下的锚杆轴力变化曲线以及所取典型锚杆的示意图。

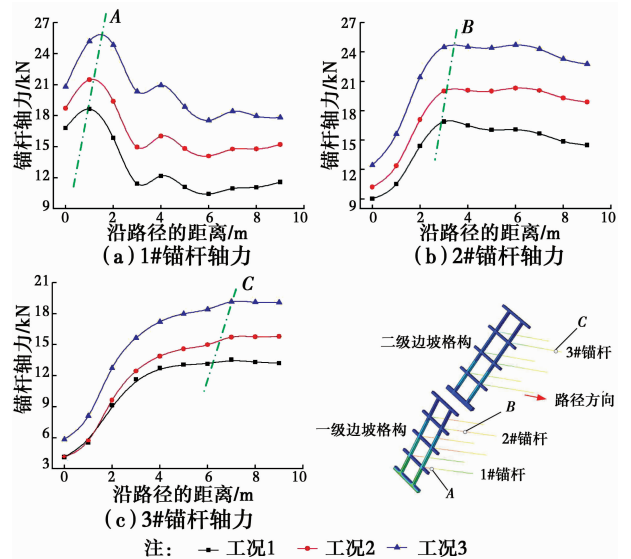


图 12 锚杆轴力变化

Fig. 12 Variation of anchor axial force

由图 12 可知, 排水孔堵塞对锚杆轴力的影响显著, 不仅表现在数值上, 也表现在最大轴力出现的位置。在数值上, 3 根锚杆在排水孔完全堵塞状态相对于正常排水状态分别提高了 35.14%、44.95% 和 44.45%。其原因是, 岩体内部地下水位上升导致边坡岩体内部变形增大, 使得锚杆的轴力亦随之增大; 从宏观上看, 1 号、2 号和 3 号锚杆最大轴力分别出现在离坡面约 1、3、9 m 的位置, 对应于示意图中的 A、B、C 点。随着排水孔堵塞系数增大, 最大锚杆轴力对应的位置向边坡深部岩体发展, 图中虚线对应最大轴力。由叶海林等^[23]的研究结果可知, 锚杆轴力最大的点对应于潜在滑动面的位置。因此, 可用

一系列锚杆的最大轴力点定性判断边坡的潜滑动面范围,由图中最大轴出现的位置变化可知,潜在滑动面沿坡趾剪出口向坡内延伸,且在排水孔堵塞后,有向岩体内部扩展的态势。

随排水孔堵塞系数增大,3根锚杆轴力变化也呈现出了不同的规律。1#和2#锚杆的轴力均表现为中间大两边小,而3#锚杆的轴力沿路径方向增大后并没有出现明显的下降;在数值上,3#锚杆的轴力明显小于1#锚杆和2#锚杆,说明3#锚杆轴力没有得到较好发挥;此外,3#锚杆处于工况1和工况2时,靠近坡面的位置轴力大致相等,这是因为,在这两种工况下,地下水水位均在3#锚杆之下,因此,靠近坡面的锚杆段在这两种工况下轴力并无太大差异;而对于远离坡面的锚杆段,在工况2时位于地下水水位之下,所以,排水孔堵塞后,该锚杆段轴力变化较显著。

综上所述,在富水区宜适当增加锚杆长度,尤其是边坡上部锚杆,确保其锚固范围穿越潜在滑动体的范围,较大限度发挥其锚固效果。

4.4 边坡安全系数

利用强度折减法计算边坡的安全系数,研究排水孔堵塞程度与边坡安全性的关系。计算中,取一个坡顶节点的位移变化为标准,当坡顶节点位移发生突变,则此时对应的强度折减系数即是边坡的安全系数,将不同堵塞系数下的安全系数绘制成曲线如图13所示。

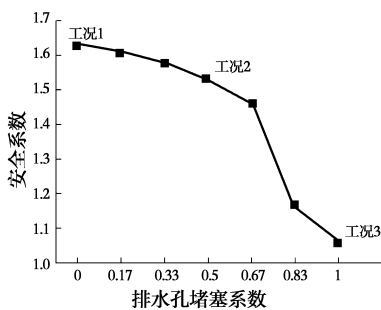


图13 安全系数变化

Fig. 13 Variation of safety factor

由图可知,随排水孔堵塞系数增大,边坡的安全系数减小,堵塞系数小于0.67时,安全系数减小幅度较小,当排水孔堵塞系数大于0.67时,边坡的安全系数表现出急剧减小。其原因是,排水孔堵塞程度较小时,坡内地下水仍可以通过排水孔排出坡体,不同的是排水孔出现堵塞后孔内渗流量减少,在一定程度上抬升了坡体内部地下水位,造成边坡安全系数小幅度变化;而当排水孔接近完全堵塞时,排水

孔内的地下水无法及时排出,导致边坡岩体力学性质劣化,严重影响边坡的安全性。

5 结论

建立了考虑边坡排水孔堵塞的边坡稳定性分析模型,利用数值方法研究边坡排水孔不同堵塞工况下的坡内地下水位和支护结构力学响应,探讨了排水孔堵塞对边坡稳定性的影响,得到如下结论:

1)高边坡排水孔堵塞后,坡内地下水位显著抬升,一方面会导致岩体的力学性质劣化,另一方面增大边坡岩体的下滑力,严重威胁边坡的稳定和支护结构的安全。

2)格构支护的变形响应受排水孔堵塞的影响显著,主要表现为:边坡最危险位置为坡趾剪出口附近岩体。坡趾剪出口位置出现了较大的侧向位移,有向外挤出的趋势,排水孔堵塞后,这种特征表现更加明显。

3)排水孔堵塞后,锚杆轴力有较大幅度的增长,位于自由水面下的锚杆段尤为显著;排水孔堵塞后,锚杆最大轴力对应的位置向边坡岩体深处发展,表明边坡潜在滑体有向岩体内部渐进扩展的趋势。

4)排水孔堵塞后,边坡的安全系数有大幅度的降低,尤其是排水孔接近完全堵塞状态时,排水孔堵塞会造成边坡安全系数的急剧减小,严重威胁边坡的安全性和支护结构的安全。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544. HUANG R Q. Geodynamical process and stability control of high rock slope development [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525-1544. (in Chinese)
- [2] 李家春. 公路边坡降雨灾害评价方法与指标研究[D]. 西安:长安大学, 2005. LI J C. Study on the risk evaluation of rainfall hazard on highway slope [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [3] 刘璐, 牛文全, Zhou Bob. 细小泥沙粒径对迷宫流道灌水器堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 87-93. LIU L, NIU W Q, ZHOU B. Influence of sediment particle size on clogging performance of labyrinth path emitters [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 87-93. (in Chinese)
- [4] 周卓. 岩溶地区地下水渗流结晶堵塞隧道排水管机理

- 研究及处治建议[D]. 西安:长安大学,2015.
- ZHOU Z. Study on the plug of the tunnel drainage pipe mechanism caused by groundwater seepage crystallization in karst area and the proposal of treatment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [5] OASELLES-OSORIO A, GARCIA J. Performance of experimental horizontal subsurface flow constructed wetlands fed with dissolved or particulate organic matter [J]. *Water Research*, 2006, 40 (19): 3603-3611.
- [6] ZHONG X, WU Y. Bioclogging in porous media under continuous-flow condition [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 68(8): 2417-2425.
- [7] PEDESCOLL A, CORZO A, ALVAREZ E, et al. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation [J]. *Water Research*, 2011, 45(12): 3579-3589.
- [8] HUA G F, ZENG Y T, ZHOU Z W, et al. Applying a resting operation to alleviate bioclogging in vertical flow constructed wetlands: An experimental lab evaluation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 136 (8): 47-53.
- [9] MORVANNOU A, FORQUET N, VANCLOOSTER M, et al. Characterizing hydraulic properties of filter material of a vertical flow constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60: 325-335.
- [10] LI Y K, LIU Y Z, LI G B, et al. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters [J]. *Irrigation Science*, 2012, 30 (1): 43-56.
- [11] 王恩志,王洪涛,邓旭东. “以管代孔”——排水孔模拟方法探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(3): 346-349.
- WANG E Z, WANG H T, DENG X D. Pipe to represent hole-Numerical method for simulating single drainage hole in rock-masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(3): 346-349. (in Chinese)
- [12] 王建,姜海霞. 排水孔模拟的汇线单元法[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(5): 677-684.
- WANG J, JIANG H X. Simulating drainage holes with line sink drainage element [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(5): 677-684. (in Chinese)
- [13] 姜海霞,王建. 排水子结构节点凝聚的节点映射法[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(1): 68-70.
- JIANG H X, WANG J. Node mapping method for coacervation degree of freedom for inner nodes in drainage substructure [J]. *Water Resources and Power*, 2007, 25(1): 68-70. (in Chinese)
- [14] 胡静,陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 281-283.
- HU J, CHEN S H. Air element method for modeling drainage holes in seepage analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 281-283. (in Chinese)
- [15] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京:地质出版社,1986
- XUE Y Q. Theory of groundwater dynamic [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986. (in Chinese)
- [16] 张社荣,谭尧升,王超,等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(Sup2): 4102-4112.
- ZHANG S R, TAN Y S, WANG C, et al. Influence of heavy rainfall characteristics on saturated-unsaturated slope failure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (Sup2): 4102-4112. (in Chinese)
- [17] 杨改强,霍丽娟,杨国义,等. 利用 MATLAB 拟合 van Genuchten 方程参数的研究[J]. *土壤*, 2010, 42(2): 268-274.
- YANG G Q, HUO L J, YANG G Y, et al. Research on fitting van Genuchten equation parameter with Matlab software [J]. *Soils*, 2010, 42(2): 268-274. (in Chinese)
- [18] 郭向红,孙西欢,马娟娟. 基于混合遗传算法估计 van Genuchten 方程参数[J]. *水科学进展*, 2009, 20(5): 677-682.
- GUO X H, SUN X H, MA J J. Parametric estimation of the van Gehuchten's equation based on hybrid genetic algorithm [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20 (5): 677-682. (in Chinese)
- [19] 张露,王益权,韩霁昌,等. 基于 van Genuchten 模型的渭北苹果园土壤水分能量特征分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 120-126.
- ZHANG L, WANG Y Q, HAN J C, et al. Analysis on soil moisture energy feature of apple orchards in Weibei area based on van Genuchten model [J]. *Transaction of the CSAE*, 2016, 32(19): 120-126. (in Chinese)
- [20] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition [G]//HAMMAHR, BAWDEN W F, CURRAN J, et al. Proceedings of the North American Rock Mechanics

- Society NARMS-TAC 2002, Toronto: University of Toronto Press, 2002: 267-273.
- [21] 郑颖人,赵尚毅. 边(滑)坡工程设计中安全系数的讨论[J]. 岩石力学与工程学报,2006, 25(9): 1937-1940.
ZHENG Y R, ZHAO S Y. Discussion on safety factors of slope and landslide engineering design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (9): 1937-1940. (in Chinese)
- [22] 曹兴松,肖世国,何洪,等. 高边坡多级锚杆框架上坡体压力模型试验[J]. 地下空间与工程学报,2015, 11 (5): 1159-1163.
CAO X S, XIAO S G, HE H, et al. Model test on characteristics of slope pressure on multi-frame beams with anchor bolts used to stabilize high slope [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1159-1163. (in Chinese)
- [23] 叶海林,黄润秋,郑颖人,等. 岩质边坡锚杆支护参数地震敏感性分析[J]. 岩土工程学报,2010, 32(9): 1374-1379.
YE H L, HUANG R Q, ZHENG Y R, et al. Sensitivity analysis of parameters for bolts in rock slopes under earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1374-1379. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)