

涔天河渠道土质边坡失稳分析与对策研究

李毅^{1,2},程宝平^{1,2},何学春³,张贵金^{1,2},梁经纬^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114;3. 湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司,湖南 长沙 410007)

摘要:【目的】探究因不合理开挖导致的渠道土质边坡的失稳问题。【方法】以涔天河干渠切方土质边坡为例,用 FLAC^{3D} 模拟其施工过程,复核开挖设计方案,分析边坡开挖诱发牵引式滑坡的破坏机理。针对失稳土质边坡,提出边坡锚固支护、渠道衬砌(方案一)和边坡锚固、明渠变暗涵(方案二)两种加固处置方案,并分析了处置措施的有效性。【结果】对边坡使用方案二支护加固后,其稳定性明显优于方案一,最不利工况的安全系数可达 1.18 以上,边坡的总体安全性可以得到保障,而且能最大限度地减小边坡开挖对地表变形的影响,研究成果可指导边坡后期施工的顺利进行。基于 TOUGH2 模拟脉动灌浆,通过精细化模拟灌浆过程,确定灌浆方案和参数,并以质量分数的形式在 FLAC^{3D} 中通过插值修改强度参数,采用强度折减法计算开挖边坡安全系数,确定预加固设计方案。【结论】对于类似边坡,应预加固再开挖,预加固措施优先推荐脉动灌浆方式,以提高边坡的整体稳定性。采用 3 排孔、孔排距 2 m、孔深 8 m 的布孔方案后,边坡安全系数可达到 1.50 以上。与直接开挖相比,该方案有效降低了边坡垮塌的风险,研究成果可供类似工程参考。

关键词:渠道土质边坡;稳定性分析;锚固支护;灌浆预加固;不合理开挖

中图分类号:TV223

文献标志码:A

Instability analysis and countermeasure research of soil slope in Centianhe canal

LI Yi^{1,2}, CHENG Bao-ping^{1,2}, HE Xue-chun³, ZHANG Gui-jin^{1,2}, LIANG Jing-wei^{1,2}

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Hunan Lishui Hydro & Power Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to explore the problem of soil slope instability of canal caused by unreasonable excavation. [Methods] Taking the incised soil slope of Centianhe trunk canal as an example, its construction process was restored by FLAC^{3D} numerical simulation, the excavation design scheme was reviewed, and the failure mechanism of traction landslide induced by slope excavation was analyzed. Aiming at the instable soil slope, two reinforcement treatment schemes were put forward, namely the scheme 1 (slope anchoring support, canal lining) and the scheme 2 (slope anchoring, hidden culvert replacing open channel), and the effectiveness of the treatment measures was analyzed. [Findings] The stability of the slope reinforced by the scheme 2 is obviously better than that of the scheme

收稿日期:2021-08-28

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50336);湖南省水利科技项目(2017-230-4, XSKJ2018179-04);湖南省教育厅科研项目(19B018)

通信作者:李毅(1988—),男,副教授,主要从事水利与岩土工程方面的研究。E-mail: liyi0217@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

1, the safety factor can reach more than 1.18 under the most unfavourable condition, and the overall safety of the slope can be guaranteed. Moreover, the influence of slope excavation on surface deformation can be minimized, and the research results can guide the smooth construction of slope in the later period. The pulsating grouting was simulated based on TOUGH2, the grouting scheme and parameters were determined by finely simulating the grouting process, and the strength parameters were modified by interpolation in FLAC^{3D} in the form of mass fraction. The strength reduction method was used to calculate the safety factor of the excavated slope to determine the pre-reinforcement design scheme. [Conclusions] For similar slopes, they should be pre-reinforced before excavation, and the pre-reinforcement measures should give priority to the pulsating grouting method to improve the overall stability of the slope. The slope safety factor reaches more than 1.50 after using the hole-layout scheme of 3 rows of holes, 2 m hole spacing and 8 m hole depth. Compared with the direct excavation, the scheme can effectively reduce the risk of slope collapse, and the research results can be used as a reference for similar projects.

Key words: channel soil slope; stability analysis; anchoring support; grouting pre-reinforcement; unreasonable excavation

丘陵及山区长距离引水干渠一般穿过山腰,由渡槽、倒虹吸管段、隧洞等组成。穿过山腰的渠段不可避免地涉及削坡、填方等边坡工程,沿线也往往存在岩溶、断层、软岩、特殊土等不良地质条件,以及变化的地表水、地下水等水文地质条件^[1]。切坡修渠、开挖扰动极易导致土质边坡失稳,发生大面积滑坡。由于设计不当、支护不及时等造成滑坡的现象十分普遍,甚至在采取补救措施后还会再次发生滑坡、崩塌以及泥石流等地质灾害^[2]。

边坡失稳造成的滑坡、崩塌不仅影响工程进度和造价,还会使临近设施及居民面临安全风险^[3]。多年来,相关学者结合实际工程,为寻求有效的边坡加固方案而开展了大量的研究,取得了一系列的研究成果^[4-7]。施建勇等^[8]对传统有限元强度折减法进行修正,提出切线弹性模量 E_t 的折减算法。李广信^[9]认为边坡工程稳定分析的风险主要在于强度指标,用强度折减系数代替安全系数可以正确地界定抗滑稳定分析中的荷载与抗力。郑明新等^[10]针对偏压隧道洞口段边坡提出了相应的加固方案,解决了偏压隧道施作套拱初期局部坡体滑移的问题。ALONSO 等^[11]通过敏感性分析研究了降雨强度、降雨历时、土水特征曲线以及土壤渗透性对边坡稳定的影响。WU 等^[12]考虑渗流与变形的耦合关系,分析了非饱和多孔介

质降雨的入渗过程。付宏渊等^[13]、曾铃等^[14]考虑了渗流作用下边坡内孔隙水压力的变化和岩石软化效应的耦合作用对边坡稳定的影响,提出了降雨条件下软岩边坡稳定分析的新方法。张贵金等^[15]模拟裂隙岩体的脉动灌浆,分析灌浆预加固对边坡稳定性的影响。对于土质边坡,常用极限平衡法和有限元法进行稳定性分析,但极限平衡法不考虑岩土体自身的应力应变关系,而有限元法适用于研究小变形问题。FLAC^{3D} 是一款基于三维显式有限差分法的仿真计算软件^[16],可模拟岩土或其他材料的三维力学行为。

本研究结合湖南涔天河干渠切方土质边坡范围广、面积大等特点,基于 FLAC^{3D} 还原施工过程^[17],复核设计方案,根据破坏现状提出针对性的加固措施,并对加固后的边坡进行安全评价,评价结果可用于指导边坡下一步的安全开挖支护。对于类似边坡,基于 TOUGH2/Gel 模块模拟灌浆预加固措施,论证预加固再开挖方案的可行性,为类似工程预加固开挖设计与施工提供依据。

1 工程条件分析

1.1 自然地貌与地质条件

涔天河水库扩建工程为一等大(I)型工程,干渠长 240 km,灌区工程的设计灌溉面积为

111.46 万亩,涉及江华、江永、道县、宁远 4 县。其中,右总干渠 YZ23+950~YZ24+120 渠段发生大面积滑坡,该渠段地貌总体为山岭剥蚀堆积型地貌,沟谷与山坡相间分布,且与渠道走向大角度相交或垂直,地形起伏较大,山体高度为 300~500 m。山体下部为较平缓的岗垅,坡角一般为 15° 左右;中部稍陡,坡角一般为 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$;上部坡角则大于 30° 。山坡植被茂密,除部分乔木外,还有密集分布的灌木和蕨类及藤蔓植物,通行困难。

该边坡自地表向下分布的地层依次为第四系堆积层和泥盆系的碳酸盐岩。其中,第四系自上而下分为坡积层和残积层。坡积层主要为红色的可塑至硬塑黏土,含大量的铁铝氧化物,并夹有经过短距离搬运的灰岩碎屑和角砾,该层一般厚 3~5 m;坡积层下面为黄红至红黄色的碳酸盐岩风化残积层,该层黏土中含有较多残留于原位的全风化灰岩碎屑,厚度一般为 2~3 m。坡、残积层下面为上泥盆统的锡矿山组,其岩性为灰岩夹泥灰岩,岩层产状为:走向 $NE45^{\circ}$,倾向 NW,倾角 38° 左右,岩层倾向与边坡倾向相近或小角度斜交,构造节理较发育。本区降雨量较大,年均降水量为 1500 mm 左右,且主要集中于 4—6 月和 8—10 月。降水大部分沿地表形成径流,并从坡面和沟谷排泄,小部分渗入地层形成地下水。

1.2 滑坡现状

现场踏勘显示:滑坡沿渠道走向宽约 100 m,长约 70 m,滑体平均厚约 3 m,滑坡后缘呈弧形,整个滑体呈“圈椅”状,滑坡后缘陡峭,坡角达 70° 左右,滑动面呈圆弧状,符合一般的土质滑坡特征。经初步测算,该滑坡的面积为 $6\,300\text{ m}^2$ 左右,体积近 2.0 万 m^3 ,滑体物质为砖红色的第四系坡、残积含砾红黏土,滑坡规模属浅层小型的牵引式土质滑坡。

滑坡现状显示:原开挖的三级边坡已滑至下部,其前缘受阻于已开挖的渠道沟槽,沿渠道走向堆积,堆积高度超过渠顶 2 m 左右。原开挖的第三级边坡坡顶以上的天然斜坡受其下方开挖边坡向下滑移的牵引,出现了 30 多米长的破坏。滑坡上部形成了 3 个台阶状陡坎和错台,最上一级的陡坎高约 3.0 m,各级错台高约 1.0 m,水平位移约 0.5~2.0 m。现场踏勘发现,在已破坏的滑坡后缘以上,还存在 3~5 条裂缝,裂缝宽 10~

20 cm,长 5~10 m,可见深度 1.5 m 左右。这些拉张裂缝被蕨类植物覆盖,难以被发现,但实际上都属于该滑坡的组成部分,如不及时治理,该滑坡存在继续发展的高风险。

2 边坡失稳分析及处置方案

2.1 失稳机理定性分析

1) 地质条件较差。下伏基岩为顺层且倾角较大的灰岩,其透水性差且表面岩溶发育,致使岩土接触面附近的红黏土含水量高,成为软塑状态,在上部荷载作用下易产生向下的蠕滑变形。

2) 红黏土的特殊土体结构。红黏土颗粒表面和粒间孔隙中有较多的胶凝态氧化铁,可使红黏土的体积随含水量的变化而变化。当土体失水超过土的缩限时,氧化铁胶体的含水量将大大减少,表层土体因收缩开始出现网络状微裂隙,这使其更易受到大气的影 响。当大气中的湿度持续降低时,土体表层的裂隙进一步扩大并向深部延展,发育深度一般可达 3~4 m。这些收缩裂隙在干旱季节是深部土体失水的通道,在雨季又是浸水的通道。当地表水沿裂隙浸入时,裂隙因吸水而膨胀、闭合,如此反复致使红黏土的结构强度遭到严重破坏,从而导致边坡失稳和滑坡的形成。

3) 设计方面,根据边坡地质和岩土特点,结合现场勘查发现,三级开挖边坡的坡比均为 1:1.25,坡角均为 $38^{\circ}39'$,土坡的坡角等于其下伏岩层的倾角,开挖坡比偏陡,边坡支护无其他设计措施。因此,该边坡按第 III 类边坡的要求进行设计为宜。

4) 施工方面,边坡开挖后裸露时间较长(一年),边坡表层土体遭受雨水冲蚀、风化以及温度和湿度的频繁变化,致使边坡土体的结构强度有所降低。

5) 支护时机。在无任何边坡支护和加固的条件下,对较陡渠道沟槽(坡比 1:1)实施开挖,致使边坡坡脚被深切挖除,边坡前缘失去支撑。

2.2 数值模拟定量分析

2.2.1 边坡三维地质模型及参数

通过分析右总干渠 YZ23+950~YZ24+120 的工程地质条件,依据等高线地形图建立该渠段边坡的三维模型。地质模型分为 3 层,分别为覆

盖层、强风化层、中风化层。模型长 529 m, 宽 164 m, 最低高程 184 m, 铅直向上为 z 轴正向, 垂直渠线指向山顶为 y 轴正向, 结合右手螺旋法则建立坐标系。采用六面体和四面体对模型进行网格单元的划分, 共划分出 29 432 个单元, 节点共计 16 330 个, 计算模型见图 1。为方便后期对边坡开挖进行稳定性分析和对治理措施进行模拟, 本研究主要对原始状态下的 1[#] 和 2[#] 剖面进行分析。

对现场取回的土样进行渗透、密度、含水量、剪切强度、颗粒分析及液塑限试验, 得到土体的基本物理力学参数。根据设计院地质勘测资料和本

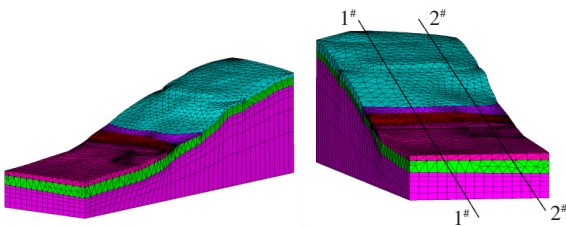


图 1 边坡三维网格模型

Fig. 1 3D mesh model of the slope

研究的试验成果, 参考前人经验, 对研究区域边坡相关土体的力学参数进行比较分析, 确定渠段岩土体物理力学等效参数, 结果见表 1。

表 1 渠段岩土体物理力学等效参数

Table 1 Equivalent parameters of rock and soil in the canal section							
地层	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	孔隙率	渗透率/D	密度/(kg · m ⁻³)
覆盖层	60.0	0.32	20.0	14.5	0.35	1.0E-08	1 780.0
强风化层	200.0	0.25	30.0	18.2	0.25	1.0E-10	1 940.0
中分化层	556.0	0.35	36.0	24.3	0.18	1.0E-12	2 115.0

2.2.2 边坡失稳分析

根据土体的物理力学参数, 以自重应力场为初始应力场, 采用莫尔-库仑弹塑性本构模型进行计算。模型底部受水平和法向 3 个方向的约束。初步设计计算结果见表 2。

表 2 切方边坡各工况下的最大位移(初步设计)

Table 2 Maximum displacement of incised slope under various working condition(initial design)

工况	剖面	最大位移/cm	安全系数
开挖	1 [#]	8.68	1.18
	2 [#]	3.57	
回填	1 [#]	8.73	1.19
	2 [#]	3.59	
降雨	1 [#]	16.67	1.01
	2 [#]	4.40	

在降雨工况下, 雨水的入渗使边坡的地下水位有所抬升, 加上地下水的渗流作用, 覆盖层土体被完全浸湿, 处于饱和状态^[18]。图 2~3 所示分别为 1[#] 和 2[#] 剖面降雨工况下的位移云图。由图 2~3 可以看出, 边坡变形量有所增大, 最大变形发生在 1[#] 剖面最高开挖处的后缘, 最大位移达到了 16.67 cm。2[#] 剖面最大位移为 4.40 cm。边坡

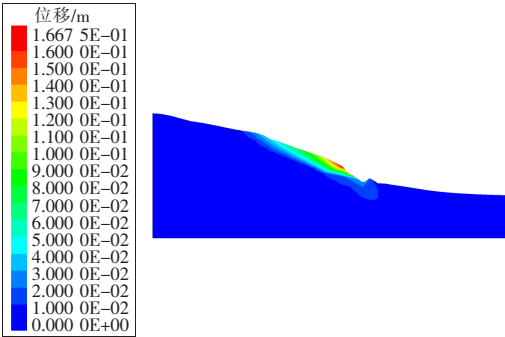


图 2 1[#] 剖面降雨工况下位移云图

Fig. 2 Displacement nephogram of section 1[#] under rainfall condition

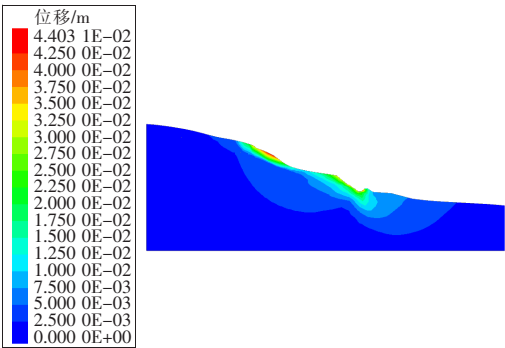


图 3 2[#] 剖面降雨工况下位移云图

Fig. 3 Displacement nephogram of section 2[#] under rainfall condition

整体安全系数减小为 1.01。小桩号(2[#]剖面)段地形平缓,渠道开挖方量较小,对原始边坡土体的扰动也较小;而大桩号(1[#]剖面)段地形陡峭,渠道开挖方量较大,在降雨工况下,根据边坡牵引式破坏机理,边坡易发生拉伸滑动破坏^[19]。边坡的模拟结果与实际的滑坡情况较吻合,说明模拟方法和参数选取较恰当,具有较高的可靠度。

2.3 滑坡处置优化方案及计算结果分析

2.3.1 滑坡处置优化方案

滑坡处置优化方案一:锚杆+衬砌。

1) 削坡减载:应清除现状滑坡体后缘以下已出现位移和开裂的全部土体。放坡:最上一级的坡比宜控制在 1:1.75,其余各级坡比宜控制在 1:1.5。

2) 锚杆支护:边坡自上而下逐级开挖和布设锚杆,锚杆钢筋采用 $\phi 25$ II 级变形钢筋,长 6.0 m,间距 2.0 m,按梅花形布置。钻孔直径为 10 mm,下倾角为 15°,低压注射水泥砂浆。锚头用 C25 砼墩保护,最上面的两排锚杆可加长至 9 m。

3) 不设暗涵的渠道开挖与支护:渠道应分段开挖和支护,每段长度不大于 10 m,开挖坡比为 1:1,采用长 4.5 m、间距 1.5 m、 $\phi 22$ (钻孔直径为 70 mm)的锚杆,挂网喷射细石砼(厚 12 cm)支护。喷射的细石砼分为两层,第一层喷射的厚度为 5~6 cm,然后在其上挂网孔为 150 mm×150 mm、直径为 6 mm 的钢筋网,再在钢筋网上喷射厚度为 7~6 cm 的砼。在喷射砼的过程中,应每隔 20 m 左右留一道伸缩缝,缝宽不小于 2 cm,且缝宽要一致,上下对齐,内注沥青,外用橡胶止水带封闭。在喷射砼的外层铺一层防水土工布或其他防渗材料,该层防水材料应与渠底防渗材料相连。最后在防水层上加铺防渗砼层,厚度不小于 10 cm,并振捣密实、平整表面,将其作为渠道的内侧坡面。

锚杆挂网喷射砼的渠道上部距渠道最高水位 20 cm 处应设置至少一排边坡地下水排水孔,排水孔孔径不小于 50 mm,长约 6 m,上倾角为 5°~10°,孔内置地下水排水管,将边坡中的地下水引入渠道。

4) 边坡排水设计。① 坡体地下排水:在渠道顶部以上的第一级开挖边坡坡脚 0.5 m 以上设两排地下水排水钻孔,孔深不小于 9 m,上倾角为 5°~10°,孔径为 90 mm,内置直径 80 mm 的波纹

排水管,排水孔排距为 3.5 m,孔距为 4 m,用以排除边坡中的地下水。② 坡面排水:在各级边坡坡面浅挖树枝状碟形排水沟,并在其上和边侧喷射厚 6 cm 的细石砼,形成宽 10~20 cm、深 5~10 cm 的排水网,并与坡脚平台上的横向排水沟连为一体。边坡开挖区 5 m 以外应设置周边梯形排水沟,并衬砌,以阻断开挖边坡以外的地表水汇入开挖边坡。③ 边坡台阶排水:每级台阶宽 2 m,在其表面喷射厚约 10 cm 的细石砼进行硬化,砼表面向内侧倾斜 3°左右。在平台内侧边坡下部 50 cm 高的范围内均喷射 10 cm 厚的细石砼护脚,并与平台形成一条横向排水沟,将上级边坡的坡面汇水向两端排至周边的环形排水沟或天然沟谷中,由此形成一个完整的地表排水系统。

滑坡处置优化方案二:锚杆+暗涵。

1) 削坡减载:应清除现状滑坡体后缘以下已出现位移和开裂的全部土体。放坡:各级坡比宜控制在 1:1.75。

2) 锚杆支护:边坡自上而下逐级开挖,在各级削坡间隔布设锚杆。在最上一级布设长 12 m 的锚杆,中间布设长 9 m 的锚杆。暗涵开挖面宜在距涵顶 1.5 m 处开始打锚杆,锚杆长度为 9 m。锚杆钢筋采用 $\phi 25$ II 级变形钢筋,间距为 2.0 m,按梅花形布置。钻孔的直径为 10 mm,下倾角为 15°,低压注射水泥砂浆。锚头用 C25 砼墩保护。锚杆进入硬土体的部分不短于 3 m,进入完整基岩的部分不短于 1.5 m。锚杆长度应根据施工现场的情况灵活变动,当打锚长度超过 12 m 还未出现完整基岩时,建议布设锚索。

3) 明渠变更暗涵:在垮塌坡脚处应将明渠变更为暗涵进行治理。暗涵能够承受更大的荷载变形,对于背后土体具有类似挡土墙的稳固作用。暗涵尺寸为:净宽 7 m,净高 4.9 m,厚度 60 cm。主体材料为 C30 钢筋砼。暗涵开挖边坡的坡比为 1:1。暗涵背侧的下部以黏土回填、夯实,上部堆填碎石,便于排水。

4) 边坡排水设计:与方案一相同。

2.3.2 计算结果分析

表 3 和图 4 为优化方案一的计算结果。由表 3 和图 4 可知:在加固边坡后,降雨工况下的位移从原设计的 16.67 cm 减小为 8.56 cm,减小了

8.11 cm。安全系数也从 1.01 上升至 1.15,与原设计降雨工况相比提升了 14%,满足《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386—2016)中的要求。锚杆支护对上部潜在滑坡体具有加固作用,能有效提高边坡的整体稳定性。因此,方案一是治理该失稳边坡的有效处置方案之一。

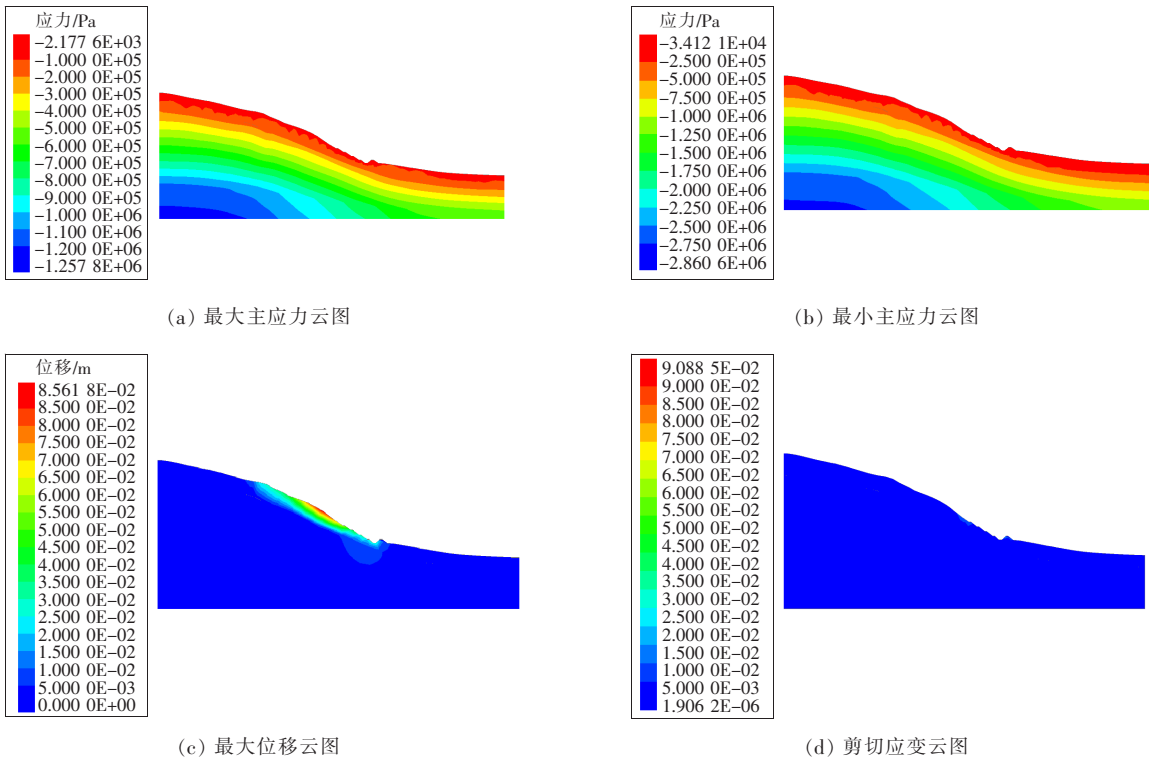


图 4 降雨工况下方案一的数值计算结果

Fig. 4 Numerical calculation results of scheme 1 under rainfall condition

表 4 和图 5 为优化方案二的计算结果。由表 4 和图 5 可知:边坡经过方案二加固后,降雨工况下的最大位移为 4.41 cm,与原设计位移 16.67 cm 相比减小了 12.26 cm,且发生位移的部位主要为边坡后缘的覆盖层土体;安全系数为 1.18,相比原设计提高了 17%,满足设计规范要求。说明方案二也能有效提高边坡的整体稳定性。

对比两个滑坡处置优化方案的数值计算结果

表 4 切方边坡优化方案二计算结果		
Table 4 Calculation results of optimization scheme 2 of incised slope		
工况	位移/cm	安全系数
回填	2.02	1.20
降雨	4.41	1.18

表 3 切方边坡优化方案一计算结果

Table 3 Calculation results of optimization scheme 1 of incised slope

工况	位移/cm	安全系数
开挖	6.08	1.19
降雨	8.56	1.15

可以发现:方案二的安全系数为 1.18,比方案一的 1.15 有明显提升,且其最大变形范围更小;方案二将明渠变更为暗涵的设计中,对于渠道内侧土体,暗涵具有类似于挡土墙的稳固作用,且暗涵的耐久性优于衬砌明渠。可见,方案二能极大地提高边坡的整体稳定性,也能极大地降低后期边坡加固施工对地表变形的影响。因此,推荐方案二作为支护加固方案。

3 类似边坡预加固再开挖方案论证

切方土质边坡的自稳能力较差,在这样的边坡上开挖修建大型输水灌渠而不采取预加固措施,极易造成滑坡,给工程造成巨大损失。常见的预加固措施主要有挡土墙、锚杆、土钉墙、抗滑桩等。

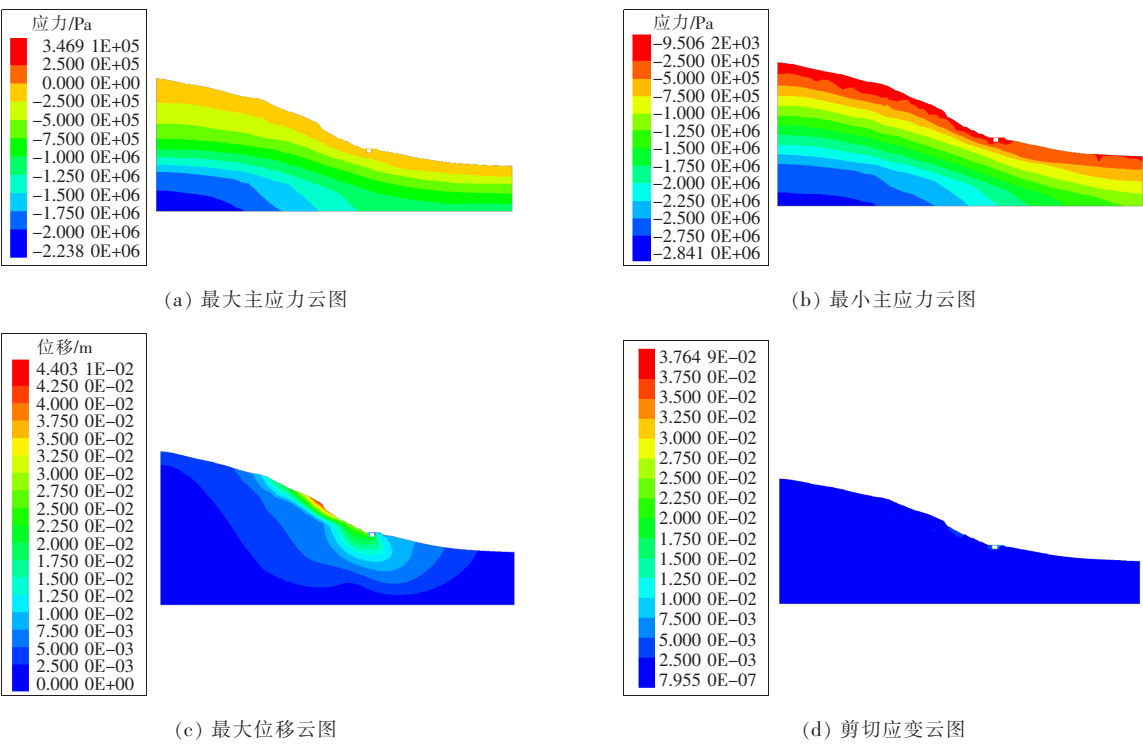


图 5 降雨工况下方案二的数值计算结果

Fig. 5 Numerical calculation results of scheme 2 under rainfall condition

灌浆作为预加固手段之一,可以充填岩土体中的裂隙、孔隙,增加密实度,提高边坡的稳定性。目前,常规灌浆存在无效灌注、冒浆和加固效果不佳等问题,且灌浆设计参数过度依赖工程经验。现有研究表明,采用脉动灌浆时,浆液受剪切力、黏滞作用、启闭压力、裂隙闭合、劈裂挤密作用等多重因素的影响,其进一步的扩散受到阻塞,因而注浆范围相对可控^[20]。与传统灌浆方式相比,脉动灌浆能使受灌体的密实度更好。通过精细化数值模拟,可获得供设计施工参考的预加固方案。

3.1 脉动灌浆工艺

张贵金等提出的“自下而上,分段灌浆”的脉动灌浆工艺是一种针对松散地层进行防渗加固处理的新技术^[21]。通过输出脉冲压力,浆液以脉动流量的方式形成周期性的张压应力冲击松散土体,并较均匀地向孔隙扩散,充填土体中的孔隙。在实际灌浆工程中,常用灌浆压力和灌浆量的双重标准控制灌浆过程,这样能有效地改善浆液的扩散和分布^[22]。本研究中边坡的预加固采用脉动灌浆工艺,以一次成孔、自下而上、一米卡塞的方式分段灌注。注入率为 40 L/min,脉动频率为 1 s,脉动灌浆过程示意图如图 6 所示。

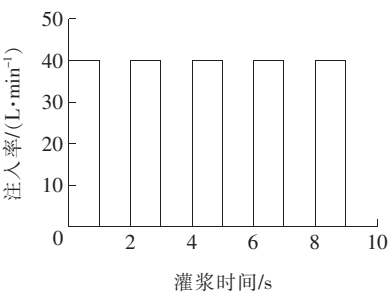


图 6 脉动灌浆过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of pulsating grouting process

已有研究表明,灌注纯水泥浆或在水泥浆中渗入少量膨润土,可以有效提升土体的力学强度和抗变形能力。浆液黏度会影响浆液在孔隙中的扩散速度,而动切力会限制扩散距离。浆液的基本性能参数见表 5。当纯水泥浆的水灰比为 0.75 时,黏度时变方程为:

$$\mu = 7.523\exp(2.934 \times 10^{-4}t) \tag{1}$$

表 5 浆液的基本性能参数

Table 5 Basic performance parameters of the slurry				
密度/ (g·cm ⁻³)	凝结时间/min		结实率/ %	28 d 抗压 强度/MPa
	初凝	终凝		
1.62	647	1 236	90	11.27

3.2 灌浆数值模拟

TOUGH2/Gel 模块的多孔介质多相流程序多用于解决多孔及裂隙介质问题。本研究通过反演改善参数的匹配,基于质量和能量守恒方程的耦合,利用 Newton-Raphson 迭代法求解非线性方程组,对灌浆过程进行精细化数值模拟。

灌浆数值模拟的精度要求较高。为提高运行速度,选取 10 m 宽的整体边坡作为灌浆研究区域。经多方案比选,得到最优布孔方案为:孔排距 2 m,布置 3 排,孔深 8 m,距开挖线 1 m 之外向山体内侧布孔。灌浆数值模拟结果见图 7。

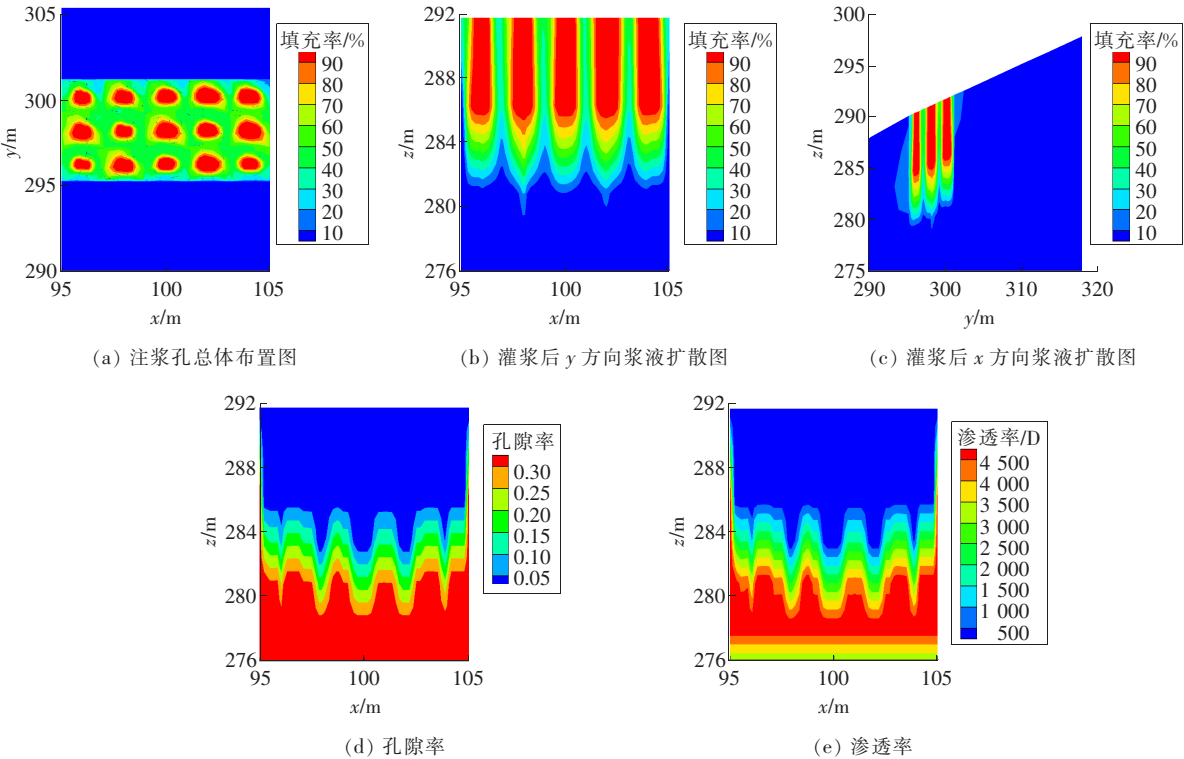


图 7 灌浆数值模拟结果
Fig. 7 Numerical simulation results of grouting

在脉动灌浆过程中,浆液以灌浆孔为中心向四周孔隙扩散。在注入率逐渐增大至峰值的过程中,浆液在脉冲作用下对松散地层形成周期性的冲击,使可注性增大。脉冲作用持续时间短、频率高,通过压力调节,可减小对地层构造的破坏,浆液则以渗透灌浆方式进行扩散。当注入率从峰值减小到零时,灌浆压力急剧降低,浆液在黏滞作用下沿通道继续缓慢扩散,根据最小能耗原理,浆液将更均匀地进入孔隙中,达到充填孔隙的效果。

图 7(a)~7(c)所示为浆液在均质地层中的饱和度和云图。从图中可以看出,浆液的扩散呈类椭球形,两灌浆孔之间的浆液基本可以实现搭接,搭接部位的饱和度达到了 50% 以上。浆液在有效范围内进行扩散,孔隙填充较充分。通过注浆孔对

单元压力进行监测,得到最大压力为 0.84 MPa。

图 7(d)~7(e)所示为灌浆后的孔隙率和渗透率。从图中可以看出,浆液固化后,在灌浆区域浆液有效填充了孔隙,孔隙率降低,相应区域渗透率也随之减小。在浆液填充范围内,孔隙率降低至 0.1 以下,渗透率在初始基础上减小至 0.01 D 以下,说明灌浆效果显著。

3.3 预加固后边坡稳定性分析

预注浆对边坡覆盖层土体起到充填和胶结作用,显著提高了地层的抗剪强度,改善了边坡整体的力学性能和稳定性。

灌浆效果可由浆液在孔隙中的填充程度反映^[23]。浆液的填充会影响土体黏聚力、内摩擦角等力学参数,浆液的填充率与抗剪强度指标的关

系可简化为线性相关关系^[24]。根据强度折减法,以浆液填充率作为依据,插值换算得到浆液扩散范围内单元强度增强后的参数。在初始地层参数与 100% 填充的地层参数间进行线性插值,换算得到不同填充率对应的抗剪强度参数。插值换算公式为:

$$c_{i, \text{gel}} = \frac{x_{i, \text{gel}} - x_1}{x_0 - x_1} c_{i, 0} + \frac{x_{i, \text{gel}} - x_0}{x_1 - x_0} c_1 \quad (2)$$
$$\tan \varphi_{i, \text{gel}} = \frac{x_{i, \text{gel}} - x_1}{x_0 - x_1} \tan \varphi_{i, 0} + \frac{x_{i, \text{gel}} - x_0}{x_1 - x_0} \tan \varphi_1 \quad (3)$$

式中: $x_{i, \text{gel}}$ 为单元 i 的浆液填充率,取值为 0~1; $c_{i, 0}$ 、 $c_{i, \text{gel}}$ 、 c_1 分别为单元 i 灌浆前、灌浆后、浆液充满时的黏聚力; $\varphi_{i, 0}$ 、 $\varphi_{i, \text{gel}}$ 、 φ_1 分别为单元 i 灌浆前、灌浆后、浆液充满时的内摩擦角。

以浆液扩散效果数值化结果为依据,基于 FLAC^{3D} 强度折减法进行边坡施工分步模拟。在非灌浆区域采用松散土体材料模型,参数见表 1;在灌浆区域,边坡稳定性受到浆液扩散范围和结实率的影响^[25],根据灌浆数值化的结果,浆液填充率超过 10% 的单元将固化结石,增大这些单元的抗剪强度参数,然后通过编程对强度增强单元进行参数设置。图 8 为灌浆后边坡的最大剪切应变增量图。从图 8 可以看出,预加固后边坡开挖未出现明显的塑性贯通区域,安全系数达到了 1.50,边坡整体稳定。图 9 为灌浆后边坡的位移云图。从图 9 可以看出,最大位移为 8.43 cm,发生位置为渠道内侧而非不利于稳定的边坡后缘。与未实施预加固而直接开挖相比,最大位移减小了 8.24 cm,安全系数增大了 49%,说明预注浆加固显著改善了边坡的稳定性,同时可以避免由于切方边坡的直接开挖而导致的滑坡。

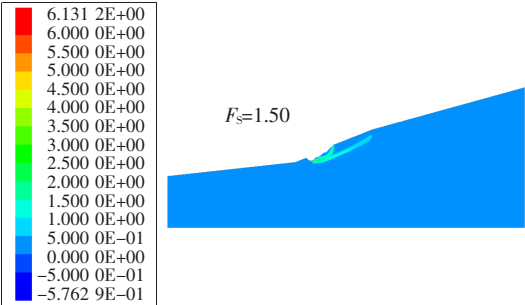


图 8 灌浆后边坡的最大剪切应变增量

Fig. 8 Maximum shear strain increment of the slopr after grouting

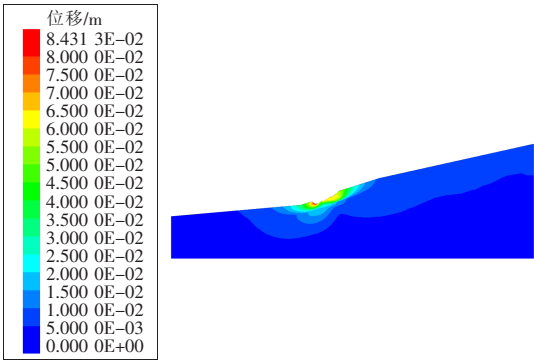


图 9 灌浆后边坡的位移云图

Fig. 9 Displacement nephogram of the slope after grouting

4 结论

- 1) 查明地质条件和边坡失稳机理,通过室内试验获得岩土体物理力学参数,建立了三维模型。基于数值模拟对原设计进行复核,对开挖前后、支护等情况的自然和强降雨工况下的边坡稳定性、变形应力等分别进行了模拟计算。结果表明:所研究的边坡自然状态下的安全系数为 1.20,开挖后在降雨工况下安全系数降为 1.01,安全系数较低,最大位移为 16.6 cm,变形范围较广,边坡发生了牵引式破坏。数值模拟结果与实际失稳情况较吻合,说明所建模型具有较高的可靠度。
- 2) 提出滑坡处置优化方案一:锚杆+衬砌,包括削坡减载、系统锚杆支护、地表和地下排水系统及坡面生态防护等,并进行了数值计算。结果表明:通过锚杆支护,削坡后在降雨情况下边坡的安全系数为 1.15,最大位移为 8.56 cm,满足设计规范要求。验证结果说明削坡减载、锚杆支护是治理该滑坡的有效措施之一。
- 3) 提出滑坡处置优化方案二:锚杆+暗涵,先对边坡上部滑动土体进行削坡减载,再进行锚杆支护,并将渠道变更为暗涵。数值计算结果表明:降雨工况下边坡的安全系数为 1.18,最大位移为 4.41 cm,边坡整体稳定。优化方案二比方案一更能提高边坡的整体稳定性,也更能降低后期边坡加固施工对地表变形的影响。
- 4) 对于类似边坡,提出脉动灌浆预加固后再进行开挖的方案,采用 TOUGH2/Gel 模块模拟自下而上的脉动灌浆工艺,结合 FLAC^{3D} 分步进行

边坡施工的模拟。结果表明:采用3排孔、2 m孔排距、8 m孔深的布孔方案,灌浆压力为0.84 MPa,边坡安全系数可达到1.50以上,边坡足够安全,研究成果可供类似工程参考。

〔参考文献〕

[1] 徐卫亚,周伟杰,闫龙.降雨型堆积体滑坡渗流稳定性研究进展[J].水利水电科技进展,2020,40(4):87-94.
XU Wei-ya, ZHOU Wei-jie, YAN Long. Research progress on seepage stability of rainfall-induced accumulation landslide [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 87-94.

[2] 李毅,胡兰桂,汪洋,等.涪天河工程1号泄洪洞出口边坡与隧洞联合变形分析[J].工程地质学报,2018, 26(4):1 095-1 104.
LI Yi, HU Lan-gui, WANG Yang, et al. Combined slope and tunnel deformation analysis for No. 1 spillway tunnel outlet of Centianhe project[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 1 095-1 104.

[3] 张贵金,徐卫亚.岩土工程风险分析及应用综述[J].岩土力学,2005(9):1 508-1 516.
ZHANG Gui-jin, XU Wei-ya. Summary about risk analysis of geotechnical engineering and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(9): 1 508-1 516.

[4] LI L Q, JU N P, HE C, et al. A computationally efficient system for assessing near-real-time instability of regional unsaturated soil slopes under rainfall[J]. Landslides, 2020, 17: 893-911.

[5] XIA P, HU X L, WU S S, et al. Slope stability analysis based on group decision theory and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Earth Science, 2020, 31: 1 121-1 132.

[6] 刘卫涛,曹文贵,张运强.考虑土体非饱和特性的斜坡降雨入渗模型及边坡稳定性分析[J].长江科学院院报,2021,38(4):102-109,117.
LIU Wei-tao, CAO Wen-gui, ZHANG Yun-qiang. Rainfall infiltration model and slope stability analysis in consideration of unsaturated soil characteristics [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(4): 102-109, 117.

[7] 胡冉,陈益峰,周创兵.降雨入渗过程中土质边坡的固-液-气三相耦合分析[J].中国科学:技术科学, 2011, 41(11):1 469-1 482.
HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bin. Modeling of coupled deformation, water flow and gas

transport in soil slopes subjected to rain infiltration [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2011, 41 (11): 1 469-1 482.

[8] 施建勇,曹秋荣,周璐璐.修正有限元强度折减法与失稳判据在边坡稳定分析中的应用[J].岩土力学, 2013, 34(S2):237-241.
SHI Jian-yong, CAO Qiu-rong, ZHOU Lu-fei. Modified finite element method for shear strength reduction and instability criterion in slope stability analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (S2): 237-241.

[9] 李广信.岩土工程安全系数法稳定分析中的荷载与抗力[J].岩土工程学报,2021,43(5):918-925.
LI Guang-xin. Load and resistance in stability analysis of geotechnical engineering with safety factor method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 918-925.

[10] 郑明新,伍明文,胡国平,等.偏压隧道洞口段坡体钢管注浆加固效果分析[J].隧道建设,2019, 39 (1):23-30.
ZHENG Ming-xin, WU Ming-wen, HU Guo-ping, et al. Analysis of slope grouting reinforcement effect of unsymmetrically-pressured tunnel portal by steel pipe[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(1): 23-30.

[11] ALONSO E E, PINYOL N M. Slope stability in slightly fissured claystones and marls [J]. Landslides, 2015, 12: 643-656.

[12] WU L Z, LIU G G, WANG L C, et al. Numerical analysis of 1D coupled infiltration and deformation in layered unsaturated porous medium[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 761.

[13] 付宏渊,曾铃,王桂尧,等.降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J].岩土力学,2012, 33(8):2 359-2 365.
FU Hong-yuan, ZENG Ling, WANG Gui-yao, et al. Stability analysis of soft rock slope under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (8): 2 359-2 365.

[14] 曾铃,史振宁,付宏渊,等.降雨入渗对边坡暂态饱和和区分布特征的影响[J].中国公路学报,2017, 30 (1):25-34.
ZENG Ling, SHI Zhen-ning, FU Hong-yuan, et al. Influence of rainfall infiltration on distribution characteristics of slope transient saturated zone[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(1): 25-34.

- [15] 张贵金,宋伟,何学春,等.裂隙岩体边坡开挖渠道脉动灌浆预加固措施论证[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(4):32-43.
ZHANG Gui-jin, SONG Wei, HE Xue-chun, et al. Demonstration of pulsating grouting pre-reinforcement measures for excavation channels on fractured rock slope[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (4):32-43.
- [16] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
CHEN Yu-min, XU Ding-ping. FLAC/FLAC^{3D} foundation and engineering examples[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [17] 李毅,刘福东,张贵金,等.岩土体开挖变形的分步模拟方法及其工程应用[J].水利水电技术,2015,46(11):66-71,76.
LI Yi, LIU Fu-dong, ZHANG Gui-jin, et al. Method of step by step simulation on rock and soil mass deformation during excavation and its application[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(11):66-71,76.
- [18] 蒋中明,李小凡,袁涛,等.厚覆盖层暂态饱和边坡稳定性分析方法[J].岩土力学,2018,39(12):4561-4568.
JIANG Zhong-ming, LI Xiao-fan, YUAN Tao, et al. A method for stability analysis of thick overburden slope in transient saturated state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12):4561-4568.
- [19] 杨煜,何忠明,卞汉兵,等.不同降雨类型对粗粒土高路堤边坡稳定性影响分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2017,14(4):36-43.
YANG Yu, HE Zhong-ming, BIAN Han-bing, et al. Stability analysis of coarse grained soil high embankment slope under different rainfall conditions[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2017, 14(4):36-43.
- [20] 欧阳进武,张贵金,刘杰.劈裂灌浆扩散机理研究[J].岩土工程学报,2018,40(7):1328-1335.
OUYANG Jin-wu, ZHANG Gui-jin, LIU Jie. Diffusion mechanism of split grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7):1328-1335.
- [21] 窦金熙,张贵金,陈安重,等.全风化花岗岩地层脉动灌浆控制防渗机理研究[J].岩土工程学报,2021,43(2):309-318.
DOU Jin-xi, ZHANG Gui-jin, CHEN An-zhong, et al. Mechanism of seepage control of pulsating grouting in completely weathered granite stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2):309-318.
- [22] 张聪,梁经纬,阳军生,等.考虑区间分布的幂律流体脉动渗透注浆扩散机制研究[J].岩土工程学报,2018,40(11):2120-2128.
ZHANG Cong, LIANG Jing-wei, YANG Jun-sheng, et al. Diffusion mechanism of pulsating seepage grouting slurry with power-law fluid considering interval distribution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11):2120-2128.
- [23] 敖雪菲.基于精细地质建模的水利工程灌浆数值模拟及稳定性分析[D].天津:天津大学,2017.
AO Xue-fei. Research on numerical simulation and stability analysis of grouting engineering based on three-dimensional refined geological model in hydraulic project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [24] 伍宇腾,韩增强,王川婴,等.基于裂隙充填特征的坝基岩体灌浆效果评价[J].岩土力学,2017,38(S2):311-316.
WU Yu-teng, HAN Zeng-qiang, WANG Chuan-yong, et al. Grouting effect evaluation of dam foundation rock mass based on fracture filling characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2):311-316.
- [25] 袁敬强,陈卫忠,黄世武,等.全风化花岗岩注浆加固特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):2876-2882.
YUAN Jing-qiang, CHEN Wei-zhong, HUANG Shi-wu, et al. Experimental study on physico-mechanical properties of grouted completely weathered granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1):2876-2882.

(编辑 石月珍)