

文章编号:1672-9331(2021)04-0032-12

# 裂隙岩体边坡开挖渠道脉动灌浆预加固措施论证

张贵金<sup>1,2</sup>, 宋 伟<sup>1,2</sup>, 何学春<sup>3</sup>, 李 毅<sup>1,2</sup>

(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:** 在裂隙岩体边坡上开挖修建大型引水渠道, 如不采取预加固措施直接开挖, 遭遇降雨时极易造成滑坡。脉动灌浆工艺可实现控制灌浆, 有效解决常规灌浆无效灌注、加固效果不佳等突出问题, 可作为裂隙岩体边坡的预加固措施。以涔天河水库干渠典型渠段边坡为例, 分析裂隙岩体边坡开挖诱发滑坡倾倒的破坏机理; 考虑结构面张开度、分布及力学参数的不均匀性和不确定性, 浆液黏度时变特性等因素, 构建三维非均质正交结构面网络模型。基于 TOUGH2 质量守恒方程及 FLAC<sup>3D</sup> 强度折减法, 模拟裂隙岩体的脉动灌浆, 并根据浆液填充率插值换算得到抗剪强度参数的变化, 分析灌浆预加固对边坡稳定性的影响, 得到经优化的预加固设计方案。结果表明: 采用 2 排孔、排距 1.5 m、孔深 8.5 m 的预加固设计方案, 边坡安全系数可达 1.83 以上, 故该方案不仅可行, 而且相对经济。所用研究方法可用于设计方案优化, 并能获得较合理的设计参数, 研究成果可供类似工程参考。

**关键词:** 裂隙岩体边坡; 灌浆预加固; 稳定性分析; 非均质正交结构面; 参数非均质性

**中图分类号:** TV223

**文献标志码:** A

## Demonstration of pulsating grouting pre-reinforcement measures for excavation channels on fractured rock slope

ZHANG Gui-jin<sup>1,2</sup>, SONG Wei<sup>1,2</sup>, HE Xue-chun<sup>3</sup>, LI Yi<sup>1,2</sup>

(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:** When the large diversion channel is excavated directly on the slope of fractured rock mass without pre-reinforcement measures, the landslide is easily caused by rainfall. Pulsating grouting technology can control grouting and solve the outstanding problems effectively such as ineffective grouting and poor reinforcement effect of conventional grouting, which can be used as a pre-reinforcement measure for fractured rock slope. Taking the typical canal section slope of the main canal of Centianhe reservoir as an example, the failure mechanism of landslide dumping induced by slope excavation of fractured rock mass was analyzed; the 3D heterogeneous orthogonal structural plane network model was built considering the factors, such as the inhomogeneity and uncertainty of opening, distribution, and mechanical parameters of structural planes, time-varying characteristics of slurry viscosity.

收稿日期: 2021-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279019)

通讯作者: 张贵金(1964—), 男, 教授, 主要从事岩石力学与工程风险方面的研究。E-mail: gjzhang@126.com

Based on the mass conservation equation of TOUGH2 and the strength reduction method of FLAC<sup>3D</sup>, the pulsating grouting of fractured rock mass was simulated, the variation of shear strength parameters was obtained according to the interpolation conversion of slurry filling rate, and the influence of grouting pre-reinforcement on slope stability was analyzed to obtain the optimized pre-reinforcement design scheme. The results show that using the pulsating grouting pre-reinforcement scheme of two rows of holes, row spacing of 1.5 m, hole depth of 8.5 m, the slope safety coefficient can reach more than 1.83, so the scheme is not only feasible but also relatively economical. The research method can be used to optimize the design scheme and obtain reasonable design parameters. The research results can be used for reference to similar projects.

**Key words:** slope of fractured rock mass; grouting pre-reinforcement; stability analysis; heterogeneous orthogonal structural plane; parameter inhomogeneity

节理裂隙比发育的岩质边坡的自稳能力差,在修造大型引水渠道时,如不采取预加固措施直接开挖,岩体在扰动、强降雨条件下,极易发生滑坡,从而给工程造成重大损失<sup>[1-2]</sup>。预加固措施主要有挡土墙、土钉墙、锚杆、抗滑桩等。其中,灌浆能够显著改善结构面的结构及力学性能,是提高裂隙岩体边坡稳定性的有效途径<sup>[3-4]</sup>。

常规灌浆存在无效灌注、加固效果不佳等突出问题,其设计参数过度依赖经验。现有研究表明,采用脉动灌浆时,浆液扩散受静切力、黏滞作用、裂隙闭合、启闭压力、复劈挤密作用等多重因素影响,浆液扩散受阻,灌浆范围相对可控<sup>[5-7]</sup>。

采取精细化数值模拟可获得供设计、施工参考的成果。王臻等<sup>[8]</sup>构建等效多孔介质裂隙岩体计算渗流;敖雪菲等<sup>[9]</sup>建立三维随机圆盘裂隙的宾汉姆流体灌浆模型;张庆松等<sup>[10]</sup>建立恒定注浆速率条件下浆液驱替扩散理论模型。在边坡稳定性方面,学者们从节理特征、软弱夹层、降雨等方面对其进行了研究<sup>[11-14]</sup>。韦立德等<sup>[15]</sup>、郑明新等<sup>[16]</sup>研究了输电线路塔基边坡、隧洞边坡的稳定性特征;周家文等<sup>[17]</sup>研究了水动力型的滑坡机理。在材料参数特性方面,孟永东等<sup>[18]</sup>通过内掺微生物来提高浆体的均匀致密程度;王伟等<sup>[19]</sup>研究了岩石力学特性的变化;王志文等<sup>[20]</sup>研究了非均质节理岩体的力学特性及均质度对其的影响。

本研究结合灌浆机理、脉动控制灌浆方法和可控性灌浆材料的已有研究成果,以涔天河水库干渠典型渠段裂隙岩体边坡为例,采取脉动灌浆工艺,充分考虑地质特征及灌浆材料、灌浆控制参

数的不确定性,通过精细化数值模拟,获得经优化的灌浆方案和参数,为预加固开挖设计与施工提供依据。

## 1 裂隙岩体模型的构建

### 1.1 典型工程案例及裂隙岩体的构造特征

涔天河干渠为湖南省一号工程,长 240 km。其中,道县境内的一段渠道由于在设计时对裂隙岩体的风险评估不足,开挖后的边坡在尚未完全支护的情况下遭遇强降雨,发生大范围垮塌,多处被破坏,其后续处理困难,造价远超预算。

该地段为低山丘陵,渠道沿山坡下部蜿蜒,其内侧山高约 30~50 m,上陡下缓,坡角 10°~30°;外侧为低平的宽谷,坡高约 5~10 m,坡角 5°~15°。边坡岩体为平卧层状碎裂结构(见图 1),风化严重,多顺节理面,层面发育,充填有红黏土、灰岩碎屑和角砾等。碳酸盐岩的岩性以中厚层灰岩为主,并与薄层泥灰岩互层、软硬交替,有两组优势节理裂隙分布,其构造特征如表 1 所示。



图 1 揭露面地质构造

Fig. 1 Geological structure of exposed surface

表1 裂隙岩体的构造特征

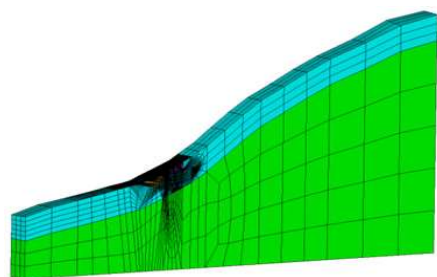
Table 1 Structural characteristics of fractured rock mass

结构面	走向	倾角	间距	宽度/cm
层理	顺层坡面	接近水平,倾角较缓(5°)	30~50 cm	2~5
垂直节理	与岩层走向正交	等于或接近 90°	密度较大,0.2~0.4 m	5~30
平行节理	与岩层走向接近平行		稀疏,1 m	5~30

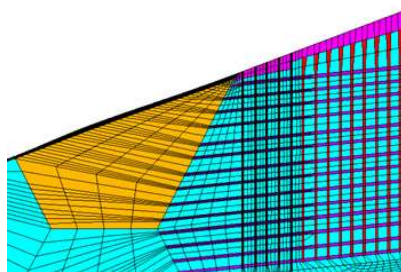
## 1.2 非均质正交结构面模型构建

根据裂隙岩体的构造特征(表1),建立精细化非均质结构面正交边坡模型,如图2所示。模型长188.49 m,宽10 m,最低高程219.78 m,原点位于渠道中心线下方,铅直向上为 $z$ 轴正向,垂直渠线指向山顶方向为 $x$ 轴正向,结合右手螺旋法

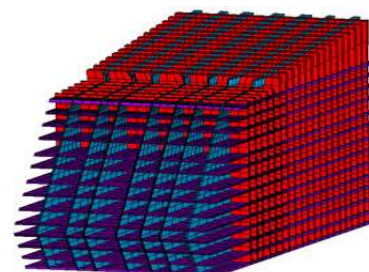
则建立坐标系。采用蒙皮、布尔切割等算法将模型按六面体映射网格进行划分,共有节点223 244个、单元214 884个,包括结构面单元135 168个。其中,灌浆预加固模拟只针对渠道内侧边坡模型,有节点179 696个、单元170 865个,并与整体模型一一对应。



(a) 边坡整体



(b) 边坡局部



(c) 非均质正交结构面

图2 裂隙岩体边坡模型

Fig. 2 The slope model of fractured rock mass

## 1.3 岩体物理力学参数不确定性描述

裂隙岩体的不确定性源于有限的可利用信息、量测误差、固有的非均质性,并服从随机模糊概率分布规律<sup>[21]</sup>。本研究基于等效参数,考虑参数非均质性,结合概率分布函数对裂隙岩体的不

确定性进行描述。

通过详细勘察现场,获取岩土试样(含裂隙充填物),然后进行室内试验。综合考虑工程经验,确定岩、土体物理力学等效参数,见表2。

表2 渠段岩、土体物理力学等效参数

Table 2 Physical and mechanical equivalent parameters of rock and soil in the canal section

地层	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	抗拉强度/ MPa	孔隙率	渗透率/ D
第四系地层	1 800	60	0.32	19.4	14.8	0.0	0.30	1E-10
中风化层	2 700	9 000	0.25	350.0	36.0	0.2	0.10	1E-14
弱风化层	2 720	12 000	0.20	550.0	45.0	0.5	0.05	—
构造节理	2 300	180	0.35	50.0	20.0	0.0	0.35	1E-10
层理	2 400	300	0.35	25.0	24.0	0.0	0.35	1E-10

浆液扩散及稳定性分析涉及的岩、土体关键参数包括黏聚力、内摩擦角、孔隙率与渗透率。因结构面充填物不均匀,需将非正态随机变量简化成正态随机变量,把生成的随机数赋给结构面单元,并结合正态分布概率密度函数求出相应的关

键参数  $x_i$ , 即:

$$f(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中:  $f(x_i)$  为区间  $[0,1)$  内均匀分布的随机实数;随机变量  $x_i$  为所求参数,包括黏聚力、内摩擦



角及孔隙率;期望值  $\mu$  为等效参数的值;  $\sigma$  为标准差,根据参数区间拟定。

为使每个单元的孔隙率与渗透率相互关联,将式(1)得出的结构面非均质孔隙率按 Kozeny-Carman 方程<sup>[22]</sup>计算相应单元的渗透率,即:

$$k_i = \frac{\varphi_i^3}{S(1 - \varphi_i)^2}$$

(2)

式中:  $k_i$  为单元  $i$  的渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\varphi_i$  为单元  $i$  的孔隙率;  $S$  为固体相的比表面积,取值为  $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^2$ 。

根据表 2 及式(1)~(2)设置地层参数,结构面

单元参数总体服从正态分布。结构面非均质参数的区间特征及分布如表 3 及图 3 所示。

表 3 结构面非均质参数的区间特征

Table 3 Interval characteristics of heterogeneous parameters of structural plane

关键值	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	孔隙率	渗透率/D
最大值	60	15.0	0.54	1.1E+04
最小值	20	6.0	0.15	2.1E-01
期望值	40	14.8	0.35	1.0E+02

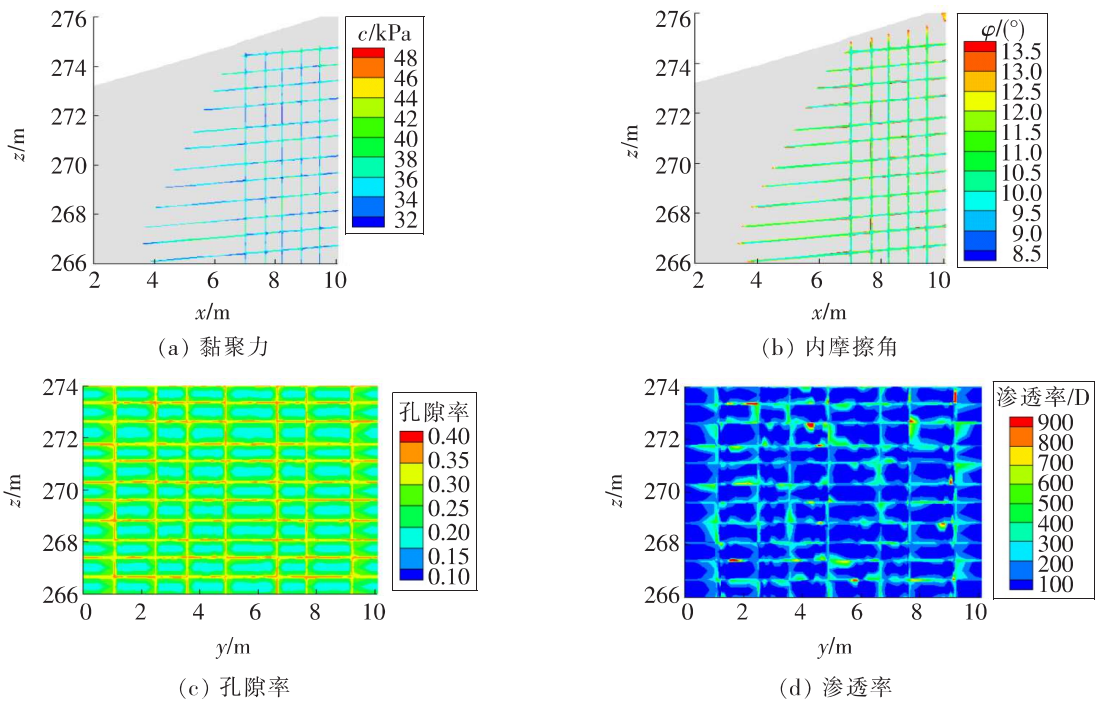


图 3 非均质参数分布

Fig. 3 Distribution of heterogeneous parameters

2 脉动灌浆工艺及方案优化

2.1 脉动灌浆工艺

裂隙岩体的边坡开挖风险较高,而脉动灌浆预加固措施能有效提高软弱结构面的力学性能及整体稳定性<sup>[4]</sup>,降低边坡开挖的垮塌风险。

2.1.1 灌浆数值模拟

“自下而上,分段灌浆”的脉动灌浆工艺通过输出脉冲压力,使浆液以脉动流量的形式形成周期性的张压应力冲击地层,因而灌浆范围可控。

基于 TOUGH2/Gel 模块中的多孔介质多相流动程序,对脉动灌浆、稳压灌浆等多种灌注方式及孔口封闭灌浆、分段灌浆、分序灌浆等多种灌浆

工艺进行精细化数值模拟。

为提高运行效率,灌浆模拟采用渠道开挖内侧边坡的局部裂隙岩体模型,侧边界采用常压力边界,上下边界采用不透水边界。同时假定:① 裂隙表面光滑,填充不均质,不考虑裂隙开度的变化;② 以线性混合规则实现浆液与水的混合、稀释弱化,不考虑渗滤效应的影响;③ 关键参数随浆液填充率线性变化,浆液完全填充的单元,抗剪强度相等。

2.1.2 脉动灌浆工艺参数

裂隙岩体采用脉动灌浆(见图 4),一次成孔,自下而上,一米卡塞,分段灌注,注入率为 40 L/min,脉动频率为 1 s。

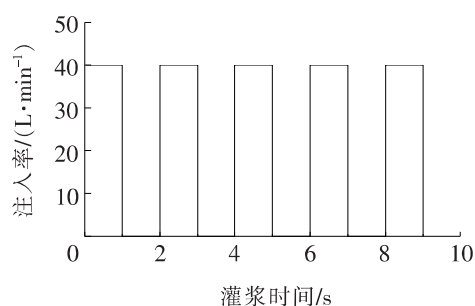


图4 脉动灌浆过程

Fig. 4 Process of pulsating grouting

采用脉动灌浆工艺灌注浆液的过程中,浆液不断向孔隙中扩散。当注入率增大到峰值时,浆液对结构面形成冲击,即脉冲作用,增加了岩体的可注性。脉冲作用持续时间短、频率高,通过控制压力对地层构造不会造成破坏,浆液以渗透灌浆形式扩散;当注入率减小到0时,灌注压力急剧降低,浆液在黏滞作用下,运动速率迅速下降,但仍继续沿通道根据最小耗能原理进行扩散,并更均匀地灌入孔隙中,岩体的均质化程度得以提高。

基于前人研究成果,灌注纯水泥浆或在水泥浆中渗入少量膨润土可提高岩体的力学强度和抗变形能力。水灰比为0.75的纯水泥浆的浆液参数见表4。

表4 浆液参数

Table 4 Parameters of slurry

密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	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

黏度会影响浆液在节理裂隙中的扩散速度,其随时间的变化符合指数规律,即:

$$\mu = 7.523 \exp(2.934 \times 10^{-4} t) \quad (3)$$

### 2.1.3 灌浆工艺模拟结束标准

在实际工程中,采用灌浆量与灌浆压力的双控标准控制灌浆。

#### 1) 灌浆量。

当总灌浆量达到设计值时,终止灌浆,其值可根据地层孔隙率、浆液扩散范围、浆液损失等进行估算。

灌浆孔段穿过裂隙岩体内存在的多处结构面。假定各结构面的吸浆量相等,灌浆孔段内吸浆量  $V_1$  的计算公式为:

$$V_1 = (1 + \eta) \pi R^2 (L/n_1) t \varphi / M \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为浆液损失率,取为20%;  $R$  为浆液扩散半径,  $\text{m}$ ;  $L$  为灌浆孔的深度,  $\text{m}$ ;  $n_1$  为软弱夹层在钻孔轴上的间距,  $\text{m}$ ;  $t$  为软弱夹层的厚度,  $\text{m}$ ;  $\varphi$  为软弱夹层的等效孔隙率;  $M$  为浆液结实率。

#### 2) 灌浆压力标准。

若灌浆压力过小,则达不到灌浆效果,而过大又会抬动地面。因此,以灌浆产生的上抬力不超过盖重作为变形的控制标准。

在正交结构面裂隙岩体中灌浆,由渗透挤压产生的最大上抬力可采用隆巴迪平缝模型推导公式进行计算:

$$F_{\max} = V_{\max} P_{\max} / 6t \quad (5)$$

式中:  $F_{\max}$  为最大上抬力,  $\text{N}$ ;  $V_{\max}$  为最大注入量,  $\text{m}^3$ ;  $P_{\max}$  为最大灌浆压力,  $\text{Pa}$ ;  $t$  为结构面缝宽的一半,  $\text{m}$ 。

忽略水的自重及结构面的黏聚力,正交结构面裂隙岩体的最小盖重可表示为:

$$G_{\min} = \rho g h a b \quad (6)$$

式中:  $G_{\min}$  为最小上抬力,  $\text{N}$ ;  $\rho$  为岩石的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h$  为盖层的厚度,即浆液注入点的深度,  $\text{m}$ ;  $a, b$  为岩体的长度和宽度,即结构面的间距,  $\text{m}$ 。

## 2.2 脉动灌浆方案优化及效果分析

### 2.2.1 脉动灌浆方案

灌浆工程是隐蔽性工程,可根据数值模拟结果初步确定合理的灌浆技术参数,如孔排距、孔深、灌浆压力等。合理布置钻孔,提高灌浆效果,可节约成本。由于工程需要,灌浆工艺涉及的变量众多,本研究分析不同孔排距、孔深方案的灌浆效果,及其对边坡开挖稳定性的影响,最终得到优化后的脉动灌浆预加固设计参数。

考虑不同的孔排距,进行试验性灌浆。首先,基于渠段裂隙岩体正交结构面特征,因地制宜布孔,分别模拟孔排距为1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m平缝模型灌浆过程;然后,自孔底向上逐段灌入浆液,采用“自下而上,一米卡塞,分段灌注”的灌浆工艺,考虑脉动与稳压两种灌注方式;最后,分析裂隙岩体的可灌性及浆液的扩散效果。

经比较,采用孔排距为1.5 m,在山体内侧距离开挖线预留1 m范围,向外侧布孔,采用预加固灌浆,灌浆深度穿过滑动面并达到一定深度。脉动灌浆方案见表5,根据实际施工情况可因地制宜对工艺参数进行优化,使灌浆更科学、合理。

表 5 脉动灌浆方案  
Table 5 Schemes of pulsating grouting

工况	孔深/m	排数	孔排距/m	灌浆压力/MPa
1	6.5	1	1.5	0.15
2	7.5	1	1.5	0.18
3	8.5	1	1.5	0.20
4	6.5	2	1.5	0.15
5	7.5	2	1.5	0.18
6	8.5	2	1.5	0.20

### 2.2.2 灌浆效果分析

对灌浆效果进行多指标综合评价需考虑不确定性<sup>[23]</sup>,浆液充填程度可直接反映灌浆效果<sup>[24]</sup>。

首先,统计目标灌浆范围内单元的体积、孔隙率、浆液质量分数;然后,计算灌浆区域内单元孔隙中浆液的体积分数,即浆液体积与初始孔隙体积的比值  $\alpha$ ,如式(7)~(8)所示;最后,根据计算结果定量评价灌浆效果。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i \varphi_i \rho_i x_{i,\text{gel}} / \rho_{\text{gel}})}{\sum_{i=1}^n (V_i \varphi_i)} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{1 - x_{i,\text{gel}}}{\rho_w} + \frac{x_{i,\text{gel}}}{\rho_{\text{gel}}} \quad (8)$$

式中: $\alpha$  为孔隙中浆液的体积分数; $n$  为帷幕区域内单元的数量; $V_i$  为单元  $i$  的体积; $\varphi_i$  为单元  $i$  的孔隙率; $\rho_i$  为单元  $i$  液相混合物的密度; $\rho_{\text{gel}}$  为浆液密度; $\rho_w$  为水密度; $x_{i,\text{gel}}$  为单元  $i$  中浆液的质量分数,即浆液填充率。

采用脉动灌浆、稳压灌浆后,目标灌浆区域的浆液体积分数分别为 43%,29%。图 5 所示为其灌浆效果。在脉动作用下,浆液首先被灌入高渗透性区域;当注入率减小到 0 时,在黏滞作用下,浆液扩散逐渐减缓直至停滞;在注入率从 0 增大到峰值的过程中,浆液沿着耗能少的路径扩散,并更均匀地灌入岩石裂缝及软弱夹层中,形成网络状结构。在双控标准下,浆液沿结构面向四周环状扩散,其单宽流量由灌浆孔壁向四周径向递减。在不同的裂隙中,浆液的扩散形状呈峰刺状、扁头状。浆液基本在有效范围内扩散,但在靠近注入点或在通透性好的夹层中浆液扩散地较远,并相互挤密补充,裂隙的填充效果也更好。

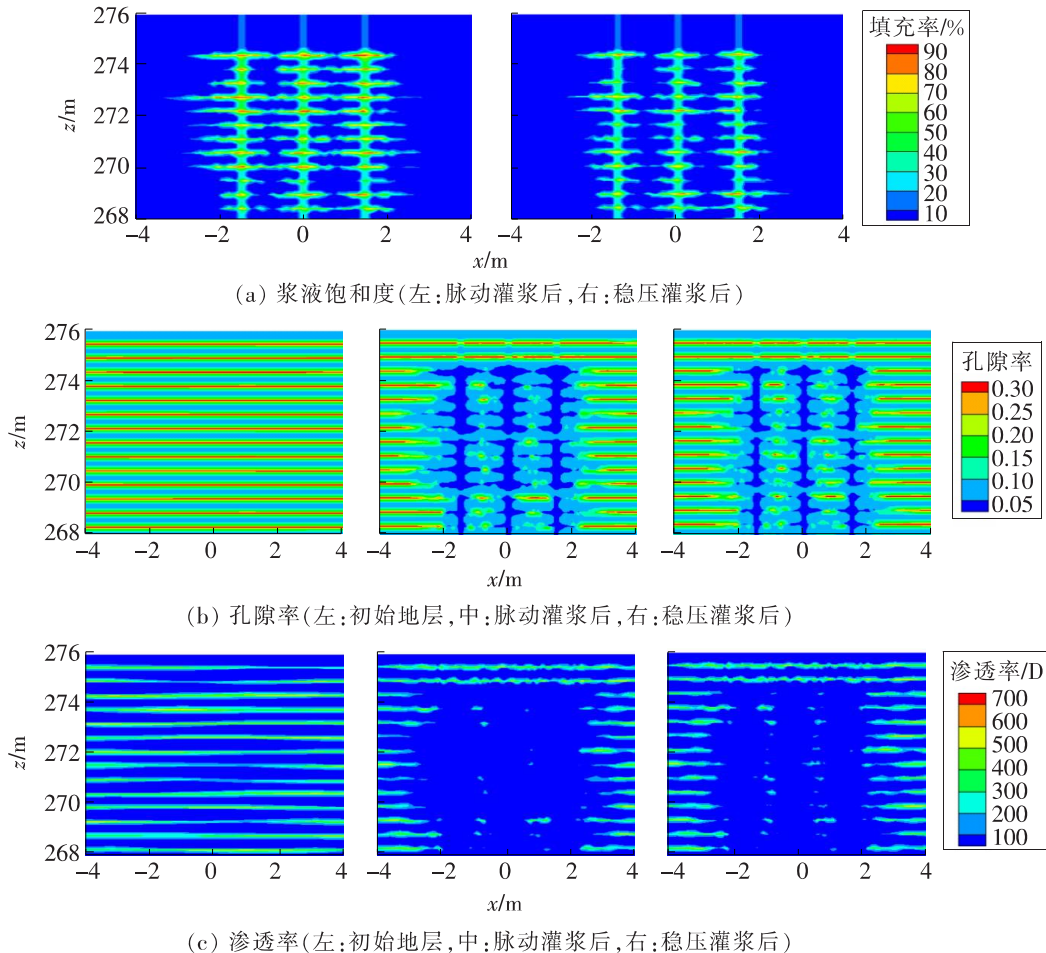


图 5 试验性灌浆效果

Fig. 5 Effect of experimental grouting



图 5(b)和图 5(c)中的左图分别为灌浆前地层的孔隙率与渗透率。从这两幅图可以看出,结构面各单元的孔隙率与渗透率存在差异,说明各单元浆液的渗透存在难易之分。浆液固化后,岩层孔隙率降低,渗透率随之减小,均质化程度提高,孔隙率均降低至 0.1 以下,渗透率均降低至 0.01 D 以下。

### 3 脉动灌浆预加固后的开挖效果

灌浆预加固可起到充填和胶结作用,使结构面的抗剪强度明显提高,有利于边坡稳定。

#### 3.1 脉动灌浆效果的数值化

灌浆效果可由浆液填充率对黏聚力、内摩擦角等力学参数的影响来体现<sup>[25]</sup>。可将三者的关系简化为线性相关。

根据单元中填充的浆液的多少,即填充率,在由式(1)求得的灌浆前的参数与浆液完全填充时的参数之间进行线性插值,可换算出逐个单元灌浆后的黏聚力和内摩擦角,即:

$$c_{i, \text{gel}} = \frac{x_{i, \text{gel}} - x_1}{x_0 - x_1} c_{i, 0} + \frac{x_{i, \text{gel}} - x_0}{x_1 - x_0} c_1 \quad (9)$$

$$\tan \varphi_{i, \text{gel}} = \frac{x_{i, \text{gel}} - x_1}{x_0 - x_1} \tan \varphi_{i, 0} + \frac{x_{i, \text{gel}} - x_0}{x_1 - x_0} \tan \varphi_1 \quad (10)$$

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;  $\varphi_{i, 0}$ ,  $\varphi_{i, \text{gel}}$ ,  $\varphi_1$  分别为单元  $i$  灌浆前、灌浆后、完全填充时的内摩擦角。

基于 FLAC<sup>3D</sup> 采用强度折减法对裂隙岩体边坡的稳定性进行分析。边坡模型侧边界为滚轮约束,底边界为固定约束。用基于 Mohr-Coulomb 准则的弹塑性本构模型按重力场生成边坡灌浆前的应力场,清零速度场、位移场后,模拟灌浆对边坡稳定性的影响。考虑浆液扩散范围的有效性和浆液结实率的影响,单元中浆液填充率超过 15% 时浆液固化结石,单元抗剪强度参数增大,用安全系数、塑性破坏区、变形、滑动面表征裂隙岩体的边坡稳定性。通过最大剪应变增量云图确定滑动

面,根据最大主应力云图判定拉应力区<sup>[26]</sup>。

#### 3.2 边坡稳定性

根据表 5 的脉动灌浆方案,分析灌浆后的边坡稳定性,评价脉动灌浆的预加固效果,得到经优化的灌浆设计参数。

根据《水利水电工程边坡设计规范》(SL386—2016)的规定,1 级边坡正常运用时抗滑稳定安全系数为 1.30~1.50。为进行比较,将直接开挖、脉动灌浆预加固开挖、方案优化后稳压灌浆预加固开挖 3 个方案下各工况的边坡安全系数列于表 6。图 6 所示为工况 6 脉动灌浆的预加固效果。

表 6 各工况下的边坡安全系数

Table 6 Slope safety factors under each condition

工况	边坡安全系数		
	脉动灌浆	直接开挖	稳压灌浆
1	1.22		—
2	1.49		—
3	1.62	1.09	—
4	1.35		—
5	1.59		—
6	1.83		1.46

分析图 6 可知,最大主应力基本沿着边坡平行分布,灌浆范围内结构面与结构体之间的最大主应力大小相当,而渠道底部内侧的最大主应力比外侧的小。破坏单元主要分布在结构面及覆盖层,水平层理及覆盖层以剪切破坏为主,破坏单元不连续;竖向节理以张拉破坏为主,尤其集中在开挖面附近结构面的上部。中下部以剪切破坏为主,部分结构体单元也发生了破坏。拉应力区位于结构体与坡脚部位,被灌浆区域隔断,渠道内侧及坡面覆盖层的位移显著,最大位移增量为 17.86 cm。顺开挖方向最大位移为 13.9 cm,出现在渠道开挖面的中部。位移等值线为折线,沿结构面分布,靠近开挖面处相对较陡。竖向最大位移为 5.27 mm,出现在开挖线附近的结构面上。最大剪应变增量主要出现在边坡底部岩体及开挖线附近未灌入浆液的竖向结构面上。可见,脉动灌浆后岩体的抗变形能力得到了明显的改善。

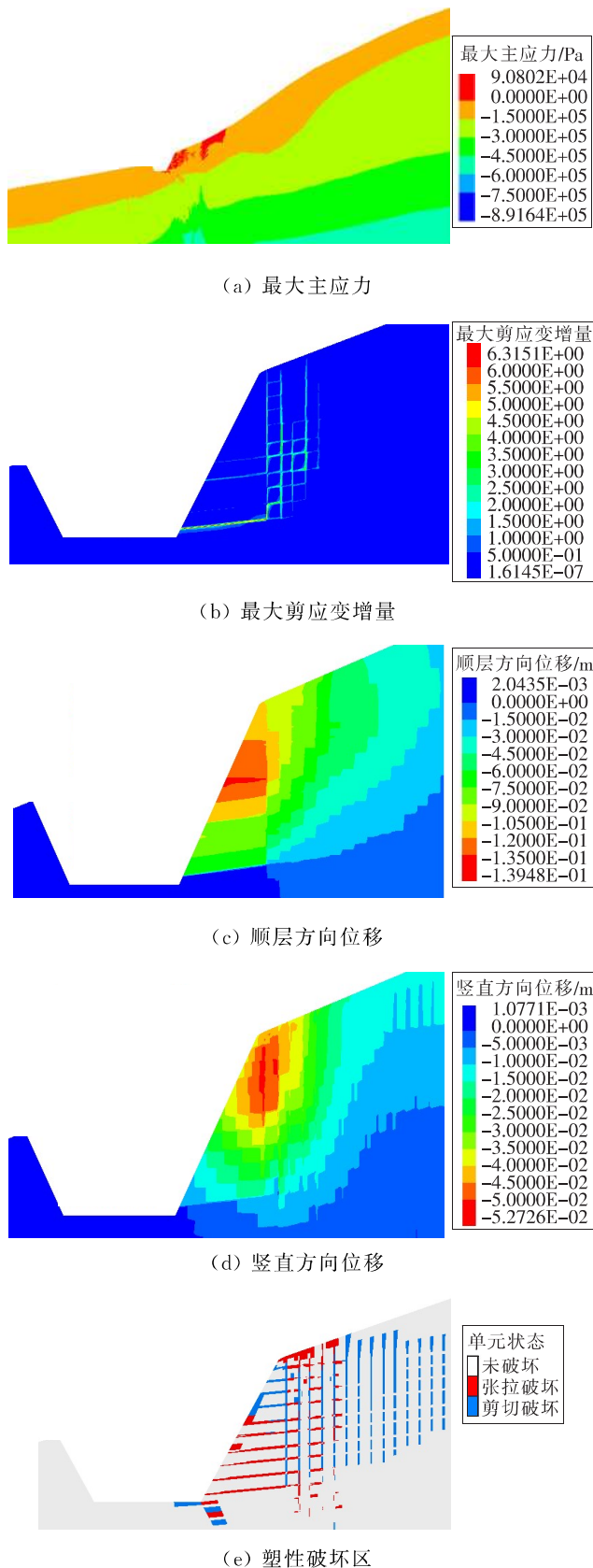


图 6 脉动灌浆的预加固效果

Fig. 6 Pre-reinforcement effect of pulsating grouting

压灌浆预加固开挖方案进行效果评价。

#### 4.1 直接开挖方案

对裂隙岩体直接开挖,当整体失稳时边坡安全系数为 1.09。直接开挖的预加固效果如图 7 所示。

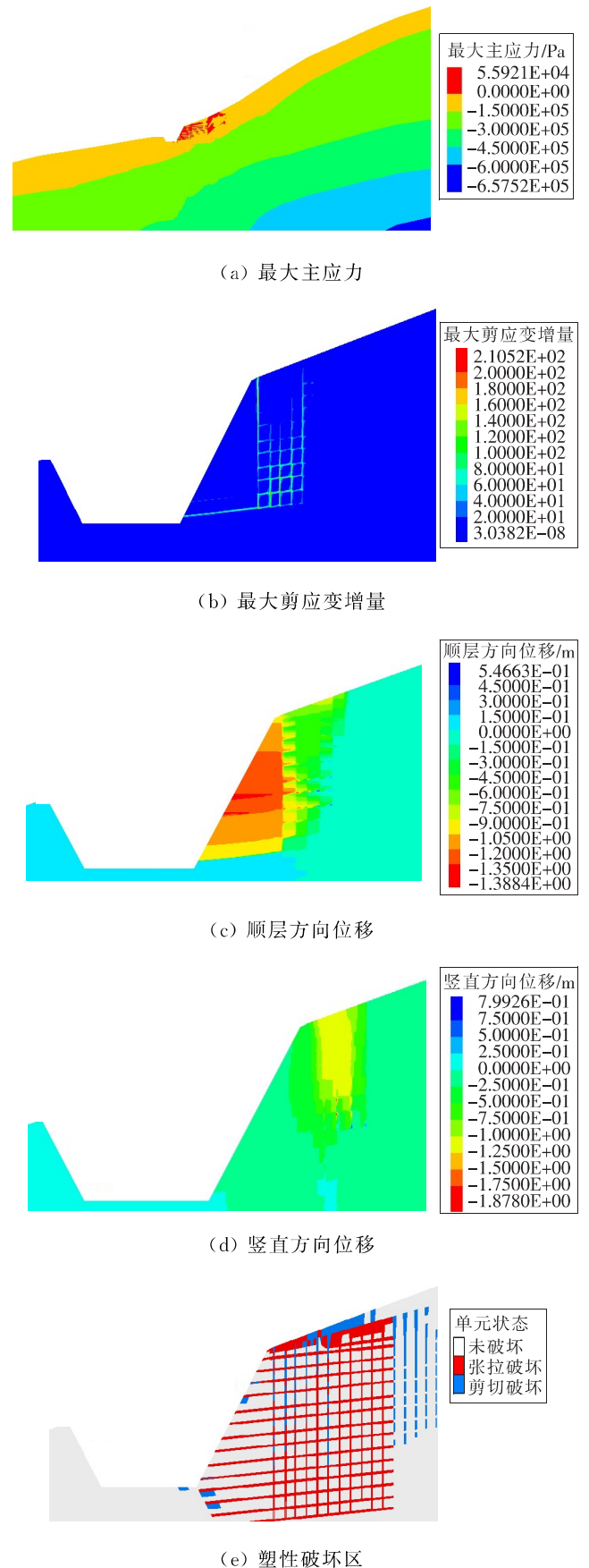


图 7 直接开挖的预加固效果

Fig. 7 Pre-reinforcement effect of direct excavation

#### 4 其他开挖方式效果比较

根据灌浆模拟及稳定性分析结果可知,将脉动灌浆预加固措施应用于裂隙岩体的开挖工程,效果很好。为进一步对比分析,需对直接开挖、稳



从图7可以看出,破坏单元主要分布在结构面上,水平层理以剪切破坏为主,竖向节理上部以张拉破坏为主、下部以剪切破坏为主。渠道底部内侧及坡面存在拉应力区。最大剪应变增量自开挖线附近坡面沿结构面贯通至渠道底部,并与内侧竖向节理形成了凹形贯通,边坡存在张拉开裂与坍塌风险。渠道内侧靠近节理裂隙的部分岩体的位移变形显著增大,渠道外侧岩体发生了不同程度的滑移,最大位移增量为69.2 cm,两构造节理之间的岩、土体向下塌落,深度达53.8 cm,这与边坡突降暴雨后边坡失稳、渠道内侧岩体整体推移的现象较吻合。图8所示为渠道内侧的破坏状况。从图8可以看出,部分渠段内侧边坡发生推移,形成了宽0.5~2.0 m、深1.0 m左右的沟槽。这在一定程度上说明非均质正交结构面模型具有较高的可靠度,参数区间的设置也较恰当,同时也说明了裂隙岩体开挖采用预加固措施的必要性。



图8 渠道内侧破坏状况

Fig. 8 Destruction condition inside canal

#### 4.2 稳压灌浆预加固方案

稳压灌浆预加固方案的参数为优化后的脉动灌浆方案的参数。在与脉动灌浆方案相同孔排距、孔深的情况下,稳压灌浆预加固方案的边坡安全系数为1.24,其预加固效果如图9所示。

从图5(a)~5(c)中的右图可以看出,在稳压灌浆方式下浆液在裂隙岩体中扩散。灌浆孔内浆液含量较大,说明浆液未能被通畅地灌入结构面,而是沿着部分结构面呈丝状或带状进行扩散,并且存在部分结构面未被灌入浆液的情况。浆脉沿扩散方向的宽度变化不一,不平整度显著,多处未良好搭接,部分岩体裂隙渗透率降低到1 mD以下。这在一定程度上说明浆液未能较好地扩散,致使灌浆压力大幅提升。灌浆后,最大剪应变增量主要分布在岩体深部、开挖线附近未灌入浆液的竖向结构面上。

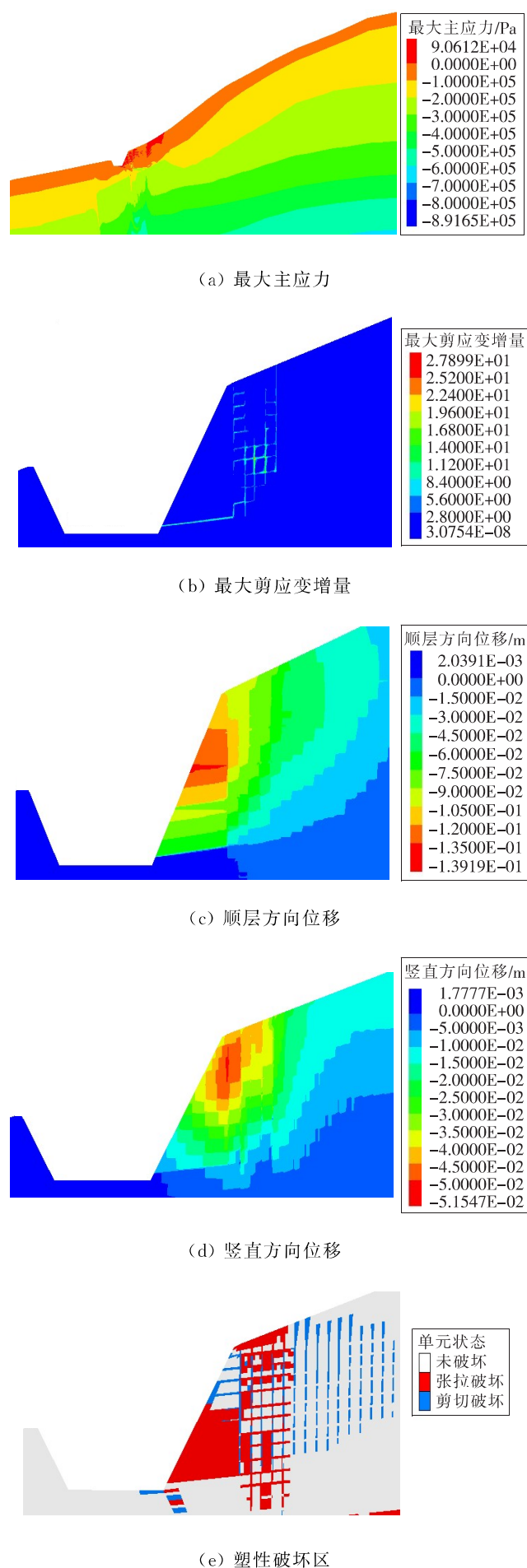


图9 稳压灌浆的预加固效果

Fig. 9 Pre-reinforcement effect of pressure-stabilized grouting

## 5 结论

以涔天河灌区工程干渠典型边坡为例,开展了裂隙岩体渠道边坡开挖脉动灌浆预加固设计研究,并得到以下主要结论:

1) 查明地质条件和破坏机理,获得岩、土体物理力学参数。考虑参数的随机分布,构建了三维随机结构面正交地质模型。模型的模拟结果与工程实际失稳情况较吻合,说明采用的精细化数值模拟方法和参数较恰当,具有较高的可靠度。

2) “自下而上,分段灌浆”工艺显著改善了灌浆、无效灌浆等严重问题;脉动灌浆有效地改善了浆液的扩散分布状况及密实度,使裂隙岩层中的浆液充填均匀,岩体的整体性及强度得到了明显提升,且采用预加固的开挖方式能满足边坡的安全要求。

3) 基于 TOUGH2 及 FLAC<sup>3D</sup> 精细化数值模拟平台,构建非均质结构面裂隙岩体地层,模拟脉动灌浆。根据浆液有效扩散范围内单元的浆液填充率,借鉴强度折减法进行插值换算,量化灌浆对单元强度参数的影响。

4) 针对不同的灌浆设计参数,考虑浆液黏度的时变性及岩体裂隙中土体填充的不均匀性、随机性,赋予裂隙土壤呈随机分布、数值不一的强度参数,模拟脉动灌浆工艺,最终得到了经优化的设计参数。

### 〔参考文献〕

- [1] LIU X R, LIU Y Q, LU Y M, et al. Numerical analysis of evaluation methods and influencing factors for dynamic stability of bedding rock slope[J]. Journal of Vibro Engineering, 2017, 19(3): 1 937-1 961.
- [2] 唐佳, 彭振斌, 何忠明. 基于连续介质的裂隙岩体流固耦合数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3 800-3 807.  
TANG Jia, PENG Zhen-bin, HE Zhong-ming. Numerical analysis of fluid-solid coupling in fractured rock mass based on continuous medium[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(11): 3 800-3 807.
- [3] 杨烜宇, 王闫超, 李景皓, 等. 基于能量守恒确定岩体结构面的抗剪强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2020,

39(S1): 2 674-2 682.

YANG Xuan-yu, WANG Yan-chao, LI Jing-hao, et al. A method to determine the shear strength of structural plane based on energy conservation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 2 674-2 682.

- [4] 刘泉声, 雷广峰, 卢超波, 等. 注浆加固对岩体裂隙力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3 140-3 147.  
LIU Quan-sheng, LEI Guang-feng, LU Chao-bo, et al. Experimental study of grouting reinforcement influence on mechanical properties of rock fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3 140-3 147.
- [5] 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): 1 328-1 335.  
OUYANG Jin-wu, ZHANG Gui-jin, LIU Jie. Diffusion mechanism of split grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1 328-1 335.
- [6] 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.
- [7] 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): 2 120-2 128.  
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): 2 120-2 128.
- [8] 王臻, RUTQVIST Jonny, 左建平, 等. 裂隙单元修正等效渗透率模型及其验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 728-733.  
WANG Zhen, RUTQVIST Jonny, ZUO Jian-ping, et al. A modified equivalent permeability model of fracture element and its verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 728-733.
- [9] 敖雪菲, 王晓玲, 赵梦琦, 等. 坝基裂隙岩体三维灌浆数值模拟[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 945-954.

- AO Xue-fei, WANG Xiao-ling, ZHAO Meng-qi, et al. Three-dimensional grouting simulation in fractured rock mass of the dam bedrock[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 945-954.
- [10] 张庆松, 张连震, 张霄, 等. 基于浆液黏度时空变化的水平裂隙岩体注浆扩散机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1 198-1 210.
- ZHANG Qing-song, ZHANG Lian-zhen, ZHANG Xiao, et al. Grouting diffusion in a horizontal crack considering temporal and spatial variation of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1 198-1 210.
- [11] 王保林, 何忠明. 降雨入渗条件下多层顺层软弱夹层土坡稳定性分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1): 8-13, 29.
- WANG Bao-lin, HE Zhong-ming. Stability analysis of multistrata weak intercalation layer under rainfall infiltration condition[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2018, 15(1): 8-13, 29.
- [12] 龚啸. 含软弱夹层岩质高边坡稳定性影响因素分析[J]. 公路与汽运, 2020(6): 85-89.
- GONG Xiao. Analysis of influence factors on stability of high rock slope with weak interlayer[J]. Highways and Automotive Applications, 2020(6): 85-89.
- [13] 冯开帅, 姜谔男, 吴洪涛, 等. 顺层非贯通节理边坡稳定性及破坏模式研究[J]. 公路工程, 2020, 45(6): 52-58.
- FENG Kai-shuai, JIANG An-nan, WU Hong-tao, et al. Study on stability and failure mode of bedding non-through joint slope[J]. Highway Engineering, 2020, 45(6): 52-58.
- [14] 张永杰, 马文琪, 罗伟庭, 等. 基于经验强度准则的岩体力学参数敏感性分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 1-7.
- ZHANG Yong-jie, MA Wen-qi, LUO Wei-ting, et al. Sensitivity analysis of mechanical parameters of rock mass based on empirical strength criterion[J]. Journal of Traffic Science and Engineering, 2020, 36(3): 1-7.
- [15] 韦立德, 安少鹏, 李鹏云, 等. 输电线路塔基土质边坡稳定性评价的BP网络模型[J]. 电力勘测设计, 2013(2): 17-20.
- WEI Li-de, AN Shao-peng, LI Peng-yun, et al. BP network model of stability evaluation of tower foundation soil slope in transmission line[J]. Electric Power Survey and Design, 2013(2): 17-20.
- [16] 郑明新, 伍明文. 爆破振动下偏压隧道洞口段边坡稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(8): 2 018-2 027.
- ZHENG Ming-xin, WU Ming-wen. Stability analysis of slope at biased tunnel portal section under blasting vibration pressure tunnel under blasting vibration[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(8): 2 018-2 027.
- [17] 周家文, 陈明亮, 李海波, 等. 水动力型滑坡形成运动机理与防控减灾技术[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1 131-1 145.
- ZHOU Jia-wen, CHEN Ming-liang, LI Hai-bo, et al. Formation and movement mechanisms of water-induced landslides and hazard prevention and mitigation technologies[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1 131-1 145.
- [18] 孟永东, 王定杰, 蔡征龙, 等. 内掺微生物水工混凝土的早期强度和微观特征[J/OL]. 水力发电学报. [2021-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2241.TV.20210330.1021.002.html>.
- MENG Yong-dong, WANG Ding-jie, CAI Zheng-long, et al. Study on early strength and micro-pore characteristics of hydraulic concrete with mineralized microorganisms[J/OL]. Journal of Hydroelectric Engineering. [2021-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2241.TV.20210330.1021.002.html>.
- [19] 王伟, 刘桃根, 吕军, 等. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3 607-3 617.
- WANG Wei, LIU Tao-gen, LYU Jun, et al. Experimental study influence of water-rock chemical interaction on mechanical characteristics of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3 607-3 617.
- [20] 王志文, 赵海军, 马凤山, 等. 非均质共面断续节理岩体拉伸剪切破裂机制研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 989-999.
- WANG Zhi-wen, ZHAO Hai-jun, MA Feng-shan, et al. Numerical study on tension-shear failure mechanism of heterogeneous coplanar intermittent jointed rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 989-999.
- [21] 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.
- [22] HENDERSON N, BRÉTTAS J C, SACCO W F. A three-parameter Kozeny-Carman generalized equation for fractal porous media [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(15): 4 432-4 442.
- [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-ying, 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): 2 876-2 882.
- 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): 2 876-2 882.
- [26] 郭芳, 梁正召, 龚斌, 等. 岩土工程边坡稳定性分析中的拉伸破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3 192-3 205.
- GUO Fang, LIANG Zheng-zhao, GONG Bin, et al. Tensile failure in stability analysis of rock and soil slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3 192-3 205.
- 
- (上接第 31 页)
- [12] 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 等. 江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 749-760.
- WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, et al. The current status of antibiotics and resistance genes in representative water sources of Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 749-760.
- [13] 程逸群, 王龙飞, 胡晓东, 等. 江苏省代表性水源地持久性有机污染物污染特征及风险评价[J]. 江苏水利, 2020(4): 1-9.
- CHENG Yi-qun, WANG Long-fei, HU Xiao-dong, et al. Pollution characteristics and risk assessment of persistent organic pollutants in representative water sources in Jiangsu Province [J]. Jiangsu Water Resources, 2020(4): 1-9.
- [14] 王华, 冯启言, 郝莉莉. 我国底泥重金属污染防治[J]. 污染防治技术, 2004, 17(1): 75-78.
- WANG Hua, FENG Qi-yan, HAO Li-li. Prevention and control of heavy metal pollution in sediments in my country [J]. Pollution Control Technology, 2004, 17(1): 75-78.
- [15] DAVISON W, ZHANG H. Insitu speciation measurements of trace components in natural waters using thin film gels [J]. Nature, 1994, 367: 546-548.
- [16] 李希媛, 滕辉, 赵玉杰, 等. 薄膜扩散梯度 (DGT) 技术在环境微界面物质运移过程研究中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1 649-1 660.
- LI Xi-yuan, TENG Hui, ZHAO Yu-jie, et al. Application of diffusion gradient in thin-films (DGT) technology in the study of the transport process of environmental microinterfaces [J]. Journal of Agro-Environment Sciences, 2020, 39(8): 1 649-1 660.
- [17] 李财, 任明漪, 石丹, 等. 薄膜扩散梯度 (DGT): 技术进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2 613-2 628.
- LI Cai, REN Ming-yi, SHI Dan, et al. Thin film diffusion gradient (DGT): technological progress and prospects [J]. Journal of Agricultural Environment Sciences, 2018, 37(12): 2 613-2 628.