

文章编号:1672-3961(2023)01-0092-08

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2021.591

# 基于连续-非连续元降雨工况三维边坡稳定性分析

牛犇<sup>1</sup>,张新伟<sup>2</sup>,周玉<sup>3</sup>,李婧<sup>1</sup>,徐兴全<sup>2</sup>,张一鸣<sup>1\*</sup>

(1.河北工业大学土木与交通学院,天津 300401;2.北京市地质工程勘察院,北京 100048;3.中国科学院力学研究所,北京 100190)

**摘要:**基于连续-非连续单元方法,引入应力场和渗流场数值耦合算法。根据兰营地区边坡地质条件建立高精度三维地质灾害模型,考虑不同降雨工况,对边坡稳定性进行分析,并与监测数据展开对比验证模型可靠性。研究表明,该边坡天然工况下安全系数为1.79,短时强降雨工况下边坡安全系数约为1.20,边坡破裂度为10.36%。经稳定性评价,该边坡在天然工况下处于基本稳定状态,在暴雨状态下处于欠稳定状态,存在一定失稳危险。

**关键词:**连续-非连续单元法;水力耦合;降雨型滑坡;模型验证;数值模拟

**中图分类号:**TU45 **文献标志码:**A

**引用格式:**牛犇,张新伟,周玉,等.基于连续-非连续元降雨工况三维边坡稳定性分析[J].山东大学学报(工学版),2023,53(1):92-99.

NIU Ben, ZHANG Xinwei, ZHOU Yu, et al. Three-dimensional slope stability analysis based on continuum-discontinuum element rainfall condition[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(1):92-99.

## Three-dimensional slope stability analysis based on continuum-discontinuum element rainfall condition

NIU Ben<sup>1</sup>, ZHANG Xinwei<sup>2</sup>, ZHOU Yu<sup>3</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, XU Xingquan<sup>2</sup>, ZHANG Yiming<sup>1\*</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Beijing Institute of Geological & Prospecting Engineering, Beijing 100048, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Based on the continuum-discontinuum element method and the numerical coupling algorithm of stress field and seepage field, a high-precision three-dimensional geological hazard model was established according to the geological conditions of slope in Lanying area. In the calculation process, different rainfall conditions were considered to analyze the slope stability, and compared with the monitoring data to verify the reliability of the model. The study showed that the safety factor of the slope was 1.79 under natural conditions. The safety factor of the slope was about 1.20 and the slope rupture degree was 10.36% under short-time heavy rainfall condition. By stability evaluation, the slope was basically stable under natural condition and understable under rainstorm condition. The slope had a certain risk of instability.

**Keywords:** continuum-discontinuum element method; hydraulic coupling; rainfall-type landslide; model validation; numerical simulation

## 0 引言

近年来,我国地质灾害处于多发态势,滑坡灾

害最为突出,滑坡体在脱离母岩后往往产生高速、远程的次生灾害,造成毁灭性破坏和伤亡<sup>[1-2]</sup>。降雨诱发边坡失稳是一个连续-非连续的过程,降雨入渗则是典型的渗流场和应力场耦合问题<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2021-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178324);国家重点研发计划项目(2018YFC1505504)

第一作者简介:牛犇(1997—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程。E-mail:1648022951@qq.com

\*通信作者简介:张一鸣(1984—),男,上海人,教授,博士,主要研究方向为岩土工程和土木工程防灾减灾。E-mail:yiming.zhang@hebut.edu.cn

目前对降雨型滑坡研究主要包括模型试验和数值模拟。模型试验是一种比较直观形象的边坡稳定性分析手段,由于边界条件容易控制及操作等特点,使得模型试验在边坡稳定性分析方面有着广泛的应用。文献[4]通过模型试验和全自动人工模拟降雨器对不同材料堆积体在降雨作用下的滑坡机理和孔隙水压力变化特征进行分析。文献[5]开展了人工降雨条件下黄土边坡室内模型试验,对岩土体的变形、含水率和基质吸力进行分析。文献[6]结合传感器和人工降雨系统,通过开展室内降雨模型试验,对降雨入渗后边坡内部的变形响应。文献[7]采用地质分析和降雨离心机模型试验相结合的方法,研究水力作用下的硬土软岩质滑坡的启动机制。但模型试验在成本方面花费较高,在尺度和时间方面不易控制。与模型试验相比,数值模拟具有高效省时和低成本的特点,并且数值模拟方法在分析过程中可以考虑复杂的边界条件,能够模拟复杂工况,不仅可以模拟边坡的破坏和变形,还可以获得边坡在不同位置不同时刻的应力应变状态。文献[8]提出坡面径流-非饱和渗流分析的渗流场和应力场耦合计算算法,通过有限元对耦合情况和非耦合情况进行对比分析。文献[9]利用 Geo-Studio 软件对非饱和土边坡渗流场和应力场进行数值耦合分析,总结非饱和土边坡的稳定性和滑移面的演化规律。文献[10]利用 ABAQUS 有限元分析软件,建立渗流-应力耦合控制方程和边坡有限元模型,对渗流应力耦合作用下的露天矿边坡进行稳定性分析。文献[11]采用二维有限元渗流-应力耦合程序对基于饱和-非饱和渗流有限元计算的渗流场和应力场计算边坡的危险滑动面和安全系数。目前,连续方法如有限元方法在处理边坡大位移、大变形的破坏问题时容易因为网格畸变导致计算不收敛;非连续方法如离散单元法在处理水力耦合方面存在一定缺陷。基于连续-非连续单元法引入水力耦合数值算法则会结合两者优势,分析整个系统在大变形大位移状态下的水力耦合问题。文献[12]基于连续-离散耦合方法,对两个典型边坡进行稳定性分析,证明了连续-离散耦合方法对于山体滑坡的适用性。文献[13]基于连续-非连续耦合分析理论,利用强度折减法简化降雨工况的方法对高填方边坡进行稳定性分析,研究结果表明耦合方法在边坡稳定性分析方面的可行性。

上述研究发现,大部分边坡稳定性分析都是将边坡简化为二维模型进行分析计算,很大程度上忽

略边坡三维效应。本研究选取兰营地质灾害调查点作为研究对象,基于连续-非连续单元法,采用 CAD 和 GID 软件进行三维曲面高精度建模,采用模拟数据与实际数据对比方法对模型进行验证,引入应力场和渗流场耦合算法对不同降雨工况下边坡的变形运动和失稳破坏展开数值模拟研究,研究结果可为兰营地区滑坡灾害防灾减灾提供理论依据和科学指导。

## 1 数值计算方法

### 1.1 连续-非连续单元法

本研究依据连续-非连续单元法 (continuum-discontinuum element method, CDEM),通过数值模拟研究降雨作用下坡体的运动规律和边坡的稳定性<sup>[14-15]</sup>。CDEM 是一种有限元与离散元耦合的显式数值分析方法,不仅可以模拟材料的弹塑性变形及接触碰撞过程,还可以模拟材料从连续到非连续的渐进破坏过程。CDEM 包含块体和界面两部分,每个块体单元包括一个或多个有限元单元,用于表征材料的弹性、塑性等连续特征。界面由块体边界组成,块体边界上用弹簧连接,用于表征材料的断裂、碰撞等非连续特征<sup>[16-17]</sup>,如图 1 所示。在数值计算过程中,通过块体间及块体内单元间界面的破裂来模拟材料从连续到非连续的渐进破坏过程。

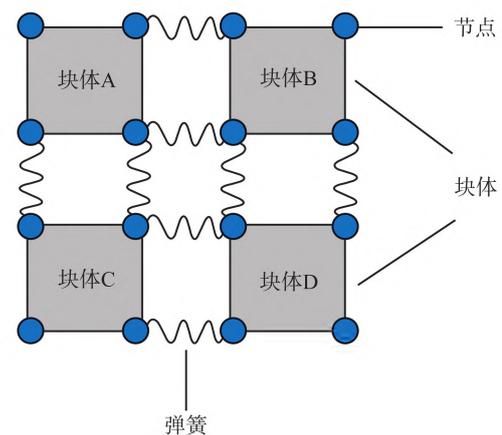


图 1 单元界面断裂计算模型

Fig.1 Calculation model of element interface fracture

CDEM 理论基础是拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial v_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial u_i} = Q_i, \quad (1)$$

式中: $u_i$  和  $v_i$  为广义坐标; $L$  为拉格朗日系统的能量; $J$ ;  $Q_i$  为非保守力做的功, $J$ 。CDEM 核心控制方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + K_c u_c + C_c \dot{u}_c = F, \quad (2)$$

式中: $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 $u$ 、 $u_c$ 、 $\dot{u}_c$  分别为单元内所有节点的加速度

列阵、速度列阵、位移列阵以及虚拟裂缝上的相对位移列阵、相对速度列阵,  $M$ 、 $C$ 、 $K$ 、 $K_c$ 、 $C_c$  和  $F$  分别为单元质量矩阵、单元阻尼矩阵、单元刚度矩阵、接触面刚度矩阵、接触面阻尼矩阵和节点外部荷载矩阵。

### 1.2 渗流-应力耦合

针对降雨型滑坡,水是最重要的影响因素,水对滑坡的影响主要在于水的入渗作用和渗流-应力耦合作用。岩体内部含有大量的孔隙结构,孔隙是水的存在场所和转移通道。当岩土体内部孔隙中产生水头差时,孔隙中的水会产生渗流运动,产生动水压力,动水压力即渗透体积力。动水压力以荷载的形式作用在边坡内的岩土体上,造成岩土体内部应力场的改变,而应力场的改变会使得岩土体的空间位置发生改变,进而会造成岩土体内部孔隙体积的改变,孔隙体积的改变会影响孔隙率,从而影响渗透系数<sup>[18]</sup>。

降雨作用下渗流场对应力场的作用是通过改变岩土体的动水压力也就是渗透体积力来实现的,而应力场是通过改变岩土体的孔隙特征和分布情况来对渗流场造成影响。渗流场与应力场耦合示意图如图2所示。

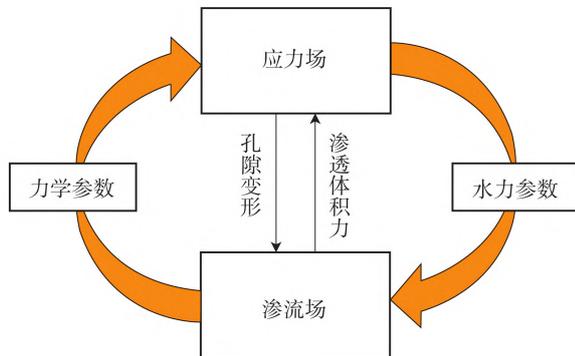


图2 渗流-应力耦合示意图

Fig.2 Schematic diagram of seepage-stress coupling

考虑应力场影响的渗流场数学模型<sup>[19]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\partial_{ijk}) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K(\partial_{ijk}) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\partial_{ijk}) \frac{\partial H}{\partial z} \right] = 0, \\ (x, y, z) \in \Omega_1 \\ K(\partial_{ijk}) \frac{\partial H}{\partial n_2} = q(x, y, z), (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ H(x, y, z) = z, K(\partial_{ijk}) \frac{\partial H}{\partial n_3} = 0, (x, y, z) \in \Gamma_2 \\ H(x, y, z) = H_1(x, y, z), (x, y, z) \in \Gamma_3 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $H$ 为水头分布; $K(\partial_{ijk})$ 为渗透系数,  $m^2 \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$ ;  $\Omega_1$ 为渗流计算区域; $\Gamma_1$ 为已知流量边界; $\Gamma_2$ 为已知自由边界; $\Gamma_3$ 为已知水头边界; $n_2$ 、 $n_3$ 为对应边界的法线方向。

考虑渗流场影响的应力场数学模型为

$$\begin{cases} \sigma_{ijk,j} + f_i = 0, (x, y, z) \in \Omega_2 \\ \varepsilon_{ijk} = \frac{1}{3}(\mathbf{u}_{ijk} + \mathbf{u}_{jki} + \mathbf{u}_{kij}), (x, y, z) \in \Omega_2 \\ \sigma_{ijk} = \lambda \varepsilon_v \delta_{ijk} + 3G \varepsilon_{ijk}, (x, y, z) \in \Omega_2 \\ \sigma_{ijk} n_j = t_{ijk}(H), (x, y, z) \in s_\sigma \\ u_i = \bar{u}_i, (x, y, z) \in s_u \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $f_i$ 为渗透体积力,  $kN \cdot m^{-3}$ ;  $\sigma_{ijk}$ 、 $\sigma_{jik}$ 为应力张量; $\mathbf{u}_{ijk}$ 、 $\mathbf{u}_{jki}$ 、 $\mathbf{u}_{kij}$ 为位移场; $\varepsilon_{ijk}$ 为应变张量; $\Omega_2$ 为应力场区,与渗流场区相同; $\varepsilon_v$ 为体积应变; $\lambda$ 、 $G$ 为土体的弹性常数; $t_{ijk}(H)$ 为已知体积力分布,关于渗流场水头分布的函数; $s_\sigma$ 为已知体积力边界; $n_j$ 为其法线方向的余弦; $s_u$ 为已知位移边界; $\bar{u}_i$ 为其上的已知位移分布。

### 1.3 本构模型

计算过程中,对于块体单元和块体与块体之间的界面选取不同的本构模型,单元的本构模型选择 Mohr-Coulomb 模型,判断单元的应力是否已经达到或超过 Mohr-Coulomb 准则的计算式为:

$$\begin{cases} f^s = s_1 - s_3 N_\varphi + 2C \sqrt{N_\varphi} \\ f^t = s_3 - T \\ h = f^t + \alpha^p (s_1 - s^p) \end{cases}, \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ \alpha^p = \sqrt{1 + N_\varphi^2} + N_\varphi \\ s^p = TN_\varphi - 2C \sqrt{N_\varphi} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $C$ 为块体的黏聚力, Pa;  $\varphi$ 为块体的内摩擦角, ( $^\circ$ );  $T$ 为块体的抗拉强度, Pa;  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 分别为块体的最大、中间和最小主应力, Pa;  $N_\varphi$ 、 $\alpha^p$ 、 $s^p$ 为常数;  $f^s$ 是判断块体是否满足剪切破坏准则的指标;  $f^t$ 是判断块体是否满足拉破坏准则的指标。

块体与块体之间的虚拟界面的本构采用 Mohr-Coulomb 脆性断裂模型 brittleMC, 进行拉伸破坏的判断和法向接触力修正的计算式为:

$$\begin{aligned} &\text{if } -F_n(t + \Delta t) \geq T_0 A_c, \\ &\text{then } F_n(t_1) = -T(t_0) A_c, \\ &\quad T(t_1) = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $T(t_0)$ 为初始时刻的抗拉强度, Pa;  $A_c$ 为弹簧的特征面积,  $m^2$ ;  $F_n(t_1)$ 为  $t_1$ 时刻弹簧的拉力, N;  $T(t_1)$ 为  $t_1$ 时刻的抗拉强度, Pa。

进行剪切破坏的判断及切向接触力修正的计算式为:

$$\text{if } F_s(t_1) \geq F_n(t_1) \tan \varphi + c(t_0 A_c),$$

$$\begin{aligned} \text{then } F_s(t_1) &\geq F_n(t_1) \tan \varphi + c(t_0 A_c), \\ c(t_1) &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $F_s(t_1)$ 为  $t_1$  时刻的剪切力, N;  $F_n(t_1)$ 为  $t_1$  时刻拉力, N;  $c(t_0)$ 为  $t_0$  时刻黏聚力, Pa;  $c(t_1)$ 为  $t_1$  时刻的黏聚力, Pa。

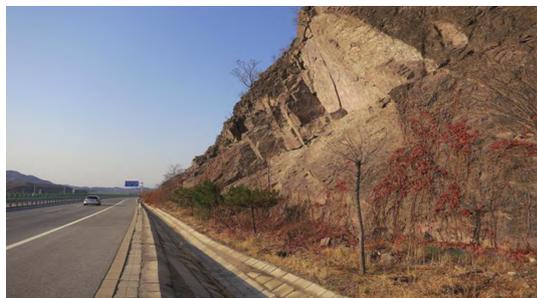
## 2 工程分析

### 2.1 工程背景

调查区位于怀柔北部山区,地貌为典型的低山河谷地貌,白河流域右岸,地势整体西高东低,海拔高度为 400~1000 m。地属暖温带半湿润型气候,四季分明,雨热同期,夏季湿润,冬季寒冷少雪。受气候与地形影响,调查区所处位置降水量具有年际变化大、季节分配不均、汛期降水集中等特点。降雨多集中在夏季(6~9月),占全年降雨量的 80%以上,年平均降雨量在 850 mm 以上,多年平均 24 h 最大降雨量为 80 mm。降雨量集中和降雨强度大是引发地质灾害的主要原因。该调查区为岩质边坡,岩性为砂岩,灾害规模等级为小型,威胁对象为 G111 国道。隐患点位于 G111 国道北侧,为人工修路削坡形成陡坡,地表基岩裸露,偶见少量灌木。宏观地质灾害隐患点如图 3 所示。



(a) 崩塌隐患点 1



(b) 崩塌隐患点 2

图 3 地质灾害隐患点

Fig.3 Hidden danger points of geological disasters

### 2.2 数值模型

本研究依据勘察报告中地形地貌、地质构造、地层岩性等基本状况,结合 CAD 和 GID 软件建立三维数值模型。本模型长约 320 m、宽约 230 m、高约 205 m,其中滑坡隐患区域边坡长约 68 m、宽约

61 m、高约 21 m。模型含有 48 408 个节点,259 018 个块体,均为四面体单元。边坡模型分为两组,一组为基岩,另一组为基岩上的崩塌体(砂岩)。计算模型及网格如图 4 所示。



图 4 计算模型和网格

Fig.4 Computational model and grid

CDEM 中包含块体和界面两部分,在界面上引入数值弹簧表述层间作用,界面材料参数包括强度和刚度两部分,强度有黏聚力、抗拉强度和摩擦角,刚度有法向刚度和切向刚度,强度基于弹簧两侧块体的弱值选取,刚度考虑两侧的粗糙度<sup>[20]</sup>。本研究中界面材料参数基于块体继承获取,刚度基于块体 10 倍继承,保证计算过程中界面刚度参数为一个数值,强度基于块体 1 倍获取,与块体一致。计算过程所用力学参数和渗透参数如表 1 所示。

表 1 计算参数

Table 1 Calculated parameters

材料	弹性模量/ MPa	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa	摩擦角/ (°)
砂岩	17	0.086	0.09	20
基岩	32	0.500	0.33	42
材料	体积模量/ MPa	孔隙率/ %	渗透系数/ (m·s <sup>-1</sup> )	比奥 系数
砂岩	0.9	0.10	1×10 <sup>-5</sup>	1
基岩	1.0	0.15	2×10 <sup>-6</sup>	1

### 2.3 计算过程与边界条件

计算过程分为两阶段:第一阶段考虑重力作用,计算至平衡状态,获取边坡初始应力、位移等信息;第二阶段基于第一阶段获取的应力场,作为初始计算状态,清除第一阶段位移信息,在边坡上部表面施加流量边界,分析降雨作用下坡体的运动特性和破坏过程。针对边界条件,模型的四周及底部采用法向位移约束。边坡顶部表面设置为透水边界,保证雨水自由入渗;假设边坡四周处于无限远处,边坡底部、后部和左右两边设置为不透水边界,边坡前部设置为透水边界,保证雨水自由出渗。降雨流量边界条件施加在边坡表面,计算中不考虑地下水的影响,认为降雨对该滑坡的诱发影响仅为坡面渗流。

2.4 模型验证

在进行数值模拟分析之前,需要对边坡进行初始地应力平衡,还原真实的应力场,保证数值模拟与真实情况相符合。导入模型之后,施加重力和边界条件,计算至平衡状态,清除边坡位移信息,获取边坡初始应力信息。初始应力场如图5所示。

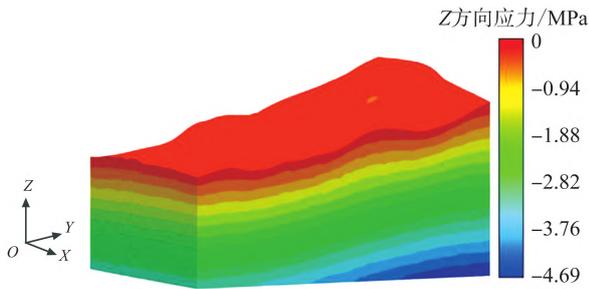


图5 初始应力场云图

Fig.5 Cloud image of initial stress field

统计兰营地区日降雨量以及位移数据,根据勘察资料提供的监测点位置在软件内模型中设置监测点,依据统计的降雨数据在边坡表面施加降雨,将软件内检测的位移数据与兰营地区实际位移数据进行对比,确定模型合理性。兰营地区降雨量数据以及 GDEM 软件模拟合位移数据如图6所示。

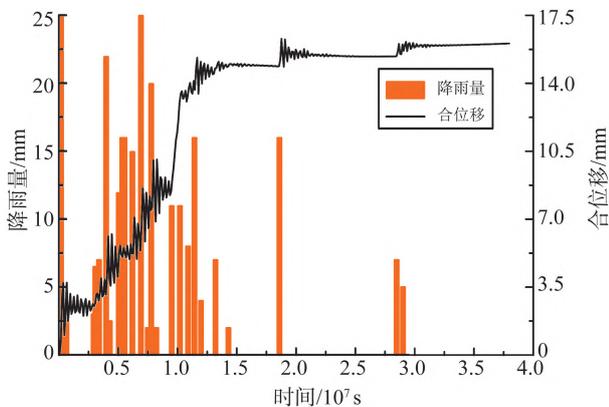


图6 降雨量数据和合位移数据

Fig.6 Rainfall data and displacement data

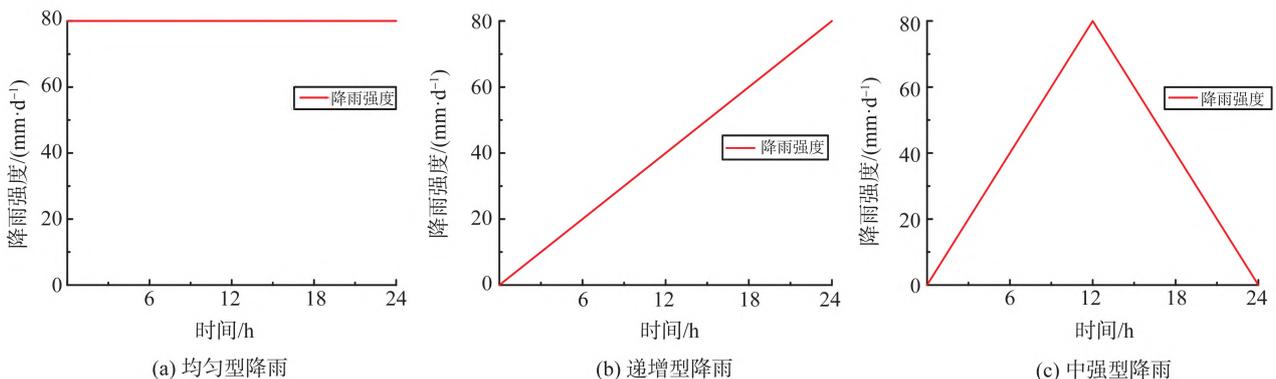


图7 3种不同的降雨工况

Fig.7 Three different rainfall conditions

降雨量统计数据包括2020年4月—2021年6月降雨强度,共430d左右,约 $3.72 \times 10^7$ s,2020年4月13日设置为起始日期。该地区降雨量主要集中于2020年6月—2020年9月,最大日降雨量为25mm左右。根据图6可知,从起始时刻至第 $0.5 \times 10^7$ 秒大约为2020年4月—2020年6月,该时间段降雨量随时间分布不均匀,雨量相对较少,根据位移监测数据可知,此时合位移相对较低,波动不明显;从第 $0.5 \times 10^7$ 秒—第 $1.31 \times 10^7$ 秒,大约为2020年6月—2020年9月,该时间段降雨量集中且雨量相对较大,合位移波动明显且位移较大;从第 $1.31 \times 10^7$ 秒—第 $3.72 \times 10^7$ 秒,大约为2020年9月—2021年6月,该时间段降雨量相对较少且仅存在较短时间段的降雨,位移波动不明显。

合位移总体呈现在雨季上升,雨季之后平缓的趋势,与兰营地区实际监测点合位移数据相符合。根据位移数据对比分析,认为模型合理,可以用于后续不同降雨工况下的边坡稳定性计算分析。

3 模拟结果及分析

依据第2章验证得到的模型在本章开展不同降雨工况下的计算工作,并对该边坡的位移场和渗流场等展开分析。通过查阅兰营地区历史降雨量数据,选取降雨强度80mm作为参考数据,进行以下不同降雨工况下的边坡稳定性计算。考虑3种不同的短时强降雨工况:工况1为均匀型降雨,设置降雨强度为80mm/d,保持降雨强度不变,持续时间24h;工况2为递增型降雨,开始降雨强度为0,之后24h之内降雨强度线性递增至80mm/d;工况3为中强型降雨,从起始时刻经过12h降雨强度从0递增至80mm/d,再经过12h~24h递减至0。具体降雨工况如图7所示。

考虑 3 种不同的降雨工况,在滑体坡顶、坡中和坡脚分别设置监测点。降雨作用下,坡体表面土体持续受到雨水冲刷,造成土体强度降低,上部土体下滑压迫坡脚土体,再加上坡脚处土体持续受到雨水的冲刷,造成坡脚处土体位移较大。不同降雨工况下监测点处位移如图 8 所示。

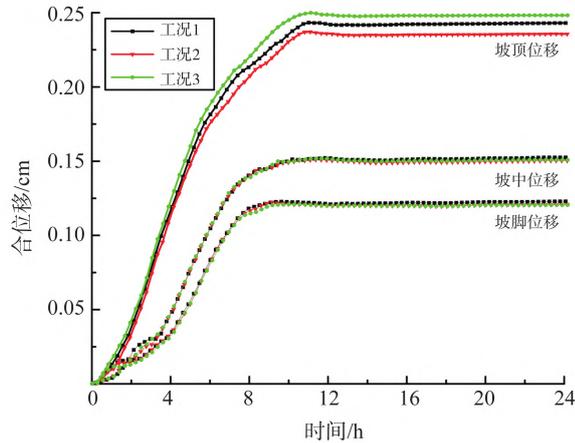


图 8 合位移时程曲线

Fig.8 Time history curve of combined displacement

由图 8 可知:3 种降雨工况下坡顶和坡中处的位移没有明显差别,工况 1 坡脚处的合位移最大,为 24.3 cm;工况 3 坡脚处的合位移最小,为 23.2 cm。随着降雨持续进行,上部土体由于雨水沿着坡顶和坡面入渗导致坡体自重增大,压迫坡脚处岩土体,再加上坡脚处岩土体持续受到雨水冲刷,产生裂缝,雨水沿裂缝进入土体,造成坡脚处土体强度降低,造成坡脚处土体滑动。根据图 8 可知,坡顶、坡中和坡脚的位移变化可以分为两个阶段,以降雨渗流经过 10.8 h 为分界点,位移在降雨经过 10.8 h 之前迅速上升,在降雨经过 10.8 h 以后,位移曲线呈缓慢增长趋势。

由图 9 降雨 24 h 后最大主应力云图可知,在模型四周出现拉应力集中带;在坡顶和坡面表面,出现拉应力,在软弱面交汇处,出现拉应力集中现象,容易出现变形和破坏。同时在坡体周边同样出现拉应力集中现象,边坡后缘出现了一定深度的张拉破坏区。

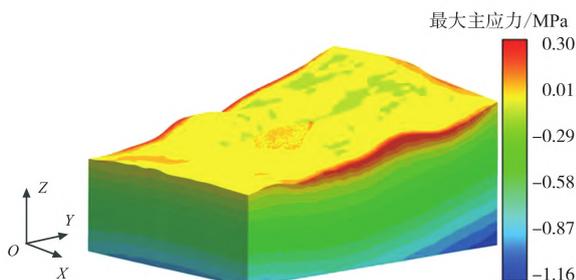


图 9 最大主应力云图

Fig.9 Cloud diagram of maximum principal stress

3 种降雨工况下,边坡在降雨持续一段时间后,表现出一定范围深度的暂态饱和区,暂态饱和区随降雨历时的增大而增大,暂态饱和区的形成与降雨强度有直接关系。施加降雨之后,随着时间推移,一方面,由于降雨渗流作用,雨水沿边坡表面向内入渗;另一方面,降雨强度大于坡体渗透系数,雨水在坡体表面汇集形成径流,沿坡体两侧沟谷区域流向坡体坡脚处,具体饱和状态如图 10 所示。

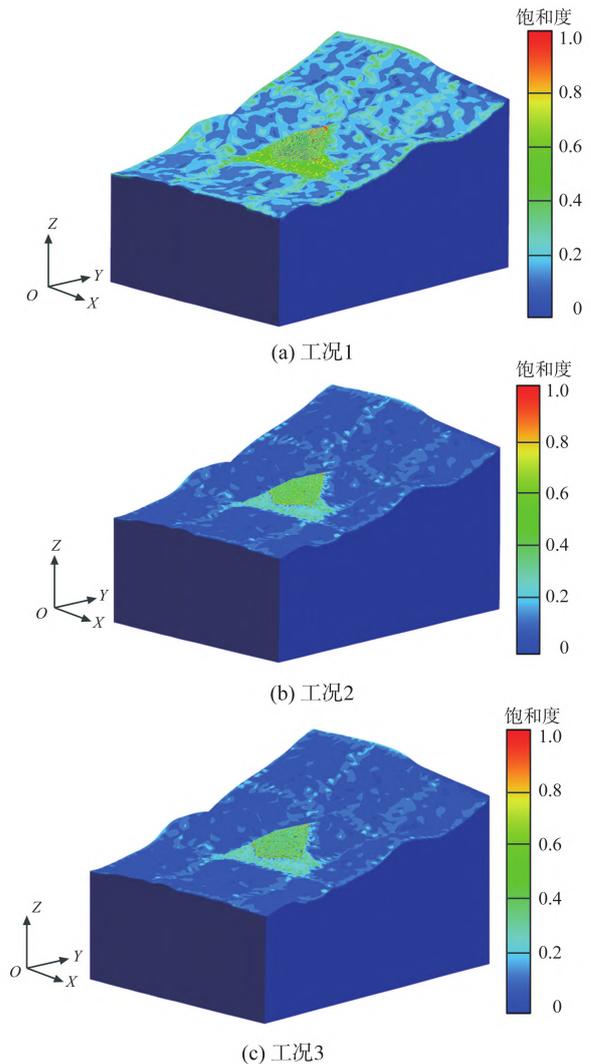


图 10 不同工况下的饱和度( $t=24\text{ h}$ )

Fig.10 Saturation under different working conditions( $t=24\text{ h}$ )

图 10 (a) 为均匀型降雨工况下饱和状态图,此工况下,降雨集中且降雨强度较大,坡体表面和坡体顶部有局部地区接近饱和,雨水沿边坡两侧的沟谷区域流向坡脚处;图 10 (b) 和图 10 (c) 分别为递增型降雨和中强型降雨工况下的饱和度云图,此两种工况下降雨强度相对较低,坡体四周处出现饱和区,雨水在坡脚处少量聚集。

定义破裂度为已发生破裂的面积占可发生破裂截面积比例,可破裂面包括虚拟界面和真实界

面,用于描述裂缝数量变化趋势。边坡的破裂度是表征滑坡体所处状态的关键指标<sup>[21]</sup>。监测得到3种不同降雨工况下的破裂度曲线如图11所示。

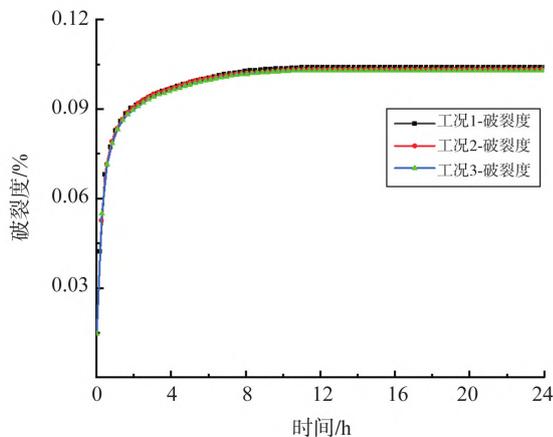


图11 破裂度时程曲线

Fig.11 Time-history curve of fracture degree

由图11可知,破裂度时程曲线具有明显的两阶段特征,第一阶段从降雨起始时刻经过4h,此阶段破裂度呈现迅速增长阶段;第二阶段为降雨第5小时至降雨结束,此阶段破裂度提升缓慢。破裂主要发生在降雨初期,最终时刻破裂度为10.39%。根据强度折减法求解边坡安全系数,天然工况下边坡安全系数为1.79,降雨工况1下边坡安全系数为1.191,降雨工况2边坡安全系数为1.199,降雨工况3下边坡安全系数为1.199。

## 4 结论

本研究选取京“怀”(G111)兰营地质环境调查点为研究对象,基于连续-非连续单元法,引入渗流-应力耦合计算模型,对降雨-应力-渗流作用下的边坡稳定性进行分析。

通过连续方法强度折减法和非连续方法破裂度方法分别对边坡稳定性进行分析,利用连续方法求解边坡安全系数;天然工况下安全系数为1.79,3种不同短时强降雨工况下边坡安全系数约为1.20;利用非连续方法求解边坡灾变状态:3种不同短时强降雨工况下边坡破裂度为10.36%。经稳定性评价,该边坡在天然工况下处于基本稳定状态。

### 参考文献:

- [1] 文海家,张岩岩,付红梅,等.降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展[J].中国公路学报,2018,31(2):15-29.  
WEN Haijia, ZHANG Yanyan, FU Hongmei, et al. Research status of instability mechanism of rainfall-induced landslide and stability evaluation methods [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2):15-29.
- [2] 黄润秋.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.  
HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their mechanism in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454.
- [3] 李世海,冯春,周东.滑坡研究中的力学方法[M].北京:科学出版社,2018.  
LI Shihai, FENG Chun, ZHOU Dong. Mechanical methods in landslide research [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [4] 石振明,赵思奕,苏越.降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(4):135-140.  
SHI Zhenming, ZHAO Siyi, SU Yue. An experimental study of the deposit slope failure caused by rainfall [J]. Journal of Engineering Geological and Hydrogeological Lancet, 2016, 43(4): 135-140.
- [5] 周杨,刘果果,白兰英,等.降雨诱发黄土边坡失稳室内试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(6):838-843.  
ZHOU Yang, LIU Guoguo, BAI Lanying, et al. Laboratory experimental study on rainfall induced loess slope instability [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2016, 49(6): 838-843.
- [6] 陈林万,张晓超,裴向军,等.降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验[J].水文地质工程地质,2021,48(6):152-161.  
CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Rainfall-induced linear loess fill slope instability model test [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(6):152-161.
- [7] 朱谭方,辛鹏,姚磊华,等.水力作用诱发硬土软岩滑坡启动机制研究[J].岩土力学,2021,42(10):2733-2754.  
ZHU Tanfang, XIN Peng, YAO Leihua, et al. Initiation mechanism of soft rock landslide induced by hydraulic action [J]. Geotechnical Mechanics, 2021, 42(10): 2733-2754.
- [8] 田东方,刘德富,王世梅,等.土质边坡非饱和渗流场与应力场耦合数值分析[J].岩土力学,2009,30(3):810-814.  
TIAN Dongfang, LIU Defu, WANG Shimei, et al. Coupling numerical analysis of unsaturated seepage and stress fields for soil slope [J]. Geotechnical Mechanics, 2009, 30(3): 810-814.
- [9] 吕雨桦,梁德贤,王莹,等.降雨条件下非饱和土边坡渗流-应力耦合分析[J].桂林理工大学学报,2021,41(2):318-324.  
LÜ Yuhua, LIANG Dexian, WANG Ying, et al.

- Seepage-stress coupling analysis of unsaturated soil slope under rainfall infiltration[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2021, 41(2): 318-324.
- [10] 李柱,谢锋.渗流-应力耦合作用下露天矿边坡稳定性研究[J].*工矿自动化*,2018,44(12):83-88.  
LI Zhu, XIE Feng. Research on slope stability of open-pit mine under coupled seepage-stress[J]. *Industrial and Mining Automation*, 2018, 44(12): 83-88.
- [11] 周家文,徐卫亚,邓俊晔,等.降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J].*水利学报*,2008, 39(9):1066-1073.  
ZHOU Jiawen, XU Weiya, DENG Junye, et al. Stability analysis of slope under the condition of rainfall infiltration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(9): 1066-1073.
- [12] 王叶.基于连续-离散耦合分析方法的边坡滑动及堰塞体形成过程研究[D].武汉:武汉大学,2018.  
WANG Ye. Study on slope sliding and weir plug formation process based on continuous discrete coupling analysis method[D]. Wuhan:Wuhan University, 2018.
- [13] 司宪志,宁宇,石崇,等.基于连续-非连续方法的高填方边坡变形稳定性分析[J].*河北工程大学学报(自然科学版)*,2021,38(2):53-60.  
SI Xianzhi, NING Yu, SHI Chong, et al. Deformation stability analysis of high fill slope based on continuous discontinuous method[J]. *Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition)*, 2021, 38(2): 53-60.
- [14] LI S H, WANG J G, LIU B S, et al. Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope using a Face-to-Face discrete element method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40(4):331-348.
- [15] WANG Y, ZHAO M, LI S, et al. Stochastic structural model of rock and soil aggregates by continuum-based discrete element method[J]. *Science in China Series E: Engineering & Materials Science*, 2005, 48(1): 95-106.
- [16] 冯春,李世海,刘晓宇.半弹簧接触模型及其在边坡破坏计算中的应用[J].*力学学报*,2011,43(1):184-192.  
FENG Chun, LI Shihai, LIU Xiaoyu. Semi-spring contact model and its application to failure simulation of slope[J]. *Acta the Mechanica Sinica*, 2011, 43(1): 184-192.
- [17] FENG Chun, LI Shihai, LIU Xiaoyu, et al. A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan Landslide[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(1):26-35.
- [18] 明俊男.基于位移反分析的地铁深基坑渗流-应力耦合研究[D].成都:成都理工大学,2018.  
MING Junnan. Research on seepage and stress coupling of metro deep foundation pit based on displacement back analysis[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [19] 黄香,崔志瑞,郭莹莹,等.考虑渗流-应力耦合的黏土心墙坝边坡稳定分析[J].*广东水利水电*,2021(5):6-11.  
HUANG Xiang, CUI Zhirui, GUO Yingying, et al. Analysis of slope stability of clay core dam considering seepage and stress coupling[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2021(5): 6-11.
- [20] 林钦栋,冯春,唐德泓,等.冲击载荷作用下路面结构的沉降及破坏特征[J].*爆炸与冲击*, 2019, 39(11): 109-122.  
LIN Qindong, FENG Chun, TANG Dehong, et al. Settlement and failure characteristics of pavement structure under impact load[J]. *Explosion and Impact*, 2019, 39(11): 109-122.
- [21] 郭汝坤,冯春,周东,等.基于破裂度可靠性的边坡灾变状态评价方法研究[J].*岩石力学与工报*,2016,35(增刊1):3111-3118.  
GUO Rukun, FENG Chun, ZHOU Dong, et al. Study on the evaluation method of slope disaster status based on the reliability of fracture degree[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Suppl.1): 3111-3118.

(编辑:郭少华)