



山东大学学报(工学版)

Journal of Shandong University(Engineering Science)

ISSN 1672-3961,CN 37-1391/T

《山东大学学报(工学版)》网络首发论文

题目: 8度地震烈度区新民隧道出口处边坡的稳定性
作者: 王心泉, 王智猛, 牛犇, 蒋恒, 冯春
收稿日期: 2022-06-16
网络首发日期: 2022-09-26
引用格式: 王心泉, 王智猛, 牛犇, 蒋恒, 冯春. 8度地震烈度区新民隧道出口处边坡的稳定性[J/OL]. 山东大学学报(工学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1391.T.20220922.1822.014.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

文章编号:1672-3961(2022)05-0000-00

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2022.218

8度地震烈度区新民隧道出口处边坡的稳定性

王心泉^{1,2},王智猛³,牛犇⁴,蒋恒³,冯春^{1,2*}

(1. 中国科学院力学研究所,北京 100190; 2. 中国科学院大学工程科学学院,北京 1000493; 3. 中国中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都 610031; 4. 河北工业大学土木与交通学院,天津 300401)

摘要:为预防地震导致的滑坡对道路的危害,保证交通的安全性,基于连续-非连续单元法,根据新民隧道出口高陡岩质边坡地质资料建立数值分析模型,采用数值模拟方法对该高陡岩质边坡进行地震作用下的稳定性分析。研究表明,该处边坡在自然状态下处于基本稳定状态,在地震作用下,坡体前部出现破裂,出现岩石掉落情况。针对破裂岩体,对不同加固方式下的边坡安全系数进行分析,模拟发现隧道上方倒悬体在地震作用后具有较高的破裂崩塌风险,需进行重点加固。研究结果为该处高陡岩质边坡崩塌灾害防灾减灾提供理论依据和科学指导。

关键词:连续-非连续单元法;边坡稳定性;地震;加固支护;数值模拟

中图分类号:TU43

文献标志码:A

引用格式:王心泉,王智猛,牛犇,等.8度地震烈度区新民隧道出口处边坡的稳定性[J].山东大学学报(工学版),2022,52(5).

WANG Xinquan, WANG Zhimeng, NIU Ben, et al. Slope stability at the exit of Xinmin tunnel in 8 degree seismic intensity area [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(5).

Slope stability at the exit of Xinmin tunnel in 8 degree seismic intensity area

WANG Xinquan^{1,2}, WANG Zhimeng³, NIU Ben⁴, JIANG Heng³, FENG Chun^{1,2,*}

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 1000493, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to prevent the hazard of landslides caused by earthquakes on the road and ensure the safety of traffic, based on the continuum-discontinuum element method, a numerical analysis model was established according to the geological data of high and steep rock slope at the exit of Xinmin tunnel. The model used numerical simulation to analyze the stability of the slope under earthquake action. Study showed that under the action of an earthquake, the front part of the slope body broke and rock fell. In view of the fractured rock mass, the safety factor of slope under different reinforcement methods was analyzed. It was found that the overhanging body above the tunnel had a high risk of rupture and collapse after earthquake action, which needed to be strengthened. This result could provide theoretical basis and scientific guidance for the collapse prevention of high and steep rock slope.

Keywords: continuum-discontinuum element method; slope stability; earthquake; reinforced support; numerical simulation

0 引言

我国山区众多、地形复杂,随着全国道路网络的不断发展,越来越多的交通线路需要穿过地

质复杂的山地区域,这在对道路架设提出考验的同时,也对道路沿线地质灾害的排查预防提出了严格的要求。山区地质灾害隐患分布广泛,由于强烈地震和极端天气等因素影响,地质灾害处于多发态势。地震滑坡是破坏力极强的次生地震灾害,具有

收稿日期:2022-06-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1505504)

第一作者简介:王心泉(1995—),女,山东临沂人,博士研究生,主要研究方向连续非连续数值计算方法。E-mail: wangxinquan@imech.ac.cn

* 通信作者简介:冯春(1982—),男,浙江富阳人,教授,博士,主要研究方向连续非连续数值计算方法。E-mail: fengchun@imech.ac.cn

数量多、分布广、危害大的特点^[1-2]。地震作用后,边坡原始的平衡状态遭到破坏,稳定性发生改变,极易发生崩塌落石等地质灾害,对道路交通安全性存在巨大的威胁。对道路沿线边坡在地震作用下的稳定性进行研究具有重要意义。

近年来,国内外学者对地震作用下的边坡稳定性展开了大量研究,主要可分为与理论研究与数值分析两个方面。文献[3]基于拟静力法研究不同参数变化对地震作用下边坡稳定性的影响,研究表明,坡高和坡脚是两个主要影响因素。文献[4]采用拟静力法对三向地震作用下的三维边坡稳定性进行分析,研究不同参数对安全系数的影响,认为水平地震作用对安全系数影响最大。拟静力法是通过静力加载方式模拟地震作用,其优点是可以根据需要改变加载历程。但是拟静力试验只能得到结构在反复荷载下的恢复力滞回特性,不能反应地震全过程。文献[5]根据 Newmark 滑动法分析均质土坡滑动的永久位移,考虑不同的地震作用,给出不同屈服速度与永久位移的关系。文献[6]认为传统 Newmark 法不考虑结构退化,提出了一种考虑结构退化的岩质边坡的永久位移算法,计算结果表明该法与试验计算结果较符合。工程界普遍采用 Newmark 滑动法来确定地震作用下边坡的永久位移,但是永久位移是一个带量纲的量,针对不同尺度的边坡模型会存在不适用的情况。

随着计算机水平的不断提升,数值分析手段已成为研究地震作用下边坡破坏问题的重要手段。文献[7]以汶川地震为研究背景,利用强度折减法和 FLAC3D 有限元软件对地震作用下边坡的破坏模式进行数值模拟。文献[8]基于有限单元法,研究分析边坡地形以及输入地震波频率对边坡稳定性和动力响应规律的影响,研究表明,边坡动力响应与自身特性以及地震波频率存在关系。地震作用下的边坡涉及到大变形和大位移问题,在这种情况下传统有限单元法单元网格由于过分畸变而导致计算不收敛^[9-11]。离散单元法(discrete element method, DEM)则弥补了这一缺陷,该方法将研究区域划分为刚体或不可变形的颗粒,其间通过弹簧接触,整个系统可以描述大变形运动状态^[12]。连续-非连续单元方法(continuum-discontinuum element method, CDEM)是新兴的一种耦合算法,该方法结合连续介质力学和非连续介质力学特点,既可以对连续区域的小变形进行有限元求解,也可以对大位移、大变形的区域进行离散元求解^[13-14]。

本研究以新民隧道出口处的边坡为例,采用 CDEM 对该边坡在静力及动力状态下的稳定性进行研究,将地震后坡体的残余强度用于震后安全系数的计算,根据边坡在地震作用下的潜在落石情况设计边坡加固方案,对不同加固方案下边坡的稳定性进行分析与评价。

1 新民隧道出口边坡模型

边坡位于岷江断裂带南段之下盘,隧道区总体为单斜构造,但受区域性断裂影响严重,段内砂岩、板岩及千枚岩中小褶皱发育,产状变化较大,岩体破碎,节理发育。主要发育有两组节理,节理面多数呈微起伏一起伏粗糙,少数平直光滑和平直粗糙。节理以共轭形式存在为主,节理如下: $N67^{\circ}W/65^{\circ}NE$ (倾向坡外,与坡面近平行)、 $N30^{\circ}E/72^{\circ}NW$ (倾向公路侧及微坡外)、 $N20^{\circ}W/57^{\circ}SW$ 。边坡层理厚度一般 0.1~0.3 m,节理以共轭形式存在为主,节理间距一般为 0.3~3 m,迹长一般为 0.5~9 m,最长约 30 m。

新民隧道出口高陡岩质边坡地面高程为 2370~2560 m,相对高差达 220 m,受岷江及岷江支流解放村沟切割,三面临空,岩体卸荷强烈,该处山体自然坡度达 $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$,局部近直立或倒悬,存在大量节理或裂隙,发育大量的危岩落石及倒悬不稳定岩体,如图 1 所示。边坡坡脚发育大型岩堆体,边坡存在大型崩塌的条件,有较高的落石风险。



图1 隧道出口危岩落石

Fig.1 Rockfall from dangerous rock at tunnel exit

2 数值计算方法

2.1 连续-非连续单元法

CDEM 是一种基于拉格朗日能量系统的计算方法,基于拉格朗日方程建立计算方程,通过动态松弛法进行显式求解,可实现裂缝的拓展及单元的破裂,适用于模拟单元从连续到非连续的

过程^[15-18]。

CDEM 方法通过拉格朗日能量系统建立控制方程

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

式中: Q_i 为系统的非保守力; \dot{u}_i 为节点速度, $m \cdot s^{-1}$; u_i 为单元节点位移, m ; L 为拉格朗日函数, 可写为:

$$L = \Pi_m + \Pi_e + \Pi_f, \quad (2)$$

式中: Π_m 、 Π_e 、 Π_f 分别为系统动能、弹性能和势能, J 。

在拉格朗日系统下的单元上讨论, 单元的能量泛函为

$$L = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{u}_i^2 dV + \int_V \frac{1}{4} \sigma_{ij} (u_{i,j} + u_{j,i}) dV - \int_V f_i u_i dV, \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, $kg \cdot m^{-3}$; \dot{u}_i 为节点速度, $m \cdot s^{-1}$; σ_{ij} 为单元应力, Pa ; f_i 表示单元节点的体力, Pa ; V 是单元体积, m^3 。非保守力包括阻尼力和边界外力, 分别为

$$Q_u = \int_V \mu \dot{u}_i dV, Q_t = - \int_V \bar{T}_i dS, \quad (4)$$

式中: μ 是阻尼系数; \bar{T}_i 为单元边界上的面力, Pa 。根据式(2)~(4), 得

$$\begin{aligned} & - \left(\int_V \rho \ddot{u}_i dV + \int_V \sigma_{ij} \frac{\partial u_{i,j}}{\partial u_i} - \int_V f_i dV \right) = \\ & \int_V \mu \dot{u}_i dV - \int_S \bar{T}_i dS, \end{aligned} \quad (5)$$

利用分部积分有

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial u_{i,j}}{\partial u_i} dV = \int_S \sigma_{ij} n_j dS - \int_V \sigma_{ij,j} dV, \quad (6)$$

利用拉格朗日方程简化为

$$\begin{aligned} & \int_V (\sigma_{ij,j} + f_i - \rho \ddot{u}_i - \mu \dot{u}_i) dV + \\ & \int_S (\bar{T}_i - \sigma_{ij} n_j) dS = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

此时, 即可根据有限元方法或弹簧元方法, 单元节点所受的内力等于单元变形能对节点的位移求偏导, 即

$$F_i^e = \frac{\partial \Pi_e}{\partial u_j} = K_{ij}^e u_j, \quad (8)$$

式中: K_{ij}^e 为弹簧元的刚度系数或有限元的刚度矩阵。拉格朗日方程可以写为

$$\begin{aligned} & \int_V \rho \ddot{u}_i dV + \int_V \mu \dot{u}_i dV + F_i^e = \\ & \int_V f_i dV + \int_S \bar{T}_i dS, \end{aligned} \quad (9)$$

最终单元的动力学方程可以写为

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t), \quad (10)$$

式中: \ddot{u} 、 \dot{u} 、 u 分别为单元内所有节点的加速度列阵、速度列阵、位移列阵, M 、 C 、 K 和 F 分别为单元质量矩阵、单元阻尼矩阵、单元刚度矩阵、和节点外部荷载矩阵。

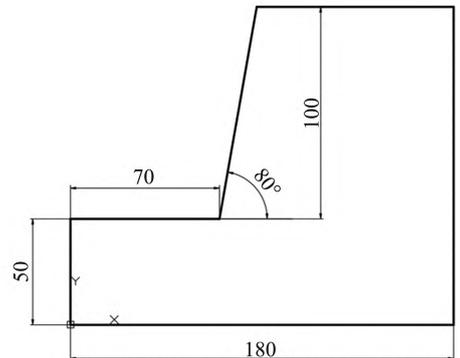
2.2 边坡稳定性模拟方法

通过强度折减法计算边坡在静力状态下的安全系数, 用于评估静力状态下边坡的稳定性。对于震后的安全系数, 首先将地震波输入计算模型进行计算, 获取地震后边坡岩体的残余强度, 将地震作用后边坡的残余强度输入至初始模型, 根据强度折减法计算震后的边坡安全系数, 用于评估地震后边坡的稳定性。

3 计算模型概化

该边坡层理间距较小, 节理面上的岩土参数不确定, 若按现场实际勘察情况进行建模计算, 建模难度较大, 建模得到的计算网格较小且网格质量差, 计算网格较小将大大增加计算成本及计算时间。由于网格质量差且节理面参数不确定, 节理间距较小得到的结果并不一定较网格大节理面参数统一的情况更符合实际, 因此对该处边坡模型进行概化处理, 建模时增加边坡层理间距。

由于边坡稳定性与层理间距相关, 一般情况下表现为层理间距增加边坡稳定性增加, 层理间距减小边坡稳定性减小。因此需对概化模型计算得到的边坡安全系数进行修正。通过简单边坡模型计算得到边坡安全系数与层理间距之间的关系, 用于边坡安全系数修正。简单边坡尺寸如图2所示, 设计4种层理的简单模型, 如图3所示。



单位: m

图2 简单边坡模型示意图

Fig.2 Sketch of simple slope dimension

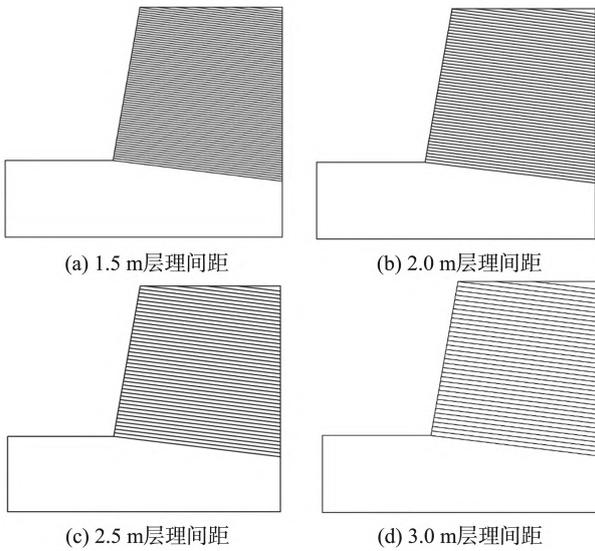


图3 设置不同节理的简单边坡模型

Fig.3 Simple slope models with different joints are set up

计算以上4种层理间距边坡在静力状态下的安全系数,并对以上4种边坡施加水平向正弦函数变化的地震波,峰值加速度为 $0.30g$ (g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$),周期为 $0.40s$,计算地震作用后边坡的安全系数。计算结果如表1所示。

表1 不同层理间距下的边坡安全系数

Table 1 Slope safety factors under different bedding spacing

间距/m	静力安全系数	震后安全系数
1.5	1.52	1.40
2.0	1.64	1.59
2.5	1.88	1.69
3.0	2.01	1.73

对计算得到的安全系数数据进行拟合,静力情况下的安全系数拟合结果如图4所示,拟合公式为:

$$f=0.342L+0.993, \quad (11)$$

其中: f 为安全系数, L 为层理间距。

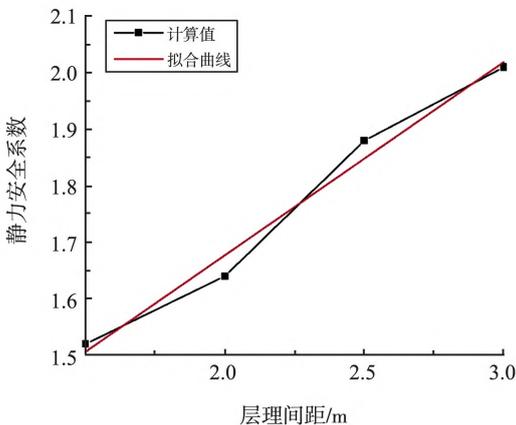


图4 简单边坡模型的静力安全系数

Fig.4 Static safety factor of simple slope

地震作用后的安全系数拟合结果如图5所示,拟合公式为:

$$f=0.218L+1.112, \quad (12)$$

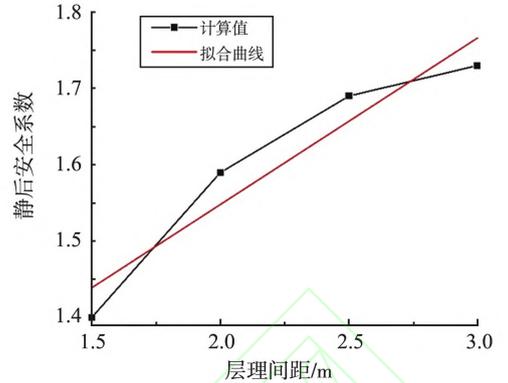


图5 简单边坡模型的震后安全系数

Fig.5 Safety factor after earthquake of simple slope

根据新民隧道洞口上方已清方断面的勘察情况进行计算模型的建立,综合考虑计算成本及计算结果可靠性,建立的计算模型如图6所示。设置 10° 层理,间隔 $1m$;设置 75° 节理,间隔 $2.5m$;设置 90° 节理,间隔 $2m$ 。



图6 新民隧道边坡计算模型

Fig.6 Calculation model of Xinmin tunnel slope

4 模拟结果及分析

4.1 原始边坡稳定性

对无喷锚网支护的原始边坡进行稳定性分析,计算原始边坡在静力状态下的稳定性,通过强度折减法计算得原始边坡在静力状态下的安全系数为 1.44 ,处于稳定状态。原始边坡静力状态下各位移如图7所示。边坡在静力情况下位移较小,最大位移不超过 $1cm$,在静力状态下稳定性较高。

由于本边坡位于断裂带附近8度烈度区域,考虑边坡在后续使用时间内可能受地震影响,根据当地地震动加速度反应谱,地震动峰值加速度为 $0.30g$,地震动反应谱特征周期为 $0.40s$,对边坡施加地震波动力荷载,对原始边坡在地震作用下的稳定性进行研究。施加的地震波波形如图8所示,设置如图9所示的监测点,对边坡不同高度的位移情况进行检测。

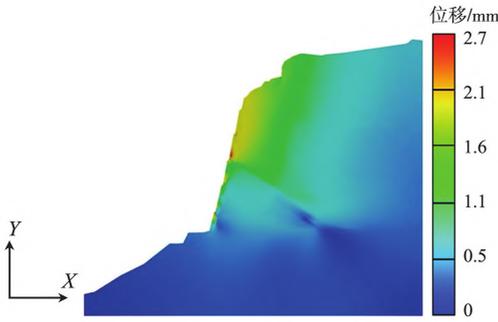


图7 原始边坡静力状态下的位移

Fig.7 Displacement of original slope under static state

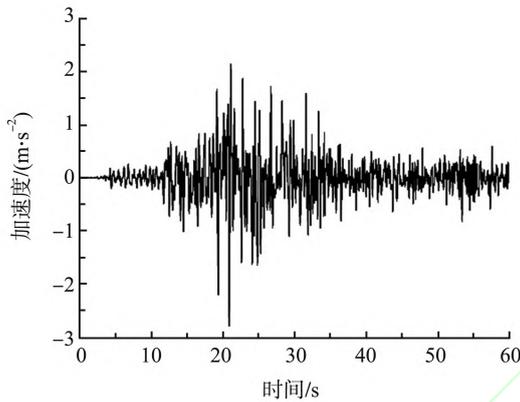


图8 地震波加速度曲线

Fig.8 Seismic wave acceleration curve

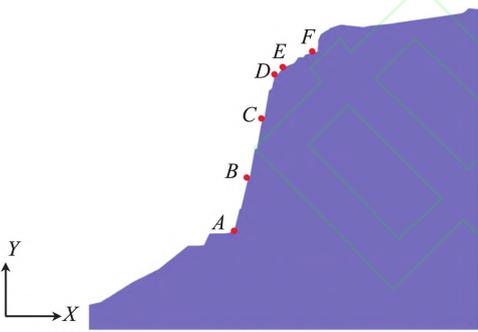


图9 监测点示意图

Fig.9 Schematic diagram of monitoring point

原始边坡地震作用后的合位移云图如图10所示,监测点测得的原始边坡在地震作用下的位移时程曲线如图11所示。

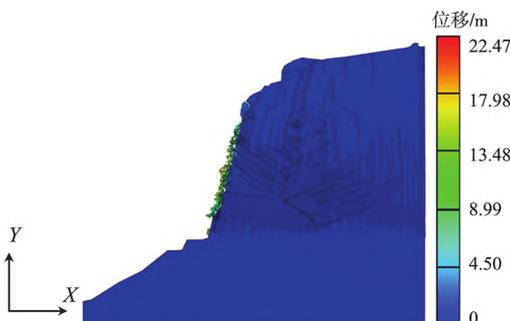


图10 原始边坡地震后位移云图

Fig.10 Displacement of original slope after earthquake

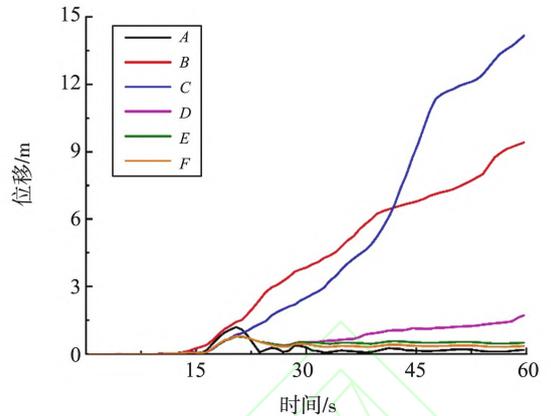


图11 原始边坡地震作用过程中监测点位移

Fig.11 The displacement of the monitoring point during the earthquake of the original slope

该边坡在地震作用后已处于失稳状态,用 S 表示位移,从监测点位移可知位移值 $S_C > S_B > S_D > S_E > S_F > S_A$,坡体中部的位移大,坡脚位移最小,坡顶部 E 点与 F 点位移较小。 B 点、 C 点监测点附近的表层岩体在地震作用下最先发生破坏,岩体破裂,大量表层块石向下运动,说明该坡体在地震作用下易发生崩塌灾害。 D 点岩石开裂,破裂岩体向下运动。 E 点、 F 点虽无破裂岩体向下运动,但地表存在裂缝,该处岩石仍存在落石的风险。依据监测点的分布情况对监测点对应的各高程区间内的破裂岩体体积及破裂度信息进行统计,统计结果如表2所示。破裂岩体体积为已经脱离边坡存在向下运动的块石的体积,破裂度为地震作用后破裂的界面面积与总界面面积的比值,可用于边坡的稳定性分析及地质体的破碎程度描述。通过破裂岩体体积及破裂度统计可知, B 点与 C 点之间的区域破裂最严重,破裂岩体体量最多, D 点之上区域破裂岩体体积较小,破裂程度最轻。

表2 破裂岩体体积及破裂度

Table 2 Volume and degree of fracture of fractured rock mass

监测点范围	破裂岩体体积/ m^3	破裂度
A—B	102.6	0.16
B—C	213.5	0.24
C—D	82.5	0.11
D以上	7.2	0.14
合计	405.8	0.16

注:A点高程为2432 m,B点高程为2472 m,C点高程为2512 m,D点高程为2543 m。

该边坡在地震作用后已处于失稳状态,由于边坡内多组节理相互切割,导致地震后作用后边坡前侧产生大量落石,根据以上情况设计该边坡的加固方案。

4.2 加固后边坡稳定性

4.2.1 加固方案一

对边坡进行喷锚网加固,并在坡体顶部采用12 m大锚杆进行补强,锚杆间距4 m,计算模型如图12所示。对喷锚网与顶部长锚杆联合支护的边坡进行稳定性分析,由于原始边坡在静力状态下已处于稳定,故不再对加固边坡在静力状态下的稳定性进行研究,仅对加固边坡在地震作用下的响应,以及地震作用后边坡的稳定性进行研究。

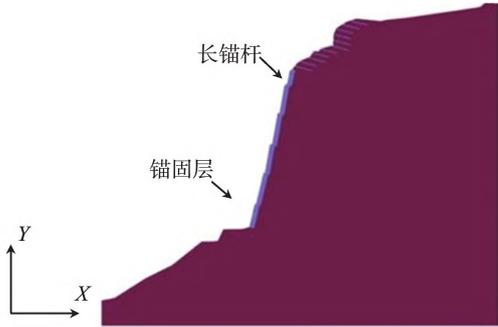


图12 喷锚网+顶部长锚杆支护计算模型
Fig.12 Calculation model of shotcrete anchor net & roof long bolt support

加固方案一边坡在地震作用后的位移云图如图13所示,监测点测得的考虑加固方案一边坡在地震作用下的位移时程如图14所示。

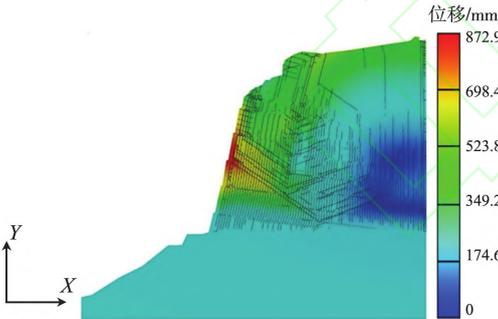


图13 地震作用后位移(加固方案一)
Fig.13 Displacement after earthquake (reinforcement scheme 1)

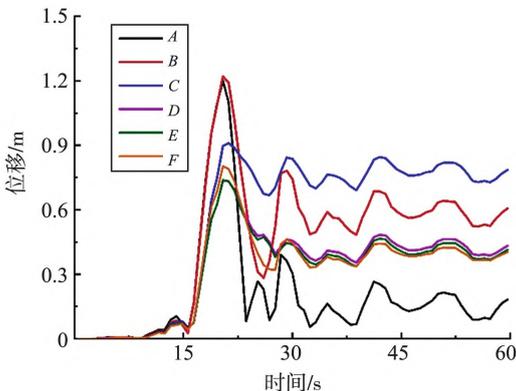


图14 地震作用过程中监测点位移(加固方案一)
Fig.14 Displacement of monitoring point during earthquake action (reinforcement plan 1)

从图14可知,总位移 $S_C > S_B > S_D > S_E > S_F > S_A$,坡体中部的位移大,坡脚位移最小。监测点处均有锚固作用,未发生破碎。从图13可知,最大位移点位于B点与C点之间。该坡体经喷锚网支护后,在地震作用下坡体前侧较为稳定。坡体顶部存在贯穿性裂缝,存在落石可能,对坡体顶部区域位移情况进行研究,如图15所示,可发现图中标出区域存在破裂岩体,虽位移值较小,但由于岩石已经破裂,与脱离原始母体,岩块易发生掉落,需要对该区域进行加固。对该加固方案边坡在地震作用后的安全系数进行计算,由式(2)得安全系数为1.14。



图15 坡体顶部破裂岩体(加固方案一)
Fig.15 Fractured rock mass at the top of the slope (reinforcement scheme 1)

4.2.2 加固方案二

对边坡进行喷锚网加固,并在坡体顶部及上部倒悬体区域采用12 m大锚杆进行补强,锚杆间距4 m,计算模型如图16所示。对该支护方案下在地震作用下的响应,以及地震作用后边坡的稳定性进行研究。

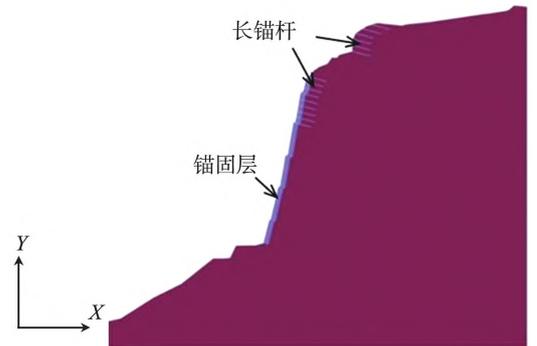


图16 喷锚网+顶部长锚杆+上部长锚杆支护计算模型
Fig.16 Calculation model of spray anchor net & top long bolt & upper long bolt support

加固方案二边坡在地震作用后的位移云图如图17所示,监测点测得的加固方案二边坡在地震作用下的位移时程如图18所示。

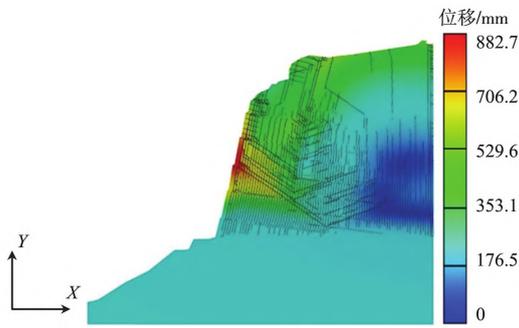


图 17 地震作用后位移(加固方案二)

Fig.17 Displacement after earthquake (reinforcement scheme 2)

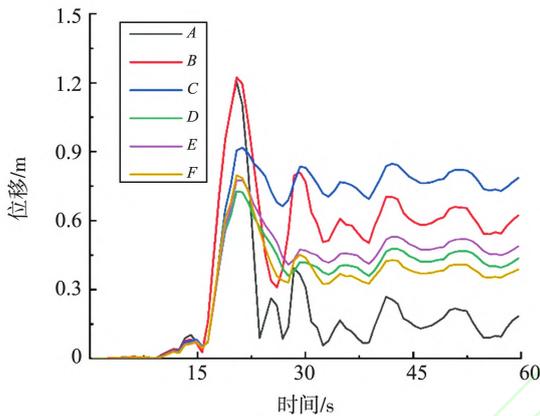


图 18 地震作用过程中监测点位移(加固方案二)

Fig.18 Displacement of monitoring point during earthquake action (reinforcement plan 2)

从图 18 可知,总位移 $S_C > S_B > S_D > S_E > S_F > S_A$, 坡体中部的位移大,坡脚位移最小。该加固方案中去除顶部平缓区域的长锚杆可发现该处无破裂岩体,说明该处无需锚杆作用。坡顶顶岩体破裂情况如图 19 所示。对该加固方案边坡在地震作用后的安全系数进行计算,由式(2)得安全系数经为 1.14,与加固方案一得安全系数一致,顶部长锚杆对该处岩石得加固作用不足。



图 19 坡体顶部破裂岩体(加固方案二)

Fig.19 Fractured rock mass at the top of the slope (reinforcement scheme 2)

4.2.3 加固方案三

在该加固方案中,对边坡及顶部倒悬体区域增

加喷锚网支护,并在坡体顶部及上部倒悬体区域采用 12 m 大锚杆进行补强,锚杆间距 4 m,计算模型如图 20 所示。对该支护方案下在地震作用下的响应,以及地震作用后边坡的稳定性进行研究。

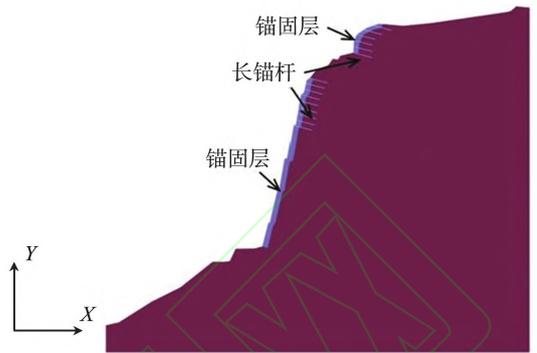


图 20 喷锚网+顶部长锚杆+上部喷锚网长锚杆支护计算模型

Fig.20 Calculation model of spray anchor net & top long bolt & upper spray anchor net with long bolt support

加固方案三边坡在地震作用后的位移云图如图 21 所示,监测点测得的加固方案三边坡在地震作用下的位移时程如图 22 所示。

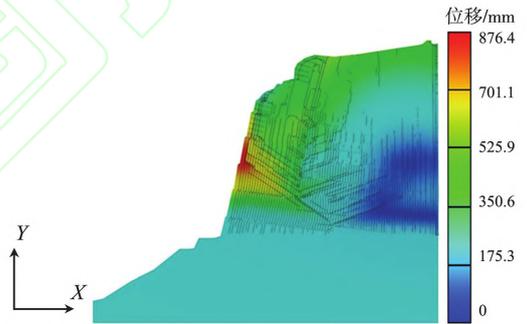


图 21 地震作用后位移(加固方案三)

Fig.21 Displacement after earthquake (reinforcement scheme 3)

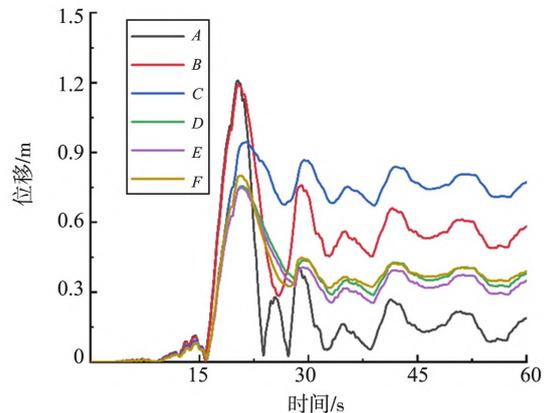


图 22 地震作用过程中监测点位移(加固方案三)

Fig.22 Displacement of monitoring point during earthquake action (reinforcement plan 3)

从图 22 可知,总位移 $S_C > S_B > S_D > S_E > S_F > S_A$, 坡体中部的位移大,坡脚位移最小。坡顶顶岩体破裂情况如图 23 所示。该坡体顶部倒悬体区域经喷锚

网支护后,在地震作用下贯穿性裂缝数量减少,未产生破裂岩体。利用式(2)对该加固方案边坡在地震作用后的安全系数进行计算,得安全系数 1.17。



图 23 坡体顶部破裂岩体(加固方案三)

Fig.23 Fractured rock mass at the top of the slope (reinforcement scheme 3)

对比三种不同方案地震过程中监测点位移曲线, C 点坡体中上部在地震过程中的位移最大, 其次为 B 点坡体中下部, A 点坡体底部在地震过程中的动位移最小, 坡体顶部 D、E、F 点处的位移值较为接近; 地震过程中监测点位移变化主要受地震作用影响, 位移峰值及波动情况与施加的地震波波存在相关性, 监测点位移受不同加固方案的影响较小。地震作用导致边坡岩体发生破裂, 对坡体震后安全性存在较大影响, 不同加固方案主要针对地震导致的破裂岩体进行加固, 从而提高边坡在地震作用下的稳定性。

5 结论

本研究采用连续非连续单元方法, 对新民隧道出口处边坡稳定性进行研究。该区域地震峰值加速度为 $0.30g$, 地震动反应谱特征周期为 $0.40s$, 属于 8 度烈度区。基于新民隧道洞口上方已清方断面的勘察情况建立计算模型, 建立边坡安全系数随节理间距改变的公式, 修正了计算模型的安全系数; 根据地震作用下边坡的潜在破坏情况, 设计边坡的加固方案, 得到地震作用后边坡岩体间的残余强度, 可计算出地震作用后边坡的安全系数。

边坡安全系数与边坡基岩的节理间距存在线性关系, 随时节理间距增加, 边坡的安全系数增加; 静力作用下, 边坡处于稳定状态, 地震作用下, 由于边坡基岩存在多组节理相互切割, 导致大量破碎岩体产生并沿坡体向下运动, 边坡处于失稳状态; 不同边坡加固方案表明, 喷锚网可有效减小破碎岩体产生, 但不足以约束深部岩体运动, 长锚杆可约束深

部岩体运动, 但难以控制坡体前方仍存在较多破碎岩体产生, 在喷锚网与长锚杆联合作用下, 坡体稳定性提高。

参考文献:

- [1] FROUDE M, PETLEY D. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(8):2161-2181.
- [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 sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3):433-454.
- [3] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 地震作用下边坡稳定性分析的拟静力法研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(10):3578-3588.
DENG Dongping, LI Liang, ZHAO Lianheng. Research on quasi-static method of slope stability analysis during earthquake[J]. *Journal of Central South University (Natural science edition)*, 2014, 45(10):3578-3588.
- [4] 胡成, 卢坤林, 朱大勇, 等. 三维边坡拟静力抗震稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增刊 1):2904-2912.
HU Cheng, LU Kunlin, ZHU Dayong, et al. Analysis of pseudo-static seismic stability for three-dimensional slope [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Suppl.1):2904-2912.
- [5] YOU L, MICHALOWSKI R. Displacement charts for slopes subjected to seismic loads [J]. *Computers & Geotechnics*, 1999, 25(1):45-55.
- [6] 祁生文. 考虑结构面退化的岩质边坡地震永久位移研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(3):452-457.
QI Shengwen. Evaluation of the permanent displacement of rock mass slope considering deterioration of slide surface during earthquake [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(3):452-457.
- [7] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8):1714-1723.
ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8):1714-1723.
- [8] FIORE V. Seismic site amplification induced by topographic irregularity: results of a numerical analysis on 2D synthetic models [J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3):109-115.
- [9] ZIENKIEWICZ O, HUMPHESON C, LEWIS R. Associ-

- ated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soilmechanics[J]. *Geotechnique*, 2015, 25(4):671-689.
- [10] MATSUI T, SAN K. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique [J]. *Soils & Foundations*, 2008, 32(1):59-70.
- [11] GRIFFITHS D, LANE P. Slope stability analysis by finite elements [J]. *Géotechnique*, 1999, 49(3):387-403.
- [12] CUNDALL P, STRACK O. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. *Géotechnique*, 2008, 30(3):331-336.
- [13] LI Shihai, ZHAO Manhong, WANG Yuannian, et al. A new numerical method for DEM—block and particle model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41:414-418.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] LI Shihai, WANG Jianguo, LIU Bingshan, 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.
- [17] WANG Yuannian, ZHAO Manhong, LI Shihai, 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.
- [18] 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]. *Chinese Journal of Mechanics*, 2011, 43(1):184-192.

(编辑:陈丽萍)