

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.03.05

隧道-洞口滑坡体系受力特征及变形模式

赵 金^{1,2}, 吴红刚^{2,3,4}, 刘德仁¹, 牌立芳^{1,4}, 李玉瑞^{1,2}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国中铁滑坡工程实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 4. 西部环境岩土与场地修复技术工程实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 随着我国高速铁路在西部地区的大规模建设, 隧道在线路中所占的比例越来越高, 洞口隧道在滑坡作用下产生的病害越来越严重。然而, 我国目前在隧道-洞口滑坡体系设计中没有可供参考的受力变形模式, 因此本文以隧道-洞口滑坡为研究对象, 通过对云南功东高速公路中隧道-滑坡工程实例的总结及工程地质模型的建立, 对滑坡推力作用下的隧道变形模式进行研究, 得到如下结论: (1) 将隧道-洞口滑坡分为与滑面相交和下穿滑体两种模式, 与滑面相交的隧道直接受到剩余滑坡推力的作用, 而下穿滑体的隧道主要承受附加荷载的影响; (2) 位于滑体内隧道承受围岩压力、滑坡推力和岩土抗力的作用, 可将洞口有刚性支撑的隧道-滑坡结构简化为简支梁, 无刚性支撑作用下的隧道-滑坡结构简化为悬臂梁; (3) 下穿滑体隧道在附加荷载的影响下, 拱部承受多余的压力而受到偏压作用, 拱顶形成受拉区域, 出现拉张裂缝。

关键词: 隧道-滑坡; 变形模式; 工程地质模型; 附加荷载; 梁式结构

中图分类号: RU452.27

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)03-0024-07

Stress distribution and deformation model of the tunnel and landslide at the tunnel's entrance

ZHAO Jin^{1,2}, WU Honggang^{2,3,4}, LIU Deren¹, PAI Lifang^{1,4}, LI Yurui^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. China Railway Landslide Engineering Laboratory, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. China Railway Northwest Research Institute Limited Company, Lanzhou, Gansu 730000, China; 4. Western Environmental Geotechnical and Site Remediation Technology Laboratory, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: With the large-scale construction of China's expressway in the western region, more and more tunnels were constructed, and the threat caused by landslide is becoming more and more serious in the tunnel. However, there is no stress and deformation model in the design of tunnel and landslide in the tunnel's entrance at present. Taking tunnels in Gongdong Expressway in Yunnan Province, this paper studied the tunnel deformation mode under the effect of landslide thrust. The following conclusions are obtained: (1) The system of tunnel and landslide in the tunnel's entrance is divided into two modes, that are intersecting the sliding surface and traversing the lower slide mass. The tunnel intersected with the sliding surface is directly affected by the residual landslide thrust, while the tunnel under the slide mass is mainly affected by the additional load. (2) The tunnel in the slide mass bears the pressure of the surrounding rock, the residual landslide thrust and the resistance of rock and soil mass. The tunnel-landslide structure with rigid support at

收稿日期: 2018-05-30; 修订日期: 2018-07-17

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(145RJZA068); 中铁科研院(科研)(2017-KJ008-Z008-XB)

第一作者: 赵 金(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土和边坡工程研究。E-mail: 2274211481@qq.com

通讯作者: 吴红刚(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土和边坡工程研究。E-mail: 271462550@qq.com

the entrance can be simplified as simply supported beam, and the structure without rigid support can be simplified as cantilever beam. (3) Under the influence of additional load, the arch is subjected to bias action due to bearing excessive load, and the vault forms a tension region and appears tensile crack.

Keywords: tunnel-landslide; deformation mode; engineering geological model; additional load; beam structure

0 引言

我国是地质灾害频发的国家,其中滑坡灾害占65%左右,伴随着我国经济的高速发展,在西部地区公路建设的投入力度不断增大。在该地区进行公路建设时不可避免的会遇到大量的隧道工程,由于线路客观原因,隧道遇到滑坡区无法绕避必须穿越时,即形成隧道-滑坡体系^[1-3]。根据滑坡主滑方向与隧道轴线的交角,将隧道-滑坡体系分为平行体系($0^{\circ} \sim 20^{\circ}$)、正交体系($70^{\circ} \sim 90^{\circ}$)和斜交体系($20^{\circ} \sim 70^{\circ}$)^[4]。根据施工经验,山区隧道地质条件一般比较复杂,尤其是隧道洞口段地质条件差,容易产生边坡失稳,往往会导致平行体系洞口段隧道极大的变形破坏,阻碍交通的运行。因此对隧道-洞口滑坡体系变形模式及防治技术的研究对保证公路交通的安全运行具有重要的意义。

国内外许多专家和学者对隧道-滑坡体系进行了大量的理论和实践研究。SZAVITS-NOSSAN等^[5]分析了在土耳其地中海地区的Anamur Kaledran岩质滑坡,阐述了岩质滑坡与隧道开挖的相关性。张丽萍等^[6]对隧道-滑坡体系相关实例进行了分析和研究。KOIZUMI Y等^[7]提出在日本许多滑坡是因隧道开挖而引起的,进行了一系列数值模拟,确定隧道在斜坡中的安全范围。毛坚强等^[8]研究了滑坡-隧道体系相互间的力学作用机理。王俊伟等^[9]研究了渭河隧道施工对上覆滑坡体扰动影响及滑坡对隧道围岩的作用机理,提出相应的治理措施。王玉龙等^[10]研究了孙家崖偏压-滑坡隧道围岩变形和受力特征。陈小云等^[11]进行了较为深入的正交体系下隧道与滑带相交力学模型与加固研究。许淑珍等^[12]研究了在滑坡体黄土隧道中使用纵环向注浆联合的支护技术。

综上所述,众多学者对隧道-滑坡相互作用机理和治理技术方面做了大量研究,但对于隧道-洞口滑坡体系变形模式及防治技术的研究相对较少。因此,本文通过对云南功山-东川高速公路沿线典型的隧道-洞口滑坡工程实例进行总结,得出相应的工程地质模型,并对在滑坡推力作用下的隧道变形模式进行分析,其结果能够为滑坡区隧道的设计提供参考。

1 功东高速沿线典型工程实例分析

昆明市寻甸县功山至东川高速公路位于云南省昆明市东北区域,是云南、四川两省一条重要的省际运输通道。线路南起寻甸县功山镇嵩待高速分离立交桥,经东川区阿旺镇、姑海乡,北至东川区以北四方工业园,路线如图1所示。功东高速公路于2016年1月开工建设以来,随着多处隧道的开挖建设,出现大量的隧道洞口高边坡、滑坡病害,对洞口段隧道的安全造成了严重的威胁,形成隧道-洞口滑坡体系。根据隧道与滑面的位置,将其分为与滑面相交和下穿滑体两种类型。其中典型的工程实例如表1所示。



图1 功东高速路线图

Fig. 1 The road map of Gongdong Expressway in Yunnan Province

在山体开挖隧道过程中,会使坡脚形成一定的临空面,同时隧道的开挖对山体的扰动较大,隧道四周形成围岩松动区,坡体内应力得到释放,导致隧道洞口上方老滑坡的复活和新滑坡的形成。滑坡体产生的滑坡推力首先作用于隧道拱部,导致隧道的变形破坏首先从这里开始。本着忽略“次要影响因素,抓主要影响因素”的原则,将隧道-洞口滑坡工程实例简化为相应工程地质模型(表1)。

2 作用于隧道滑坡推力的空间分布

由于滑坡体是三维立体结构,每个截面上所受的滑坡推力也是立体分布的,为了准确的说明滑坡推力对洞口隧道的作用模式,从三维空间将滑坡推力沿着其纵向和横向分布来考虑。

由图2知坡体纵向滑坡推力由牵引段不断的向主滑段增大,再向抗滑段减小。这是由于牵引段抗滑力最小,逐渐向抗滑段增大,导致剩余滑坡推力不断累加,直到下滑力等于抗滑力时,剩余滑坡达到最大。横向为中间的滑坡推力最大,依次向两边递减。因此将滑坡中间断面作为最危险截面,同时可以通过横向断面的滑坡推力求出其它断面上的滑坡推力。沿 y 方向,滑坡推力为 y 的函数式 $P(y)$,设控制断面上某一滑块的滑坡推力为 P_0 ,则距离控制断面 y 处滑块的滑坡推力为:

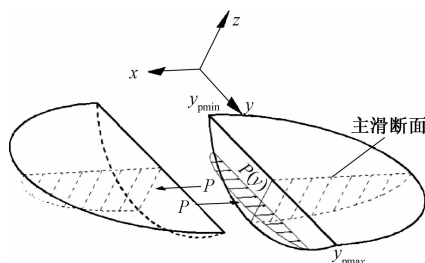


图2 滑坡推力空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution diagram of landslide thrust

$$p(y) = p_0 \lambda(y) \quad (1)$$

式中: p_0 ——剩余滑坡推力的合力,可通过传递系数法求得^[14]。其分布有三角形分布、矩形分布、梯形分布三种形式^[15],本文采用较复杂的梯形分布来说明;

$\lambda(y)$ ——分布函数^[13]。

隧道与滑面相交时,主要承受滑坡推力和围岩压力的作用。滑坡主滑段产生的剩余滑坡推力直接作用于与滑面相交的隧道结构上,且对相邻的土体产生影响,如图3(a)所示;隧道下穿滑体时,主滑段产生的剩余滑坡推力作用于相邻抗滑段的土体上,对位于主滑段与抗滑段过度区域的隧道扰动影响最大,如图3(b)所示。

3 洞口段隧道受力变形模式分析

3.1 与滑面相交隧道的受力变形模式

目前,我国公路桥隧、路隧过渡段主要采用桥梁伸入隧道与隧道连接的桩基础支撑形式(图4(a))和路

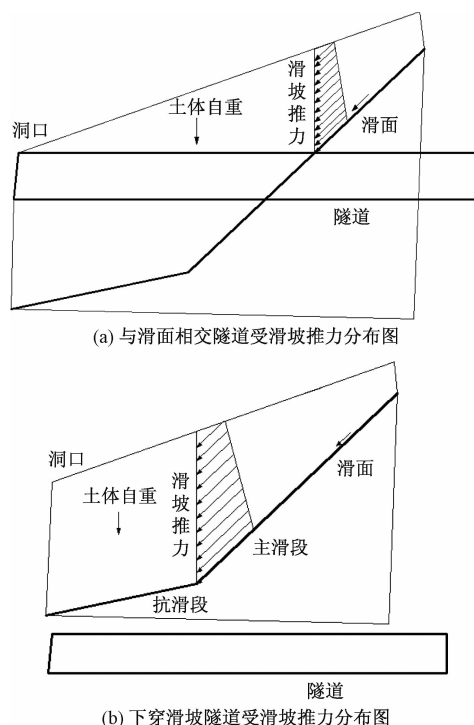


图3 隧道-洞口滑坡受滑坡推力分布图

Fig. 3 The landslide thrust distribution diagram of tunnel and landslide in the tunnel's entrance

面、桥面与隧道搭接的扩大基础支撑形式(图4(b))。过渡段桩基础支撑可提供洞口足够的刚性支撑,阻止隧道口产生向下位移,允许水平方向的运动;洞口的扩大基础一般埋深较浅,且位于滑体内,不能对洞口提供有效的刚性支撑,导致其受力变形与前者差别较大。

当隧道与滑面相交时,作用于隧道上的外荷载主要为围岩压力 P 和剩余滑坡推力 P_i ,同时隧道为了保持平衡,对隧道底部土体产生挤压,导致其受到岩土抗力 P_k 的作用,此时隧道变形破坏主要位于洞口段,位于基岩中的隧道及滑体以外部分坡体都有足够的刚度,对基岩中的隧道具有支撑作用,可将隧道简化为梁式结构。

对于洞口有刚性支撑的隧道-滑坡结构,可将此梁式结构简化为简支梁,梁的一端铰支,另一端为固定端。位于滑体内的隧道作为梁式结构在轴向承受沿滑面的剩余滑坡推力 P_i 水平分力的作用,使隧道上部的土体由于水平运动趋势产生的摩擦力直接作用于隧道拱部,且大小从滑带处向洞口减小。极易导致张拉裂缝的产生;横向隧道受围岩压力 P 、滑坡推力 P_i 沿隧道垂向的分量和土体抗力的作用,将导致隧道竖直方向的弯曲变形和轴向的拉伸变形,在隧道顶部产生弯张变形,形成环形剪切裂缝。特别是滑面附近,隧道受

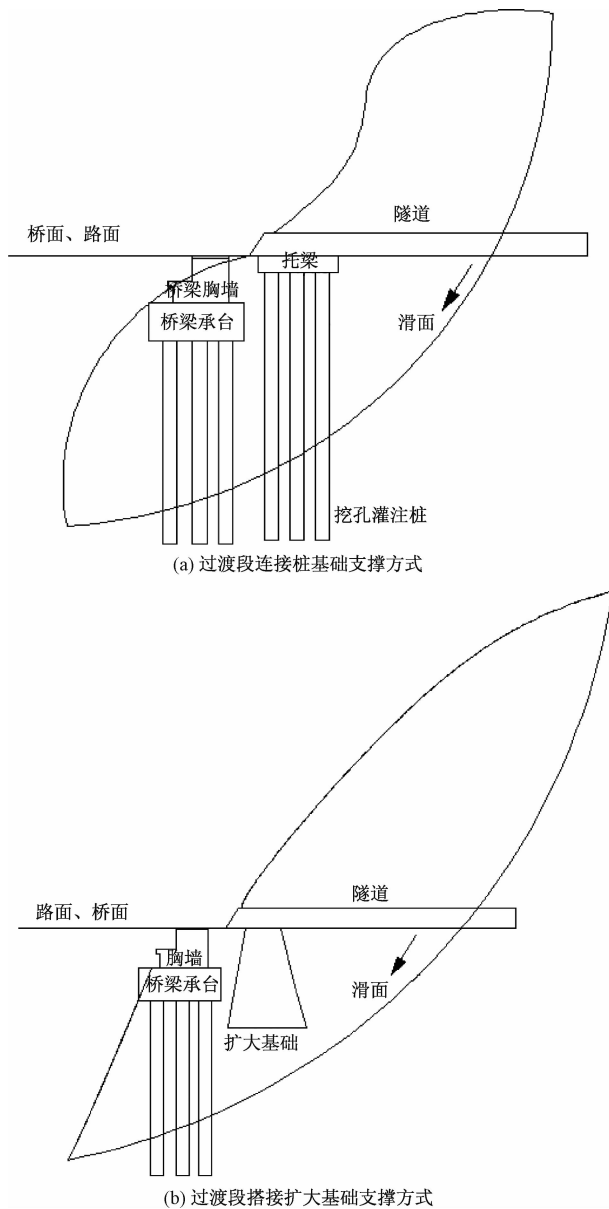


图4 隧道洞口支撑方式

Fig.4 The support mode of tunnel entrance

到的弯矩、剪力和轴力都达到最大,隧道弯曲变形、剪切变形和轴向拉伸变形最大,最终导致隧道在滑面处发生错动,形成剪切错台(图5)。

无刚性支撑作用下的隧道-滑坡结构可简化为悬臂梁,受力方式与刚性支撑一致(图6)。由于洞口无支撑,在滑坡推力、围岩压力和岩土抗力的作用下产生较大的位移,尤其是位于滑带附近的隧道结构变形量急剧增大,剪力和弯矩明显大于有支撑的情况,导致隧道的破坏更为严重。

3.2 下穿滑体隧道的受力变形模式

隧道下穿滑体时,作用于隧道上的外荷载主要为

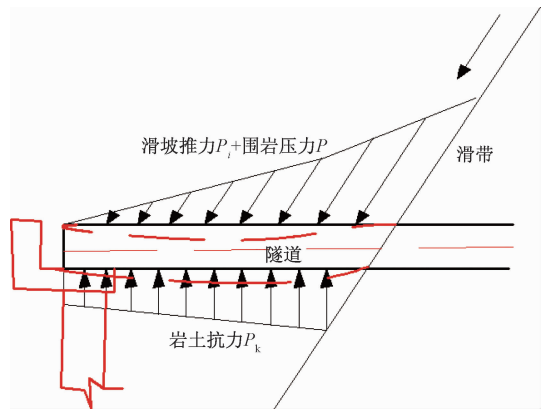


图5 洞口刚性支撑作用下隧道与滑面相交受力变形模式

Fig.5 The force and deformation mode of intersection of tunnel and sliding surface under rigid support at portal

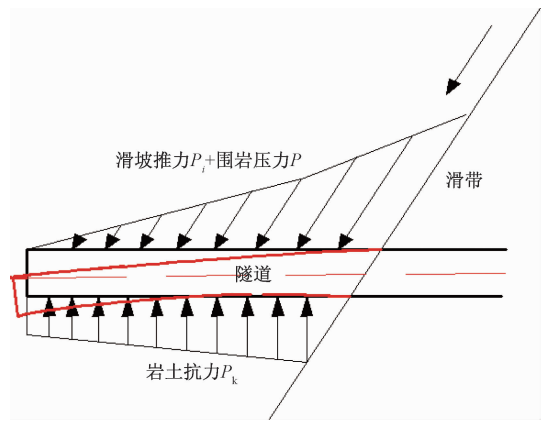


图6 洞口无支撑作用下隧道与滑面相交受力变形模式

Fig.6 The force and deformation mode of intersection of tunnel and sliding surface without support at portal

围岩压力 P 、岩土抗力 P_k 和剩余滑坡推力产生的附加荷载 P_1 。其中附加荷载的影响范围主要与隧道围岩的岩土性质、风化程度、节理裂隙发育情况和水文地质条件有关。在附加荷载的影响下,隧道拱部承受多余的压力而受到偏压作用,拱顶形成受拉区域,出现拉张裂缝,若拱顶岩土体的节理裂隙发育,还会出现拱顶掉块甚至压溃破坏(图7)。

4 结论与建议

隧道-洞口滑坡体系的作用机理较为复杂,实际工程中滑坡推力导致隧道病害的情况时常发生。但是目前在铁路隧道设计中并未将滑坡推力考虑为设计荷载且没有相关的计算理论,本文从具体的工程实例出发,结合地质模型对洞口段隧道-滑坡的受力变形模式进行分析,重点讨论了洞口支撑方式的不同对隧道变形模式的影响。得到以下研究结论和建议:

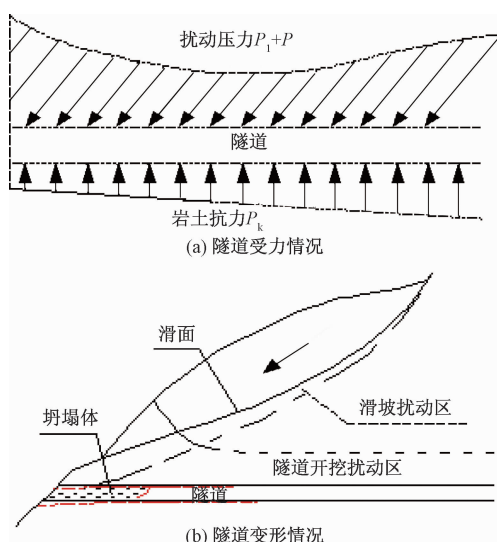


图7 下穿滑体隧道受力与变形示意图

Fig.7 The schematic diagram of the force and deformation of the tunnel traversing the lower slide mass

(1)根据功东高速具体的隧道-洞口滑坡实例的分析,将隧道-洞口滑坡分为与滑面相交和下穿滑体两种模式,与滑面相交的隧道直接受到剩余滑坡推力的作用,而下穿滑体的隧道主要承受附加荷载的影响。

(2)位于滑体内隧道承受围岩压力、滑坡推力和岩土抗力的作用,可将洞口有刚性支撑的隧道-滑坡结构简化为简支梁;无刚性支撑作用下的隧道-滑坡结构简化为悬臂梁。

(3)下穿滑体隧道在附加荷载的影响下,拱部承受多余的压力而受到偏压作用,拱顶形成受拉区域,出现拉张裂缝,拱顶掉块甚至压溃破坏。

隧道-洞口滑坡体系的受力变形情况比较复杂,本文仅对隧道-洞口滑坡的受力变形模式进行了分析讨论,对滑坡推力作用下隧道承受的外荷载以及隧道衬砌内力的计算方法有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 周德培,毛坚强,张鲁新,等. 隧道变形与坡体灾害相互关系及其预测模式[J]. 铁道学报,2002,24(1):81-86.
ZHOU Depei, MAO Jianqiang, ZHANG Luxin, et al. The relationship between tunnel deformation and slope disaster and its prediction model[J]. Journal of the China Railway Society, 2002,24(1):81-86.
- [2] 张鲁新,周德培. 蠕动滑坡成因及隧道变形机理的分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(2):217-221.

ZHANG Luxin, ZHOU Depei. Analysis of the causes of creep landslide and analysis of deformation mechanism of tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999,18(2):217-221.

- [3] 马惠民. 坡体病害与隧道变形问题[J]. 岩石力学与工程报,2003,22(增刊2):2719-2724.
MA Huimin. Slope disease and tunnel deformation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(S2):2719-2724.
- [4] 吴红刚,吴道勇,马惠民,等. 隧道-滑坡体系类型和隧道变形模式研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012(增刊2):3632-3642.
WU Honggang, WU Daoyong, MA Huimin, et al. Study on the type of tunnel-landslide system and the deformation model of tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(S2):3632-3642.
- [5] SZAVITS NOSSAN V. Landslide induced by tunnel excavation [C]//Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering. Hrvatska znanstvena bibliografijai MZOS-Svibor, 1997.
- [6] 张丽萍,李毅. 邱家焉隧道进口滑坡稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2012,12(10):2347-2349.
ZHANG Liping, LI Yi. Stability analysis of imported landslide in Qiujiayan tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(10):2347-2349.
- [7] KOIZUMI Y, Lee J, DATE K, et al. Numerical analysis of landslide behavior induced by tunnel excavation [C]//European Rock Mechanics Symposium. 2010.
- [8] 毛坚强,周德培. 滑坡-隧道相互作用受力变形规律的研究[J]. 西南交通大学学报,2002,37(4):371-376.
MAO Jianqiang, ZHOU Depei. Study on the law of stress and deformation of landslide tunnel interaction [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002,37(4):371-376.
- [9] 王俊伟,林超,吴洁,等. 渭河隧道施工对上覆滑坡体扰动影响及施工控制技术研究[J]. 路基工程,2017(4):185-190.
WANG Junwei, LIN Chao, WU Jie, et al. Influence of Weihe tunnel construction on overlying landslide and construction control technology research [J]. Subgrade Engineering, 2017(4):185-190.
- [10] 王玉龙,李德武. 孙家崖偏压-滑坡隧道围岩变形

- 和受力特征分析[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(4):98-104.
- WANG Yulong, LI Dewu. Sunjiaya landslide bias tunnel surrounding rock deformation characteristics and stress analysis [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014, 33 (4): 98-104.
- [11] 陈小云, 吴红刚, 艾挥. 正交体系下隧道与滑带相交力学模型与加固研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(9):73-78.
- CHEN Xiaoyun, WU Honggang, AI Hui. The mechanical model and reinforcement of the intersection of tunnel and sliding zone under orthogonal system [J]. Science and Technology and Engineering, 2017, 17 (9): 73-78.
- [12] 许淑珍, 董鹏. 纵环向注浆联合支护技术在滑坡体黄土隧道中的应用[J]. 铁道标准设计, 2011(2): 103-106.
- XU Shuzhen, DONG Peng. The application of longitudinal grouting combined support technology in the Loess Tunnel of landslide body [J]. Railway Standard Design, 2011 (2): 103-106.
- [13] 程建军, 廖小平, 王浩, 等. 滑(边)坡稳定性计算分析中的滑坡推力计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(增刊1):50-52.
- CHENG Jianjun, LIAO Xiaoping, WANG Hao, et al. Calculation method of landslide thrust in stability calculation and analysis of sliding (side slope) [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(S1): 50-52.
- [14] 张靓. 滑向及轴线斜交条件下滑坡与隧道结构相互作用研究[D]. 西南交通大学, 2012.
- ZHANG Liang. Study on the interaction between landslide and tunnel structure under the condition of sliding and axis skew [D]. Southwest Jiaotong University, 2012.
- [15] 铁道部. 铁路隧道设计规范:TB10003—2005[S]. 北京:中国铁道出版社, 2016.
- Ministry of Railways. Code for design of railway tunnels:TB10003—2005[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.

(上接第 17 页)

- CEN Duofeng, HUANG Da, HUANG Runqiu. Step-path failure mode and stability calculation of jointed rock slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 36(4):695-706.
- [16] 季宪军, 欧国强, 杨顺, 等. 基于 PFC^{3D} 黏性与无黏崩滑土体运动过程对比分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(增刊1):67-73.
- JI Xianjun, OU Guoqiang, YANG Shun, et al. Comparison analysis of the motion process about viscous and no-viscous landslide-collapse soil based on PFC^{3D} [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(S1):67-73.
- [17] 韩光, 崔铁军, 马云东, 等. 煤层自燃所致上覆露天矿复杂边坡破坏过程模拟与现象研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(3):535-540.
- HAN Guang, CUI Tiejun, MA Yundong, et al. Research on the phenomenon and failure process simulation of open-pit slope in coal spontaneous combustion [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33 (3): 535-540.
- [18] 朱雷, 黄润秋, 严明, 等. 基于裂纹扩展模式的岩质斜坡阶梯状滑移破裂机制研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7):1216-1224.
- ZHU Lei, HUANG Runqiu, YAN Ming, et al. Step-path failure mechanism of rock slopes based on crack coalescence modes in rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 39(7):1216-1224.
- [19] 朱永生, 朱焕春, 石安池, 等. 基于离散单元法的白鹤滩水电站复杂块体稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10):2068-2075.
- ZHU Yongsheng, ZHU Huanchun, SHI Anchi, et al. Complicated block stability analysis of Baihetan hydropower station based on distinct element method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10):2068-2075.
- [20] 杨圣奇, 黄彦华. 双孔洞裂隙砂岩裂纹扩展特征试验与颗粒流模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014(3):584-597.
- YANG Shengqi, HUANG Yanhua. Experiment and particle flow simulation on crack coalescence behavior of sandstone specimens containing double holes and a single fissure [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014(3):584-597.