

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.014

隧道-滑坡平行体系时间效应演化及变形破坏 试验研究*

牌立芳^{1,4}, 赵金^{1,3}, 吴红刚^{2,3,4}, 李玉瑞^{1,3}

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

摘要: 通过4组隧道-滑坡平行体系模型试验, 研究在不同工况下隧道-滑坡相互作用下的时间效应和变形破坏模式。结果表明:(1)隧道-滑坡平行体系单滑面情况滑坡推力在滑体内产生一种应力临界状态, 该应力临界状态是处于拉、压应力变化过渡的一种状态, 有一个时间传递变化的过程, 即时间效应。(2)桥隧搭接桩基础支撑结构较无支撑结构会加速应力临界过渡状态的时间效应。(3)滑坡体内的滑坡推力, 最先引起滑带位置附近的土体达到应力临界过渡状态, 随着时间的推移, 这种临界状态逐步由滑坡体后缘向前缘移动, 滑坡破坏面上的每一点的时间与应变关系均会呈现不同的“S”型曲线特征, 对于整个滑体而言, 滑面上每一点的时间与应变关系曲线, 在不同时刻呈现不同的线型特征。(4)桥隧搭接桩基础支撑结构较无支撑结构会延缓隧道模型的破坏, 使得破坏断裂面向基岩内部延伸, 且作用效果显著, 但隧道模型整体的破坏处于基岩内。

关键词: 模型试验; 隧道-滑坡; 平行体系; 时间效应; 变形破坏

中图分类号: U25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0100-07

Experimental Study on Time Effect Evolution and Deformation and Failure of Tunnel-slide Parallel System

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

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Northwest Research Institute CO. Ltd of C.R.E.C, Lanzhou 730070, China;

3. China Railway Landslide Engineering Laboratory, Lanzhou 730070, China;

4. Western Environmental Geotechnical and Site Rehabilitation Technology Engineering Laboratory, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this paper, four tunnel-landslide parallel system model tests are conducted to study the time effect and deformation failure mode considering the interaction between tunnel and landslide under different conditions. The results show that: (1) Landslide thrust in parallel system of tunnel-landslide produces a critical state of stress in the sliding body. This critical state is in a transitional state of tension and compression stresses, with a time-varying process, that is, the time effect. (2) The bridge-connected pile foundation supporting structure can accelerate the time effect of critical stress-

* 收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-04-09

基金项目: 中铁科研院(科研)字 2017-KJ008-Z008-XB 资助

作者简介: 牌立芳(1992-), 男, 硕士研究生。主要从事岩土与地下工程研究。Email: 13465099791@163.com

通讯作者: 吴红刚(1983-), 男, 高工, 硕导, 博士。主要从事岩土和边坡工程研究。Email: 271462550@qq.com

transient state, compared to the unsupported structure. (3) The landslide thrust in the landslide body firstly leads the soil near the sliding zone to reach the critical transitional state of stress; this critical state gradually moves from the trailing edge of the landslide body to the front edge. The relationship between the time and strain of each point will show different "S"-shaped curve characteristics. For the entire sliding body, the curve of time and strain at each point on the sliding surface presents different linear features at different moments. (4) Compared with the unsupported structure, the bridge-connected pile foundation supporting structure will delay the destruction of the tunnel model, so that the failure fracture extends toward the interior of the bedrock and the effect is remarkable. However, the overall damage of the tunnel model is within the bedrock.

Keywords: model test; tunnel-landslide; parallel system; time effect; deformation damage

引言

随着国民经济的快速发展,大量铁路、公路、水利、矿山、城镇等设施的修建,特别是在丘陵和山区建设中,开挖和堆填的滑坡数量越来越多,由于山区的地质条件复杂,人类活动规模越来越大,设计施工方法不当,河道堵塞、隧道坍塌等事故频发,给人民的生命财产安全造成重大损失。

近年来,国内外众多学者在滑坡变形破坏机制及稳定性方面,做了大量的研究工作。王建锋^[1]根据深部蠕变理论重新分析了滑坡 Saito 模型和 Voight 模型,明确了参数的物理意义;A. Kumar 等^[2]在研究印度喜马拉雅山区(IHR)极端降水导致滑坡驱动的危害加剧,表明极端降雨事件不存在特征周期性,提出了极端降雨事件引起的滑坡的时空分布;G.B.Bischetti 等^[3]研究了刷毛层对边坡稳定性的影响,并通过模型试验,进行了斜坡稳定性分析;卢应发等^[4]在现行滑坡稳定分析的基础上,建立推移式滑坡渐进破坏稳定性分析法;段钊等^[5]对泾河台塬区黄土滑坡的时空分布规律进行研究,结果表明:区内黄土滑坡的时间分布特征表现为黄土滑坡日趋频繁和春季多发,空间特征表现为黄土滑坡多源段群发和区域破坏模式差异;牌立芳等^[6-7]通过模型试验对不同工况条件下的隧道-滑坡体系的空间破坏特征进行了研究;魏林森等^[8]选择典型城市的系列降水资料及发生滑坡数量,从多年降水、年内降水过程及降水的空间变化 3 个方面阐述了对黄土滑坡的时空影响;王建勇^[9]从滑坡所处的自然地理状况入手,收集大量滑坡地区的基础资料,分析顺层岩质滑坡的工程地质条件及基本特征,并从地质环境、水岩土相互作用、时效蠕变作用和人为

作用等方面对成因进行解析。

上述成果仅对滑坡变形破坏机理和稳定性等进行研究,并提到相关滑坡变形时效蠕变作用的问题,但是对于隧道-滑坡相互作用下时间效应和变形破坏等方面的研究成果较少。娄海成^[10]依托贵广高铁贺街隧道,进行了现场大型试验,以型钢拱架的安全性作为判别初期支护稳定性的标准,分析了型钢拱架横截面边缘应力、轴力、弯矩的时空分布特征;M. Hasan 等^[11]通过固定相方法从矩形势垒得到隧道时间的近似表达式,证明了隧穿时间取决于势垒宽度 b ;C.Paraskevopoulou 等^[12]研究了隧道开挖过程中,隧道支护的累积壁面位移和加载是隧道前进(圆周长度和周期时间)以及围岩随时间变化的行为的结果。通过设计多组常规模型试验,从结构性整体角度出发,定性的分析不同工况下隧道-滑坡平行体系时间效应演化及变形破坏模式。

1 模型设计

1.1 试验材料设备及模型制作

本次多组模型试验在中铁西北科学研究院有限公司定远滑坡实验室进行。每组试验均在搭建好的模型箱内完成,模型箱尺寸为(1 400×600×1 100) mm,坡面为 45°的单滑面圆弧斜坡。每组模型试验的材料相似参数见表 1,试验应变片参数见表 2。

1.2 试验监测装置布置及测试内容

本次多组模型试验主要通过东华测试 DH3816 静态应变数据采集仪全程监测隧道沿滑体纵向变形应形应变片数据变化,在隧道上设置一个纵向断面和几个横断面,如图 1 所示。

表1 相似参数的模型设计

Table1 Design of model with similar parameters


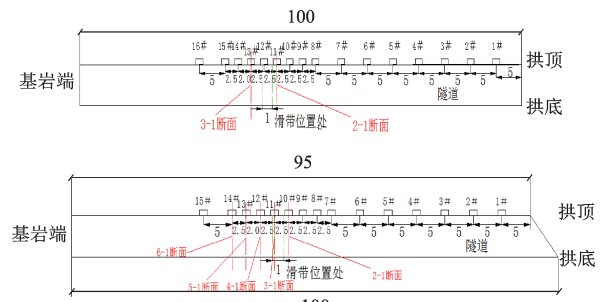
模型	图片	材料
基岩		本次多组模型试验基岩均采用水泥土(水:水泥:黄土的混合比为1:3:9)并夯实模拟
滑坡坡体		本次多组模型试验均采用细筛黄土作为滑体材料
滑带		滑带(1 cm)采用塑料薄膜表面铺设细筛黄土、滑石粉与水的混合物进行模拟(水:滑石粉:黄土=2:5:12)
隧道		隧道均用直径为50 mm的PVC管代替,作为结构性构件
加载		加载或者减载均使用50 kg标准加载板,加载板尺寸为(500×430×30) mm
桥隧过渡段		桥隧模型试验采用在洞口下面设置一矩形木块,伸入基岩中固定,模拟桥隧搭接桩基础支撑结构构件

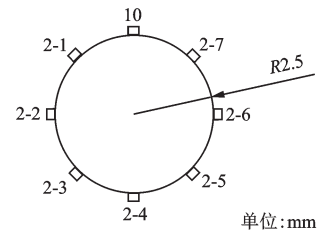
表2 应变片参数

Table 2 Strain gauge parameters

参数	取值范围
栅长×栅宽	(5×3) mm
基长×基宽	(8.5×4.5) mm
基底材料	缩醛类
丝栅材料	康铜(德国进口)
电阻	(120±0.3)Ω
灵敏度系数	2.08±0.01
适用温度	-20~80 °C
最大微应变	20 000
额定电压	≤12 V



(a) 纵向应变片平面布置



(b) 横断面应变片平面布置

图1 隧道应变片平面布置

Fig. 1 Layout of the strain gauges in the tunnel

时间效应和变形破坏模式,更好的反映各组试验效果,分别设计了1组刷方减重模型试验、2组桥隧过渡段模型试验、1组洞口段无支挡结构的模型试验。

1.3.1 刷方减重

(1) 第一阶段:考虑到时间效应,为了使后部加载的荷载缓慢传递到隧道上,试验开始后共进行三次加载,每次加载一块标准加载板,每块50 kg,待坡面位移,隧道应变增大,开始分级减载,每次减载一块标准加载板,模拟坡体在蠕滑变形阶段刷方减重的有效性,待变形稳定,结束第一阶段。

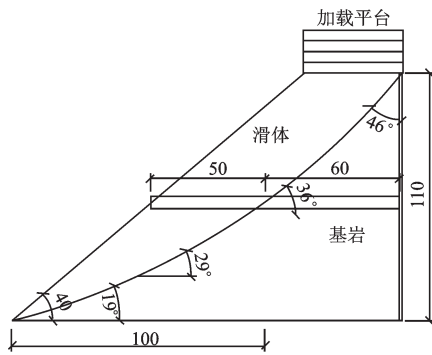
(2) 第二阶段:在第一阶段基础上,在分级加载,每次加载一块标准加载板,每块50 kg,此阶段多增加一级荷载,待坡面位移变形突变,开始分级减

1.3 试验工况设计

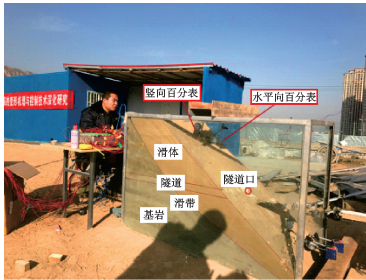
为研究在不同工况下隧道-滑坡相互作用下

载,每次减载两块加载板,模拟坡体在大变形情况下削方减载的有效性,待变形稳定后,结束第二阶段。

(3)第三阶段:在第二阶段基础上,在分级加载,每次加载两块标准加载板,每块 50 kg,此阶段多增加一级荷载,待坡面位移变形激增,开始减载,将全部荷载减掉,模拟坡体在坡体位移激增下削方减载的有效性,待变形稳定后,结束第三阶段,其工况设计如图 2 所示。



(a) 模型设计



(b) 模型完成

图 2 刷方减重模型试验设计

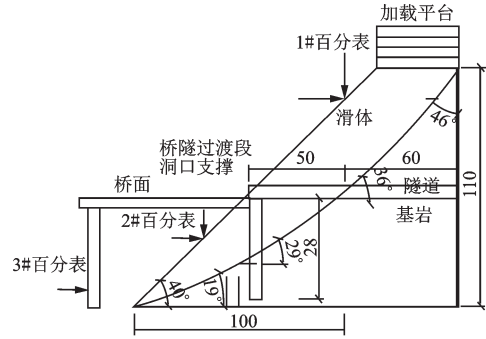
Fig. 2 Design drawing of the model test for brush weight reduction

1.3.2 桥隧过渡段

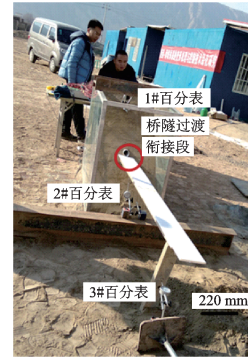
此组模型试验为探究桥隧搭接桩基础支撑形式对隧道-滑坡平行体系时间效应及变形破坏模式,设计试验时,采用后部分时分段逐级加载的方式,每次加载一块标准加载板,每块 50 kg,迫使坡体变形对隧道模型造成影响,其工况设计如图 3 所示。

1.3.3 洞口段无支撑条件

为更好的反映洞口段无支撑条件下隧道-滑坡平行体系时间效应及变形破坏模式,设计试验时,采用后部均匀加载的方式,每次加载一块标准加载板,每块 50 kg 迫使坡体对隧道造成影响,其工况设计如图 4 所示。



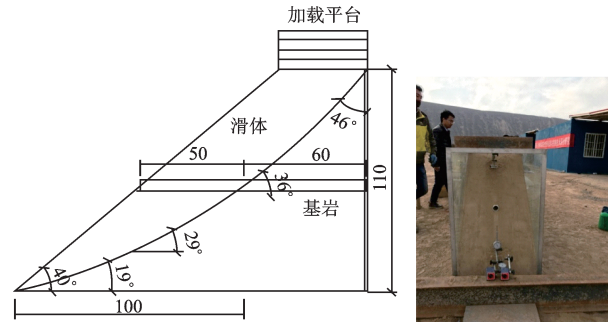
(a) 模型设计



(b) 模型完成

图 3 桥隧过渡段模型试验设计

Fig. 3 Model test drawing of transition section of bridge and tunnel



(a) 模型设计



(b) 模型完成

图 4 洞口段无支撑条件模型试验设计

Fig. 4 Model test design drawing of the opening section without supporting conditions

2 试验结果分析

2.1 应变数据时间效应分析

各组试验结束后,通过对隧道纵断面数据处理分析,重点探讨刷方减重、无支撑结构和桥隧搭接桩基础支撑形式下,隧道-滑坡平行体系单滑面情况的时间效应变化规律。

如图 5(a)所示,刷方减重模拟下随着荷载的增减变化,隧道-滑坡平行体系单滑面情况滑坡推力在

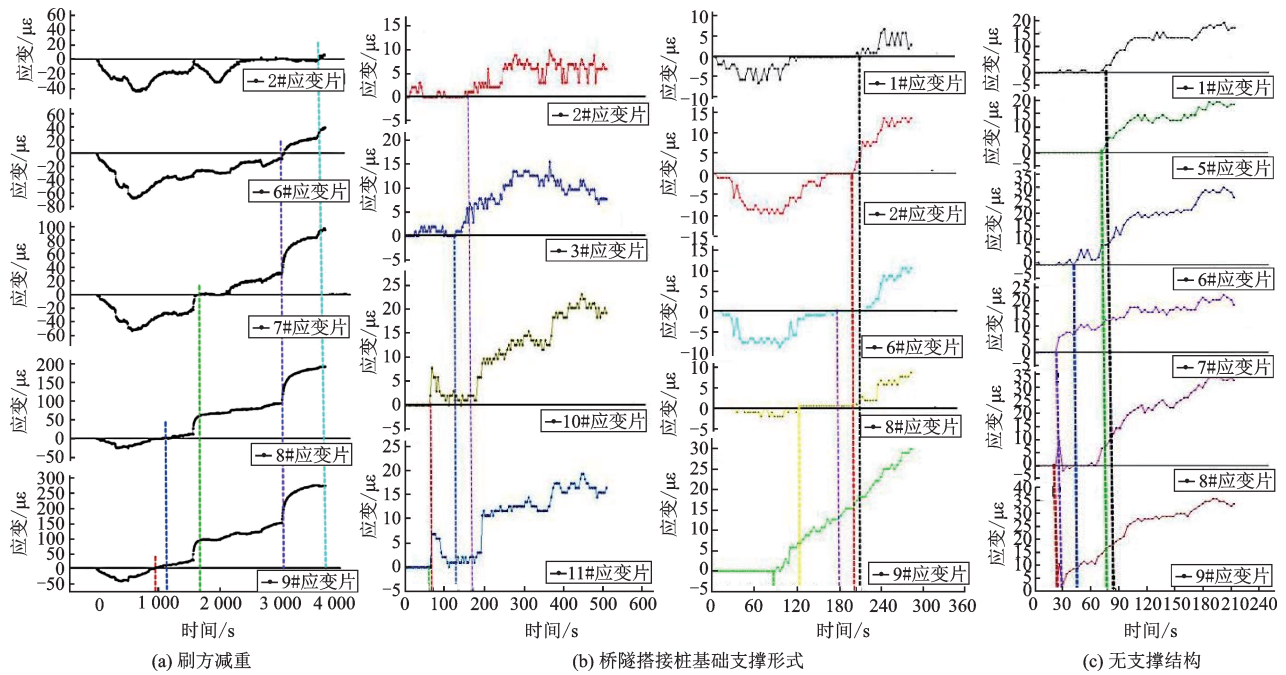


图5 应变—时间变化曲线

Fig.5 Strain—time curve

注:图线横轴以下隧道模型处于受压状态,应变片数值为负值,横轴以上处于受拉状态,应变片数值为正

滑体内产生一种应力临界状态,该应力临界状态是处于拉、压应力变化过渡的一种状态,有一个时间传递变化的过程,即时间效应。

为进一步验证应力临界过渡状态时间变化的规律,又相继设计桥隧搭接桩基础支撑形式模型试验和无支档结构模型试验,由图5(b)、(c)可知,桥隧搭接桩基础支撑形式和无支撑结构隧道-滑坡平行体系模拟下随着荷载的增加,仍在滑坡体内产生这种应力临界状态过渡,且桥隧搭接桩基础支撑情况下应力临界状态的过渡时间明显小于刷方减重和无支撑结构下的时间,说明桥隧搭接桩基础支撑结构下会加速这种时间效应的变化,加速到达应力临界过渡状。

在外部因素作用下,滑坡体产生滑坡推力,滑带位置附近的土体最先达到应力临界过渡状态,引起隧道的拉、压变形过渡,随着时间的推移,这种临界状态逐步由滑坡体后缘向前缘移动,滑坡破坏面上的每一点的时间与应变关系均会呈现不同的“S”型曲线特征,对于整个滑体而言,滑面上每一点的时间与应变关系曲线,在不同时刻呈现不同的线型特征。说明在这种剪切集中推力作用的影响下,较密的土体易产生剪胀,土体体积增大,土体向外扩张发展,土体骨架仍随时间继续发生蠕滑变形,距

离滑带较远的滑体逐渐挤密,引起隧道的拉压变形过渡。

2.2 隧道变形破坏分析

通过对4组模型试验隧道破坏断裂时分析,着重探讨了刷方减重、无支撑结构和桥隧搭接桩基础支撑形式下在隧道-滑坡平行体系单滑面情况隧道模型断裂时的破坏状况,如图6所示。

如图6(a)所示,刷方减重模拟下随着荷载的增减变化,隧道-滑坡平行体系单滑面情况隧道模型破坏断裂处于基岩内部,且距离滑带一定的距离。

为进一步验证隧道模型破坏断裂时的状况,又相继设计了桥隧搭接桩基础支撑形式模型试验和无支撑结构模型试验,由图6(b)、(c)隧道模型破坏可知,桥隧搭接桩基础支撑和无支撑结构隧道-滑坡平行体系模拟下随着荷载的增加,隧道模型破坏断裂处均处于基岩内部,且桥隧搭接桩基础支撑形式下隧道模型破坏断裂面距离滑带约为10 cm,而无支撑结构下隧道模型破坏断裂面距离滑带约为4 cm。说明桥隧搭接桩基础支撑结构较无支撑结构会延缓隧道模型的破坏,使得破坏断裂面向基岩内部延伸,且作用效果显著,但隧道模型整体的破坏

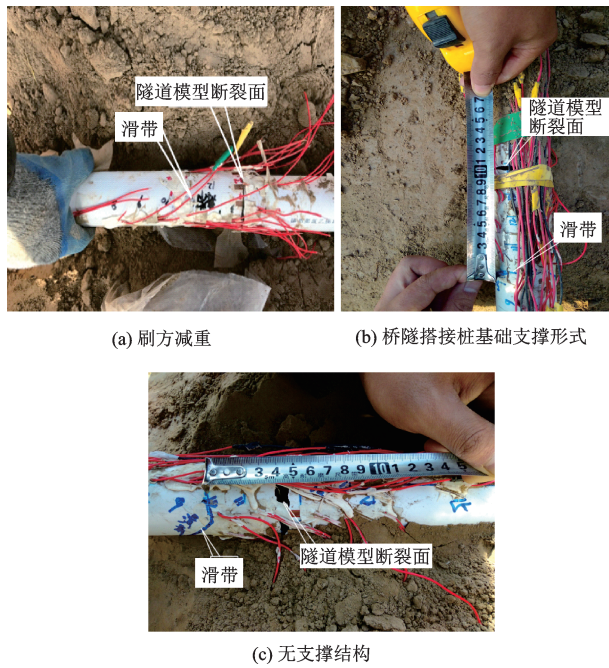


图6 模型试验隧道模型破坏

Fig.6 Tunnel model destruction in the model test

是处于基岩内。

根据上述几组试验的隧道模型破坏断裂的特点,在单滑面情况下,隧道与滑移面相交区段,滑坡对隧道的破坏模式主要位于滑移剪切面附近破坏,此种破坏模式使得隧道容易在基岩和滑坡交界附近位置产生剪切应力集中,隧道容易发生剪切错台甚至断裂变形破坏。其变形破坏的简化三维示意如图7所示。

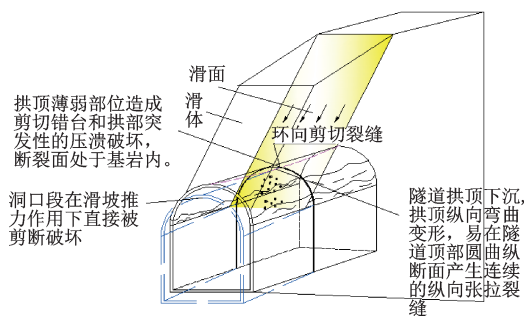


图7 隧道模型破坏简化示意

Fig.7 Simplified diagram of the model test on tunnel damage

3 结论

根据本文所设计的4组隧道-滑坡平行体系的常规模型试验,所得结论如下:

(1)隧道-滑坡平行体系单滑面情况滑坡推力在

滑体内产生一种应力临界状态,该应力临界状态是处于拉、压应力变化过渡的一种状态,有一个时间传递变化的过程,即时间效应。

(2)桥隧搭接桩基础支撑结构较无支撑结构会加速应力临界过渡状态的时间效应。

(3)滑坡体内的滑坡推力,最先引起滑带位置附近的土体达到应力临界过渡状态,随着时间的推移,这种临界状态逐步由滑坡体后缘向前缘移动,滑坡破坏面上的每一点的时间与应变关系均会呈现不同的“S”型曲线特征,对于整个滑体而言,滑面上每一点的时间与应变关系曲线,在不同时刻呈现不同的线型特征。

(4)桥隧搭接桩基础支撑结构较无支撑结构会延缓隧道模型的破坏,使得破坏断裂面向基岩内部延伸,且作用效果显著,但隧道模型整体的破坏是处于基岩内。

参考文献:

- [1] 王建锋. 两类经典滑坡发生时间预报模型的理论分析[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 42-52.
Wang J F. A theoretical analysis of two types of classic landslide forecasting model [J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10 (1): 42-52. (in Chinese)
- [2] Kumar A, Asthana A, Priyanka R S, et al. Assessment of landslide hazards induced by extreme rainfall event in Jammu and Kashmir Himalaya, northwest India [J]. Geomorphology, 2017, 284(5): 72-87.
- [3] Bischetti G B, Chiaradia E A, D'agostino V, et al. Quantifying the effect of brush layering on slope stability [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3): 258-264.
- [4] 卢应发, 黄学斌, 刘德富. 推移式滑坡渐进破坏机制及稳定性分析[J]. 岩石力科学与工程学报, 2016, 35(2): 333-345.
Lu Y F, Huang X B, Liu D F. Analysis of progressive failure mechanism and stability of sliding landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (2): 333-345. (in Chinese)
- [5] 段 钊, 李文可, 王启耀. 泾河下游台塬区黄土滑坡类型与时空分布规律[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(3): 369-375.
Duan Zh, Li W K, Wang Q Y. Distributions of loess landslides and their spatio-temporal distribution in the lower reaches of jinghe river [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35 (3): 369-375. (in Chinese)

- [6] 牌立芳,赵金,吴红刚,等.刷方减重下隧道-滑坡平行体系变形演化试验研究[J].防灾减灾工程学报, 2019,39(5):842-850.
Pai L F, Zhao J, Wu H G, et al. Experimental study on deformation evolution of tunnel landslide parallel system under brush weight reduction [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39 (5): 842-850.(in Chinese)
- [7] 牌立芳,赖天文,吴红刚.陆路交通隧道-滑坡平行体系模型建立与试验验证[J].铁道建筑, 2018, 58(12): 64-68.
Pai L F, Lai T W, Wu H G. Establishment and experimental verification of parallel system model of land traffic tunnel landslide [J]. Railway architecture, 2018, 58 (12): 64-68.(in Chinese)
- [8] 魏林森,丁宏伟,王婷,等.降水对陇西黄土滑坡的诱发作用及时空影响分析[J].冰川冻土, 2017, 39(3): 609-615.
Wei L S, Ding H W, Wang T, et al. Effect of precipitation on loess landslide in longxi and its temporal and spatial analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39 (3): 609-615. (in Chinese)
- [9] 王建勇.滑体蠕动工况下抗滑桩的受力分析[D].重庆:重庆大学, 2012.
Wang J Y. Analysis of anti-slide piles under creep movement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.(in Chinese)
- [10] 娄海成.浅埋偏压大断面隧道围岩变形与支护受力研究[D].北京:北京交通大学, 2015.
Lou H Ch. Research on deformation and supporting forces of surrounding rock in shallow-buried large-section tunnel with bias pressure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [11] Hasan M, Mandal B P. Tunneling time in space fractional quantum mechanics [J]. Physics Letters A, 2017, 382(12):248-252.
- [12] Paraskevopoulou C, Diederichs M. Analysis of time-dependent deformation in tunnels using the Convergence-Confinement Method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71(6): 62-80.

(本文责编:周小潭)