

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0825

# 隧道正交穿越深厚滑坡体的相互影响 分析与应对措施

刘天翔<sup>1</sup>, 王忠福<sup>2,3</sup>

(1. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041; 2. 华北水利水电大学 岩土工程与土工结构研究院, 河南 郑州 450045;  
3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 在我国西南山区修建公路隧道时, 常常需穿越滑坡等不良地质灾害体, 而其中最复杂的组合便是隧道正交穿越滑坡, 这一复杂组合耦合了上覆厚度巨大的滑坡体和隧道开挖揭露滑坡滑面两个不利条件, 将会引发滑坡和隧道的强烈相互作用, 从而诱发滑坡体和隧道的强烈开裂、变形。以西南山区某高速公路隧道正交穿越厚度超过 60 m 的老滑坡为背景, 对这类隧道-滑坡体系的相互作用而引发的工程病害的机制进行了深入的分析和研究, 并采用数值分析方法对坡体、隧道的应力、变形等进行了详细计算分析, 同时与规范推荐的传递系数法的计算结果进行了对比分析。结果表明, 数值分析方法对这种复杂体系作用下的坡体与隧道的相互影响所进行的分析更为合理, 基于应力变形控制理论所确定的最终防治方案具有明显技术合理性和经济优势。目前该隧道已成功穿越滑坡体并通车, 这种复杂条件下的隧道-滑坡体系的成功处治在国内外亦是非常少见的, 其设计分析思路和应对措施可供今后类似工程参考和借鉴。

**关 键 词:** 隧道-滑坡体系; 应力变形控制; 数值分析; 正交穿越; 防治技术

中图分类号: U 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 01-0265-11

## Analysis of interaction when tunnel orthogonal crossing deep-seated landslide and the corresponding control measures

LIU Tian-xiang<sup>1</sup>, WANG Zhong-fu<sup>2,3</sup>

(1. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu, Sichuan 610041, China;  
2. Institute of Geotechnical and Hydraulic Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China;  
3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** When highway tunnels are constructed in the southwest mountainous area in China, they often have to pass through the landslides and other adverse geological disasters. Especially, the tunnel orthogonally crossing the landslide is considered as the most complicated situation. In this case, two serious conditions are coupled, i.e., deep-seated landslide mass with a great thickness and exposed slip surface of landslide. Thus, the coupled action leads to strong interactions between landslide and tunnel, which also can induce the deformation and crack diseases of landslide and tunnel. In this study, a highway tunnel is investigated, which orthogonally crosses an old landslide with an over 60 m thickness in the southwest mountainous area. Due to the interaction of the tunnel-landslide system, the mechanism of the engineering diseases is deeply studied. The numerical analysis method is used to calculate and analyze the stress and deformations of landslide and tunnel as well. Finally, the calculated results are compared with those obtained by the recommended transfer coefficient method. The results verify that the numerical analysis method is more reasonable for analyzing the interaction between the landslide and the tunnel. Meanwhile, it is proven that the final control measures based on stress deformation control theory has obvious technical and economic advantages. At present, the tunnel has successfully passed through the landslide. As it is rare to easily manage this complex tunnel-landslide system, its design analysis method and comprehensive prevention measures provide helpful references for the similar projects in the future.

**Keywords:** tunnel-landslide system; stress deformation control; numerical analysis; orthogonal crossing; control measures

## 1 引 言

我国西南山区由于地形和地质条件复杂, 依山

傍水而行的山区公路常常会穿越滑坡等不良地质灾害体。尽管选线阶段已尽量采用避让方案, 但由于在勘察设计阶段对地质条件的认识不足, 穿越大型

收稿日期: 2017-04-26

基金项目: 交通运输部建设科技项目(No. 2013318800020); 四川省交通科技项目(No. 2013A1-3, No. 2012C14-2)。

This work was supported by the Research Project from Ministry of Transport of China (2013318800020) and the Transportation Science and Technology Project of Sichuan Province (2013A1-3, 2012C14-2).

第一作者简介: 刘天翔, 男, 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事公路路基、边坡病害防治设计与监测预警方面的研究工作。E-mail: 411495191@qq.com

滑坡体的隧道工程几乎很难避免, 这些滑坡或因隧道开挖而发生蠕动变形甚至整体复活, 而隧道因坡体滑动而产生变形、开裂等病害, 严重威胁到工程的建设及运营安全。

目前, 已有部分专家和学者开始重视这一工程问题, 对这类隧道与滑坡的相互作用及引发的工程病害机制进行了分析和研究, 并取得了一定的研究成果。山田刚二等<sup>[1]</sup>对隧道开挖施工引发的坡体滑动问题进行了探讨, 并对病害原因做了归纳总结。张鲁新等<sup>[2]</sup>对蠕动滑坡成因及隧道变形机制进行了研究, 分析了蠕动型滑坡成因, 以及酿成隧道变形开裂的机制。毛坚强<sup>[3]</sup>、周德培<sup>[4]</sup>等分析了坡体病害地段隧道变形开裂的特征及二者相互关系, 给出了隧道变形与坡体病害相互关系的 5 种地质结构模型, 提出了用隧道变形规律预测坡体灾害的模式。陶志平等<sup>[5-7]</sup>基于地质力学模型试验研究了滑坡地段坡体变形与隧道的相互作用机制及坡体和隧道的变形特征, 建立了 3 类分析隧道变形规律的地质力学模型, 得出隧道与滑面的相对位置关系是决定隧道变形特征的主要因素这一重要结论。王建秀等<sup>[8]</sup>通过对典型的两座滑坡连拱隧道的现场监控量测数据进行分析, 讨论了滑坡蠕动对连拱隧道的破坏规律和特征。Wang<sup>[9]</sup>分析了台湾某滑坡隧道的滑坡演化特征与隧道衬砌裂缝发展的特征, 并据此推断滑坡与隧道二者之间的力学模型。王永刚等<sup>[10]</sup>以武罐高速公路阳坡里隧道为依托, 深入探讨了隧道纵向穿越滑坡体情况下隧道与滑坡的相互作用机制及变形破坏模式。刘海等<sup>[11]</sup>以川主寺隧道为研究对象, 初步分析了穿越古滑坡隧道建设中出现的洞口滑坡以及碎裂围岩坍塌等地质问题, 并提出相应的整治思路。赵志刚等<sup>[12]</sup>探讨了库区公路穿越滑坡段隧道与滑坡的相互作用机制及其变形破坏模式、防治技术方案等。马惠民<sup>[13-14]</sup>、吴红刚<sup>[14-17]</sup>等研究了坡体病害与隧道变形问题, 系统论述了坡体病害(滑坡、错落等)地段隧道变形类型、地质结构模型、相互作用关系, 构建了“隧道-滑坡体系”的理论分析框架, 形成了以平行体系、正交体系和斜交体系为核心的受力变形模式, 并初步研究了其变形机制和控制技术。邓荣贵<sup>[18]</sup>、尹静<sup>[19]</sup>等针对位于滑坡体滑面上部的隧道加固问题, 提出了一种滑坡区隧道自锚式新型加固结构, 并对加固结构进行了受力变形分析计算。

上述学者的研究结论表明, 不同的隧道-滑坡组合体系其受力与变形有很大差别, 总体上隧道-滑坡体系的相互作用随两者距离的增加而减弱, 其

中又以隧道-滑坡正交体系对工程影响最为严重。当隧道正交穿越滑坡, 同时又耦合了上覆滑坡滑体厚度巨大和隧道开挖揭穿了滑坡的滑面两个非常不利的条件时, 将会引发滑坡和隧道的强烈相互作用, 从而诱发滑坡体和隧道的强烈开裂、变形, 给相应的工程建设带来巨大的影响, 甚至成为“卡脖子”的关键工程。而这种比较极端的工程案例是极为少见的, 基本没有可以借鉴的成功工程经验。本文以西南山区某高速公路隧道正交穿越厚度超过 60 m 的老滑坡为例, 对这类比较极端的隧道-滑坡体系的相互作用机制、应力和变形的计算分析以及综合应对措施进行研究和探讨, 以期对山区高速公路、铁路建设提供一定的借鉴作用。

## 2 工程概况与基本地质条件

西南山区某高速公路 K12+813 隧道左洞长为 978 m, 右洞长为 1 029 m, 正交从一近正北向的(358°)斜坡上穿越。初步设计时已发现隧道正交穿越的该斜坡体为一老滑坡体, 故在施设阶段将线路走向调至老滑坡后部的基岩层内以隧道通过。但最终施工时发现, 隧道并未完全避开老滑坡体, 隧道在 ZK12+650 及 ZK13+050 两区段穿越到了老滑坡体内, 并正交切穿了老滑坡体的滑面, 诱发了坡体和隧道的变形开裂。

### 2.1 滑坡基本地质特征

K12+813 滑坡所处斜坡整体坡度约 21°, 上陡下缓, 滑坡总体长度约为 550~980 m, 宽度为 400~900 m, 前宽后窄, 斜坡上修建有大量民房和小学。高速公路的 K12+813 隧道从该老滑坡后部正交穿越, 隧道开挖前该老滑坡处于基本稳定状态(图 1)。

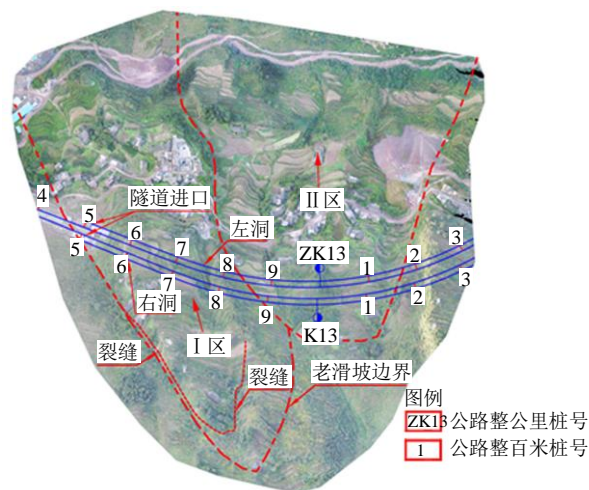


图 1 K12+813 滑坡全貌及分区特征图  
Fig.1 Full view and zoning characteristics of K12+813 landslide

该老滑坡具多级滑动、地表分区等特征。滑坡共分为两个大区(I区和II区),I区位于ZK12+840之前(西侧),该区滑坡主滑方向约354°,前后长约980 m,宽约330 m,占整个滑坡平面面积的53%,滑体平均横坡坡度为18.5°(图2);II区滑坡位于ZK12+840~ZK13+160段(东侧),该区主滑方向358°,滑体前后长550 m,平均宽度为405 m,占整

个滑坡平面面积的 47%，滑体平均横坡坡度为 17.8°。根据勘察揭示，该老滑坡体最大厚度达 72.6 m，平均厚度超过 50 m，整个滑坡方量达 1 100 多万方，属巨型深层岩质顺层老滑坡。K12+813 滑坡最初是由于顺基岩软弱层面滑动形成，但经过漫长的外营力改造后，滑坡已发生了解体，出现了多区、多期、多层的滑动。

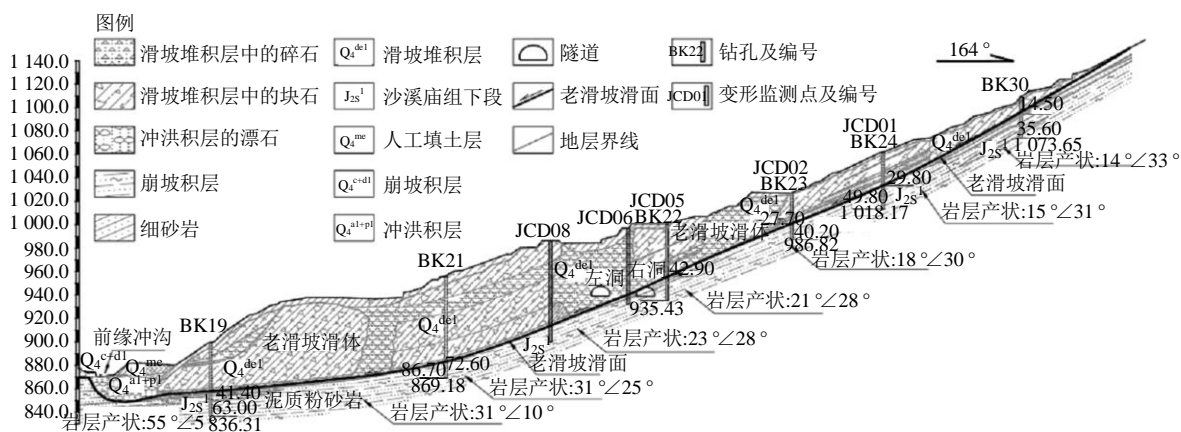


图 2 ZK12+751 工程地质剖面图  
Fig.2 K12+751 geological profile of landslide

## 2.2 滑坡物质组成及滑面、滑床特征

### 2.2.1 滑体物质组成

I 区滑体物质以块石、碎石为主, 粉质黏土含量相对较少, 基岩下滑后解体不充分, 滑体中仍有大量未解体的整体块石(“假基岩”, 如图 3 所示)。

II 区与 I 区物质差别较大,除部分钻孔揭示有 16.5~50.0 m 的整体状块石外,其余孔皆以碎块石为主,其间夹含角砾碎石黏土,土中一般可见多层光滑面。



图3 BK21 钻孔 31.3~55.2 m 段整体块石 (“假基岩”)  
Fig.3 Complete core segment between 31.3 and 55.2 m of borehole BK21

### 2.2.2 滑面、滑床特征

I 区、II 区滑面、滑床特征有较多相同之处:

①I、II区皆是顺岩层软弱面发生滑动的,属于牵引式基岩顺层滑坡;②滑坡规模都非常大,中前部滑面深度皆达到60 m以上;③两区滑坡在第1次滑动后皆发生过后续多区、多期、多层滑动。

两区滑面、滑床又有许多不同之处：①纵向上，Ⅰ区滑面顺直、起伏小、中后部滑面陡；而Ⅱ区滑面起伏大、中后部滑面相对更缓。横向上，Ⅰ区滑面边界变化突然，东侧边界为基岩陡坎；而Ⅱ区滑体厚度变形较大，滑面横向起伏也较大。②Ⅰ、Ⅱ区滑坡滑面虽然皆顺软弱层，但并不是顺着同一软弱层，Ⅱ区大致顺  $J_{2s^2}/J_{2s^1}$  分界面的油页岩软弱层滑动，而Ⅰ区滑面比Ⅱ区层位更低，Ⅰ区则是顺  $J_{2s^2}$  层内的软弱层滑动。③Ⅱ区前部滑体比Ⅰ区整体低 5~25 m，能量释放更充分，且Ⅱ区滑体前部滑面已处于前缘沟床高程以上，而Ⅰ区滑体前部滑面位于河床以下，河床对滑体的抵抗力仍然存在，故Ⅰ区滑体最下层滑面的整体稳定性较高。

### 2.3 老滑坡成因

该老滑坡为一顺层基岩滑坡，其形成因素包括岩体的产状、结构特征、地下水、前缘河水侵蚀及临空等。

该滑坡处于区域柏杨坪向斜南西翼一顺层斜坡上,斜坡坡向为近正北,岩层产状为  $32^{\circ} \angle 15^{\circ} \sim 26^{\circ}$ ,岩层产状上陡下缓(图2),顺层结构,岩性



为侏罗系沙溪庙组砂泥岩互层,砂岩岩体裂隙较发育,有利于地表水下渗,且在岩体中发育两组近正交的节理,有利于岩层拉裂和侧向切断岩层。地表水顺着岩体内的裂隙入渗,形成较大的裂隙水压力,并在岩层内隔水的泥岩层面上聚集,软化软弱夹层,降低其力学参数,急剧降低了斜坡稳定性,加之前缘冲沟长期冲刷掏蚀坡脚形成了高陡临空面,在降雨等因素的诱发下,发生了大规模的顺层滑动,堆积形成老滑坡的雏形,后经长年风化、降雨、冲刷掏蚀等外部营力作用及人类活动改造,最终形成了目前的老滑坡形态。老滑坡已有 100 a 以上未发生过变形滑动,隧道开挖前整体处于稳定状态。

## 2.4 滑坡、变形体及隧道的变形特征

因该滑坡为一巨型顺层岩质老滑坡,已滑动基岩未完全解体,真基岩和“假基岩”不宜区分,导致最终线路走向未完全避开老滑坡体,隧道在 I 区和 II 区均穿越到了老滑坡体内。

2014 年 8 月,隧道左洞 ZK13+107 进入到了老滑坡 II 区的滑体内,通过加强支护参数,调整开挖方法和步距,在 2015 年 1 月底施工通过该段(103 m),后期该段没有出现开裂、变形等异常情况。而后隧道开挖进入了老滑坡 I 区,其中隧道左洞 ZK12+835~+516 段全断面皆处于 I 区老滑坡滑面以上的滑坡体内;右洞 K12+720~+506 段左上侧处于 I 区滑坡体内,恰巧揭穿老滑坡滑面,滑面从右洞斜向穿越,隧道穿越滑坡的段落达 300 m 以上。由于 I 区隧道开挖形成临空面,引起老滑坡 I 区滑体范围内的隧道右侧土体变形、地表开裂以及隧道开裂变形。



图 4 左洞护拱严重变形

Fig.4 Serious deformation of protection arch in the left tunnel

衬浇筑,左洞出口端掌子面施工至 ZK12+682,进口端掌子面至 ZK12+644 时,ZK12+829~+817 段二衬及仰拱斜向开裂,ZK12+799~+766 段初期支护剧烈变形,造成顶部拱架变形扭断(图 4),右侧边墙变形侵限最大值约为 65~70 cm,且拱顶初期支护混凝土有破坏掉块现象;右洞 K12+540~+720 段拱顶偏右侧及左侧拱脚位置开始出现裂缝,最大裂缝宽度为 3 mm 左右,拱顶裂缝以纵向为主,并已基本连通,拱脚位置纵向和横向、放射状皆有。截止 2015 年 12 月中旬,左洞在 ZK12+506~+850 段出现了开裂现象,ZK12+799~+766 段变形最严重。右洞在 K12+506~+720 段变形开裂严重,K12+720~+800 段也有些细微开裂。

在隧道右侧 270 m 左右的斜坡地表发现了水平开裂 10~40 cm、下沉 5~20 cm 的弧形裂缝,断续延伸长度超过 500 m,在老滑坡体后缘已基本贯通。

种种迹象表明,隧道开挖已诱发隧道右侧的 I 区滑坡体局部复活,并在隧洞右侧形成一周界明显的变形体,变形体周界裂缝已基本贯通,形成了连续的滑移后缘边界。变形体滑体以块石、碎石为主,部分滑体中下部存在未解体的“假基岩”,其潜在滑面与原老滑坡滑面基本一致,且相当部分滑带土直接位于下伏基岩面上,变形体的滑带土一般厚度为 10~20 cm,呈可塑状,镜面特征非常明显。

## 3 应对措施研究

### 3.1 应急处治措施

隧道变形开裂后,立即采取了左洞回填支撑、右洞套拱支撑的应急措施:

(1)对左洞 ZK12+799~+682 段和 ZK12+532~+644 段进行回填反压+水平支撑,每回填 2 m 时设置钢管水平支撑。

(2)左洞 ZK12+799~+830 段、右洞 ZK12+730~+540 段采用 I22 工字钢架做环向支护,底端设置 I22 工字钢横撑,底部纵向以 I16 工字钢连接,同时用钢管斜撑支撑环向套拱。

(3)立即增加了地表位移监测和深部位移监测工作。

在采取应急措施后,隧道的变形逐渐趋缓。

### 3.2 永久处治工程措施

如前所述,老滑坡 II 区处于整体稳定状态,也未引起隧道变形和地表开裂,故无需对该区滑坡体进行处治,后期以监测为主。老滑坡 I 区整体也处于稳定状态,但 I 区隧道开挖形成了较大的临空面,左洞完全处于滑体内,右洞开挖又恰巧切穿了老滑

2015 年 10 月 15 日,隧道右洞已贯通并完成二

坡滑面,从而诱发了老滑坡I区右侧土体及隧道的变形开裂。由于隧道在滑体内的最大埋深超过了60 m,右侧变形体平均厚度也达35~40 m,按规范推荐的不平衡推力法来计算,右洞右侧剩余下滑推力有29 633 kN/m,抗滑桩根本无法支挡。即便设置的抗滑桩作为抗滑键考虑,桩顶以上滑体通过传递到前缘抗滑段的滑体来抵消其下滑推力,右洞右侧抗滑键的设计推力还有11 653 kN/m,仍需在隧道右侧设置多排抗滑桩和桩顶锚索进行支挡,工程造价极高,且仍然存在抗滑桩开挖深度大(最大桩长超过80 m)、安全风险高等问题。

因此,对于这类隧道正交穿越深厚滑坡体,且隧道开挖揭穿了滑坡滑面的情况,仅靠抗滑桩等进

行支挡是行不通的。但由于该变形体中前部厚度大,后缘厚度小,具备清方的条件,故可以通过清方来减小滑坡的下滑推力,以便设置支挡和加固措施来对变形体和隧道进行综合处治。

经反复演算分析,最终采取了对老滑坡I区隧道右侧的变形体进行清方减载、适当支挡、清方体弃于前缘反压的综合处治方案(图5)。

### 3.2.1 清方减载

大规模清除隧道右侧变形体,平均清方厚度约25 m,清方量达143万 $\text{m}^3$ 。清方所产生的弃方堆于滑坡前缘的自然冲沟内,以起到回填反压的作用,增加老滑坡体的整体稳定性。自然冲沟水另设泄水洞进行排泄。

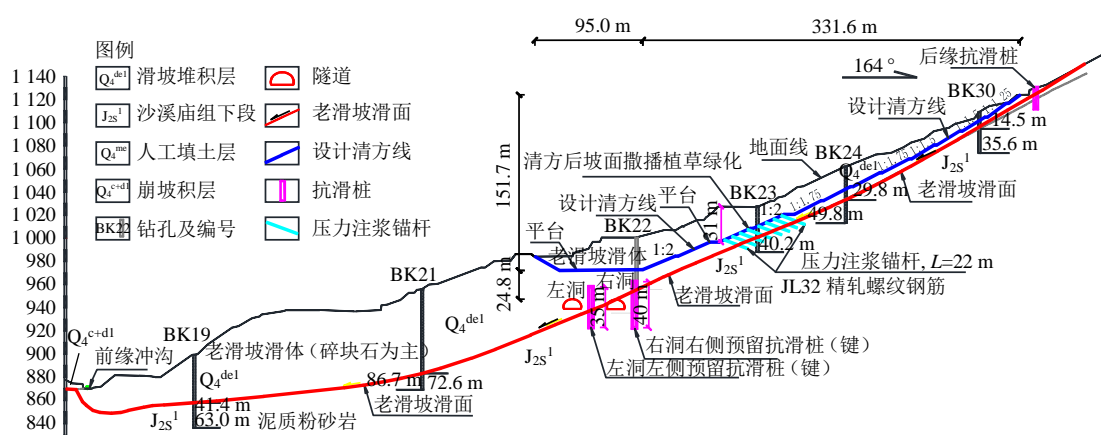


图5 变形体处治工程剖面布置图

Fig.5 Treatment cross section of deformable body

### 3.2.2 工程加固措施

(1) 抗滑桩支挡为防止清方后牵引后缘坡积体变形、滑移,在变形体后缘设置一排抗滑桩。

(2) 框架锚固加固在清方后,顺层基岩上覆土体较薄,为防止下伏顺层基岩发生压溃破坏,在坡体中下部增设框架锚杆工程。

### 3.2.3 预留工程

变形体进行大规模清方后,是否还有必要在隧道右侧设置抗滑桩(键)成为变形体彻底处治的关键。按规范推荐的不平衡推力法进行计算,在隧道左洞右侧和右洞右侧尚有超过2 000 kN/m的剩余下滑推力,还需要在两洞右侧各设置一排抗滑桩来限制坡体对隧道的推力作用。但由于受该滑坡和变形体地质结构复杂、规模巨大、边界条件复杂、参数取值困难等因素的制约,传统的不平衡推力法计算结果可能偏于保守,可能造成不必要的工程投资浪费。对于这类复杂的隧道与滑坡的相互作用问题,

仅靠推力的大小来控制整个处治工程是不太合理的,应该采用基于应力-变形控制理论的数值分析方法来计算和验证更为准确和合理,并结合后期变形体及隧道的变形监测结果,最终确定是否有必要增加两洞右侧的抗滑桩支挡工程。因此,将这两个位置的抗滑桩作为预留工程来考虑。

## 4 变形体、隧道的数值分析

本次数值分析计算的主要对象为变形剧烈的I区滑体中后部的变形体与I区隧道,研究其相互作用影响、验证及优化处治措施。根据滑坡体地形图、地质勘探资料、隧道结构物等建立了滑坡体区域的FLAC三维地质结构模型(图6),以此来进行变形体及隧道三维数值精细分析。

计算模型概化为滑体、滑带、初期支护、二次支护及基岩5个部分,滑体和滑带土采用摩尔-库仑模型,假定每种材料均为各向同性的均质体,强度

破坏准则服从摩尔-库仑定律。初期支护、二次支护及基岩采用弹塑性模型。

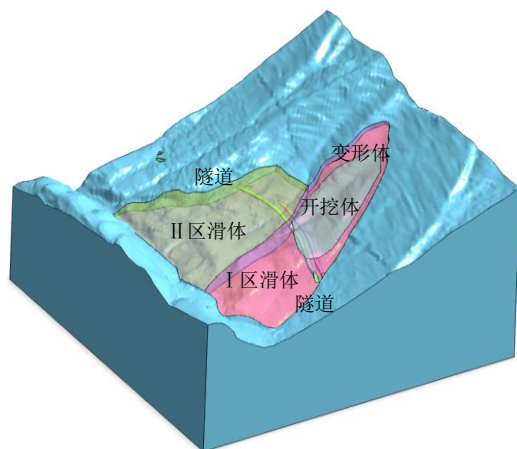


图6 滑坡三维地质模型

Fig.6 A 3D numerical model of landslide

边界条件：模型底部采用三向约束， $y$  方向全约束， $x$  方向在模型边界处采用法向约束。

计算分两步进行，第1步计算滑床、滑体和滑带在重力作用下的弹性变形和应力，作为初始状态；第2步将弹性变形清零，将滑带的材料属性变更为弹塑性，模拟变形和破坏发展过程。

#### 4.1 现状条件下（天然工况）滑带土的参数反分析

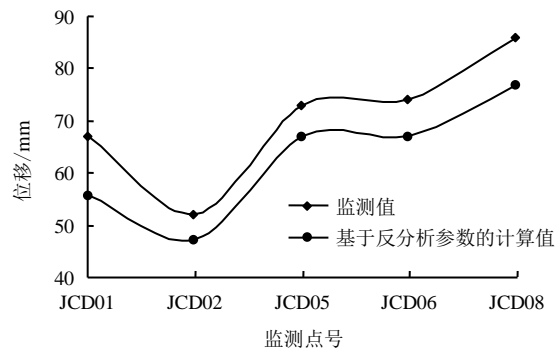
FLAC 数值分析模型建立后，利用均匀设计试验方法，构建以变形位移为输入变量，滑带土参数为输出变量的神经网络 RBF 模型，反演分析得到变形体的滑体变形参数、滑带强度参数，结果如表 1 所示。

表1 变形体的参数反分析结果表

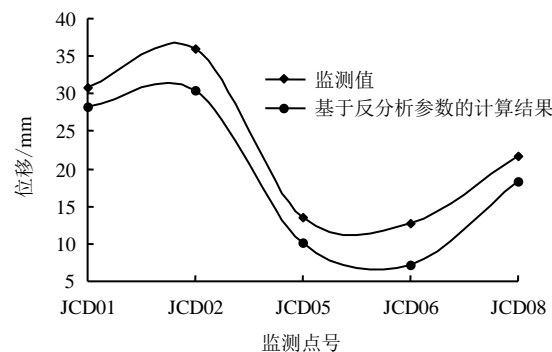
Table 1 Results of parameters base on back analysis

滑体弹性模量 /MPa	滑体泊松比	滑带弹性模量 /MPa	滑带泊松比	滑带黏聚力 c/kPa	滑带内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
70.0	0.33	40.0	0.35	33.2	18.6

为验证反分析参数的合理性，将反分析得到的参数代入计算模型中，再次进行正向计算，得到各测点的  $X$ 、 $Z$  方向位移。图 7 为老滑坡 I 区及变形体主剖面上监测点的反演计算位移值与实测位移值对比图。从图中可以看出，现场实测位移与基于反分析参数得到位移拟合较好，反演分析的滑体参数、滑带强度参数与室内试验所得到的参数也较为接近，也就证明了其模型的合理性，可以采用该模型和反分析参数进行以下的数值分析计算。



(a) X 方向位移对比图



(b) Z 方向位移对比图

图7 现场实测位移与基于反分析参数得到位移对比

Fig.7 Comparison of measured displacement and displacement based on parameters of back analysis

#### 4.2 变形体及隧道的数值分析

为验证清方方案的合理性和指导后期的预留工程设计，在验证后的数值分析模型和反演参数的基础上，对变形体及隧道进行应力-变形分析，以获得变形体的应力分布规律、变形规律、隧道变形情况及稳定性。

各层岩土体及支护结构力学参数见表 2。计算工况考虑了 4 种：①天然+隧道开挖+未清方；②天然+隧道开挖+清方；③暴雨+隧道开挖+清方；④暴雨+隧道开挖+清方+支护结构（隧道左洞右侧和右洞右侧 10 m 分别设置一排抗滑桩予以支挡）。以下以老滑坡 I 区及变形体主剖面的计算分析结果为例予以说明。

表2 模型计算参数表

Table 2 Table of model parameters

岩性	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	重度/( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	
					天然	饱和
滑带土	40.0	0.35	30	19	23.5	24.0
滑体	70.0	0.33	36	28	23.5	24.0
基岩	50.0	0.26	6 000	42	26.4	/
初支护	90.0	0.24	500	38	25.0	/
二次支护	90.0	0.20	6 000	40	25.0	/



### 4.2.1 坡体变形及应力分布规律

图8为主剖面在隧道开挖后，天然隧道开挖和清方+暴雨两种工况下的滑坡变形等值云图。从图中可以看出，在天然状态隧道开挖下，坡体的最大变形约57 cm，主要集中在变形体的中、上部，坡体下部基本上没有变形量，这与地表宏观变形是完全吻合的；在暴雨+清方工况下，坡体的最大变形值约2.3 cm，隧道周边变形量较小。

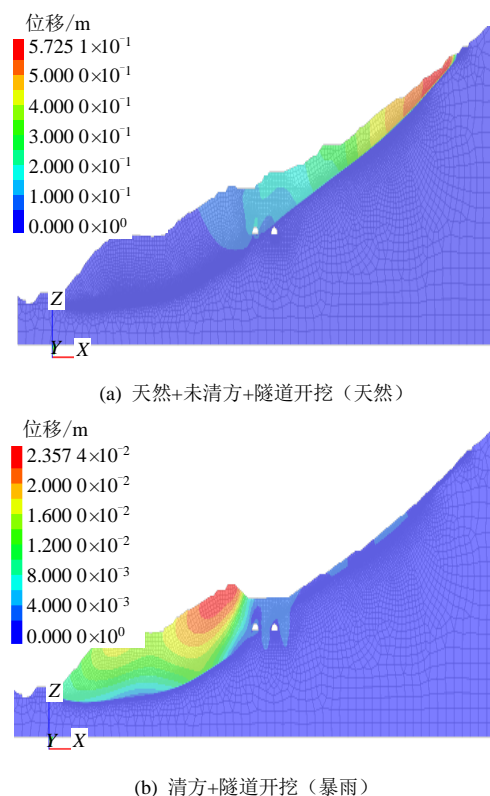


图8 滑坡体变形分布等值云图

Fig.8 Contours of displacement of landslide

图9为变形体剪应力分布图。从图中可以看出，最大剪应力主要集中在隧道周边，天然未清方工况下，最大剪应力值约5.40 MPa，暴雨+清方工况最大剪应力值约2.45 MPa。

图10和图11分别为变形体的剪应变增量云图和塑性区分布图。从图中可以看出，隧道开挖后在天然工况下，滑坡上部存在一条贯通的剪应变增量带，而下部没有，说明斜坡整体是稳定的，隧道右侧变形体可能产生滑动。在暴雨+清方工况下，滑带土强度折减1.15倍，而剪应变增量带主要在滑坡中下部出现，说明清方后隧道右侧剩余的变形体不可能再产生滑动。

### 4.2.2 隧洞变形及应力分布规律

图12为天然状态隧道开挖后洞内的变形破坏图。坡体的下滑力作用导致左线隧道变形严重，侧

压现象明显，左线隧道右侧侵陷严重，最大侵陷量值约66 cm，这与实际变形量也是基本吻合。右线隧道变形较小，仅在隧道顶部出现了变形。隧道支护结构承受的最大剪应力值约5.4 MPa。

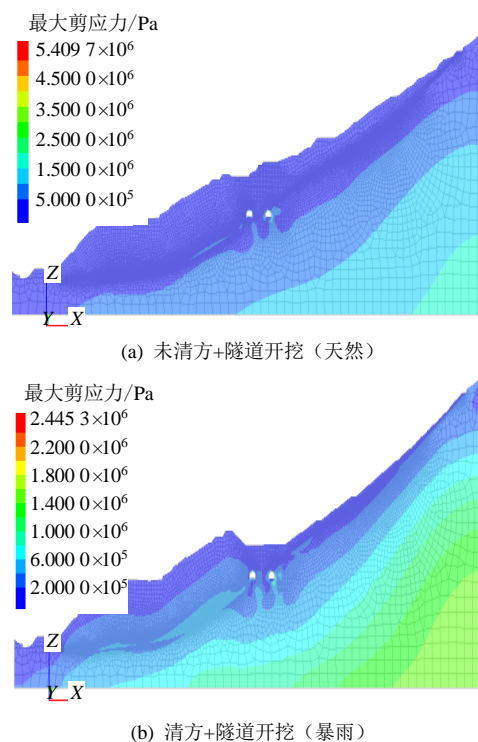


图9 滑坡体最大剪应力等值云图

Fig.9 Contours of maximal shear stress of landslide

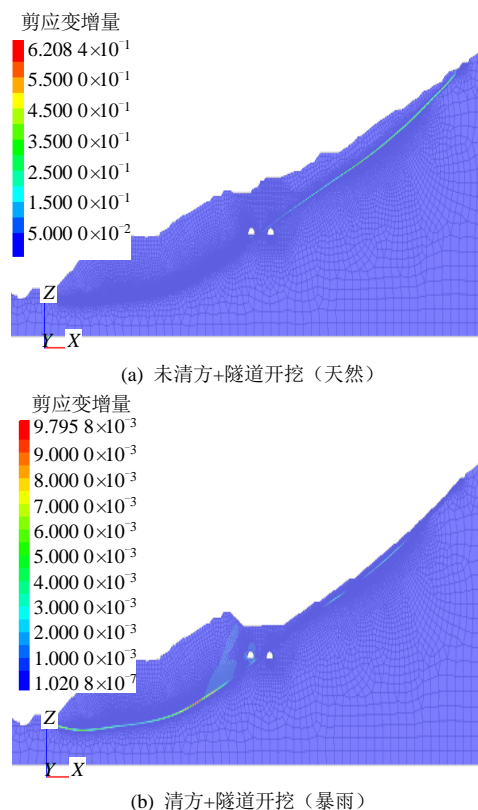


图10 滑坡体剪应变增量等值云图

Fig.10 Contours of shear strain increment of landslide

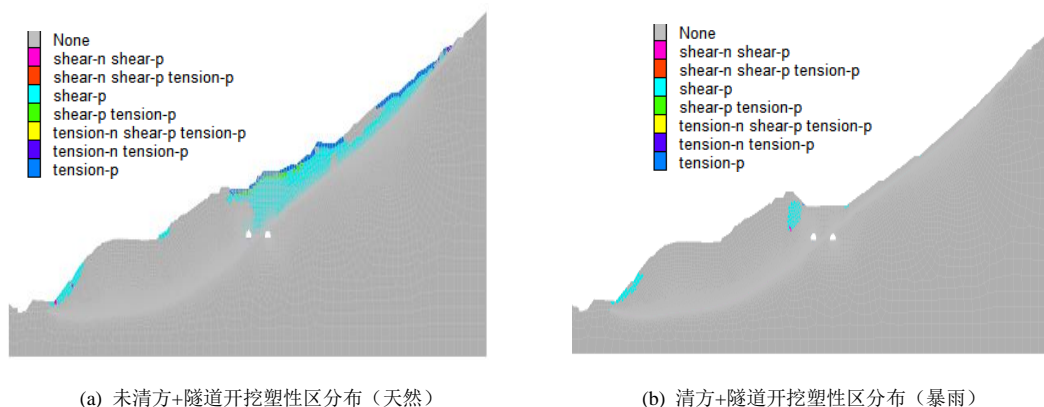


图 11 滑坡体塑性区分布图  
Fig.11 Plastic zones of landslide

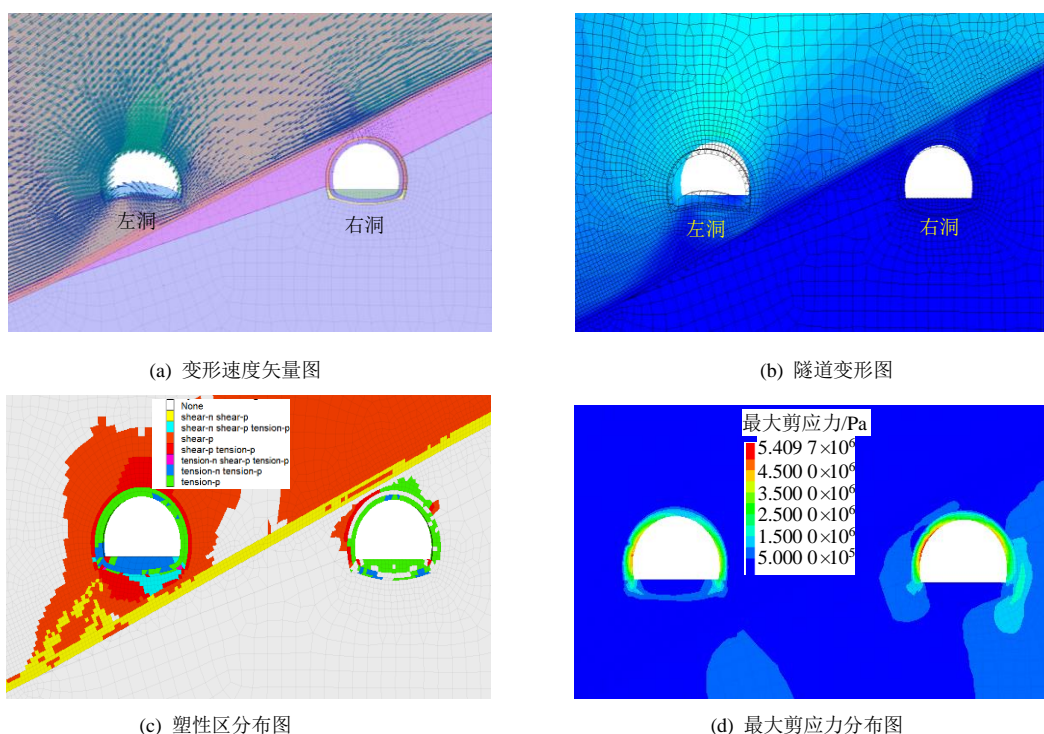


图 12 隧洞变形破坏图  
Fig.12 Deformation and failure of tunnel

图 13 和图 14 分别为坡体清方后隧道的最大剪应力分布云图和变形云图。从图中可以看出,在暴雨工况下,变形体清方后,隧道周边最大的剪应力值约 2.45 MPa,变形值约 5.8 mm。施加抗滑桩后隧道周边的应力和位移值变化不大。

#### 4.2.3 抗滑桩受力分析

图 15 和图 16 为暴雨工况+清方后,预留在隧道左洞右侧和右洞右侧的两排抗滑桩的剪力和弯矩图。从图中看出,桩体承受的最大剪应力值约 37 kN,弯矩最大值约 199 kN·m。

#### 4.3 数值分析计算的基本结论

(1) 应力-变形分析计算结果表明:老滑坡 I 区

在天然+隧道开挖工况下产生了较大的变形,主要变形部位位于变形体的中、上部,下部基本上没有变形,老滑坡 I 区整体是稳定。

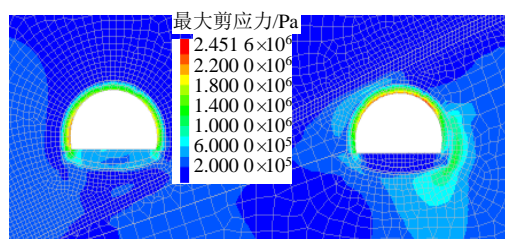
(2) 采用设计方案对隧道右侧的变形体进行清方后,在暴雨工况下,按强度折减法计算的安全系数均大于 1.20,变形体中上部的变形也很小,滑面未贯通,说明清方后老滑坡 I 区和隧道开挖诱发的变形体均处于稳定状态。

(3) 清方后,隧道周边最大的剪应力值和变形值明显减小,可通过隧道自身支护结构确保隧道的稳定。在隧道左洞右侧和右洞右侧各预留的一排抗滑桩对隧道的变形影响不大,故该预留工程可不予

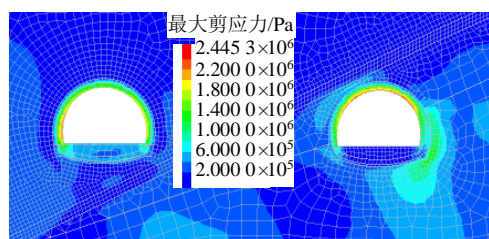


实施,直接节省工程造价逾5 000万元。

2016年7月,施工完成了该变形体的清方、坡体加固等综合处治工程,并未实施隧道左洞和右洞右侧的抗滑桩预留工程,在变形监测条件下实施隧道左洞的重新开挖,逐步拆除了右洞斜撑。于2016年10月,隧道成功穿越滑坡体并顺利贯通,并且未出现新的变形开裂现象。这种复杂条件下的隧道-滑坡体系的成功处治在国内外亦是非常少见的,其设计分析思路和应对措施可供今后类似工程提供参考和借鉴。



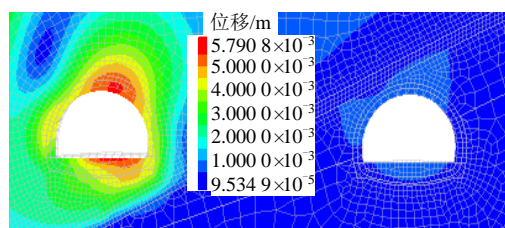
(a) 清方后隧洞最大剪应力分布云图(暴雨)



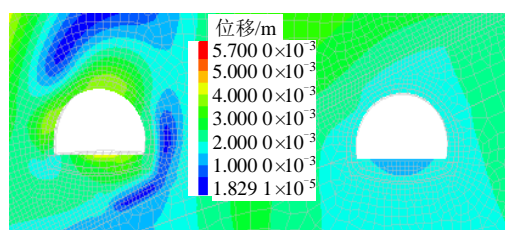
(b) 清方+抗滑桩隧洞最大剪应力分布云图(暴雨)

图13 隧道最大剪应力分布云图

Fig.13 Contours of maximal shear stress of tunnel



(a) 清方后隧洞变形分布云图(暴雨)



(b) 清方+抗滑桩隧洞变形云图(暴雨)

图14 隧道变形位移等值云图

Fig.14 Contours of displacement of tunnel

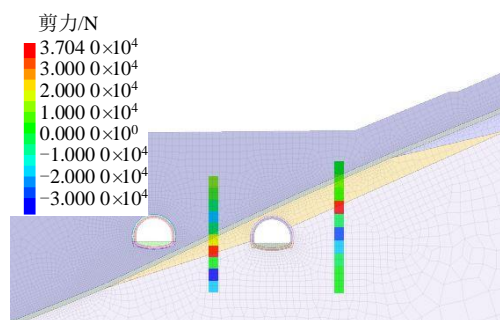


图15 桩剪力分布图

Fig.15 Shear of anti-slide piles

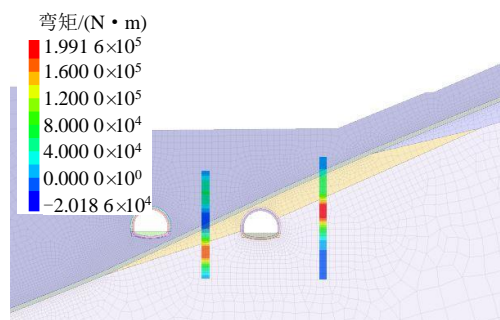


图16 桩弯矩分布图

Fig.16 Bending moment of anti-slide piles

## 5 结论

(1) 隧道正交穿越滑坡,同时又耦合了厚度巨大的上覆滑坡体和隧道开挖揭穿了滑坡滑面这两个不利条件时,将会引发滑坡和隧道的强烈相互作用。为控制坡体变形,减轻或消除其对隧道的威胁,应准确分析滑坡与隧道的影响关系和相互作用机制。

(2) 这类深厚滑体滑坡正交作用在隧道侧的下滑推力非常大,仅靠抗滑支挡措施来处治是不太经济 and 合理的,本文通过工程案例的深入分析,证明清方减载应该是被优先考虑的简单有效的措施。

(3) 数值分析方法可对坡体、隧道的应力、变形等进行详细计算分析,对这种复杂体系作用下的坡体与隧道的相互作用所进行的分析更为合理,并可直接用于最终的滑坡和隧道加固设计以及相互间的变形协调设计中,所确定的处治方案具有明显技术合理性和经济优势,避免了不必要的工程浪费,取得了很好的经济效益。

## 参考文献

- [1] 山田刚二,渡正亮,小岛澄治(日).滑坡和斜坡崩塌及其防治[M]. 翻译组译. 北京: 科学出版社, 1980.  
YAMADA TAKEJI, DU Zheng-liang, OHASHI CHEJI. Landslide and slope failure and its prevention and control[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [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 Lu-xin, ZHOU De-pei. Cause of creep landslide formation and mechanism of deformation of tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(2): 217—221.
- [3] 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): 71—376.
- MAO Jian-qiang, ZHOU De-pei. Deformation analysis of landslide-tunnel interaction[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2002, 37(4): 371—376.
- [4] 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 De-pei, MAO Jian-qiang, ZHANG Lu-xin, et al. Relationship between tunnel deformation with slope disasters and its prediction model[J]. **Chinese Journal of the China Railway Society**, 2002, 24(1): 81—86.
- [5] 陶志平. 滑坡地段隧道变形机理及灾害预测和治理研究[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- TAO Zhi-ping. Study on tunnel deformation mechanism at landslide site and disaster predicting and controlling[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [6] 陶志平, 周德培. 滑坡地段隧道变形的地质力学模型及工程防治措施[J]. 铁道工程学报, 2006, 2006(1): 61—66.
- TAO Zhi-ping, ZHOU De-pei. The geological mechanics model of tunnel deformation at landslide site and engineering controlling measure[J]. **Chinese Journal of Railway Engineering Society**, 2006, 2006(1): 61—66.
- [7] 陶志平, 周德培. 蠕动型滑坡隧道的变形规律及灾害预测[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(2): 163—168.
- TAO Zhi-ping, ZHOU De-pei. Deformation law and disaster prediction of tunnel in creep landslide[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2007, 42(2): 163—168.
- [8] 王建秀, 朱合华, 唐益群, 等. 连拱隧道一边坡耦合作用: 滑坡连拱隧道[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 120—124.
- WANG Jian-xiu, ZHU He-hua, TANG Yi-qun, et al. Interaction between twin-arch tunnel and slope: landslide twin-arch tunnel[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(9): 120—124.
- [9] WANG T T. Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes[J]. **Engineering Geology**, 2010, 115: 80—95.
- [10] 王永刚, 丁文其, 唐学军. 阳坡里隧道纵穿滑坡体段变形破坏机制与加固效应研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2142—2148.
- WANG Yong-gang, DING Wen-qi, TANG Xue-jun. Study of deformation and failure mechanism and reinforcement effect of Yangpoli tunnel longitudinally traversing landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 2142—2148.
- [11] 刘海, 沈军辉, 魏伟, 等. 穿越古滑坡川主寺隧道施工地质问题及整治措施[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 540—546.
- LIU Hai, SHEN Jun-hui, WEI Wei, et al. Geological problems and treatment measures for highway tunnel through ancient land-slide[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2012, 20(4): 540—546.
- [12] 赵志刚, 李德武, 张志军, 等. 高速公路隧道穿越滑坡段变形机制与处治技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(3): 47—52.
- ZHAO Zhi-gang, LI De-wu, ZHANG Zhi-jun, et al. Deformation mechanism and treatment technology for landslides with undercrossing tunnels[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2013, 10(3): 47—52.
- [13] 马惠民. 坡体病害与隧道变形问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2719—2724.
- MA Hui-min. Discussion on problems of slope disaster and tunnel deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp. 2): 2719—2724.
- [14] 马惠民, 吴红刚. 隧道-滑坡体系的研究进展和展望[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 522—530.
- MA Hui-min, WU Hong-gang. Progress and expectation of research on tunnel-landslide system[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2016, 12(2): 522—530.
- [15] 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, 31(增刊 2): 3632—3642.
- WU Hong-gang, WU Dao-yong, MA Hui-min, et al. Research on type of tunnel-landslide system and tunnel deformation mode[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp. 2): 3632—3642.