

不同空间位置滑坡对 隧道支护结构的作用效果数值分析

孙志杰

(山西省交通科技研发有限公司 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室,山西 太原 030032)

摘要: 隧道线路的选址和设计应确保滑坡与隧道之间的距离足以避免滑坡对隧道的不利影响。但由于隧道所处环境的改变致使隧址区滑坡复活,进而导致隧道支护结构开裂、仰拱隆起等病害。依托某高速公路滑坡-隧道体系实体工程,采用数值模拟方法,对不同滑坡-隧道空间位置下隧道结构的受力和变形特性进行了对比分析。结果表明,滑坡-隧道体系中,隧道支护结构的变形在3D影响范围内主要受滑坡和隧道空间位置的影响。0D工况由于滑带贯穿整个隧道截面,变形最为不利。拱部变形最不利状态为左1D工况(右侧拱脚与滑带相交),仰拱变形最不利状态为右1D工况(左侧拱肩与滑带相交)。但超过3D范围后,埋深对变形效果开始显现。滑坡位置对隧道支护结构受力的影响规律与变形不同,且对轴力的影响远大于弯矩。在对类似隧道进行监测和处治时,除变形外还应对支护结构关键部位受力进行监测。且应针对滑坡和隧道的不同位置关系,选用针对性加固方案。

关键词: 滑坡-隧道体系;空间位置;数值分析;支护结构变形;支护结构受力

中图分类号: U45 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)04-0034-06

隧道在选线时如发现隧址区存在老滑坡或不稳定斜坡,会根据实际情况采取改线绕避、深埋隧道从滑床下通过或先整治滑坡后再修建隧道等技术手段加以解决,但由于隧道所处岩土体水文地质环境在不断发生变化,洞周围岩在长期地应力、地下水作用下使得自身强度降低,沿节理裂隙等软弱面形成蠕动性滑坡;或者是人类工程活动引起坡体内应力场发生重大调整,导致坡体失稳从而酿成滑坡。滑坡导致隧道衬砌开裂、仰拱隆起,严重影响了行车安全。因此对滑坡地段隧道受力变形问题进行深入研究,是一项十分必要而又紧迫的工作。

目前学者在滑坡-隧道体系的诱发因素和变形机理等方面开展了不少研究工作。李文军等^[1]针对隧道开挖导致古滑坡复活的案例,对滑坡-隧道间的关系进行了分析,探讨了隧道开挖-滑坡复活-边坡内应力重新分布之间的关系。马惠民^[2]通过对多条主要铁路干线滑坡-隧道体系病害实例归纳总结,提出了滑坡病害与隧道变形的5种地质模型。朱苦竹^[3]将数学二次规划法的有限元分析计算应用于滑坡隧道相互作用,构建了相关的数理模型,推导了相关计算公式。吴红刚^[4]综合运用各种研究手段,分析洞口段滑坡与隧道间的相互作用关系,对隧道-滑坡体系进行了安全评价,提出了针对性的灾害防治措施。Keiichi et al^[5]采用离散元软件对不同围岩参数和隧道位置对隧道拱顶沉降、滑体水平竖向位移和隧道洞周围岩滑体应变的影响进行了分析。尹静等^[6]、张治国等^[7]建立了隧道-滑坡相互作用的力学模型,采用传递矩阵法推导了隧道内力和位移的传递矩阵计算式。雷耀军^[8]采用数值模拟方法对偏压隧道洞口边坡的变形和稳定性进行了分析,得出必须对洞口边坡进行预加固的结论。赵金等^[9]对滑坡内隧道变形模式与荷载计算方法进行了研究,得出了隧道在滑坡推力作用下的受力图示和荷载计算公式。周文皎^[10]基于滑

收稿日期:2021-06-13 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20210130

基金项目:山西省交通运输厅科技项目(2018-1-17,2019-1-24);山西交控集团科技项目(19-JKKJ-3,19-JKKJ-16,19-JKKJ-46)

作者简介:孙志杰(1983—),男,高级工程师,研究方向为岩土工程病害机理、处治及监测。E-mail:18835130490@163.com

孙志杰.不同空间位置滑坡对隧道支护结构的作用效果数值分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):34-39.

坡和隧道变形破坏特征,从时间和空间上揭示了滑坡-隧道相互作用机理。

从上述研究可看出,滑坡-隧道空间位置关系对二者相互作用影响至关重要,当前对空间位置研究多采用工程案例归纳分析^[2,10],且多为在某一特定空间位置关系下的研究^[4,6-7],对滑坡-隧道体系不同空间位置关系下隧道支护结构受力和变形定量系统研究的成果不多。因此,本文通过数值模拟方法对滑坡影响下隧道结构的受力和变形特性进行了分析,可为隧道在滑坡-隧道体系中的选址设计施工提供借鉴和参考。

1 工程概况

依托工程某高速公路隧道运营至今已 10 余年之久。5 年前隧道衬砌结构出现大量裂缝,包括纵向裂缝、横向裂缝、环向裂缝。裂缝大多较细小,剪切错动不明显。同时隧道上部坡体东侧地表出现明显的张裂缝。经地质调绘及钻探,初步认为隧道结构裂缝为坡体蠕滑所致。滑坡-隧道相互位置关系及坡体、隧道结构部分病害如图 1 所示。

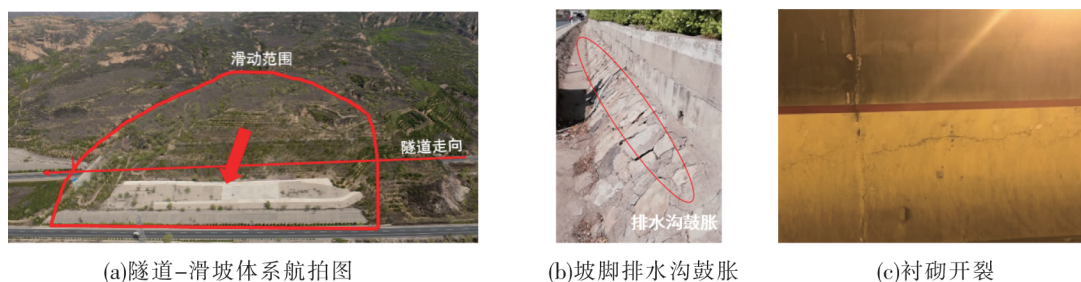


图 1 滑坡-隧道相互位置及部分病害

在路堑左侧边坡的一级平台到三级边坡的中部,已经形成不连续的近水平裂缝(裂缝宽度 1~4 cm)和鼓胀现象、错台及排水沟渠渠壁倾斜。隧道内裂缝以水平裂缝、斜向剪切裂缝为主,裂缝大多较细小,宽度 1~3 mm 为主。

2 数值模型

2.1 模型参数选取

模型中各类岩土体参数根据隧址区及滑坡所取岩土体试验获得,支护结构参数从设计图纸中获得。采用平面应变单元模拟岩体,梁单元模拟初期支护中的喷射混凝土和钢架组合体系。滑坡为圆弧形单滑带滑坡,模型物理力学参数如表 1 所示。

表 1 围岩及支护结构物理力学参数

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	摩擦角/ $(^\circ)$
滑体	400	0.4	2 500	18	40
滑带	50	0.45	2 100	1	30
基岩	600	0.35	2 580	25	40
初期支护	28.5	0.22	2 300	—	—

模型水平长 305 m、上坡高 155 m、下坡高 105 m。模型网格如图 2 所示。模型边界条件为:地表为自由面,下边界垂直方向约束,左右边界水平方向约束。

2.2 模拟工况

本文共模拟了 12 个工况的滑坡-隧道空间位置关系,其中基准工况为隧道中心位于滑带上。将隧道分别向上、下、左、右 4 个方向

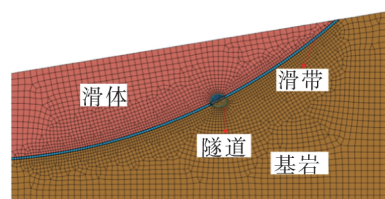


图 2 隧道滑带模型网格图(基准工况)

平移 1.0D、3.0D、5.0D, 为对比工况, 如图 3 所示。

隧道受构造应力影响较小, 故地应力场只考虑自重应力。计算流程分 3 个施工步。首先, 施加重力作用, 并进行初始地应力平衡, 位移清零; 其次, 钝化隧道开挖部分围岩, 激活隧道初期支护结构; 最后, 激活滑带单元, 实现滑坡滑动, 最终实现对滑坡-隧道的模拟。

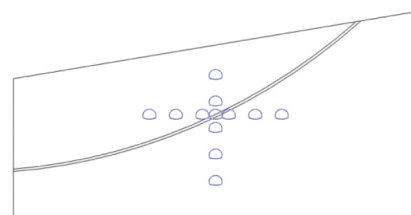
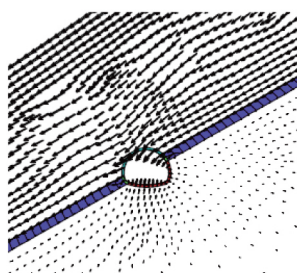


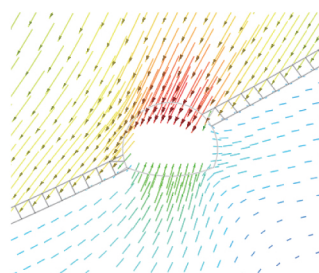
图 3 模型计算工况示意图

3 滑坡-隧道体系变形分析

为验证模型的可靠性, 将文献[11]数值位移矢量图与模拟结果进行对比。图 4 为隧道位于滑带处的位移矢量图。



(a) 文献模型



(b) 本文模型

图 4 隧道位于滑带处滑坡-隧道体系位移矢量图

从图 4 可看出, 当隧道位于滑坡处时, 隧道拱部发生较大沿滑坡方向滑移, 仰拱为斜向上的隆起; 本文模型与文献模型模拟结果吻合较好。

为定量分析不同工况下隧道洞周围岩变形, 将各工况下洞周围岩竖向和水平向变形展布于水平轴上。其中拱部和边墙部分从左侧到右侧节点编号为 1~19; 仰拱部分从左侧到右侧节点编号为 1~11。隧道洞周各节点编号如图 5 所示。其中 10[#] 节点和 6[#] 节点为拱部和仰拱中点。

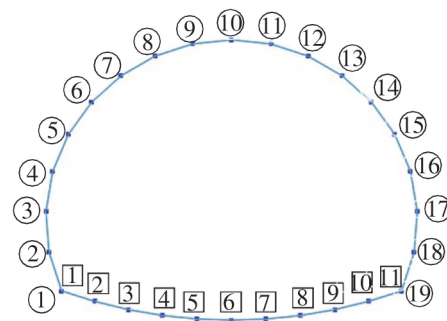
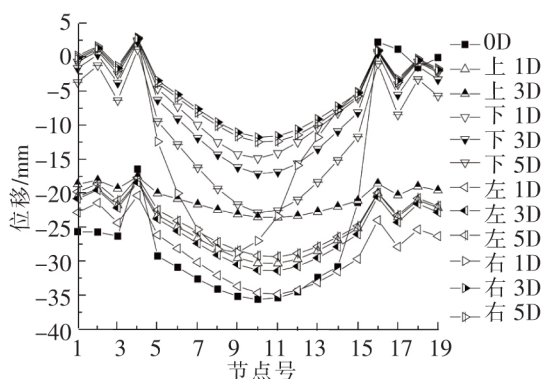
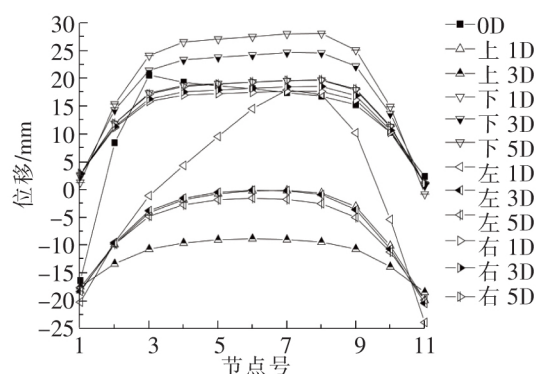


图 5 支护结构各节点编号示意图

不同工况隧道支护结构竖向位移沿各节点展布如图 6 所示。图 6 中正值为下沉, 负值为向上隆起。



(a) 拱部和边墙区域



(b) 仰拱区域

图 6 各工况洞周围岩节点竖向位移

从图 6(a) 可看出, 0D 工况和右 1D 工况由于隧道和滑带相交, 故围岩变形存在显著的不对称性。0D 工况由于右侧边墙部分位于滑带以下基岩部位, 滑带及以上土体向下的滑动产生对该处向右上方的反向

挤压作用,导致该部分沉降值大幅减小。两侧边墙位移值相差 25 mm。最大沉降位于拱顶,约 36 mm。右 1D 工况由于拱部左侧位于滑动区域,导致该部分沉降值增加,拱部最大沉降点发生在拱顶左侧与滑动交叉位置,约 29 mm。

从整体看,最大沉降多发生在拱顶部位。拱部区域沉降从拱顶至拱脚单调逐渐减小。边墙区域沉降均表现出波动现象。除向下工况外,其他工况竖向位移极值随隧道与滑坡距离的增加而减小。向下工况随着距离滑坡位置的增大,受埋深影响效应大于滑坡影响效应,故呈现与其他工况不同的趋势。

竖向位移曲线大致可分为 2 大区域,上部区域小于 17 mm 区域,包括右 1D、右 3D、右 5D、下 1D、下 3D、下 5D。下部区域大于 17 mm 小于 36 mm,包括左 1D、3D、左 5D、上 1D、上 3D。从图 6(b)可看出,基本工况和左 1D 工况由于仰拱和滑带交叉,故沉降曲线差异较大。其他工况仰拱沉降规律呈现 2 种规律:滑带下部为中间大两头小,下 5D 工况最大,约 27 mm;滑带上部为中间小两头大,上 3D 工况最大,约为一 9 mm。

4 滑坡-隧道体系受力分析

4.1 隧道衬砌轴力分析

为定量分析不同工况下衬砌内力分布差异,将衬砌单元编号,规则同节点编号。隧道衬砌各单元编号如图 7 所示。图 8 为不同工况衬砌轴力分布图。

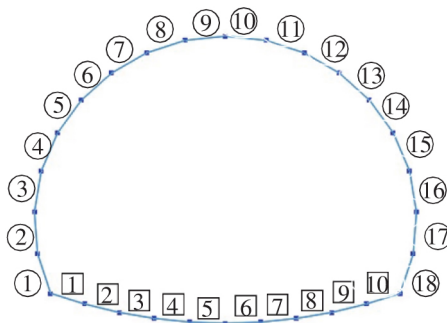


图 7 隧道衬砌各单元编号示意图

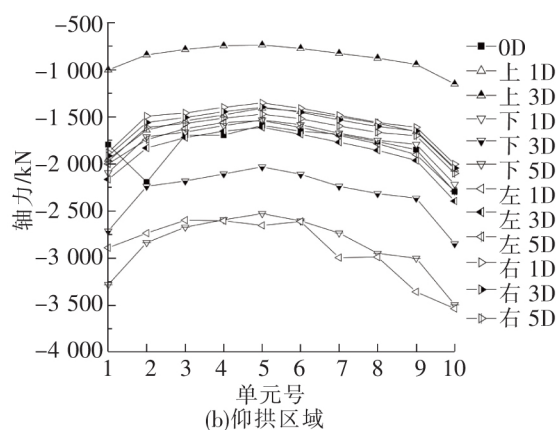
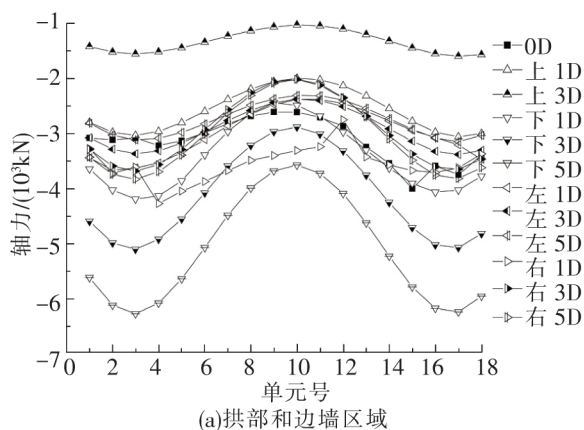


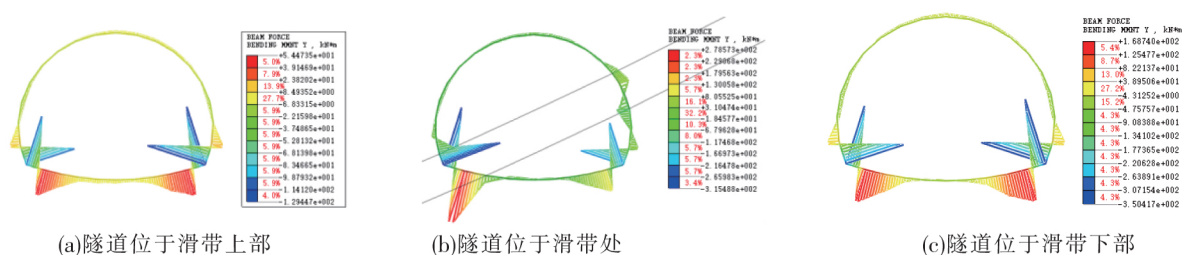
图 8 各工况衬砌轴力分布图

从图 8(a)可看出,拱部和边墙部位轴力沿 10 号单元大致呈对称分布,且对称性随隧道距滑坡距离的增大而增强。拱顶轴力最小,边墙轴力最大。轴力曲线呈“W 型”,轴力受埋深影响程度大于受滑带影响程度,埋深越深,曲线越陡,轴力越大。体现在左 1D、左 3D、左 5D、右 1D、右 3D、右 5D 工况轴力大小集中于一 2 000~一 4 000 kN 范围内。下 5D 工况轴力最大,边墙约为一 6 200 kN,拱顶约为一 3 600 kN,两者差值一 2 600 kN;上 3D 工况轴力最小,边墙约为一 1 600 kN,拱顶约为一 1 000 kN,两者差值一 600 kN。

从图 8(b)可看出,仰拱轴力分布对称性较拱部差,右侧轴力大于左侧相同位置处。和拱部边墙轴力类似,仰拱轴力也随埋深增加而增大。左 1D 工况由于仰拱与滑带相交,故仰拱受力较同等埋深其他工况大,达到了下 5D 工况受力水平。

4.2 支护结构弯矩分析

图 9 为隧道-滑带不同位置关系衬砌弯矩云图。

图 9 隧道-滑带不同位置关系衬砌弯矩云图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

从图 9 可看出,整个拱部范围内衬砌弯矩水平较低,边墙中下部位及仰拱两端弯矩变化较大。图 9(b)由于隧道位于滑带,故右侧拱脚和左侧墙脚及仰拱部位弯矩较图 9(a)和图 9(c)大。这与图 1 中边墙部位出现的纵向裂缝的特征相吻合。

图 10 为各工况衬砌弯矩分布图。

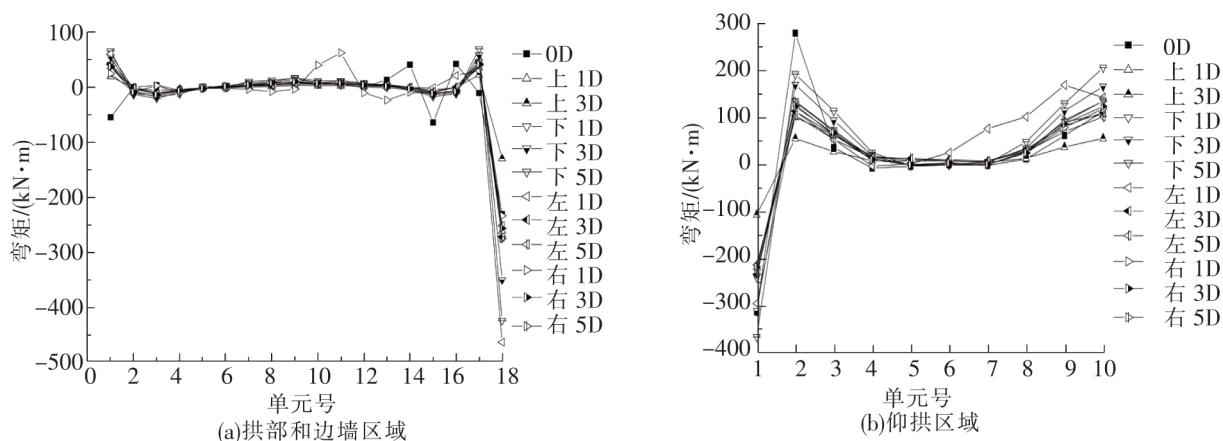


图 10 各工况衬砌弯矩分布图

由于单元两节点弯矩不同,本次提取单元节点 1 处弯矩值进行分析,故图 10 中弯矩分布曲线与图 9 中弯矩云图有所不同。图 10(a)中,除右 1D 工况和 0D 工况,由于支护结构拱部左侧(1D 工况)、拱腰右侧(0D 工况)与滑带交叉;图 10(b)中,由于左 1D 工况,仰拱右侧与滑带交叉,导致结构弯矩呈现与其他工况不同的分布。拱部弯矩水平较低,墙脚处弯矩变化幅度大,且弯矩值较高。仰拱两端弯矩值较中间部位高。

5 结论

依托某高速公路滑坡-隧道体系实体工程,采用数值模拟方法,对滑坡影响下隧道支护结构变形和受力特性进行了分析,得出如下结论:

- (1) 隧道支护结构位移由隧道与滑带位置关系决定,隧道位于滑带上部工况(左 1D、3D、左 5D、上 1D、上 3D)隧道支护结构的沉降量大于隧道位于滑带下部工况(右 1D、右 3D、右 5D、下 1D、下 3D、下 5D),且沉降量随着距滑带距离的增大而减小。
- (2) 滑带和隧道的空间位置对轴力的影响远大于弯矩的影响,滑带导致交叉部位衬砌轴力增大,埋深对轴力的影响大于滑带的影响。
- (3) 当出现滑坡无法绕避而采用隧道从滑床底部穿过的选址理念时,还应该考虑由于埋深增加导致支护结构受力增加的问题。当滑带与隧道相交时,应对滑带穿越部位的隧道支护结构进行加强设计。

参 考 文 献

- [1]李文军,马惠民,曹玉立. 斜坡病害与隧道变形问题综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(1): 74-80, 90.
- [2]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(S2): 2719-2724.
- [3]朱苦竹. 边坡与隧道相互作用分析及数学二次规划法应用[D]. 上海:同济大学, 2007.
- [4]吴红刚. 隧道滑坡体系的变形机理及控制技术研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2012.
- [5]Keiichi O, Senro K, Toshiya T. Numerical analysis to examine the effect of landslides on tunnels[J]. Missouri University of Science and Technology, 2013, 5(20): 9-16.
- [6]尹静,邓荣贵,钟志彬,等. 横穿滑坡变形区隧道受力变形规律及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3615-3625.
- [7]张治国,马兵兵,黄茂松,等. 山区滑坡诱发既有隧道受力变形影响分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3555-3564, 3572.
- [8]雷耀军. 米亚罗双洞偏压隧道洞口稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(S1): 156-161.
- [9]赵金,吴红刚,刘德仁,等. 滑坡内隧道变形模式与荷载计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 112-118.
- [10]周文皎. 滑坡-隧道相互作用分析及控制对策[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2020.
- [11]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(S2): 3632-3642.

Numerical Analysis of the Effect of Tunnel Support Structure with Different Landslide-Tunnel Spatial Positions

Sun Zhijie

(Key Lab of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi
Transportation Technology Research & Development Co. Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: The site selection and design of the tunnel route shall ensure that the distance between the landslide and the tunnel is sufficient to avoid the adverse impact of the landslide on the tunnel. However, due to the change of the tunnel environment, the landslide in the tunnel site is revived, which leads to the cracking of the tunnel support structure, inverted arch uplift and other diseases. Relying on a highway landslide-tunnel system project, the stress and deformation characteristics of the tunnel structure under different landslide-tunnel spatial positions were analyzed by numerical analysis. The results show that in the landslide-tunnel system, the deformation of tunnel support structure is mainly affected by the spatial position of landslide and tunnel within the 3D influence range. The most unfavorable state of deformation is 0D working condition because the sliding belt runs through the whole tunnel section. The most unfavorable state of arch deformation is left 1D working condition (the right arch foot intersects the sliding belt), and the most unfavorable state of inverted arch deformation is right 1D working condition (the left arch shoulder intersects the sliding belt). However, beyond the 3D range, the effect of buried depth on deformation begins to appear. The influence of landslide location on the stress of tunnel support structure is different from that of deformation, and the influence on axial force is much greater than that of bending moment. During the monitoring and treatment of similar tunnels, in addition to deformation, the stress of key parts of support structure shall be monitored. The targeted reinforcement scheme shall be selected according to the different location relationship between landslide and tunnel.

Key words: landslide-tunnel system; spatial location; numerical analysis; deformation of supporting structure; force of supporting structure