

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.01.14

滑坡内隧道变形模式与荷载计算方法

赵金^{1,3}, 吴红刚^{2,3,4}, 刘德仁¹, 牌立芳^{1,4}, 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 730000; 3. 中国中铁滑坡工程实验室, 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:近年来,运营期铁路隧道发生病害的比例逐年提高,其中以位于滑坡体内隧道的破坏最为严重,对铁路的安全运营造成了严重的威胁,然而我国目前对位于滑体内隧道的设计还没有形成统一的认识和标准,没有完整的计算理论。本文以隧道-滑坡中隧道穿越滑体为研究对象,从运营隧道的病害特征入手,通过对工程中的具体隧道-滑坡实例进行调查、归纳、总结,建立相应的工程地质模型。然后对该类模型在围岩压力和滑坡推力作用下的受力变形情况进行分析,将上部坡体作用于隧道上的滑坡推力与围岩压力进行叠加,得出隧道在滑坡推力作用下的受力图示和荷载计算公式,从而为滑坡地段隧道的设计提供参考。

关键词:隧道-滑坡;病害特征;地质模型;滑坡推力;叠加

中图分类号:RU452.27

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2019)01-0112-07

Deformation model of the tunnels within landslides and methods for loading caculation

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

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

Abstract: In recent years, the proportion of railway tunnel diseases in the operation period has increased, among which the damage to the tunnel in the landslide is the most serious and has posed a serious threat to the safe operation of railway. However, at present, there is no uniform understanding and standard for the design of tunnel located in the sliding body in our country. Relevant calculation theory is also uncompleted. In this paper, the tunnel crossing landslide is taken as the research object and starting from the disease characteristics of the operation tunnel. Through the investigation, induction and summary of the specific tunnel landslide examples in the project, the corresponding engineering geological model is established. Then the stress and deformation of the model under the action of surrounding rock pressure and landslide thrust are analyzed, the upper slope in tunnel landslide thrust and rock pressure are superimposed to produce the tunnel in landslide thrust under the action of the force diagram and load calculation formula. The results can provide reference for the design of the tunnel landslide site.

Keywords: tunnel-landslide; disease characteristics; geological model; landslide thrust; superposition

收稿日期: 2018-03-17; 修订日期: 2018-03-27

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

0 引言

随着我国经济发展和国土的开发利用,建设规模越来越大,范围越来越广,尤其在山区和丘陵地区开发中,铁路的修建不可避免通过隧道穿越山体,然而这些山体在降雨、地震等因素下极易产生滑坡,在交通运营使用时,在滑坡推力的作用下易导致铁路发生变形、破坏,影响行车安全。因此,越来越多的专家、研究工作者重视对于滑坡与隧道的相互作用模式和隧道的开挖对滑坡的影响的研究。马惠民,^[1]张鲁新等^[2],毛坚强等^[3]研究了坡体蠕滑的成因及隧道的变形机理。王俊伟等^[4]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^[5]研究了孙家崖偏压-滑坡隧道围岩变形和受力特征。许淑珍等^[6]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。吴红刚等^[7],朱苦竹等^[8],王建修等^[9],范建海等^[10]研究了隧道与滑坡的相对位置关系以及不同位置情况下滑坡体对隧道的作用形式和破坏情况,提出隧道-滑坡正交体系、平行体系和斜交体系。陈小云等^[11]研究了正交体系下隧道与滑带相交的力学模型。

上述学者大多只是对工程实例中的某个特定例子进行研究分析,得出的受力模式适应性差,难以大范围推广应用,而且只是得出滑坡推力与围岩压力对隧道的荷载作用模式,无法为滑坡地段的隧道设计提供借鉴。

现主要研究单滑面情况下,隧道穿越滑体的受力图示及荷载计算方法。通过工程实例中隧道的变形特征建立相应的工程地质模型,将作用于隧道的滑坡推力与围岩压力进行叠加,得出隧道在滑坡推力作用下的受力图示和荷载计算公式。

1 典型实例分析

当隧道位于滑体内时,主要承受滑坡推力和围岩压力。该类型的典型工程实例有成昆线林场隧道-滑坡、襄渝线狗磨湾隧道-滑坡。

1.1 成昆线林场隧道-滑坡

成昆线林场隧道位于青杠-沙坝之间,于1967年建成通车。建成初期铁路通过-古滑坡(图1)。1967年至1991年间坡体保持稳定,无滑动趋势,隧道安全运营。其地质断面如图2所示。

1991年7~9月,该地区发生大规模的降雨,部分时段雨量达到1100 mm多。由于长时间的持续降雨导致滑坡区大量雨水汇聚,前部坡体在雨水的长期浸泡作用

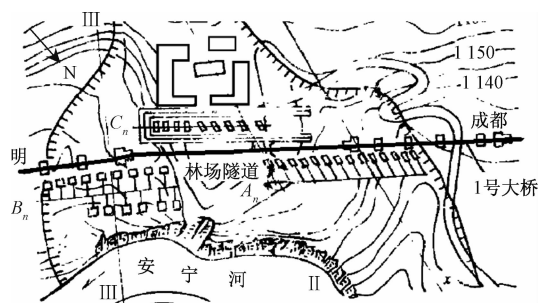


图1 林场隧道-滑坡平面图

Fig.1 The plane map of the tunnel-landslide in the forest farm

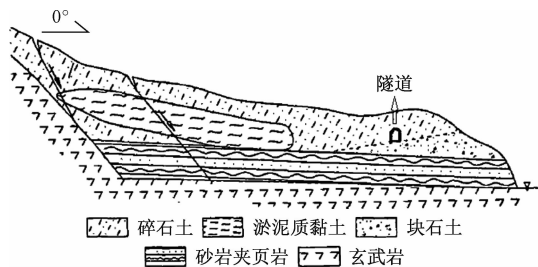


图2 林场隧道-滑坡地质断面图

Fig.2 The tunnel-landslide geological section of the forest farm

下饱和和软化,致使主滑体失去东南支撑脚,而整体滑动。同时,滑带上部为破碎昔格达组岩体,下部为坚硬的玄武岩,强降雨使滑带岩土体饱和产生静水压力,导致主滑体加速蠕滑。滑坡中部的林场隧道承受滑坡推力作用发生变形破坏,隧道内壁边墙受力产生20余条横向裂纹。由于隧道受不对称推力作用,使隧道发生整体移动,连接缝不规则错动,隧道沿轴向纵向弯曲严重,进出口整体向河侧位移约200 mm,边墙错台部分下沉。2个月后,滑坡变形趋于稳定,隧道破坏停止(图3)。

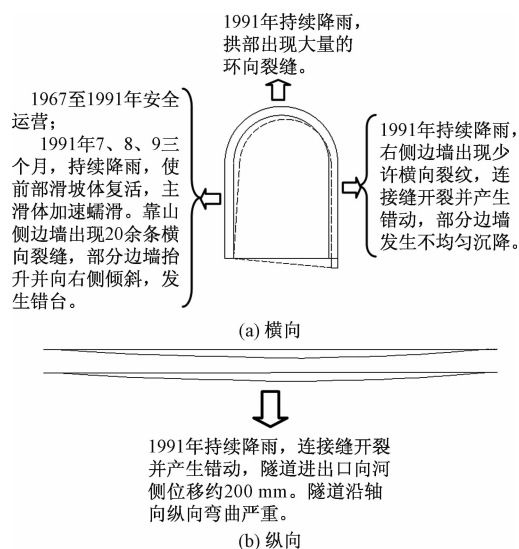


图3 林场隧道变形图示

Fig.3 The deformation diagram of the forest farm tunnel

1.2 湘渝线狗磨湾隧道-滑坡

狗磨湾隧道位于湘渝线狗磨湾地区,坡体土层上部为堆积土,滑带以下为节理发育,风化严重的石英云母片岩,地质断面图如图4所示。建设期间发生持续降雨,导致雨水渗入滑带,岩土进一步软化,同时导致汉江水位上升不断的冲蚀坡脚,使坡体逐渐失去支撑力,破坏了原来的平衡而使滑坡滑动。坡体下滑力的作用使隧道路线向汉江方向移动了0.079~0.299 m,连接缝产生错动,边墙产生一些横向环形裂缝。1983年雨季,滑坡蠕滑加剧,导致隧道变形进一步扩大,隧道靠山侧拱部混凝土掉块。1987年雨季,中铁西北科学研究院对隧道监测发现里程K260+342~K260+382段变形进一步增大,隧道边墙不断向河侧移动倾斜,13号避人洞的边墙、拱部裂缝扩展变形量从监测开始已经达到8.42 mm/80 d,并且不断扩大。

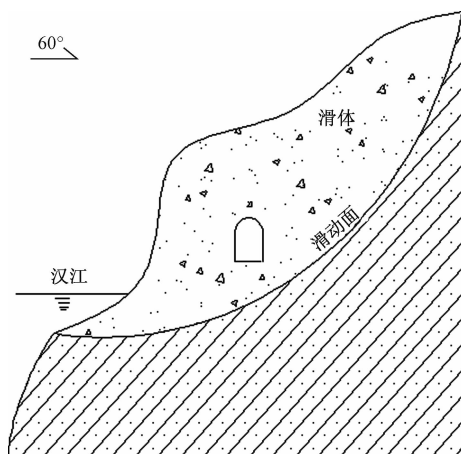


图4 狗磨湾隧道-滑坡地质断面图

Fig. 4 The tunnel-landslide geological section of Goumowan

2 滑坡内隧道受力特征

2.1 滑体内隧道地质模型

从隧道的变形特征图(图5)知位于滑体内的隧道变形具有一定规律,拱部、边墙裂缝发展规律一致。本着“忽略次要影响因素,抓主要影响因素”的原则,将位于滑体内的隧道-滑坡工程实例简化为相应工程地质模型。由于隧道和滑坡坡体的接触面是立体的,所以从隧道横向截面和纵向分别进行分析(表1)。

由地质模型分析知,当隧道位于滑体内的时候,就像埋入滑体内的空心薄壁地梁,两端有支撑,中间受滑坡推力作用,下侧面受滑坡剩余抗滑力。如果下侧滑坡体已经滑动对隧道无支撑,则下侧面受力可忽略不

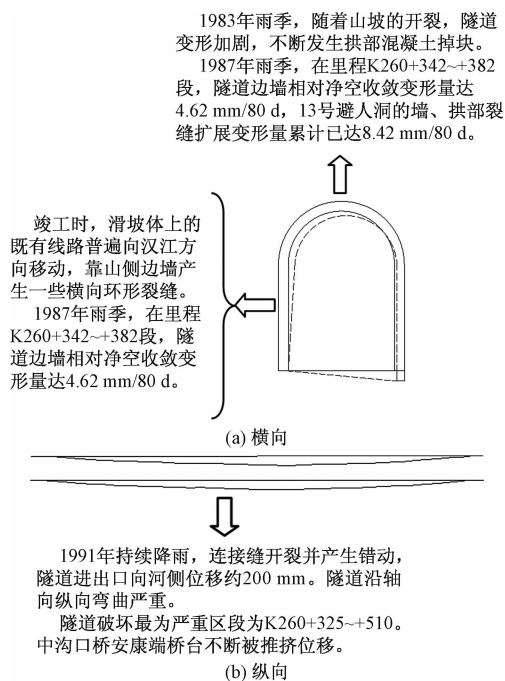


图5 狗磨湾隧道变形图特征

Fig. 5 The deformation diagram of Goumowan tunnel

计。滑坡滑动方向与隧道轴线方向有正交、斜交和平行关系,为了简化计算和推导方法的说明,采用隧道轴线与滑坡滑动方向正交的模式进行推导,将隧道上方正常的围岩压力和隧道后部紧邻滑块的剩余下滑力视为直接作用于隧道上的分布荷载,再结合隧道围岩的弹塑性理论对其进行一定的修正。

2.2 滑坡推力空间分布

由于坡体是立体结构,断面上所受的滑坡推力也是立体分布的,为了准确的计算滑坡推力的大小分布,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6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。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:

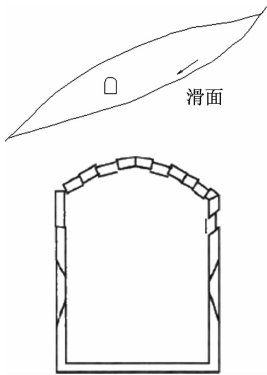
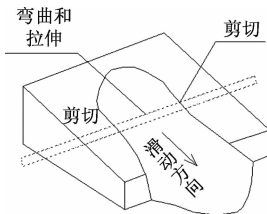
$$p(y) = p_0 \lambda(y) \quad (1)$$

式中: $\lambda(y)$ ——分布函数^[12]。

滑坡推力分布有三角形分布、矩形分布、梯形分布三种形式^[13-14],为了验证推导过程,采用较复杂的梯形分布(图7a)来计算。梯形分布时滑坡推力的荷载值为:

表 1 隧道 - 滑坡工程地质模型

Table 1 The engineering geological model of tunnel-landslide

模型	模型图	拱部结构	边墙结构
横向		两个模型中拱部均出现了环向裂缝,甚至在狗磨湾模型中靠山侧部分压溃破坏,混凝土压碎掉块。说明拱部除受纵向弯曲的影响,其上的荷载增大,尤其是靠山侧受力比河侧大。导致靠山侧混凝土承受的轴向力大于其抗压强度值而压碎破坏。	两个模型中靠山边墙均出现大量的环向裂缝且向上延伸至拱部,说明其受到了较大的滑坡推力作用。林场模型中左边墙发生倾斜并伴有抬升和错台,说明犹如薄壁箱梁的隧道,在推力作用下向河侧弯曲和移动,导致左边墙向河侧倾斜,产生不规则抬升和错台。这一现象在狗磨湾模型也出现了。
轴向		两个模型中在隧道纵向上均出现了弯曲变形,隧道整体向河侧移动,山侧边墙出现横向张裂缝,并随隧道移动。说明滑坡体内的隧道在线路轴向上,可作为梁式结构在其纵向上承受滑坡推力,上侧面受滑坡推力的作用,下侧面受滑坡剩余抗滑力作用。由于滑坡中轴附近推力一般较两侧大,所以隧道中部受力较两侧大,弯矩也较大。	右(河)侧边墙在林场模型中出现了少量的环向裂缝,由于右侧滑坡体已经滑动对其的围岩压力减小,导致隧道右侧无支撑,加大了隧道的弯曲变形,使环向裂缝扩展。

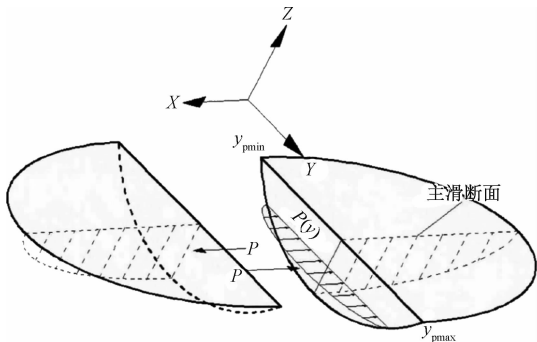


图 6 滑坡推力空间分布图

Fig. 6 The distribution of landslide thrust on three dimensional space

$$q_z = \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3}z + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3}p_i \quad (2)$$

式中: h_1 ——与隧道接触条块的高度;
 p_i ——传递系数法计算条块作用于隧道的滑坡推力合力;
 z ——从地面到滑面的条块竖向位置的高度;
 kh_2 ——滑坡合力作用点距滑面的距离。

为了与围岩压力进行叠加,将其沿水平方向和竖直方向分解,见图 7(b)。

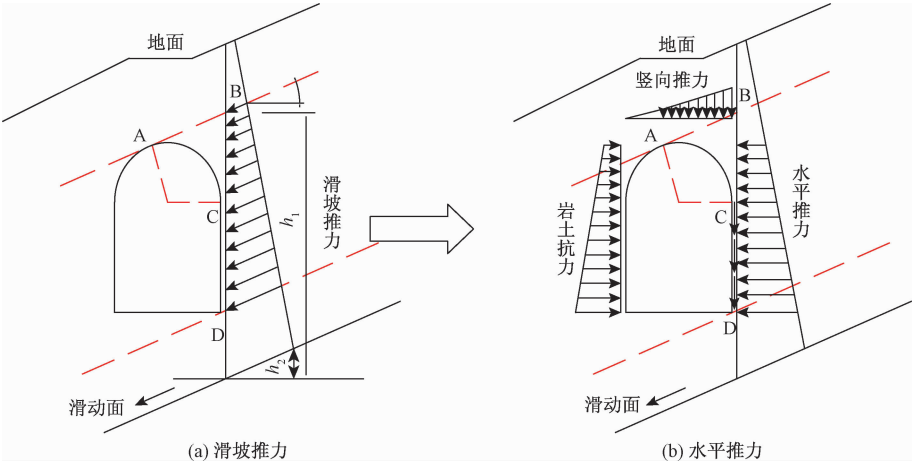


图 7 作用于隧道上的滑坡推力分解图

Fig. 7 The decomposition diagram of landslide thrust on tunnel

3 滑坡中隧道荷载计算方法

3.1 隧道横向荷载的分布和计算方法

(1) 拱部结构

将作用于拱脚到 B 点的滑坡推力水平方向分解为:

$$q_{h1} = q_z \cos\beta = \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3} z \cos\beta + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} p_i \cos\beta \quad (3)$$

竖直方向分解为:

$$q_{v1} = q_z \sin\beta = \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3} z \sin\beta + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} p_i \sin\beta \quad (4)$$

则作用于拱部的合力 ($0 \leq z \leq h_{BC}$)

水平方向:

$$q_h = q_{h右} + q_{h1} = \gamma h_i \lambda + \frac{[12kh_2 - 6(h_1 + h_2)]Pi}{(h_2 - h_1)^3} Z \sin\beta + \frac{Pi(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]Pi(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} P_i \sin\beta \quad (5)$$

竖直方向:

$$q_v = q_{pv} + q_{v1} = \frac{\gamma}{2} [(h + h')B - (\lambda h^2 + \lambda' h'^2) \tan\theta] + \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3} z \sin\beta + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} p_i \sin\beta \quad (6)$$

式中: $q_{h右}$ ——靠山侧边墙隧道围岩压力,可参照文献 15 选取;

q_{pv} ——隧道拱部围岩压力,可参照文献 15 选取;

β ——滑面倾角;

h', h ——分别为内、外侧由拱顶水平至地面的高度(m);

B ——坑道跨度(m);

γ ——围岩重度(kN/m^3);

θ ——顶板土柱两侧摩擦角($^\circ$);

λ, λ' ——内外、侧的侧压力系数;

Z ——地面到隧道边墙位置的垂直高度;

h_i ——分别为内、外侧任一点 i 至地面的距离(m)。

当滑坡推力作用于拱部时,除了受直接接触拱部

的推力外,还受到未接触推力的影响,同时隧道开挖会导致围岩应力松弛,产生塑性区,因此以上求出的拱部竖向荷载需要修正(图 8、图 9)。

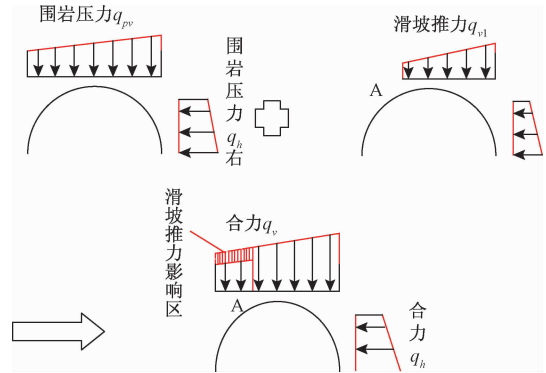


图 8 拱部合力计算图示

Fig. 8 Calculation diagram of resultant force acting on tunnel arch

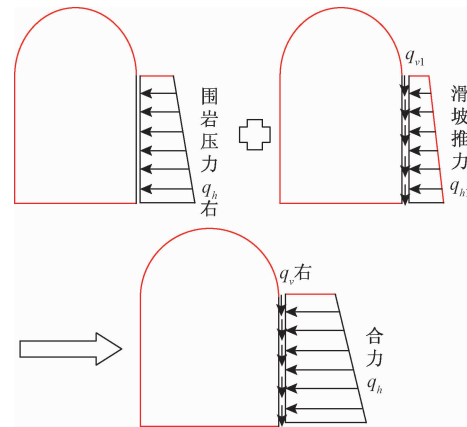


图 9 右边墙合力计算图示

Fig. 9 The force calculation diagram acting on the right wall of tunnel

(2) 右边墙(靠山侧)结构

将作用于右边墙底部到拱脚的滑坡推力在水平方向和竖直方向进行分解。

可得水平方向滑坡推力: ($h_{BC} \leq z \leq h_{CD}$)

$$q_{v1} = q_z \sin\beta = \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3} z \sin\beta + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} p_i \sin\beta \quad (7)$$

竖直方向的推力:

$$q_{h1} = q_z \cos\beta = \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3} z \cos\beta + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} p_i \cos\beta \quad (8)$$

则作用于右边墙的合力:

水平方向:

$$q_h = q_{h右} + q_{h1} = \gamma h_i \lambda + \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3} z \cos\beta + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} p_i \cos\beta \quad (9)$$

竖直方向:

$$q_{v右} = q_{v1} = \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3} z \sin\beta + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} p_i \sin\beta \quad (10)$$

(3) 左边墙结构

隧道在滑坡推力作用下,产生向左的变形,导致左边墙挤压岩土体。左侧岩土体对边墙产生岩土抗力,如果隧道前部滑体随着坡体蠕动而发生滑动时,则滑体对隧道的岩土抗力可忽略不计。反之,为了设计的安全考虑,则左边墙的滑体抗力取隧道前部滑体剩余抗滑力。前部滑体剩余抗滑力合力可通过滑坡设计的传递系数法求得,沿隧道左半部分的荷载分布表达式与右边墙一致,为:

$$q'_z = \frac{[12kh_2 - 6(h_2 + h_1)]p_i}{(h_2 - h_1)^3} z + \frac{p_i(h_2 - h_1)^2 - [6kh_2 - 3(h_2 + h_1)]p_i(h_2 + h_1)}{(h_2 - h_1)^3} p_i \quad (11)$$

(4) 总结

由图 10 知隧道横向荷载靠山侧明显比靠河侧大,导致靠山侧边墙和拱部破坏比河侧严重,与地质模型中隧道的变形特征完全相同。

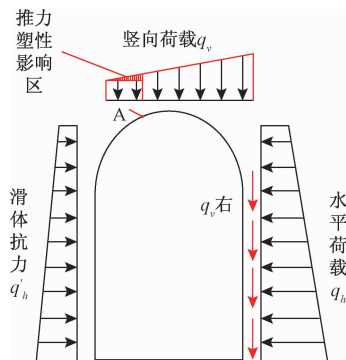


图 10 隧道位于滑体内时受力示意图

Fig. 10 Schematic diagram of force acting on a tunnel in a sliding body

3.2 隧道轴向荷载的分布和计算方法

隧道轴向受围岩压力和滑坡推力的作用,滑坡推

力呈中间大两边小分布,其大小用 $p(y)$ 表示(图 11);围岩压力只与深度有关,而隧道垂直滑动面,所以沿隧道轴向围岩压力不变,则偏压隧道的荷载分布为:

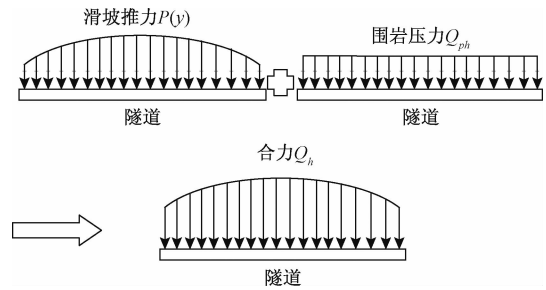


图 11 隧道轴向受力示意图

Fig. 11 The schematic diagram of the axial force acting on the tunnel in the sliding body

$$Q_{ph右} = \int_h^{h+H} \lambda h_i \gamma dh_i \quad (12)$$

则隧道靠山侧边墙所受的合力:

$$Q_h = p(y) + Q_{ph} = p_0 \lambda(y) + \int_h^{h+H} \lambda h_i \gamma dh_i \quad (13)$$

式中: $\lambda(y)$ ——滑坡推力沿隧道轴向的分布函数;

h ——为靠山侧侧拱顶水平至地面的高度(m);

H ——隧道的高度(m);

γ ——围岩重度(kN/m^3)。

4 结论

(1) 位于滑坡体内的隧道在滑坡推力作用下轴向发生弯曲变形,靠山侧边墙首先发生破坏,不断延伸至拱部,导致隧道整体破坏。

(2) 滑坡体内的隧道的工程地质模型为梁式结构在其纵向上承受滑坡推力作用,下侧面受滑坡剩余抗滑力作用。

(3) 位于滑坡体内的隧道轴向受滑坡推力和围岩压力作用,大小呈抛物线形式,中间截面为控制截面,隧道设计时以此截面进行设计。横向其靠山侧边墙和拱部受力比另一侧大,呈梯形分布。隧道设计时以靠山侧荷载进行衬砌设计,可保证设计结构的安全。

为了将滑坡推力纳入铁路隧道设计规范中,对隧道-滑坡平行体系、正交体系、斜交体系还需要进行大量的研究,其中具有通用性的斜交体系的研究最为重要。

参考文献:

- [1] 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.
MA Huimin. Slope disease and tunnel deformation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2003, 22 (S2): 2719 - 2724.
- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 (S2): 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.
- [8] 朱苦竹, 朱合华. 滑坡与隧道相互作用机理实例分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2 (5): 809 - 812.
- ZHU Kuzhu, ZHU Hehua. Analysis of the interaction mechanism of landslides and tunnels [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2 (5): 809 - 812.
- [9] 王建秀, 朱合华, 唐益群, 等. 连拱隧道 - 边坡耦合作用: 连拱隧道滑坡[J]. 土木工程学报, 2010 (1): 103 - 107.
- WANG Jianxiu, ZHU Hehua, TANG Yiqun, et al. Coupled arch tunnel-slope coupling effect [J]. Civil Engineering Journal, 2010 (1): 103 - 107.
- [10] 范建海, 张涛, 郭刚, 等. 李师关隧道洞口滑坡发生机理与防治措施研究[C]// 深部岩石工程与岩土灾害防治测试新技术与应用研讨会, 2006: 1445 - 1450.
- FAN Jianhai, ZHANG Tao, GUO Gang, et al. Study on the occurrence mechanism and prevention measures of Li Shiguan tunnel portal landslide [C]// Deep Rock Engineering and Geotechnical Disaster Prevention and Control Test New Technology and Application Symposium, 2006: 1445 - 1450.
- [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] 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]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- Zhang Liang. Study on the interaction of landslide and tunnel structure under the condition of sliding and axis skew [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [13] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (4): 517 - 521.
- DAI Zihang. Anti slide pile and landslide thrust slip of the resistance distribution [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (4): 517 - 521.
- [14] 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 (S1): 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.
- [15] 铁道部, TB1003-2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- Ministry of Railways, TB1003-2016 Code for design of railway tunnels [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.