

必用功隧道下穿古滑坡体最小安全净距分析

漆 江

国家林业和草原局西南调查规划院 云南昆明 650216

【摘 要】本文深入研究了G214线隔德公路上必用功隧道下穿古滑坡体的最小安全净距问题。利用有限元分析软件，建立了隧道洞顶距滑动面净距分别为4D、3D、2D、1D穿越古滑坡体的模型，并进行了详细的计算和分析。研究结果显示，拱顶受滑坡体的影响最大。当拱顶距滑动面的净距为2.5D时，变形量达到最小值，而当净距大于3D时，净距对应力的影响减小。这些发现对于隧道穿越古滑坡体的可行性、安全性和经济性具有直接影响。本文的研究成果对于隧道穿越古滑坡体的安全问题具有一定的理论和实践意义，对于保障隧道建设的安全和稳定性具有重要意义。

【关键词】隧道工程；隧道设计；有限元计算；隧道下穿滑坡；正交体系

随着我国基础设施建设的快速发展，特别是在山区等复杂地形条件下，隧道工程经常不可避免地需要穿越滑坡区域。隧道下穿滑坡体时，其稳定性受到多种因素的影响，其中隧道与滑面的最小净距是关键因素之一。本文通过理论分析、数值计算，研究了隧道下穿滑坡体最小净距的确定方法，并提出了相应的计算模型和设计建议。这对于确保隧道施工和运营的安全、降低工程风险具有重要意义。同时，研究结果对于类似工程的设计和施工也具有较高的参考价值。

在隧道与滑坡体的相互作用机理方面，国内学者进行了大量研究，主要集中在隧道穿越滑坡体的受力特征、破坏机理等方面。这些研究揭示了隧道开挖对滑坡稳定性的影响，以及滑坡变形对隧道结构的反作用。吴红刚^[1]等主要探讨了隧道下穿滑坡时的附加荷载计算方法。高超^[2]系统研究了隧道下穿滑坡体的力学行为和稳定性。李尚^[3]探讨了黄土滑坡体对正交下穿隧道的变形影响。孙浩^[4]等揭示了隧道正交下穿滑体滑坡的破坏模式。牌立芳^[5-6]等系统性研究了滑坡与隧道的相互作用模式和变形特征。李建旺^[7]等揭示了隧道下穿采空区施工时围岩破裂孕育演化规律。

云南省G214线隔德公路项目中必用功隧道下穿必用功古滑坡的情况，可以作为隧道—滑坡正交体系最小安全净距分析的一个典型案例。在实际工程中，设计者确实需要快速确定设计参数，而可靠的经验参数可以在一定程度上简化这一过程。

1 古滑坡体概况

必用功古滑坡位于澜沧江左岸必用功西侧，滑坡体长约1500m，前缘宽约600m，平均厚度约50m。植被不发育，前缘较陡，发育小型崩塌。前缘有地下水外露。滑坡体积约 $2600 \times 10^4 \text{m}^3$ ，巨型滑坡，天然状态下处于基本稳定状态。

滑坡区地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。滑体厚度20~123m，局部见块石。滑面物质以砂质粘土含砾石为主，厚度2~3m。滑床为强风化泥岩夹砂岩，砂泥质结构，碎裂状构造，节理裂隙极发育、岩体极

破碎。按滑坡物质和结构因素属坡积、冰水沉积层滑坡，按运动形式属于牵引—推动复合式滑坡（如图1）。路线经滑坡中后部以隧道方式下穿滑坡体。

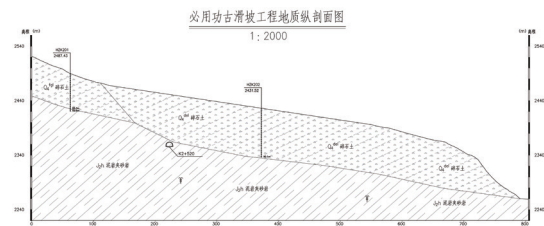


图1 必用功古滑坡工程地质纵断面图

2 三维有限元模型

2.1 模型参数

表1 地层材料参数

名称	泥岩夹砂岩（滑床）	碎石土（滑体）
材料特性	各向同性	各向同性
模型类型	摩尔-库伦	摩尔-库伦
弹性模量/（ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ）	200000	50000
泊松比	0.25	0.3
容重/（ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ）	25	18
黏聚力/（ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ）	20	5
摩擦角/（ $^{\circ}$ ）	35	30

表2 结构材料参数

名称	喷射混凝土	锚杆
材料特性	各向同性	各向同性
模型类型	弹性	弹性
弹性模量/（ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ）	230000	200000
泊松比	0.2	0.3
容重/（ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ）	22	78.5

2.2 模型建立

使用Midas GTS NX软件建立隧道—滑坡正交体系的三维有限元模型。模型纵向长度为10米，考虑的埋深为70米，底部边界和侧向边界的大小为4倍的洞身直径（D），模型底部和水平面施加约束，上表面为自由面。

分别建立四个模型，每个模型的隧道洞顶距离滑动面的净距为4D、3D、2D、1D。（其中D代表隧道洞身直径。）

2.3 计算工况

开挖进尺为1m，按实际开挖布设施工阶段，初始应力按自重考虑，不考虑水压力、温度场及地震。

2.4 分析目标

1. 分析在不同净距条件下，隧道和滑坡体的应力、位移等力学响应。

2. 研究隧道开挖对滑坡体稳定性的影响。

3. 探讨不同净距条件下隧道与滑坡体的相互作用机理。

2.5 研究内容

1. 分析不同净距条件下隧道和滑坡体的应力分布。

2. 研究不同净距条件下隧道和滑坡体的位移分布。

3. 探讨不同净距条件下隧道和滑坡体的变形规律。

4. 分析不同净距条件下隧道和滑坡体的稳定性。

2.6 预期成果

1. 确定隧道洞顶距离滑动面的最优净距。

2. 提出隧道下穿滑坡体的设计计算方法。

3. 为类似工程提供理论指导和设计参考。

3 结果分析

3.1 变形分析

隧道掘进初期拱顶和边墙的变形量保持较大速率增长，这是由于隧道开挖过程中围岩应力重分布，导致围岩产生较大变形。初期支护的施作可以有效控制围岩的变形，使其逐渐趋于稳定。

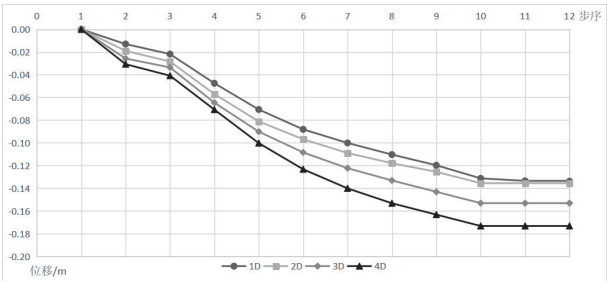


图2 拱顶变形随开挖进度变化图

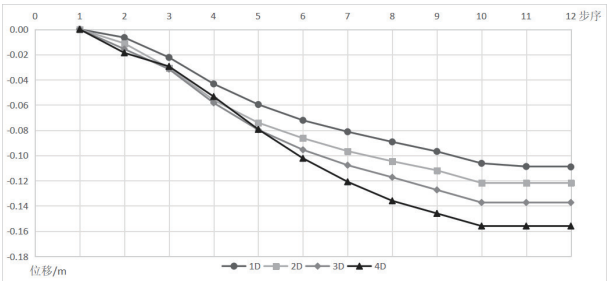


图3 边墙变形随开挖进度变化图

如图2、图3，可以看出，随着净距的增加，隧道拱顶和边墙的最大变形量逐渐增大。这是因为随着净距的增加，隧道与滑坡体的相互作用力逐渐增大，导致围岩变形增大。

隧道与滑动面不同净距的变形云图(如图4)显示了隧道在开挖过程中拱顶和边墙的变形情况。拱顶变形总体较边墙

变形受滑体影响较大，这是因为隧道开挖过程中，滑坡体的下滑力主要作用于拱顶处，从而导致拱顶处的变形量较大。

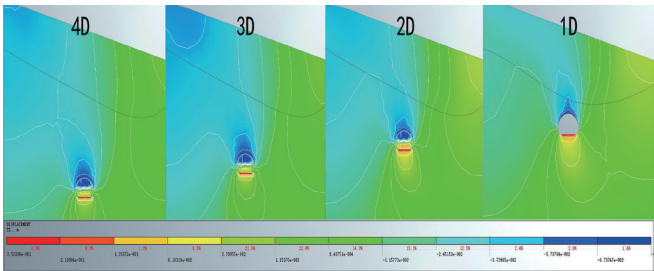


图4 不同净距下变形量云图

边墙处的变形随净距的减小而逐渐增大，这表明边墙处受到滑坡体的影响随着净距的减小而增大。净距越小，隧道与滑坡体的相互作用力越大，导致边墙处的变形量增大。

拱顶处的变形随净距的变化呈抛物线型变化(如图5)，约2.5D处达到最小变形量0.11m，这是因为在净距约为2.5D时，隧道与滑坡体的相互作用力达到一个平衡状态，使得拱顶处的变形量最小。当净距小于2.5D时，隧道与滑坡体的相互作用力过大，导致拱顶处的变形量增大；当净距大于2.5D时，隧道与滑坡体的相互作用力减小，导致拱顶处的变形量增大。

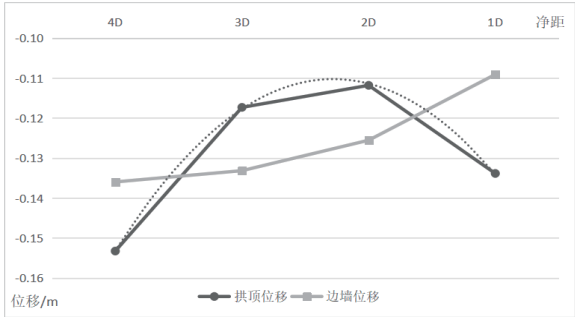


图5 不同净距下变形量变化图

3.2 应力分析

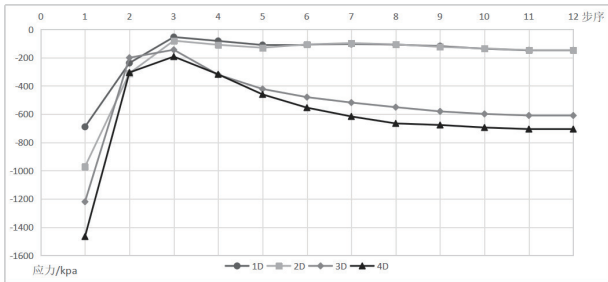


图6 拱顶应力随开挖进度变化图

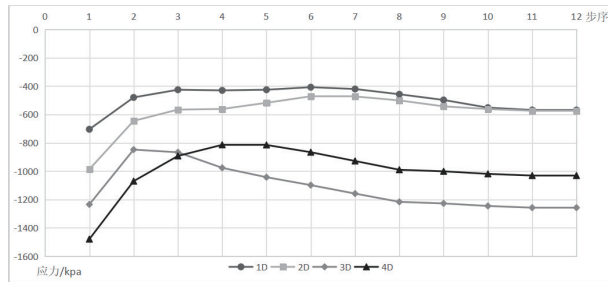


图7 边墙应力随开挖进度变化图

隧道掘进过程中拱顶和边墙处的应力随隧道掘进总体上逐渐减小,这可能是因为隧道开挖过程中围岩应力重分布,导致围岩产生应力释放。初期支护的施作可以有效控制围岩的应力,使其逐渐趋于稳定。

如图6、图7在不同净距条件下,隧道拱顶和边墙的最大应力如下:

净距为1D时,拱顶最大应力为149kpa,边墙最大应力为569kpa。

净距为2D时,拱顶最大应力为147kpa,边墙最大应力为574kpa。

净距为3D时,拱顶最大应力为610kpa,边墙最大应力为1258kpa。

净距为4D时,拱顶最大应力为706kpa,边墙最大应力为1031kpa。

从上述数据可以看出,随着净距的增加,隧道拱顶和边墙的最大应力逐渐增大。这是因为随着净距的增加,隧道与滑坡体的相互作用力逐渐增大,导致围岩应力增大。

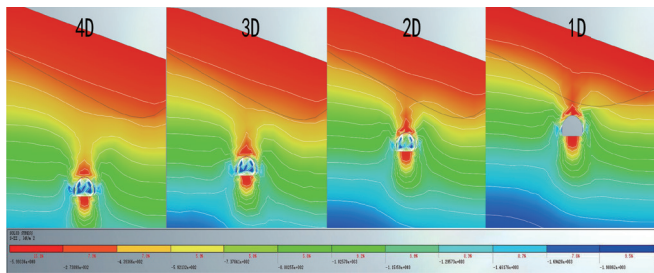


图8 不同净距下应力云图

隧道与滑动面不同净距的应力云图(如图8)显示了隧道在开挖过程中拱顶和边墙的应力分布情况。拱顶与边墙处的应力分布趋势相同,这意味着在隧道开挖过程中,拱顶和边墙的应力变化趋势是相似的。

拱顶受滑体的影响较边墙大,这可能是因为隧道开挖过程中,滑坡体的下滑力主要作用于拱顶处,从而导致拱顶处的应力较大。当这些应力达到抗压强度时,拱部首先可能发生破坏。

在净距小于3D时(如图9),应力随净距的增大而逐渐增大。这表明在这个范围内,随着净距的减小,隧道与滑坡体的相互作用力增大,导致围岩应力增大。

当净距大于3D时,净距对应力的影响变小。这表明在这

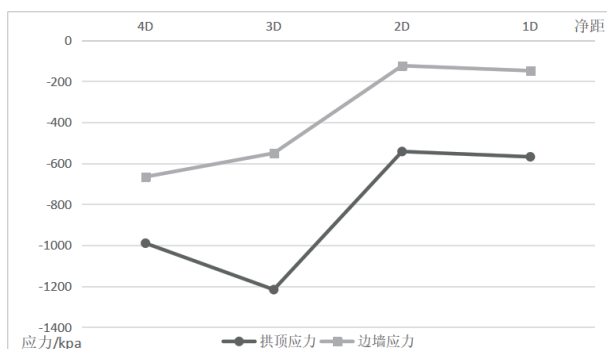


图9 不同净距下应力变化图

个范围内,随着净距的增大,隧道与滑坡体的相互作用力减小,导致围岩应力减小。

4 结论

本文以云南省G214线隔德公路上的必用功隧道为例,对隧道-滑坡正交体系中最小安全净距进行了分析和研究。通过有限元软件计算方法,研究了不同净距下隧道下穿滑坡体的力学响应。主要结论如下:

1. 拱顶受滑坡体影响最大:在隧道下穿滑坡体的情况下,拱顶处的受力特征最为显著,因此在设计时应特别注意拱顶的支护措施,以增强其稳定性。

2. 拱顶距滑动面的净距在2.5D时,变形量最小:研究结果表明,当隧道拱顶距离滑动面的净距为2.5倍隧道直径时,拱顶的变形量达到最小。这一发现对于确定安全距离和控制隧道标高具有重要意义。当净距大于3D时,净距对应力的影响减小,说明在一定的安全距离范围内,净距的增加对减小拱顶应力影响有限。

3. 初期支护的重要性:初期支护的及时施作能够有效减缓隧道初期开挖后的变形速率,对于控制隧道初期变形和保证施工安全至关重要。

综上所述,本文的研究结果为类似工程的设计和施工提供了重要的参考,特别是在确定隧道与滑坡体的最小安全净距方面,为保证工程的安全性和经济性提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 吴红刚,赵金,李玉瑞,陈小云.隧道下穿滑坡附加荷载计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S2):4375-4383.
- [2] 高超.隧道下穿滑坡体力学行为及稳定性演化规律研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2021.
- [3] 李尚.黄土滑坡体对其正交下穿隧道的变形影响分析[J].工程机械与维修,2023,(05):213-216.
- [4] 孙浩,曹生慧,吴红刚,张克宏,黄新宇.基于希尔伯特边缘谱理论的含隧道滑坡震动破坏模式研究——以隧道正交下穿主滑方向滑体为例[J].隧道建设(中英),2023,43(S1):257-270.
- [5] 牌立芳.高烈度地震区隧道下穿滑坡体系灾变演化机制与控制技术研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2022.
- [6] 牌立芳,吴红刚.地震作用隧道正交下穿滑坡体衬砌结构的动力响应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(05):979-994.
- [7] 李建旺,冯仕文,周喻.隧道下穿采空区施工围岩灾变演化的力学机制[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(02):543-554.

作者简介:

漆江,男,工程师,主要从事公路隧道设计工作。