

企业应用

# 地下开挖条件下高陡边坡的变形破坏机制

——以郭塘隧道为例

王璐石<sup>1</sup>, 钱均益<sup>1</sup>, 孙瑞峰<sup>2</sup>, 管凯歌<sup>3</sup>

(1. 中铁城市发展投资集团有限公司, 成都 610213; 2. 中铁十七局集团城市建设有限公司, 贵州 遵义 564512;  
3. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 05004)

**摘要:**为研究地下开挖条件下高陡边坡的变形破坏机制,以某覆盖型高陡边坡为依托,利用有限元滑面应力法对比分析了隧道开挖的不同位置对边坡稳定性的影响,系统研究了地下开挖诱发边坡失稳的破坏机制及变形特征。结果表明,地下开挖破坏了边坡原有的平衡体系,导致开挖影响范围内坡体的应力出现重新分布,在边坡的不同区域产生新的张拉应力区、压应力区和剪应力区,使边坡表面和内部各点产生不利的附加位移,从而对边坡的稳定性产生显著的影响。根据地下开挖孔洞与滑动面之间的位置关系,可把地下开挖诱发边坡失稳的破坏方式分为坡面局部坍塌、坡体A型滑移、坡体B型滑移和坡体C型滑移共4种类型,并揭示了各种失稳类型的破坏过程与力学机制。

**关键词:**地下开挖; 稳定性分析; 变形机制; 边坡失稳; 边坡支护

**中图分类号:** TU472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)14-0189-08

岩土工程领域经常遇到由于地下开挖而使稳定性受到严重影响的边坡,比如地形偏压隧道穿越的傍山边坡、露天矿转地采的采动边坡等。随着社会经济的发展和西部大开发战略的实施,中国将有越来越多的铁路、公路等大型工程在西部高山区进行建设,但由于其地形地貌条件复杂,工程施工难度大,给国民经济建设和社会发展造成重大损失,因此,开展此类边坡的变形破坏机理和稳定性研究具有重大的现实意义。

地下开挖诱发边坡失稳是一个由来已久的工程难题,国内外不少学者和工程师们取得了一定的研究成果。尹光志<sup>[1]</sup>采用底摩擦模型试验方法研究不同坡高、不同顶柱厚度开挖情况下的边坡破坏,结果表明,边坡变形破坏模式主要是采动边坡岩体向采空的拉裂、破断和滑移,最终形成坡面坍塌。任高峰<sup>[2]</sup>将现场位移监测和数值模拟相结合发现顺坡开采时,上部岩体以采空沉陷为主,逆坡开采时,上部岩体以沿坡向的滑移为主。苟永平等<sup>[3]</sup>通过FLAC3D有限差分软件研究了优势节理影响下的隧道开挖边坡的响应机制,模拟结果与检测结果一

致。崔正宇<sup>[4]</sup>通过数值模拟和模型试验等手段研究隧道碎石土洞口开挖对边坡稳定性的影响,分析了边坡的变形失稳模式并揭示了开挖洞口与边坡稳定性的相互作用机理关系。陶志刚等<sup>[5]</sup>通过物理模型试验发现隧道开挖会形成大范围的松动圈和临空面,极易在地下水作用下发生涌水现象,进而诱发边坡发生局部滑塌。向安田等<sup>[6]</sup>通过数值模拟分析发现,塑性区和应力集中主要发生在开挖区附近,引起的附加垂直位移后缘大、前缘小,与圆弧型剪切滑移边坡的位移模式很吻合。邵珠山等<sup>[7]</sup>、肖金科<sup>[8]</sup>、刘晓红等<sup>[9]</sup>、刘墩利<sup>[10]</sup>、李宗鸿等<sup>[11]</sup>均通过数值模拟研究隧道开挖对边坡稳定性的影响,并提出合适的边坡支护方式,为相关边坡工程的设计、施工和治理提供了理论依据。

目前国内外许多学者通过现场监测、数值模拟和物理模型试验等方法对各种不同条件下受地下开挖影响的边坡进行相关研究,分析多种边坡失稳方式的变形破坏规律,取得了一定的研究成果,但并未系统厘清地下开挖影响下边坡失稳模式的分类及其对应的失稳机制,缺乏对地下开挖影响边坡

**收稿日期:** 2024-10-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(51709176)

**作者简介:** 王璐石(1988—),男,四川巴中人,硕士,工程师,研究方向为隧道岩体稳定性分析及加固;钱均益(1995—),男,河北定州人,工程师,研究方向为地下工程施工技术;通信作者孙瑞峰(1984—),男,内蒙古清水河人,高级工程师,研究方向为岩土工程地质灾害防控方面的研究工作;管凯歌(1998—),男,湖北荆州人,硕士,硕士研究生,研究方向为边坡稳定性分析。

稳定性机理的一般性认识<sup>[12-14]</sup>,同时由于不同研究者采用的研究对象及方法存在差异,导致对同一种破坏方式的失稳机理亦尚未取得一致的认识<sup>[15-17]</sup>。

本文以某覆盖型高陡边坡为研究对象,利用 Geostudio 数值模拟软件研究不同开挖位置的地下隧道开挖孔洞对边坡稳定性影响的规律,明确其对应的失稳力学机理,从而为该类型边坡可能诱发的地质灾害提供合理的预测分析依据。

## 1 隧道开挖数值模拟

### 1.1 算模型的建立

根据郭塘隧道覆盖型高陡边坡的结构特征和边界特征,通过 Geostudio 仿真软件建立二维数值模型(图 1)。边坡高为 363 m,长为 755 m,计划隧道开挖孔洞竖向距坡顶 300 m,隧道跨径最大值为 14 m,坡面横向和孔洞中心相距 12 m,计算单元采用四边形单元,模型经过网格划分后包括 6 422 个节点和 6 382 个单元,计算中岩土体采用理想弹塑性本构模型摩尔—库伦屈服准则计算。分析时在 SIGMA/W 模块中进行位移应力分析,再将分析得到的应力导入 SLOPE/W 模块中,采用有限元滑面应力法计算得到边坡的位移、塑性区等。

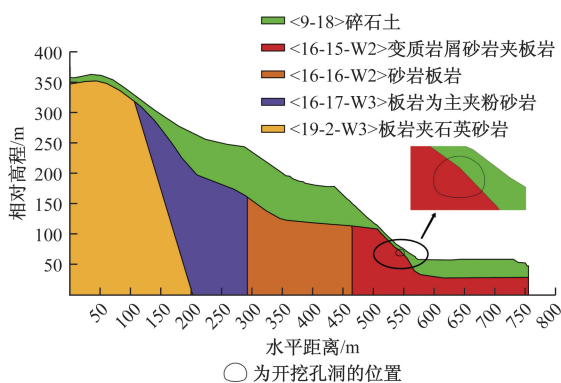


图 1 边坡数值模型

### 1.2 岩土体参数及边界条件

通过现场勘察和查阅相关资料,利用工程类比和数值反分析法确定本次数值分析所需的各岩土体物理力学参数如表 1 所示。边坡模型网格采用四角形和三角形混合的方式进行自动划分并加密。边坡岩土体采用理想弹塑性本构模型,遵循摩尔库伦—准则。模型的边界条件设置为:边坡模型左右边界分别施加 X 方向约束,底部施加 X 方向和 Y 方向约束。

## 2 计算结果分析

在保证洞顶距坡面竖向距离为 300 m 的基础上,为分析不同开挖位置对边坡稳定性的影响,研

究地下隧道开挖诱发滑坡的不同破坏机制,选取隧道孔洞横向距 12、26、38、54、66、82、106、124 m 8 个位置进行分析。不同水平位置的地下孔洞布置示意图(图 2)。通过对地下孔洞不同开挖位置的位移场、塑性区进行分析,共存在四种不同的失稳破坏模式:坡面局部坍塌、坡体 A 型滑移、坡体 B 型滑移和坡体 C 型滑移。分别对以上四种失稳破坏模式的表现形式、形成过程及力学机制进行分析。

表 1 各土层物理力学参数

岩土类型	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	泊松比	弹性模 量/kPa
碎石土	21	22	30	0.38	52 000
变质岩屑 砂岩夹板岩	25	590	55	0.38	2 578 000
砂岩板岩	25	630	55	0.25	1 856 000
板岩为主 夹粉砂岩	23	320	45	0.32	3 180 000
板岩夹石 英砂岩	26	450	50	0.33	1 637 000

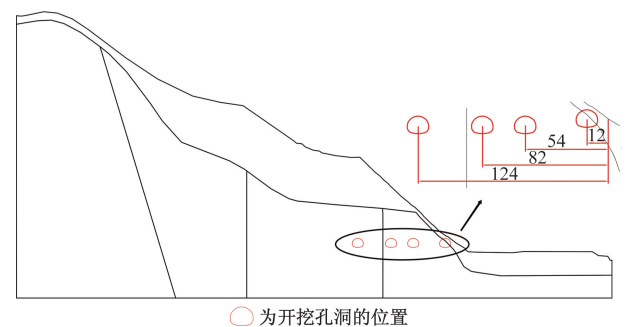


图 2 不同隧道开挖位置示意图

### 2.1 坡面局部坍塌型

坡面局部坍塌型的表现形式为边坡岩体的位移方向主要朝向地下开挖区,扰动岩体以坍塌破坏为主,直至破表。这是地下开挖孔洞远离边坡临空面的一种典型失稳破坏模式。以地下开挖孔洞距坡面水平距离为 124 m 为例,图 3 为地下开挖引起的塑性区,图 4 为位移等值线图,边坡最大水平位移约为 0.037 m,最大竖向沉降位移约为 0.066 m,最

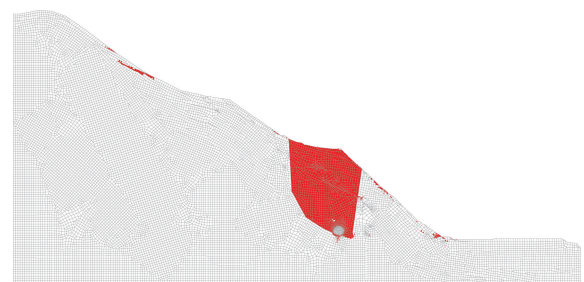


图 3 坡面局部崩塌边坡塑性区

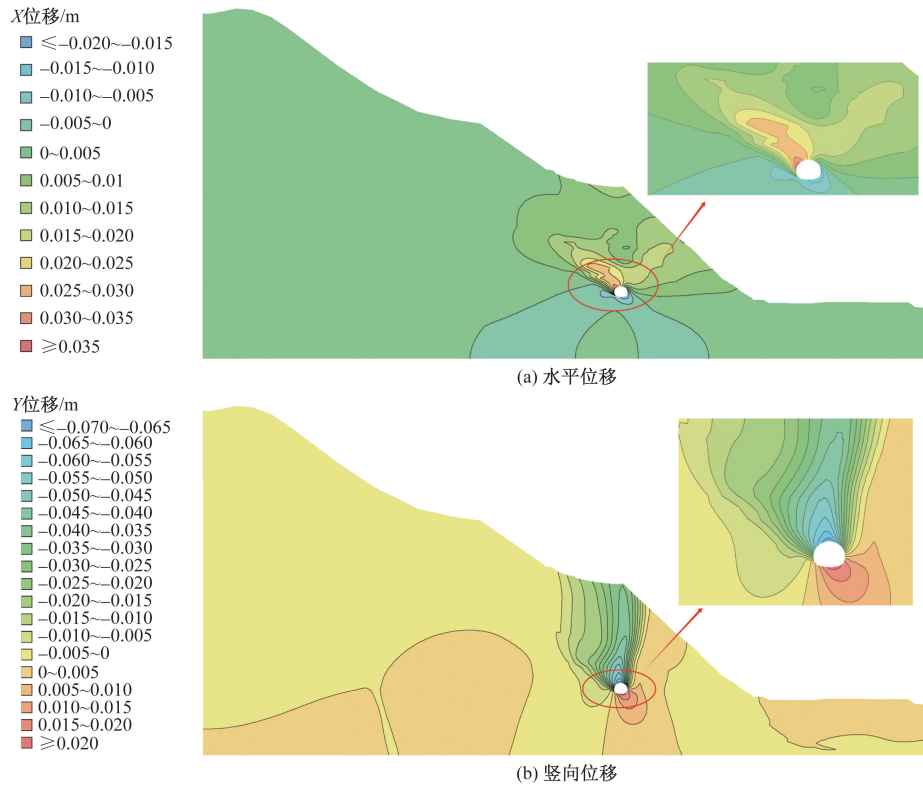


图4 坡面局部崩塌位移等值线

大位移发生在开挖洞顶上侧,边坡变形以下沉为主。由此可见,当隧道开挖孔洞距坡顶位置一定时,隧道开挖位置距坡面越远,隧道开挖对边坡的扰动影响越小。该种类型的失稳力学机制是,开挖孔洞上方岩体失去原有的支承作用,使孔洞上方局部岩体出现弯折破坏,引起弯折区以外的岩体向地下开挖区挤压移动,使扰动的岩体发生渐进式坍塌破坏直至贯穿坡体表面,最终在坡体表面形成一个非对称的塌陷盆地。产生坍塌型破坏的主要影响因素有特殊地质条件、开挖位置和方向、开挖孔洞顶部岩土体厚度等,显然顶部岩土体厚度是决定是否发生坡面局部坍塌的关键因素,一旦该厚度小于最小安全厚度,即会在边坡表面形成塌陷。

## 2.2 坡体 A 型滑移

坡体 A 型滑移的表现形式为地下开挖导致的边坡滑移面位于开挖孔洞的上部。以地下开挖孔洞距边坡临空面 82 m 为例,图 5 为地下开挖引起的塑性区分布,图 6 为该种开挖条件下的位移等值线。由图 6 可知,边坡最大水平位移达到 0.034 m;隧道洞顶土体发生竖向沉降,坡体最大竖向位移达到 0.077 m,隧道拱底发生向上隆起,最大隆起达到 0.012 m。从失稳机理来看,地下开挖使开挖孔洞

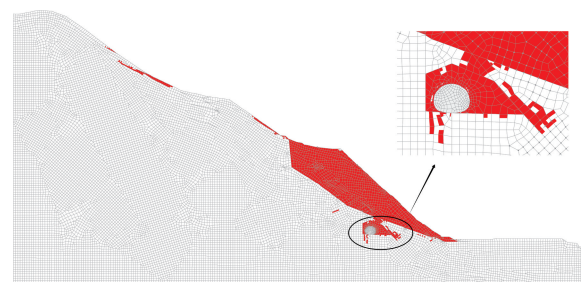


图5 坡体 A 型滑移边坡塑性区

周围出现大量的塑性破坏区域,并朝坡表延伸,从而使开挖区上部岩体的强度降低,增大发生滑坡的风险。另外,地下开挖引起的附加位移一般是边坡后缘大、前缘小,从而导致在坡体后缘先出现张拉裂缝,由于偏压作用导致的坡体下错趋势使边坡的下边界亦产生拉裂缝,裂缝贯通就会形成滑坡。从数值模拟结果来看,地下开挖诱发 A 型滑移失稳的开挖位置大多处于坡脚下部的一定范围内,由于坡脚失去了一定程度的支撑作用,诱使边坡顶部产生较大的附加位移,另外,边坡表面的地形亦会影响 A 型滑移失稳破坏,台阶状地形变形剧烈,易在各台阶表面处形成变形集中。

## 2.3 坡体 B 型滑移

坡体 B 型滑移的表现形式为地下开挖区下山

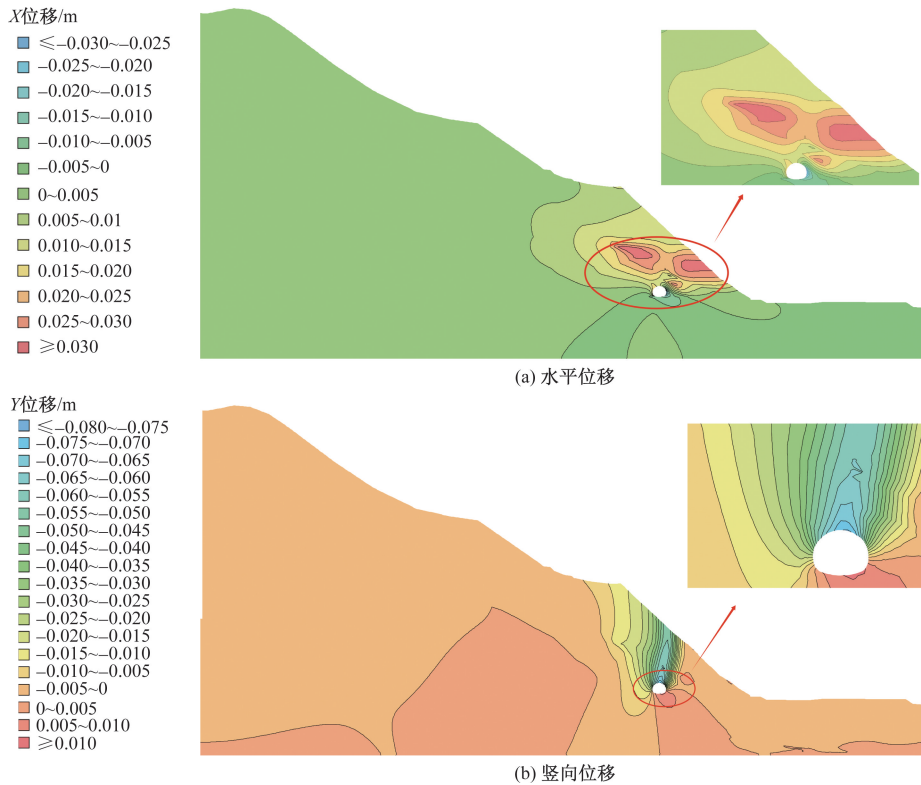


图 6 坡体 A 型滑移位移等值线图

方向的最大拉裂缝组成滑动面的后缘、地下开挖区上山方向的剪切裂缝组成滑动面的前缘,两种裂缝延伸至地下开挖区,从而形成贯通的滑动面。以地下开挖孔洞距离边坡临空面 54 m 为例,图 7 为地下开挖引起的塑性区分布,图 8 为该种开挖条件下的位移等值线。由图 7 和图 8 可知,坡体滑动面穿过地下开挖区,地下开挖形成的孔洞与滑动面相交,此外,开挖区上部岩土体在开挖作用下向右发生滑动,边坡最大水平位移达到 0.15 m;边坡最大沉降为 0.27 m,隧道孔洞拱底发生向上隆起,最大值隆起达到 0.084 m。由此可见,该种失稳模式的失稳力学机制是,地下开挖引起应力松弛导致开挖区顶部产生较大的沉降变形和侧向变形,从而导致开挖区上方的边坡岩体向下山侧方向移动,呈现明显的蠕滑-拉裂模式,由于边坡上部岩体的偏压作用,会对下山侧形成推挤作用,进而推动下面的坡体形成贯通裂缝,使坡体发生滑动。

### 2.4 坡体 C 型滑移

坡体 C 型滑移的表现形式为地下开挖导致边坡滑移面位于地下开挖区域的下部。以地下开挖孔洞距离边坡临空面 12 m 为例,图 9 为地下开挖引起的塑性区分布,图 10 为该种开挖条件下的位移等值线。由图 9 可知,随着开挖的进行,由于岩体破碎

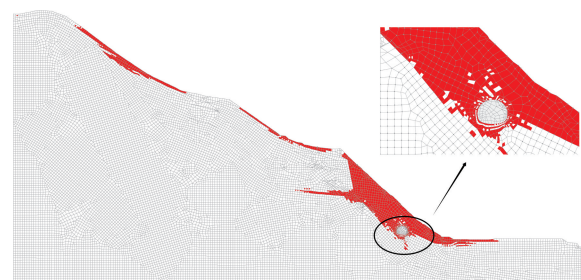


图 7 坡体 B 型滑移边坡塑性区



图 9 坡体 C 型滑移边坡塑性区

并且隧道埋深较浅,开挖扰动不仅使隧道产生塌方冒顶,同时切断开挖区净空的岩体,形成新的临空面,洞顶上部岩土体及边坡前缘有向右滑动的倾向,同时开挖区拱腰的右侧土体受到挤压作用向左发生剪切破坏,并在开挖区与边坡前缘之间形成一

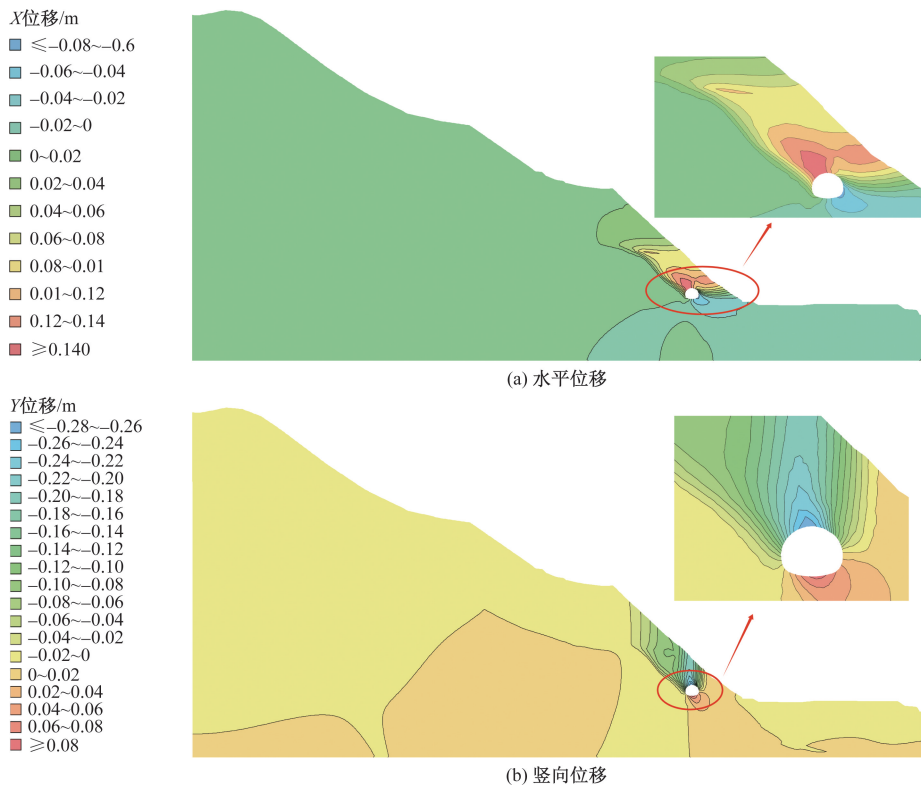


图 8 坡体 B 型滑移位移等值线

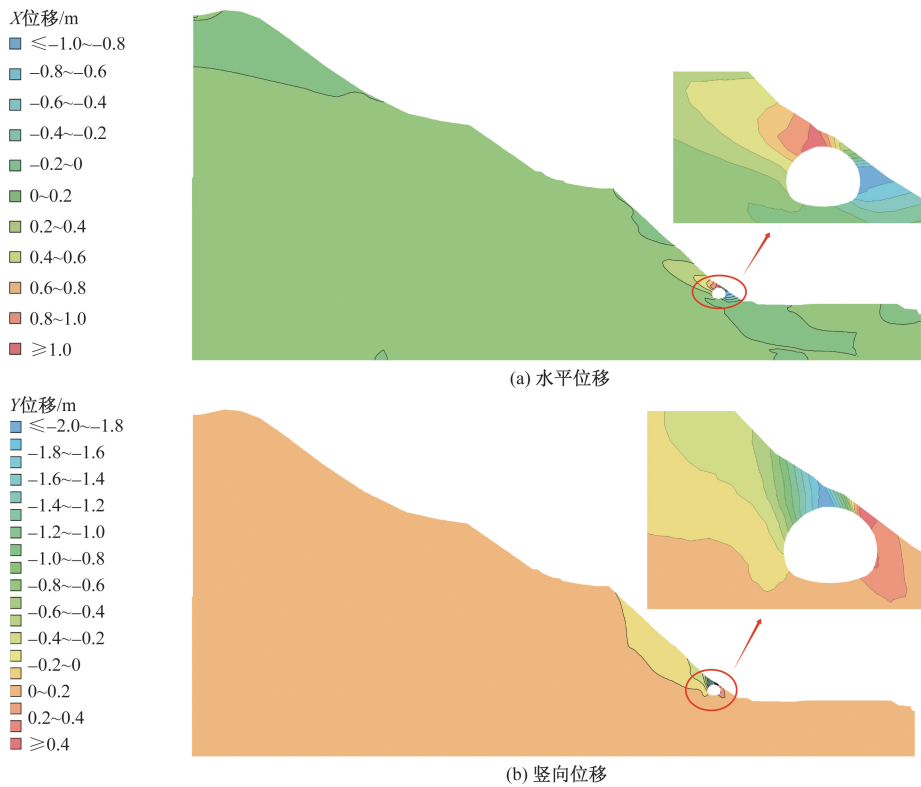


图 10 坡体 C 型滑移位移等值线

个滑动带。由图 10 可知,边坡最大水平位移发生在开挖区洞顶上部,靠近边坡一侧,达到 1.1 m,而洞顶上部岩土体发生沉降,最大竖向位移达到 1.85 m,孔洞右侧土体出现隆起变形,最大隆起量达到 0.47 m。在地下开挖作用下,开挖区发生弯曲变形,洞顶上部岩土体松弛变形,而塌方和冒顶的发生进一步扩大了松弛范围,导致边坡形成圆弧滑动面,边坡坡脚处出现大量塑性区域,开挖区随滑坡一起滑动发生破坏,诱发山体发生滑坡。

综上所述,根据地下开挖位置距离边坡临空面距离由远到近,可将地下开挖诱发边坡失稳分为四种破坏模式,依次是坡面局部坍塌、坡体 A 型滑移、坡体 B 型滑移和坡体 C 型滑移。四种模式的简化示意图如图 11 所示。

### 3 坡体 C 型滑移模式的加固支护方案

本文依托的隧道工程项目与坡面横向距离为 12 m,根据上述分析可知,隧道开挖区距离边坡临空面极近,潜在发生 C 型滑移模式。边坡的稳定安全系数为 0.847,说明此时边坡处于不稳定状态,因此边坡须进行支护加固设计,支护方案拟用锚索(杆)框架梁进行支护,框架梁内设置灌草护坡。锚索框架梁间距为 4 m,正方形布置,采用 C40 混凝土浇筑。锚索采用一孔 6 束  $\phi 15.2$  mm 高强度、低松弛钢绞线制作,单根长度从 20~60 m 不等,锚孔注浆采用 M35 水泥砂浆,并掺入 20% 水泥重量的粉煤灰,注浆压力不小于 0.4 MPa,为对锚索进行差异设计,锚索有两种规格:①设计锚固段长度为 12 m,锚固段直径  $\phi 130$  mm,每孔施加 100 kN 的预应力;②设计锚固段长 12 m,锚索钻孔直径  $\phi 110$  mm,每孔施加 100 kN 的预应力。

在 Geostudio 有限元软件中,锚索杆自由段采用结构杆进行模拟,而锚固段则采用结构梁模拟,其具体设计参数如表 2 所示,图 12 为边坡具体支护位置和锚索框架梁布设情况。

通过数值模拟计算,结果如图 13 所示,采用锚索框架梁支护边坡方案,边坡的位移得到显著的控制,边坡最大水平位移为 0.047 m,最大竖向沉降控制在 0.023 m 左右,位移主要集中在边坡的中下部,同时开挖洞顶上方岩土体出现小范围内的隆起,最大隆起量达到 0.007 m。相比图 10,边坡位移减小明显,位移呈均匀变化。此时边坡稳定安全系数为 1.34,达到规范要求标准,说明加固后的边坡处于稳定状态,锚索框架梁支护方案锚固效果显著,设计安全合理可行。

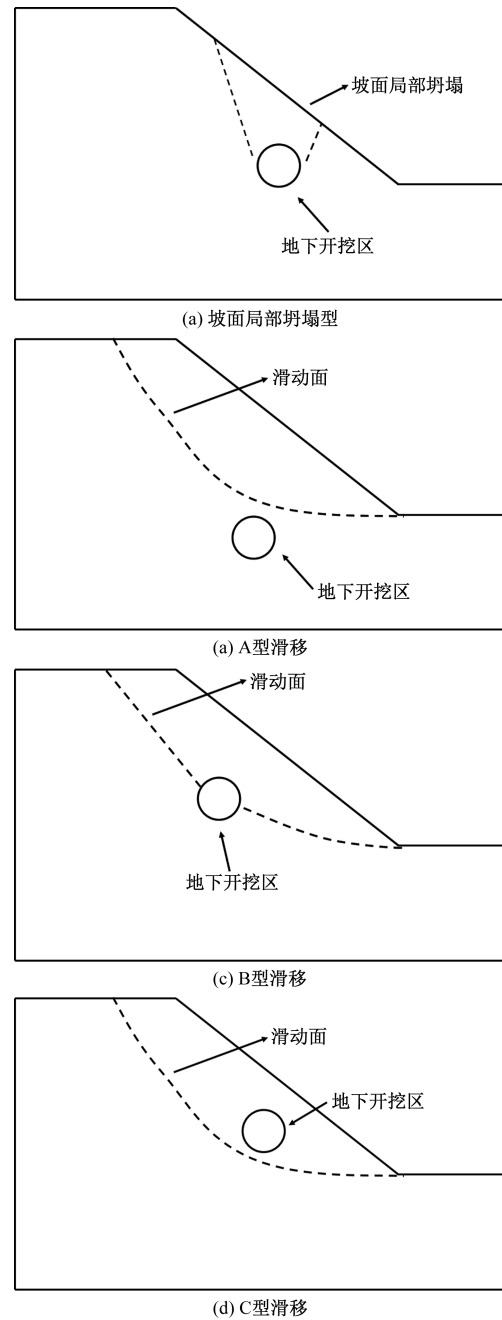


图 11 不同失稳破坏模式示意图

表 2 锚索框架梁设计参数

规格	锚固段长度/m	锚固段直径/mm	锚固段弹性模量/kPa	锚固段截面积/m <sup>2</sup>	锚固段惯性矩/m <sup>4</sup>	自由段弹性模量/kPa	自由段截面面积/m <sup>2</sup>
1	12	130	$2.9 \times 10^7$	0.013 3	$2.804 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^8$	0.000 508
2	10	110	$2.9 \times 10^7$	0.009 5	$1.437 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^8$	0.000 508

### 4 结论

本文以郭塘隧道覆盖型高陡边坡为依托建立二维数值模型,通过有限元滑面应力法研究不同地下开挖位置对边坡稳定性影响,归纳总结了覆盖型

高陡边坡在隧道开挖下的四种破坏机制,针对隧道开挖后的 C 型滑移失稳边坡选择合理的支护方案进行加固支护,确保边坡及隧道的稳定性。本文主要结论如下:

(1)根据地下开挖孔洞与边坡滑移面的位置,地下开挖诱发边坡失稳的破坏方式简单分为四类,即坡面局部坍塌、坡体 A 型滑移、坡体 B 型滑移和坡体 C 型滑移。

(2)坡面局部坍塌的失稳机理为隧道孔洞上方局部岩体出现弯折破坏,进而引起周围岩土体向地下开挖区挤压移动,使扰动的岩土体发生渐进式坍塌破坏直至贯穿坡体表面,从而造成大范围岩土体发生剪切破坏,边坡表面形成一个非对称的塌陷盆地。

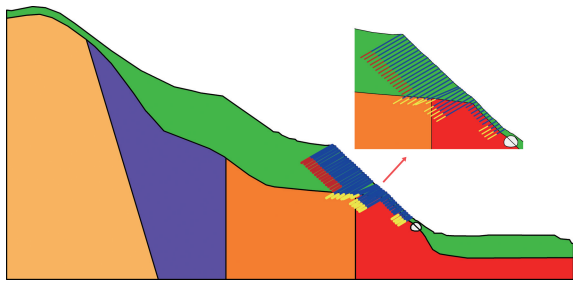


图 12 边坡支护位置示意图

(3)当地下开挖区在滑移面下部时,边坡的失稳模式为坡体 A 型滑移,其失稳机理为地下开挖区周围出现大量的塑性破坏区域,隧道洞顶上方岩土体应力松弛,土体强度降低,边坡下滑力增大,坡体出现张拉裂缝,裂缝贯通进而形成滑坡。

(4)当地下开挖区与滑移面相交时,边坡失稳模式为坡体 B 型滑移,其失稳机理为地下开挖引起的应力松弛导致隧道洞顶产生较大变形,开挖区上方土体向下滑移对坡脚处岩土体产生推挤作用引起剪切破坏,进而推动坡脚处岩土体形成贯通裂缝,坡脚失去一定的支撑作用,使坡体发生滑动。

(5)当地下开挖区在滑移面内部时,边坡失稳模式为坡体 C 型滑移,其失稳机理为开挖扰动使开挖区产生塌方冒顶,开挖区洞顶上部岩土体松弛变形,同时切断开挖区净空的岩体,形成新的临空面,边坡坡脚处出现大量塑性区域,开挖区随滑坡一起滑动发生滑移破坏。

(6)不同位置的地下开挖会对边坡造成不同程度的影响,当开挖孔洞距坡顶的位置一定时,开挖区横向距离坡面越近,地下开挖对边坡的影响越大。当开挖区靠近坡脚时,会对边坡稳定性造成巨大影响,应及时对边坡进行加固支护处理,锚索框架梁是一种合理有效可行的支护手段。

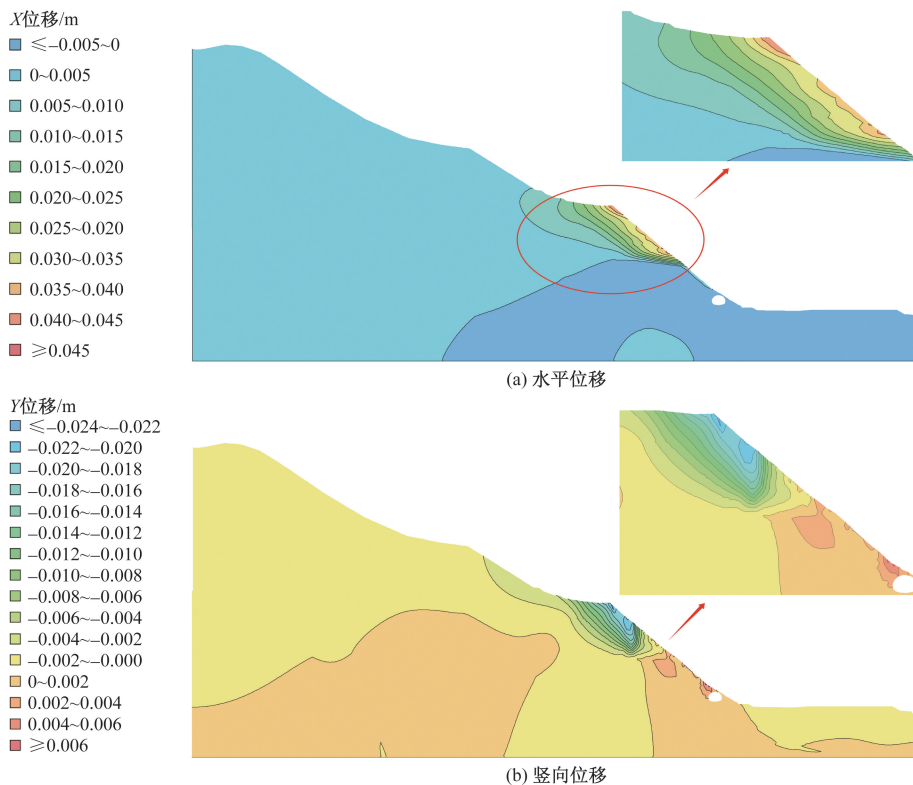


图 13 边坡支护后位移等值线

## 参考文献

- [1] 尹光志. 底摩擦模型模拟露天转地下开挖采空区影响下边坡变形破裂响应特征及其稳定性[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(3): 231-238.
- [2] 任高峰. 露井联合开采作用边坡损害机理及控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [3] 苟永平, 叶琼瑶, 韦立德, 等. 央达隧道掌子面前方边坡地表开裂研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 548-560.
- [4] 崔正宇. 隧道碎石土洞口开挖对边仰坡稳定性影响研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [5] 陶志刚, 张庆周, 杨晓杰, 等. 下穿隧道开挖对松散堆积边坡稳定性影响的物理模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 61-76.
- [6] 向安田, 朱合华, 丁文其, 等. 偏压连拱隧道洞口仰坡失稳机制的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 73-79.
- [7] 邵珠山, 崔枫, 李成龙, 等. 粉质黏土隧道边坡稳定性影响因素及处治技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 2055-2064.
- [8] 肖金科. 某浅埋隧道开挖对侧边坡稳定性影响分析[J]. 岩土工程与地下工程, 2020, 40(2): 140-141.
- [9] 刘晓红, 杨溢, 李得, 等. 基于隧道开挖对临近边坡稳定性的分析研究[J]. 中国水运, 2019, 19(3): 201-203.
- [10] 刘墩利. 隧道开挖对边坡稳定性的影响规律[J]. 铁道建筑, 2018, 58(7): 68-71.
- [11] 李宗鸿, 袁维, 王伟, 等. 陡倾顺层边坡地下开挖失稳模式分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5): 1988-1992.
- [12] 高亮, 张腾伍, 饶法强, 等. 公路高边坡灾变机理及滑动力响应规律分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(11): 4741-4749.
- [13] 张岩, 孙全帅, 徐书名, 等. 山区采动地表异常形变识别与损害原因[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 5775-5782.
- [14] 譙立家, 许万忠, 张黎明, 等. 采空区赋存状态对邻域边坡稳定性的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7): 2816-2822.
- [15] 黄润秋, 肖华波. 浅埋双连拱隧道围岩一边坡体系变形机理及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 384-591.
- [16] 黄锋, 李硕, 李思远, 等. 隧道爆破作用下堆积层边坡稳定性的耦合数值分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(26): 11111-11120.
- [17] 徐杨青, 吴西臣. 复合采动边坡变形机理及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 594-600.

## Deformation and Failure Mechanism of High and Steep Slope under Underground Excavation: Taking Guotang Tunnel as an Example

WANG Lushi<sup>1</sup>, QIAN Junyi<sup>1</sup>, SUN Ruifeng<sup>2</sup>, Guan Kaige<sup>3</sup>

(1. China Railway City Development and Investment Group Co. Ltd., Chengdu 610213, China;

2. China Railway 17th Bureau Group Urban Construction Co., Ltd., Zunyi 564512, Guizhou, China;

3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to study the deformation and failure mechanism of a high steep slope under underground excavation, the influence of different locations of tunnel excavation on slope stability was analyzed by using the finite element sliding surface stress method, and the failure mechanism and deformation characteristics of slope instability induced by underground excavation were systematically studied. The results show that the underground excavation destroys the original equilibrium system of the slope, redistributes the stress of the slope in the influence range of the excavation, and creates new tensile stress regions, compressive stress regions and shear stress regions in different areas of the slope, which causes adverse additional displacement on the surface and internal points of the slope, and thus has a significant impact on the stability of the slope. According to the position relationship between underground excavation holes and sliding surface, slope instability induced by underground excavation can be divided into four types, which are local slope collapse, slope A-type slip, slope B-type slip and slope C-type slip, and the failure process and mechanical mechanism of each type of instability are revealed.

**Keywords:** underground excavation; stability analysis; deformation mechanism; slope instability; slope support