

高陡节理岩质边坡破坏模式及其对临近桥梁桩基的影响*

姚治 刘旭*

四川沿江宜金高速公路有限公司

摘要: 桩基础是边坡上常见的基础形式,一旦发生产生边坡变形和滑坡,将对施工和运营造成严重威胁。本文以贵州凯里市湾水镇境内的小江口隧道为工程背景,考虑边坡优势节理对于边坡稳定性的影响,利用ABAQUS分析节理岩质边坡的稳定性及其破坏模式,由于边坡陡崖数组优势结构面与两侧坡面走向基本处于平行状态,计算结果表明其破坏模式为错落式破坏。同时考虑边坡下方桥梁桩基的安全性,分析了边坡失稳对于其下方桥梁桩基的影响,陡崖失稳后,桥梁墩台底部区域可能会受到失稳岩体的冲击,致使桥梁被破坏甚至垮塌,建议进行锚固处理或者选择合理的桥墩位置,避免边坡破坏对桩基础造成危害。本次研究为小江口隧道桥梁桩基的施工和建设安全提供了参考和依据。

关键词: 边坡稳定性; 结构面; 破坏模式; 桥梁工程; 桩基础

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.05.041

一、工程背景

(一) 工程概况

地处贵州省凯里市湾水镇的小江口隧道出口处于两岔河的左岸陡壁上,高度约200m,隧道与两岔河大桥临近。隧道出口两面临空,呈直立状态,岩体中节理裂隙较发育。由于受到底部煤矿开采出的既有采空区和自身重力的影响,岩体下部开始出现位移,上部节理裂隙随后逐渐扩张,最终呈贯通状态,形成了危岩体,易产生崩塌和落石。为杜绝重大事故的发生,进行了边坡稳定性分析以及边坡失稳对桥梁桩基础影响的研究。

(二) 危岩体特征

桥梁右侧边坡陡壁基本由灰岩组成,河床左岸下部为泥灰岩,下伏梁山组煤系地层,坡体内卸荷裂隙发育;陡壁上多次发生崩塌现象,坡脚崩塌物发育。边坡体上部区域已出现拉张裂隙,并有不断扩展的趋势;软弱带发生蠕变,上部岩体出现坠石,预示崩塌现象随时可能发生^[1]。岩体在后期隧道开挖、采空区变形的进一步发展、河流下切及地表水下渗形成静水压力的共同作用下稳定性降低,会进一步加大崩塌的可能性,危及隧道及桥梁安全。

根据现场调查,桥梁右侧边坡主要包括两处危险岩体,第一处处于大桥右侧,长60m,厚70m;第二处处于隧道出口左侧,长70m,由于受卸荷的影响,既有裂隙已经从山顶延伸至坡脚,下部处于煤矿开采的既有采空区的影响范围之内,裂隙在近期有持续加剧变形的迹象。

(三) 结构面特征

根据现场勘察得到的结构面情况,桥梁右侧边坡主要包括两组主控结构面,参数见表1,其产状分别为 $NE70^{\circ} < NW6^{\circ}$ 和 $NE35^{\circ} < SE72^{\circ}$,如图1所示为裂隙桥梁右侧边坡坡面赤平投影图。

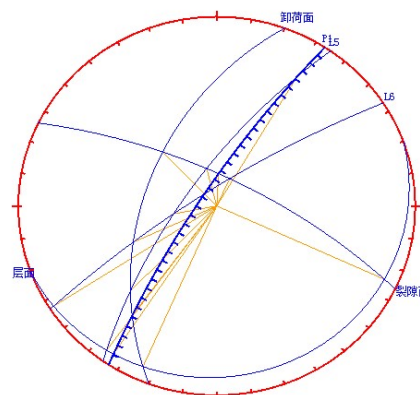


图1 两岔河大桥右侧边坡坡面赤平投影图

表1 两岔河大桥右侧边坡坡面优势结构面参数

| 编号 | 结构面名称 | 走向 | 倾角 |
|-------|----------------------|----------------|----------------|
| P1 | 走向 $NE33^{\circ}$ 坡面 | $NE33^{\circ}$ | $SE80^{\circ}$ |
| L1 层面 | 层面 | $NE70^{\circ}$ | $NW6^{\circ}$ |
| L2 裂隙 | 裂隙 | $NE35^{\circ}$ | $SE72^{\circ}$ |

二、边坡稳定性分析

(一) 计算模型

此计算模型选取的计算断面为两岔河上游侧陡崖(桥右侧)断面。对于岩质边坡而言,影响岩体整体稳定性的关键因素是岩体的内部构造,因此,此计算模型真实的对岩体内部构造进行了模拟,计算模型中主要涵盖了两组节理,第一组是缓倾节理,第二组是陡倾节理,由于视角的关系,近乎水平的状态是缓倾节理在本次计算模型中的表现形式。

本次计算选取长度约500m、高度约250m的模型尺寸。纵横轴左侧交点位置为模型定义的坐标原点,取水平向右为x轴正方向,竖直向上为y轴正方向。底部约束x方向及y方向的位移,两侧约束x方向的位移。对模型进行有限元离散分析,共计9211个节点,4075个单元,各单元离散情况如图2所示。后文中,在没有说明的情况下,计算结果中的位移单位为m,应力单位为kPa,正值为受压。

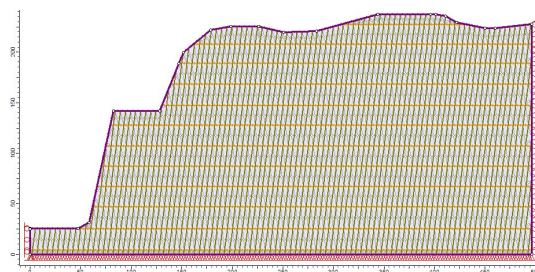


图2 网格划分图及边界条件

(二) 材料参数

本次计算中，为考虑边坡稳定性受围岩结构的影响，将边坡组成材料分为节理和岩块两个板块，通过查阅地勘报告显示：此区段的地层以灰岩和白云岩为主，为满足研究要求，将视为同一种岩体，采用实体单元进行模拟，并视其为莫尔-库伦弹塑性材料；主要考虑两组节理影响，一组为缓倾节理，产状NE70°∠6°，一组为陡倾节理，产状70°∠83°，均采用Goodman接触面单元进行模拟，并服从莫尔-库伦屈服准则的要求。材料的物理力学参数如表2所示。

表 2 模型参数

| 材料名称 | 重度 γ (kN/cm ³) | 黏聚力 c (kPa) | 摩擦角 ϕ (°) | 弹性模量 E_0 (MPa) | 泊松比 μ | 法向刚度 k_n (MPa/m) | 切向刚度 k_s (MPa/m) | 抗拉强度 (kPa) |
|------|-----------------------------------|---------------|----------------|------------------|-----------|--------------------|--------------------|------------|
| 岩块 | 22 | 400 | 30 | 1500 | 0.25 | — | — | 200 |
| 结构面 | — | 150 | 25 | — | — | 900 | 600 | 0 |

服区域主要体现在坡体内部，还未从延伸形成贯通面。

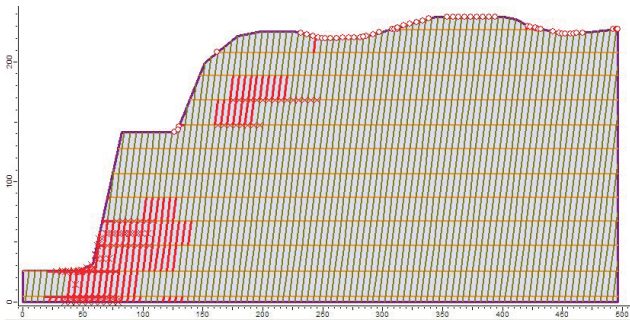


图 3 边坡塑性区分布图

(注：—：表示节理屈服；○：表示岩块受拉屈服；×：表示岩块剪切屈服)

(四) 边坡破坏模式分析

此模型的边坡破坏模式采用强度折减法进行分析。在自身重力的作用下，下部剪应力逐步加大，当达到岩体抗剪强度后，底部岩体先产生了剪切变形后形成破坏面，后与节理共同形成了贯通式破坏面，随后造成滑坡灾害，如图4所示。

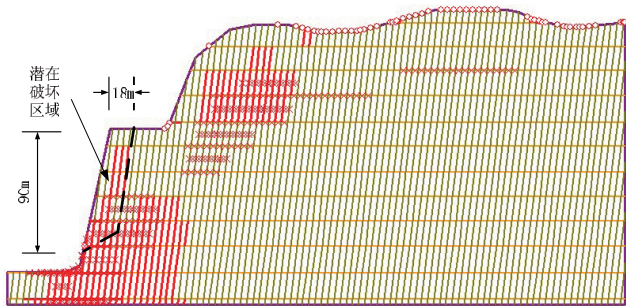


图 4 极限平衡时边坡塑性区分布图

(注：—：表示节理屈服；○：表示岩块受拉屈服；×：表示岩块剪切屈服)

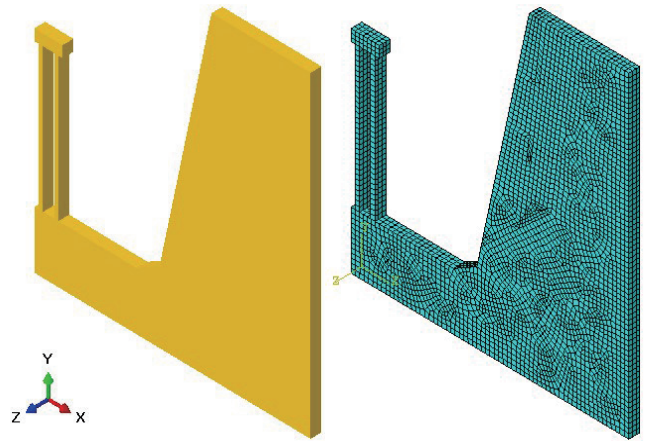
(三) 边坡稳定性分析

由自重作用下坡体的最大主应力和最小主应力云图可知，主应力（最大及最小）分布与平行于坡面，受到两组结构面的影响，总体分布呈现出明显的高山峡谷应力分布特征且符合斜坡应力的分布规律，表现在陡坡面存在受拉区域，边坡体坡底部位置应力集中分布，形成了滑坡灾害的先行因素。图3为边坡塑性区分布图（红叉表示岩块剪切屈服、红实线表示节理屈服、红圆圈表示岩块受拉屈服）。由图可知，在重力作用下，上不存在受拉屈服区，下部岩体出现了剪切屈服现象，但是屈

三、上游侧陡崖边坡失稳对桥梁影响分析

(一) 计算模型

模型中选取桥梁右侧断面作为计算断面，结合上游侧边坡稳定性分析结果，分析出了该陡崖边坡可能失稳的范围及计算模型，如图5(a)所示。选取的计算模型整体尺寸高度约140m、长度约127m，边坡与桥梁的水平净距不到40m。此坐标原点位于左下角点，水平向右为x轴正方向，竖直向上为y轴正方向。在模型左右两侧约束x方向位移，底部约束x和y向位移。对模型进行有限元离散分析，共计13052个节点，9183个单元，单元离散如图5(b)所示。如无特别说明，所有计算结果中，应力单位为Pa，以受拉为正，位移单位为m。



(a) 几何模型 (b) 网格划分

图 5 有限元模型

(二) 材料参数

根据陡崖边坡（上游侧）的破坏模式结果分析，将坡体分为滑床、滑带和滑体，采用实体单元模拟法进行模拟，将桥梁结构视为损伤弹塑性材料。模拟滑坡体对桥梁的冲击破坏，岩体运动过程中的相互作用运用罚函数关系进行模拟，运动摩擦系数取为0.3。各材料的物理力学参数见表3所示。

表3 材料参数表

| 材料名称 | 重度 γ (kN/cm ³) | 黏聚力 c (kPa) | 摩擦角 ϕ (°) | 弹性模量 E_0 (MPa) | 泊松比 μ | 断裂应变 |
|------|--------------------------------------|----------------|-------------------|---------------------|--------------|------|
| 滑体 | 22 | 400 | 30 | 1500 | 0.25 | 0.01 |
| 滑带 | 22 | 150 | 25 | 1200 | 0.26 | 0.01 |
| 滑床 | 22 | — | — | 3000 | 0.22 | — |
| 桥梁 | 24 | 1500 | 45 | 20000 | 0.2 | 0.01 |

(三) 边坡失稳对桥梁影响分析及防护措施

为准确研究桥梁结构安全受边坡失稳的影响，采用ABAQUS有限元—离散元耦合进行分析，能直观地表示边坡从局部破坏到整体失稳的而致使桥梁垮塌过程。得知，在垮塌过程中，首先发生破坏的是边坡底部，破坏面向上扩展延伸至边坡顶部，最终形成滑坡灾害；滑坡体快速向下坠落，由于受到拉应力影响，滑坡体在坠落过程中自然解体，随后沿滑床向下滑动，最终滑入底部河谷，虽有摩擦作用影响，但是由于速度快、体积大，滑体继续向桥梁方向滑动；由于桥梁与边坡的水平净间距很小，滑落的岩体最终撞击到桥梁墩台底部，桥墩受冲击作用的影响，根部发生断裂，最终导致桥梁整体倒塌，发生此次灾害。

分析可知，若桥梁上游侧边坡不采取边坡处治措施，一旦失稳，将严重影响到邻近桥梁或其他结构物的安全。为确保桥梁安全，减轻或避免受地质灾害影响的措施有三点，一是：提前主动加固，就是采取对边坡进行加固措施，确保边坡的整体稳定；二是：被动拦截，在边坡底部坡脚位置处设置挡墙进行拦截，拦截滑坡体或降低滑坡体的滑动速度；三是：桥墩施工时要尽量避免处于有边坡垮塌风险的受影响范围内。

结合以上数值计算结果，为了维护桥梁桩基的安全，建议：（1）进行锚固处理，加固范围宽度约为160m，由于危岩体上部裂隙发育，大部呈张开状，建议纵向进行全断面加固，中上部松弛带范围考虑40-50m为宜，下部加固深度建议20-30m；（2）变更桥型结构，合理选择桥墩位置，加大桥跨间距，在桥墩外设置防撞

墙，避免偶然局部崩塌对桥墩的破坏，同时彻底清理两侧岸坡危岩体；（3）设置变形监测点，实时监测陡壁岩体或隧道变形，要特别加强强降雨后或爆破作业后的监测，了解强降雨，爆破施工，采空区塌陷等对边坡岩体的影响。

四、结论

（1）错落式破坏是边坡的主要破坏模式。边坡失稳垮塌后，岩体可能冲击桥梁墩柱，从而导致桥梁整体垮塌。

（2）对大桥产生影响的主要为大桥右侧的危岩体产生的错落式滑动—崩塌变形，建议进行锚固处理，或者选择合理的桥墩位置，加大桥跨间距，在桥墩外设置防撞墙，避免偶然局部崩塌对桥墩的破坏，同时彻底清理两侧岸坡危岩体。

（3）建议设置变形监测点，实时监测陡壁岩体或隧道变形，要特别加强强降雨后或爆破作业后的监测，了解强降雨，爆破施工，采空区塌陷等对边坡岩体的影响。

参考文献

[1]解瑞松，巩悦，韩飞，等.抗滑桩对边坡桥梁桩基受力变形的影响[J].科学技术与工程，2022，22（09）：3665-3673.

作者简介：姚治，学士，工程师，研究方向：桥梁隧道施工管理。

通讯作者：刘旭，学士，助理工程师，研究方向：桥梁隧道施工管理。

*国家自然科学基金（51178402）：震后变形边坡的稳定性评价方法研究。