

小型采空区影响下高边坡变形破坏机理及稳定性分析

任燕红^{1,2}, 赵文杰³, 黄启轩⁴, 赵 帅⁵

(1. 河北水利电力学院 交通工程系, 河北 沧州 061001; 2. 河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室, 河北 沧州 061001; 3. 化学工业第一勘察设计院有限公司, 河北 沧州 061001; 4. 东北林业大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 5. 河北振沧环保科技有限公司, 河北 沧州 061728)

摘要:为评估人工开挖条件下边坡的长期安全状态,以某人工开挖路堑边坡为例,通过综合地层岩性、地质构造、水文地质条件及采空区特征开展定性分析;基于已有资料及现场调查数据建立二维有限单元法地质力学模型;系统模拟两个典型剖面在双滑面、圆弧形破坏模式下的稳定性演化并对比差异;辅以其他软件验算边坡稳定性。结果表明:两剖面代表坡体区域的稳定性系数均未达到安全要求限值 1.25。本文结果可为类似工程地质条件下路堑边坡的开挖设计与灾害防控提供理论依据及工程借鉴。

关键词:高边坡; 采空区; 破坏机理; 稳定性分析

中图分类号: TU435.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)05-0028-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.05.051

Analysis on deformation failure mechanism and stability of high slope under influence of small goaf

REN Yanhong^{1,2}, ZHAO Wenjie³, HUANG Qixuan⁴, ZHAO Shuai⁵

(1. Department of Transportation Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, HBWE, Cangzhou 061001, Hebei, China; 2. Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control, Cangzhou 061001, Hebei, China; 3. First Survey and Design Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Cangzhou 061001, Hebei, China; 4. College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 5. Hebei Zhencang Environmental Technology Co., Ltd., Cangzhou 061728, Hebei, China)

Abstract: In order to evaluate the long-term safety status of the slope under artificial excavation conditions, a trench slope is taken as an example; the qualitative analysis is carried out by combining the lithology, geological structure, hydrogeological conditions and goaf characteristics of the stratigraphy. Based on the existing data and field survey data, a two-dimensional finite element method geomechanical model is established. The stability evolution of two typical profiles in the failure mode of double sliding surface and arc shape is simulated, and their differences are compared; and other software are supplemented to check the stability of the slope. The results show that the stability coefficients of the two profiles do not reach the safety limit of 1.25. The results can provide a theoretical basis and engineering reference for the excavation design and disaster prevention and control of trench slopes under similar engineering geological conditions.

Key words: high slope; goaf; failure mechanism; stability analysis

随着我国高速公路网日益完善、车流量持续增长,改扩建工程不断推进,公路边坡稳定性问题愈

加突出^[1-3]。目前,边坡稳定性分析方法主要包括工程地质类比法、图解法、坡率法、极限平衡法及

收稿日期: 2025-10-17

基金项目: 河北水利电力学院基本科研业务费(SYKY2204); 河北省沧州市重点研发计划(23244105009)

作者简介: 任燕红(1988—),女,讲师,从事地质工程方面的教学及科研工作。

数值模拟法等, 总体可归纳为定性分析与定量分析两大类^[4-5]。在边坡工程研究中, 采空区作为常见不良地质条件, 其对边坡变形与稳定性的影响日益受到关注。郝振立^[6]通过现场调研、物理模型试验与数值模拟, 揭示了采空区影响下高陡边坡的大变形破坏规律与锚索变形特征; 范永丰等^[7]通过试验与实例分析, 探讨了采空区残余沉降对深挖边坡稳定性的影响; 王杰等^[8]则通过理论与数值手段, 研究了采矿活动影响下路堑边坡的变形破坏机制与滑坡演化过程。此外, 闫明波等^[9]结合物探、钻探与数值方法对桥梁墩柱所在峡谷边坡的稳定性进行了评估; 杨睿等^[10]基于修正的 Mohr-Coulomb 准则, 分析了地震荷载下土体抗拉强度对公路边坡稳定性的影响。国际上, 相关研究亦聚焦复杂地质条件与采矿活动的综合效应, 如: LI 等^[11]通过整合三维数值模拟与现场监测数据, 深入分析露天矿边坡的变形机理与稳定性, 凸显了多技术手段融合的重要性; ZHANG 等^[12]通过数值模拟, 研究弱岩带连通性对采矿诱发边坡变形的关键控制作用, 揭示特定地质结构的触发机制; BHATTACHARJEE 等^[13]则将视角扩展至长期稳定性评价, 利用有限元法与极限平衡法相结合的方法, 系统评估历史采矿空洞对上覆公路路基长期沉降及稳定性的影响, 其方法框架对评价“老旧小型采空区”等类似工程的长期危害具有参考价值。

上述研究从不同方面推动了采空区边坡稳定性分析的进展, 但针对小型采空区影响下高边坡的变形破坏机理及稳定性评价, 仍缺乏系统性研究。尤其在多因素耦合作用(如地质构造、风化作用、不良地质体等)下, 小型采空区对边坡长期稳定性的影响机制尚不明确。为此, 本文以某受小型采空区影响的人工开挖路堑边坡为研究对象, 在综合地质勘察与现场调查基础上, 建立二维有限元地质力学模型, 系统分析其在双滑面与圆弧形破坏模式下的稳定性, 旨在揭示小型采空区影响下高边坡的变形破坏机理, 以期工程加固提供理论依据。

1 项目概况

某段路堑左侧人工开挖边坡, 坡高为 35~40 m, 坡脚采用片石挡墙支护, 高度为 4~5 m, 挡墙上

方为未加防护的开挖坡面, 坡角约为 50°。通车 5 a 来, 受地质结构、风化剥蚀及不良地质等因素综合影响, 该边坡始终处于不稳定状态, 时有块体崩滑至路面(图 1), 严重威胁行车安全和行人安全, 属重大安全隐患路段。截至目前, 随着不利因素影响加剧和坡体应力状态不断变化, 边坡稳定状况日趋恶化。坡顶危岩崩塌区持续扩大, 危石林立(图 2), 滚落块度增大、方式增多、影响范围扩展; 在不良地质作用(如采空区覆岩变形)影响下, 边坡变形破坏模式可能由局部失稳发展为大规模整体失稳。鉴于此, 需对该段路堑边坡进行稳定性评价并实施有效治理。



图 1 路边滚落石块特征



图 2 危岩体特征

2 边坡岩体地质规律

2.1 地层

边坡所处地质环境中, 出露地层由老到新依次: 新地层为第四系, 老地层为二叠系山西组煤系地层(P1s)。第四系以不整合接触关系覆盖于老地层之上, 主要由冲洪积、残坡积物构成, 厚度一般为 1.0~2.0 m。二叠系山西组为主要老地质, 其特点如下: 岩层总体倾向 155°~187°, 倾角为 3°~11°, 岩层较稳定; 沉积韵律明显, 自坡脚至坡顶呈“粗(砂岩)–细(泥岩)–粗(砂岩)–细(泥岩)”规律性分布; 受沉积环境影响, 岩相变化大, 粗粒中夹细粒、细粒中带粗粒现象普遍, 局部见透镜体产出; 岩层以厚层、巨厚层为主, 薄层及夹层为辅。

2.2 地质构造

场地出露主要构造形迹为褶皱构造，场区位于背斜南翼。该背斜控制区域岩层产状及次级构造形迹的发育和展布，为控制性构造。场区未发现断层，通过极点等密度图按岩性分组统计，出露 5 组优势节理，其特征如表 1 所示。由表 1 可知：节理长度较小但数量多，将岩体分割为多种力学介质特征的结构体，显著降低岩体完整性与渗透性。地表及近地表节理多张开、少闭合，节理面粗糙度以稍粗糙为主，平直且局部夹泥质充填物，多属硬性结构面。其中 J₃、J₄ 节理与坡体层面可构成潜在危险滑面，其力学效应直接控制边坡稳定性。

经现场调查，坡体中部平台见一沉降沟，总体走向为 150°，沟宽为 5~6 m，总长 90 m，应为采空区冒落所致。据经验判断，其沉降带形成历史较长，既存在老采空区覆岩变形形迹，又有近期覆岩变形持续发生，表明坡体下伏煤层可能仍在开采，或经复采后覆岩变形尚未停止，未达稳定状态。中北部沉降沟出露标高北高南低，沟体因降雨冲刷平缓展布，灌木丛生，与两侧地层间接过渡，属古条形沉降带遗迹；南部区域见新近变形痕迹，裂缝深度较大（15~20 cm），连续展布，沿走向分布星点状排气孔，土质新鲜，近端部可见分支与复合现象。坡体变形裂缝为采空区覆岩变形过程中形成，调查搜集地面裂缝特征如

表 2 所示。

由表 2 可知：裂缝大部分张开，走向多与边坡斜交。显著特点：1）平面形态局部呈锯齿状（沿多组节理拉裂），总体弧形分布；2）主要分布于北部坡体顶或中上部，呈 NE 或 NNE 向平行展布，其次为南侧坡顶近 SE 向展布（与坡体近于平行）；3）两壁坍塌物新鲜（南北坡均见），系新近活动形迹。综上，北侧坡体变形由采空区覆岩变形所致，南侧坡体变形由应力状态变化引起。

层间错动面形成于褶皱过程中，沿层理发育，显著特点为界面多、规模大、贯通性强。在构造应力作用下，层间常夹泥化物质，形成软弱夹层，力学性质差。

2.3 古老采空区特征

根据搜集的该段采空区注浆及检测资料，坡体下伏已采空煤层为 3[#]煤，开采厚度约为 1.5 m，埋深约为 40 m，开采方式为人工洞室（解放前），回采方式多为残柱式。采空区特点：巷道宽度约为 2.5 m，开采强度小，地表变形小，稳定所需时间长。

结合上述沉降沟特征及此类采空区变形特点，采空区覆岩变形大部分已完成；场地局部近期地表裂缝系采空区局部塌落与临坡面卸荷引起应力松弛的综合效应所致。经反复对比和综合评定，采空区冒落充填已基本完成，坡体后缘较稳定沉降带为古老采空区覆岩变形的结果。

表 1 优势节理裂隙组特征

编号	优势节理组频度/%	平均产状/(°)		力学性质	规模(沿走向或倾向)/m	平均间距/m	粗糙度	闭合性
		倾向	倾角					
J ₁	7.9	10	85	压扭性	10.0	0.30	稍粗糙	闭合
J ₂	21.0	60	80	压扭性	15.0	0.10	稍粗糙	张开
J ₃	7.9	70	80	压扭性	10.0	0.35	稍粗糙	闭合
J ₄	32.9	100	70	压扭性	5.0	1.00	稍粗糙	闭合
J ₅	30.3	120	85	压扭性	20.0	0.55	稍粗糙	张开

表 2 裂缝特征

裂缝编号	产状/(°)		长度/m	开口宽度/cm	裂缝两侧沉降/cm	裂缝条数/条	开裂时间
	走向	倾角					
L ₁	32	近于直立	17.6	10~15	0	1	近期
L ₂	48	近于直立	17.4	15~20	10	1	近期
L ₃	弧形	近于直立	31.3	18~25	35~60	1	近期
L ₄	162	近于直立	8.8	5~10	10	2	近期

基于上述分析, 北部坡体变形形迹由新近开采活动引起覆岩变形所致, 根据裂隙特征判断, 其西北区域近期仍可能存在开采活动(方向可能为北东-南西向), 或既有该方向采空区虽已停采, 但覆岩变形仍在继续。

综上, 北部坡体稳定性主要受采空区覆岩变形影响, 采空区覆岩变形产生的附加应力因作用方向与边坡走向斜交, 对边坡影响较小; 南侧坡体在既有不利边界条件下处于蠕变状态, 稳定性主要受自身稳定和边界条件控制。

3 边坡岩体工程地质特征

3.1 地形、地貌与周边环境

边坡场地地处构造剥蚀丘陵地貌单元, 海拔 844~902 m, 相对高差为 56 m, 走向近南北向; 地形总体西高东低、北高南低, 属中低山中弱切割地貌。

3.2 边坡工程地质特征

3.2.1 地质岩组划分及其特征

根据地层的成因类型、岩相变化、成层条件及工程地质特征, 按岩体工程地质力学理论, 将场地边坡出露的岩石划分为 4 个工程地质岩组: 第四系岩组(Q)、砂岩岩组(Sy)、泥岩岩组(Ny)、薄煤层岩组(Mx)。第四系岩组(Q)主要包括冲洪积物和残坡积物, 局部出露, 厚度为 1~2 m。砂岩岩组(Sy)出露于评价坡体底部路基和中上部。泥岩岩组(Ny)主要由泥岩构成, 含少量碳质; 薄煤层岩组(Mx)仅分布于中部泥岩中, 主要包括 1 层薄煤层, 局部为两层, 单层厚度为 50~70 cm。

3.2.2 边坡岩体结构及结构体

基于结构面和结构体在岩体内的组合排列形式, 将边坡岩体划分为 3 种岩体结构类型: 层状

块状结构、层状碎裂结构和散体结构。

3.2.3 岩体风化特征

岩体风化特征表现为中部强风化泥岩及顶部强风化砂岩两部分。强风化泥岩主要分布于中部泥岩区, 受力学作用及其他风化营力影响, 岩体破碎, 已丧失原岩结构特征, 裂隙发育且充填黏土等风化产物, 影响深度为 0.5~1.0 m; 强风化砂岩受层面与两组节理组合切割, 风化裂隙极发育, 岩体破碎, 原始结构基本破坏, 裂隙间充填黏土、砂质土或铁染薄膜等, 强度低, 影响深度达 0.5~1.0 m。

3.3 边坡工程地质分区

边坡岩体的工程地质分区根据边坡岩体性质、地质结构和岩体结构类型及其工程特性、边坡几何要素、稳定主控因素和水文地质特征等, 将工程地质条件和周边环境一致或相近的区段概括为边坡地质单元, 各区特征如表 3 所示。

4 边坡水文地质特征

区域属北温带半湿润气候, 四季分明, 夏秋多雨, 冬季干寒。冻结期为 11 月至次年 3 月, 标准冻土深度为 0.68 m。无地表水系与大型储水构造, 植被稀疏, 局部冲沟灌木较茂盛, 排泄径流条件较好。地下水主要为松散岩层孔隙潜水和基岩构造裂隙潜水, 汇水面积为 13 400 m²。枯雨季节坡面未见出水点; 雨季时大气降水可能沿贯通或追踪节理裂隙入渗, 沿薄煤层或泥岩界面排泄。水量较小, 渗透、渗流对周围岩体的侵蚀或软化作用是控制边坡稳定的重要因素。基于上述分析, 边坡稳定性计算时应考虑: 1) 暴雨季节及极端降雨情况下, 边坡后缘裂隙的瞬时静水压力; 2) 基岩裂隙水对滑面或潜在滑面物质强度的弱化作用。

表 3 各工程地质分区特征

分区 编号	分布 位置	代表 剖面	坡高/ m	产状/(°)		特征
				倾向	倾角	
I	边坡北部	1 剖面	33.6	85	34	底部为砂岩, 中部平台存在变形裂缝, 下部路面有少量滚石; 采空区覆岩变形和降水入渗是影响稳定的主因
II	边坡南部	2 剖面	35.7	83	33	底部为泥岩, 中部平台存在沉降沟, 下部路面有大量滚石; 后缘沉降带、新近坡体蠕变变形及拉裂变形是控制稳定的主因

5 边坡稳定性评价

该边坡是路堑开挖切割坡脚形成的人工边坡。基于边坡周边环境、破坏后可能后果的严重性、边坡类型及坡高等因素综合评价,边坡安全等级定为二级。依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)、工程重要程度及对坡体工程地质条件与赋存环境的认识,坡体稳定性评价安全系数定为 1.25。经现场调查,坡体周围无地表水系,但坡体中上部存在纵深裂缝或沉降沟,稳定性计算时需考虑:1) 张裂缝中暴雨瞬时静水压力;2) 基于水文地质特征,地下水对滑面黏聚力、内摩擦角的弱化作用。场地地震烈度为 7 度,地震力影响按式(1)考虑。

$$P_h = C_z \cdot k_h \cdot W_i \quad (1)$$

式中: P_h 为水平地震力, kN/m; C_z 为综合影响系数, 取 0.25; k_h 为水平地震力系数, 地震烈度 7 度时取 0.1; W_i 为计算块体重量, kN/m。

5.1 边坡潜在破坏模式分析

经现场详细地工程地质调查及对资料综合分析(利用赤平投影技术分析结构面几何组合关系,结合反分析成果),场地坡体在不利边界条件下的潜在破坏模式确定如下:

(1) 潜在组合滑面破坏。以沉降沟或密集陡倾节理化岩带为滑坡后缘,以煤层层面为潜在滑动面,形成双滑面组合破坏。

(2) 潜在圆弧形滑面破坏。以沉降沟或密集陡倾节理化岩带为后缘边界,通过软件圆弧形破坏模式自动搜索潜在最危险滑面,其具圆弧形特征。

(3) 局部边坡破坏模式。评价表明,边坡既有挡墙墙底及周边堆积、散落有不同程度滚石和松散堆积物。局部边坡顶部危岩体的倾倒、崩塌、错落

破坏是当前坡体最明显的变形破坏模式,由坡体地质结构与岩体工程特性决定(图 3)。裂隙砂岩构成危岩体,在后期改造作用下,先产生倾斜趋势,导致重心向临空面偏移;同时临坡面泥岩在附加重力下产生侧向压缩变形位移,二者共同加剧危岩体倾倒或错落破坏,此为危岩体破坏的力学作用机制。

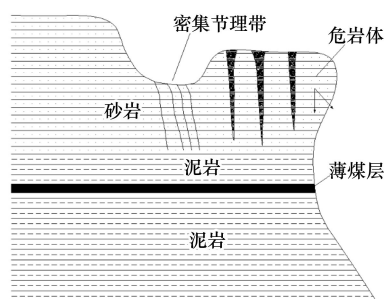


图 3 危岩体破坏机理示意

(4) 最终破坏模式确定。分析所有潜在破坏模式并结合工程判断,以安全系数最小的破坏模式作为验算对象,最终确定为局部坡双滑面破坏和整体坡圆弧形破坏两种模式。

5.2 有限元数值模拟分析

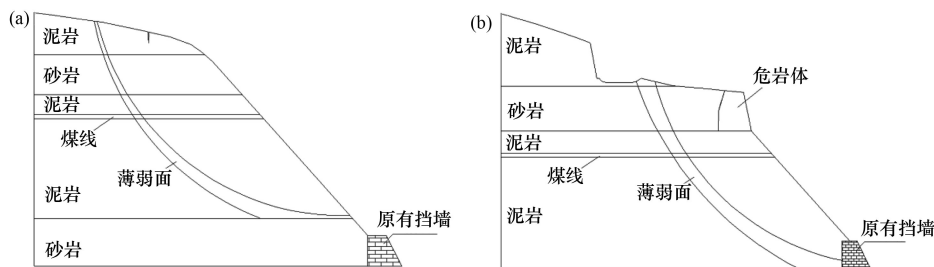
5.2.1 模型建立

以 1-1'、2-2' 剖面为代表进行分析,依据已有资料及现场调查综合建立二维有限单元法模型,模型范围分别为 34.2 m × 50.2 m 和 37.9 m × 55.2 m(图 4)。岩层由砂岩与泥岩互层及中部薄煤层组成,2-2' 剖面额外增加坡顶临坡面危岩体。模型边界:非临空面约束 x 方向位移,底部约束 y 方向位移。根据计算结果分析坡体应力应变,评价边坡稳定性。

室内岩土力学试验各分层物理力学参数如表 4 所示。

5.2.2 计算结果与分析

计算模拟结果如图 5~8 所示。



剖面: (a) 1-1'; (b) 2-2'

图 4 剖面模型

表 4 岩层分层物理力学参数

岩土层	弹性模量/MPa	泊松比	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
砂岩	1 500	0.35	27.0	300	30
泥岩	850	0.38	24.5	150	25
煤线	600	0.39	18.0	40	18
薄弱带	750	0.39	24.0	50	20

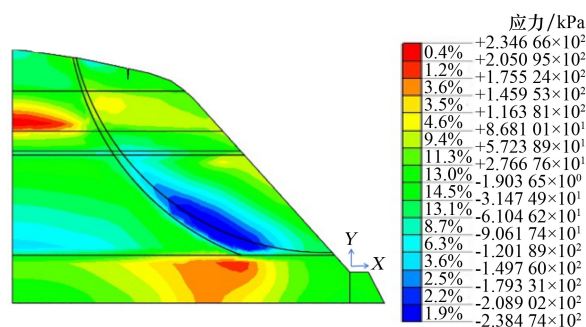
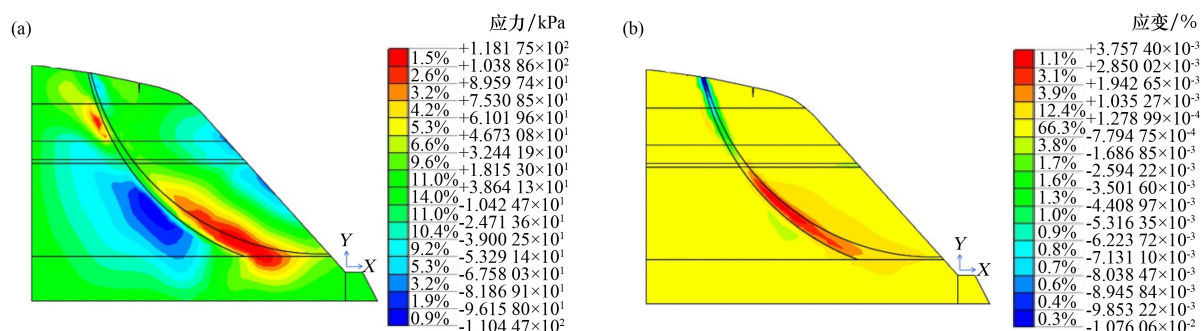


图 5 1-1'剖面 x 方向应力云图



(a) 剪切应力; (b) 剪切应变

图 6 1-1'剖面 xy 方向剪切应力、应变云图

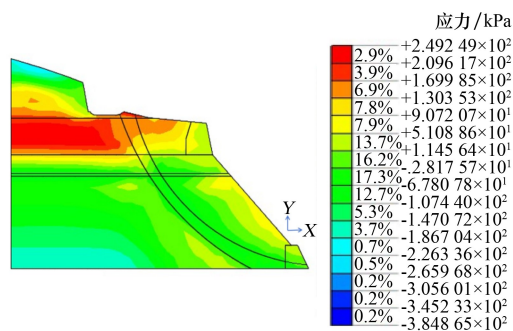
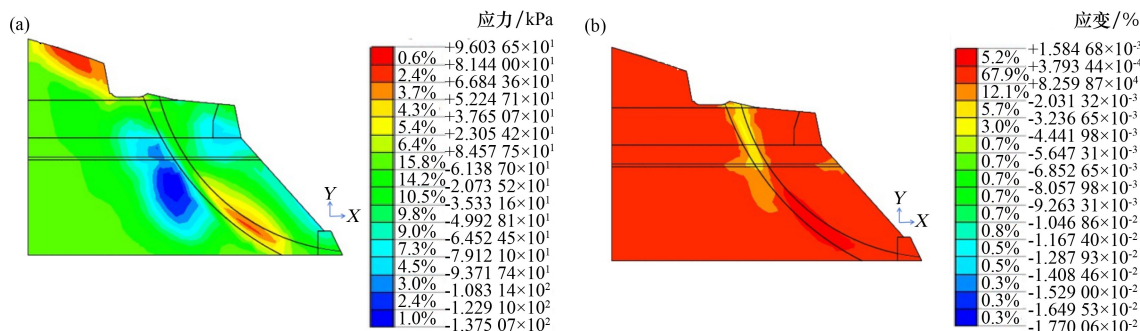


图 7 2-2'剖面 x 方向应力云图



(a) 剪切应力; (b) 剪切应变

图 8 2-2'剖面 xy 方向剪切应力、应变云图

结果分析:

(1) 由图 5、7 可知: 两剖面均存在 x 正方向应力集中。1-1'剖面集中于坡体后缘上层砂岩底

部、砂泥岩交界处和底部砂岩与薄弱带交汇处, 最大值为 234.6 kPa; 2-2'剖面集中于坡体后缘上部砂岩层, 最大值为 249.2 kPa, 应力集中对坡体

稳定不利,尤其 2-2'剖面边坡前缘存在危岩体,降雨季节渗流力增大时,坡体沿薄弱面滑出或危岩体崩塌可能发生。

(2) 由图 6(a)、图 8(a)可知:坡体薄弱面存在剪切应力集中。1-1'剖面剪切应力距坡脚近,最大值约为 118 kPa,虽小于泥岩抗剪强度,但该处为泥岩与砂岩交界(岩层近水平),降雨入渗沿层面排泄会降低抗剪强度,坡体沿薄弱面在泥岩底部剪出可能性较大;2-2'剖面整体剪应力破坏性不大,但流滑蠕变特征显著,其险象环生机理即在于此。

(3) 由图 6(b)、图 8(b)可知:1-1'剖面最大剪切应变集中于薄弱带;2-2'剖面集中于薄弱带内砂岩层及坡体前缘薄煤层出露部位附近。

数值模拟显示:1-1'剖面安全系数为 1.11(较稳定状态);2-2'剖面 1.06(极限平衡状态)。两剖面代表的坡体稳定性均未达限值 1.25。

5.3 岩体、结构面抗剪参数确定

局部坡潜在双滑动面沿节理面和煤层面滑动,整体坡潜在圆弧形滑动面切穿各层岩体。本次参数选取基于边坡反算和已有类似工程参数(参照本路段附近古滑坡研究等),结合工程判断综合确定。结构面强度参数如表 5 所示。

表 5 结构面抗剪强度参数

结构面名称	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
陡倾节理面	5	5
煤层层面	15	10

岩体抗剪强度取决于岩块与结构面性质,受结构面密度、间距等影响,内摩擦角介于岩块与结构面之间。本次取岩块与结构面内摩擦角平均值作为岩体内摩擦角,取二者黏聚力平均值作为岩体黏聚力,各岩组“岩桥”黏聚力、内摩擦角如表 6 所示。

表 6 各岩组岩体物理力学参数

岩组名称	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	容重/(kN·m ⁻³)
砂岩岩组(Sy)	100	25~30	27.0
泥岩岩组(Ny)	50~60	20~25	24.5
煤线岩组(M)	15.0	10.0	18.0

5.4 边坡稳定性验算

基于确定的破坏模式与选取的参数,采用边坡稳定性分析软件(非数值模式类),通过折线型/圆弧形滑动模型对剖面验算,结果如表 7 所示。

表 7 坡体稳定性验算结果

模型类型	1-1'剖面	2-2'剖面
双滑面破坏模式	1.68	1.83
圆弧形破坏模式	1.15	1.08

由表 7 可知:按限定安全系数 1.25,双滑面破坏模式验算值均超 1.25(稳定状态),圆弧形破坏模式均小于 1.25(欠稳定状态)。鉴于边坡潜在破坏模式以圆弧形为主,其破坏机理与计算模型更吻合,故最终选用圆弧形破坏模式结果。

6 结 论

(1) 由边坡潜在破坏模式分析可知,边坡最终确定的破坏模式为局部坡双滑面破坏和整体坡圆弧形破坏。

(2) 有限元数值模拟结果表明:1-1'剖面安全系数为 1.11,为较稳定状态;2-2'剖面安全系数为 1.06,处于极限平衡状态。两剖面代表的坡体稳定性均未达到 1.25 的要求限值。

(3) 边坡稳定性验算显示:圆弧形破坏模式下,各剖面代表区域安全系数均小于限定值(1.25),处于欠稳定状态。

(4) 综合以上分析(潜在破坏模式、数值模拟、稳定性验算),该边坡整体处于欠稳定状态,需采取加固措施保障坡体稳定。

参考文献:

- [1] 张勇,侯伟宁. 岩质高边坡稳定性分析及支护设计浅析[J]. 中国水运(下半月),2018,18(14):244-245.
- [2] 李家欣. 改扩建公路岩质高边坡处治方案比选及优化[J]. 山西交通科技,2023(1):67-71;83.
- [3] 宋健. 某高速公路岩质高边坡破坏机理及稳定性分析[J]. 山西建筑,2023,49(24):82-85.
- [4] 贾鹏云. 顺层岩质高边坡稳定性分析及处治方案研究[J]. 山西交通科技,2017(4):29-32.
- [5] 冯忠居,孟莹莹,霍建维,等. 改扩建公路岩质高边坡爆破开挖稳定性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(1):112-122.

- [6] 郝振立. 采空区影响下高陡边坡变形破坏机理及控制对策研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2023.
- [7] 范永丰,罗锦,徐衍,等. 采空区残余沉降对深挖边坡稳定性的影响[J]. 工业建筑,2024,54(4):166-172.
- [8] 王杰,向喜琼,吴正超. 浅埋采空区路堑边坡变形破坏过程研究[J]. 中国水运(下半月),2021,21(3):121-123.
- [9] 闫明波,莫金峰,金宇轩,等. 深“V”型峡谷桥位区岩质边坡稳定性分析[J]. 工程建设,2025,57(9):51-57.
- [10] 杨睿,石文涛,张国平. 地震作用下土体抗拉强度对公路边坡稳定性影响的上限有限元分析[J]. 交通世界,2024,(33):66-68.
- [11] LI Z G,XU T,ZHAO L C, et al. Enhancing stability analysis of open-pit slopes via integrated 3D numerical modeling and data monitoring [J]. Engineering FailureAnalysis,2024,163:108495.
- [12] ZHANG C,CLEMENT A A,KODAMA J L, et al. Effect of the connectivity of weak rock zones on the mining-induced deformation of rock slopes in an open-pit mine [J]. Sustainability,2024,16(14):5974.
- [13] BHATTACHARJEE R, KUMAR A, DEB D. Stability assessment of road foundation over abandoned mine workings using FEM and LEM[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2022,32(5):1145-1158.