

谢艳华,张炳晖,孙刚臣,等. 桂林阳朔如意峰景区A4救生平台基础岩体稳定性分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 584-591.  
DOI: 10. 11932/karst20200414

## 桂林阳朔如意峰景区A4救生平台基础 岩体稳定性分析

谢艳华<sup>1</sup>, 张炳晖<sup>2</sup>, 孙刚臣<sup>2</sup>, 刘宝臣<sup>2</sup>, 陈宣东<sup>2</sup>, 范新东<sup>3</sup>

(1. 桂林航天工业学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 3. 广西桂林水文工程地质勘察院, 广西 桂林 541002)

**摘要:** 依托桂林阳朔如意峰旅游景点项目开发, 针对项目建设中A4救生平台基础存在的安全隐患问题, 通过现场调查和理论分析相结合的方法, 采用赤平投影定性分析和极限平衡法、有限元数值模拟法定量计算相结合的方式, 对如意峰景区A4救生平台基础岩体稳定性进行综合评价, 分析表明A4救生平台基础岩体处于不稳定状态, 需对其进行加固处理, 并提出了加固处理建议措施, 为后期危岩崩塌的治理提供理论支撑和科学依据, 对岩溶地区类似岩体的稳定性研究具有一定的参考价值。

**关键词:** 危岩体; 稳定性; 极限平衡法; 有限元数值模拟

**中图分类号:** P642 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810(2020)04-0584-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



### 0 引言

桂林为典型的岩溶区, 分布着大量的岩溶山石, 在地壳运动、风化作用等影响下, 形成了大量的危岩, 严重威胁桂林旅游经济的发展和人民生命财产安全<sup>[1-4]</sup>。2009年3月2日至5日发生在秀峰区西山、叠彩区白面山、西城区金山的3起危岩崩塌地质灾害, 均不同程度地造成了人员伤亡和巨大财产损失; 2013年6月28日桂林遇龙路发生危岩崩塌地质灾害, 造成12栋民房不同程度受损, 所幸无人员伤亡; 2015年3月19日, 桂林叠彩山危岩崩塌地质灾害, 造成7人死亡, 25人受伤。自2007年以来, 桂林岩溶区发生过10多起危岩崩塌地质灾害, 极大影响了居民生活, 危及游客人身安全, 严重阻碍了桂林旅游经济的发展<sup>[5]</sup>。

阳朔如意峰景区位于桂林岩溶区, 将通过索道、

悬索桥、玻璃栈道、林中漫步、如意云顶等创意景观, 建设成桂林首个山顶空中公园, 带领游客畅享“空中花园”, 体验“桂林新峰景”。而危岩地质灾害伴随岩溶区而存在, 为避免如意峰景区在建设中和建设后运营过程中发生危岩地质灾害致使人员伤亡和财产损失, 因此, 在阳朔如意峰景区建成之前开展危岩地质灾害研究, 指导工程治理, 预防景区地质灾害隐患, 极为必要。

近年来, 国内外学者对危岩破坏模式等方面研究取得了较丰富的成果。唐红梅等<sup>[6-7]</sup>采用D-P破坏准则, 建立了用主控结构面法向力和切向力表达的压剪滑动型危岩的失稳破坏准则; 将层次分析法和模糊综合评价法有机结合, 构建了灰岩地区崩塌体危险性模糊综合评价模型; 陈健云等<sup>[8]</sup>认为对倾倒式危岩体进行复杂环境下的动力稳定性核实时应考虑

基金项目: 广西自然科学基金(2018GXNSFAA138139); 广西建筑新能源与节能重点实验室基金(桂科能16-J-21-6、桂科能19-J-21-21、桂科能19-J-21-22); 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室(长安大学)开放基金(300102260503)

第一作者简介: 谢艳华(1986—), 女, 硕士, 高级讲师、工程师, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: xieyh1986@163.com。

通信作者: 张炳晖(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩溶区环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhangbh1983@163.com。

收稿日期: 2020-03-21

动水压力的作用;陈鹏宇等<sup>[9]</sup>集合颗粒流数值模拟方法和断裂力学理论,建立了危岩稳定性评价的颗粒流断裂力学法;何潇等<sup>[10]</sup>基于极限平衡理论和岩体结构理论,推导了座滑式危岩破坏的两组结构面的应力表达式,建立了座滑式危岩稳定性分析的力学模型。

基于以上丰富的理论基础,本文通过现场勘查和理论分析相结合的方法,采用定性和定量相结合的方式,对阳朔如意峰A4救生平台基础岩体稳定性进行分析研究,为预防危岩地质灾害发生和危岩治

理提供科学依据,同时对类似岩体稳定性分析研究提供参考。

## 1 工程概况

阳朔如意峰景区位于广西桂林市阳朔县高田镇,321国道西侧。按照景区整体规划,将建设运行长度为1 750 m,线路高差约260 m,始于下站房,途经A4山头、A3山头和A2山头,止于上站房的索道观光缆车。线路示意图如图1。

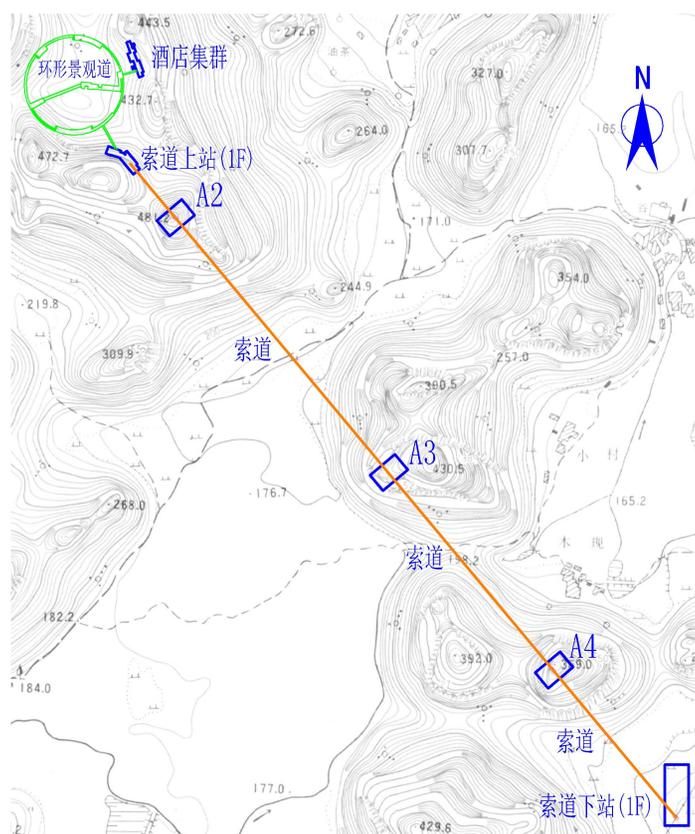


图1 阳朔如意峰索道线路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cableway line of the Ruyi peak in Yangshuo

A4救生平台位于A4山头,经现场勘查,A4救生平台基础岩体层理、裂隙发育,岩体较破碎,且基础范围内岩体存在原生节理裂隙并自基础表面内侧向外发育延伸,在A4救生平台荷载作用下,不利于基础岩体稳定,存在极大的安全隐患,因此,在A4救生平台建设之前,对其基础岩体进行稳定性评价尤为重要。

## 2 岩体工程地质条件

根据现场勘查,研究区A4山体峰顶标高

369.0 m,与山体北侧谷地(标高约165.2 m)相对高差约203.8 m,岩组为泥盆系上统融县组( $D_3r$ )灰岩,岩层产状 $J1:46^\circ\angle 13^\circ$ ,索道建设开挖A4山体形成的岩质边坡坡向 $320^\circ$ ,坡度 $81^\circ$ ,A4救生平台基础与索道塔架基础底面相对高差7.0 m,A4救生平台竖向荷载作用点为其基础表面E点,E点位置及贯穿结构面见图2。研究区岩体节理裂隙发育,发育节理共9组,除J5、J8和J10为张性节理外其余均为剪性节理,其中原生节理2组为J2和J3,结构面外倾,贯通较好,对A4救生平台基础岩体稳定性影响较大,其余组均为

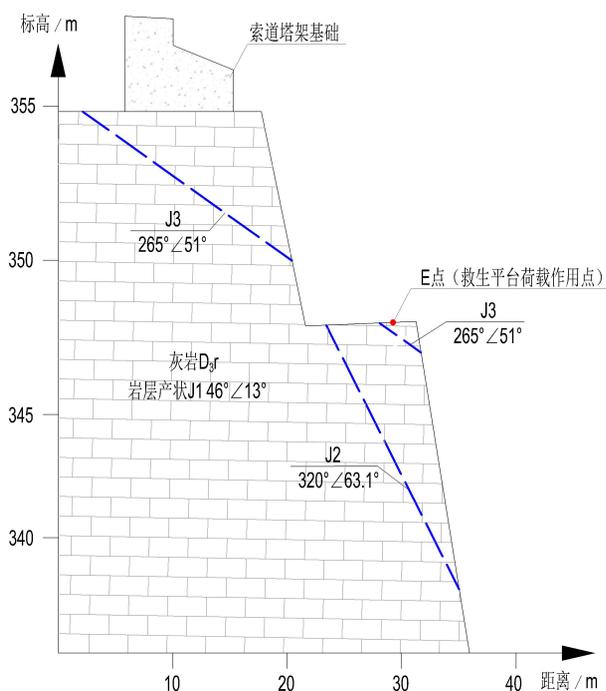


图2 E点位置及结构面

Fig. 2 Location and structural plane of point E

次生裂隙,节理面平直或较平直,为方解石(细)脉充填,胶结较好,完整性较好,对A4救生平台基础岩体稳定性影响小,具体各节理特征见岩体节理特征统计表1,节理倾向玫瑰花图如图3。

### 3 岩体稳定性评价

在现场勘查成果及室内试验成果的基础上,采用赤平投影定性分析和极限平衡法、有限元数值模拟定量分析相结合的方法对A4救生平台基础岩体进行稳定性研究分析。

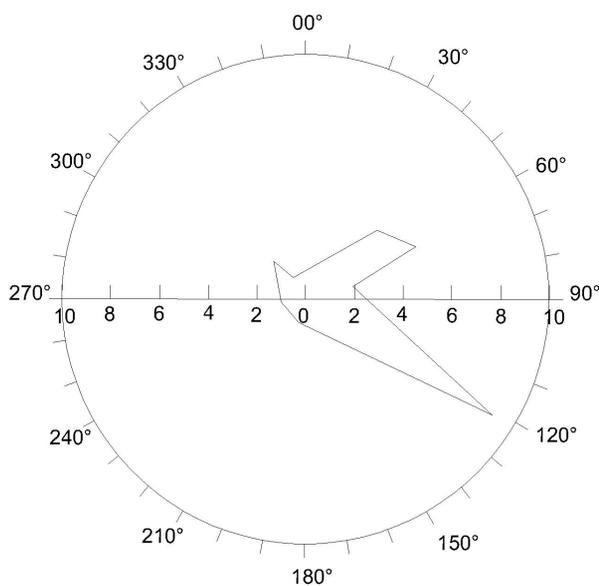


图3 节理倾向玫瑰花图

Fig. 3 Rose diagram of joint tendency

#### 3.1 岩体稳定性定性分析

A4救生平台基础岩体边坡岩层产状J1, 46°/13°,坡面表层岩体风化切割严重,表面岩体完整性差,但对稳定性影响小;根据A4救生平台竖向荷载作用点E点钻孔电视(ZK1)成果见图4和图5,E点下方岩体主要发育一组原生节理J2,产状为320°/63.1°,节理裂隙自基础表面内侧向外下方发育延伸,贯通性较好,不利于A4救生平台基础岩体稳定;根据E点附近岩体开挖面的现场调查以及钻孔电视资料,E点南侧(180°方向)开挖面揭露一组原生节理J3,产状为265°/51°,裂隙贯通性较好,对A4救生平

表1 岩体节理特征统计表

Table 1 Statistics of rock mass joint characteristics

节理编号	节理走向/°	节理倾向/°	节理倾角/°	密度/条·m <sup>-1</sup>	延伸长度/m	节理特征	类型	备注
J2	50	320	63.1	1	8~12	节理面较平直,较粗糙,张开,裂隙宽度0.5~2.0 cm,局部见泥痕,结合差	原生剪性	E点钻孔揭露
J3	85	265	51	1	15~20	节理面较平直,较粗糙,局部微张,裂隙宽0.2~7.2 cm,大部分为可塑状红黏土充填,结合差,局部存在钙质胶结	原生剪性	E点南侧开挖揭露
J4	60	330	76	1	5~6	节理面平直,钙质和方解石细脉充填,较紧闭	次生剪性	基础开挖
J5	335	60	28	1	3~4	节理面粗糙,方解石脉充填,胶结较好,紧闭	次生张性	挖面
J6	335	65	35	4	3~4	节理面平直,方解石细脉充填,胶结较好,紧闭	次生剪性	
J7	303	123	72	9	2~3	节理面平直,方解石细脉充填,胶结较好,微张	次生剪性	基础坡面风化带
J8	343	73	26	2	0.5~2	节理面粗糙,方解石脉充填,胶结较好,较紧闭	次生张性	
J9	15	195	52	1	1	节理面平直,方解石细脉充填,胶结较好,紧闭	次生剪性	
J10	310	40	21	3	1~2	节理面粗糙,方解石细脉充填,胶结较好,紧闭	次生张性	

台基础岩体局部切割,影响基础岩体稳定。

受外倾结构面控制,A4救生平台基础岩体稳定性主要取决于原生节理J2、J3裂隙面的强度、基础切割体岩体自重及基础荷载的大小,通过赤平投影进行稳定性分析<sup>[11]</sup>(图6),分析结果表明,节理J2裂隙面与坡面倾向相同,且倾角小于坡角,欠稳定,A4救

生平台基础岩体边坡在节理J2的影响下处于欠稳定状态,因此A4救生平台基础岩体在荷载作用下,可能处于不稳定状态,在荷载和岩体自重作用下,极有可能沿节理J2结构面向下滑移,发生滑移式危岩崩塌地质灾害,存在极大安全隐患,需进一步进行定量分析和评价。

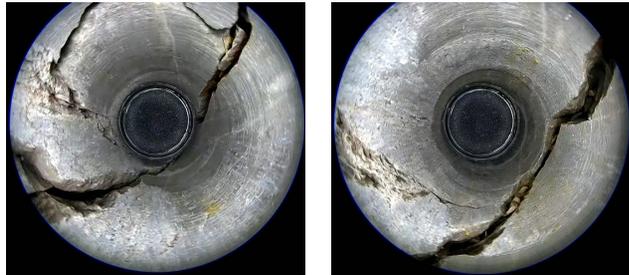


图4 ZK1 h=1.031~1.133m处裂隙  
Fig. 4 Cracks at ZK1 of h = 1.031-1.13 m

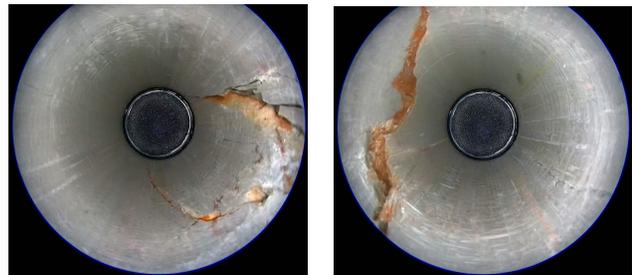


图5 ZK1 h=3.6~4.63m处裂隙  
Fig. 5 Cracks at ZK1 of h = 3.60-4.63 m

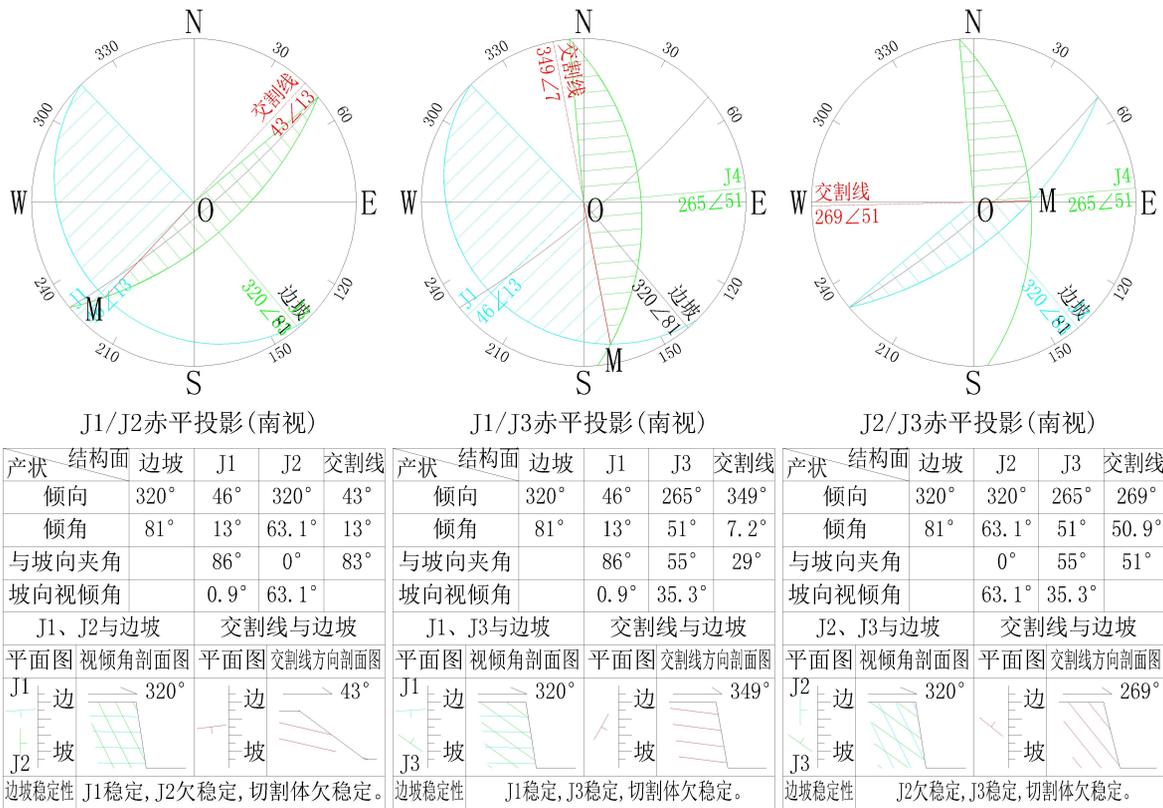


图6 A4救生平台基础岩体边坡赤平投影图  
Fig. 6 Stereographic projection of rock slope at A4 rescue platform foundation

### 3.2 岩体稳定性定量分析

#### 3.2.1 极限平衡法<sup>[12-14]</sup>

(1) 计算模型。依据定性分析结论,按照最不利因素考虑,选取J2作为潜在滑动面,对A4救生平台

基础岩体边坡进行稳定性计算,计算模型见图7,本次A4救生平台基础岩体边坡稳定性计算仅考虑以下三种工况:工况1,天然状态下(未施加荷载);工况2,对E点施加最小竖向荷载435.49KN;工况3,对E点施加最小竖向荷载1191.46KN。

(2) 计算原理。由于节理J2裂隙面贯通性较好,且研究区受地震影响较小,故未考虑降雨入渗、地震作用情况,相应坡体稳定性系数为 $K_f$ :

$$K_f = \frac{(W + F) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \varphi + CL}{(W + F) \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

式(1)中: $W$ 为单位宽度坡体重量(KN); $F$ 为竖向荷载(KN); $\alpha$ 为坡体潜在滑面倾角( $^\circ$ ); $\psi$ 为坡体潜在滑面内摩擦角( $^\circ$ ); $C$ 为坡体潜在滑面内聚力; $L$ 为坡体潜在滑面长度(m); $K_f$ 为稳定性系数。

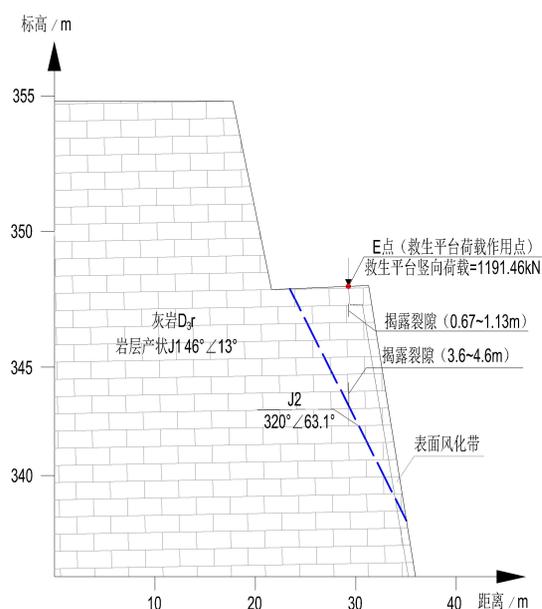


图7 A4救生平台基础岩体边坡稳定性计算模型

Fig. 7 Calculation model of rock slope stability of A4 rescue platform foundation

(3) 计算参数。综合现场勘查成果及室内试验及当地经验,边坡稳定计算参数取值如表2。

表2 边坡稳定性分析计算参数及取值依据

Table 2 Calculation parameters and parameter assignment basis of slope stability analysis

项目	参数取值	
岩体重度(KN/m <sup>3</sup> )	24.5	
E点竖向荷载范围(KN)	435.49 ~ 1191.46	
潜在滑面倾角及长度	J2	63.1°, 9.70m
裂隙面内聚力C(KPa)	J2	50
裂隙面内摩擦角( $^\circ$ )	J2	18

(4) 结论分析。计算结果见表3,根据计算分析,A4救生平台基础岩体边坡在施加荷载前(自然状态下),处于稳定状态;在施加A4救生平台竖向荷载后,

基础岩体边坡处于不稳定状态,存在安全隐患,在荷载作用下基础岩体易沿J2结构面发生滑移式危岩崩塌地质灾害。

表3 边坡参数及计算结果一览表

Table 3 Slope parameters and calculation results

工况	参数	裂隙倾角/ $^\circ$	稳定性系数 $K_f$	稳定性评价
工况1	J2滑面	63.1	1.89	稳定
工况2	J2滑面	63.1	0.89	不稳定
工况3	J2滑面	63.1	0.53	不稳定

### 3.2.2 有限元数值分析法

为进一步探究岩体的稳定性趋势,采用ABAQUS有限元法数值模拟软件对A4救生平台基础岩体稳定性进行数值模拟。

(1) 基本原理。根据现场勘查成果,岩体在受到基础荷载作用后,将产生压裂-剪切破坏,在数值模拟时采用Mohr-Coulomb破坏准则<sup>[15]</sup>。Mohr-Coulomb准则定义了主应力空间中的不规则六边形金字塔,其在屈服函数的导数中产生奇点,Mohr-Coulomb准则锥体压缩轴开口如图8。

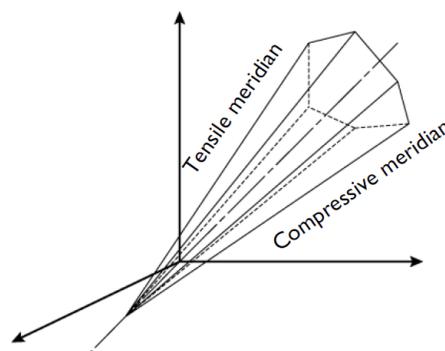


图8 Mohr-Coulomb准则锥体压缩轴开口

Fig. 8 Mohr-Coulomb criterion cone compression shaft opening

该准则认为当剪切应力和作用于材料中的任何元素的法向应力满足等式时发生失效,其方程如公式(2)所示。

$$|\tau| + \sigma \tan \phi - c = 0 \quad (2)$$

式(2)中: $\tau$ 为剪切力, $\varphi$ 为内摩擦角, $c$ 为粘聚力;根据莫尔圆,公式(3)可以写成:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (3)$$

(2) 计算参数。模拟中不考虑破坏过程中岩体强度的变化。计算参数如表4。

表 4 岩体物理、力学参数取值

Table 4 Values of physical and mechanical parameters of rock

参数名称	mass	
	坡体内部岩体	坡面表层岩体
重度(KN/m <sup>3</sup> )	24.5	23.0
杨氏模量(10 <sup>3</sup> MPa)	15	3.6
泊松比	0.25	0.32
内聚力(Mpa)	3.2	0.31
内摩擦角	40°	29°

(3)数值模拟。根据现场勘查结果及定性定量分析,原生节理J2对A4救生平台基础岩体稳定性起主要控制作用,因此,在本次数值模拟中,仅考虑原生节理J2裂隙影响;A4救生平台基础岩体边坡除坡面表层岩体风化切割严重,形成风化破碎带厚约0.5 m,其余部分岩体较完整;根据设计要求,A4救生平台基础表明E点仅受到A4救生平台竖向荷载1 191.46 KN,计算中仅考虑此荷载,具体数值模拟几何模型见图9。为保证计算精度,本此模拟采用自由三角形网格,裂隙部分采用加密网格划分。顶点单元数59,边界单元数950,单元数31 902,最小单元质量为0.534 6,网格划分见图10。

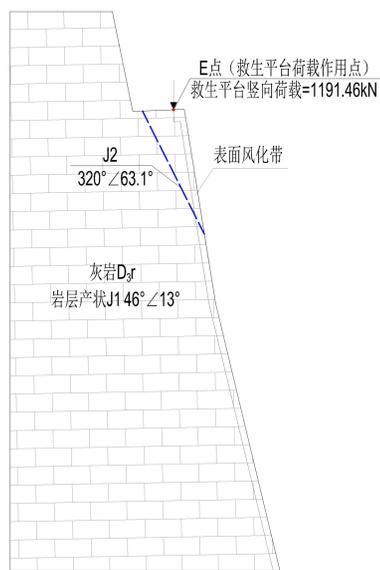


图 9 数值模拟几何模型

Fig. 9 Geometric model of numerical simulation

(4)模拟结果及分析。在未施加荷载时,坡体在自重应力作用下发生了弹性变形,图11为地应力作用下的山体应力云图及位移,从图中可以看出地应力最大值为0.86 MPa,山体在自重应力作用下的位移最大量为1 mm,在E点处位移为0.88 mm。

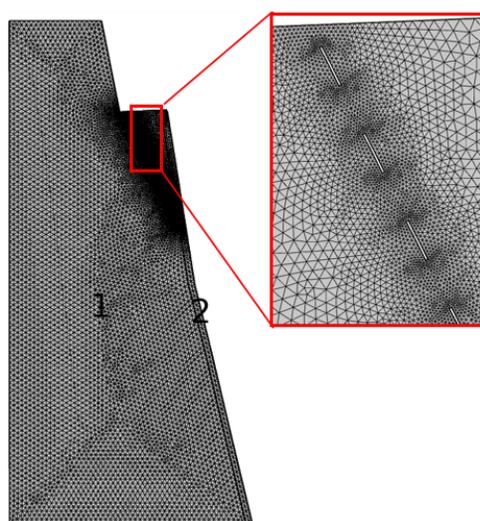


图 10 网格划分

Fig. 10 Mesh generation

由于E点下部岩体存在节理裂隙,具有明显的各向异性和较强的不均匀性,在荷载作用下出现应力重分布和应力集中现象。当E点在竖向荷载达到1 191.46 KN时,基础岩质边坡出现较大的塑性变形。图12为A4救生平台竖向荷载作用下的应力云图,从图中可以看出,应力集中出现在救生平台基础下方1.6 m左右,最大值为2.76 MPa。根据岩体力学强度准则,当重分布之后的应力值超过岩体强度时,岩体中原有的原生节理J2裂隙进一步扩展,同时衍生新的裂隙,直至形成贯通裂隙带。图13为损伤云图,云图显示,在A4救生平台竖向荷载作用下,E点下方岩体在未进入塑性状态(破坏)之前,将沿原生节理J2裂隙面产生破坏,导致危岩崩塌地质灾害发生。

通过坡体位移云图图14可知,A4救生平台基础岩体位移基本以节理J2裂隙面为分界,基础岩体位移主要发生在节理裂隙面北侧岩体部分,其余部位岩体位移相对很小或无位移发生,且越接近坡面风化带岩体和基础表面破碎岩体,位移越大,其原因是岩体强度及变形模量变小,在竖向荷载作用下,岩体出现不均匀压缩变形相对较大,但总体位移绝对值较小。在A4救生平台竖向荷载作用下,节理J2裂隙面上侧呈拉裂趋势较明显。

根据设计承载力要求,A4救生平台基础表面E点需承受最大竖向荷载特征值为1 191.46 KN,而综合以上的计算模拟分析结果表明,在不考虑降雨入渗、地震等因素的情况下,A4救生平台基础不满足承载力要求,在设计荷载作用下易产生变形破坏,发生危岩崩塌地质灾害,建设中需进行加固处理。

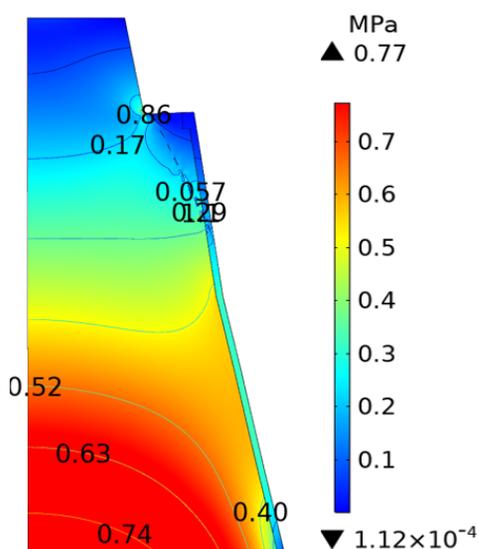


图11 山体地应力作用下的云图及位移

Fig. 11 Cloud chart and displacement of the slope under in-situ stress

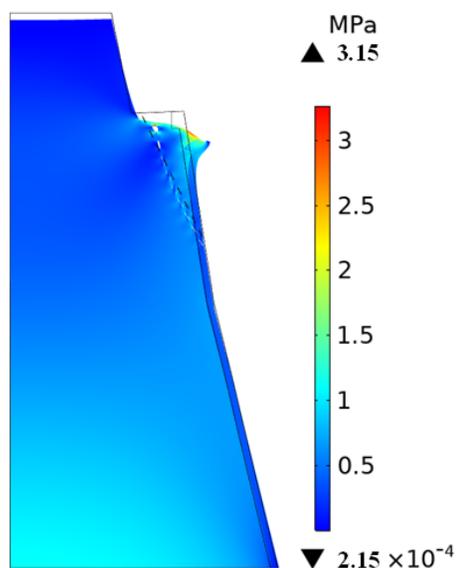


图12 A4救生平台竖向荷载作用下的应力云图

Fig. 12 Stress cloud diagram of A4 rescue platform under vertical load

#### 4 结论及建议

(1)通过赤平投影定性分析,节理J2裂隙面与坡面倾向相同,且倾角小于坡角,欠稳定,A4救生平台基础岩体边坡在节理J2的影响下处于欠稳定状态,在E点施加A4救生平台竖向荷载后存在安全隐患,在荷载和岩体自重作用下,极有可能沿节理J2结构面向下滑移,发生滑移式危岩崩塌地质灾害;

(2)通过极限平衡法定量计算,A4救生平台基础

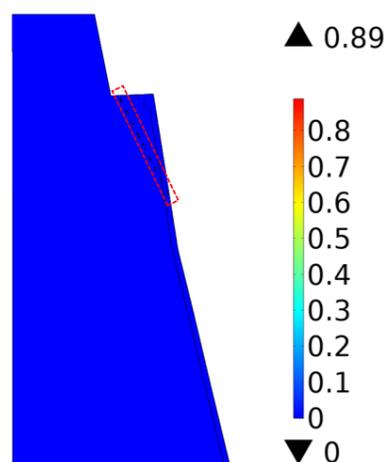


图13 E点下部坡体整体损伤云图

Fig. 13 Cloud chart of overall damage of slope at the lower part of point E

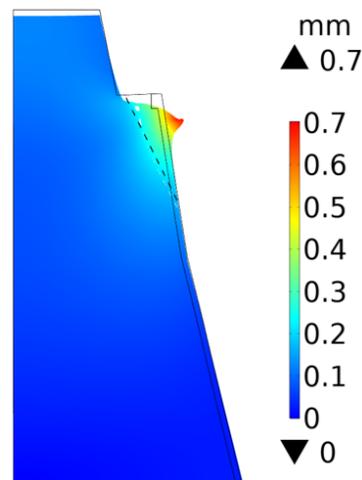


图14 坡体位移云图

Fig. 14 Cloud diagram of slope displacement

岩体边坡在施加荷载前(自然状态下),处于稳定状态;在E点施加A4救生平台竖向荷载后,处于不稳定状态,易发生滑移式危岩崩塌地质灾害;

(3)通过有限元数值模拟,E点在设计最大竖向荷载特征值1 191.46 KN的作用下,A4救生平台基础不满足承载力要求,基础岩体易发生变形破坏,导致危岩崩塌地质灾害,需进行加固处理;

(4)综上,E点在设计荷载作用下,A4救生平台基础岩体边坡处于不稳定状态,严重威胁桂林阳朔如意峰景区在建设中和建成运营后的人员、游客的人生安全和景区的财产安全,因此须对A4救生平台基础岩体进行有效加固处理,建议在A4救生平台架设之前采取锚索格构方式进行基础岩体加固,并对节理裂隙面、风化裂隙面进灌浆充填处理;同时减少施工爆破振动。

## 参考文献

- [1] 刘宝臣,潘宗源,郑金. 桂林市喀斯特危岩体发育特征及稳定性分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 183-189.
- [2] 许强,陈伟. 单体危岩崩塌灾害风险评价方法:以四川省丹巴县危岩崩塌体为例[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1039-1046.
- [3] 覃乙根,杨根兰,鲁鲲鹏,等. 贵州寨子危岩崩塌风险定量评价研究[J]. 人民长江, 2019, 30(10): 113-119.
- [4] 程鹏翔,李宗发. 贵州武陵山区中二叠统崩塌地质灾害形成机理研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 565-572.
- [5] 许腾晖,金文祥,孙书勤,等. 西藏紫金山危岩特征及稳定性和运动特性研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(1): 169-178.
- [6] 唐红梅,张金浩,陈洪凯. 亚剪滑动型危岩失稳破坏准则研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(5): 45-50.
- [7] 唐红梅,韩明明,王林峰. 基于AHP-Fuzzy法的灰岩低区崩塌体失稳危险性评价[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 1-7.
- [8] 陈健云,岳红原,徐强. 复杂环境下倾倒式危岩体的动力稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 1965-1974.
- [9] 陈鹏宇,曾红彪,师华鹏,等. 危岩稳定性评价的颗粒流断裂力学法[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(3): 87-95.
- [10] 何潇,陈洪凯,赵鹏,等. 长江巫峡岸坡座滑式危岩稳定性研究:以望霞座滑式危岩为例[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 411-418.
- [11] 刘伟鹏,毛邦燕,侯伟龙. 吉尔木隧道出口边坡赤平投影稳定性分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(10): 59-64.
- [12] 赵婷,王畅. 边坡稳定性分析方法及工程应用研究进展[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 196-203.
- [13] 陈权川,朱爱军,殷博,等. 缓倾顺向软弱夹层岩体边坡变形机理及稳定性研究[J/OL]. 水力发电: 1-8[2020-03-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20200318.1448.004.html>.
- [14] 陈亚飞,纪玉石,韩猛. 某露天矿南端帮边坡稳定性分析及治理措施[J]. 煤矿安全, 2019, 50(4): 241-244.
- [15] 袁海平,王金安,黄晖. 基于Mohr-Coulomb破坏准则的开采过程岩体稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2009, 29(6): 11-12, 25.

## Stability of foundation rock mass beneath the A4 rescue platform in the Ruyifeng scenic spot, Yangshuo, Guilin

XIE Yanhua<sup>1</sup>, ZHANG Binghui<sup>2</sup>, SUN Gangchen<sup>2</sup>, LIU Baochen<sup>2</sup>, CHEN Xuandong<sup>2</sup>, FAN Xindong<sup>3</sup>

(1. Guilin University of Aerospace Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Guangxi Guilin Hydrological Engineering Geological Survey Institute, Guilin, Guangxi 541002, China)

**Abstract** This work makes an assessment of the stability of the rock mass beneath the A4 rescue platform during the construction of the Ruyifeng scenic spot project in Yangshuo, Guilin. It builds on the combination of the methods of field surveys and theoretical analysis including stereographic projection qualitative analysis, the limit equilibrium method and finite element numerical simulation. The results show that the rock mass beneath the A4 rescue foundation is in an unstable state thus needs to be reinforced. Additionally, we puts forward the reinforcement treatment measures so as to provide theoretical support and scientific basis for the treatment of later possible collapse of the dangerous rock, which would be a certain reference for the stability research of similar rock masses in karst areas.

**Key words** dangerous rock mass, stability, limit equilibrium method, finite element simulation

(编辑 张玲)