

考虑节理裂隙的复杂岩质边坡稳定性控制技术

尹华东¹, 张道兵^{1*}, 熊慧灵², 石倩³, 胡阿平¹, 朱远嫒¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南安全技术职业学院 安全工程学院, 湖南 长沙 410151;
3. 绵阳城市学院 建筑工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 节理裂隙是影响边坡稳定性的重要因素之一, 为研究含有节理裂隙的岩质边坡稳定性, 以衡山县紫景轩边坡支护工程为研究背景, 采用定性和定量分析方法对该边坡的稳定性进行评价。定性分析揭示该边坡存在多组不利的岩层结构面、节理面和组合交线, 沿 YC5-J3, YC6-J5 和 YC9-J7 组合交线的稳定性最差; 定量分析表明该边坡支护前在自重及暴雨工况下处于不稳定-基本稳定状态。为此, 提出一种格构式锚杆(索)挡墙、挂网喷混、注浆钢花管和坡脚浆砌块石挡墙相结合的支护方案, 并辅以截排水工程以及监测措施。最后, 通过指定潜在滑裂面和自动搜索最危险滑面的方式, 采用理正岩土软件计算得出支护后的边坡稳定性系数满足规范要求。该支护方案能有效控制含有节理裂隙的岩质边坡的稳定, 可为类似的矿山边坡支护设计提供技术支撑。

关键词: 岩质边坡; 节理裂隙; 支护设计; 稳定性

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)03-0042-09

Stability Control Technology of the Complex Rock Slope Considering Joint Fissures

YIN Huadong¹, ZHANG Daobing¹, XIONG Huiling², SHI Qian³, HU Aping¹, ZHU Yuanlei¹

(1. School of Resources & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Safety Engineering, Hunan Vocational Institute of Safety Technology, Changsha 410151, China;

3. School of Architectural Engineering, Mianyang City College, Mianyang 621000, China)

Abstract: The joint fissure is one of the important factors that affect the stability of slopes. In order to study the stability of rock slopes with joint fissures, the supporting project of Zijingxuan slope in Hengshan County is taken as the research background, and the stability of the slopes is evaluated using qualitative and quantitative analysis methods. The qualitative analysis reveals that there are multiple groups of unfavourable rock stratum structural surfaces, joint surfaces, and combined intersection lines in the slope, and the stability is the worst along the combinational intersecting lines of the YC5-J3, YC6-J5, and YC9-J7. The quantitative analysis shows that the slope is in an unstable to basically stable state under the condition of the self-weight and rainstorm before supporting. For this reason, a support scheme is proposed, which is combined with the lattice anchor (cable) retaining wall, hanging net sprayed concrete, grouting steel floral tube, and slope foot slurry block stone retaining wall, supplemented by the drainage project and monitoring measures. Finally, the stability coefficient of the slope after support is calculated by the Lizheng geotechnical software to meet the specification requirements by specifying the potential slip surface and automatically searching for the most dangerous slip surface. The stability of rock slopes with joint fissures can be effectively controlled by this support scheme, and technical support for similar mine slope support designs can be provided.

Keywords: rock slope; joint fissure; support design; stability

收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 湖南安全技术职业学院应用技术专项课题 (AY24E005)

* 通信作者, E-mail: dbzhang@hnust.edu.cn

岩质边坡广泛存在于土木工程、采矿工程和交通工程等领域,保障边坡的稳定对工程建设和营运十分重要.对于含有节理裂隙的岩质边坡,其地质情况较复杂,节理裂隙的发育将严重影响边坡的稳定性,一旦发生滑坡和崩塌等地质灾害,治理难度将急剧加大且危害性极大.分析复杂地质条件下边坡稳定性是确定合理的边坡支护技术的关键,尤其对于岩体中富含节理裂隙的情况^[1-4].因此,研究含有节理裂隙的复杂岩质边坡的稳定性与支护技术具有重要的科研价值和工程意义.

近年来,对岩质边坡稳定性的研究已然硕果累累.张海娜等^[5]通过构建岩质边坡块状-弯曲倾倒破坏模式,采用极限平衡法分析了地震作用对岩质边坡稳定性和潜在破坏面的影响;代仲海等^[6]采用极限平衡法及强度折减技术,研究反倾岩质边坡滑动面的时空演化规律,发现其潜在破坏模式呈现剪切-张拉破坏;赵明华等^[7]基于极限平衡法和MSDP(Mises-Schleiche Drucker-Prager)准则,求解岩质边坡安全系数解析解,分析岩石拉压强度对岩质边坡安全系数的影响;ZHANG等^[8]结合极限分析上限法求解边坡稳定系数的上限解,分析了边坡坡角对稳定系数的影响;陈训龙等^[9]综合考虑强度参数的离散性和地震的时空效应,提出适用于顺层岩质边坡的可靠性分析方法;王安礼等^[10]通过RFPA2D-SRM模拟公路岩质边坡的失稳过程,发现边坡破坏时声发射能量呈现缓增-激增-平缓的变化规律;覃伟^[11]基于Navier-Stokes方程和极限平衡法,分析了充水隙宽对岩质边坡稳定性的影响.此外,大量学者为了防止岩质边坡出现滑坡、崩塌等事故,提出了许多行之有效的支护技术.XU等^[12]基于极限分析法研究抗滑桩对边坡的加固机理,探讨边坡加固时抗滑桩的适宜位置;熊慧灵^[13]分析了怀化鹤城高陡岩质滑坡的形成原因及诱发因素,提出边坡加固以及环境恢复的综合治理方案;孙伟峰^[14]针对永吉高速破碎岩质边坡,采用极限平衡法分析不同锚固方式作用下边坡的稳定性,提出以长度8 m的锚杆垂直于坡面布置的支护措施;姜华^[15]以衡邵高速公路顺层岩质边坡为例,采用数值模拟计算“微型桩+锚索”联合支护下的边坡安全系数,发现该支护方式有效提高了边坡的稳定性;古金伦^[16]采用极限平衡法计算公路岩质边坡不同剖面的安全系数,针对不满足稳定性要求的边坡,提出“抗滑桩+预应力锚索+锚杆格构梁”的联合支护方案.以上文献采用不同的理论和方法对岩质边坡的稳定性和支护技术展开研究,然而,对于富含节理裂隙的复杂岩质边坡研究甚少.因此,本文以衡山县紫景轩边坡支护工程为背景,采用赤平投影、指定潜在滑裂面以及自动搜索最危险滑面的方式,对含有节理裂隙的边坡的稳定性进行定性和定量分析,并提出合理的支护设计方案,以期为类似工程提供借鉴.

1 边坡工程概况和地质环境条件

1.1 边坡工程概况

衡山县紫景轩边坡工程场地位于衡阳市衡山县开云镇金峰村,东距解放路约200 m,北西与衡山大道直线距离约2 km.场地地貌单元属低山丘陵地貌,场地北、西侧为自然斜坡,东、南侧多已开辟为民居等建设用地,地势呈西高东低,地形坡度为 $18^{\circ} \sim 28^{\circ}$.现状条件下,由于建设场地对原始紫巾山体进行开挖,在建设场地北侧及西侧形成了高10~20 m、坡角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的人工边坡,边坡总长约246 m,发育多处崩塌及滑坡.因边坡组成主要为软质岩石,节理裂隙极发育,岩体极破碎,且多为顺向或斜向坡,稳定性差,又因场地西侧及北侧边坡附近现状标高较设计高程高2~3 m,工程建设需进一步下挖,可能加剧现状滑坡及崩塌,且建筑物距离边坡坡脚最近处约1 m,建设工程亦可能遭受滑坡及崩塌等地质灾害的影响,严重威胁坡底工程建设安全和坡顶电塔运营安全,进而造成不必要的经济损失和社会影响.边坡场地典型滑坡和崩塌现状如图1所示.

1.2 地层岩性

边坡场地勘探深度范围内,揭露的地层有耕表土(Q_4^{pd})、粉质黏土(Q_4^{cl})、强风化砂岩(Pt)、中风化炭质灰岩(D),各岩土体的主要特征从上而下描述:

- 1) 耕表土(Q_4^{pd}):灰褐色,松散,稍湿,主要由黏性土组成,含大量植物根系,层厚0.5~1.2 m.

2) 粉质黏土(Q_4^{el}):红色、黄褐色,硬塑状,含少量粗砂及石块,块径10~40 cm,捻面略有砂感,稍有光泽,局部网纹状结构,层厚2.10~12.90 m.

3) 强风化砂岩(Pt):黄褐色,原岩结构基本破坏,节理裂隙发育,岩质软,岩芯破碎,呈碎块状,局部砂土状,手捏易碎,浸水易崩解、软化,局部夹灰白色石英脉,揭露层厚6.50~39.00 m.

4) 中风化炭质灰岩(D):灰黑色,隐晶质结构,中层状构造,碳质含量较高,节理裂隙发育,裂隙面附铁锰质及方解石脉,岩芯较破碎,呈碎块状、短柱状,上部岩芯较破碎,揭露层厚2.20~26.10 m.



(a) 滑坡现状



(b) 崩塌现状

图1 地质灾害现场

1.3 地质构造

边坡区域岩层产状变化较大,存在一条次级断层构造,走向 55° ,倾向南东,属压扭性左行逆冲断裂.受断层影响,边坡区域地层产状变化较大,构造节理极发育,节理大致可分为2组,一组为大致平行断层走向,另一组走向与断层走向呈锐角相交,锐角指向另一盘的相对运动方向.

边坡区域内地质构造对地质灾害影响较大,区内人工边坡处所发育的几处崩塌、滑坡均受构造节理面、组合节理面或断层面控制.边坡场地内岩体基本质量等级为Ⅲ类,局部Ⅳ类,岩体产状主要为 $110^\circ \angle 28^\circ \sim 30^\circ$,场地北侧岩层倾角变陡,产状为 $105^\circ \angle 50^\circ$.此外,受临近构造影响,边坡中存在3组主要结构面产状,分别为 $350^\circ \angle 49^\circ$, $330^\circ \angle 40^\circ$ 和 $225^\circ \angle 41^\circ$,结构面宽度为3~5 mm,泥质充填.

1.4 边坡区域地质灾害危险性评估

现状条件下,边坡区域内现有地质灾害强发育,发育的5处灾害点均位于人工边坡上,坡度均大于 45° ,当边坡坡度在 $45^\circ \sim 55^\circ$ 时,主要引发顺向滑坡,而坡度大于 55° 时,则主要引发坠落式或推移式崩塌,破坏范围主要受结构面控制,一般局限于坡面附近1~3 m,局部可达4~5 m,破裂面总体大致与坡面平行,可见其破坏机理主要为边坡开挖过陡而出现卸荷作用所致.现状评估,其中有1处崩塌危险性大,其余3处崩塌及1处滑坡的危险性均为中等.评估区其他各类地质灾害不发育,危险性小.

2 边坡稳定性分析

本边坡地质灾害诱发因素中,自然因素主要为大气降水造成地下水位短期上升,而人为因素主要为开挖扰动.根据边坡勘察结果及工程实际情况,本边坡共选取8个最不利计算剖面,并考虑一般工况(天然状态)和暴雨工况(暴雨、连续降雨状态)下边坡的稳定性计算.边坡平面布置及典型计算剖面如图2所示.

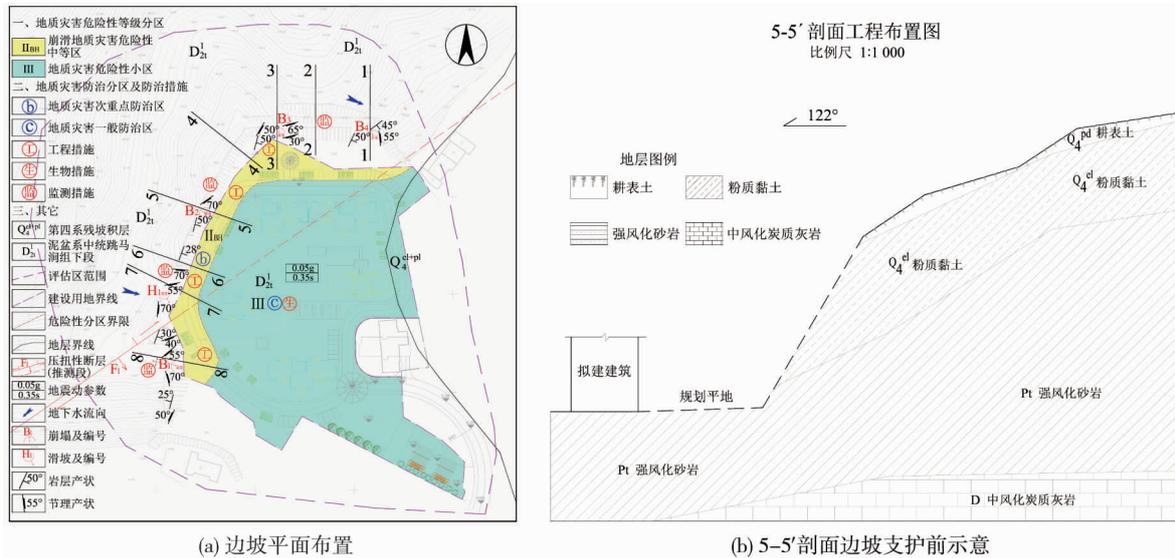


图2 边坡平面布置及典型计算剖面

2.1 定性分析

由于本边坡节理裂隙极发育,存在多组岩层结构面和节理面,且结构面和节理面交叉发育,因此,首先采用赤平投影对边坡稳定性进行定性分析.根据图2中边坡节理裂隙发育及分布情况,本次定性分析选取8个最不利计算剖面中的7个典型剖面进行研究,赤平投影分析结果如图3所示.由图3a可得:1-1'剖面中所有岩层结构面和节理面都与开挖面大角度相交,坡体沿岩层结构面和节理面顺层滑动的可能性较小;结构面组合交线中,YC1-YC2组合交线的倾向与坡面倾向夹角较小,倾角小于开挖面坡角且大于自然坡角,为较不稳定结构,沿交线的滑动可能性较大.由图3b和图3e可得:2-2',6-6'剖面中所有岩层结构面都与开挖面大角度相交,岩层结构面倾向与边坡倾向正交,结构面稳定性好,边坡没有沿结构面顺层滑动的可能性;YC3-YC4和YC7-YC8结构面组合交线的倾向与坡面相反,坡体不沿交线滑动,但两组结构面交叉切割岩体,导致岩体较为破碎,切坡后受节理裂隙及风化作用影响,可能形成孤立岩块,产生小型崩塌.由图3c可得:3-3'剖面中J3节理面与开挖面夹角小于30°,属外倾结构面,且J3节理面的倾角小于自然坡角和开挖面坡角,因此J3节理面不稳定;J4节理面也属外倾结构面,但J4节理面的倾角大于开挖面坡角,因此J4节理面稳定性相对较好,边坡沿节理面滑动的可能性较小;分析组合结构面的影响,其中沿YC5-J3和J2-J3组合交线滑动的可能性较大.由图3d可得:5-5'剖面中YC6岩层结构面与开挖面夹角较小,属外倾结构面,边坡沿结构面滑动的可能性较大;分析结构面组合交线的稳定性,其中沿YC6-J5组合交线滑动的可能性较大.由图3f可得:7-7'剖面中YC9岩层结构面和J8节理面与开挖面夹角较小,属外倾结构面,其中J8节理面倾角大于开挖面坡角,J8节理面稳定性相对较好,而YC9岩层结构面倾角小于开挖面坡角且大于自然坡角,为较不稳定结构面,边坡沿YC9岩层结构面滑动的可能性较大;同时分析结构面组合交线的稳定性得出,YC9-J6,YC9-J7和J6-J7组合结构面的交线外倾,均为不利组合交线,稳定性较差.由图3g可得:8-8'剖面中J9和J10节理与边坡的倾向夹角较大,为稳定结构面;J11节理面与坡面的夹角较小,属外倾结构面,但节理面的倾角大于开挖面坡角,节理面稳定性相对较好,边坡沿节理面顺层滑动的可能性较小;分析结构面组合交线的稳定性得出,沿J9-J11组合交线滑动的可能性较大.

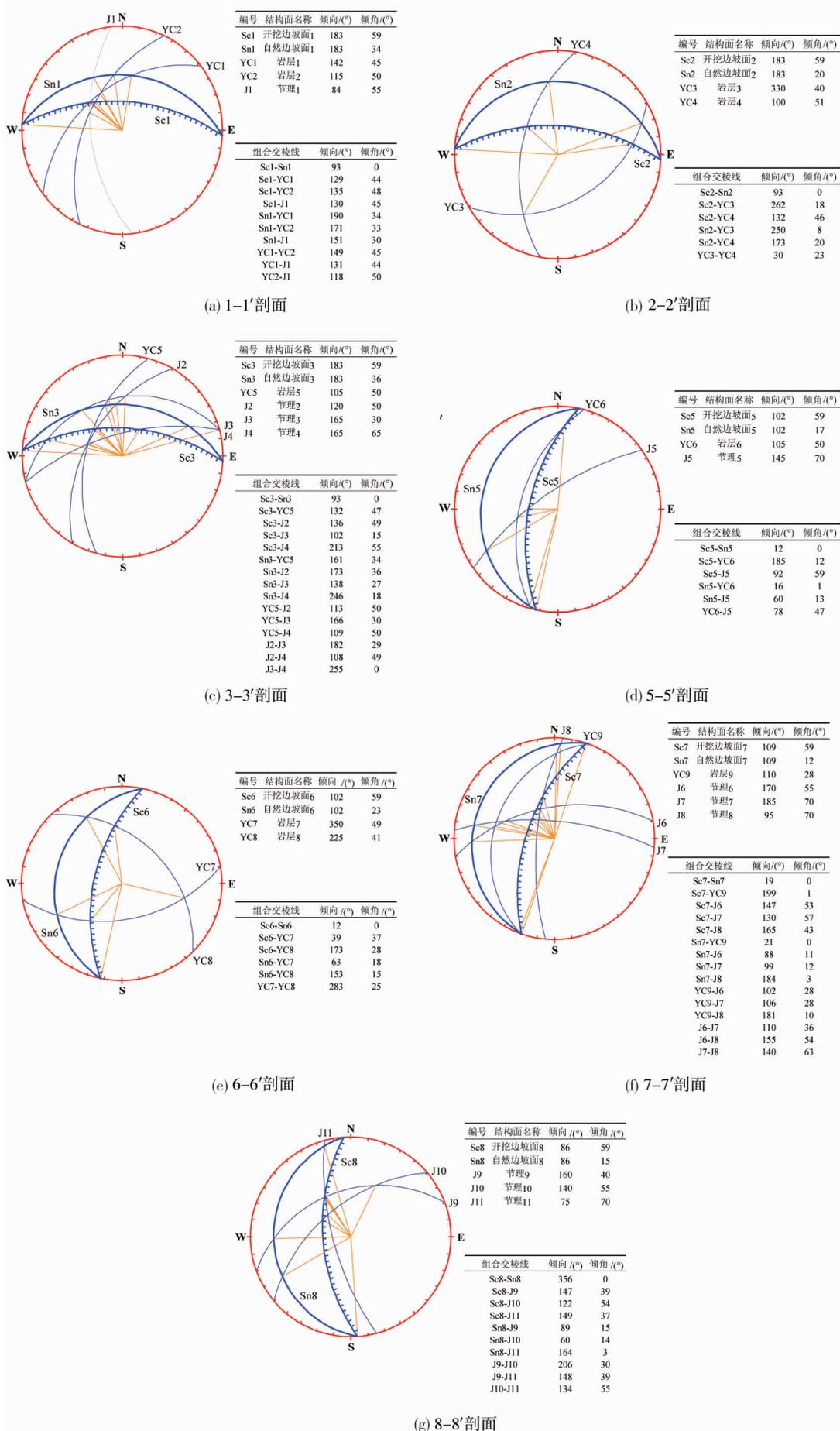


图3 赤平投影法分析

2.2 定量分析

结合该边坡实际情况,本工程定量分析采用折线滑动法和圆弧滑动法进行稳定性计算,边坡主要岩土层以及支护计算所需的参数如表1所示.本次定量分析首先针对上述定性分析中3-3'剖面、5-5'剖面以及7-7'剖面中存在多组不利岩层结构面、节理面和组合交线的情况,根据指定的不利折线形滑面,采用北京理正岩土计算软件进行分析,并取最不利的稳定性计算结果.计算结果表明:3-3'剖面中稳定性最差的结构面交线为YC5-J3组合交线,5-5'剖面中稳定性最差的结构面交线为YC6-J5组合交线,7-7'剖面中稳定性最差的结构面交线为YC9-J7组合交线.

表1 设计支护计算所需的主要参数

岩土名称	重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$		抗剪强度				锚固体极限黏结强度标准值/kPa	承载力特征值/kPa
			黏聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$			
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和		
耕表土	18.6	19.0	6.0	5.0	5.0	4.0	20	
粉质黏土	20.0	20.5	24.2	22.5	19.6	18.4	60	200
强风化砂岩	21.9	22.6	31.5	29.5	34.0	32.8	210	300
中风化炭质灰岩	26.6	27.0	55.0	52.0	36.0	34.0	500	800
1-4剖面结构面	15.3	15.8	23.0	21.2	23.8	22.4		
5-8剖面结构面	15.3	15.8	21.2	19.2	22.4	21.4		

考虑边坡原岩结构基本破坏,节理裂隙发育,岩体破碎,坡体极可能出现崩塌和圆弧滑动,对本边坡进行多种不同类型的稳定性分析非常必要,因此,采用北京理正岩土计算软件,根据圆弧滑动法对边坡支护前的整体稳定性进行计算,且计算过程中考虑地下水对边坡稳定性的影响,边坡支护前的稳定性计算结果见图4.结合《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)第5.3.1条和第5.3.2条有关边坡稳定性状态的划分规定^[17],分析图4可知:该边坡中5-5'剖面、6-6'剖面在一般工况和暴雨工况下均处于不稳定状态;1-1'剖面在一般工况下处于基本稳定状态,在暴雨工况下处于不稳定状态;其余剖面在两种工况下均处于基本稳定状态,但暴雨工况下的边坡稳定性系数 F_s 明显减小,以4-4'剖面为例,其一般工况下的边坡稳定性系数 $F_s = 1.206$,暴雨工况下的边坡稳定性系数 $F_s = 1.102$,边坡稳定性系数 F_s 相对减小8.6%.上述结果进一步论证了该边坡在天然状态下就已发生滑坡和崩塌等地质灾害,与现场实际较为契合.同时揭示该边坡在大气降雨的影响下存在较大的安全隐患,如不及时支护,将有加剧滑坡和崩塌的可能性.

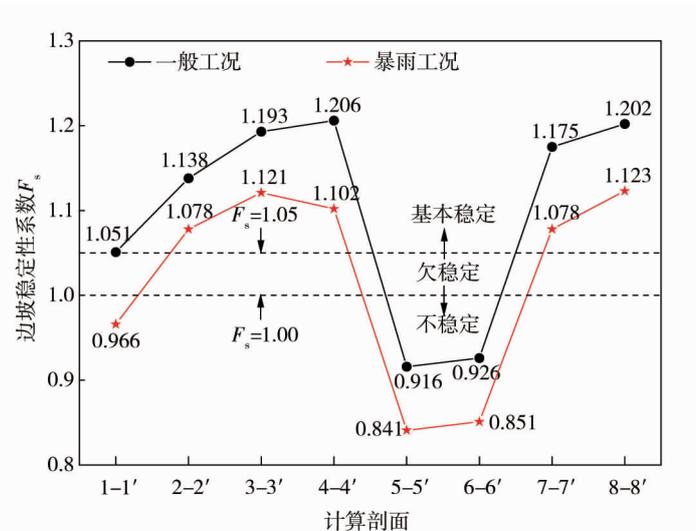


图4 2种工况下不同剖面的边坡稳定性系数变化曲线

在暴雨工况下处于不稳定状态;其余剖面在两种工况下均处于基本稳定状态,但暴雨工况下的边坡稳定性系数 F_s 明显减小,以4-4'剖面为例,其一般工况下的边坡稳定性系数 $F_s = 1.206$,暴雨工况下的边坡稳定性系数 $F_s = 1.102$,边坡稳定性系数 F_s 相对减小8.6%.上述结果进一步论证了该边坡在天然状态下就已发生滑坡和崩塌等地质灾害,与现场实际较为契合.同时揭示该边坡在大气降雨的影响下存在较大的安全隐患,如不及时支护,将有加剧滑坡和崩塌的可能性.

3 边坡支护设计方案和稳定性验算

3.1 支护设计方案介绍

本边坡支护采取格构式锚杆(索)挡墙、挂网喷混、注浆钢花管、浆砌块石挡墙及截排水相结合的方案,并辅以监测措施.在坡体上采用锚杆(索)支护可以有效提高坡体的整体稳定性,同时,长短锚杆(索)间隔布置也可以避免群锚效应;通过在坡面上挂网喷射混凝土,可以有效避免雨水渗透到坡体,也

可对坡面破碎岩体起到一定的固定作用;在坡体上设置注浆钢花管可对节理裂隙发育的破碎岩体发挥注浆加固的作用,浆液入渗并充填节理裂隙可以有效提高结构面的抗剪强度,增强坡体稳定性;坡脚修建浆砌块石挡墙可以发挥护脚的作用,避免雨水对坡脚的冲刷,同时,在挡墙后种植迎春花也能发挥坡脚绿化的作用;通过设置截排水沟、泄水孔、急流槽和挡墙后盲沟等排水设施,全方位、立体化减少雨水对边坡的影响,能有效避免坡体失稳;通过布设监测点对边坡进行监测预警,形成信息化施工与动态设计相结合的方式,保障边坡在施工期间和使用过程中的安全.本边坡支护设计方案选取5-5'剖面作为典型示意,如图5所示.

3.2 边坡具体支护措施

本边坡根据工程实际按二级放坡,设计坡比均为1.0:0.6,修坡完成后在坡体上设置格构梁+锚杆(索)+注浆钢花管,格构梁纵横正交呈“井”字形,锚杆(索)设置在纵横梁的十字交点上,其竖直方向上部分锚杆(索)间隔布置,具体布置详见图5.锚杆(索)的倾角均为15°.锚杆为全长粘结型锚杆,采用直径32mm的Ⅲ级钢筋(HRB400),锚杆横向间距为2.0m,竖向间距为2.0m或4.0m,锚杆长度分别取12,18,20m,钻孔直径150mm.锚索采用4束15.2mm的钢绞线,横向间距为2.0m,竖向间距为4.0m,总长为20m和24m,对应的自由段长分别为7m和8m,锚固段长为13m和16m,钻孔直径150mm,锚索自由段采用除锈、刷沥青船底漆和沥青玻纤布缠裹二层进行防腐蚀处理.注浆钢花管采用Q345级无缝钢管,钢管直径76mm,壁厚4mm,注浆钢花管排间距为0.5m,水平间距为1.0m,呈梅花形布置,采用成孔插管注浆,孔径150mm;平台处的两排注浆钢花管长度为9m,与900mm×500mm的格梁基础Ⅱ相连;坡顶的两排注浆钢花管长度为12m,与1000mm×500mm的压顶梁相连.格构梁采用C30混凝土现浇成型,截面尺寸为400mm×500mm,坡脚格构梁与700mm×500mm的格梁基础Ⅰ相连,平台处格构梁与格梁基础Ⅱ相连,格梁基础均为条形基础.坡面格梁间采用挂网喷面防护,挂网钢筋为直径8mm的Ⅰ级钢筋(HPB300),钢筋间距为200mm×200mm,喷面为C25细石砼150mm厚.同时,在坡脚设置墙高1.5m,底宽0.5m,顶宽0.35m的浆砌块石挡墙,并在墙后分层填土种植植被绿化.坡顶设置500mm×500mm的砖砌截水沟,坡脚和放坡平台处设置500mm×500mm的砖砌排水沟,坡体上设多排泄水孔,泄水孔采用DN75的PVC管,间隔2.0m布置.

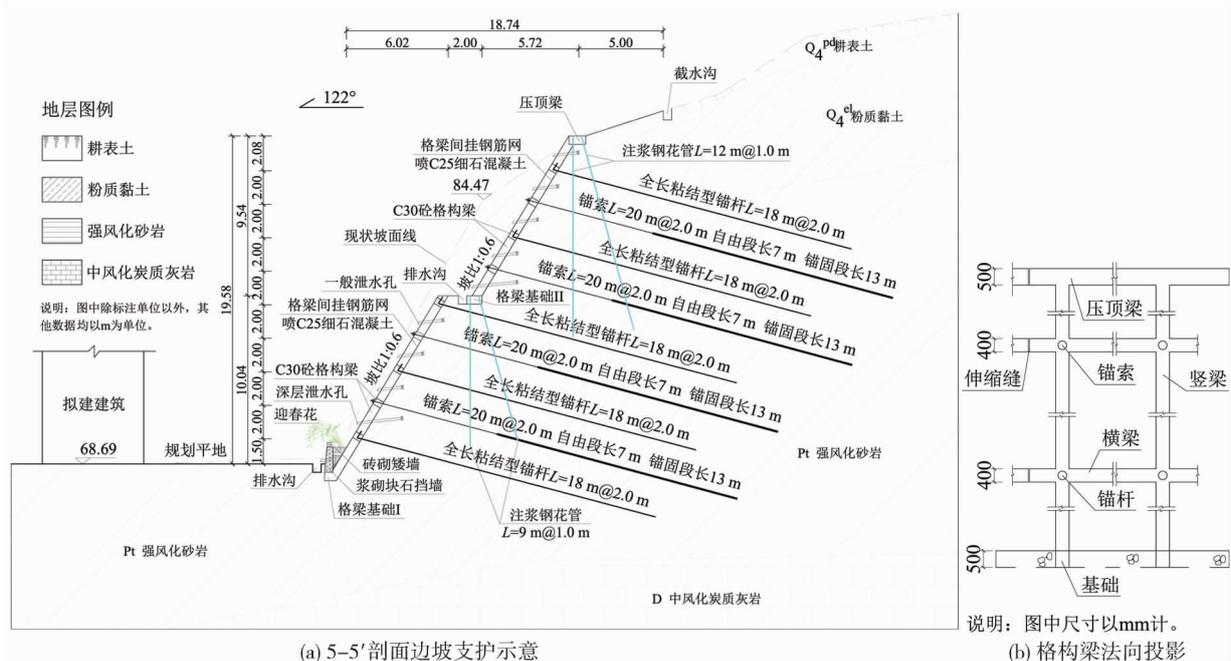


图5 边坡支护设计方案

3.3 边坡支护后的稳定性计算与分析

本边坡支护后的稳定性分析针对有多组不利岩层结构面、节理面和组合交线的情况,计算考虑最不利结构面和组合面交线的稳定性,采用指定潜在滑裂面的方式,即假设结构面(滑裂面)为折线.结合上述的定性分析,可以发现1-1'剖面、3-3'剖面、5-5'剖面、7-7'剖面和8-8'剖面存在最不利的结构面和组合面交线,采用北京理正岩土计算软件按指定潜在滑裂面的方式计算,结果如图6a所示,从图6a中可以看出,支护后一般工况下边坡稳定性系数 F_s 最小值为1.374,暴雨工况下边坡稳定性系数 F_s 最小值为1.263.同时,结合本边坡工程实际,进一步采用北京理正岩土计算软件按自动搜索最危险滑面(圆弧滑动法)的方式对边坡支护后的稳定性进行分析,计算结果如图6b所示,从图6b中可知,支护后一般工况下边坡稳定性系数 F_s 最小值为1.362,暴雨工况下边坡稳定性系数 F_s 最小值为1.264.综上所述,边坡支护后的稳定性系数均大于规范要求的一级边坡稳定安全系数(一般工况下边坡稳定安全系数 $F_{st}=1.35$,暴雨工况下边坡稳定安全系数 $F_{st}=1.20$),设计方案符合要求.

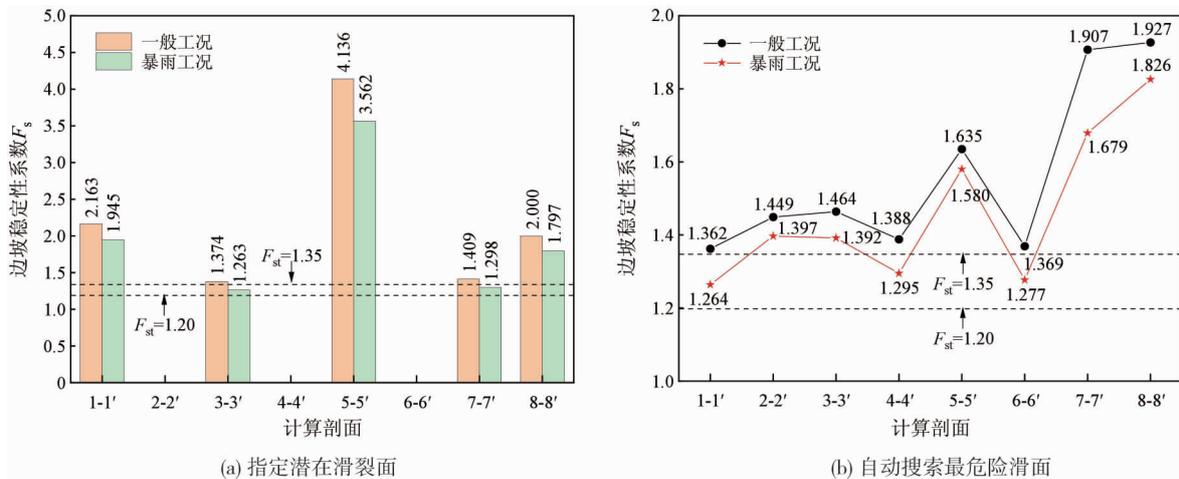


图6 支护后边坡稳定性系数

4 结论

1) 节理裂隙发育导致本边坡出现多处崩塌,边坡后续沿J3节理面、YC6和YC9岩层结构面以及YC1-YC2, YC5-J3, J2-J3, YC6-J5, YC9-J6, YC9-J7, J6-J7和J9-J11组合交线滑动的可能性较大,其中,稳定性最差的为YC5-J3, YC6-J5和YC9-J7组合交线.

2) 原始边坡在节理裂隙、大气降水以及人为开挖扰动影响下处于不稳定-基本稳定状态,且暴雨工况下边坡稳定性系数明显减小.

3) 采用“格格式锚杆(索)挡墙+挂网喷混+注浆钢花管+浆砌块石挡墙”联合支护后,一般工况下的边坡稳定性系数最小值分别为1.374和1.362,暴雨工况下的边坡稳定性系数最小值分别为1.263和1.264,均满足规范要求.

4) 降雨状态下含节理裂隙的边坡失稳表现为渐进性破坏,故对边坡采取截排水和监测措施尤为重要.

参考文献:

- [1] 周子涵,陈忠辉,包敏,等.顺倾断续节理岩质边坡的稳定性突变[J].煤炭学报,2020,45(增刊1):161-172.
- [2] 卞康,刘建,胡训健,等.含顺层断续节理岩质边坡地震作用下的破坏模式与动力响应研究[J].岩土力学,2018,39(8):3029-3037.

- [3] 赵伟华,黄润秋.基于SRM的裂隙岩质边坡潜在失稳路径分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1843-1855.
- [4] 蒋明镜,江华利,廖优斌,等.不同形式节理的岩质边坡失稳演化离散元分析[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(2):167-174.
- [5] 张海娜,陈从新,郑允,等.地震作用下的层状岩质边坡块状-弯曲倾倒解析分析[J].中国公路学报,2018,31(2):75-85.
- [6] 代仲海,胡再强,尹小涛,等.工程荷载作用下缓倾角反倾似层状岩质边坡变形稳定性分析[J].岩土力学,2018,39(增刊1):412-418.
- [7] 赵明华,刘菁钰,赵衡,等.基于MSDP准则的岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):10-18.
- [8] ZHANG B, JIANG Y, CHENG H, et al. Upper bound analysis of the stability of 3D slopes in the saturated soft clay subjected to seismic effect[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 795854.
- [9] 陈训龙,龚文惠,钟旭晗,等.水平和竖向地震作用下顺层岩质边坡动力可靠性分析[J].土木工程学报,2017,50(10):91-98.
- [10] 王安礼,邬忠虎,娄义黎,等.公路岩质边坡稳定性的数值模拟分析[J].科学技术与工程,2021,21(22):9577-9582.
- [11] 覃伟.充水隙宽对顺层岩质边坡稳定性的影响[J].人民长江,2021,52(7):185-191.
- [12] XU J S, LI Y X, YANG X L. Stability charts and reinforcement with piles in 3D nonhomogeneous and anisotropic soil slope[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2018, 14(1): 71-81.
- [13] 熊慧灵.高陡岩质滑坡治理及环境恢复技术[J].矿业工程研究,2021,36(2):42-47.
- [14] 孙伟峰.永吉高速沿线破碎岩质边坡锚杆支护方式研究[J].公路工程,2017,42(4):271-274.
- [15] 姜华.微型桩-锚索联合支护顺层岩质边坡的稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(9):2184-2191.
- [16] 古金伦.公路岩质边坡支护施工技术[J].工程建设与设计,2021(5):134-136.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.