

工程地质勘察中结构面特征的研究及应用

Research and Application of Structural Plane Feature in Engineering Geological Investigation

师华鹏, 占建琴, 石盼, 农丽婷(广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530029)

摘要:本文以龙寺 CIV-1 边坡为例,对结构面从数据采集、分析、空间分布模型、结构特征等方面进行了分析研究,得到了控制性结构面的分布、产状及空间组合关系等;并基于此,对危岩体的破坏模式进行了初判,然后利用极限平衡理论和 UDEC 软件分别对不同工况下不同破坏模式的危岩体进行稳定性分析。结果表明各工况对边坡稳定性影响程度为组合工况 > 暴雨工况 > 地震工况,且理论计算与数值分析的结果均验证了利用结构面空间组合关系对危岩体稳定性的初判,最后提出了基于结构面特征划分坡体结构区的加固优化方案,为以后类似工程治理提供借鉴。

关键词:控制性结构面;空间组合关系;破坏模式;稳定性分析;加固优化方案

中图分类号: U412.22; P642.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)04-0006-09

Abstract: Structural planes often control the stability of rock slope directly, so how to obtain, analyze and use the information of structural planes is very important. Taking Longsi CIV-1 slope as an example, the structural planes are analyzed and studied from data collection, analysis, spatial distribution model, structural characteristics and other aspects, and the distribution, attitude and spatial combination of the controlling structural planes are obtained. Based on this, the failure modes of dangerous rock body are preliminarily judged, and then the stability of dangerous rock body with different failure modes is analyzed by using limit equilibrium theory and UDEC software respectively. The results show that the influence degree of each working condition on slope stability is as follows: Combined condition > rainstorm condition > earthquake condition, and the results of theoretical calculation and numerical analysis verify the preliminary judgment of the stability of dangerous rock body by using the spatial combination relation of structural plane; Finally, the reinforcement and optimization scheme of dividing slope structure area based on the characteristics of the structural plane is proposed, which provides some reference for similar engineering treatment in the future.

Key words: controlling structural plane; spatial combinatorial relation; failure mode; stability analysis; reinforcement optimization scheme

1 前言

随着我国城镇化率的不断提高,西部地区出现了大量的高陡边坡,尤其是在公路、铁路等线状工程两侧,如何保证边坡在建设期和运营期的稳定是十分重要的。大量工程实践表明,结构面直接控制着岩质边坡的稳定性^[1],如 2003 年千江坪滑坡、2015 年陕西山阳滑坡以及 2018 年西藏白格滑坡等大型岩质滑坡。因此,在工程地质勘察期间,开展准确且详细的结构面采集及分析工作是十分必要的,这对后续工程设计施工有着现实指导意义。

目前,工程实践中最常用的岩体结构面信息采集方法是在天然露头、隧道或平硐中开展的人工接

触测量法,也常在工程钻探时通过钻孔电视和物探测井等手段对结构面数据进行采集^[2],以减少人工测量时的主观性,但该方法解译难度大,难以广泛应用。

随着测量技术的快速发展,三维激光扫描、数字近景摄影和无人机测量技术等非接触测量方法也逐渐被应用到了实际工程中^[3-8]。李胜等(2022)利用改进的 DBSCAN 算法得到了一种可靠高效的岩体结构面智能识别方法^[9],王述红等(2022)利用 HDBSCAN 的算法实现了对岩体结构面产状的快速识别及分组^[10];马显东等(2022)通过 Hough 算法和 FCM 算法对电云数据聚类分析后,再通过用

[作者简介] 师华鹏(1988—),男,汉族,内蒙古乌拉特前旗人,工程师,从事岩土体的工程稳定性及地质灾害分析与防治。

[基金项目] 广西重点研发计划(桂科 AB22035024),广西重点研发计划(桂科 AB22080024)

[引用格式] 师华鹏,占建琴,石盼,等.工程地质勘察中结构面特征的研究及应用[J].中国矿山工程,2024,53(4):6-14.

Fast-Marching 算法得到了崩塌危岩体的空间形态特征,为危岩体失稳破坏模式的判断和防治措施提供参考^[11];陆三福等(2014)将三维激光扫描技术与结构面网络模拟技术相结合,以某大桥桥址的岩体调查为例,阐述了该方法在边坡岩体结构特征分析中的应用^[12];王明东(2023)通过过三维激光扫描技术获取研究区边坡点云数据,依此建立了边坡的三维仿真地质模型,分析评价了高陡岩质边坡的稳定性^[13];邓一(2019)将三维点云逆向建模的方法运用到数值模拟软件,进而对杨家山边坡的稳定性进行了分析评价^[14]。可以看出,近年学者在进行稳定性分析评价时,仅采用非接触测量的方式获取结构面信息,并未对结构面的结构特征、空间分布模型等方面进行分析;另外,非接触测量的方式价格昂贵,易受植被等因素影响而出现大量扫描盲区,存在丢失部分优势结构面信息的风险。基于此,本文以龙寺 CIV-1 矿山边坡为例,采用非接触测量和人工接触测量相结合的手段来获取完整真实的结构面信息,并从结构面数据统计、结构特征、空间分布模型等多个角度进行详细分析,最后阐述了其在危岩体破坏模式分析、稳定性分析以及坡体优化设计中的应用,为同类工程建设提供借鉴。

2 工程概况

龙寺矿山由于计划经济时期胡乱无序地露天开采,矿区周边引发了诸多环境地质问题。其中,未按台阶开挖的高陡边坡在降雨或地震作用下随时可能发生崩塌灾害,急需治理。CIV-1 边坡经过人工开挖后,形成了高约 105 m,坡度 75°~85°的圈椅状高陡边坡。坡体岩性主要为浅灰色~灰黑色的中厚层状奥陶系灰岩,由于受断层等构造影响,坡内岩体裂隙发育,且在坡向 190°的坡面形成了较多块状危岩体,具体如图 1 所示。

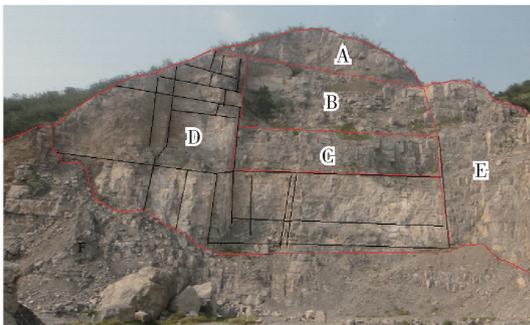


图 1 CIV-1 边坡开挖情况

3 结构面参数的采集

3.1 人工接触测量法

人工接触测量法主要以罗盘和皮尺作为测量工具,具有简单易操作、对接触的结构面可一一测量等优点。在人工获取结构面信息前,应首先对边坡存在的长大控制性节理面进行观察,忽略仅对局部稳定性有影响的 V 级结构面,避免在测量过程中因微小结构面的统计而增加大量工作。由于该边坡下部被崩塌体覆盖,中上部较陡,故于附近露头测量结构面,测量结果见表 1。

表 1 结构面测量情况表

地点	岩性	测线走向	结构面条数
CIV-1 边坡	灰岩	330°	109

3.2 三维激光扫描测量法

本文采用 ILRIS-3D 三维激光扫描仪。它以脉冲激光测距法为作业原理,进而获取岩体浅表部的扫描点云图像,然后使用 PolyWorks 8.0 软件进行数据处理,进而获到结构面产状参数和结构面的总条数。由于 CIV-1 边坡范围大,无法完成对边坡的一次性扫描,故从三个不同方向对边坡进行扫描,扫描完成后,对初始的点云数据通过进行抽稀、降噪、拼接以及坐标转换等处理方式来获取边坡的点云图,具体如图 2 所示;然后根据 Ployworks 软件的 Plane 工具对结构面进行拟合,最后利用结构面自动生成程序获取结构面的产状,结构面的拟合如图 3 所示。

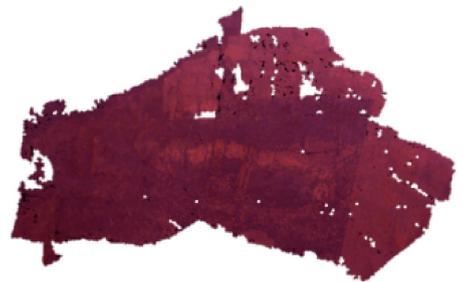


图 2 结构面点云图

4 结构面统计分析

4.1 人工测量数据的统计分析

根据测线法现场测量所得到的结构面倾向、倾角的数据,采用 Dips 进行分析,具体如图 4、图 5 所示。

从图 4 的等密度图可以看出,边坡主要存在五组优势结构面,其中四组陡倾角结构面,一组缓倾角

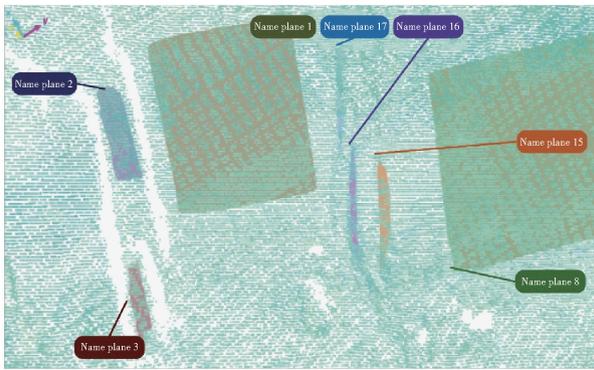


图3 结构面拟合

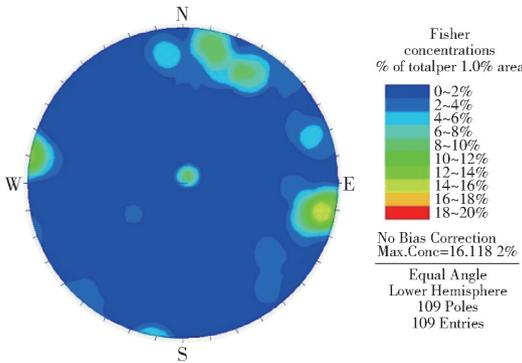


图4 结构面等密度图

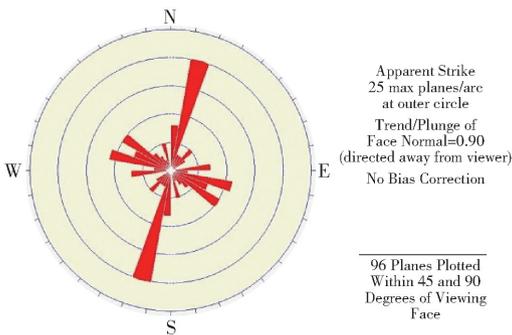


图5 结构面走向玫瑰花图

结构面;而图5中走向玫瑰花图却显示边坡存在两组优势结构面,这表明坡体内的四组陡倾结构面为两组“X”共轭结构面以及缓倾角结构面走向与其中一组共轭陡倾角结构面走向必然同向;根据现场调查,场地内岩层产状近似水平,等密度图圆心处的投影反应了岩层产状的情况。由此得出优势结构面和岩层产状,具体见表2。

4.2 三维激光扫描数据的统计分析

本文利用 Plane 工具对三维激光扫描数据进行了拟合,得到大量几厘米到几十米不等的结构面。由于结构面尺寸的不同,对边坡稳定性的影

表2 优势结构面与层面产状

优势结构面	层面
R1	21° ∠ 81°
R2	281° ∠ 81°
R3	100° ∠ 85°
R4	195° ∠ 87°
	210° ∠ 6°

响程度不尽相同,往往几米到几十米的控制性结构面构成了边坡失稳的边界,而厘米级的非控制性结构面往往多发育于岩块内部,影响其完整性,具体如图6所示。

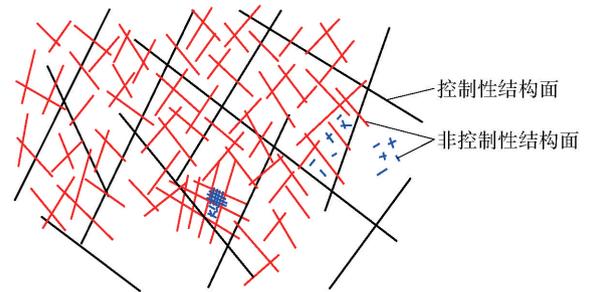


图6 边坡控制性结构面筛选示意图

基于上述原则,在拟合结果中选取了28条控制性结构面,具体见表3。利用 Dips 对这些结构面进行了分析,具体如图7、图8所示。

表3 结构面统计结果

组号	倾向/(°)	倾角/(°)	数量	中心产状
J1	182.7 ~ 258.5	64.3° - 88.4°	14	210° ∠ 82°
J2	7.9 ~ 71.0		3	31° ∠ 82°
J3	271.9 ~ 313.6		9	287° ∠ 84°
J4	100.5 ~ 125.2	78.9° ~ 89.0°	2	113° ∠ 86°

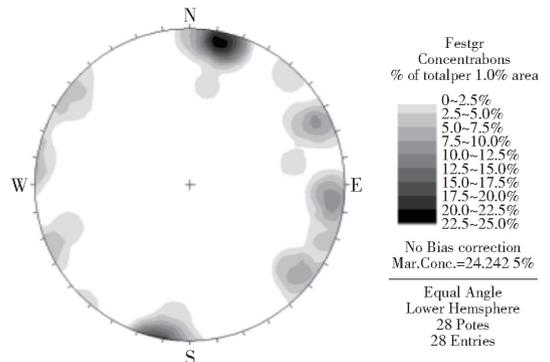


图7 结构面等密度图

4.3 数据的差异性分析

从图4与图7的结构面等密度图可以看出,除

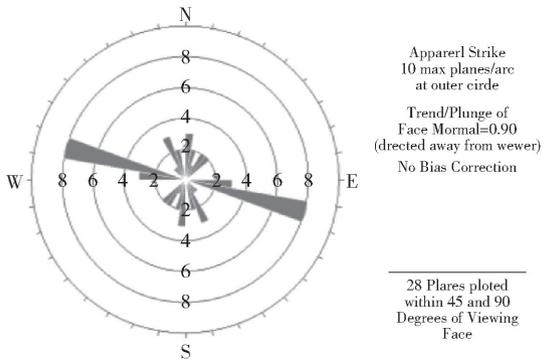


图8 结构面等密度图和走向玫瑰花图

图7几乎没有结构面中心点的投影外,其余结构面空间分布特征与图4一致,这是由于层面产状的实测值近乎平行,加之坡体浅层岩体较为破碎的结构特征,坡面几乎没有层面出露,导致Plane工具在对结构面拟合时,受非控制性结构面的影响未将层面判断为控制性结构面导致的。

对于走向玫瑰花图而言,由于人工测线与R1、R4结构面走向呈小角度相交,而与R2、R3节理成大角度相交,使得样本统计时,R1的样本数量要少

于R2、R3;而三维激光扫描时,几乎是正对坡面进行的,与坡面近乎平行的结构面被揭露,这就导致了J1和J3的样本数量远大于J2与J4的样本数量,从而导致在判断最优势结构面上出现了一定的差异性。

根据表1和表2中结构面测量结果的统计值可以发现,测线法和三维激光扫描法测量到的结果存在一些差异,这是由于统计样本的数量、测量角度的不同以及人工测量陡倾的共轭结构面时存在的人工误差造成的,但从规律性的角度可以发现,两种方法获得的控制性优势结构面是基本一致的。

4.4 结构面的空间分布模型

从上述分析的等密度图、走向玫瑰花图可知,边坡的结构面倾角多为 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。为得到准确的结构面概率分布模型,现对倾角 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、倾向 $170^{\circ} \sim 240^{\circ}$ 和 $250^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 进行分组联合统计分析,分析结构面的概率分布模型,结果表明结构面倾角服从正态分布,而倾向用正态分布模型拟合时,相关性相对偏小,但分布形态上又表现为正态分布的规律,具体如图9所示。

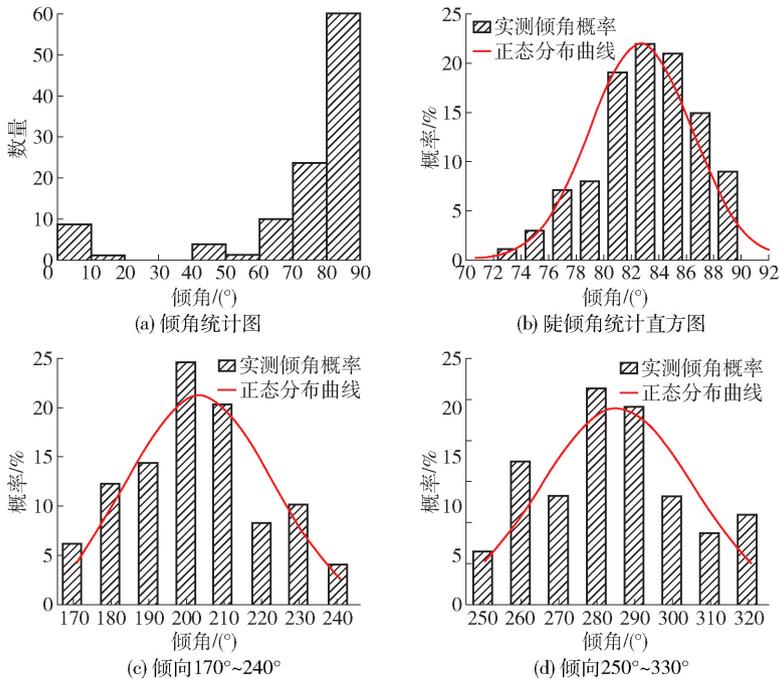


图9 结构面的概率分布模型

从结构面的统计直方图也可发现,倾角分布与倾向分布具有一定的对应性,如倾角为 82° 时,倾角概率分布达到最大,对应于倾向 200° 、 280° ,这也与所得优势结构面产状 $195^{\circ} \sim 210^{\circ} \angle 82^{\circ} \sim 87^{\circ}$ 、

$281^{\circ} \sim 287^{\circ} \angle 81^{\circ} \sim 84^{\circ}$ 相吻合。

为获取岩体内部岩体结构特征,可对实测结构面倾向、倾角、迹长和间距等几何特征参数建立的概率密度函数,通过蒙特卡罗随机模拟方法进行结构

面空间展布,进而提高使用者对结构面在研究区岩体内部的分布情况的认知。为此本文通过实测结构

面倾向、倾角等参数,得到其空间分布模型,具体见表4。

表4 结构面统计结果及空间分布模型

倾向/倾角	范围/(°)	样本	均值	分布模型	表达式
					(其中: $f(x)$ 为分布概率、 θ 为角度、 $\exp()$ 为指数函数)
倾角1	0~60	23	30.7		
倾角2	70~90	85	82.7	正态	$f(x) = \frac{1}{3.7 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - 82.7}{3.7} \right)^2 \right]$
倾向1	20~120	12	102.5		
倾向2	170~240	46	202.7	正态	$f(x) = \frac{1}{0.1 * 17.9 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - 202.7}{17.9} \right)^2 \right]$
倾向3	250~330	51	284.7	正态	$f(x) = \frac{1}{0.1 * 20.1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - 284.7}{20.1} \right)^2 \right]$

4.5 结构面的结构特征

在 CIV-1 边坡内的 IV 结构面较为发育,其类型主要为卸荷裂隙、层面、构造裂隙,其组合切割形成了危岩体。IV 结构面长几米到几十米不等,裂隙面受岩溶作用强烈,主要钙质填充,局部泥质填充。坡内主要发育 3 组结构面,具体如图 10 所示。

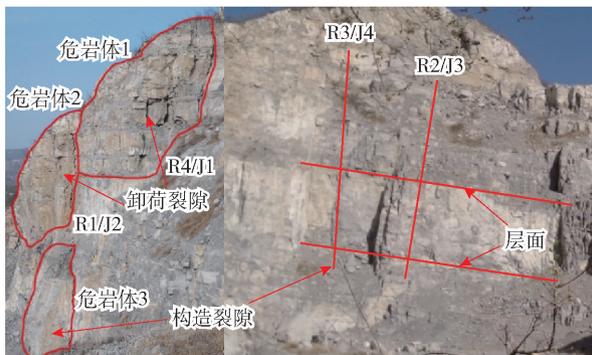


图10 边坡不同类型结构面的分布图

R1、R4、J1 及 J2 是由于开挖卸荷产生的卸荷裂隙,近乎于坡面平行,产状分别为 $21^\circ \angle 81^\circ$ 、 $195^\circ \angle 87^\circ$ 、 $210^\circ \angle 82^\circ$ 、 $31^\circ \angle 82^\circ$,裂隙面较为平直,多数张开度为 0.5 cm,最大处可达到 3 cm。

R2、R3、J3 和 J4 为构造节理面,它们倾向相反,倾角在 $80^\circ \sim 85^\circ$,但走向基本一致,近似为南北向,它们在平面上呈一对共轭的“X”型,裂隙面整体较平直,局部倾角变化,微粗糙,在边坡上延伸可达 75~85 m。

层面,较直,局部有泥质充填,产状 $210^\circ \angle 6^\circ$ 。该组结构面可形成边坡块体倾覆的底部边界和块体坠落的控制性结构面。

CIV-1 边坡上部的岩体中 V 级结构面发育,其

多平直光滑,张开度大小不一,局部有泥质填充。在浅表改造作用下,随着边坡卸荷(“离面卸荷”)使其其中与坡面近平行的中缓节理显现、拉裂扩展,岩体表现出破碎状。

根据野外地质调查 CIV-1 边坡存在 3 个危岩体,利用上文采集的层面数据、实测裂隙产状或每组优势结构面的中心产状以及危岩体的几何尺寸,建立边坡危岩体的简化地质模型,用于危岩体稳定性的计算,模型如图 11 所示。

5 成果应用

5.1 破坏模式分析

在节理岩质边坡中,其破坏模式往往受层面、构造裂隙以及卸荷裂隙组合关系的控制,不同的组合方式常常形成不同形式的块体破坏模式^[15];基于此,根据前文统计数据,利用赤平投影对边坡控制性结构面进行分析可知,边坡的整体稳定性较好,但边坡坡体中发育着两组近乎正交的陡倾优势节理面,加之缓倾角层面的影响,岩体多被切割成块状或板状的危险块体,如图 11 所示的 3 个危岩体。为分析危岩体的失稳模式,利用 dips 软件对三维激光扫描获得的 CIV-1 边坡的 28 个控制性优势结构面绘制节理离散点如图 12 所示,图 12(a)有一个极点落在了滑动区,说明边坡内的危岩体有可能出现平面滑动破坏;而图 12(b)则有两个极点落在倾覆破坏区,表明了边坡内的危岩体出现倾覆破坏的可能性较滑移破坏可能性大。

根据结构面与临空面的组合关系确定的边坡或危岩体破坏模式,常常为稳定性计算模型的建立、简化和计算分析提供了基本理论支撑,结合野外的地

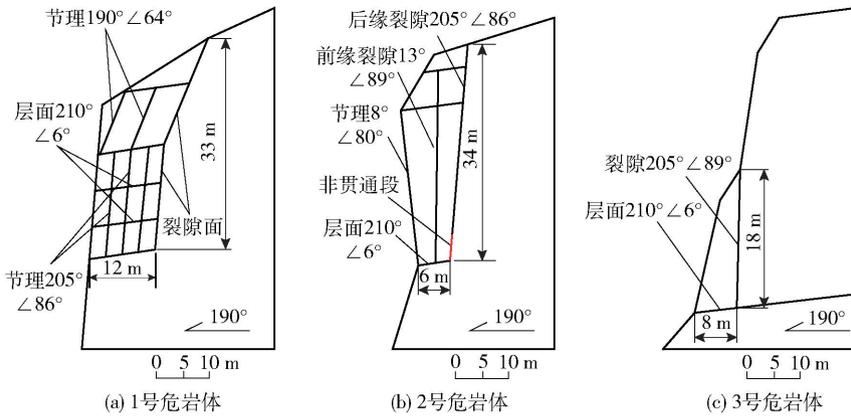


图 11 危岩体的简化地质模型

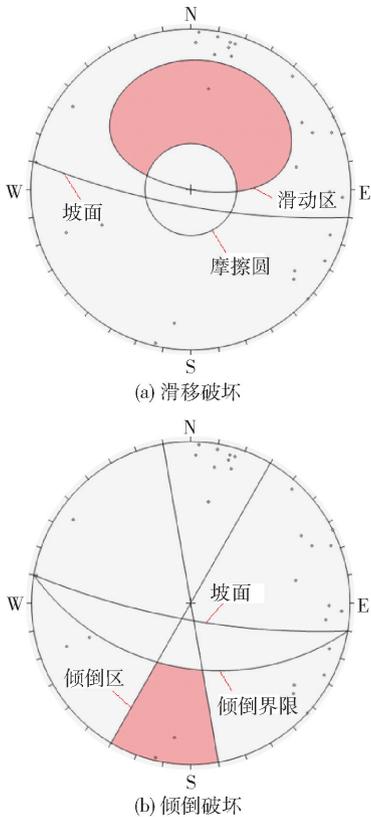


图 12 CIV-1 边坡块体破坏模式分析

5.2 稳定性分析

根据上文分析可知,边坡整体稳定性较好,但在结构面、临空面的影响下,可能形成块体的滑移或倾倒破坏,但不能很还好的反应危岩体的形成机理,本节利用离散元强度折减法对危岩体的渐进破坏过程、破坏机理进行分析。仅以 1 号、2 号危岩体为例进行基于 UDEC 的数值成果分析,模型如图 13 所示,计算工况按自然工况、地震工况、暴雨工况及暴雨+地震组合工况进行,模型尺寸按实测危岩体形态尺寸,参数按试验获得的岩体和结构面参数对模型进行计算,具体见表 6。

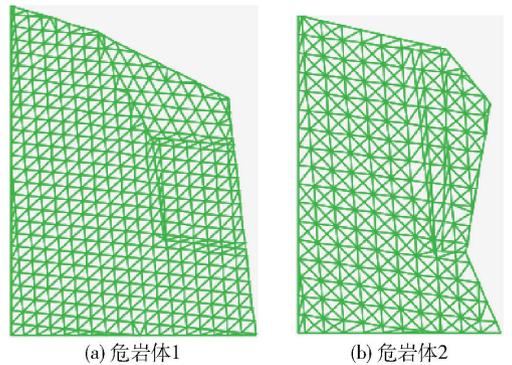


图 13 数值模型

质调查资料和图 12 所示的块体可能出现的破坏模式,对 CIV-1 边坡危岩体可能出现的破坏模式进行了初判,具体见表 5。

表 5 危岩体特征及最可能出现的破坏模式

编号	危岩体特征	破坏模式
危岩体 1	由块体叠置构成,块体之间结合差,节理裂隙张开	滑移破坏
危岩体 2	成板状孤立岩体,临空面与坡面倾向相反	倾倒破坏
危岩体 3	由张开节理裂隙和层面组合形成	滑移破坏

由于本节主要分析结构面在危岩体稳定性分析中的作用,对于繁琐、复杂的定量分析公式以及众多的数值计算图件等在此不宜一一推导、罗列,仅对结构面对危岩体破坏模式的影响以及稳定性计算结果予以说明。以 1 号、2 号危岩体在自然工况下的位移矢量图和位移等值线图为例,具体如图 14、15 所示;各方法计算结果见表 7,其中 F^* 为数值模拟计算各危岩体稳定性系数, F_s 为理论计算的滑移稳定性系数, F_w 为理论计算的倾覆稳定性系数,具体的公式推导可详见师华鹏等^[16-17]的研究成果;不同工

表6 UDEC 计算参数取值

	物理量	单位	天然	饱和
石灰岩	密度 ρ	g/cm^3	2.849	2.853
	泊松比 μ	—	0.208	0.242
	变形模量 E	GPa	40.03	32.97
	体积模量 K	GPa	22.85	21.30
	剪切模量 G	GPa	16.57	13.27
	抗拉强度 σ_t	MPa	5.262	4.461
	黏聚力 c	MPa	0.43	0.41
节理	内摩擦角 φ	($^\circ$)	33.5	29.8
	法向刚度 K_n	GPa		3.9
	切向刚度 K_s	GPa		1.8
	黏聚力 c	MPa	0.12	0.09
层面	内摩擦角 φ	($^\circ$)	20	17
	法向刚度 K_n	GPa		5.4
	切向刚度 K_s	GPa		2.5
	黏聚力 c	MPa	0.23	0.21
	内摩擦角 φ	($^\circ$)	24.3	22.8

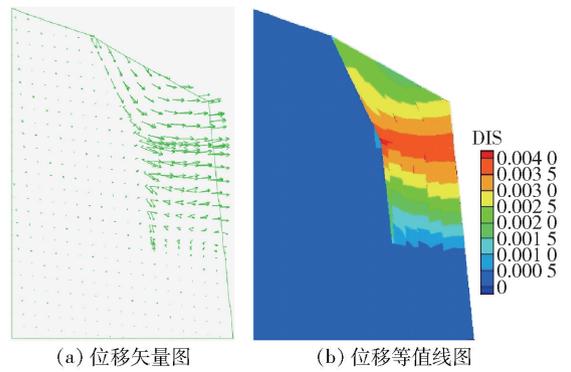


图14 自然状态下1号危岩体的位移分布图

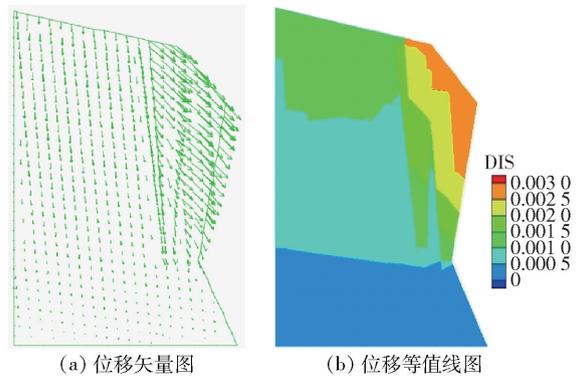


图15 自然状态下2号危岩体的位移分布图

况情况下边坡稳定性系数变化曲线如图16所示。

由图14可知,边坡开挖后,1号危岩体中间位移量大于两边位移量,具有岩层面向临空滑移的趋势,加之受层面本身起伏度的影响,形成了垂直于滑移面的喇叭状张拉裂隙(如图10所示),使得在危岩体在层面、陡倾构造结构面以及卸荷作用下呈现卸荷-拉裂(剪切)-滑移式的破坏模式,这与陈鹏

宇^[18]利用PFC得到的CIV-1号边坡1号危岩体的破坏模式是一致的。

由图15可知,边坡开挖后,2号危岩体上部位移量大于下部位移量,具有岩层面向临空倾覆的

表7 CIV-1 矿山危岩稳定性计算表

状态编号	天然状态			地震状态			暴雨状态			组合荷载		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
F_s	1.35	1.32	1.30	1.14	1.19	1.02	1.07	1.14	1.00	0.97	1.11	0.93
F_w	1.51	1.48	1.68	1.31	1.23	1.46	1.22	1.19	1.38	1.01	0.98	1.17
F^*	1.32	1.50	1.29	1.19	1.25	1.15	1.12	1.21	1.10	0.92	0.99	0.90

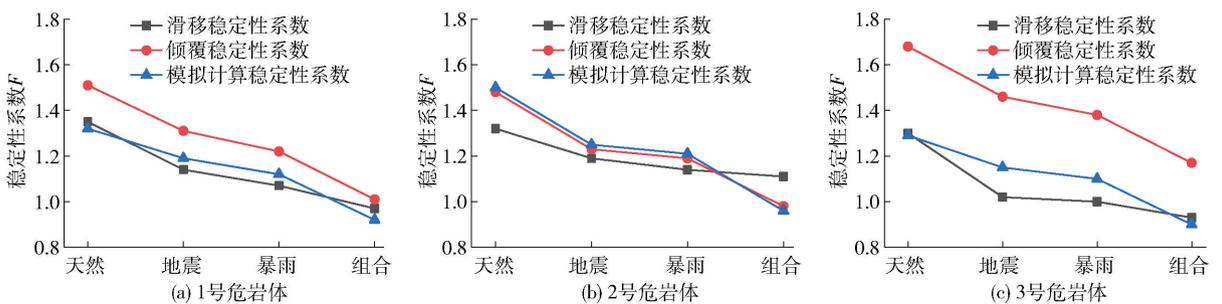


图16 不同工况情况下边坡稳定性系数变化曲线

趋势,这主要是危岩体后缘上部裂隙已贯通,而下缘未贯通存在锁固段,使得危岩体在层面、陡倾构造结构面以及卸荷作用下呈现卸荷-拉裂-倾倒式的破坏模式,这与陈鹏宇^[18]利用 PFC 得到的 CIV-1 号边坡 2 号危岩体的破坏模式是一致的。

由表 7 和图 16 的成果,结合规范^[19]表 17 可知:在自然状态下,各危岩体处于基本稳定-稳定状态,在外力影响下,危岩体的稳定性系数发生了显著的降低,可能发生破坏,为评价外力对危岩体稳定性的影响程度,现规定各工况的滑移稳定性为 F_{si} , 倾倒稳定性为 F_{wi} , 数值计算的滑坡稳定性为 F_i^* , $i = 1, 2, 3, 4$ 依次代表天然、地震、暴雨以及组合工况,结合表 8 可知。

表 8 不同工况对边坡稳定性系数的影响程度表

编号	i	$\frac{F_{s1} - F_{si}}{F_{s1}}$	$\frac{F_{w1} - F_{wi}}{F_{w1}}$	$\frac{F_1^* - F_i^*}{F_1^*}$	$\left \frac{F_{si} - F_i^*}{F_{wi} - F_i^*} \right $
1	1				<1
	2	0.156	0.132	0.098	<1
	3	0.207	0.192	0.152	<1
	4	0.281	0.331	0.303	<1
2	1				>1
	2	0.098	0.169	0.167	>1
	3	0.136	0.196	0.193	>1
	4	0.159	0.338	0.340	>1
3	1				<1
	2	0.215	0.131	0.109	<1
	3	0.231	0.179	0.147	<1
	4	0.285	0.304	0.302	<1

(1)各工况对危岩体稳定性的影响程度为:组合工况 > 暴雨工况 > 地震工况,且组合工况对其稳定性的影响并不等同于暴雨工况和地震工况的简单叠加。这与 2013—2016 年龙寺矿区不同外因诱发崩塌地质灾害现场观测统计数量的占比结果基本一致。

(2)在各工况影响下,危岩体的滑移稳定性系数下降幅度为:3 号危岩体 > 1 号危岩体 > 2 号危岩体;而倾倒稳定性系数下降幅度为:2 号危岩体 > 1 号危岩体 > 3 号危岩体;同时,通过 UDEC 的计算结果与理论计算结果对比可知,1 号、3 号危岩体的值均小于 1,而 2 号危岩体的值大于 1,结合表 6 可知,3 号、1 号危岩体在外动力影响下最有可能发生滑移破坏,而 2 号危岩体最有可能发生倾倒破坏,这与

表 5 利用结构面与临空面相互组合时对危岩体的初判是一致的。

(3)2 号危岩体的 UDEC 的计算结果比滑移、倾倒稳定性系数都大,这是由于模拟计算时前缘裂隙处于完全贯通而后缘裂隙存在锁固段,而理论计算时为简化公式全按贯通考虑导致的。

5.3 边坡加固优化设计

根据上文对 CIV-1 边坡结构面数据的采集、分析,获得了控制边坡稳定性的结构面,这些结构面构成了上文所述危岩体的边界,多以 IV 结构面为主,长度几米到几十米不等,如图 1 的 D 区域。非控制性结构面以 V 结构面为主,它们的尺寸普遍较小,无法构成失稳大块体的破坏边界,如图 1 的 A、B、C、E、F 区域。鉴于结构面的规模、数量、间距、岩体的破碎程度、危岩体的稳定性以及崩积物的分布情况,对边坡采取了分区治理措施,结合各个结构特征区的特点分别选择以下的治理方式。

I 区、II 区、VII 区和 IX 区整体稳定性较好,局部可能发生块体掉落,加之区域内堆积了大量的边坡崩塌物,易发生崩塌堆积物的滑移破坏,对该区域主要进行主要进行坡面清理工作。

III 区岩体较完整,被主控结构面和层面切割成长柱状体和块体危岩体,上文提到的 2、3 号危岩体就位于其中,以锚杆 + 喷混凝土 + 坡面挂网的治理方式为主。

VI 区、V 区受风化、卸荷作用的影响强烈,岩体结构破碎,并且区域内已发生了大面积的块体崩落,主要进行坡面清理工程。

IV 区、X 区呈层状碎裂结构,在风化、降雨作用等外力作用下,易发生破坏,对其进行削坡治理。

VIII 区受多组陡倾节理切割,岩体有可能发生风化剥落、浅层块体崩落为保证其在外力作用作用下岩体的稳定性采用了锚杆和支撑绳将金属网张紧覆盖于坡面的主动柔性防护措施。

CIV-1 边坡通过主动与被动加固相结合的防治手段,形成了“锚、清、撑、喷、挂、拦、截、排”等治理措施的联合加固方法,具体如图 17 所示,避免了因选择单一方式对边坡加固造成的经济浪费;并且通过这种联合加固措施可以有效的避免单一加固方式的弊端,发挥出结构的综合效应。自 2016 年按联合加固方法对 CIV-1 边坡治理以来,龙寺 CIV-1 边坡的再未出现崩塌灾害,证明了联合加固措施对提高复杂岩体边坡的稳定性是行之有效的。

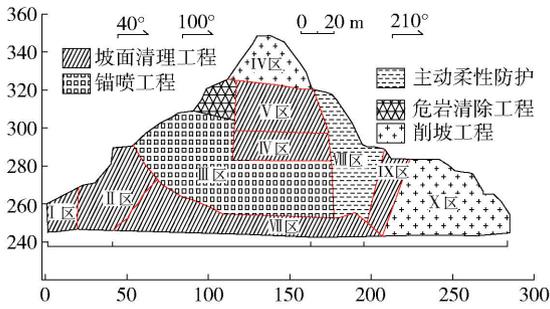


图 17 CIV-1 边坡立面治理布置图

6 结论

(1) 在评价岩质高边坡的稳定性时,无接触式获取岩体结构面信息的三维激光扫描技术具有较高的实用性,但对于坡体结构破碎、极破碎区以及植被发育区时,易出现盲区,应视情况辅助人工测量。

(2) 本文以龙寺矿山 CIV-1 岩质高边坡为例,从结构面信息采集、数据分析、空间分布模型、结构特征等各方面进行了详细的阐述,为岩质边坡、危岩体的破坏模式、稳定性以及优化防治提供了基础资料支撑。

(3) 通过对实测结构面信息建立的危岩体地质模型和数值模型的计算,结果表明:1号、3号危岩体在外动力影响下最有可能发生滑移破坏,而2号危岩体最有可能发生倾倒破坏,与利用实测结构面的初判结果是一致的。

(4) 对 CIV-1 边坡经济有效的治理,表明利用实测结构面对边坡坡体结构分区后的分区优化治理是行之有效的。

[参考文献]

[1] 顾路. 大型顺层岩质滑坡形成演化过程研究[D]. 西安:长安大学,2021.

[2] 李鹏. 地面 LIDAR 在边坡空间分析中的应用研究[D]. 广州:广东工业大学,2016:55-70.

[3] 王凤艳. 数字近景摄影测量快速获取岩体裂隙信息的工程应用[D]. 长春:吉林大学,2006.

[4] 娄国川,赵其华. 基于三维激光扫描技术的高边坡岩体结构调查[J]. 长江科学院院报,2009,26(9):58-61.

[5] 陈昌富,何旷宇,余加勇,等. 基于无人机贴近摄影的高陡边坡结构面识别[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(1):145-154.

[6] 谢金,杨根兰,覃乙根,等. 基于无人机与 Rockfall 的危岩体结构特征识别与运动规律模拟[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(1):55-64.

[7] 宣程强,章杨松,许文涛. 基于数字表面模型的岩体结构面产状获取[J]. 水文地质工程地质,2022,49(1):75-83.

[8] 吕权儒,曾斌,孟小军,等. 基于无人机倾斜摄影技术的崩塌隐患早期识别及影响区划分方法[J]. 地质科技通报,2021,40(6):313-325.

[9] 李胜,熊自明,李一鸣,等. 基于改进 DBSCAN 算法的岩体结构面智能识别方法[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2022,4(2):49-58.

[10] 王述红,魏崑,陈浩,等. 基于 HDBSCAN 算法的岩体结构面产状识别及分组方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2022,43(6):888-896.

[11] 马显东,周剑,张路青,等. 强震区公路沿线崩塌危岩体特征提取及失稳分析[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(S1):2901-2913.

[12] 陆三福,熊承仁,龙露. 三维激光扫描与结构面模拟在地质勘察中的应用[J]. 人民长江,2014,45(12):54-59.

[13] 王明东. 基于点云数据下的三维高陡岩质边坡稳定性分析研究[D]. 南昌:东华理工大学,2023:27-49.

[14] 郑一. 基于非接触测量技术的隧道开挖对杨家山边坡稳定性影响分析[D]. 绍兴:绍兴文理学院,2019:11-29.

[15] 李茂,王静. 三维极限平衡法在露天矿边坡稳定性分析中的应用[J]. 中国矿山工程,2022,5(4):40-44.

[16] 师华鹏,余宏明,陈鹏宇. 极端灾害天气下临河岩质边坡的倾覆稳定性分析[J]. 灾害学,2016,31(2):176-181.

[17] 师华鹏,余宏明,陈鹏宇,等. 水力作用下同向双平面滑移型岩质边坡稳定性分析[J]. 世界科技研究与发展,2015,37(5):535-541.

[18] 陈鹏宇. 岩质高边坡坡体结构特征分析与稳定性研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2015.