

水电工程危岩体数据采集与稳定性分析

易庆波^{1,2}, 杨进军^{1,2}, 牛志强^{1,2}, 李剑飞^{1,2}

(1. 中国水电顾问集团 贵阳勘测设计研究院岩土工程有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 中国电建集团 贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 水电工程危岩体往往分布于高山峡谷之中, 治理方案对地质勘察提出了更高的要求, 通过三维激光扫描及数码摄影技术可以获得高陡危岩体的主要边界条件, 以查明危岩体的结构面组成、连通情况、规模、主要影响因素等, 进而进行危岩体分区及定性评价。根据岩石单轴抗压强度、结构面特征、地面坡度、结构面不利组合、地下水特征、植被覆盖情况等影响因子进行综合评分, 进行半定量评价。最后, 根据危岩体的破坏模式选取相应的稳定性计算模型进行分析计算, 提出定量评价结论, 为同类危岩体的勘察及稳定性分析提供一定的参考依据。

关键词: 水电工程; 危岩体; 影响因子; 稳定性; 坠落模式

中图分类号: P694; TV7

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)01—0160—05

Data Acquisition and Stability Analysis of Unstable Rock Mass in Hydropower Project

YI Qingbo^{1,2}, YANG Jinjun^{1,2}, NIU Zhiqiang^{1,2}, LI Jianfei^{1,2}

(1. Hydro China Guiyang Engineering Corporation Geotechnical Engineering Company Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Unstable rock mass of hydropower projects are usually distributed in high mountains and valleys with steep slopes and large scale, the prevention scheme raise higher requirements for geological investigation, the main boundary conditions of high and steep rock mass can be obtained by 3D laser scanning and digital photography, which is very helpful to find out the structural plane composition, connectivity, scale and main influencing factors of the unstable rock mass. Subarea and qualitative evaluation of unstable rock mass is analyzed. According to the impact factors of rock uniaxial compressive strength, structural surface characteristics, ground slope, adverse combination of structural surface, groundwater characteristics, vegetation coverage and so on, the comprehensive score was conducted, as well as semi-quantitative evaluation. Finally, according to the failure mode of unstable rock mass, the stability calculation model is selected for analysis and calculation to draw the quantitative evaluation conclusion. This paper could provide some reference for the investigation and stability analysis of similar unstable rock mass.

Keywords: hydropower projects; unstable rock mass; impact factor; stability; falling mode

危岩体是指陡峭边坡上被多组结构面切割, 在重力、风化营力、地震和渗透压力等外力作用下可能与母岩分离而坠落失稳的岩石块体^[1]。危岩的形成、失稳与运动属于边坡地貌动力过程演化的一种重要形式, 其破坏失稳具有突发性、致灾具有毁灭性的特点^[2]。岩体在干湿循环、溶蚀、构造风化作用

等因素影响下, 致使高陡峡谷带岩体劣化变形及卸荷裂缝发育, 引起岸坡失稳的地质灾害现象已多次出现^[3-5]。坝区高边坡岩体在长期风化、卸荷的影响下, 形成广泛分布的危岩体^[6-11]。危岩体稳定性受主控结构面的影响, 而结构面强度参数受其贯通度、结合程度及状况、起伏粗糙程度、张开度、充填状

况等诸多因素的综合影响^[12-13]。贵州某水电站坝址右岸分布较大规模的危岩体,其中 DR8 号危岩体下部悬空,形成倒悬体,对枢纽建筑物存在较大安全隐患。以坝区危岩体为例,旨在从危岩体的破坏模式分析入手,分别采用定性、半定量及定量评价方法分析危岩体的稳定性,为该类危岩体治理设计提供地质依据,对其他水电工程建设类似问题的分析评价也具有重要的参考意义。

1 Dr8 号危岩体基本特征

危岩体一般分为在高山峡谷地区的高陡岸坡上,其边界条件较难获取,可通过三维激光扫描技术进行危岩体测量调查,并利用测量的点云数据在 Riscan Pro 软件中进行处理^[14]。本文通过三维激光扫描及数码摄影技术对野外数据进行采集。

Dr8 号危岩体平面长轴走向为 N26°E,略向北西凸出,顶部为 T_1y^3 粉砂质泥岩夹泥灰岩及灰岩,上部为残坡积物构成的缓坡平台,北侧及东侧后缘以 Dr8-L1 及 PD8 平硐第 I 组裂隙为边界,南侧以 Dr8-L6 裂隙为界,底部以 f1、f2 层间错动夹层及 Dr8-L3 裂隙为界。上述结构面与临空面围成了 Dr8 危岩体。Dr8 危岩体分布高程 870 m~960 m,最长约 100 m,上宽下窄,垂直陡壁方向最大宽 25 m,采用三维激光扫描及数码摄影技术采集地形及地质信息,建立地质三维模型,通过三维方法计算体积为 $1.37 \times 10^4 \text{ m}^3$,属特大型规模。

1.1 成因机制分析

乌江宽谷期以后,由于地壳强烈抬升,河流急剧下切,形成深切峡谷地形。河谷下切致使岸坡变化主要分为两个主要时期,首先是河流下切至 T_1y^3 泥岩地层,该阶段峡谷岸坡为上硬下软的地质结构,高陡的临空条件及下部泥页岩塑性岩体,使该段岸坡卸荷拉应力高度集中,早期顺河向张性裂隙不断发展,并由于 T_1m^1 灰岩与下伏 T_1y^3 泥岩的差异风化,在 T_1y^3 泥岩分布地带形成风化凹槽,加剧了上伏岩层卸荷松动带沿临空面方向产生崩塌、座滑,并在 T_1y^3 泥岩形成一个缓坡平台,崩塌堆积体胶结对泥岩及上部岸坡起到压脚作用,使上部岩体处于自稳状态;其次乌江河谷不断下切,形成高陡岸坡,使 T_1y^{2-3} 地层处于第二个峡谷岸坡顶部,岸坡应力集中,卸荷裂隙及张裂缝不断发展,另一方面,由于卸荷裂隙的形成,有利于地表水的入渗,地表水主要沿最后缘拉裂隙入渗,从而加剧了沿拉裂隙产生的溶蚀作用,使危岩体后缘边界扩展及加大连通率,形成

现今危岩体形态,见图 1。

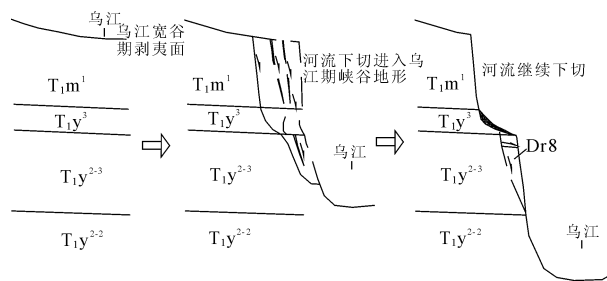


图 1 Dr8 危岩体形成过程示意图

1.2 Dr8 危岩体结构面特征

Dr8 危岩体顶部主要为 T_1y^3 残坡积物及少量 T_1m^1 崩塌堆积物,物质成分为黏土夹碎石、块石为主,块石直径一般大于 0.3 m,局部可达 3.0 m 以上;覆盖层下为 3.0 m~6.5 m 厚 T_1y^3 粉砂质泥岩强风化产物,再下为 T_1y^{2-3} 弱风化厚层灰岩。危岩体以下依次为 T_1y^{2-2} 中厚层至薄层灰岩、 T_1y^{2-1} 薄层、极薄层灰岩夹泥页岩。

根据现场勘察,结合三维数码摄影技术,在 Dr8 危岩体区主要统计了 6 条(Dr8-L1-L6)裂隙及 PD8 平硐第 I 组裂隙,实测了 f1、f2 层间错动夹层,除 Dr8-L2 裂隙外,其余 5 条裂隙及第 I 组裂隙均切割了危岩体,构成了危岩体边界,裂隙特征见表 1。

1.3 Dr8 危岩体分区

黄达等^[15]从地质体结构组成出发,对巨型危岩体进行稳定性分区。

根据边界条件及结构面切割关系,将 Dr8 危岩体分成 3 个区,即 3 个块体。Dr8-1 区为以 Dr8-L1、f1、Dr8-L4、Dr8-L5 结构面与临空面围成的块体,由于 f1 在 Dr8-L3 上游不连续,该区未封闭;Dr8-2 区为以 Dr8-L1(顶部)、PD8 第 I 组、Dr8-L6、f1、Dr8-L4、Dr8-L5 结构面与临空面围成的块体,由于 PD8 第 I 组及 f1 不连续,该区也未封闭;Dr8-3 区为以 Dr8-L3(下部)、f2、Dr8-L1、f1 结构面与临空面围成的倒悬块体,由于结构面连续性较好,已基本形成封闭块体。

2 Dr8 危岩体稳定性评价

2.1 变形失稳模式

Dr8-3 区为以 Dr8-L3(下部)、f2、Dr8-L1、f1 结构面与临空面围成的块体,由于形成倒悬体,分析以整体坠落模式失稳,参见图 2。

表 1 Dr8 危岩体主要裂隙及层间错动统计表

编号	位置	产状	连通率/%	地质简述
Dr8-L1	下游侧边界	N3°W, SW∠80°	85~90	起点位于 3#出线洞洞口右侧,未向该洞内延伸,向上终止于陡壁顶部 ZK2 钻孔附近,在陡壁面上可见延伸长约 117 m,钻孔内铅直厚度 0.2 cm~2.0 cm,形成 Dr8 危岩体下游侧及后沿部分边界。
Dr8-L2	危岩体下游侧	N70°W, SW∠71°	80	起点位于 Dr8-L1 中部,沿着陡壁竖直延伸至倒悬体下方,铅直高差 60 m,张开宽 0.2 cm~0.5 cm。
Dr8-L3	危岩体中下部	N49°E, NW∠79°	85	起点位于 3#出线洞洞口顶部,未向该洞内延伸,沿着陡壁竖直延伸至 923.6 m 高程,高差约 61.8 m,张开宽 2 cm~5 cm。构成危岩体下部边界。
Dr8-L4	危岩体内部	N50°E, SE∠82°	75	起点位于 fj1 上盘 904.4 m 高程,在陡壁向下游斜上,终止于 938.0 m 高程,出露迹长 36.4 m。张开宽 0.5 cm~1.0 cm。
Dr8-L5	危岩体顶部	N80°W, SW∠10°	90	出露在高程 943 m~944 m 陡壁面上,ZK1 钻孔揭露明显,ZK2 钻孔揭露不明显。可见延伸长 45 m,张开宽 2 cm~6 cm。
Dr8-L6	危岩体上游侧边界	N5°E, NW∠80°	90	主要发育在危岩体顶部,裂隙顶延伸至危岩体顶部,总体向下游倾斜,可见延伸长约 20 m,张开宽 2 cm~5 cm。
PD8 第 I 组	危岩体顶部	N0°~30°E, NW∠70°~90°	45	长 0.5 m~3.0 m,间距 2.9 m~5.5 m,面平直稍粗糙,充填黏土夹少量岩屑,宽 0.2 cm~4.0 cm。构成危岩体后沿部分边界。
fj1	危岩体中部	N80°W, SW∠27°	80	为层间错动夹层,沿岩层面发育,延伸长大于 600 m,厚度 3 cm~10 cm,充填黏土及岩屑。
fj2	危岩体底部	N80°W, SW∠27°	100	为层间错动夹层,为 $T_{1y}^{2-3}/T_{1y}^{2-2}$ 分界,厚度 2 cm~5 cm,充填黏土夹少量岩屑,局部发育溶洞。构成危岩体底部边界。

2.2 影响危岩体稳定的不利因素

影响环境边坡危岩体稳定程度的因素很多。危岩体的稳定程度通常受地形地貌、地层岩性、岩体结构等内在因素和水的作用、风化卸荷、震动、植被等外在因素的影响^[16]。

(1) 地表水入渗的影响(包括降水及运行期泄洪雾水的入渗):降雨时危岩体顶部地表接收上一级陡壁地表雨水,地表水沿 Q^{col} 、 Q^{cd} 松散堆积物及 T_{1y}^3 强风化岩体入渗,流经 Dr8 危岩体,使危岩体结构面饱水状态,降低结构面力学性能,增加瞬时渗透压力。

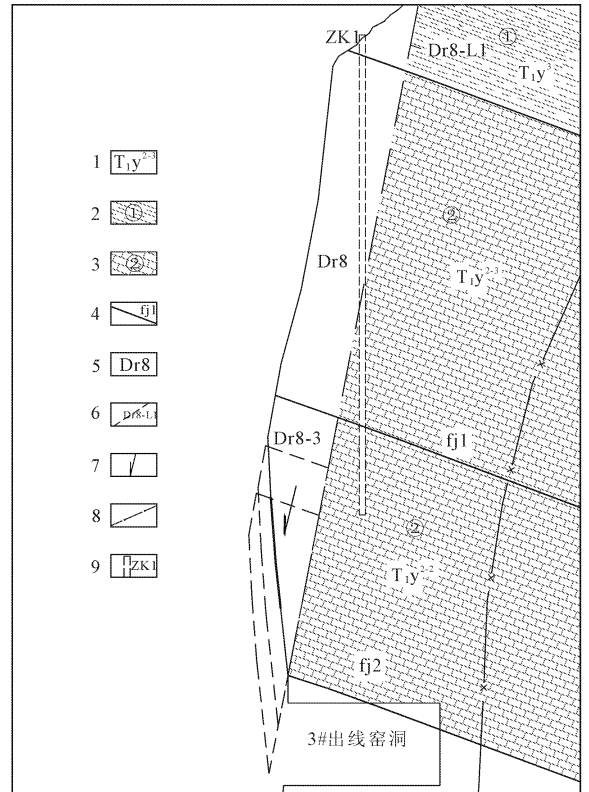


图 2 Dr8 危岩体整体坠落模式示意图

(2) 危岩体进一步卸荷、风化、溶蚀的影响:随着时间的推移,在自然条件下,岩体风化、卸荷、溶蚀持续,岩体及结构面强度均会降低。主要影响 Dr8-3 区块体稳定性。

2.3 危岩体稳定性评价

2.3.1 定性评价

整体稳定性:构成 Dr8 危岩体下游及后缘部分边界基本贯通,构成后缘的长度约 36 m,接其上游端 PD8 平硐第 I 组裂隙(N0°~30°E, NW∠70°~90°),经槽探揭露未发现长大连续张裂隙,说明连通率较低,即该组裂隙作为后缘的危岩体与完整岩层未分离;连续性较好的 fj1 从危岩体中下部切割,因倾向山内,与 Dr8-L1 裂隙构不成危岩体。因此,Dr8 危岩体整体是稳定的。

局部稳定性:根据边界条件及结构面切割情况,将 Dr8 危岩体分成 3 个区。

Dr8-1 区为以 Dr8-L1、fj1、Dr8-L4、Dr8-L5 结构面与临空面围成的块体,Dr8-L1 与 Dr8-L4 交线陡倾山内,且 fj1 在 Dr8-L3 上游不连续,因此 Dr8-1 区块体是稳定的。其内部 Dr8-L3 (fj1 以上)与 Dr8-L1 构成的楔形块体因 Dr8-L3 顶端终

止于 923.6 m 高程而连通率低,该局部块体稳定。

Dr8-2 区为以 Dr8-L1(顶部)、PD8 平硐第 I 组、Dr8-L6、fj1、Dr8-L4、Dr8-L5 结构面与临空面围成的块体。Dr8-L1、PD8 平硐第 I 组与 Dr8-L6 基本平行,不存在切割楔块体,Dr8-L1、PD8 平硐第 I 组与 Dr8-L4 交线陡倾山内,且底部 fj1 不连续,因此 Dr8-2 区块体也是稳定的。其内部 Dr8-L5 与 Dr8-L1 切割的块体因 Dr8-L5 平缓(倾向坡外,倾角 10°),该局部块体稳定。

Dr8-3 区块体位于 Dr8 危岩体底部,为以 Dr8-L3(下部)、fj2、Dr8-L1、fj1 结构面与临空面围成的倒悬块体,主要因 Dr8-L1(下部)与 Dr8-L3(下部)切割而成楔形块体,体积约 5 504.5 m³。Dr8-L1、Dr8-L3 连通性好,主要靠凝聚力抗剪;fj1 处于受拉状态,从左岸观察,fj1 唯独在该部位连续性较好、张开最宽,可能是受拉变形所致。因此定性判断 Dr8-3 区块体稳定性较差。

2.3.2 半定量分析

为了客观、快速地评价危岩体稳定性,通过研究还提供了一种半定量危岩体稳定性快速评价体系,参照边坡 RMR^[17] 分类法,可根据岩石单轴抗压强度、结构面特征、地面坡度、结构面不利组合、地下水特征、植被覆盖情况等影响因子进行评分,根据评分总和划分稳定性等级。

参照表 2 进行半定量评分,总分为 33,根据表 3,位于稳定性较差范围。

2.3.3 定量分析

参考黄达等^[18]通过对锦屏一级水电站危岩体的计算模式,根据表 4 中 Dr8 危岩体物理力学参数值、表 5 中 Dr8-L1、Dr8-L3 裂隙抗剪断强度值定量计算,采用坠落式计算模型,如图 3 所示,其中图中滑动面 AE 即裂隙 Dr8-L1 与 Dr8-L3 的交线,DE 为底部层间夹层 fj2 切割构成悬空面,顶部切割面 fj1 即图中的顶部边界 AB。

坠落式计算模型安全系数为:

$$K = \frac{(G \cos \alpha - P \sin \alpha - Q) \tan \varphi + \frac{cH}{\sin \alpha}}{G \sin \alpha + P \cos \alpha} \quad (1)$$

$$c = \frac{(H-h)c_0 + hc_1}{H} \quad (2)$$

$$\tan \varphi = \frac{(H-h) \tan \varphi_0 + h \tan \varphi_1}{H} \quad (3)$$

式中:K 为危岩体稳定性系数;c 为结构面和岩桥的等效黏聚力,kPa;tanφ 为结构面和岩桥的等效摩擦

系数,(°);G 为危岩体自重,kN;P 为危岩体所受到的地震水平外力,kN;Q 为水压力,kN;α 为结构面的倾角,(°);H 为危岩体高度,m;h 为岩桥高度,m;c₀ 为结构面黏聚力,kPa;φ₀ 为结构面内摩擦角,(°);c₁ 为岩桥的黏聚力,kPa;φ₁ 为岩桥的内摩擦角,(°)。

表 2 危岩体稳定性影响因素快速评分表

影响因素	评分标准				
岩石单轴抗压强度 R _b /MPa	R _b > 100	60 < R _b ≤ 100	30 < R _b ≤ 60	15 < R _b ≤ 30	5 < R _b ≤ 15
评分	5	4	3	2	1~0
岩石风化程度	新鲜	微风化	弱风化	强风化	全风化
评分	5	5	3	1	0
结构面粗糙度	很粗糙	粗糙	较粗糙	光滑	擦痕、镜面
评分	5	4	2	1	0
结构面充填物/mm	无	<5(硬)	>5(硬)	<5(软)	>5(软)
评分	5	4	3	2	0
结构面张开度 a/mm	未张开	a < 0.1	0.1 < a ≤ 1	1 < a ≤ 5	a ≥ 5
评分	5	4	3	1	0
结构面长度 L/m	L < 1	1 < L ≤ 3	3 < L ≤ 10	10 < L ≤ 20	L ≥ 5
评分	5	4	2	1	0
地面坡度 θ/(°)	0 ≤ θ < 30	30 ≤ θ < 40	40 ≤ θ < 60	θ > 60	倒坡
评分	30	20~10	5~0	0	0
结构面不利组合	完备		较完备		不完备
评分	0~5		10~15		25~30
地下水特征	干燥	湿润	滴水	线状流水	涌水
评分	4	3	2	1	0
植被发育特征	茂密	中等	稀疏	无	—
评分	5	3	1	0	—

表 3 危岩体稳定性半定量快速评价表

总分 Σ	0 < Σ ≤ 25	25 < Σ ≤ 40	40 < Σ ≤ 65	Σ > 65
稳定性分级	差	较差	基本稳定	稳定

表 4 岩体物理力学参数建议值表

地层	岩性	密度 / (kN · m ⁻³)	饱和抗压 /MPa	承载力 /MPa	f _{抗剪断}		C'/MPa		f _{抗剪}
					岩/岩	凝土/岩	岩/岩	凝土/岩	
T ₁ y ³	粉砂质泥岩	26.7	15	1~2	0.45	—	0.3	—	0.35
T ₁ y ²⁻³	厚层灰岩	27.0	63	5	1.20	1.1	1.2	1.1	0.70
T ₁ y ²⁻²	中厚夹薄层灰岩	27.0	45	4	1.00	1.0	1.0	0.8	0.65

表 5 结构面抗剪断强度建议值表

结构面名称	结构面倾角/ $^{\circ}$	$f_{\text{抗剪}}$	C' /MPa	备注
Dr8-L1(Dr8 下游边界及后沿部分切割面,含岩桥)	80	0.30	0.01	T_1y^3 连通率 90%
Dr8-L3(构成 Dr8 侧向切割面,含岩桥)	79	0.50	0.12	T_1y^{2-3} 连通率 90%
右 f1(构成 Dr8 局部块体切割面,含岩桥)	27	0.36	0.03	T_1y^{2-3} 连通率 80%
右 f2(Dr8 危岩体底界)	27	0.30	0.01	T_1y^{2-3}/T_1y^{2-2} 连通率 100%

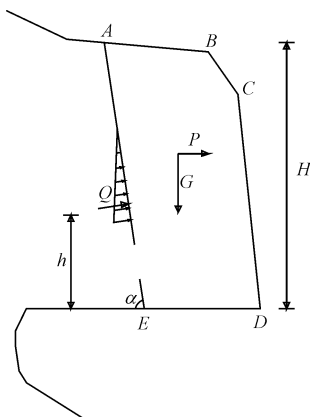


图 3 危岩体坠落式计算模型

根据式(1)、式(2)、式(3)计算,得出稳定性系数为 $K = 1.04$,稳定性较差,可能产生坠落破坏。根据以上分析计算可知,Dr8-3 区块体稳定性较差。

3 结论

(1) Dr8 号危岩体顶部为缓坡平台,北侧及东侧后缘以 Dr8-L1 及 PD8 平硐第 I 组裂隙为边界,南侧以 Dr8-L6 裂隙为界,底部以 f1、f2 层间错动夹层及 Dr8-L3 裂隙为界,与临空面围成了 Dr8 危岩体。其形成机制主要是高山峡谷岩溶软硬岩分布地区河床下切引起岸坡卸荷拉应力高度集中,构成卸荷裂隙相互切割形成的不稳定楔形块体,以坠落模式破坏为主的危岩体。

(2) 经分析 Dr8 危岩体整体稳定。根据结构面切割关系,将 Dr8 危岩体分成 3 个区,进行块体稳定性分析,其中 Dr8-1 区块体、Dr8-2 区块体处于稳定状态,Dr8-3 区通过影响因数快速评分法半定量分析及坠落式破坏模式定量计算,块体稳定性较差,需采取治理措施。

(3) 水电工程危岩体的评价可以从成因机制方面入手,分析危岩体的破坏模式,研究影响危岩体稳定性的主要因素,进行影响因素综合快速评分,在精

心勘察及试验的基础上,提出稳定性计算的物理力学参数,最后采用相应的计算模型进行稳定性定量评价。通过后期监测,现状稳定性与评价计算结果较为吻合。

参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,王林峰,等.危岩崩塌演化理论及应用[M].北京:科学出版社,2009:8-72.
- [2] 李明,陈洪凯,叶四桥,等.重庆市洪崖洞危岩发育机制[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(2):1-6.
- [3] 何潇.长江巫峡望霞危岩形成机制与危险性评[D].重庆:重庆交通大学,2015:1-8.
- [4] 梁学战.三峡库区水位升降作用下岸坡破坏机制研究[D].重庆:重庆交通大学,2013:1-10.
- [5] 肖诗荣,刘德富,姜福兴,等.三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):1023-1030.
- [6] 陈洪凯,唐红梅,胡明,等.危岩锚固计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1321-1327.
- [7] 吴文雪,刘耕.三峡库区危岩稳定性分析[J].重庆交通学院学报,2003,22(5):112-116.
- [8] 陈洪凯,王蓉,唐红梅.危岩研究现状及趋势综述[J].重庆交通学院学报,2003,22(3):18-22.
- [9] 夏元友,朱瑞康.黄石市板岩山危岩体防治方案决策分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(4):498-500.
- [10] 陈光宗.江东危岩群的形成及其防治[J].水文地质工程地质,1994(12):58-63.
- [11] 黄润秋,王贤能,唐胜传.热应力的交变作用对边坡危岩体形成的影响[J].自然科学进展,1999,9(8):46-52.
- [12] 卢妮妮,曾亚武,夏磊.复杂节理岩体的剪切强度特性的尺寸影响研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):131-136.
- [13] 潘凯,谭洵,吉锋,等.岩石硬性结构面粗糙度量化的及其剪切试验研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):41-44.
- [14] 陈爱云,曾唯恐,王哲,等.基于三维激光扫描技术的危岩体特征快速识别方法及稳定性评价[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):60-64.
- [15] 黄达,黄润秋,裴向军,等.溪洛渡水电站某危岩体稳定性及加固措施研究[J].岩土力学,2008,29(5):1425-1429.
- [16] 田雄,张世殊,黎昌有,等.水电工程环境边坡危岩体稳定性综合评分方法[J].长江科学院院报,2016,33(1):38-41.
- [17] 国家能源局.水电水利工程边坡工程地质勘察技术规范:DL/T 5337—2006[S].北京:中国电力出版社,2006:6-19.
- [18] 黄达,黄润秋,周江平,等.雅砻江锦屏一级水电站坝区右岸高位边坡危岩体稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):175-181.