

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.04.014

溪洛渡水电工程坝区高边坡危岩体分类及稳定性评价

刘卫华^{1 2}, 罗 倩³, 黄润秋², 裴向军², 张伟锋²

(1. 中国中铁二局集团有限公司 四川 成都 610032 ;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 四川 成都 610059 ; 3. 西南石油大学外语系 四川 南充 637001)

摘要 : 针对溪洛渡水电工程坝区高边坡危岩体分布广泛 , 对建筑物、大坝以及整个发电系统存在极大的潜在威胁等问题 , 在现场调查的基础上 , 将危岩体分为孤立式、悬挂式、贴坡式、软弱基座式和碎裂结构式等 5 种类型 , 指出每一种类型分别对应不同的失稳模式。在充分揭示危岩体边界条件、形成机制以及失稳方式的基础上 , 提出了危岩体稳定性、危险性分级和系统评价方法 , 为高边坡地质灾害防治提供了依据。

关键词 : 危岩体 ; 形成机制 ; 稳定性评价 ; 危险性评价 ; 边坡处理 ; 溪洛渡水电工程

中图分类号 : U418.5+2 **文献标识码** : B **文章编号** : 1006-7647(2008)04-0048-04

Quality classification and stability evaluation of unstable rock mass on high rock slope of Xiluodu Hydropower Project // LIU Wei-hua^{1 2}, LUO Qian³, HUANG Run-qiu², PEI Xiang-jun², ZHANG Wei-feng² (1. China Railway No. 2 Engineering Group Co., Ltd, Chengdu 610032, China ; 2. State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China ; 3. English Department, Southwest Petroleum University, Nanchong 637001, China)

Abstract : Potential unstable rock masses are widely distributed on the high rock slope of the Xiluodu hydropower project on the Jinsha River, and they pose a great potential risk to construction, operation of the dam and the entire power station system. On the basis of field investigation, the potential unstable rock masses can be classified into five types, the isolated unstable rock mass, the over-hang unstable rock mass, the conjoint unstable rock mass, the unstable rock mass with a soft foundation and the cataclastic unstable rock mass, with every type corresponding to a different failure pattern. The boundary conditions, failure patterns and mechanisms for formation of potentially unstable rock masses have been described, and the stability evaluation system and risk grading method for potential unstable rock masses are herein proposed and established. The study in this paper can provide a basis for geohazards prevention on high rock slopes.

Key words : potential unstable rock mass ; formation mechanism ; stability evaluation ; risk evaluation ; slope protection ; Xiluodu Hydropower Project

溪洛渡水电工程坝区河谷狭窄、岸坡陡峻 , 河谷呈较为对称的“ V ”型。水电站大坝为双曲拱坝 , 坝高为 273 m , 谷底高程在 360 m 左右 , 正常蓄水位高程为 600 m^[1]。

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^[2-7] , 尤其是部分危岩悬于枢纽建筑物上空 , 哪怕是很小范围的自然因素(如降雨、渐进性的风化等) 和工程因素都会导致局部的危岩体失稳 , 对施工和运行期枢纽区建(构) 筑物带来极大的威胁 , 甚至造成灾难性的后果。因此 , 对坝区高边坡危岩体的稳定性进行分析评价是十分必要的。

另外 , 在西南地区大型水电站的建设过程中 , 高边坡危岩体的问题具有很大的普遍性。因此 , 对水

电站高边坡危岩体进行深入分析 , 提出危岩体的分类体系、失稳模式和稳定性评价方法 , 对其他工程建设类似问题的分析评价也具有非常重要的理论和现实意义。

1 危岩体成因及分布特征

岩体结构面是危岩体形成的控制因素 , 岩体结构面的特征基本决定了危岩体的分布特征 , 同时 , 危岩体的形成及分布特征也与地形地貌、边坡地层岩性等有关。

该工程坝区分布的主要岩层为晚二叠系峨眉山玄武岩(P₂β) , 各岩层层间为假整合接触。峨眉山玄武岩岩性坚硬 , 适于危岩体的形成。

控制边坡危岩体发育的主要岩体结构条件有以下 4 类:①坝区普遍发育的缓倾角层间层内错动带,它们通常构成危岩体发育的下部控制边界或条件;②高位边坡第 12 和第 13 岩流层顶面发育厚度较大的凝灰岩夹层,其厚度一般为数十厘米,最大可达 2~3 m,边坡开挖揭露后,迅速风化,产生压缩变形,引起上部坚硬岩层顺平行坡面结构面拉裂,甚至垮塌;③平行坡面颇为发育的 NNW 向陡倾角结构面,这类结构面在第 12 和第 13 岩流层通常表现较长的延伸;④第 12 岩流层中下部为呈碎裂结构的玄武岩,这部分岩体风化较为强烈,导致玄武岩隐裂隙显现,并切割岩体呈碎裂状,开挖卸荷后极易松弛,形成局部的失稳。

陡峻的斜坡地形是危岩体形成的必要条件。此外,边坡的高度对危岩体的形成也有明显的影响。现有研究^[8]表明:75.4%的危岩体发育在坡度大于 45°的陡坡地形。该水电站坝区处于峡谷段,山体浑厚,河谷断面呈较为对称的“V”型,两岸谷坡陡峻,左岸坡度为 40°~75°,右岸坡度为 55°~75°,边坡高度大于 300 m^[19-10],这种地形、地貌条件有利于危岩体的形成。

受上述地形特征和岩体结构条件的影响,该坝区高边坡危岩体十分发育。边坡左右两岸共发育有 41 块(区)危岩体,其中,左岸 23 块(区),右岸 18 块(区),对水电站的建设和建成后运营将产生较大的潜在威胁。该坝区危岩体多分布在层间或层内充填型结构面部位,以层间或层内充填型结构面为底部、顶部边界,以陡倾构造裂隙作为后缘边界,部分危岩体以缓倾构造裂隙为底部、顶部边界,以陡倾构造裂隙作为后缘边界。

2 危岩体分类及失稳模式

2.1 危岩体分类

根据对边坡危岩体的调查分析,从危岩体稳定性的控制条件出发,确定危岩体主要有以下类型,即孤立式、悬挂式、贴坡式、软弱基座式和碎裂结构式等 5 种类型。由于危岩体发育于坡面上,因此将危岩体沿坡面方向的尺寸定为宽度,将危岩体与坡面垂直方向的尺寸定为厚度,将危岩体顶部和底部高程的差定为高度。

a. 孤立式危岩体是指危岩体整体已与母岩分离,孤立于坡面上,靠与坡面的摩擦力、嵌合力或植被的拦挡保持现状。此类危岩体多出现在坡度较缓或覆盖层较厚的坡面上(图 1)。

b. 悬挂式危岩体是指岩体底面临空,上部与后部母岩尚未脱离,悬挂于坡面上的稳定性较差的岩体。危岩体底部临空的原因主要是下部的差异风化(图 2)。

c. 贴坡式危岩体是指后部存在与边坡倾斜一致的、贯通或断续贯通的结构面,贴于坡面上的不稳定或欠稳定的岩体(图 3)。

d. 软弱基座式危岩体是指底部存在物理力学性质较低的软弱层,岩体在重力等作用下挤压软弱层,使岩体后部拉裂而形成的危岩体(图 4)。

e. 碎裂结构式危岩体是指在多组结构面与临空面构成不利组合作用下,呈块状、次块状碎裂结构的易失稳破坏的岩体(图 5)。

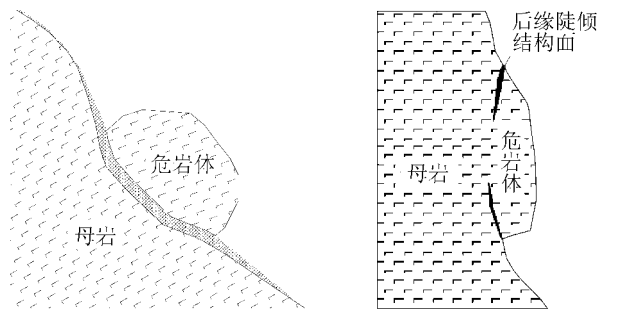


图 1 孤立式危岩体

图 2 悬挂式危岩体

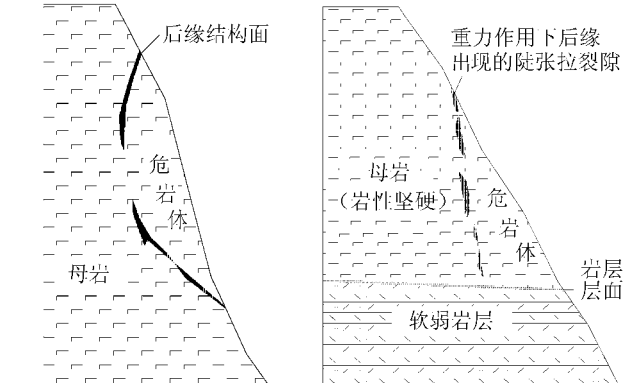


图 3 贴坡式危岩体

图 4 软弱基座式危岩体

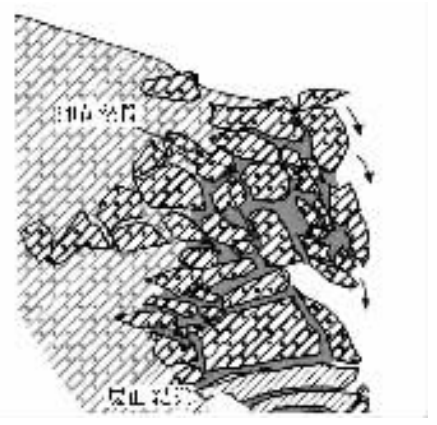


图 5 碎裂结构式危岩体

2.2 危岩体的失稳模式

危岩体的类型不同,变形失稳模式也不尽相同,在现场调查的基础上对高边坡危岩体进行分析,其变形失稳模式可以归结为偏心滚落模式、错落破坏模式、整体滑移模式、壅流-拉裂模式和溃屈模式。

a. 偏心滚落模式是指危岩体受渐进风化及重

力作用,块体重心逐渐偏移失去支撑而失稳。地下水对基座的软化、侵蚀是促使危岩体以该模式破坏的主要因素,对应此模式的主要为孤立式危岩体。

b. 在自重等作用下,危岩体与母岩之间连接的岩桥被剪断,与母岩分离而整体崩落的失稳模式称为错落破坏模式,对应此模式的主要为悬挂式危岩体。

c. 危岩体覆于坡面上,后缘结构面为主控结构面,当危岩体所受抗滑力低于下滑力时,沿后缘结构面滑移而失稳的模式称为整体滑移模式,一般认为贴坡式危岩体以这种模式失稳为主。

d. 下伏软岩在上覆岩层压力作用下产生塑性流动并向临空方向挤出,上覆危岩体因拉裂、解体和不均匀沉陷而失稳破坏的模式称为塑流-拉裂模式,软弱基座式危岩体对应此模式。

e. 危岩体结构碎裂,在风化、水流侵蚀作用下而结构溃屈的失稳破坏模式称为溃屈模式,碎裂式危岩体以这种模式失稳。

3 危岩体稳定性评价

危岩体稳定性评价的方法很多,主要有计算法和综合性评价方法。计算法就是利用刚体极限平衡理论或经验公式计算危岩体的稳定系数,从而评价其稳定性。综合性评价方法主要有灰色聚类评价法、可靠性理论评价法及时序分析法等。以上这些评价方法需要的最主要的参数是危岩体主控结构面的参数,其中最重要的是结构面的连通情况,但危岩体主控结构面的连通情况是很难现场确定的,因此这些方法的应用存在很大的局限性。所以,需要寻找一种根据现场调查的与危岩体地质特征相关的体系来确定危岩体稳定性等级的方法。

影响危岩体稳定性的因素很多,最主要的是危岩体的地质特征,包括坡体特征、结构面特征和风化特征等,另外,危岩体自身特征对其稳定性也有影响,同时也可以采用同类危岩体稳定状态来类比。影响危岩体稳定性的每一个因素又包含了多个因子,他们相互作用、相互影响。评价系统在分析各个因子对危岩体稳定性影响大小的基础上,确定各个因子的权重,从而建立了危岩体稳定性评价系统。

3.1 地质特征

3.1.1 坡体特征(权重 20%)

a. 边坡坡度。①陡坡(坡度大于 60°)分值为 3~4 分;②中缓坡(坡度在 $35^\circ \sim 60^\circ$ 之间)分值为 1.6~3 分;③缓坡(坡度小于 35°)分值为 0~1.6 分。

b. 岩体质量。①V 类岩体(松弛结构或散体结构)分值为 4.5~6 分;②IV 类岩体(镶嵌结构或碎裂结构)分值为 2.4~4.5 分;③III 类岩体(次块状结构)分值为 0~2.4 分。

c. 边坡岩体结构特征。①完全不稳定或不稳

定;以大范围的平面破坏、类似土质边坡的破坏、平面滑动、大的楔形滑动为破坏特征的 V 类或 IV 类岩体边坡,分值为 3.75~5 分;②局部稳定:以某些节理或很多楔形体滑动为破坏特征的 III 类岩体边坡,分值为 2~3.75 分;③稳定或完全稳定:仅以某些块体崩落为破坏特征或不存在破坏的 II 类或 I 类岩体边坡,分值为 0~2 分。

3.1.2 危岩体结构面特征(权重 40%)

a. 结构面分布组合特征。①不利方位的连续节理:危岩体表现出不利方位的控制性节理模式、层理面或其他非连续体,分值为 15~20 分;②不利方位的非连续节理:危岩体表现出非常显著的不利方位节理模式、层理面或其他非连续体,分值为 8~15 分;③随机方位的非连续节理:可能有一些分散的带不利方位节理的块体,但不存在起控制作用的节理组,分值为 0~8 分。

b. 是否构成几何可移动性块体。①构成潜在滑动的块体或楔形体,分值为 7.5~10 分;②有构成块体的潜在发育结构面,分值为 4~7.5 分;③基本不构成几何可移动性块体,分值为 0~4 分。

c. 结构面表面特征。①黏土充填或镜面:诸如黏土和强风化等低摩擦材料将岩石壁面分离,使节理面的任何宏观和微观粗糙度失效,这些充填材料与岩石的接触摩擦角比岩石之间的接触摩擦角小得多,镜面节理也具有非常小的摩擦角,分值为 7.5~10 分;②结构面表面平整:宏观光滑但微观粗糙的节理,表面无任何起伏,摩擦直接来源于岩石表面的粗糙度,分值为 4~7.5 分;③结构面表面粗糙而不规则或有起伏:节理表面粗糙,节理不规则,足以引起块体之间的嵌锁或有宏观和微观粗糙特征但不具嵌锁能力,分值为 0~4 分。

3.1.3 危岩体风化特征(权重 20%)

a. 结构特征。①大量的侵蚀特征:诸如危险的侵蚀性悬崖等严重情形,分值为 9.75~13 分;②明显的侵蚀特征:存在较多而明显的差异风化特征,分值为 5.2~9.75 分;③很少或偶有侵蚀特征:只有微弱的差异风化特征,分值为 0~5.2 分。

b. 风化速度差异。①极大差异:这种差异使侵蚀特征很快形成,分值为 9~12 分;②大的差异:这种差异使侵蚀特征每年都会形成,分值为 4.8~9 分;③小或中等差异,分值为 0~4.8 分。

3.2 危岩体自身特征(权重 10%)

a. 危岩体规模。规模大于或等于 100 m^3 ,分值为 4.5~6 分;规模在 $10 \sim 100\text{ m}^3$ 之间,分值为 2.4~4.5 分;规模小于或等于 10 m^3 ,分值为 0~2.4 分。

b. 危岩体易碎情况。整体性较差、极易碎裂的危岩,分值为 3~4 分;整体性一般、较易碎裂的危岩,分值为 1.6~3 分;整体性好、不易碎裂的危岩,

分值为 0~1.6 分。

3.3 工程类比特征(权重 10%)

同类型危岩体全部失稳,分值为 7.5~10 分;同类型危岩体部分失稳或局部失稳,分值为 4~7.5 分;同类型危岩体局部失稳或个别失稳,分值为 0~4 分。

根据以上评价体系可知,当分值大于或等于 75 分时,为Ⅰ类危岩体,稳定性差;当分值在 40~75 分之间时,为Ⅱ类危岩体,稳定性较差;当分值小于 40 分时,为Ⅲ类危岩体,稳定性一般。

利用该评价体系对溪洛渡水电工程坝区边坡发育的危岩体进行评分,得出该坝区高边坡Ⅰ类危岩体有 14 块(区),其中左岸 7 块(区),右岸 7 块(区);Ⅱ类危岩体有 24 块(区),其中左岸 14 块(区),右岸 10 块(区);Ⅲ类危岩体有 3 块(区),其中左岸 2 块(区),右岸 1 块(区)。

4 危岩体危险性分析

危岩体的危险性评价应考虑危岩体的稳定性、危岩体失稳后冲击建(构)筑物的能量和所威胁建(构)筑物的重要程度等 3 个因子。由于危岩体只有在失稳破坏后才会对建(构)筑物构成威胁,因此危岩体的稳定性是危险性评价的前提。在确定稳定性的前提下考虑建(构)筑物的重要性和危岩体失稳后冲击建(构)筑物的能量对危岩体危险性进行评价,如表 1 所示。

表 1 危岩体危险性评价

危险性评价	危岩体稳定性类别	受威胁的建(构)筑物的重要性	冲击能量
高度危险性	Ⅰ类危岩体	重要 较重要 一般	大、中等或小 大或中等 大
	Ⅱ类危岩体	重要 较重要	大 小
中度危险性	Ⅰ类危岩体	一般	中等或小
	Ⅱ类危岩体	重要 较重要 一般	中等或小 大、中等或小 大或中
轻度危险性	Ⅱ类危岩体	一般	小
	Ⅲ类危岩体	重要、较重要 或一般	大、中等 或小

根据所威胁的建(构)筑物对整个工程项目的重要程度,将建(构)筑物分为 3 类:①重要建(构)筑物。作为整个工程项目关键的组成部分,如果其遭到损害,整个工程项目将不能运行。②较重要建(构)筑物。作为整个工程项目重要的组成部分,如果其遭到损害,对整个工程项目的正常运行有重要影响。③一般建(构)筑物。作为整个工程项目的次要组成部分,如果其遭到损害,基本不影响整个工程项目的正常运行或影响很小。

根据危岩体失稳后冲击建(构)筑物能量的大小,

将冲击能量分为 3 个级别:当冲击能量大于 104 kJ 时,冲击能量为大;当冲击能量在 103~104 kJ 之间时,冲击能量为中等;当冲击能量小于等于 103 kJ 时,冲击能量为小。

5 结 论

a. 该水电站坝区高边坡左右两岸主要有 41 块(区)危岩体,其中左岸 23 块(区),右岸 18 块(区),它们对工程的建设和建成后运营有较大的潜在威胁。危岩体的分布明显受地形和岩体结构条件的限制。

b. 根据危岩体的边界条件和形态特征将危岩体分为孤立式、悬挂式、贴坡式、软弱基座式和碎裂结构式等 5 类,对应的变形失稳模式依次为偏心滚落模式、错落破坏模式、整体滑移模式、塑流-拉裂模式和溃屈模式。

c. 根据危岩体地质特征和类比其他工程的情形,对危岩体稳定性进行了系统评价,建立了稳定性的分值评价系统。根据得分的高低,将危岩体分为 3 类:当分值大于或等于 75 分时,为Ⅰ类危岩体,稳定性差;当分值在 40~75 分之间时,为Ⅱ类危岩体,稳定性较差;当分值小于 40 分时,为Ⅲ类危岩体,稳定性一般。

d. 以危岩体的稳定性分类为前提,考虑危岩体失稳后冲击建(构)筑物的能量和所威胁的建(构)筑物的重要程度,对危岩体的危险性进行了评价,将其危险性分为高度危险、中度危险和轻度危险,从而为危岩体的治理提供了依据。

参考文献:

[1] 黄润秋,许模,柴贺军,等.金沙江溪洛渡水电工程岩体结构模型及其工程应用研究[R].成都:成都理工学院,1997.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 夏元友,朱瑞璈.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.

[6] 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.

[7] 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):716-722.

[8] 胡厚田.崩塌与落石[M].北京:中国铁道出版社,1989:9-28.

[9] 黄润秋,许模,陈剑平,等.复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M].北京:科学出版社,2004.

[10] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1990.

(收稿日期 2007-11-08 编辑:方宇彤)