

火焰石危岩劣化变形机理研究

何钰铭^{1,2} 谢迪^{1,2} 王金波^{1,2} 黄宁^{1,2} 田然^{1,2}

1. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室 武汉 430000

2. 湖北省水文地质工程地质勘察院有限公司 湖北宜昌 443000

摘要: 通过对火焰石危岩体进行现场调(勘)查, 查明了火焰石危岩体基本特征、劣化特征, 揭示了消落区岩体劣化过程, 并探讨了危岩体劣化变形破坏模式, 对库区岩体劣化引起的类型危岩体变形研究具有一定的参考意义。

关键词: 岩体劣化; 地质灾害; 危岩体; 劣化变形机理

Study on deterioration deformation mechanism of flame stone dangerous rock

He Yuming^{1,2}, Xie Di^{1,2}, Wang Jinbo^{1,2}, Huang Ning^{1,2}, Tian Ran^{1,2}

1. Key Laboratory of Resources and Ecological Environment Geology of Hubei Province Wuhan 430000

2. Hubei Hydrogeological and Engineering Geological Survey Institute Co., LTD. Hubei Yichang 443000

Abstract: Through the field adjustment (survey) investigation of the flame stone dangerous rock mass, the basic characteristics and deterioration characteristics of the flame stone dangerous rock mass are found out, and the deterioration process of the deterioration mode of the dangerous rock body is discussed, and the deformation research of the type caused by the deterioration of the rock mass in the reservoir area is studied.

Keywords: rock mass deterioration; geological disaster; dangerous rock mass; deterioration and deformation mechanism

引言:

湖北省三峡库区蓄水运行后, 消落区岩体经历着夏季曝晒、冬季浸水的“干湿循环”过程, 库区地质环境发生较大变化, 岸坡出现覆盖层消失、岩体散裂块裂、崩解碎裂、脱落等劣化现象, 造成了斜坡稳定性降低。库岸多处出现小范围垮塌、崩落、滑移变形, 局部区段形成危岩或产生滑坡等突发性新生地质灾害, 本文通过对岸坡劣化引起火焰石危岩体变形的机理进行初步研究, 为三峡库区碳酸盐岩岸坡劣化研究、危岩体机理及防治提供技术支撑。

1 危岩体基本特征

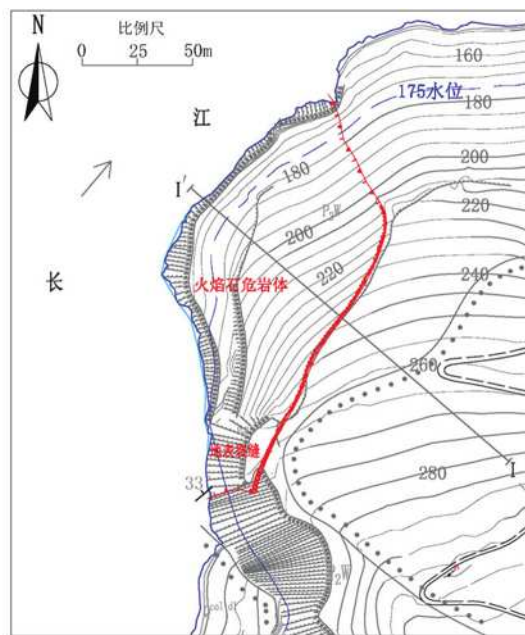
火焰石危岩体^[1]位于长江干流右岸, 行政隶属于巴东县信陵镇火焰石村, 危岩体主崩方向 310° , 西、北两面临空, 危岩体边界清晰, 西侧为陡崖, 北西侧为 $35^\circ\text{--}60^\circ$ 的陡坡(局部发育陡坎), 北东侧受走向 45° 的裂缝

控制, 坡顶高程225–260米, 坡脚在水下高程110米左右(涉水深35–65米)。危岩体剖面形态近似三角形, 纵长约170米, 平均宽约100米, 均厚约45米, 平面面积约1.7万平方米, 体积约75万立方米。

火焰石危岩体西、北两侧临空, 坡体结构类型为顺向坡。主要由吴家坪(P_{2w})组浅灰至灰色中厚–厚层状含燧石条带灰岩灰岩(坚硬岩)组成, 基座为浅灰至灰色薄层状灰岩及炭质页岩(较软岩)组成。(见下图1、图2)

火焰石危岩体位于火焰石断裂东端北翼, 岩层产状 $320^\circ \angle 33^\circ$, 区内受火焰石断裂构造影响, 岩体较破碎, 岩体中主要发育两组裂隙: ① $300^\circ \angle 88^\circ$, 裂面较平直, 水平延伸长5–20米, 垂直延伸长15–50米, 切层, 裂面张开宽1–3厘米, 无充填, 线密度1条/米; ② $265^\circ \angle 85^\circ$, 裂面较平直, 水平延伸长约5–8米, 垂直延伸长8–10米, 切层, 裂面闭合为主, 线密度1条/米。同时, 岩体表面可见溶孔、溶隙发育, 岩溶较发育。

资助项目: 巴东县火焰石危岩监测预警工程项目。



图例 1 2 3 4 5 6 7

图1 火焰石危岩体地质平面图

1. 危岩体边界
2. 地表裂缝
3. 第四系崩坡积物
4. 二叠系上统吴家坪组
5. 岩土分界线
6. 岩层产状
7. 剖面线及编号

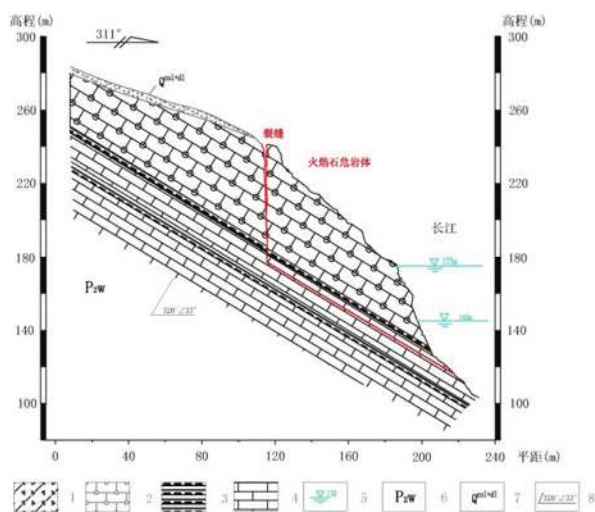


图2 火焰石危岩体地质剖面示意图

1. 碎块石土
2. 含燧石条带灰岩
3. 炭质页岩
4. 薄层灰岩
5. 水位线
6. 二叠系上统吴家坪组
7. 第四系崩坡积物
8. 岩层产状

2 危岩体变形特征

目前火焰石危岩体主要的变形特征为地面裂缝和陡崖零星崩落、掉块。

2.1 地面裂缝

据调查访问，火焰石危岩体地面裂缝发育于危岩体后部，变形始于1950年，前期变形主要由于危岩体下部

采矿活动引起，1960年裂缝增宽至1.6米，后续主要由三峡库区蓄水诱发，2003年6月三峡工程首次蓄水至135米时裂缝扩宽0.5米，2008年8月-10月三峡175米试验性蓄水时，裂缝扩宽了0.2米，随后持续扩宽，至2022年6月裂缝最大宽度为2.5米。通过近期开展的火焰石危岩裂缝监测表明，火焰石危岩处于缓慢变形阶段。该地面裂缝略呈弧状发育，裂缝走向近45°，裂缝外侧下坐约1.2米，西侧崖壁裂缝可见深度55-65米，长约168米，裂缝张开宽0.5-2.5米，少量碎块石充填。

2.2 崩落掉块

零星崩落掉块主要发生于西侧崖壁，高60-85米，坡面为中风化岩体，坡表岩体裂隙较发育，受裂隙切割，坡面上出现多块贴壁危岩，体积多为3-10立方米。

3 危岩基座劣化特征

3.1 强度劣化特征研究

针对危岩基座劣化现状，开展了现场回弹和点荷载对比试验。对水上、水下基座岩体进行了现场回弹试验，同一部位水上强度略高于消落区岩体，含燧石条带灰岩水上平均回弹值为61.2MPa，消落区平均回弹值为58.4MPa。对水上和消落区进行了现场点荷载试验，消落区点荷载平均值为36.14kN，水上破坏荷载平均值为37.06kN，对比相差0.92kN，平均强度仅下降2.48%。

综上所述，水上、水下对比岩体强度对比，消落区岩体强度略低，因此，库水位变动对含燧石条带灰岩强度劣化影响较小。

3.2 结构面劣化变形特征

通过对火焰石危岩体基座同一部位的水上和消落区裂隙面现状对比，水上部分岩体相对较完整，裂隙面多呈闭合状，少量张开平均宽1-3厘米，且多为钙质充填，密度2条/米，延伸长1-2米，裂隙面贯通情况一般；消落区岩体较破碎，特别是危岩凸出部位破碎，裂隙面平均张开5-10厘米，无填充，密度3-6条/米，延伸长1-5米，裂隙面贯通情况好，裂隙面互切密布，岩体多块裂呈块状，块径一般为20-50厘米。

3.3 岩体水平向劣化深度分析

通过对火焰石基座布置了水平钻孔勘查，在孔内进行声波测试及井下电视测试。测试结果显示裂隙发育多在8-15毫米之间，最大裂隙宽度为46.3毫米，火焰石库岸钻孔测试的结果表明库岸岩体劣化在浅表层0-3.5米左右最为严重，主要为沿层面易溶矿物（钙质矿物）的溶解和裂隙面劣化对岩体的切割，岩体较为破碎。水平向严重劣化的深度约为3.5米，劣化影响深度5.5米左右。

3.4 危岩体稳定性计算

① 计算模型与工况

本次稳定计算主要用于评价火焰石危岩体的稳定性及预测危岩体变形发展趋势。根据前节所述,火焰石危岩体所处斜坡为顺向坡,且上硬下软,具备产生滑移式崩塌的物质基础条件。计算模型采用1条实测工程地质纵剖面图为原型(图3)。

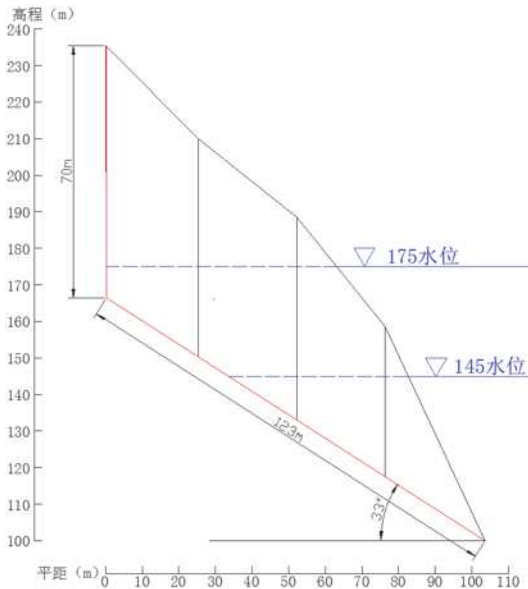


图3 计算模型

② 计算工况

本次稳定性计算工况、荷载组合选用以下2种工况进行计算:

工况1: 自重+地下水+175米水位

工况2: 自重+地下水+145米水位

③ 计算结果

计算工况	计算方法	稳定系数	稳定状态
自重+地下水+175米水位	单一平面滑动法	1.101	基本稳定
自重+地下水+145米水位	单一平面滑动法	1.128	基本稳定

a. 在自重+地下水+175米水位工况下,火焰石危岩体整体稳定系数大于1.2,处于基本稳定状态,稳定系数安全储备不高。

b. 在自重+地下水+145米水位工况下,危岩体整体稳定系数大于安全系数,处于整体稳定状态,具有一定的安全储备,但随着时间推移,岩体的抗剪强度将进一步降低。

4 危岩体劣化变形机理分析

4.1 危岩体变形破坏机制

根据上述特征综合分析,火焰石危岩1950年变形初期因下部矿山活动影响导致陡崖处顶部厚层岩体在薄层交界处形成沿构造结构面外倾贯通,形成垂向大裂缝,最终形成了火焰石危岩的初始形态,随着采矿活动的逐步深入,裂缝进一步变形。2003年三峡工程运行135米蓄水后,危岩体的部分基座位于水下,降低了危岩体整体稳定性,后部贯通裂缝进一步扩大。在高水位运行期间,基座岩体受水库作用影响开始劣化变形,消落区岩体结构面劣化贯通,逐步破碎、崩落、薄层较软岩劣化形成凹腔、凹槽,危岩基座及危岩底部临江侧的岩体开始劣化块裂,抗滑力和支撑力逐步降低,目前危岩体处于缓慢变形阶段,随时间推移,劣化逐步深入和扩展,最终导致危岩支撑的关键块体(危岩基座和危岩底部岩体)失稳破坏,引起火焰石危岩滑移入江,并极有可能诱发涌浪次生灾害。

4.2 危岩基座岩体劣化变形机理初步分析

消落区岩体劣化变形过程^[2]大致分为三个循环阶段,分述如下。

(1) 劣化初始阶段

水库蓄水后淹没植被,植被由于被库水淹没,根系的吸收能力大大降低,造成根系发育不良,根系腐烂等状况,从而导致植被大量死亡,加上水库涌浪侵蚀,植被及植被覆盖层逐渐灭失,从而导致基岩逐渐裸露。三峡库区为了应对可能到来的汛期洪峰,腾库容低水位运行,导致岸坡岩体裸露,岩体表层冷热变化比内部迅速,热胀冷缩,造成岩体表层强度逐渐降低。

(2) 劣化发展阶段

在三峡库区运行过程中,库水位变动频繁,裸露的基岩被库水冲刷,岩体裂隙面填充物被掏蚀,钙质易溶矿物沿岩体内外层面溶解,导致已有裂隙面进一步加宽加深,库水与岩体接触面积增加,裂隙矿物与水中离子接触,发生反应,溶解水中,进一步加快了劣化的速度,裂隙沿层理扩展延伸,次生裂隙不断发育,大量裂隙相互连通,形成细小裂缝,细小裂缝随扩展方向不断扩张连通,形成较大的裂缝。

(3) 劣化破坏阶段

由于库水冲刷,填充物流失,局部岩体临空,岸坡岩体孔隙增大,整体结构受到挤压,骨架颗粒分散,岩体内部团簇效应逐渐减弱,导致岩体自身结构失稳,在上覆岩体重力作用下,对岩体产生拉裂及挤压,对岩体的支撑结构造成了一定的负担,同时在水流的影响下,重力效应逐渐增大,连接结构逐步劣化损坏,加上形成

了较大的裂缝，最终导致基座岩体破坏化，结构松散化，承重能力大幅度减弱，局部崩落掉块，裸露出新的表层岩体。

岩体基座在上述循环过程中逐渐劣化，裂隙逐渐加宽加深，填充物消失，基座岩体部分临空，地形线不断向内凹进，消落区岩体坡度逐渐变陡。岩体临空面逐渐增加，形成危岩体，一旦基座岩体破碎化加重，导致结构松散化，从而承重能力大幅度减弱，危岩体整体下坐，最终可能形成危岩体整体式滑移。

5 结语与体会

本文通过对火焰石危岩体的基本特征、劣化变形特征进行综合分析，强度劣化^[3]对于岩体变形影响较小，通过声波测试和成像测试，对比波速变化来得到岩体裂隙发育程度与劣化深度的影响，确定了劣化影响范围，对比水位线上下结构面劣化的差异，岩体劣化逐渐造成裂隙加宽加深，隐性裂隙显现、张开、贯通，裂隙连通逐渐形成裂缝。同时，库水位变动，促进了溶沟溶槽的形成，特别对软弱夹层部位进一步溶蚀、压碎

破坏。通过多手段调查，概括了劣化变形特征及现象，总结了火焰石危岩体劣化变形机理，得到了劣化致灾趋势。

岩体劣化不仅仅需要空间范围上的对比，更重要的是时间上的对比，用相同部位的岩体对比现在与以前的劣化程度，分析岩体劣化进展程度，岩体劣化速率，确立岩体劣化究竟到达哪一个阶段导致灾害的发生，从而为防灾减灾做出贡献。

参考文献：

- [1]廖伟杰，何钰铭，侯时平，等.巴东县火焰石危岩体监测预警工程设计[R].宜昌：湖北省水文地质工程地质勘察院.2020.
- [2]何钰铭，王金波，金卉林，等.卡门子湾滑坡及周边碎屑岩库岸劣化变形机制初步研究[J].资源环境与工程，2020，34（4）：554-560.
- [3]黄波林，殷跃平等.三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究[J].岩石力学与工程学报，2019，38（9）：1786-1796.

