

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.02.02

库水位变动条件下柱状危岩体变形破坏机理

陈小婷¹, 王健¹, 黄波林¹, 谭建民²

(1. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

摘要: 三峡水库周期性水位变动造成了部分消落带岩体劣化, 其具体表现为强度下降和宏观裂隙增多, 这使得一些柱状危岩体被发现或需要重新认识, 包括箭穿洞、曲子滩和棺木岭等危岩体。这些柱状危岩体三维边界清晰, 由“硬-相对软”的岩性组成, 主要受控于相对软的硬岩基座岩体。采用伪时间增量的方式模拟岩石强度的时间相关劣化效应, 数值分析了多水位变动周期下棺木岭危岩体裂缝和破坏区的扩展情况。危岩体初始破坏区主要集中在基座趾部岩体。随着水位变动周期增多, 裂缝和破坏区由危岩体踵部和趾部相对扩展, 破坏区主要集中在危岩体踵部。10次水位周期计算所得破坏区比相同时步、没有劣化效应时增加了近4倍, 且以拉张破坏为主。周期性水位变动造成的岩体劣化强烈加快了柱状危岩体演化进程, 同时影响了其破坏机理。从数值分析来看, 棺木岭危岩体的变形破坏模式从原来的倾倒为主将转为以压溃崩塌为主。水位变动条件下岩石强度的时间相关劣化效应及其对柱状危岩体的影响研究将为三峡水库危岩体防治提供重要技术支撑。

关键词: 水位变动; 柱状危岩体; 岩体劣化; 破坏区扩展; 压溃失稳模式

中图分类号: P642.3

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)01-0009-10

Deformation and failure mechanism of pillar-shaped dangerous rock mass under reservoir's water level fluctuation

CHEN Xiaoting¹, WANG Jian¹, HUANG Bolin¹, TAN Jianmin²

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract: The periodic water level fluctuation of the Three Gorges Reservoir caused the deterioration of the rock mass in fluctuation zone, which is characterized by a decrease in strength and an increase in macroscopic fractures. Some dangerous rock mass are discovered or need to be re recognized, including Jianchuandong, Quzitan and Guanmuling dangerous rockmass. The boundaries of these dangerous rockmass are clear. The dangerous rockmass are built by the lithology of “hard-relative soft” rock, mainly controlled by the base mass, which is relative soft. Adopted pseudo time increment to simulate the time-dependent deteriorating effect of the rockmass in the fluctuation zone, the propagation of fractures and the failure zone of Guanmuling dangerous rockmass under multi-periods of water level fluctuation are analyzed. As the water level fluctuation cycles increase, fractures and failure zone are expanded from the heel and toe of the dangerous rockmass, and the main failure zones are concentrated in the heel. The failure zone calculated in the condition of ten water level cycles increased by nearly 4 times compared with the same calculating time steps with no deteriorating effect, and the failure is mainly tensile. The rock mass deterioration resulted from periodic water level fluctuation affected the failure mechanism of pillar-shaped dangerous rock mass and accelerated this evolution process. The

收稿日期: 2018-04-18; 修订日期: 2018-07-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504803); 中国地质调查局项目(121201009000150018)

第一作者: 陈小婷(1979-), 女, 黑龙江兰西人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水库地质灾害调查研究。E-mail: 344582786@qq.com

results of numerical analysis shows that the main deformation and failure mode of Guanmuling rock fall are transferred from topple to collapse. This study will provide important technical support for the prevention and control of landslides in the Three Gorges Reservoir.

Keywords: water level fluctuation; rock mass deterioration; pillar-shaped dangerous rock mass; failure zone propagation; collapse failure mode

0 引言

三峡库区 175 m 蓄水后,每年水位在高程 145 ~ 175 m 间波动,形成了高差 30 m 的水位变动带。针对三峡水库水位变动和危岩体,大量的前期研究集中在渗透压力的变化和危岩体静态稳定性方面^[1-3]。但是近期的调查研究显示,多年的饱和浸泡—风化曝晒造成了部分消落带岩体劣化^[4]。岩体劣化既造成了结构面的显现、延展和张开,也造成了岩石强度的下降^[5]。同时,结构面的明显出露使得一批江边的危岩体被发现或需要重新认识。其中柱状危岩体由于其基座岩体压裂严重、变形破坏机理复杂、破坏动能大而受到广泛关注。

HUNGR 等^[6]和 HUANG 等^[5]建立了承载压力和基座强度之间的经验不等式,用以判断钝性旋转崩塌和压溃崩塌失稳模式。FENG 等^[7]经过对中国西南灰岩山区的调查认为,柱状危岩体的失稳模式可分为滑移、旋转崩塌和压溃崩塌。ROHN 等^[8]基于 SANDLING 和 RASCHBERG 山脉危岩体的调查认为不稳定的柱状危岩体最终会侧向扩展或倾倒崩塌,软层的滑动和解体会导致岩体的崩塌。YIN 等^[9]分析了当坡脚凹腔明显时,大的长厚比柱状岩体的倾倒机制,周期性调水后低高程区岩体劣化的发生,加速了岸坡失稳演化进程,导致柱状危岩体变形破坏模式更为复杂。

柱状危岩体低高程区岩体的劣化造成了低高程区裂隙明显增多^[5],危岩体内部裂隙和破坏区的拓展在危岩体变形破坏过程中起着关键作用。采用 Extended Finite Element Method (XFEM)、Discrete Element Method (DEM)、Finite Element Method/Discrete Element Method (FEM/DEM)等方法,许多研究人员开展了大量岩体破坏扩展和变形模式方面的研究。

XFEM 采用了一种单元拆分法,容许在网格中独立地模拟不连续面。ZHUANG 等^[10]开展了(包含裂缝或没有裂缝)类岩样的单轴压缩试验,利用 XFEM 探索了裂缝起始时间、起始位置和传播行为。DEBASIS 等^[11]总结了 3 节点和 6 节点三角单位中不连续面的数学框架,也提供了利用 XFEM 开展单个和

多个裂缝的一维、二维应用案例。SHI 等^[12]基于 XFEM 发展了一种数值计算方法来模拟水力裂缝,数值分析表明裂缝传播路径依赖于岩体力学特性和原位应力场。WANG 等^[13]利用 ABAQUS 中的 XFEM 研究了在渗流应力耦合模型下裂缝的传播和闭合。XFEM 当前主要还应用在小变形的裂隙扩展,在实际工程尺度上的裂隙扩展和破坏分析应用较少。

自从 1989 年 Munjiza 提出 FEM/DEM 耦合方法以来,OWEN 等^[14],XIANG 等^[15]和 LATHAM 等^[16]推动了在 FEM/DEM 模型框架中的裂隙扩展算法。MORRIS 等^[17]开发了 Livermore distinct element code 来进行地质体变形破坏运动全过程的数值模拟。EBERHARDT 等^[18]利用 EFLFEN 对 1991 年 Swiss 的 Randa 岩质崩滑体进行了数值分析,研究了岩桥的破坏、崩滑体的运动及堆积过程。MAHABADI 等^[19-20]使用 FEM/DEM 方法构建了 Y-GUI 程序,并对动力条件下的巴西圆盘试验进行数值模拟,模拟结果与试验相吻合。LIU 等^[21]利用 FEM/DEM 耦合方法研究了直剪试验中岩石粗糙节理的错动过程,尽管这一方法被快速推广应用,但是方法的可操作性和实际工程适用性仍有待提高。

DEM 被广泛应用在模拟脆性岩石中裂隙的产生、扩展和闭合等现象,它能够解决从微观破裂到宏观破坏的物质破坏问题。例如,MAXIMILIANO 等^[22]利用 UDEC 研究了含平行非连续节理的岩石力学行为,研究了因为已存裂缝的延展而导致的累进性破坏。PAN 等^[23]集成 TOUGH2 和 RDCA 来耦合分析各向异性岩石中水力多相流和不连续面的力学性质,其中 RDCA 用于模拟岩石非线性的不连续地质力学行为。LAN 等^[24]实施了 ÄSPö 柱稳定性实验,基于颗粒的离散元方法分析了岩体的破坏演进。VALENTINGISCHIG 等^[25]展示了一个概念模型,提出重复的地震活动能通过创造和拓展裂缝来破坏相对坚固的岩石斜坡,直到岩体被充分削弱以引发灾难性的破坏。

显然,尽管较少有人研究岩体劣化条件下柱状危岩体裂缝及破坏区扩展,但它确是柱状危岩体演化过程的关键。因此,本文展示三峡库区若干柱状危岩体,

分析柱状危岩体及其基座岩体的工程地质特征,并以棺木岭危岩体为典型案例,采用 UDEC 的伪时间方法来开展水位变动条件下柱状危岩体内部破坏区扩展力学分析,研究典型柱状岩体裂缝和破坏区扩展过程,揭示岩体劣化对柱状岩体变形破坏机制影响。

1 三峡库区典型柱状危岩体及其基本特征

2008 年 175 m 蓄水后,消落带岩体劣化现象慢慢开始显现。部分消落带岩体出现了(长大)结构面显现或裂缝急剧变多,甚至局部破坏,而岩体结构有些从中厚层状变为中薄层状,甚至碎裂状。这些现象引起了广泛关注^[4],并开始对一些有(部分)边界、低高程岩体劣化的危岩体进行重新调查和重新认识。这些危岩体中柱状危岩体较为特殊,且发育占比较大,典型的如箭穿洞危岩体、曲子滩危岩体和棺木岭危岩体,它们拥有一些共同的工程地质特征。

1.1 若干典型柱状危岩体

(1) 箭穿洞危岩体

箭穿洞危岩体位于峡库区重庆市巫山县长江左岸,上距巫山县城约 15 km。箭穿洞斜坡在地貌上呈现陡崖与中缓坡交替的阶梯状三级台阶。第一级台阶下陡崖即为箭穿洞危岩体,其台阶面为大冶组四段 T_1d^4 。由于岩层位于背斜核部,地层较平缓,产状为 $260^\circ \angle 6^\circ$,斜坡总体为近水平层状岸坡。

箭穿洞危岩体上游侧边以陡崖冲沟为界,下游侧边界裂缝交切在临空陡崖面上,上宽下窄,上陡下缓,充填或局部充填碎石土,产状 $325^\circ \angle 45^\circ \sim 65^\circ$ 。危岩体后缘裂隙张开达到 3.15 m,产状 $276^\circ \sim 260^\circ \angle 75^\circ \sim 85^\circ$ 。箭穿洞危岩体的三维切割边界清楚,其几何形态呈不规则的柱体。后缘高程为 278 ~ 305 m,基座高程为 155 m,平均高差为 135 m,危岩体平均横宽约 55 m,平均厚度约 50 m,危岩体体积约 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$,主崩方向为 260° (图 1)。

箭穿洞危岩体基座岩体为泥质灰岩,其顶部高程为 155 m,基座岩体压裂破坏严重^[5]。危岩体中部以下为“反坡”,即危岩体基座为相对凹腔处,且基座岩体存在 3 个抗战时期修建的平碉。

(2) 曲子滩危岩群

曲子滩危岩群位于三峡库区巫山县培石乡长江右岸,上距巫山县城 21.5 km,下距巴东县城 27 km。曲子滩斜坡为临江悬崖,陡崖坡面产状为 $0^\circ \sim 10^\circ \angle 83^\circ \sim 88^\circ$ 。危岩群岩性主要为二叠系嘉陵江组三段中厚层灰岩、泥质灰岩,岩层面产状为 $98^\circ \angle 10^\circ$ 。

斜坡被两组构造裂隙切割,产状分别为 $5^\circ \angle 80^\circ$ 和 $85^\circ \angle 85^\circ$ 。2 组结构面将崖面切割出四个柱状危岩体,危岩群沿江长度约 100 m,厚度 5 ~ 10 m,高度 115 ~ 135 m,危岩单体体积 $5\,000 \sim 15\,000 \text{ m}^3$ 不等。

危岩体基座顶部高程约 150 m 左右,基座岩性为薄一中厚层状泥质灰岩。水位变动带内基座岩体溶蚀和软化作用明显,表现为裂隙宽度大,溶蚀孔洞发育,且有局部压扭变形现象。中下部岩体和基座岩体有局部掉块现象,形成局部的负地形(图 2)。



图 1 箭穿洞危岩体照片

Fig.1 The picture of Jianchuandong dangerous rock mass



图 2 曲子滩危岩群照片

Fig.2 The picture of Quzitan dangerous rock mass

(3) 棺木岭危岩体

棺木岭危岩体在三峡库区秭归县九畹溪支流左岸,距九畹溪入长江口长度约 1.2 km。危岩体斜坡处于两条支沟夹持的东西向山脊前缘,此处三面临空,发育为陡崖(图 3、图 4)。危岩区出露的地层主要为寒武系上统三游洞组(C_{3sy})厚层白云岩夹薄层硅质白云岩,局部含泥质条带,岩层产状 $280^\circ \angle 22^\circ$ 。从岩性在东侧临空陡崖上分布情况看,高程 195 m 以上为厚层白云岩,高程 155 ~ 195 m 为中薄层泥质条带白云岩,构成危岩体主体。高程 150 ~ 155 m 为薄层状泥质白

云岩中间夹一层厚层白云岩,构成危岩体基座,高程 150 m 以下为中薄层泥质条带白云岩。



图 3 棺木岭危岩体的全景照片

Fig. 3 The whole scene of Guanmuling dangerous rock mass

注:箭头所指为危岩体边界;镜像 325°

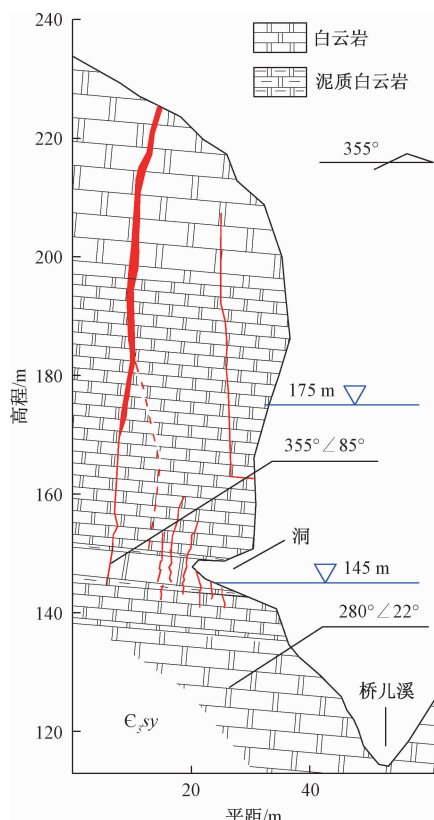


图 4 棺木岭危岩体剖面图

Fig. 4 The section map of Guanmuling dangerous rock mass

危岩体的南侧(后缘)裂隙在东侧崖壁面上清晰

可见,裂隙产状 $355^{\circ} \angle 85^{\circ}$ 。裂隙顶部岩体明显拉裂破坏,裂隙延伸到底部薄层泥质白云岩。危岩体的西侧边界裂隙产状 $275^{\circ} \angle 70^{\circ}$,与东临空崖面和九畹溪近平行,上窄下宽,可见延伸高度约 30 m。三维激光扫描测绘表明,在东侧崖壁上危岩体后缘最高高程约为 225 m,基座最低高程约为 150 m。裂缝控制岩体高度为 40 ~ 80 m,宽度约 50 m,厚度为 15 ~ 23 m,危岩体体积 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。危岩体呈不规则板柱状,主崩方向主要受后缘南侧裂缝控制,可能失稳方向 355° 。

危岩体基座岩体发育一套含泥质条带的薄层泥质白云岩夹一层厚 1.0 m 的白云岩。基座沿层面形成高 5 ~ 8 m 的岩腔,长约 60 m,最大深度达 12 m。同时,危岩体基座岩体压裂破碎严重,局部可见新鲜断面,岩体向外鼓胀,这说明危岩体在近期处于变形之中。

1.2 共同的工程地质特征

这些新发现的或需重新认识的柱状危岩体都有类似的工程地质特征。首先,它们都发育在陡崖斜坡上,三维边界较为清晰,呈板柱状或柱状,其重心投影都位于坡体内部。其次,构成危岩体(包括基座)的岩性构成均为传统认识上的硬质岩石—灰岩、白云岩等,基座岩体只是相对软的岩石—泥质条带白云岩、泥质灰岩等。因此,柱状危岩体岩性构成了“硬—相对软—硬”的硬岩岩性组合。这一岩性组合,决定了柱状危岩体的变形破坏受坡体内部结构面或基座岩体控制。在自然条件下,由于应力腐蚀或风化造成的基座岩体破坏和内部控制性结构面贯通是一个漫长的过程^[26-27]。一些柱状危岩体,例如神女峰上的“神女”常常耸立千年,稳定性较好。如果没有外界环境的急剧变化,这些柱状危岩体的稳定状态也会长期保持。因此,本文所述新发现的或需重新认识的柱状危岩体还特指受水位变动影响的危岩体,它们的部分岩体或基座岩体处于水位变动带上。一些危岩体位于较高高程的斜坡上,岩体质量不受或较少受水位变动影响,不在本文研究范围之类。

三峡水库周期性的水位变动极大地改变了一些柱状危岩体的外部地质环境条件。周期性饱和浸泡—风干曝晒循环加速了岩体劣化和力学强度的衰减^[28-30],压裂变形加剧,加速了危岩体变形,同时浪蚀作用使基座破碎岩体逐步掏空,使上部岩体悬空度加大,增加了其崩塌的危险性。在多次周期性水下浸泡—露出曝晒条件下,开展了三峡库区灰岩、白云岩、泥灰岩的抗压、抗剪、抗拉等物理力学性质试验,获得了随着不同循环周期次数的物理力学性质参数。20 次的水下浸泡—

露出曝晒周期会造成岩体抗压抗拉强度下降约15%~38%。20次循环荷载下,弹性模量下降约16%~35%^[5,31]。亦即,多次水位波动后,基座岩体更易破坏,这将极大的加速危岩体变形破坏进程。同时,从柱状危岩体失稳模式来看,柱状危岩体边界切割清晰,基座岩体处于类似单轴抗压状态(危岩体自重为压力来源),基座岩体处于受压状态。临空基座岩体由于不受限,形成压致破坏/挤出效应(这也可能是基座凹腔或负地形的形成原因)。基座岩体的部分挤出或破坏后将造成基座处于不均匀受压状态,基座岩体的应力集中程度进一步加剧,基座岩体破坏也将更为严重。基座的破碎则会造成危岩体力传递不均,使得危岩体纵向裂缝进一步发展,有解体崩塌的可能性。由此可见,在水位变动条件下基座岩体可能会被压溃,基座岩体的逐步压裂破坏会造成危岩体纵向裂缝的进一步发展,基座岩体的压裂和凹腔的进一步扩大,危岩体可能会呈复杂的滑移—倾倒—坠落的压溃崩塌破坏^[5,32]。

2 数值分析方法

岩体中裂缝从无到有,再到很多,裂缝拓展显然是随时间而变化的,具有明显的时间效应。岩体中含水量、湿度、温度都可能影响应力值,每个单元上应力的改变都可能导致微小破裂产生^[27]。在三峡水库,消落带岩体在冬季被水淹没,而夏季被暴露出来,一直处在水下浸泡—露出曝晒的循环周期中。这些岩体的力学强度和变形模量由于这种周期性条件而劣化衰减^[28-30]。在这种环境下,危岩体中的裂隙更容易发展,加速了危岩体的演化进程。

本次研究采用 UDEC 软件开展,以棺木岭危岩体为研究对象进行分析。在静态分析模式中,UDEC 建模时是不考虑时间相关性效应的,但是近似的模拟材料的某种时间相关性效应是可能的。UDEC 中没有能体现随时间强度衰减的本构模型,但是可以调整力学强度和模量值来模拟这种劣化影响。虽然时间不是显式变量,但是可以用 FISH 变量通过改变与时间相关的特征值来代表时间线。这个“伪时间”每发生一个增量时,模型都求解平衡。在本次研究中,与时间相关的特征值主要是周期性水下浸泡—露出曝晒条件下岩体物理力学性质指标。

在水位周期变动条件下岩体结构面强度也应有一定的劣化。但岩体结构面的劣化研究难度相当大,室内室外较难以取得衰减数据,因此本次研究没有将岩

体结构面时间相关性效应纳入考虑。

利用水位周期造成的强度下降来定制“伪时间”,亦即一次水位周期为一年时间。在程序中,每一次伪时间增量(水位周期)进行一次变量劣化调整,并求解平衡。如果在计算中单元已经破坏,单元会被记录,其抗拉强度和黏聚力自动设置为0。破坏单元可视为裂缝,而破坏单元的延展则为裂缝的延展。这样,每次求解平衡的时步数可视为真实时间的一次时间跨度,计算时步也可与真实的时间跨度相对应。

图5为构建的数值计算模型,分别采用0.5 m、1 m、1.5 m和3 m进行危岩体及夹层进行单元划分,中单位网格为5 612个。利用Elasto-plastic Strain-softening Mohr-Coulomb连续模型来计算应力分布。模型包含的裂隙除后缘的大裂隙外,在基座夹层还分布有10条。综合物理力学性质试验结果,它们在数值计算中取值为表1。本次研究将图5的物理力学性质劣化规律简化为等时间衰减,亦即在数值计算中每次“伪时间”增量下,强度参数呈2%的均匀下降。本次研究计算了10个“伪时间”增量,亦利用10个周期将岩体强度衰减20%。如前所述,20次的水下浸泡—露出曝晒周期会造成岩体抗压抗拉强度平均下降约20%^[5,31]。这10个周期可视为20次干湿循环,约相当于实际的20年左右。

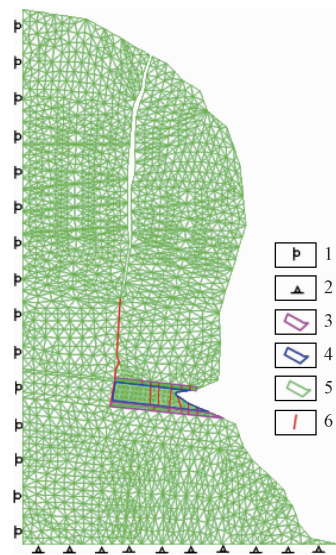


图5 棺木岭危岩体数值模型

Fig.5 The numerical model of Guanmuling dangerous rock mass

1—固定X速度;2—固定Y速度;3—泥质白云岩;
4—泥质条带白云岩;5—白云岩;6—已存裂隙。

表 1 初始数值计算参数表

Table 1 Parameters used in numerical model

岩性	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗拉强度 /Pa	黏聚力 /Pa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	体积模 量/Pa	剪切模 量/Pa
泥质 白云岩	2 500	1×10^6	6×10^6	40	8.8×10^9	4.3×10^9
泥质条带 白云岩	2 500	1.8×10^6	6.6×10^6	43	9.8×10^9	5.3×10^9
白云岩	2 600	2×10^6	7×10^6	45	22.6×10^9	11.1×10^9

3 变形破坏机理分析

没有考虑水位周期性变化造成的劣化时,从位移图上来看(图 6),危岩体以水平运动为主,垂直位移较少。水平位移上部大于下部,水平位移最大值处于危岩体顶部,向临空面方向运动。垂直位移以沉降为主,临空面向坡内递减,最大值处于临空侧。同时,节点力方向有横向分带特点,造成纵向裂缝在水平方向上的不一致,会造成纵向裂缝的新生。主应力差显示应力集中区分布在基座凹腔附近。主应力迹线显示最大主应力在基座发生严重偏转。这些区域将是裂缝新生区域。在没有水位周期前,水平位移的大小约是垂直位移的 5.3 倍,意味着危岩体运动方式总体表现为倾倒特征。水位周期发生后,水平位移的大小约是垂直位移的 4.5~5 倍。这似乎说明了水位周期带来的岩体强度下降并没有改变危岩体先前的破坏趋势。但是,如果从水位周期带来的危岩体裂缝扩展和破坏区变化来看,则可能有不同结论。

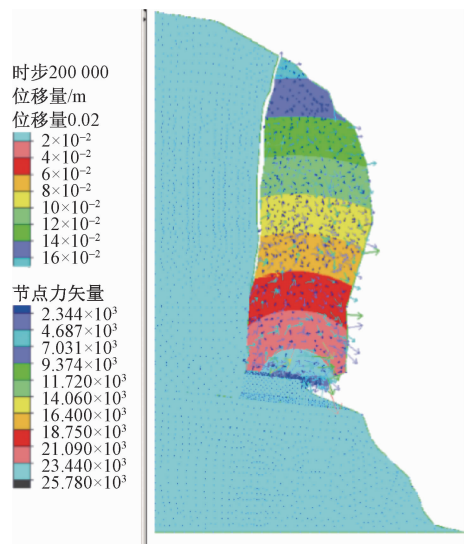


图 6 节点力矢量及位移矢量图

Fig. 6 The map of the vectors of gridpoints and the contour of displacement

没有水位周期前,危岩体少量破坏单元集中分布在基座凹腔(图 7),以拉破坏为主,拉破坏占总破坏区

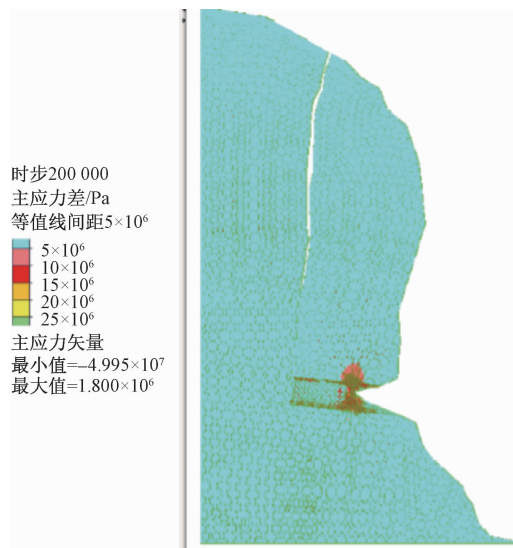


图 7 主应力迹线图

Fig. 7 The map of principal stress and stress difference

的 71.4%。随着水位周期的增加,岩体强度劣化逐步强烈,危岩体的破坏单元数也在不断增加,拉张裂缝不断延伸。从裂缝扩展来看,新增加的破坏区首先出现在危岩体的脚踵部和凹腔顶部夹层。凹腔顶部夹层进一步破坏,裂隙向内和向下深入。两个薄夹层中间的泥质条带白云岩由上而下出现了裂缝扩展,有些直抵底部夹层。危岩体脚踵部的破坏区不断向上、向下和向临空面方向扩展,形状呈三角形。在第 9 个水位周期时,原来几个独立扩展的破坏区(危岩体脚踵部的裂缝区和基座裂缝区)开始相连。这一裂缝扩展显示,危岩体的基座和危岩体脚踵部等应力集中区岩体易被压致拉裂破坏。在多个水位周期中,拉破坏区占总破坏区比约为 77.1%~88%(图 8)。

从第 10 个水位周期计算结果来看,已有裂缝多发生张开,少量挤压。在临空侧明显可见垂直的裂缝拉张开,缓倾结构面则由于错动而局部张开,这两点与野外调查发现的基座岩体张开现象一致(图 9、图 10)。

值得注意的是,危岩体的基座和危岩体脚踵部拉裂区贯通后,危岩体的切割条件与计算前完全不一样。这造成先前变形趋势分析可能过于静态,没有考虑在水位周期下裂缝和破坏区的发展。如果考虑水位周期下破坏区的发展,危岩体可能没有合适转动点以支撑倾倒,因为转动点都发生了破坏。水位变动条件下,岩体劣化发生后,基座岩体被压裂和裂缝贯通,复杂的压溃崩塌模式更可能成为现实。由于基座夹层破坏区的不均匀和沉降量的不均匀,危岩体会产生纵向裂缝,危岩体最终会解体崩塌破坏。这种压溃崩塌破坏模式是

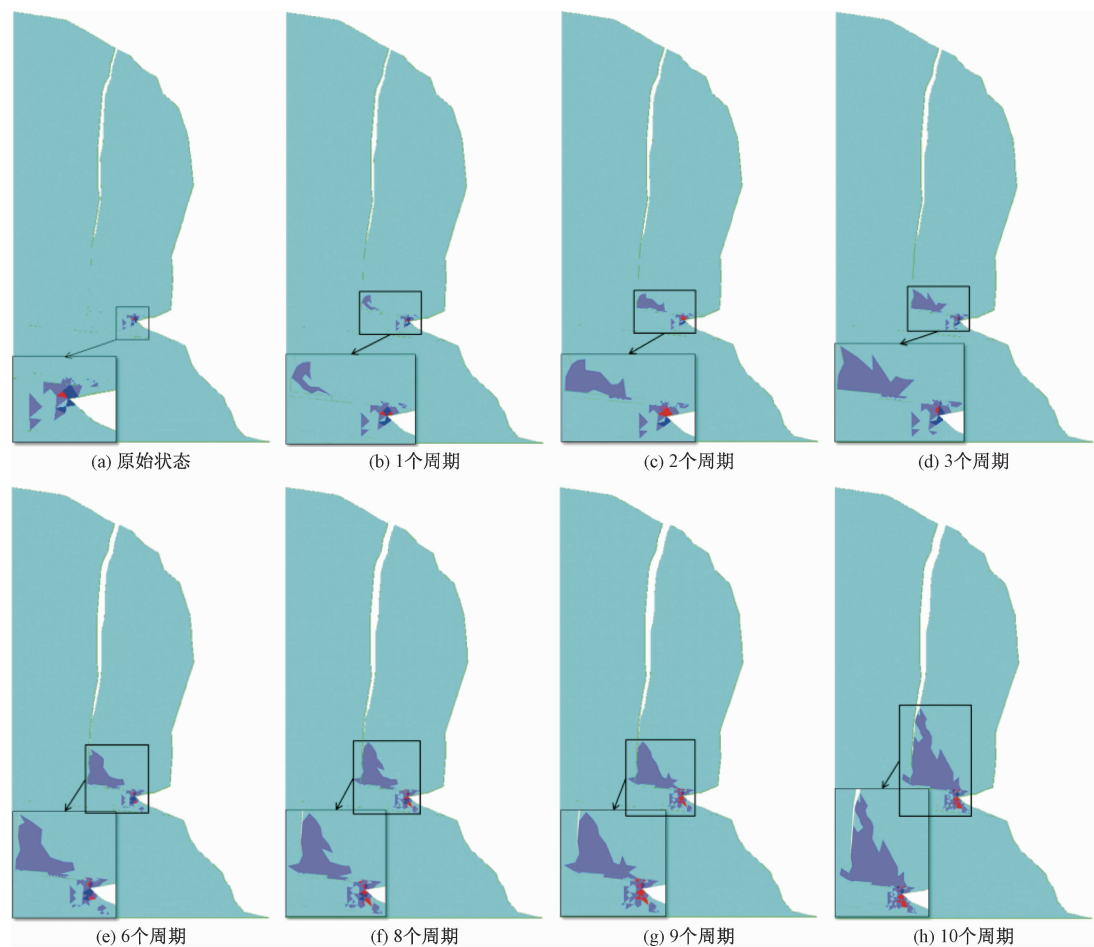


图 8 水位周期增加条件下破坏区演进图

Fig. 8 Failure zone evolution map of Guanmuling potential rockfall under the condition of increasing water level cycle

注：青色为弹性状态，浅蓝色为拉张破坏，蓝色为屈服过，红色为屈服中。

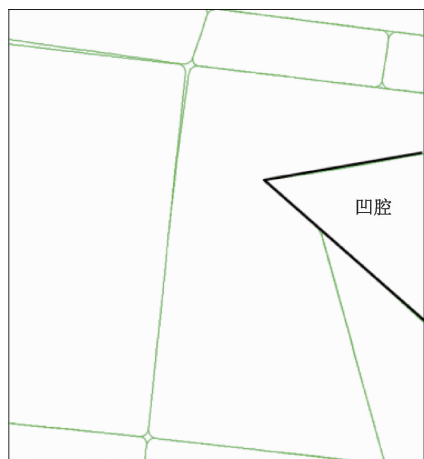


图 9 数值模型中已有裂隙的张开情况

Fig. 9 The openingpr-exist fractures in the numerical model

基座压溃后产生倾倒、滑移和坠落破坏的复合（混合）。

在没有水位周期前，危岩体破坏区仅 56 个块。随

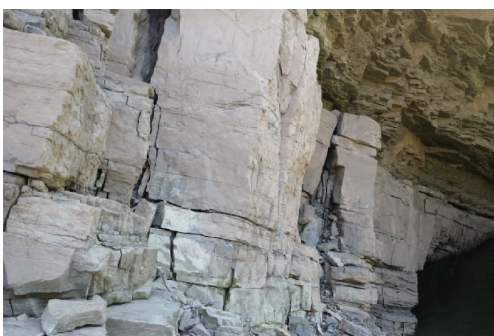


图 10 棺木岭危岩体凹腔内基座压裂照片

Fig. 10 The picture of fractures in base mass of Guanmulingdangerous rock mass

着水位周期的增加，破坏区逐渐增加。破坏区增加幅度并不一致，在第 2、6、10 周期中破坏区增加较多。在第 10 个水位周期后，破坏区达到 446 个。从第 6 个周期开始，破坏区加速增加趋势明显。这说明多水位周期后，危岩体将开始进入加速变形阶段。采用初始模

型不进行水位周期的强度参数调整,计算 11 个水位周期相同的时步。发现在这一工况下破坏区数量为 111 个,是 446 个的 24.9%。这 111 个破坏区以拉破坏为主,占比约 80.2%。破坏区主要集中在凹腔附近基座两夹层之间。这一分布类似于第 1 个水位周期后的破坏区分布。10 次水位周期计算所得破坏区比相同时步、没有劣化效应时增加了近 4 倍。这充分说明了水位周期造成的岩体劣化效应加速了危岩体演化进程。集中破坏区发生位置的差异和破坏区的增加都表明,水位变动导致岩体劣化后,变形破坏模式也会发生转化,由倾倒变形破坏模式转为压溃崩塌变形破坏模式(图 11、图 12)。

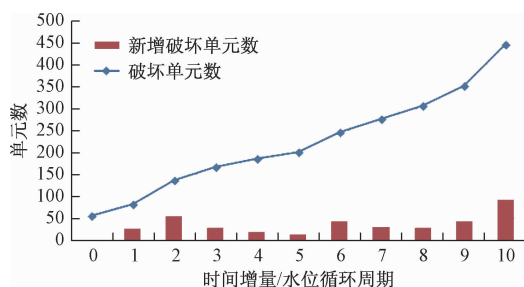


图 11 破坏区增长与水位周期增加的关系图

Fig. 11 The mapshowing the relationship between failure zone increased and water level cycles

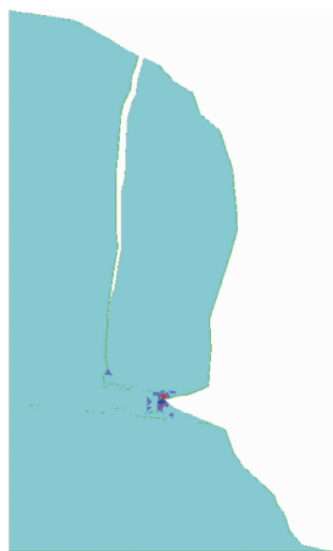


图 12 10 次水位周期下原始模型的破坏区

Fig. 12 Failure zone of original model under ten water level cycles

4 讨论

从水位周期条件下棺木岭危岩体的数值分析可见,岩体的劣化不仅造成了材料的弱化,降低了危岩体

的稳定性,同时也影响了柱状危岩体的失稳模式。

自然条件下,一些柱状危岩体的失稳模式以结构性失稳为主,例如滑坡、倾倒等失稳模式。这一种结构性失稳模式的条件是存在控制性结构面,如缓倾的滑移面或非常软弱的基座。如果结构性失稳的条件不存在时,危岩体的稳定性将比较好。水位周期性变动造成柱状危岩体低高程岩体快速劣化后,稳定性下降。但值得注意的是,消落带岩体强度的下降是材料的弱化,它会缓慢形成结构上的弱化,即基座进一步破坏或新形成大型控制性结构面。岩体强度的降低和结构的弱化造成作用在剩余岩体上的力增加,基座裂隙逐步增加,岩体强度进一步下降。材料弱化和结构弱化二者互相促进,最终会导致整个结构与材料的崩溃—危岩体的失稳。

因此,柱状危岩体的压溃崩塌实际上是材料破坏引起的整体结构破坏。这一分析需要进一步进行研究的是:

(1)数值计算中材料弱化带来的破坏。这一问题表面上是材料弱化带来的破坏怎么在后续计算中体现,实质上是斜坡岩体破坏后强度问题。围压侧限条件下,破坏岩体及其在水位周期变动下的表现值得深入研究。

(2)岩体劣化条件下压溃崩塌的数值分析方法。本文采用伪时间的方式实现了时间相关的劣化效应,但没有开展压溃崩塌的动态过程分析。岩体劣化条件下压溃崩塌过程数值分析包括柱状危岩体基座自由压裂破碎—新生裂隙生长—岩体结构解体—破坏过程,它涉及到了依赖时间的崩塌初始—启动—运动,相关数值方法值得探索和深入研究。

5 结论与建议

通过对三峡库区柱状危岩体野外调查和典型案例的室内分析,得到了以下结论和建议:

(1)周期性水位变动造成了消落带岩体劣化,大量柱状危岩体被发现和重新认识,包括箭穿洞危岩体、曲子滩危岩群和棺木岭危岩体。它们发育于陡崖斜坡上,三维边界较为清楚,呈柱状或板柱状,岩性构成为“硬—相对软—硬”的硬岩组合,体积 5 000 ~ 360 000 m³ 不等。

(2)以棺木岭危岩体为例开展了岩体劣化条件下柱状危岩体变形破坏数值分析。危岩体初始破坏区主要集中在基座趾部岩体。随着水位变动周期增多,裂缝和破坏区由危岩体踵部和趾部相对扩展,破坏区主

要集中在危岩体踵部。10次水位周期计算所得破坏区比相同时步、没有劣化效应时增加了近4倍。

(3)柱状危岩体的稳定性受控于基座岩体,岩体劣化使得危岩体稳定性下降,也极大地影响了危岩体的失稳模式。从数值分析来看,棺木岭危岩体的变形破坏模式从原来的倾倒为主将转为以压溃崩塌为主。

(4)柱状危岩体的压溃崩塌实际上是材料破坏引起的整体结构破坏,但在材料弱化带来的破坏和时间相关的压溃崩塌动态过程研究方面还需进一步研究。

(5)由于水位变动后柱状危岩体破坏区持续上升,建议柱状危岩体的防治宜早,不宜等到出现大量宏观破坏后进行,这样既可有效利用岩体自稳能力又可减少投资。

参考文献:

- [1] 殷跃平. 三峡库区地下水渗透压力对滑坡稳定性影响研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 1-8.
YIN Yueping. Seepage pressure effect on landslide stability at the Three Gorges Reservoir Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(3): 1-8.
- [2] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡水库区危岩防治技术[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 105-110.
CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Research on control techniques to unstable dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 105-110.
- [3] 文海家, 张永兴, 柳源. 三峡库区地质灾害防减灾战略关键问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 22-28.
WEN Haijia, ZHANG Yongxing, LIU Yuan. Some crucial problems of controlling geological hazard in the section of the Three Gorges Reservoir [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 22-28.
- [4] YIN Yueping, HUANG Bolin, WANG Wenpei, et al. Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016(8): 577-595.
- [5] HUANG Bolin, ZHANG Zhihua, YIN Yueping, et al. A case study of pillar-shaped rock mass failure in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2016, 34: 1-8.
- [6] HUNGR O, EVANS S G. The occurrence and classification of massive rock slope failure [J]. Felsbau-Rock and Soil Engineering, 2004(22): 16-23.
- [7] FENG Zhen, LI Bin, YIN Yueping, et al. Rockslides on limestone cliffs with subhorizontal bedding in the southwestern calcareous area of China [J]. Nature Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14: 2627-2635.
- [8] ROHN J, RESCH M, SCHNEIDER H, et al. Large-scale lateral spreading and related mass movements in the Northern Calcareous Alps [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2004, 63: 71-75.
- [9] 殷跃平. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 145-154.
YIN Yueping. Human-cutting slope structure and failure pattern at the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 145-154.
- [10] ZHUANG Xiaoying, CHUN Junwei, ZHU Hehua. A comparative study on unfilled and filled crack propagation for rock-like brittle material [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014, 72: 110-120.
- [11] DEBASIS DEB, KAMAL C DAS. Extended finite element method for the analysis of discontinuities in rock masses [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2010, 28(5): 643-659.
- [12] SHI Luyang, YU Tiantang, BUI Tinh. Numerical modelling of hydraulic fracturing in rock mass by Xfem [J]. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 2015, 52(2): 74-83.
- [13] WANG C, ZHANG Q Y. Study of the crack propagation model under seepage-stress coupling based on xfem[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2017(6): 1-12.
- [14] OWEN D R J, FENG Y T, de SOUZA Neto E A, et al. The modelling of multi-fracturing solids and particulate media [J]. Int J Numer Meth Eng, 2004, 60: 317-339.
- [15] XIANG J, MUNJIZA A, LATHAM J P, et al. On the validation of DEM and FEM/DEM models in 2D and 3D[J]. Eng Comput, 2009, 26: 673-687.
- [16] LATHAM J P, XIANG J, BELAYNEH M, et al. Modelling stress-dependent permeability in fractured

- rock including effects of propagating and bending fractures[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2012, 57: 100 – 112.
- [17] MORRIS J P, RUBIN M B, BLOCK G I, et al. Simulations of fracture and fragmentation of geologic materials using combined FEM/DEM analysis[J]. *Int J Impact Eng*, 2006, 33: 463 – 473.
- [18] EBERHARDT E, STEAD D, COGGANJ S, et al. Hybrid finite-/discrete-element modelling of progressive failure in massive rock slopes[C]. *ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003: 274 – 279.
- [19] MAHABADI O K, GRASSELLI G, MUNJIZA A. Y-GUI: A graphical user interface and pre-processor for the combined finite-discrete element code, Y2D, incorporating material heterogeneity [J]. *ComputGeosci*, 2010, 36: 241 – 252.
- [20] MAHABADI O K, COTTRELL BE, GRASSELLI G. An example of realistic modelling of rock dynamics problems: FEM/DEM simulation of dynamic brazilian test on barre granite [J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2010, 43: 707 – 716.
- [21] LIU HY, HAN HAOYU, AN HM, et al. Hybrid finite-discrete element modelling of asperity degradation and gouge grinding during direct shearing of rough rock joints[J]. *Int J Coal Sci Technol*, 2016, 3 (3): 295 – 310.
- [22] MAXIMILIANO R. VERGARA, MICHEL Van Sint Jan, et al. Numerical model for the study of the strength and failure modes of rock containing non-persistent joints[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49: 1211 – 1226.
- [23] Peng-Zhi PAN, Jonny RUTQVIST, Xia-Ting FENG, et al. An approach for modeling rock discontinuous mechanical behavior under multiphase fluid flow conditions[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2014, 47: 589 – 603.
- [24] LAN Hengxing, MARTIN C D, ANDERSSON J C. Evolution of in situ rock mass damage induced by mechanical-thermal loading [J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2013, 46: 153 – 168.
- [25] VALENTIN Gischig, GIONA Preisig, ERIK Eberhardt. Numerical investigation of seismically induced rock mass fatigue as a mechanism contributing to the progressive failure of deep-seated landslides[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49: 2457 – 2478.
- [26] LI Xiang, KONIETZKY Heinz. Numerical simulation schemes for time-dependent crack growth in hard brittle rock [J]. *Acta Geotechnica*, 2015, 10: 513 – 531.
- [27] H KONIETZKY, A HEFTENBERGER, M FEIGE. Life-time prediction for rocks under static compressive and tensile loads; a new simulation approach [J]. *Acta Geotechnica*, 2009, 4: 73 – 78.
- [28] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. 水 – 岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 613 – 618.
- LIU Xinrong, FU Yan, WANG Yongxin, et al. Stability of reservoir bank slope under water-rock interaction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (3): 613 – 618.
- [29] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水 – 岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 526 – 531.
- TANG Liansheng, ZHANG Pengcheng, WANG Sijing. Testing study on macroscopic mechanics effect of chemical action of water on rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21 (4): 526 – 531.
- [30] 王运生, 吴俊峰, 魏鹏, 等. 四川盆地红层水岩作用岩石弱化时效性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009(增刊1): 3102 – 3108.
- WANG Yunsheng, WU Junfeng, WEI Peng, et al. Research on time effect of rock weakening by water-rock interaction of redbeds in Sichuan basin [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009(S1): 3102 – 3108.
- [31] 黄波林, 刘广宁, 王世昌. 三峡库区巴东段岸坡改造调查[R]. 武汉地质调查中心, 2016.
- HUANG Bolin, LIU Guangning, WANG Shichang. Geological survey on slope transformation of badong course of Three Gorges Reservoir[R]. *Wuhan Center of China Geological Survey*, 2016.
- [32] 王文沛, 李滨, 黄波林, 等. 三峡库区近水平厚层斜坡滑动稳定性研究[J]. *地质力学学报*, 2016, 22(3): 725 – 732.
- WANG Wenpei, LI Bin, HUANG Bolin, et al. Stability analysis of sub = horizontal thick-bedded slope in three gorges reservoir area: a case study of jianchuandong dangerous rockmass in Wushan, Chongqing [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(3): 725 – 732.