

2018年度重庆市出版专项基金资助项目

DOI:10.11721/cqnuj20190218

三峡地区资源环境生态研究

# 灰岩岸坡危岩体链式演化特征分析<sup>\*</sup>

——以三峡库区羊叉河岸坡为例

陈洪凯<sup>1,2</sup>, 张金浩<sup>1</sup>, 杨志永<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 枣庄学院 城市与建筑工程学院, 山东 枣庄 277160)

**摘要:**【目的】以三峡库区羊叉河岸坡为例,分析灰岩岸坡危岩体链式演化特征。【方法】利用 FLAC3D 数值软件构建该处危岩体模型,对它的应力场进行分析。【结果】从危岩体岩腔的形成到最终形成临界岩腔的过程中,岩腔临空面的大主应力呈现拉应力状态,小主应力则处在压、拉应力转换的临界状态;危岩体的宏观链具有嵌套发育特征,始终表现为拉裂或者拉剪受力状态,并通过微观链的扩展,发育,贯通,最终出现失稳断裂。【结论】通过对危岩体受力过程进行数值模拟可知模拟结果与实际的链式发育情况相吻合,研究成果从危岩体发育角度探索岸坡地貌演化过程,对岸坡危岩体防治有积极指导意义。

**关键词:**三峡库区;危岩体;链式发育;羊叉河流域

**中图分类号:**P642.22

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2019)02-0036-08

位于三峡库区的羊叉河流域,属于长江一级支流綦江河上游,地处綦江区南部。羊叉河处在背斜核部,属于纵向穿越河流,岩性大多为灰岩,属于缓倾角岩层。河谷内峰谷高差约 500 m,分成两级台阶,下级陡崖高 80~83 m,呈现明显的倒台阶状地貌形态,陡崖上危岩体广泛分布,且于 2005 年 12 月 18 日 23:00 左右发生崩塌,方量约 20 m<sup>3</sup>(图 1),对河岸造成严重影响。羊叉河岸坡是三峡库区灰岩边坡地貌演化的典型案例,研究它的发育特性对于科学揭示三峡库区灰岩边坡地貌演化规律具有积极意义。

灰岩岸坡危岩是山丘地域常见的地质灾害之一,具备突发性,并且会造成严重危害。危岩破坏的实质是主控结构面的扩展、贯通到失稳断裂破坏的过程。陈洪凯等人<sup>[1-4]</sup>对危岩主控结构面提出损伤模型以及对结构面的断裂寿命、稳定性进行研究;张永兴等人<sup>[5]</sup>研究了边坡中张性地应力和岩腔发育深度对差异风化型危岩形成与破坏的影响;Mitchell 等人<sup>[6-7]</sup>提出了一种同时考虑构造运动和气候作用的山地演化模型,发现高强度、低频率的崩塌过程在地貌演化中具有显著的贡献率;基于耗散接触模型,Richefeu 等人<sup>[8]</sup>运用离散单元法模拟了岩石崩塌的过程;Pirulli 等人<sup>[9]</sup>建立了一种用于分析崩塌堆积物现场形成过程的反分析法。

灰岩岸坡危岩地貌演变过程在多个微观链和多个宏观链之间共同作用下构成,各个宏观链之间和各个微观链之间还存在互相影响<sup>[10-13]</sup>。此外,陡崖上危岩不会严格按照宏观链由外向内的顺序依次崩落,有时它也会几个宏观链同时发生。本研究以三峡库区羊叉河岸坡为例,采用数值模拟的方法,分析灰岩边坡地貌演化,从岸坡危岩体发育角度研究探索边坡地貌演化过程的新方法,以便对岸坡地貌发展过程中危岩体防治与减灾提供理论指导。

## 1 危岩体模型的构建

羊叉河流域位于三峡库区綦江区境内,面积 21 km<sup>2</sup>。基岩为三叠纪灰岩。岸坡高度为 10~60 m,由灰岩和泥页岩交互沉积。泥页岩出现部位为河岸坡脚缓坡平台,宽 20~40 m;平台后部为灰岩陡坡,危岩崩塌形迹典型

\* 收稿日期:2018-06-02 修回日期:2019-01-21 网络出版时间:2019-03-15 07:00

资助项目:国家自然科学基金(No. 51678067;No. 51378521;No. 11272185);重庆市首席专家工作室专项(No. 201605);重庆市"两江学者"计划专项(No. 201309);重庆市研究生教育创新基金(No. CYB18167)

第一作者简介:陈洪凯,男,教授,博士,研究方向为地貌过程减灾与环境修复,E-mail:chk99@163.com;通信作者:张金浩,男,博士,E-mail:2267772085@qq.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20190315.0056.004.html>

(图 1)。现场观测发现,羊叉河岸坡危岩发育存在链式规律,复原图如图 2 所示,其中包括 A,B,C 共 3 个宏观链,同时宏观链又由几个微观链组成。A,B,C 宏观链中的微观链数分别为 7,5,4。据此复原图,采用 FLAC3D 软件构建灰岩岸坡危岩体数值模型,表 1 中给出了具体的数值模拟所用的羊叉河岸坡岩石材料的物理力学参数。

该 FLAC3D 三维结构模型基于羊叉河危岩实体,按照等比例进行三维建模。这一模型中灰岩的本构模型为莫尔-库伦模型,泥页岩的本构模型为粘弹性本构模型;数值模型的边界条件临空面为自由边界,模型的左右边界条件分别对竖向位移进行约束,并对左右边界施加横向的水平分力,模型底面进行固定约束。

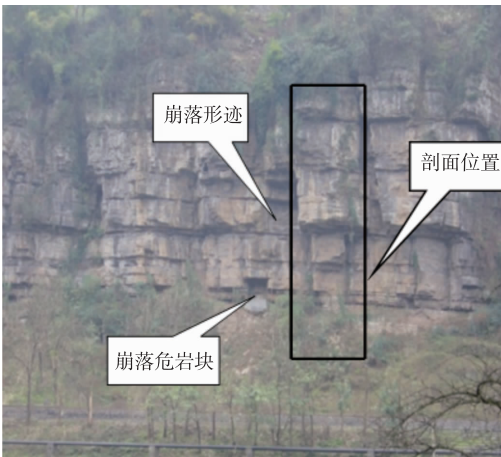


图 1 羊叉河岸坡地貌图

Fig.1 Landform map of Yangcha river bank slope

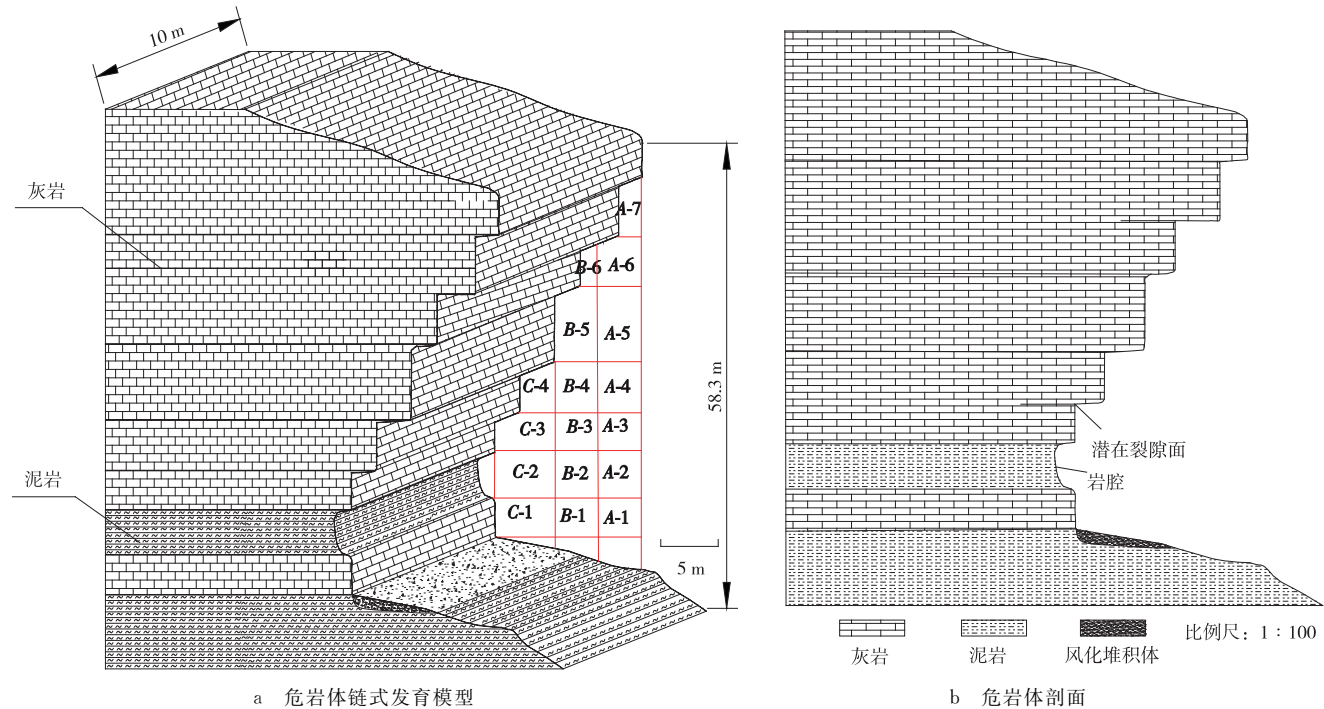


图 2 羊叉河岸坡危岩体链式发育模型及剖面

Fig.2 Chain development model and section view of dangerous rock mass on the slope of Yanghe River

| 表 1 羊叉河岸坡的岩石物理力学参数                                                           |                     |           |                    |                                |                                 |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| Tab.1 Rock physical and mechanical parameters of theYangcha river bank slope |                     |           |                    |                                |                                 |                                         |
| 岩性                                                                           | 弹性模量 $E/\text{MPa}$ | 泊松比 $\mu$ | 粘结力 $c/\text{kPa}$ | 内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$ | 膨胀角 $\varphi_i/(\text{^\circ})$ | 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ |
| 泥页岩                                                                          | 4 980               | 0.23      | 5 780              | 43.77                          | 0                               | 2 490                                   |
| 灰岩                                                                           | 5 744               | 0.12      | 4 800              | 45.84                          | 0                               | 2 672                                   |

通过对危岩体主控结构面受力分析,结合羊叉河危岩岸坡的实际状况,该模型在实际发育过程中遵循陈洪凯提出的链式发育规律<sup>[4]</sup>。在岩石的差异风化形成初始岩腔之后,由于岩腔上部结构面拉应力逐渐增大并超过结构面抗拉极限,从而造成拉裂破坏。该危岩岸坡按逐级和嵌套模式发育,本研究通过数值模拟实现该危岩体发育过程中的演化过程。

2 数值模拟结果分析

2.1 灰岩边坡初始应力场

利用 FLAC3D 软件,构建了羊叉河岸坡岩体模型;输入模型所用物理力学参数,采用摩尔库伦本构模型进行

数值模拟,得到了羊叉河岸坡岩体大主应力云图(图 3)和小主应力云图(图 4)。对这两个应力云图分析后可知:

1) 在靠近临空面处,大主应力 SIG1( $\sigma_1$ )与临空面平行,小主应力 SIG3( $\sigma_3$ )则与之正交。岩体处在初始应力情况时,小主应力表现为压应力,在岩体顶部小主应力出现最小值为 0.1 MPa,在底部小主应力达到最大值为 1.8 MPa,结果与实际情况相吻合。

2) 在泥岩底部最靠近临空面的附近,大主应力与小主应力均呈现出明显的应力集中梯度带,说明应力集中区域与临界岩石中初始岩腔的形成位置密切相关,表明数值模拟的危岩体应力场的分布反映出实际受力状况。

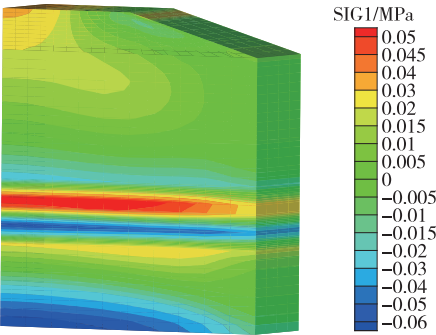


图 3 初始状态下危岩大主应力云图

Fig. 3 The large principal stress clouds of perilous rock in initial state

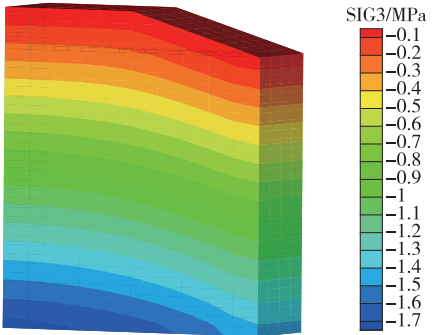


图 4 初始状态下危岩小主应力云图

Fig. 4 The small principal stress clouds of perilous rock in initial state

2.2 第一个宏观链的临界岩腔形成过程应力场分析

根据对模型施加自重应力,模型随之呈现出宏观链的应力场。从图 5~8 为第一个宏观链岩腔形成时的大主应力和小主应力云图。从这些应力云图中可知:

1) 在岩体自重作用下,在危岩体底部形成初始岩腔,岩腔的形成改变了危岩体原有的应力状态。岩腔在形成初期,在它的顶部区域出现大主应力 SIG1 为拉应力的状态,最大值为 0.12 MPa。小主应力 SIG3 则表现为压应力状态,且值表现减小的趋势。在岩腔靠近临空部位区域,出现应力集中情况;在风化作用下,初始岩腔缓行发育,逐渐形成临界岩腔(图 5~6)。

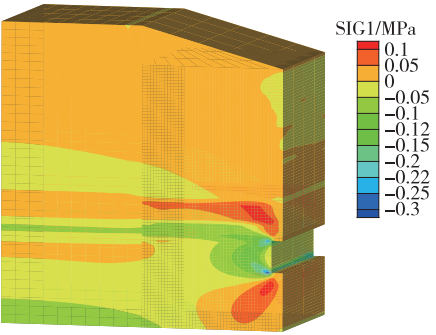


图 5 第一个宏观链初始岩腔形成时危岩大主应力云图

Fig. 5 The large principal stress clouds of the perilous rock during the formation of the initial cavities of the first macroscopic chain

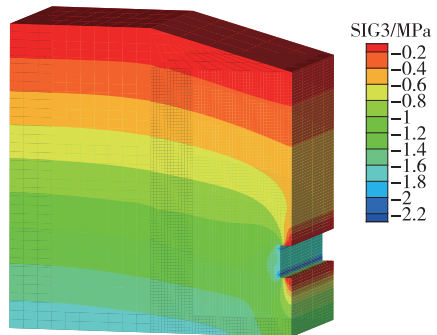


图 6 第一个宏观链初始岩腔形成时危岩小主应力云图

Fig. 6 The small principal stress clouds of the perilous rock during the formation of the initial cavities of the first macroscopic chain

2) 比较图 5~8 可以发现:在平行于临空面位置,与初始岩腔相比,临界岩腔的切向应力升高;而在垂直于临空面位置,临界岩腔的径向应力降低。这样使得临空面的应力差加大,随之会形成剪应力增大,容易发生剪切破坏;在岩腔顶部位置,岩体小主应力表现出由压应力向拉应力的转变。因此,在岩腔底部极易形成拉张裂隙,将形成最初危岩体模型。

图 9 和图 10 分别为初始岩腔和临界研究临空面的随高度的应力变化,从中可以看出在靠近岩腔上方呈现为拉应力逐渐增大,达到一个极值后,出现降低趋势呈现压应力状态。初始岩腔拉应力在高度 20.8 m 处为  $3.91 \times 10^{-2}$  MPa;进一步发育后,在 21.9 m 处拉应力逐渐增到  $9.69 \times 10^{-2}$  MPa 达到临界的抗拉强度发生断裂,进而第一个宏观链形成,并依次继续发展。

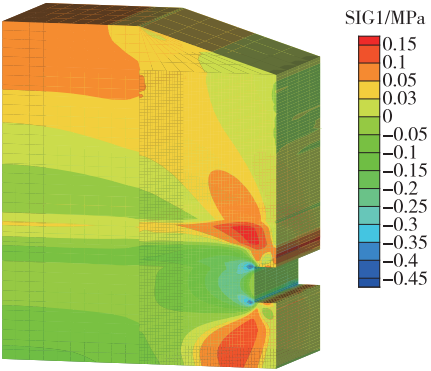


图 7 第一宏观链临界岩腔形成时危岩大主应力云图

Fig. 7 The large principal stress clouds of the perilous rock in the formation of the critical cavities of the first macroscopic chain

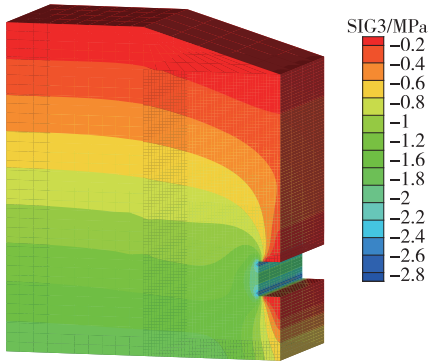


图 8 第一宏观链临界岩腔形成时危岩小主应力云图

Fig. 8 The small principal stress clouds of the perilous rock in the formation of the critical cavities of the first macroscopic chain

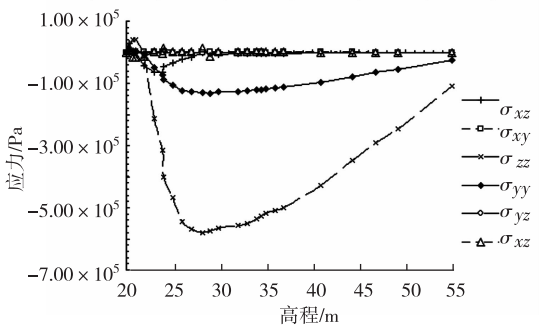


图 9 第一宏观链初始岩腔形成时临空面应力曲线

Fig. 9 Stress curve of the face of the first macroscopic chain when the initial rock cavities are formed

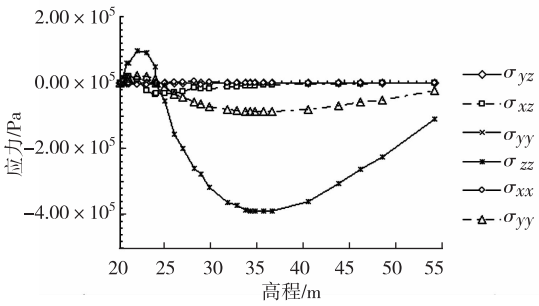


图 10 第一宏观链临界岩腔形成时临空面应力曲线

Fig. 10 Stress curve on the face of cavities in the formation of the critical rock cavities of the first macroscopic chain

### 2.3 危岩发育第一个宏观链按简单模式发育过程中的应力场分析

根据软件形成的最初危岩体模型,在自重影响下,内部裂隙发展、裂化、贯通,导致岩腔顶端出现主控结构面,随着主控结构面的形成与贯通,危岩体根据链式规律进行扩展发育。图 11~14 为羊叉河危岩的第一个宏观链中微观链按照链式模式扩展发育过程时大主应力和小主应力云图,从中可以看出在第一个宏观链的微观链扩展发育过程中,岩腔顶部大主应力 SIG1 以拉应力为主,最大达到 0.18 MPa;小主应力 SIG3 开始出现拉应力,在大主应力和小主应力联合作用下,使得岩腔顶部出现明显的拉张裂隙。

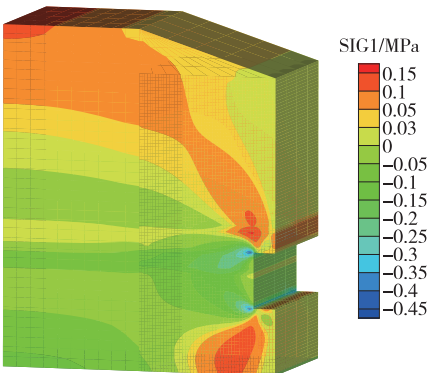


图 11 第一个微观链危岩体内大主应力云图

Fig. 11 The large principal stress clouds of the first microscopic chain perilous rock

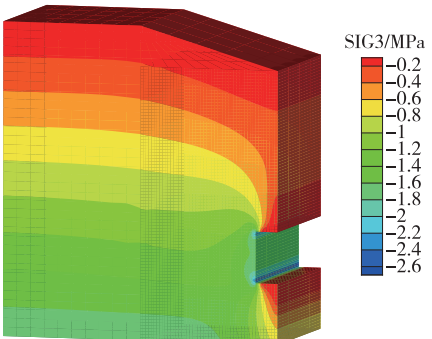


图 12 第一个微观链危岩内小主应力云图

Fig. 12 The small principal stress clouds of the first microscopic chain perilous rock



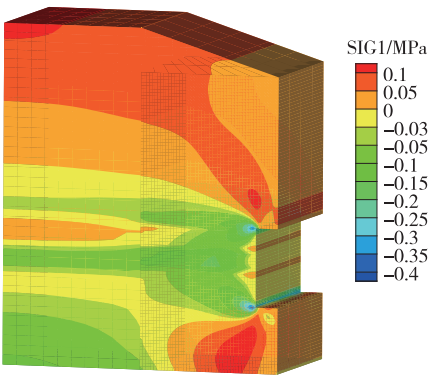


图 13 第二个微观链危岩体内大主应力云图  
Fig. 13 The large principal stress clouds of the second microscopic chain perilous rock

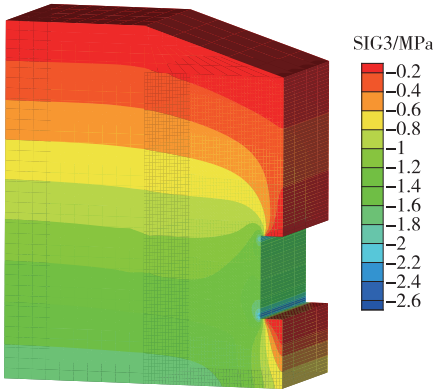


图 14 第二个微观链危岩体内小主应力云图  
Fig. 14 The small principal stress clouds of the second microscopic chain perilous rock

通过对临空面节点应力变化的监测,可以得到第一宏观链发育临空面竖向应力和剪应力变化曲线(图 15~16)。根据所得曲线可知:在微观链发育过程中,临空面自下而上先以拉应力达到最大值后逐渐减小转变成压应力,在拉应力最大位置处孕育新的微观链的发育;在链式发育过程中剪应力与竖向拉应力的位置相互吻合,剪应力也是与竖向应力呈相似的规律,它们相互作用促进危岩体进一步断裂发育。

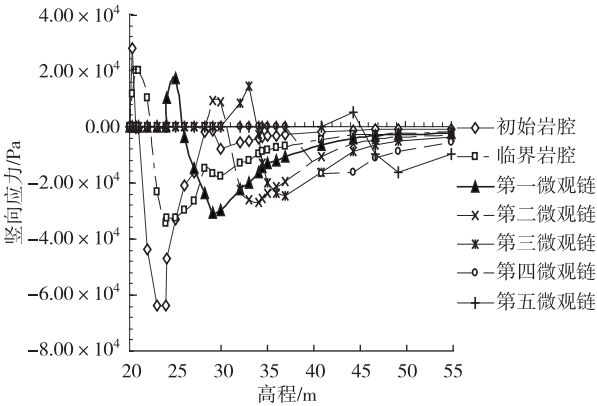


图 15 第一宏观链发育临空面竖向应力变化曲线  
Fig. 15 The change curve of vertical stress in the first macroscopic chain

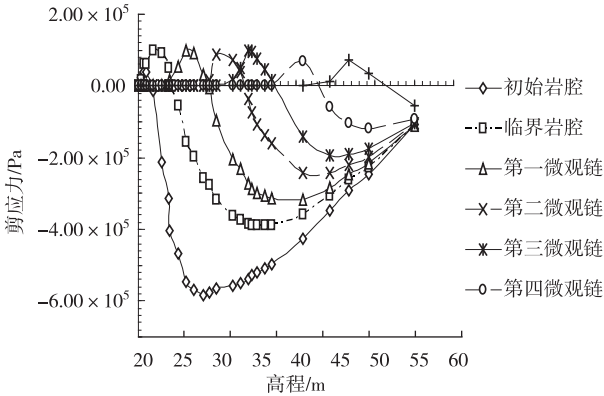


图 16 第一宏观链发育临空面剪应力变化曲线  
Fig. 16 The change curve of shear stress in the first macroscopic chain

2.4 第一个宏观链和第二个宏观链共同发育时危岩体内的应力分析

当岸坡陡崖岩体高度相对其他岩体较大时,该处危岩体呈现出两个以上的宏观链同时嵌套发育的模式。通过实地观察,羊叉河岸坡危岩体符合上述嵌套发育模式,即第一个宏观链中微观链发育的同时第二个宏观链中的微观链也开始扩展发育。羊叉河危岩第一个宏观链和第二个宏观链按照共同嵌套模式发育过程中,危岩体内的小主应力云图与大主应力云图如图 17~20 所示。

从图 17~20 中可以看出,两个宏观链按照共同嵌套模式发育扩展,宏观链中的危岩体大主应力均处在拉应力状态,在宏观链临界岩腔形成后,大主应力拉应力达到 0.15 MPa,小主应力由压应力向拉应力过渡的状态。随着两个宏观链中的微观链逐渐扩展发育,整个危岩体处于受拉状态极易发生拉裂破坏。

通过对临空面节点应力变化的监测,可以得到第二宏观链发育临空面竖向应力和剪应力变化曲线(图 21~22)。将所得曲线和第一个宏观链所得临空面竖向应力和剪应力变化曲线相比可知,羊叉河危岩的第二个宏观链按照嵌套模式进行发育时,岩体内的应力分布与第一个宏观链竖向应力的变化规律基本一致,剪应力也是与竖向应力呈相似的规律,同时在竖向应力最大的位置孕育下一个微观链的发育。

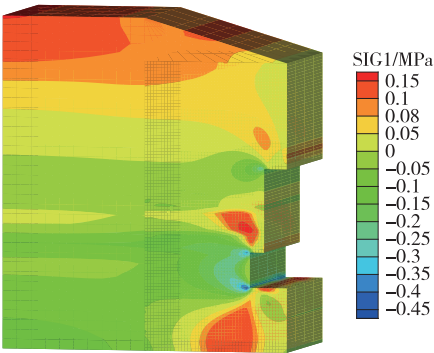


图 17 第二个宏观链初始岩腔形成时大主应力云图

Fig. 17 The large principal stress clouds during the formation of the initial rock cavities of the second macroscopic chain

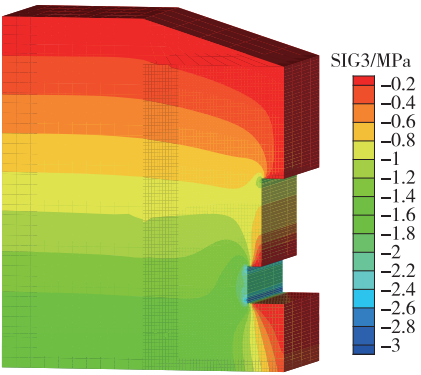


图 18 第二个宏观链初始岩腔形成时小主应力云图

Fig. 18 The small principal stress clouds during the formation of the initial rock cavities of the second macroscopic chain

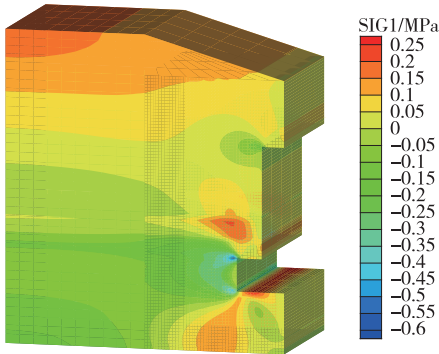


图 19 第二个宏观链临界岩腔形成时大主应力云图

Fig. 19 The large principal stress clouds during the formation of the second macroscopic chain critical rock cavities

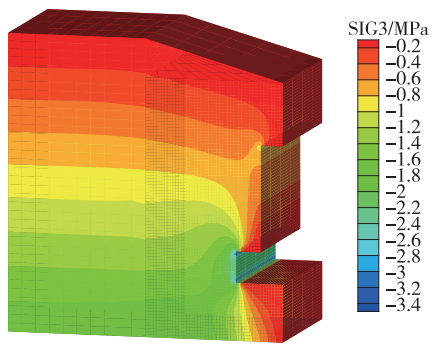


图 20 第二个宏观链临界岩腔形成时小主应力云图

Fig. 20 The small principal stress clouds during the formation of the second macroscopic chain critical rock cavities

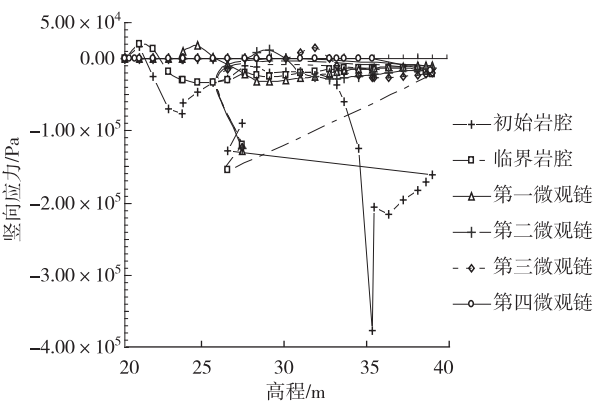


图 21 第二宏观链发育临空面竖向应力变化曲线

Fig. 21 The change curve of vertical stress in the second macroscopic chain

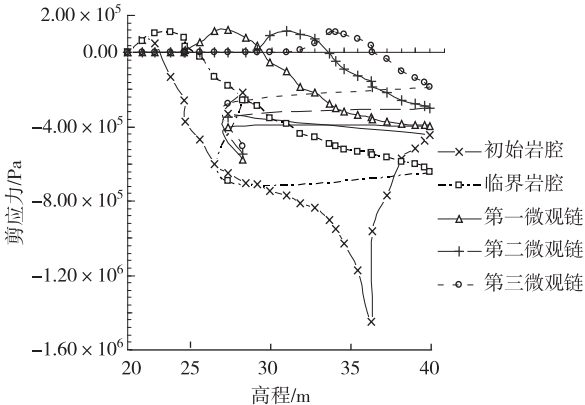


图 22 第二宏观链发育临空面剪应力变化曲线

Fig. 22 The change curve of shear stress in the second macroscopic chain

### 3 危岩体发育完成应力场分析

随着危岩中主控结构面的不断形成、损伤与断裂,危岩第二个宏观链中的微观链逐级发育,危岩开始了第三个宏观链的发育,第三个宏观链发育完成危岩体内大主应力云图和小主应力云图分别见图 23 和图 24。综合两图可以看出,羊叉河危岩在最终第三个宏观链发育最终完成后得到的大主应力和小主应力云图,可以看出该灰

岩边坡岩腔部位达到最大主压应力 SIG1,顶部处于拉应力状态,最大拉应力为 0.35 MPa。小主应力 SIG3 主要以压应力为主,应力处于拉应力阶段,同时拉应力达到容易引发崩塌,孕育下一个微观链。

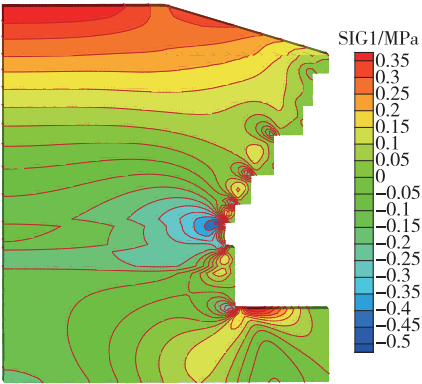


图 23 危岩体内大主应力云图

Fig. 23 The small principal stress clouds of perilous rock

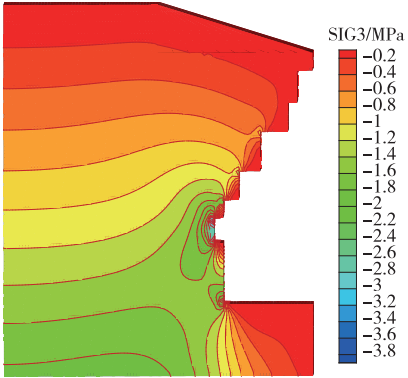


图 24 危岩体内小主应力云图

Fig. 24 The large principal stress clouds of perilous rock

通过对发育完成时临空面不同高度节点监测,得到该灰岩边坡危岩体竖向应力和剪应力大小变化。从图 25 可以看出在高度 40 m 左右,危岩体的拉应力和剪应力同时达到最大值,表明下一步在第三个宏观链 C 中的第四个微观链容易发生危岩破坏,从而为进一步危岩支护防护提供了理论依据。

4 结论

本研究针对綦江羊叉河危岩体进行数值模拟,构建了该危岩体数值模型,通过对它的应力场分析以及危岩体内监测点的统计风险,重新再现了羊叉河危岩体的链式发育过程。模拟分析结果表明:

- 1) 从危岩体岩腔的形成到最终形成临界岩腔的过程中,岩腔临空面的大主应力呈现拉应力状态,小主应力则处在压、拉应力转换的临界状态;
- 2) 危岩体宏观链在自重作用下表现出宏观链逐级发育以及宏观链和微观链嵌套发育模式,危岩体结构面的临界状态表现为拉裂或者拉剪受力状态,通过微观链的扩展、发育、贯通,最终出现失稳断裂。
- 3) 通过对危岩链式规律的力学过程分析得出的数值模拟结果与实际情况吻合很好。同时依据数值分析结果,为治理该类型危岩的施工措施提供了理论依据和借鉴。

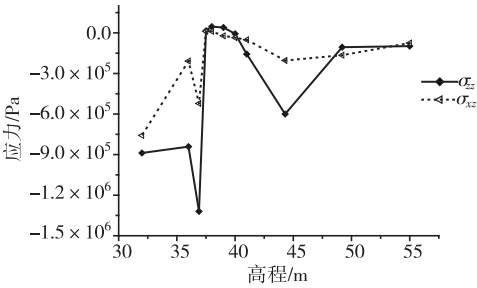


图 25 危岩体临空面竖向应力、剪应力曲线

Fig. 25 The vertical stress and shear stress curve on the face of perilous rock mass

参考文献:

[1] CHEN H K, TANG H M, YE S Q. Research on damage model of control fissure in perilous rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(7): 967-974.

[2] CHEN H K, TANG H M. Method to calculate fatigue fracture life of control fissure in perilous rock [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 28(5): 575-580.

[3] 肖盛燮,冯玉涛,王肇慧,等. 灾变链式阶段的演化形态特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(s1): 2629-2633.

XIAO S X, FENG Y T, WANG Z H, et al. Shape characteristics of evolvement in chain-styled phases of disasters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(s1): 2629-2633.

[4] 陈洪凯. 三峡库区危岩链式规律的地貌学解释[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 91-95.

CHEN H K. Geomorphology Research on chained regularity of perilous rock in the area of the Three Gorges reservoir [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2008, 27(1): 91-95.

[5] 张永兴,卢黎,张四平,等. 差异风化型危岩形成和破坏机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(2): 1-6.

ZHANG Y X, LU L, ZHANG S P, et al. Development and failure principle of differential weathering overhanging rock [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(2): 1-6.

- [6] MITCHELL W A, MCSAVENEY M J, ZONDERVAN A, et al. The keylong serial rock avalanche, NW Indian Himalaya: geomorphology and palaeoseismic implications [J]. *Landslides*, 2007, 4: 245-254.
- [7] SOSIO R, CROSTA G B, HUNGR O. Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps) [J]. *Engineering Geology*, 2008, 100(1/2): 11-26.
- [8] RICHEFEU V, MOLLON G, DAUDON D, et al. Dissipative contacts and realistic block shapes for modeling rock avalanches [J]. *Engineering Geology*, 2012, 149/150(4): 78-92.
- [9] PIRULLI M, MANGENEY A. Results of back-analysis of the propagation of rock avalanches as a function of the assumed rheology [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2008, 41(1): 59-84.
- [10] DORREN L K A, MAIER B, PUTTERS U S, et al. Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps [J]. *Geomorphology*, 2004, 57: 151-167.
- [11] COX S C, ALLEN S K. Vampire rock avalanches of January 2008 and 2003, Southern Alps, New Zealand [J]. *Landslides*, 2009, 6: 161-166.
- [12] SAVENEY M J. Recent rock falls and rock avalanches in Mount Cook national park, New Zealand [J]. *Geol Soc Am Rev Eng Geol*, 2002, 15: 35-70.
- [13] 沈金瑞, 林杭. 多组节理边坡稳定性 FLAC3D 数值分析 [J]. *中国安全科学学报*, 2007, 17(1): 29-33.
- SHEN J R, LIN H. The numerical analysis on the stability of slope with several sets of joints by FLAC3D [J]. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(1): 29-33.
- [14] 尹锡杰, 晏鄂川, 孙兆来. 某反倾页岩边坡破坏面确定及其稳定性分析 [J]. *岩土力学*, 2007(增 1): 595-598.
- YIN X J, YAN E C, SUN Z L. Slip surface ascertaining and stability analyzing of the countertendency shale slope [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(z1): 595-598.

## Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

### Analysis of Chain Evolution Characteristics of Perilous Rock Body on Limestone Bank Slope: Taking Yangcha River Slope Three Gorges Reservoir Area as an Example

CHEN Hongkai<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinhao<sup>1</sup>, YANG Zhiyong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

2. School of City and Architectural Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang Shandong 277160, China)

**Abstract:** [Purposes] Taking the bank slope of Yangcha river in the Three Gorges reservoir area as an example, the chain evolution characteristics of dangerous rock mass on limestone bank slope are analyzed. [Methods] The FLAC3D numerical software was used to construct the dangerous rock mass model and analyze its stress field. [Findings] From the formation of the dangerous rock mass to the final formation of the critical rock cavity, the large principal stress of the rock surface presents a tensile stress state, and the small principal stress is in the critical state of compression and tensile stress transformation. The macro-chain of dangerous rock mass has nesting development characteristics, which always appears as a tensile or shear-stress state, and through the expansion, development and penetration of the micro-chain, and finally the unstable fracture. [Conclusions] Through the numerical simulation of the stress process of the dangerous rock mass, it can be seen that the simulation results are consistent with the actual chain development. The research results explore the landform evolution process of the bank slope from the angle of the development of the dangerous rock mass, which has positive guiding significance for the prevention and cure of the dangerous rock mass on the bank slope.

**Keywords:** Three Gorges reservoir; perilous rock body; chain development; Yangcha river basin

(责任编辑 许 甲)