

Evolution and Stress Field Analysis for Perilous Rock of High Slope in Soft Foundation

Jinwei Li

China Railway First Survey & Design Institute Group CO.LTD, Xi'an Shaanxi
Email: 984394197@qq.com

Received: Dec. 28th, 2017; accepted: Jan. 9th, 2018; published: Jan. 16th, 2018

Abstract

Perilous rock and collapse is provided with characteristics of sudden outbreak, unpredictable, harmful and so on, accurately and reasonably infer the process and trend of the evolution of perilous rock and collapse is the key issues for the prevention and treatment of rock collapse. In this paper, based on the high rock slope of Huang Nibao, combined with the site engineering geological mapping, the structural features of dangerous rock mass in high slope is analyzed, and the cantilever-rupture failure mode of the near horizontal layered perilous rock in soft foundation is obtained. Based on the basic theory of geology, the four stages of the formation and evolution of the perilous rock and collapse are analyzed and explained. On the basis of this, the expression of the stability for the perilous rock and collapse is derived. Based on the engineering example, the numerical simulation method is used to analyze the stress field, and study the evolution characteristics of the stress field. The results show that, the stress concentration occurs at the bottom of the rock cavity and becomes more and more obvious as the rock cavity deepens. It provides guidance and reference for the stability evaluation and treatment measures of perilous rock in high slope.

Keywords

Soft Foundation Type, Perilous Rock and Collapse, Stress Field, Numerical Simulation

软弱基座型高边坡危岩演化及应力场分析

李津玮

中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安
Email: 984394197@qq.com

收稿日期: 2017年12月28日; 录用日期: 2018年1月9日; 发布日期: 2018年1月16日

文章引用: 李津玮. 软弱基座型高边坡危岩演化及应力场分析[J]. 自然科学, 2018, 6(1): 44-52.
DOI: 10.12677/ojns.2018.61008

摘要

危岩崩塌具有爆发突然、难以预测、危害性大等特点，准确合理推断危岩崩塌演化发展过程及趋势成为预防和治理危岩崩塌的关键性问题。以黄泥堡高边坡危岩为依托，结合现场工程地质调绘，通过分析高边坡危岩体的结构特征，得出近水平层状软弱基座型危岩体悬臂-拉裂式破坏模式；运用地质学基础理论，分析阐述高边坡危岩体崩塌的形成及演化发展过程的四个阶段；在此基础上，推导出评价危岩崩塌稳定性的表达式；采用数值模拟方法对依托工程实例进行应力场模拟分析，研究地应力场的演化特征。结果表明，岩腔底部产生应力集中现象，并且随着岩腔的发展加深而越来越明显。为高边坡危岩稳定性评价以及治理措施提供指导和借鉴。

关键词

软弱基座型，危岩崩塌，应力场，数值模拟

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

危岩是指位于陡崖或陡坡上被多组岩体结构面切割构成的在重力、地震力、裂隙水压力、人工活动等诱发因素共同作用下处于不稳定、欠稳定或极限平衡状态的岩石块体及其组合[1]。近水平产状的泥岩和砂岩互层结构的地层，由于差异风化作用形成的危岩体，在漫长的地质历史过程中经历了形成、演化、发展及消亡的过程。岩体在内外营力影响下，受河谷侵蚀下切、地壳抬升等作用，岩体临空面形成，岩层抗风化能力的差异性导致硬质岩层突出，软质岩层剥落凹陷形成岩腔，演化发展成危岩体，最后以崩塌形式破坏。由于地质环境演化的漫长性和复杂性，准确合理推断危岩崩塌演化发展过程及趋势成为预防和治理危岩崩塌的关键性问题，对山区危岩崩塌类地质灾害研究具有重要意义。

危岩崩塌具有爆发突然、难以预测、危害性大等特点，近几年，我国西南地区危岩崩塌地质灾害频发，严重影响铁路、公路等道路交通运输安全，给人民生命财产带来重大损失。例如，2007年4月，国道319重庆彭水山体崩塌，造成5000余吨巨石将公路路面连同路基全部砸到了下面的乌江，损失约1亿元；2009年6月，重庆武隆鸡尾山崩塌，300多万方崩塌体快速涌进山谷，造成86人死亡等[2]。因此，国家政府以及相关学者高度重视危岩崩塌地质灾害，国内外许多学者对危岩崩塌成因以及发展演化过程取得了很多有益的成果，如宋云梅[3]运用理论分析和数值模拟相结合的方法，分析危岩的形成破坏过程；陈洪凯，李霍等[4][5]研究了岩质边坡危岩崩塌形成演化过程，将危岩崩塌破坏过程概化为不同的阶段；张永兴等[6]基于危岩力学分析模型，研究了张性地应力与岩腔深度对危岩崩塌形成和破坏的影响；陈洪凯，唐红梅等[7][8][9]研究了三峡库区危岩存在的链式崩塌演化规律；苏天明，侯江萍，冯振等[10][11][12]研究了近水平层状危岩差异风化岩腔的演化过程以及危岩崩塌破坏的成因机制；董雪等[13]以黄桷湾高边坡危岩为例，采用数值模拟的方法对危岩的稳定性进行研究；史文兵，赵晓峰等[14][15]在分析危岩崩塌形成机理的基础上，归纳总结了其调查方法和防治措施。迄今，危岩崩塌作为关系国计民生的突发性地质灾害，已取得的理论和技术研究成果对于危岩崩塌治理具有积极意义，但相对于滑坡和泥石流地质灾害，危岩崩塌地质灾害的研究相对薄弱。

本文基于前人研究成果，以黄泥堡高边坡危岩为依托，结合现场工程地质调绘，通过分析高边坡危岩体的结构特征，得出近水平层状软弱基座型危岩体悬臂-拉裂式破坏模式；运用地质学基础理论，综合分析危岩体的形成及演化发展过程；在此基础上，推导出评价危岩崩塌稳定性的表达式；采用数值模拟方法对依托工程实例进行应力场模拟分析，为高边坡危岩稳定性评价以及治理措施提供指导和借鉴。

2. 高边坡危岩崩塌模式分析

2.1. 黄泥堡高边坡危岩

黄泥堡高边坡危岩位于重庆市合川区太和镇石埡村附近。该区夏季雷雨多而酷热，冬天霜雪少而无严寒，年均降雨量为 990 mm。季节性地表径流将地形切割形成两岸较陡的“V”字型沟谷，地形坡角约 40°~60°，局部存在近直立的陡崖，地面高程 266.00~345.00 m，相对高差约 79.00，沟谷底部堆积大量崩塌积体，地形地貌属于构造剥蚀丘陵地貌区，浅-中切割地形。据野外地质调绘及钻孔揭露，出露地层主要有第四系全新统残坡积层(Q₄^{el+dl})粉质黏土、崩坡积层(Q₄^{col+dl})块石土，侏罗系中统沙溪庙组(J_{2s})砂岩、泥岩，岩层产状近水平。斜坡及沟谷覆盖层主要为崩坡积块石土，土层厚度一般 8.0~10.0 m，最大厚度约 15.80 m。上层砂岩厚度约为 5 m，下部泥岩揭露最大厚度 37 m，地形地貌特征如图 1 所示。根据野外地质调绘结合钻探勘察方法，概化高边坡工程地质模型如图 2 所示。

2.2. 高边坡危岩崩塌模式分析

黄泥堡高边坡较陡峭，基岩多裸露。因场地内的产状近水平的砂岩、泥岩互层分布，砂岩出露区多形成陡坎，陡崖下部多为泥岩。泥岩在日晒雨淋条件下易崩解，因此风化速度快，砂岩属硬质岩石风化速度较泥岩慢，砂岩、泥岩因差异风化，导致砂岩陡坎下易形成岩腔，上部近水平产状砂岩由于泥岩不断风化、岩腔逐渐发展情况下演变成悬臂梁形式危岩，岩体主要依靠自身强度维持稳定。

2.3. 高边坡危岩的形成与演化过程

工程区地层岩性主要为侏罗系沙溪庙砂岩和泥岩互层，厚度不均，岩层产状近水平，该区高边坡危岩体崩塌的形成和演化过程主要分为四个阶段，分别为高边坡形成阶段、岩腔形成阶段、砂岩后缘张拉裂隙形成阶段和破坏阶段，各阶段演化过程如下：



Figure 1. Topographic and geomorphological features of the high slope of Huangni Bao

图 1. 黄泥堡高边坡危岩地形地貌特征

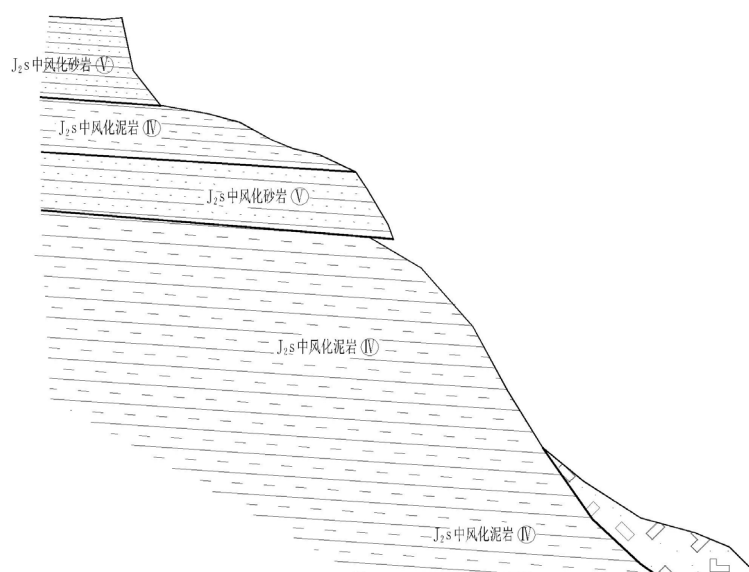


Figure 2. Engineering geological model of typical section of dangerous rock in high slope

图 2. 高边坡危岩典型剖面工程地质模型

1) 高边坡形成阶段：该工程区地形地貌属于构造剥蚀丘陵地貌区，原始地形平缓，无深切沟谷高边坡。在地质历史演化过程中，季节性地表径流不断对地层进行侵蚀，将地形切割形成两岸较陡的“V”字型沟谷，形成高边坡，砂岩和泥岩软硬相间的地层形成临空面，暴露出地表接受风化剥蚀。如图 3(a)

2) 岩腔形成阶段：形成临空面的岩层在自身应力集中条件和外界各种风化营力作用下，下部软质的泥岩在日晒雨淋条件下易崩解，因此风化速度快，砂岩属硬质岩石风化速度较泥岩慢，砂岩、泥岩因差异风化，导致砂岩陡坎下易形成岩腔，上部近水平产状砂岩由于泥岩不断风化、岩腔逐渐发展情况下演变成悬臂梁形式危岩，岩体主要依靠自身强度维持稳定。如图 3(b)。

3) 砂岩后缘张拉裂隙形成阶段：下部岩腔不断风化后退，岩腔深度逐渐增大，此时泥岩受外界风化作用影响减小。支撑上部砂岩的泥岩基础受力面积越来越小，所受压强越来越大，岩腔底部泥岩外侧产生应力集中，泥岩破碎剥落速度加快。当岩腔发育到一定深度时，上部悬臂式砂岩在自身重力作用下于后缘产生应力集中，当最大应力超过砂岩自身抗剪强度时，砂岩体后缘产生拉裂隙，砂岩强度进一步降低。如图 3(c)。

4) 破坏阶段：岩腔进一步发展，深度加深，砂岩后缘裂隙也不断发育加深，悬臂式砂岩重心不断外移到一定程度时，在后缘结构面切割、自身重力作用、裂隙水压力以及地震、人类活动等外界作用下，后缘裂隙贯通，悬臂式危岩体突然失稳崩落，形成危岩崩塌。如图 3(d)。

3. 危岩崩塌破坏力学判据

根据现场地质调查，概化工程地质模型，分析危岩体受力特征，在此基础上，用“块体平衡理论”计算其稳定性。基本假设条件[16]如下：

- 1) 在崩塌发展过程中，特别是在突然崩塌运动以前，把崩塌体视为整体；
- 2) 把崩塌体复杂的空间运动问题，简化成平面问题，即取单位宽度的崩塌体进行检算；
- 3) 崩塌体两侧与稳定岩体之间，以及各部分崩塌体之间均无摩擦作用。

拉裂式崩塌的典型情况如图 4 所示，以悬臂梁形式突出的岩体，在 AC 面上承受最大的弯矩和剪力，

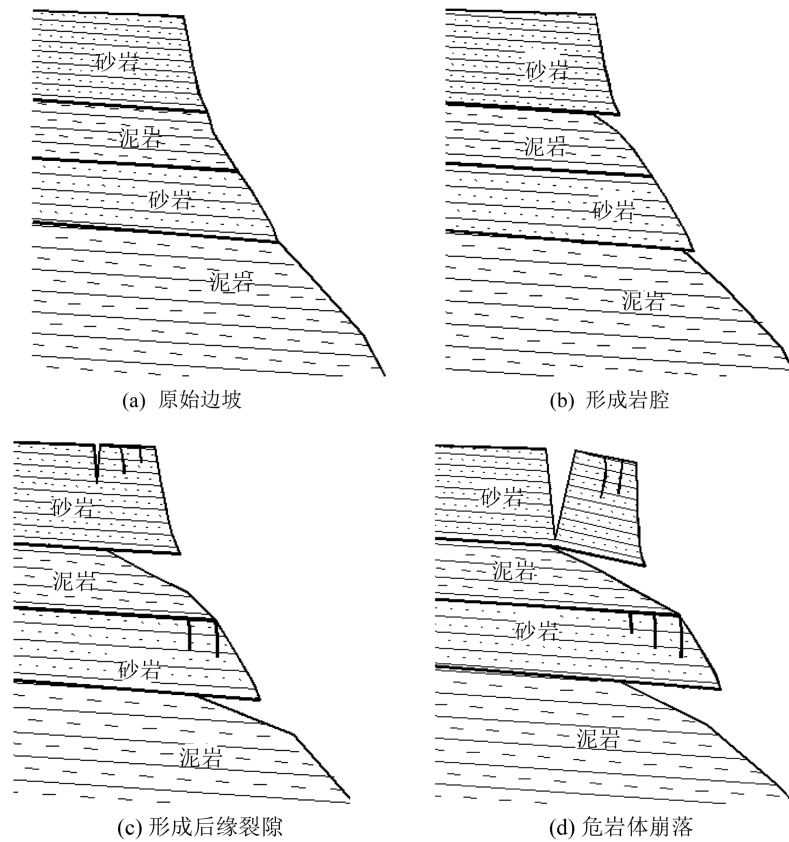


Figure 3. High side slope dangerous rock cavern evolution process
图 3. 高边坡危岩崩落演化过程

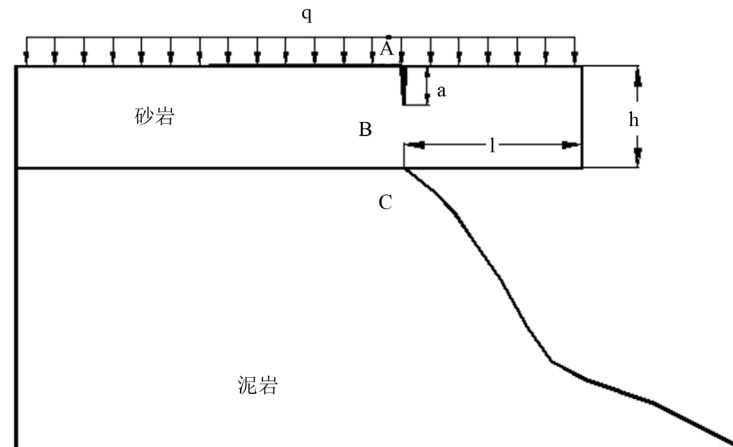


Figure 4. Dangerous rock mechanics model
图 4. 危岩体力学模型

若层顶部受拉，底部受压，A 点附近拉应力最大。在长期重力和风化营力作用下，A 点附近的裂隙逐渐扩大，并向深处发展。拉应力将越来越集中在尚未裂开的部位，一旦拉应力超过岩石的抗拉强度时，上部悬出的岩体就会发生崩塌。这类崩塌的关键是最大弯矩截面 AC 上的拉应力能否超过岩石抗拉强度。故可以用拉应力与岩石的抗拉强度的比值进行稳定性验算。

假如突出的岩体长度为 l ，岩体等厚，厚度为 h ，宽度为 1 m (取单位宽度)，岩石重度为 γ 。
在AC断面上尚未出现裂隙，则A点上的拉应力为：

$$\sigma_{A\text{拉}} = \frac{M \times y}{I} \quad (1)$$

公式中： M 是AC面上的弯矩， $M = \frac{l^2}{2} \gamma h$ ；

y ： $h/2$ ；

I 是AC截面的惯性矩。

稳定性系数 K 值可用岩石的允许抗拉强度与点所受的拉应力比值求得：

$$K = \frac{[\sigma_{\text{拉}}]}{[\sigma_{A\text{拉}}]} = \frac{h[\sigma_{\text{拉}}]}{3l^2 \times \gamma} \quad (2)$$

如果A点处已有裂缝，裂缝深度为 a ，裂缝最低点为B，则BC截面上的惯性矩 $I = \frac{(h-a)^3}{12}$ ， $y = \frac{h-a}{2}$ ，
弯矩 $M = \frac{l^2}{2} \gamma h$ ，则B点所受的拉应力为：

$$\sigma_{B\text{拉}} = \frac{3l^3 \gamma h}{(h-a)^2} \quad (3)$$

$$K = \frac{[\sigma_{\text{拉}}]}{[\sigma_{B\text{拉}}]} = \frac{(h-a)^2 [\sigma_{\text{拉}}]}{3l^2 \gamma h} \quad (4)$$

4. 危岩崩塌演化过程中应力场分析

在地形地貌未侵蚀成深切沟谷之前，岩体内部应力场在长期地质历史过程中已达到稳定状态，当季节性地表径流不断对地层进行侵蚀，将地形切割形成两岸较陡的“V”字型沟谷，形成高边坡的过程中，同时边坡临空面暴露出的砂岩和泥岩软硬相间的地层接受外界的风化侵蚀，由于差异风化作用，岩体内部应力场的平衡状态被打破，引起应力重分配和应力集中等效应。为深入分析软硬相间岩体由差异风化作用引起的应力场演化特征，本文采用数值模拟方法研究岩体内部应力场发展规律。

对具体工程实例进行数值模拟分析，砂岩、泥岩物理力学参数如表1。

应力场演化特征

根据具体工程实例，建立数值分析模型，数值模型采用摩尔库伦弹塑性理论的本构模型，由于实际高边坡是半无限空间体，模型宽度取单位宽度，对模型的底部边界固定竖向位移，左侧边界固定水平向位移。近水平产状砂泥岩互层岩体由于物理力学性质的不同，抗风化能力也各不同，在差异风化作用下，危岩崩塌的形成和演化发展经历了四个阶段，在各个演化阶段过程中，岩体内部应力场也跟着发生应力

Table 1. Calculation results of mechanical parameters of rock mass

表 1. 岩体力学参数计算结果

岩性	密度 kg/m^{-3}	弹性模量/Mpa	内摩擦角/(°)	粘聚力/Mpa	泊松比
砂岩	2352	1658.3	35	0.2	0.25
泥岩	2432	1641.3	39	0.25	0.34

重分布，各阶段应力场分布特征如图 5、图 6、图 7 所示。

根据模拟结果，如图 5 所示，在岩腔形成之前高边坡初始地应力场分布特征，由于工程区构造应力很小，岩体内部应力场主要是由于自身重力产生，边坡坡面处应力较小，向岩体内部应力逐渐增大，岩体坡面处未出现明显的应力集中现象。

由图 6 应力云图可以看出，在砂岩底部的泥岩形成岩腔之后，岩体内部初始地应力平衡被打破，应力发生了重分布。岩腔底部和砂岩接触处产生应力集中现象。越向坡内，差异风化作用对岩体应力场影响减小，最终重新恢复到岩腔形成前应力状态，由自重引起的应力状态。在岩腔底部产生的应力集中主要是压应力，因此泥岩不仅受到风化剥蚀作用，同时也受到压裂破坏作用，并且压裂破坏作用要比风化作用对泥岩破坏影响大，岩腔演化发展速度相应也更快。岩腔形成后，上部砂岩也变成凸出的悬臂梁，砂岩底部产生压应力集中，砂岩顶部对应位置将产生拉应力集中，并且随着岩腔的发展而逐渐增大。

当岩腔不断发展加深，砂岩顶部拉应力集中也越来越大，直到接近砂岩的抗拉强度时，砂岩后缘产生拉裂隙，凸出的砂岩形成危岩体。岩体内部地应力场分布特征如图 7 所示，岩腔底部应力集中现象更

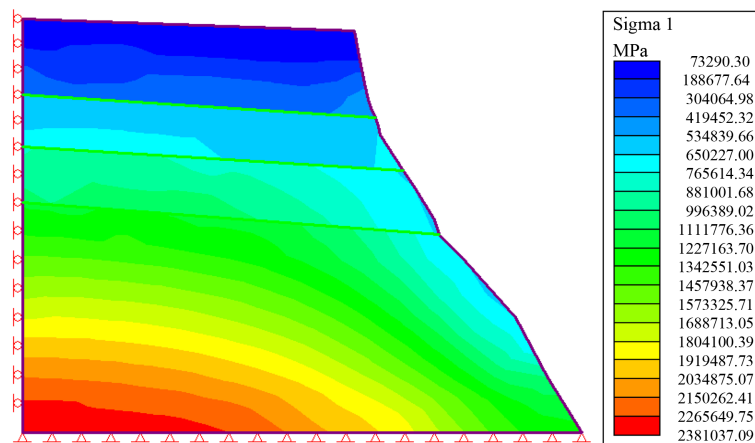


Figure 5. Initial geostress field distribution of high slope

图 5. 高边坡初始地应力场分布

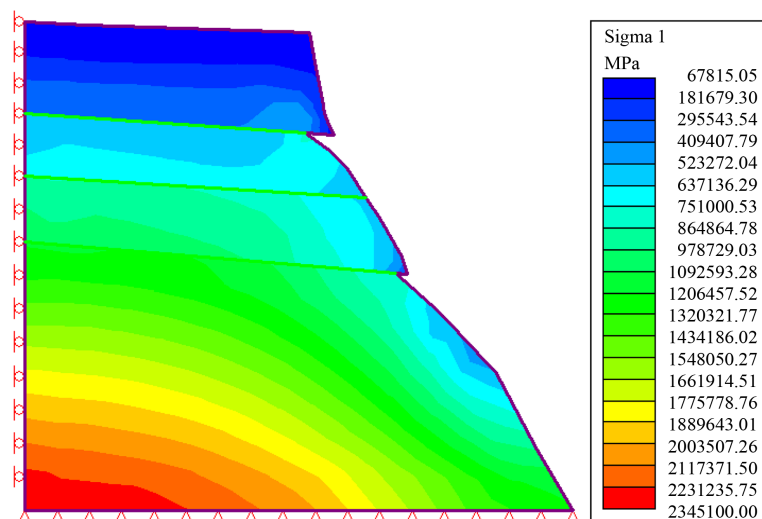


Figure 6. After the formation of rock cavity stress field distribution

图 6. 形成岩腔后地应力场分布

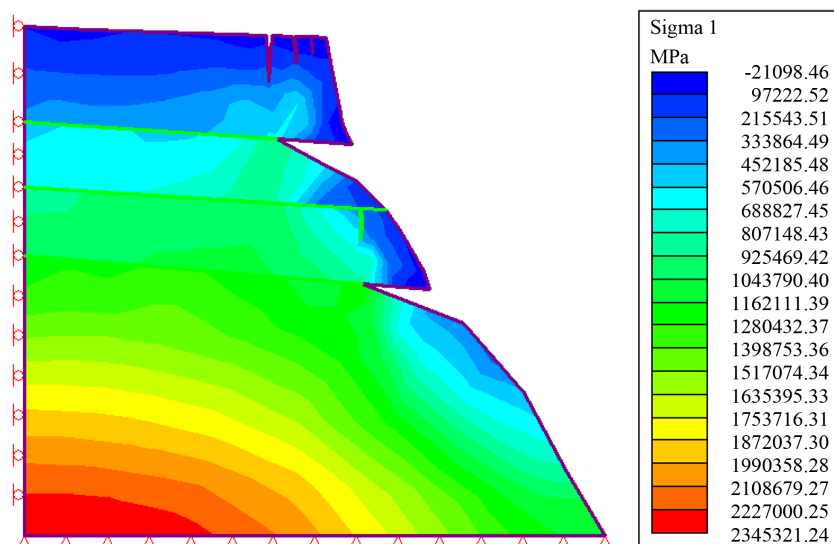


Figure 7. The stress field distribution when the trailing edge produces tension and fracture

图 7. 后缘产生张拉裂隙时地应力场分布

加明显，应力集中的位置也随着岩腔的加深而向边坡内部发展，并且应力值也增大，相应的砂岩后缘裂隙底部受到拉应力也增大。此时，岩腔受外界风化剥蚀作用减弱，压裂破坏作用增强，岩腔演化速度也加快，砂岩内部裂隙扩展速度也随之加快。

在岩腔发展速度加快，砂岩后缘裂隙扩展加深的情况下，当岩腔发育到一定深度，砂岩内部裂隙扩展到一定程度时，外界人工活动或者地震作用引起砂岩内部裂隙突然贯通，危岩体脱离母岩，形成崩塌。之后岩体内部重新恢复到自重应力场状态。

5. 结论

1) 根据野外地质调绘结合钻探勘察方法，概化黄泥堡高边坡工程地质模型，通过分析得出近水平产状岩体在差异风化作用下形成悬臂梁形式崩塌破坏模式，并且危岩体崩塌破坏过程主要分为四个阶段：高边坡形成阶段、岩腔形成阶段、砂岩后缘张拉裂隙形成阶段和破坏阶段。

2) 悬臂式危岩体最终以拉张型崩塌破坏，结合岩体自身强度因素和岩体结构面类型，通过力学分析得出悬臂式危岩体崩塌失稳判据。

3) 采用数值模拟方法分析了危岩体形成和演化过程中岩体内部应力场的变化特征，结果表明，岩腔底部产生应力集中现象，并且随着岩腔的发展加深而越来越明显。本文研究成果可为软弱基座型高边坡危岩崩塌治理工程提供参考和借鉴。

参考文献 (References)

- [1] 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, 1994.
- [2] 陈洪凯, 董平, 唐红梅. 危岩崩塌灾害研究现状与趋势[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(6): 53-60.
- [3] 宋云梅. 三汇磨子岩危岩形成过程数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [4] 陈洪凯, 王圣娟. 三峡库区灰岩地区岩质边坡危岩座裂演化机制研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 34(3): 38-43.
- [5] 李霍, 巨能攀, 郑达, 等. 贵州上洋水河流域拉裂-倾倒型崩塌机理研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 289-296.

- [6] 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.
- [7] 陈洪凯. 三峡库区危岩链式规律的地貌学解译[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 91-95.
- [8] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡库区危岩发育规律研究[C]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 837-842.
- [9] 陈洪凯, 唐红梅. 拉剪型危岩发育过程的模型试验[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(6): 115-119.
- [10] 苏天明, 张艳鸽. 风化岩腔边坡的演化与应力场分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(7): 30-34.
- [11] 侯江萍, 麻炳贵, 周俊. 织金县少普乡联盟村崩塌危岩带地质灾害成因分析论证[J]. 西部探矿工程, 2016(9): 6-8.
- [12] 冯振, 陈云霞, 李滨, 等. 重庆南川甑子岩山体崩塌机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 50-56.
- [13] 董雪, 刘文连, 徐则民. 缓倾坡内层状岩质高边坡稳定性分析——以黄桷湾危岩高边坡的主斜坡为例[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 619-625.
- [14] 史文兵, 赵娟. 软弱基座型危岩崩塌调查评价与防治[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2014, 31(5): 40-42.
- [15] 赵晓峰. 山区公路边坡崩塌的成因及处理[J]. 土工基础, 2016, 35(5): 563-565.
- [16] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册(第四版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2330-1724, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojs@hanspub.org