

# 边坡的开挖及其地震动力响应分析

孟 达<sup>1</sup>, 孟祥冲<sup>2</sup>, 赵 援<sup>3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中建钢构有限公司, 广东 深圳 518040;

3. 湖北省自动化工程学校, 湖北 襄樊 441021)

**摘 要:** 通过研究岩石的损伤弹塑性本构关系, 参考西龙池水电坝址左岸含裂隙岩质高陡边坡的地质材料, 运用有限元软件对其进行了建模, 截断边界, 引入无限元, 模拟边坡在强地震载荷下的动力学响应, 根据实际工程的需要, 对库底及岸坡进行开挖, 并对开挖后的边坡进行动力响应分析。

**关键词:** 弹塑性损伤模型; 动载荷; 动力响应

**中图分类号:** TU417; TU435 **文献标识码:** B **文章编号:** 1671 - 0959(2009)01-0077-04

地震是影响工程岩体稳定性的重要因素之一。尽管地震发生的频率不是太高, 但是它对人类所造成的损失却是无法估量的。对岩质边坡而言, 断层是最基本的构造形式之一, 岩体中普遍赋存的节理裂隙、断层、层理等软弱面或不连续面使大部分岩体失去了连续性, 而呈现出非线性大变形的力学性能。地震是断层破坏失稳的结果, 断层是研究地震孕育和发生机理、探索地震预测理论和方法的重要基础之一。研究工程岩体的地震动力响应, 评价工程岩体的动力稳定性与加固治理工程的可靠性, 无疑具有十分重要的现实意义。

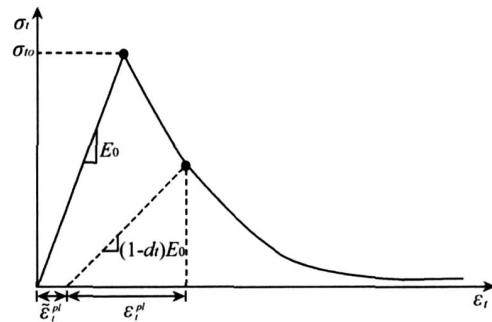


图1 岩石单轴拉伸下的应力应变关系

## 1 岩石弹塑性损伤本构模型

模型是一个基于连续介质、塑性基础的破坏模型。它假定两个主要的破坏机理: 即岩石材料的拉伸开裂和压缩破碎。屈服或破坏表面的演化是由等效拉伸塑性应变和等效压缩塑性应变这两个硬化变量所控制。

### 1.1 单轴拉伸与单轴压缩的应力行为

模型假定岩石材料具有单轴拉伸和压缩的响应行为, 如图1和2所示。

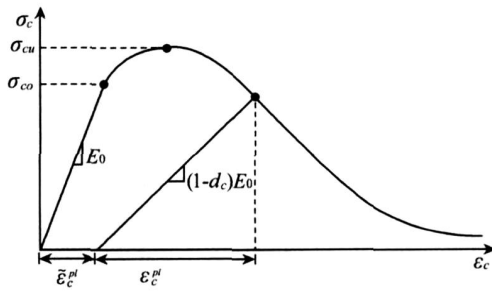


图2 岩石单轴压缩下的应力应变关系

应力 - 应变关系分别为:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \\ \sigma_c &= (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \epsilon_c^{pl}) \end{aligned} \quad (2)$$

定义“有效”拉伸的和压缩的抗滑应力为:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_t &= \frac{\sigma_t}{(1 - d_t)} = E_0 (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \\ \bar{\sigma}_c &= \frac{\sigma_c}{(1 - d_c)} = E_0 (\epsilon_c - \epsilon_c^{pl}) \end{aligned} \quad (3)$$

当岩石从应力-应变曲线上的应变软化部分某一点卸载, 卸载响应变弱了, 材料的弹性刚度弱化或递降, 即发生损伤。弹性刚度的损伤可由两个损伤变量  $d_t$ ,  $d_c$  表示, 假定  $d_t$ ,  $d_c$  均为塑性应变、温度和场变量的函数。破坏变量取值可以从 0 到 1, 0 表示材料没有破坏, 1 表示材料完全破坏。(符号含义)

$$\begin{aligned} d_t &= d_t(\epsilon_t^{pl}, \sigma_t, f_t); 0 \leq d_t \leq 1 \\ d_c &= d_c(\epsilon_c^{pl}, \sigma_c, f_c); 0 \leq d_c \leq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

设  $E_0$  为材料初始弹性刚度, 单轴拉和压荷载作用下的

收稿日期: 2008 - 11 - 16

基金项目介: 国家自然科学基金项目 (10672167)

作者简介: 孟 达 (1969 - ), 女, 辽宁营口人, 博士, 副教授, 主要从事采矿工程和煤炭安全及岩土工程等专业的科研工作。

有效抗滑应力决定屈服(或破坏)表面的大小。

### 1.2 岩体材料破坏及其在循环荷载下的刚度恢复

破坏情况下,破坏变量作为非减少质点量来处理。分析中的增量,每一个破坏变量的新值取先前增量的最后值和当前状态对应的值中的最大值。

1) 拉伸破坏,拉伸损伤可以利用这个选项定义单轴拉伸破坏变量为破裂应变或者破裂位移的函数。

2) 受压破坏,受压破坏可以利用这个选项来定义单轴受压破坏变量为无弹性应变的表格函数。

3) 刚度恢复,在周期荷载作用下,如地震荷载作用下,刚度恢复在岩石的力学响应方面是十分重要的。

大多数准脆性材料,包括岩石的实验观测显示,当荷载由拉力变为压力时,裂缝闭合,受压刚度得到恢复;另一方面,当荷载由压力变为拉力时,一旦出现了压缩破坏微裂缝,拉伸刚度不会得到恢复。

## 2 工程概况

西龙池水电坝坝址所处河床高程 640 ~ 700m,呈 SE155 方向发育,河谷为不对称的“U”字型,两侧岸坡呈陡缓相间的“梯坎”状,左岸边坡平均为 60°;局部更陡。左侧库岸冲沟发育,沟底坡降很大,局部被切割成“墙”状山脊,发育有悬谷。沟谷地形较开阔,正常蓄水位 838.0m。地层多为层状岩体,岩层产状平缓,风化相对较弱,陡立地形段一般无强风化带,层面多闭合,裂隙不发育,地质条件较好。区内发育的主要断层、裂隙方向为 NE10 ~ 20°、NE30 ~ 60°、NW330 ~ 334 和 NW280 ~ 290°;其中 F<sub>114</sub>、F<sub>118</sub> 等,属张扭性,垂直断距 2.0 ~ 20.0m,破碎带宽 0.5 ~ 3.0m,经历了两次以上的构造变动,受断层影响,其间同方向次一级断裂极为发育, F<sub>114</sub> 断层规模较大,且断层通过库底; NW280 组、F<sub>104</sub> 等,属扭性,垂直断距 10.0 ~ 30.0m,破碎带宽 2.0 ~ 5.0m,该断层横贯库区。该处边坡典型的工程地质剖面见图 3 所示。

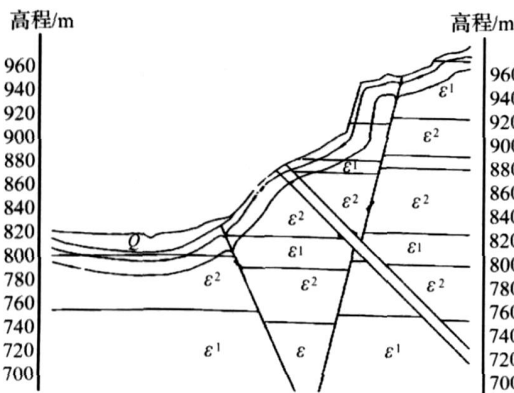


图 3 工程地质剖面图

下水库库区位于河谷左岸的池沟内,库底高出河床近 150.0m 左右。虽然靠山一侧库岸山体宽厚,但组成库岸的

基岩(正常蓄水位 838.0m 以下)为 3 厚层灰岩和薄层泥质条带灰岩,透水性较强,并且地下水位很低,位于库底以下 87.2m;库底大面积覆盖第四纪松散堆积物,厚度达 20.0 ~ 100.0m,其属于强透水,可能成为库底渗漏的主要途径。

库岸及覆盖层下伏的岩体内断裂亦较发育,有 F<sub>114</sub>、F<sub>118</sub> 多条 NE 向断层和 NW 向的 F<sub>104</sub> 断层位于库岸和库底,造成库岸的崮山组岩层和库底覆盖层下的岩层完整性较差,并且厚层灰岩中岩溶相对较为发育,从而增强了岩体的透水性。

## 3 数值模拟

### 3.1 边坡开挖

岩石开挖破坏岩体原有应力平衡状态,造成应力重分布,使某些局部岩体的应力增大,过大的应力集中可以引起局部岩体进入塑性区或破坏。因此在岩石开挖工程中应尽量减少或避免出现过大的应力集中。在边坡岩体开挖中,一般在坡面附近产生应力集中带。开挖后模拟的应力云图见图 4、图 5。

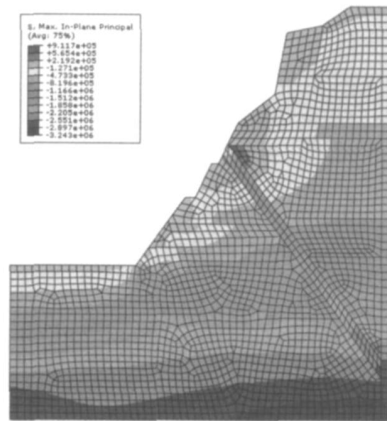


图 4 开挖后最大主应力云图

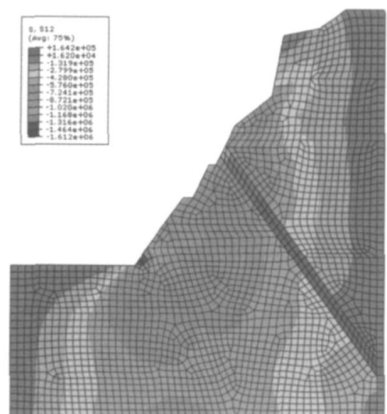


图 5 开挖后剪应力云图

边坡面附近的主应力迹线均明显偏转,表现为最大主应力与坡面近于平行,最小主应力与坡面近于正交,向坡

体内逐渐恢复到初始应力状态。

由于应力的重分布，在坡面附近产生应力集中带。不同部位其应力状态是不同的，在坡脚附近，平行坡面的切向应力显著升高，而垂直坡面的径向应力显著降低，由于应力差大，于是就形成了最大剪应力增高带，容易发生剪切破坏。在坡肩附近，在一定条件下坡面径向应力和坡顶切向应力可转化为拉应力，形成拉应力带，因此，坡肩附近最易拉裂破坏。由于此模拟边坡一次开挖成型，开挖过程中，边坡并没有发生损伤。

### 3.2 边坡开挖后地震响应分析

从最终拉压损伤云图(图6、图7)中，可以看出损伤最严重的区域主要集中在两个断层的交接处和坡角处，断层是结构中强度比较低的部分，整体性不强的部分，因此极易发生破坏，损伤是由断层及其交接处展开并扩展，坡脚处也发生比较严重的损伤，坡腰处由于受拉，而岩石的抗拉强度比较低，所以发生比较大的损伤，从图中还可以看出拉损伤比压损伤区域大很多，损伤程度更高，主要因为岩石材料是受压材料。

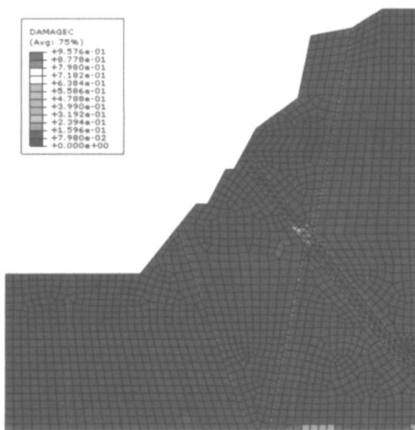


图6 压损伤云图

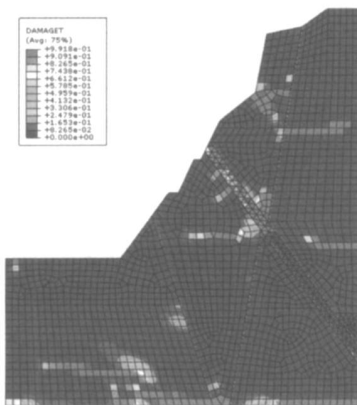


图7 拉损伤云图

从最终地震荷载作用下边坡的最大主应力和最小主应力极值分布规律特征(图8、图9)来看，从坡体表部向深部，边坡的动应力呈现逐渐由拉变压。最大主应力在边坡

底部基岩和断层交接处出现最大值，约为7.0MPa；最小主应力在坡脚底部基岩出现最大压应力，约为23.8MPa，边坡坡顶岩体和坡表面岩体出现比较大范围的拉应力。

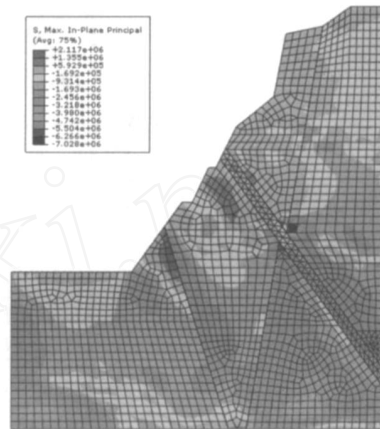


图8 最大主应力云图

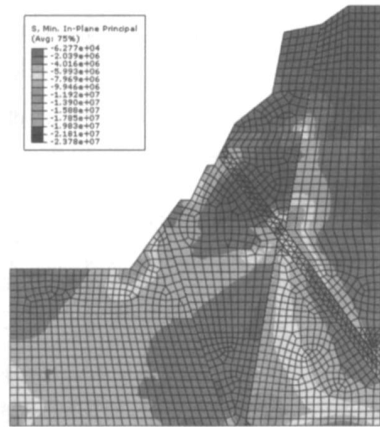


图9 最小主应力云图

从三个方向上的应力来看，坡顶基本都是受拉的，X方向应力中最大拉应力为0.79MPa，Y方向应力中最大拉应力为1.82MPa，坡面也受拉，Z方向应力中最大拉应力为1.5MPa，最大压应力基本都在坡底部。

从剪应力来看，剪应力最大处，在坡底部，最大达到8.8MPa，在底部两断层。

## 4 结论

文章主要模拟边坡的开挖过程中所产生的应力集中、应力释放等对边坡的影响，并对边坡开挖后的稳定性进行分析，同时还分析了边坡开挖后的地震动力响应，分析从损伤场、应力场等方面进行，最终的分析结果可为边坡治理提供参考。

### 参考文献：

[1] 张秋文. 大陆强震复发模型与断裂间相互作用研究及其在地震预测中的应用 [D]. 中国地震局地质研究所博士学位论文, 1999.

# 寺河矿采场覆岩结构及运动规律数值模拟研究

朱拴成<sup>1</sup>, 尹希文<sup>2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 经济与信息研究所, 北京 100013;

2. 煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013)

**摘要:** 应用“关键层”理论与离散元数值模拟相结合, 研究寺河矿大采高综采采场覆岩结构及运动规律, 结果表明, 顶板离层量的增加、顶板断裂线的前移是大采高工作面覆岩运动的两个特征。

**关键词:** 覆岩结构; 3DEC数值模拟; “关键层”理论

**中图分类号:** TD325 **文献标识码:** B **文章编号:** 1671 - 0959(2008)12-0080-04

## Research on Structure and Movement Law of Coal Face Overlying Strata Based on 3DEC

ZHU Shuan - cheng<sup>1</sup>, YIN Xi - wen<sup>2</sup>

(1. Economy and Information Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Coal Mining technology Department, China Coal Research Institute, Beijing 100013)

**Abstract:** The structure and movement law of coal face overlying strata in certain coal mine are researched based on the theory of key strata and 3DEC numerical simulation. Through the different mining height model, the increase of bed separation and the proceeding of roof caving line are the two characters of movement of overlying strata in fully mechanized mining with great mining height

**Keywords:** structure of overlying strata; 3DEC numerical simulation; theory of key strata

大采高综采已在我国西山、邢台、徐州、义马、阜新、龙口、开滦、铜川、双鸭山、淮南、晋城、神府等矿区广泛使用, 并取得了一定的成功<sup>[1]</sup>。实践中, 普遍存在的问题有<sup>[2]</sup>: 煤壁片帮容易引发端面冒顶; 支架工作阻力不足导致支架压死或结构件损坏; 采高加大, 支架稳定性差。这些问题的实质除与地质条件有关外, 其根本在于上覆岩层结构及运动规律。本文以寺河矿为例, 对其上覆岩层结构进行探讨。

### 1 采场覆岩结构

#### 1.1 垮落带高度的确定

煤层开采后, 首先引起直接顶的冒落。随着工作面继

续推进, 基本顶暴露面积逐渐增大, 当达到极限跨距时, 基本顶开始断裂、失稳。根据文献 [4] 和 [5], 说明三铰拱平衡条件即基本顶进入断裂落带的条件是基本顶分层厚度应大于其下自由空间高度的 1.5 倍。现场观测发现 C4 层节理裂隙发育, 且随着工作面的开采能够随采随垮。

以寺河矿 2307 工作面综合柱状图为依据 (如表 1 所示), 综合考虑现场实测结果, 得到寺河矿 2307 工作面冒落带岩层包括 C2、C3、C4、C5、C6、C7 层, 冒落高度为 21.95m。

#### 1.2 关键层层位的确定

1) 依据工作面综合柱状图, 从裂隙带最下位岩层开

- [2] 薄景山. 三峡重庆库区区域滑坡灾害的综合研究报告 [R]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2003.
- [3] 苏超, 李俊宏, 任青文. 有限单元法在高拱坝坝肩动力稳定分析中的应用 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2003, 31(2): 144 ~ 147.
- [4] 王金昌, 陈页开. ABAQUS在土木工程中的应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

- [5] 居荣初, 曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论 [M]. 北京: 地震出版社.
- [6] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响 [J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 129.
- [7] 蔡耀军, 崔政权, R Cojean. 水库诱发岸坡变形失稳的机理 [M]. 见: 新世纪岩石力学与工程的开拓和发展 [M]. 中国科学技术出版社, 2000: 6182622.

(责任编辑 马光辉)

收稿日期: 2008 - 07 - 29

作者简介: 朱拴成 (1982 - ), 男, 河南南阳人, 工程硕士研究生, 研究方向为安全技术及工程。