

强地震荷载作用下含断层岩质边坡稳定性分析¹⁾

张均锋²⁾ 李正国

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 基于岩石材料的弹塑性损伤理论, 引入两个独立的损伤变量分别控制岩石的拉压行为, 通过对地震荷载作用下边坡场地响应的有限元数值模拟, 总结含裂隙的岩质边坡发生局部损伤软化、破坏的区域的扩展、演化过程和规律. 结合对某大型水电坝址左岸的岩质边坡在强地震动荷载作用下(百年一遇、超越概率 2%) 发生破坏的数值模拟, 揭示这类边坡滑坡的机理, 并根据模拟的结果, 对整治边坡破坏提出参考依据.

关键词 强地震荷载, 岩质边坡, 裂隙, 损伤演化

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)01-024-05

STABILITY ANALYSIS OF FRACTURED ROCK SLOPE UNDER STRONG SEISMIC LOADING¹⁾

ZHANG Junfeng²⁾ LI Zhengguo

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Based on elasto-plastic damage theory of rock materials, the failure and fracture processes of rock slopes are numerically simulated with the site response of the rock slope under strong seismic loading, including the local damage evolution and the development of failure area. Two independent damage variables are introduced into the constitutive model to control the tension and compression behaviors of the rock materials. Although the characteristics of initial micro-cracks inherent in the rock materials are not considered in the constitutive model, their influence on the properties of rock materials is taken into consideration by reducing the corresponding moduli and strength. The interfacial characteristics between large cracks such as faults are considered as in the interface contact. The numerical simulation by finite element method is carried out for the failure of a practical rock slope on the left bank of a river with a large hydraulic power station under a strong seismic loading (in 100-year recurrent period and over a probability of 2%). The mechanism of landslide for such kind of fractured rock slope is analyzed. Some advices are proposed for prevention and treatment of the landslide according to the simulation results.

Key words strong seismic loading, rock slope, crack, damage evolution

引 言

长期以来, 强地震荷载下含裂隙岩质边坡的破坏问题一直是广大岩土工程与工程地质工作者所关注的重点和研究的难题^[1~3]. 我国西部是强地震多发地区, 地震诱发的滑坡往往具有分布广、数量多和危害大的特点. 例如 1973 年发生于四川省炉霍境内

的 7.9 级地震触发了各种规模滑坡 137 处, 滑坡面积达 90 km², 死亡人数 2175 人. 2008 年 5 月 12 日的汶川大地震造成的滑坡范围更广, 人员伤亡令人震惊, 并且道路堵塞、峡谷形成堰塞湖. 由于边坡岩体内存在大量裂隙和节理(统称岩体结构面), 其强度特性和抵抗变形的能力影响乃至控制着岩体的强度

2008-10-13 收到第 1 稿, 2008-12-30 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金(10672167)和国家重点基础研究发展规划(973)(2002CB412706)资助项目.

2) 张均锋, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事滑坡机理及动荷载下边坡稳定方面的研究工作. E-mail: zhangjf@imech.ac.cn

和变形特征。因此，开展地震荷载作用下含裂隙岩质边坡的力学响应及其治理方案研究，对于减小地震荷载诱发的灾害，确保工程安全，具有极其重要的意义。

国内外学者已经发展了多种边坡地震反应分析的方法，大致可以分为拟静力法、Newmark 滑块分析法和试验法。1950 年，Terzaghi 首次将拟静力法应用于地震边坡稳定性的分析中。拟静力法是将地震作用简化为水平方向或垂直方向的不变体积力作用边坡体。Newmark 滑块分析法^[4]用永久位移标准反映地震荷载作用下边坡的响应。试验法是在室内模拟各种条件下的边坡的响应与稳定性，如简化模型的振动台动力试验等。但前两类方法引入的假设与实际相差较大，难以真实地反映地震荷载作用下边坡岩体的力学行为和动力响应；而试验法尽管可通过离心机模拟解决重力相似问题，但整个模型还是很难完全解决物理相似问题，因此也只能得到定性结果。

随着计算机技术的发展，数值模拟方法得到越来越广泛的应用，而有限元方法是边坡稳定分析中最常用的方法之一。Clough 等^[5]首先把有限元分析引入到岩土边坡地震反应分析中。Ito 等^[6]使用二维有限元分析研究了地震永久位移与地震系数之间的相关性以及静力和地震动荷载作用下边坡稳定性的差异性。何蕴龙等^[7]在大量有限元动力计算的基础上，分析总结了岩石边坡地震动力系数的分布规律，提出了岩石边坡地震动力响应特征的岩石边坡地震作用近似计算方法。

本文结合典型实际边坡工程的地质资料和调查，根据实地采样试验所确定的各层岩体物理力学参数，采用弹塑性损伤本构模型进行有限元数值分析，对某水电坝址左岸的高陡岩质边坡在强地震荷载作用下的动力响应和破坏行为进行了分析，为实际的边坡治理提供了依据，并提出了初步的整治建议。

1 弹塑性损伤本构模型

在岩体材料的本构模型研究方面，从早期的线弹性，逐步发展了考虑塑性、黏弹塑性等在内的模型，近几年来随着岩体损伤力学的研究，人们根据不同的损伤演化机制建立起各种损伤模型并应用于岩石材料力学的研究。Dougill 最早把损伤力学应用于岩石和混凝土材料^[8]，其后 Dragon^[9]和 Krajcinovic 等^[10]的研究对此起了很大的推动作用。谢和平^[11]

基于岩石微观断裂机理和蠕变损伤的研究，把岩石蠕变大变形和损伤分析结合起来，形成了岩石损伤力学的体系。张均锋等^[12,13]研究了岩体各项异性弹塑性模型，并给出了应力增量的显式表达形式。目前使用较多的是将弹脆性损伤模型用于岩石和混凝土材料研究，而岩石材料的弹塑性损伤模型仍处于研究发展阶段。

本文采用的是基于连续损伤理论的岩石弹塑性损伤模型，假定岩石材料破坏主要因拉伸开裂和压缩破碎，材料屈服服从 Drucker-Prager 屈服准则。岩石材料拉伸和压缩损伤演化分别由两个独立的等效塑性应变变量控制，本构关系为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= (1 - D_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \\ \sigma_c &= (1 - D_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中， E_0 为岩石材料的初始弹性模量， D_t 和 D_c 分别为拉伸和压缩损伤变量， ε_t 和 ε_c 分别为拉伸和压缩总应变， ε_t^{pl} 和 ε_c^{pl} 分别为拉伸和压缩的塑性应变。

2 截断边界与初始地应力

理论上分析计算模型选取的范围越大结果越精确，但由于计算量和计算精度（包括单元尺寸）的限制和要求，通常只能截取所关心位置附近的局部区域。这样对靠近边界部分的计算结果必然会有较大误差，所以在动力分析中需要引入人工边界。

对此我们将截取的计算区域两边边界设定为无反射边界，即左右边界上的单元采用无限单元（infinite element），使得岩体内向外传播的波可以适当地被吸收从而避免地震波在边界上的反射。对底部边界，采用附加黏性压力的方法，黏性压力由下式确定

$$p = -\rho C_d(V - V_{ref})$$

其中， ρ 为岩石材料密度， V 为底边界的节点的速度， V_{ref} 为参考节点的速度（这里取无穷深处参考点，即 $V_{ref} = 0$ ）， C_d 为岩体内传播的膨胀波速，即

$$C_d = \sqrt{\frac{E_0(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

对数值模拟过程中初始地应力的处理，是在施加地震动荷载前的一段时间内先施加重力荷载。由于采用显式算法，为避免突然加载造成的冲击效应，重力荷载是采用平滑方式施加的，只要时间足够长，

在考虑内部阻尼的作用时，可获得平衡的初始地应力。然后再在底部边界施加地震加速度进行求解。

3 工程实例数值模拟分析

3.1 工程地质概况

水电坝址所处河床高程 640~700 m，呈 SE155° 方向发育，河谷为不对称的“U”字型，两岸边坡呈陡缓相间的“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。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°，30°~60°，330°~334° 和 NW280°~290°。该处边坡典型的工程地质剖面见图 1。

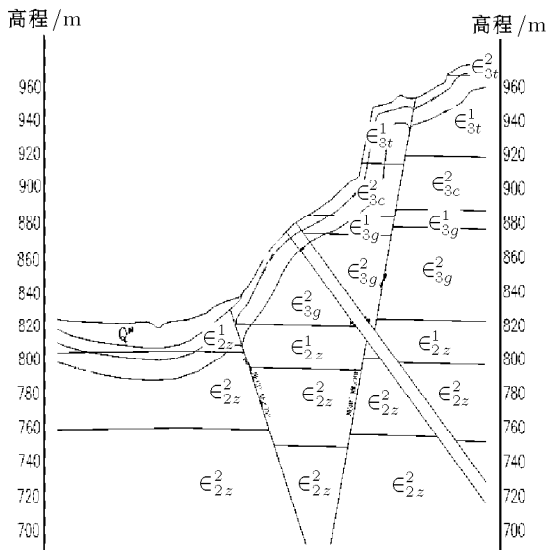


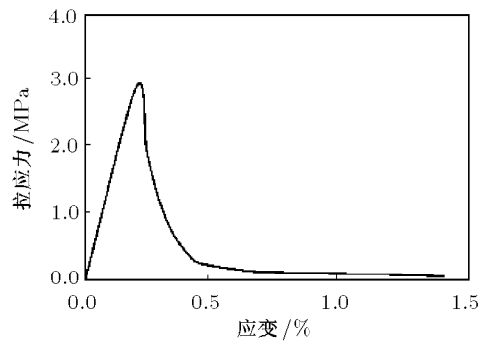
图 1 工程地质剖面图

3.2 岩层材料参数

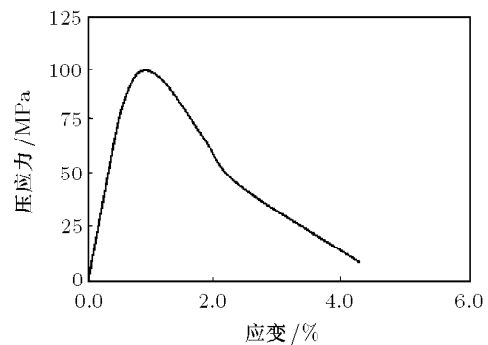
组成边坡的地层自下而上分别为厚层泥质柱状灰岩、鲕状灰岩与薄层泥质条带状灰岩互层 (ϵ_{2z}^1)；似薄层状钙质石英粉砂岩、鲕状灰岩、似薄层状灰岩互层，夹竹叶状灰岩 (ϵ_{2z}^2)；薄层~中厚层泥质条带状灰岩、竹叶状灰岩夹砂岩、灰绿色页岩 (ϵ_{3g}^1)；厚层泥质条带状灰岩夹白云质灰岩 (ϵ_{3g}^2)；紫红色竹叶状灰岩、页岩、泥质条带状灰岩互层 (ϵ_{3c}^1)；薄层条带状灰岩、小竹叶状灰岩 (ϵ_{3c}^2)；薄层~厚层泥质条带状灰岩 (ϵ_{3f}^1)；厚层蠕虫状泥质灰岩、泥质条带状灰岩 (ϵ_{3f}^2)。各层材料的力学参数见表 1，其中一类岩石材料的拉伸和压缩应力应变关系见图 2。

表 1 各层材料的力学参数

岩层名称	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 / (kg·m ⁻³)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
ϵ_{2z}^1	15	0.24	2 710	105	2.5
ϵ_{2z}^2	16	0.26	2 710	100	2.9
ϵ_{3g}^1	20	0.28	2 710	105	2.5
ϵ_{3g}^2	18	0.20	2 710	105	3
ϵ_{3c}^1	12.5	0.32	2 700	80	2
ϵ_{3c}^2	15	0.28	2 690	100	2.5
ϵ_{3f}^1	16	0.25	2 690	100	3
ϵ_{3f}^2	18	0.22	2 690	105	3



(a) 拉伸应力应变曲线



(b) 压缩应力应变曲线

图 2 岩石材料拉伸和压缩应力应变曲线

3.3 地震动加速度

计算过程中采用的地震加速度是根据当地以往的地震记录，按照百年一遇、超越概率 2%，重现期 5000 年，人工反演合成的地震加速度时程曲线见图 3。

3.4 数值模拟与分析

由于所取计算模型只是截取了水电坝址处的部分区域，计算区域大小和边界选取必然影响模拟结果的精度。因此在进行地震动力反应分析时，边坡计算区域两侧采用了无限单元作为无反射边界处理，

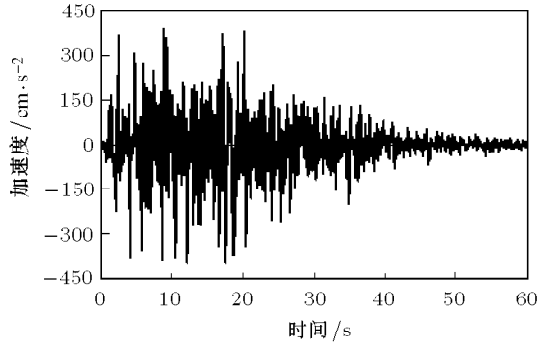


图 3 地震加速度时程曲线

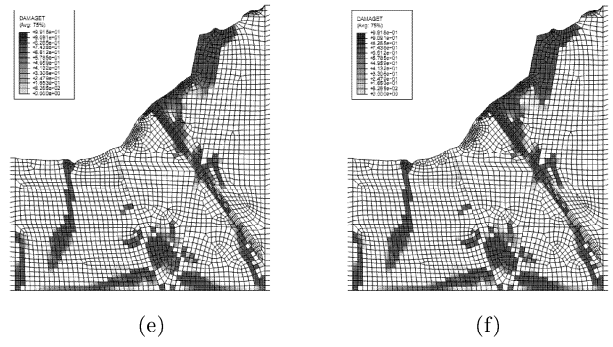


图 4 地震荷载下的拉损伤演化云图

以便使岩体结构内向外传播的波能量可以被适当地吸收，避免地震波在边界上发生反射。此外，数值模拟过程中，前 10s 仅施加重力荷载，以平衡初始地应力，后 60s 在底部边界施加横向和竖向地震加速度进行求解，且取竖向加速度幅值为横向的 0.6 倍。

在强地震荷载下，边坡将产生明显的损伤破坏，同时还存在断层开裂引发的不稳定区域。图 4 给出了边坡体拉损伤演化的云图，其中图 4(a)~ 图 4(f) 分别是初始加载开始每隔 10s 的拉损伤破坏演化结果。

可以看出，主要的拉损伤分为两个区域：一处是边坡体部分（包括断层在内），在强地震荷载下，将会发生滑塌或倾倒崩塌；另一处是坝基所处的河谷底部，将会出现张拉裂缝。

图 5 也给出了从初始施加地震动荷载开始，每隔 10s 边坡体的压损伤演化云图。可知主要的压损伤发生在边坡的坡脚和坡表面以及两条断层的交界处，后者发生在远离坝体的位置，可以不考虑其对

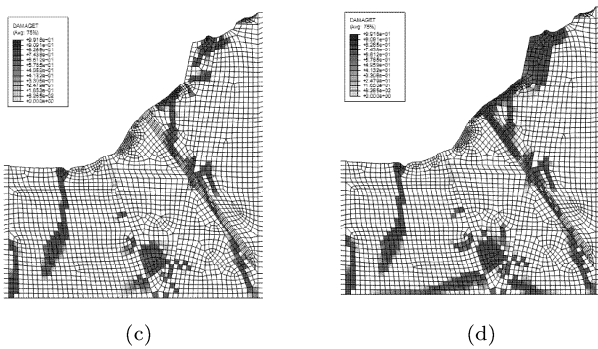
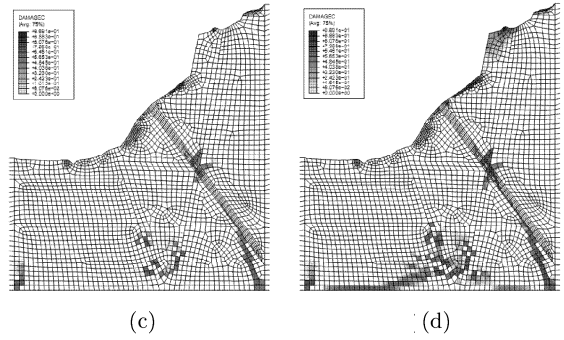
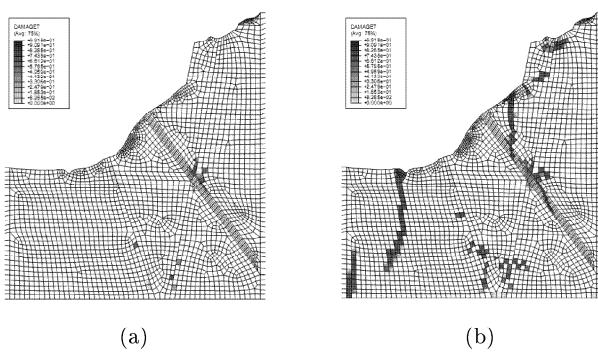
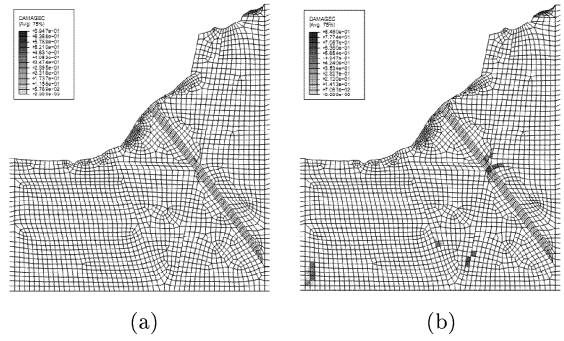


图 5 地震荷载下的压损伤演化云图

坝体安全的影响.

综合上述边坡体在强地震荷载下拉 / 压损伤破坏的演化结果, 应该对威胁坝体或坝基安全的两处主要区域进行工程处理, 即除了必要的对坝基进行注浆防渗处理外, 还须设计能抗拉的防渗混凝土墙, 对左岸的边坡则应采取削坡和锚固处理.

4 结 语

通过对某水电坝左岸边坡在百年一遇、超越概率 2% 的强地震载荷作用下发生破坏的数值模拟, 探讨了此类含裂隙岩质边坡发生局部损伤软化、破坏区域的扩展、损伤演化的过程和规律. 根据数值模拟的结果, 对边坡的整治提出了设计依据.

文中对各层岩体采用的是各向同性弹塑性损伤模型, 而边坡岩体由于富含裂隙, 使其力学性质具有强烈的各向异性特性, 因此建立基于塑性的各向异性损伤本构模型进行分析更为必要和急需.

含裂隙岩质边坡在强地震条件下的稳定性分析是一个普遍存在着的问题, 由地震诱发的滑坡也极为常见, 对一些正在兴建的大型水电工程构成严重威胁, 因此必须对其进行动力稳定性分析, 为工程设计提供参考, 保证人员和财产的安全.

参 考 文 献

- 1 李宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 268~272 (Li Ning, Cheng Guodong, Xie Dingyi. Geomechanics development in civil construction in Western China. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(3): 268~272 (in Chinese))
- 2 黄理兴, 陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(11): 1881~1886 (Huang Lixing, Chen Yibai. Rock dynamics in China: past, present and future.

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1881~1886 (in Chinese))
- 3 李海波, 蒋会军, 赵坚等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(11): 1887~1891 (Li Haibo, Jiang Huijun, Zhao Jian, etc. About safety analysis of rock engineering. *Journal of Rock Mechanics and Engineering under Dynamic Load*, 2003, 22(11): 1887~1891 (in Chinese))
- 4 Newmark NM. Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 1965, 15(2): 139~160
- 5 Clough RW, Chopra AK. Earthquake stress analysis in earth dams. *Journal of the Engineering Mechanics*, 1966, 92(EM2): 197~211
- 6 Ito H, Sato K, Sawada Y. Consideration on the seismic motion and the design seismic coefficient of large cut slope under the strong earthquake. In: International Congress on Rock Mechanics. Japan, 1995. 413~416
- 7 何蕴龙, 陆述远. 岩石边坡地震作用近似计算方法. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 66~68 (He Yunlong, Lu Shuyuan. A method for calculating the seismic action rock slope. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(2): 66~68 (in Chinese))
- 8 Dougil JW, et al. Mechanics in Engineering. ASCE, EMD, 1976. 333~355
- 9 Dragon A, Morz Z. A continuum model for plastic-brittle behavior of rock and concrete. *Int J Engineering Sciences*, 1979, 17(2): 121~137
- 10 Krajcinovic D, Fonseka GU. The continuous damage theory of brittle materials. *J Appl Mech*, 1981, 48(4): 809~815
- 11 谢和平著. 岩石、混凝土损伤力学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990
- 12 Zhang Junfeng, Qi Tao. 3D Anisotropic elastoplastic-damage model and its application in simulating the behavior of rock materials. *Key Engineering Materials*, 2006, 324-325: 579~582
- 13 张均锋, 祁涛, 李正国. 岩石材料的三维各向异性损伤破坏模型与数值模拟. 岩土力学, 2006, 27(增): 27~30 (Zhang Junfeng, Qi Tao, Li Zhengguo. A three-dimensional anisotropic damage model of rock materials and its numerical simulating application. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(Supp.): 27~30 (in Chinese))

(责任编辑: 刘俊丽)

第二届全国深空轨道设计竞赛的通知

第二届全国深空轨道设计竞赛由中国力学学会、西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室和中国科学院光电研究院空间工程部共同主办, 拟定于 2010 年 3 月底发布题目, 2010 年 6 月由西安卫星测控中心组织举行竞赛颁奖大会暨专题研讨会. 本次竞赛将设立冠军奖金 5000 元, 亚军奖金 3000 元, 季军奖金 1000 元, 其他提交正确结果的队伍将获得优胜奖. 本次竞赛的相关论文和技术报告将优先发表在《宇航动力学》杂志上.

本次竞赛活动的日程安排: 2010 年 3 月 25 日报名截止, 发布竞赛题目; 2010 年 5 月 15 日各参赛队提交竞赛结果, 组办方检查设计结果; 2010 年 5 月 31 日公布各参赛队的设计结果, 宣布竞赛结果; 2010 年 6 月竞赛颁奖大会暨专题研讨会.

联系人: 高扬, E-mail: gaoy@aoe.ac.cn; 电话: 010-62582810; 手机: 15810131931

祝开建, E-mail: zhukj06@mails.tsinghua.edu.cn; 电话: 029-84762596; 手机: 13991925015

中国力学学会
中国科学院光电研究院空间工程部
西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室