

强震诱发单一弱面斜坡塌滑有限元模拟

王来贵^{1,2}, 赵娜¹, 李天斌²

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 基于汶川大地震形成的崩塌滑坡数量多、分布密度大、影响面积大等特点, 分析复杂结构斜坡地震力作用下的破坏机制, 给出斜坡中某点在微震和强震作用下的应力-应变曲线。指出在地震力作用下斜坡会产生附加应力, 其与原始应力叠加形成总应力, 当总应力超过岩体的抗拉强度时发生拉张破裂, 并给出拉张破裂的判据。用有限元模拟了单一弱面斜坡强震作用下的拉张破裂过程。结果表明: 当第一主(拉)应力大于等于岩石的抗拉强度时, 岩体发生拉张破裂, 不能再承受拉力, 但可承受压力; 如果总应力状态满足塑性屈服准则, 则发生剪切破坏; 在地震动力作用过程中, 拉张破裂区不断累加, 即在松动区的松散程度和松散范围都在增大; 在地震动力作用下, 含有弱面的斜坡很容易沿弱面发生拉张破裂。

关键词: 边坡工程; 强震; 弱面; 塌滑; 有限元模拟

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 3163 - 05

FINITE ELEMENT SIMULATION OF COLLAPSE AND SLIDING OF SLOPE WITH SINGLE WEAK PLANE INDUCED BY STRONG EARTHQUAKE

WANG Laigui^{1,2}, ZHAO Na¹, LI Tianbin²

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Based on the characteristics of collapse and landslide induced by Wenchuan earthquake that the quantity, the distribution density and the influential area, etc. are large, the damage mechanism of the complex structural slope is analyzed under strong earthquake, and the different stress-strain curves of some points in slope are given under microseism and strong earthquake. It is pointed that slope will generate additional stress under the effect of earthquake. The superposition of the additional stress and the original stress forms the total stress. When the total stress is larger than the tensile strength of the rock, tensile fracture occurs. The tensile fracture criterion is given. The finite element method is used to simulate tensile fracture process of slope with single weak plane under strong earthquake. The following conclusions can be drawn. When the first principal(tensile) stress is greater than or equal to tensile strength of rock, it cracks and can not bear tensile stress but compressive stress; if the total stress state meets the plastic yield criterion, shear failure occurs; the tensile fracture region cumulates continuously during earthquake dynamic, that is, the loose degree and the loose range become increase; and the slope containing weak plane can easily crack along the weak plane under earthquake.

Key words: slope engineering; strong earthquake; weak plane; collapse and sliding; finite element simulation

收稿日期: 2009 - 02 - 10; **修回日期:** 2009 - 03 - 10

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(DZJK - 0809); 国家自然科学基金重点项目(50434020); 辽宁省科学技术基金资助项目(20022155)

作者简介: 王来贵(1962 -), 男, 博士, 1981年毕业于辽宁工程技术大学工程力学专业, 现任教授、特约研究员, 主要从事岩石力学系统稳定性理论、环境岩石学方面的教学与研究工作。E-mail: wanglg128@vip.sina.com.

1 引言

地震包括天然地震和人工诱发地震，是一种常见的自然灾害。根据发生原因的不同，天然地震又有构造地震、火山地震和陷落地震等几种类型，其中发生次数最多、破坏力最大的是构造地震，据统计，全球 90% 以上的地震都是构造地震。

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 4 秒，位于中国四川省阿坝藏族羌族自治州的汶川境内发生里氏 8.0 级特大地震，震源深度 14 km(据国家数字地震台网公布)。汶川地区主要处于山区，地貌特征是斜坡特征：山高、坡陡、断层节理多。汶川特大地震具有在山地为主的高震级、断层逆冲错动、主震持续时间长等特点，造成断层地表破裂，滑坡，液化等灾害。其中崩塌滑坡具有以下特点^[1-2]：(1) 崩塌滑坡数量多，分布密度大；(2) 影响面积大，灾害损失严重；(3) 地震诱发崩塌滑坡规模巨大；(4) 崩塌滑坡分布受断层破裂影响明显。

在山高、坡陡、断层节理多的复杂地貌山区，强震诱发斜坡破坏特征是在以拉张断裂的基础上，发生坍塌滑动。

关于强震作用下的斜坡体的破坏机制等，国内一些学者^[3-6]进行了分析，但是从拉破裂的角度分析此问题的尚未见报道。本文在此基础上分析了地震作用下斜坡的破坏机制，并以含有平行夹层的简单斜坡在地震作用下的拉张破裂为例，分析其破坏过程，以期为后续的复杂分析提供依据。

2 地震作用下复杂结构斜坡岩体破坏机制分析

复杂结构斜坡的岩体(包含节理、断层、层理等)具有以下特性^[7-9]：

- (1) 岩石为低抗拉介质；
- (2) 节理、断层、层理的抗拉强度更低；
- (3) 静力处于受压的岩体，动力惯性作用下即有可能受拉，并且动力加速度幅度越大，受拉应力水平越高，范围也越大；
- (4) 岩体如果同时承受拉应力、剪应力，首先发生拉破坏，然后才可能发生剪破坏。

假设斜坡中一点 P 承受压应力 σ_0 作用，见图 1，如果再加载，由岩石的应力 - 应变曲线知，应力水

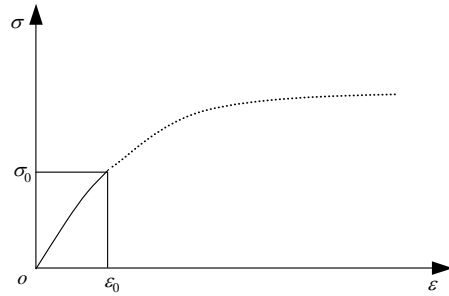
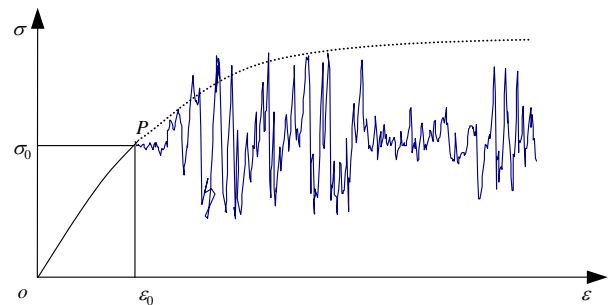


图 1 斜坡中一点应力值
Fig.1 Stress of a point in slope

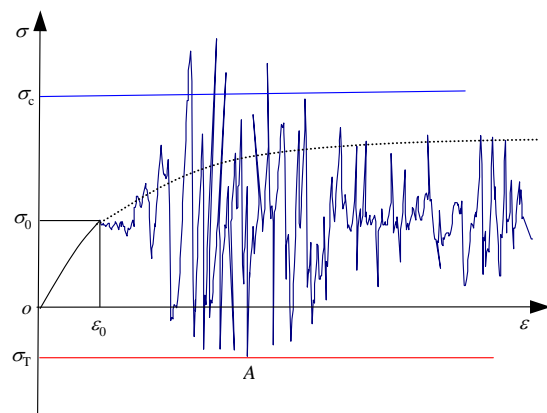
平将沿图中虚线上升。

一般来说， $1 \leq M_s \leq 3$ 的地震称为微震， $6 \leq M_s \leq 7$ 的地震称为强震。

斜坡中的点 P 在地震动动力作用下产生附加应力，其与原始地应力叠加形成总应力，如图 2(a)，(b)所示。显然，如图 2(a)所示，在微震作用下，斜坡中不可能形成拉应力，或者拉应力水平不可能达到抗拉强度 σ_T ，不发生拉张破坏；同时剪应力水平也不可能达到抗剪强度 σ_s ，不发生剪切破坏。如



(a) 点 P 的原始地应力与微震动应力叠加



(b) 点 P 的原始地应力与强震动应力叠加

图 2 斜坡中的点 P 处原始地应力与地震动应力的叠加
Fig.2 Overlap of original geostress with seismic dynamic stress at point P in slope

图 2(b)所示, 在强震作用下, 拉应力水平可能达到抗拉强度 σ_T , 发生拉张破坏; 剪应力水平可能达到抗剪强度 σ_s , 发生剪切破坏。当叠加应力达到抗拉强度 σ_T 时(见图 2(b)中点 A), 点 A 发生拉张破坏之后的应力 - 应变曲线将不再是图 2(b)所示的情况, 斜坡不能再承受拉应力, 但是可以承受压应力, 如果满足塑性屈服准则, 则发生剪切破坏。

3 强震作用下岩体拉张破坏的判据

岩石的抗拉强度比较低, 一般为抗压强度的 1/10, 即

$$\sigma_c = 10\sigma_T \quad (1)$$

岩石拉张破裂的判据^[10~15]如下:

(1) 当某一节点的最大拉应力大于岩石的抗拉强度时, 此节点就破裂, 即

$$\sigma \geq [\sigma] \quad (2)$$

式中: σ 为节点的最大拉应力。在动力作用下, 总应力为静力、动力分别作用下的应力值之和:

$$\sigma = \sigma_j + \sigma_d \quad (3)$$

式中: σ_j , σ_d 分别为静力、动力作用下的应力值。

(2) 当主压应力矢量方向与最大拉应力方向垂直时, 岩石破裂。

(3) 在众多承受拉应力的应力场中, 承受最大主拉应力的点优先破裂。

(4) 当岩石破裂后仍可承受压应力。

4 单一弱面斜坡强震作用下拉张破裂分析

4.1 模型和参数的选取及地震力的施加

斜坡模型坡角为 45°, 坡高为 40 m, 模型总高 60 m, 底边长 190 m。单一弱面斜坡模型如图 3 所示, 图中各种材料参数如表 1 所示。

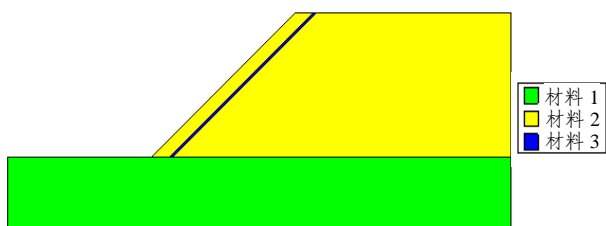


图 3 拉张破裂有限元模型

Fig.3 Finite element model of tensile fracture

表 1 模型材料参数
Table 1 Parameters of model materials

材料编号	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)
1	1 000.0	0.34	2 700
2	100.0	0.30	2 700
3	0.1	0.35	2 700

模型中地震力施加在模型的每一个单元上, 地震加速度时程曲线如图 4 所示。

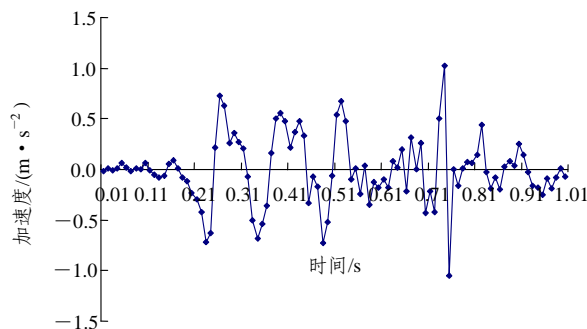
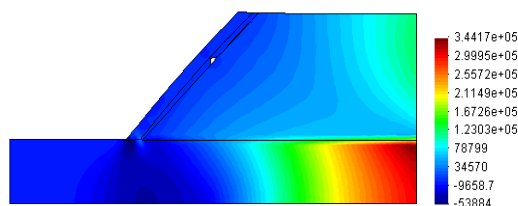


图 4 地震加速度时程曲线

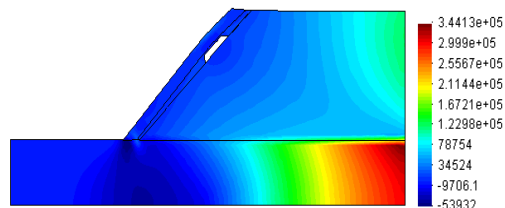
Fig.4 Time-history curve of seismic acceleration

4.2 x 方向地震动力作用下拉张破裂分析

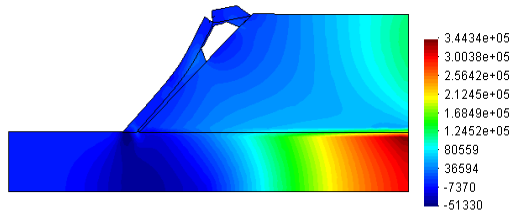
x 方向地震动力作用下边坡发生拉张破裂时第一主(拉)应力演化过程如图 5 所示。由图 5 可以看出, 在 x 方向地震力作用下, 虽然最大拉应力并没有发生在弱面位置, 但是由于弱面的抗拉强度比较低, 首先在弱面上发生拉张破裂, 沿弱面方向撕裂; 随着撕裂区域的扩大, 弱面斜上方岩层形成近似于梁的情况, 在坡面上最大拉应力大于岩石的抗拉强



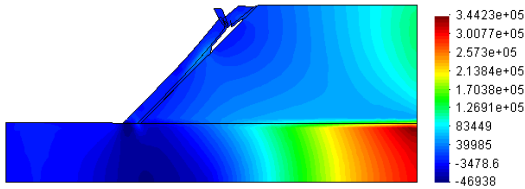
(a) 时步 1



(b) 时步 6



(c) 时步 12



(d) 时步 14

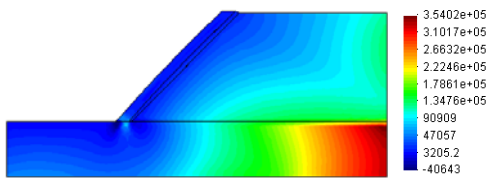
图5 x 方向地震动力作用下第一主(拉)应力演化过程(单位: Pa)

Fig.5 Evolutionary process of the first principal(tensile) stress under seismic dynamic force in x -direction(unit: Pa)

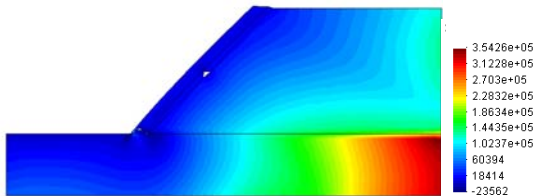
度而发生拉张破裂, 随后与弱面上撕裂的区域贯通, 但是由于网格搭接使得贯通并不明显。在拉张破裂过程中, 应力重新分布, 形成不连续面。

4.3 x, y 方向地震动力同时作用下拉张破裂分析

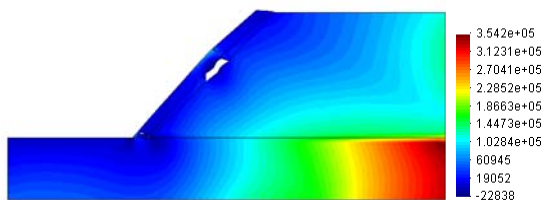
x, y 方向地震动力作用下边坡发生拉张破裂时第一主(拉)应力演化过程如图 6 所示。由图 6 可以看出, 在 x, y 方向地震力同时作用下, 在整个弱面所承受的最大拉应力中, 弱面底部的拉应力最大,



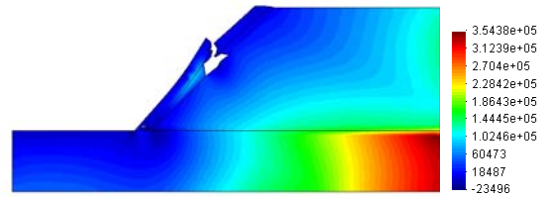
(a) 时步 1



(b) 时步 7



(c) 时步 13



(d) 时步 18

图6 x, y 方向地震动力作用下第一主(拉)应力演化过程(单位: Pa)

Fig.6 Evolutionary process of the first principal(tensile) stress under seismic dynamic forces in x - and y -direction(unit: Pa)

首先开裂, 在开裂过程中应力被释放, 随后在弱面的中间位置首先被撕裂, 坡面开裂, 直到坡面裂纹和弱面撕裂区域贯通, 此时坡面被拉开。

当地震应力加速度达到一定值时, 沿着弱面会发生瞬间多点开裂, 如图 7 所示。

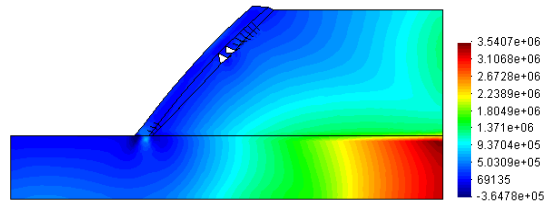


图7 瞬间多点开裂时第一主(拉)应力(单位: Pa)

Fig.7 The first principal(tensile) stress when multiple points cracking instantaneously(unit: Pa)

5 结 论

(1) 岩石的抗拉强度较低, 岩石拉张破裂后形成不连续面。岩体张裂后, 裂纹周围应力分布发生改变和调整。

(2) 地震动力产生附加应力, 并不断调整; 总应力为原岩应力与附加应力之和, 总应力场随着地震的进行发生相应改变。

(3) 如果总应力的第一主(拉)应力大于等于岩石的抗拉强度, 则发生拉裂, 不能再承受拉力, 但可承受压力; 如果总应力状态满足塑性屈服准则, 则发生剪切破坏。

(4) 在地震动力作用下, 含有弱面的斜坡很容易沿弱面发生拉张破裂。

参考文献(References):

[1] 王秀英. 汶川 M_s 8.0 级地震诱发崩塌滑坡特点分析[J]. 国际地震动

- 态, 2008, (11): 47.(WANG Xiuying. Analysis of landslides' characteristics induced by Wenchuan M_s 8.0 earthquake[J]. Recent Developments in World Seismology, 2008, (11): 47.(in Chinese))
- [2] 尹紫红. 地震作用下的滑坡稳定性分析[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2006.(YIN Zihong. Dynamic and stability of landslide under earthquake loading[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.(in Chinese))
- [3] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机制分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730 - 741. (HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, LI Tianbin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 730 - 741.(in Chinese))
- [4] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 131 - 132.(HUANG Runqiu, XU Qiang. Catastrophic landslide in China[M]. Beijing: Science Press, 2008: 131 - 132.(in Chinese))
- [5] 姚文波, 刘文兆, 侯雨坚. 汶川大地震陇东黄土高原崩塌滑坡的调查分析[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5 917 - 5 926.(YAO Wenbo, LIU Wenzhao, HOU Yongjian. Investigation and analysis of collapses and landslides on the Loess Plateau of East Gansu Province after the 5.12 Wenchuan earthquake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5 917 - 5 926.(in Chinese))
- [6] 王家鼎, 张卓元. 地震诱发高速黄土滑坡的机制研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 670 - 674.(WANG Jiading, ZHANG Zhuoyuan. A study on the mechanism of high-speed loess landslide induced by earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 670 - 674.(in Chinese))
- [7] 王来贵, 赵娜, 周永发, 等. 岩石受拉破坏的数值模拟方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2007, 26(2): 198 - 200.(WANG Laigui, ZHAO Na, ZHOU Yongfa, et al. Numerical simulation method of rock bearing tension damage[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2007, 26(2): 198 - 200.(in Chinese))
- [8] 王来贵, 赵娜, 周永发, 等. 雁列式断层拉张破裂有限元数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(2): 204 - 206. (WANG Laigui, ZHAO Na, ZHOU Yongfa, et al. Finite element numerical simulation of tension fracture of en-echelon faults[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2008, 27(2): 204 - 206.(in Chinese))
- [9] 赵娜. 岩体拉张破裂的有限元数值模拟研究[硕士学位论文][D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2008.(ZHAO Na. Study on finite element numerical simulation of rock tension fracture[M. S. Thesis][D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2008.(in Chinese))
- [10] 邱峰, 丁桦. 模拟岩石材料破坏的有限元方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 2 663 - 2 668.(QIU Feng, DING Hua. Finite element method simulating failure of rock material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 2 663 - 2 668.(in Chinese))
- [11] 王来贵, 赵娜, 初影, 等. 不同面积载荷作用下的岩石试件破裂数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(6): 918 - 921.(WANG Laigui, ZHAO Na, CHU Ying, et al. Numerical simulation of rock fracture under action of different area loading[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2007, 23(6): 918 - 921.(in Chinese))
- [12] 郭子红, 刘保县, 徐珂, 等. 单轴压力作用下岩石破坏机制分析与应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(2): 94 - 96.(GUO Zihong, LIU Baoxian, XU Ke, et al. Analysis and application of rock damage mechanism under uniaxial compression[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, 18(2): 94 - 96.(in Chinese))
- [13] 刘刚, 赵坚, 宋宏伟. 节理分布对岩体破坏影响的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 17 - 22.(LIU Gang, ZHAO Jian, SONG Hongwei. Numerical simulation of influence of joint distributions on failures of rock mass[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(1): 17 - 22.(in Chinese))
- [14] WANG L G, ZHAO N, ZHANG L L, et al. Numerical simulation of rock fracture process under tension[C]// International Young Scholar Symposium on Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 2008: 425 - 429.
- [15] ZHAO N, WANG L G, ZHOU Y F. Finite element numerical simulation of coal roof tension damage in the gob[C]// The Third International Symposium on Modern Mining and Safety Technology. [S. l.]: [s. n.], 2008: 588 - 592.