

# 地震动特性对黄土斜坡稳定性的影响分析

郭俊英<sup>1,2</sup>, 石玉成<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**采用弹塑性动力有限元分析方法和 Drucker - Prager 屈服准则, 将基于现行抗震设计规范中的 I、III 类场地标准反应谱曲线拟合而成的地震动时程作为地震输入, 选取黄土地区典型滑坡类型进行分析计算。通过对不同峰值加速度、频谱、持续时间作用下黄土斜坡的变形破坏特征的分析, 展示了土体在地震作用下的动态响应和变化规律, 揭示了地震动的工程特性对黄土斜坡稳定性的影响。

**关键词:**黄土斜坡; 动态分析; 地震动; 稳定性

**中图分类号:** TU435, P642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2004)03-0250-05

## 0 引言

中国黄土分布广泛, 又是地震多发地区, 地震引起的黄土滑坡非常普遍且危害严重。如 1718 年甘肃通渭地震 ( $M_s = 7.5$ ) 产生了大于 500 m 的大滑坡 59 处; 1920 年海原大地震 ( $M_s = 8.5$ ) 时, 形成的黄土滑坡严重而密集的区域达 4 000 km<sup>2</sup> 以上; 1995 年甘肃永登 5.8 级地震也诱发了 150 余处黄土滑坡<sup>[1]</sup>。因此, 对黄土地震滑坡灾害问题进行系统研究, 具有重要的社会效益和经济效益。

斜坡稳定是一个非常复杂的问题, 目前国内外常用的分析方法有: 极限平衡法、离散单元法、塑性极限分析法、有限元法等<sup>[2]</sup>。有限元法的优点是能算出土坡内的应力场和位移场分布。如果进行逐步非线性分析, 还可了解土坡的逐步破坏机理, 跟踪土坡内塑性区的扩展情况。目前有限元分析方法在滑坡稳定性分析中应用较为广泛, 但有关地震动的工程特性对滑坡稳定性的影响问题, 国内研究得不够深入。本文在总结前人的分析方法的基础上, 结合黄土地区的特点, 尝试用动力有限元方法对黄土斜坡地震稳定性作进一步探讨。

## 1 弹塑性动力有限元法

岩土体是典型的弹塑性物质, 其变形与外力的关系为非线性关系。弹塑性动力有限元法考虑了土体的非线性弹塑性本构关系, 能够动态模拟土坡的变形失稳过程。岩土体的变形可分为弹性变形和塑性变形两部分, 该方法把这两部分分开考虑, 认为弹性变形是线性的, 把非线性变形看成是塑性变形。根据弹塑性力学理论, 其整体方程为:

$$[K(u)]\{u\} = \{R\} \quad (1)$$

式中  $[K(u)]$  为总刚矩阵;  $\{u\}$  为位移列阵;  $\{R\}$  为荷载列阵。

应力—应变关系的本构方程为

$$d\{\sigma\} = [D]epd\{\epsilon\} \quad (2)$$

收稿日期: 2004-02-10

基金项目: 地震科学联合基金课题 (103101); 甘肃省自然科学基金 (ZS991-A25-012-Z) 资助项目; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20040049

作者简介: 郭俊英 (1975—), 女 (汉族), 内蒙包头人, 硕士, 主要从事岩土地震工程研究。

式中  $d\{\sigma\}$  为应力增量;  $[D]_{ep}$  为弹塑性矩阵;  $d\{\epsilon\}$  应变增量。

求解以上方程即可得到各单元的应力、应变、位移等。

黄土的弹塑性动本构模型采用双曲线型<sup>[3]</sup>。屈服准则采用岩土工程领域中常用的 Drucker - Prager 准则, 其表达式为

$$F = \sqrt{j_2} - aI_1 - K \tag{3}$$

式中  $F$  为屈服函数;  $a$ 、 $K$  为物性参数, 与内聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的取值有关,  $I_1$  为第一应力张量不变量;  $j_2$  第二应力偏量不变量。

## 2 计算模型

本文以天水锻压机床厂滑坡为计算模型, 滑坡类型属于典型的黄土基岩接触面滑坡<sup>[4]</sup>。计算剖面上岩土材料概化为5类(图1), 这种概化反映了实际地质结构, 又便于计算。

根据所建立的计算模型的特点, 假定模型左右两侧受水平向位移约束; 底边受垂直向位移约束; 坡面为自由边界; 载荷以地震动加速度时程方式输入。从而构成了滑坡的荷载、位移边界条件, 以保持整个受力体系的平衡。

滑坡计算剖面如图1所示。采用等参四边形单元, 二维计算剖面被离散化为856个单元, 934个节点。选取 Drucker - Prager 准则为塑性屈服准则。滑坡体各类材料的计算参数如表1所示。

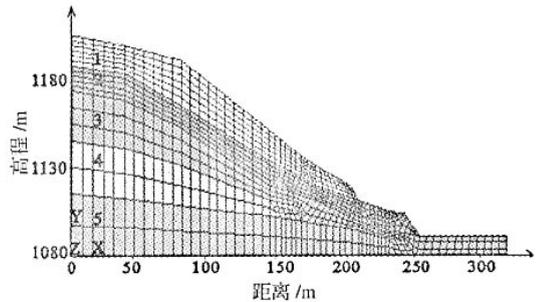


图1 弹塑性有限元计算模型

Fig.1 Elastic-plastic FEM calculating model.

表1 滑坡计算参数(据文宝萍,1997)

材料类型	容重	弹模(变模)		泊松比 $\mu$	内聚力 $C/[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}] \times 10^4$	内摩擦角 $\varphi$
	$\gamma/[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \times 10^3$	$E_1/[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}] \times 10^5$				
Q <sub>3</sub> 黄土	1.6	10		0.30	0.2	30°
Q <sub>2</sub> 黄土	1.88	20		0.32	0.6	31°
N 泥岩	2.15	9		0.42	0.48	14°
N 泥岩	2.0	5 000		0.25	20	34°
P <sub>elm</sub> 变质岩	2.7	9 000		0.16	30	50°

本文根据不同的研究目的, 选用了不同频谱特性的人造地震动时程(图2), 分别根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)<sup>[5]</sup>中的 I、III类场地的标准反应谱拟合而得。地震动时程采用拟合目标谱法, 即以设计谱为目标, 采用三角级数法, 多次迭代拟合, 完成满足给定精度要求的人造时程。其基本思路是用一组三角级数之和构造一个近似的平稳高斯过程, 然后乘以强度包络线, 以得到非平稳的地面运动加速度时程<sup>[6]</sup>。

在模拟计算过程中, 地震动的输入采用以不同峰值、不同频谱、不同持时相结合进行对比试算, 以比较不同地震动工程特性对坡体稳定性的影响程度。其中峰值分别采用  $PGA = 0.1 \text{ g}, 0.2 \text{ g}, 0.3 \text{ g}$ ; 有效持时分别采用 15 s 和 30 s。

## 3 计算结果分析

弹塑性有限元计算结果, 清楚地显示了滑坡体内各向应力的分布规律、滑坡位移趋势及剪切破坏区的展布特征, 从更深层次上揭示了地震作用下滑坡变形破坏的状态和本质。

### 3.1 位移分析

由位移矢量分析可见, 当水平位移大于垂直位移时, 滑坡变形以滑动为主; 反之则出现鼓胀错动变形

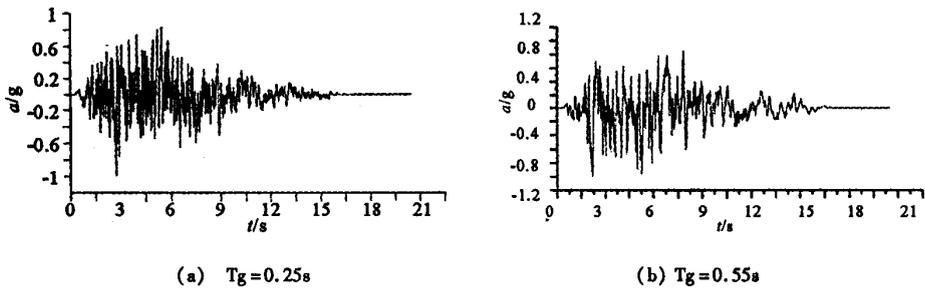


图2 输入地震动加速度时程  
Fig.2 Input ground motion time history.

现象(图3)。图4的水平位移历时曲线显示地震动对坡体位移影响最大的时段一般集中在4~8s左右,以后均有所起伏,但幅度不大。

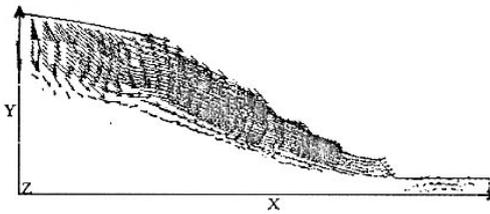


图3 位移矢量图  
Fig.3 Displacement vector illustration.

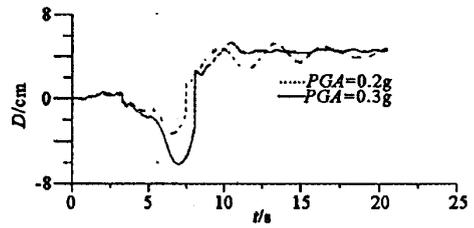


图4 水平位移历时曲线图  
Fig.4 Time history of horizontal displacement.

### 3.2 应力场分析

主应力矢量图(图5)的分布符合一般斜坡应力场的变化规律。自坡内向坡面,最大主应力 $\sigma_1$ 方向由垂直逐渐转至与坡面近于平行;随深度增加, $\sigma_1$ 的压应力值逐渐增加;在坡体下部中前段,围绕第三纪泥岩与黄土接触带形成 $\sigma_1$ 集中带,但此带未与坡脚贯通。

### 3.3 塑性破坏特征分析

由图6(a、b、c)塑性区扩展图显示,在相同持时和频谱下,随着峰值加速度的增大塑性区也在逐渐扩展。

通过图7(a)显示的塑性破坏历时曲线可以看出,随着峰值的增加发生塑性破坏的时间提前,塑性变形值也随之增大,说明峰值愈大,坡体愈不稳定。图7(b)显示,在相同峰值和持时,不同频谱地震动作用下,随长周期分量的增加塑性变形幅值有所增加,说明随着频谱长周期成分的增强坡体稳定性反而降低,甚至破坏。图7(c)显示,在相同频谱和峰值的情况,持时愈长塑性破坏幅值愈大,坡体愈不稳定。

由塑性应变历时曲线显示,持时为15s时,坡体对地震反应最为强烈的时段为4~8s左右;持时为30s时,在12~14s和20~24s左右两个时段坡体对地震反应最为强烈。

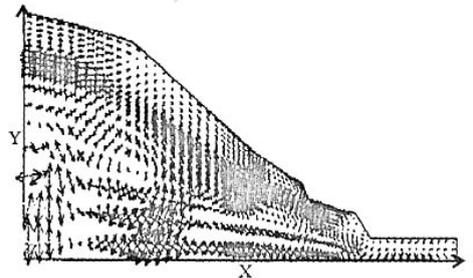


图5 主应力矢量图  
Fig.5 Principle stress vector illustration.

## 4 结论

本文通过对不同峰值加速度、频谱、持时作用下,黄土斜坡的位移场、应力场及塑性区的扩展特征的分析,初步揭示了地震动的工程特性对黄土斜坡稳定性的影响。分析表明:地震动强度越大,反应谱特征周

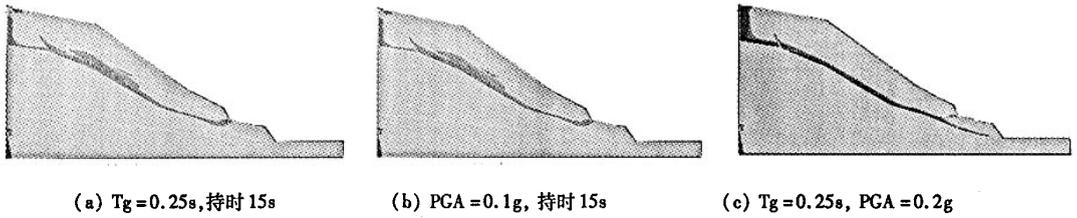


图6 塑性变形等值线图  $T_g=0.25\text{ s}$ , 持时  $15\text{ s}$ ,  $PGA=0.1\text{ g}$   
 Fig. 6 Contour line of slope plastic displacement under different ground motion.

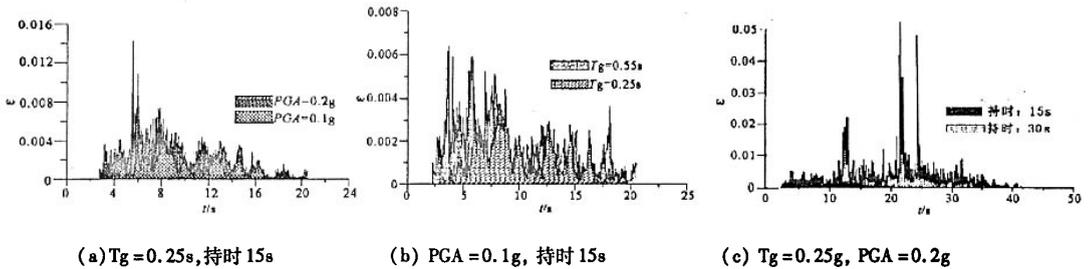


图7 不同地震动作用下斜坡塑性变形历时曲线  
 Fig. 7 Time history of slope plastic displacement under different ground motion.

期越长,持时越长,黄土斜坡的稳定性随之降低。

本文首次尝试在黄土地震滑坡稳定性分析中注重考虑地震作用的特点,取得了一些有价值的认识,但由于本文仅考虑了一种斜坡类型,故无法更为详细地分析总结地震动特性对黄土斜坡稳定性的影响规律。今后的工作还应继续深入分析不同地震作用下不同类型斜坡的稳定性问题,同时也要注意考虑黄土的物性参数的影响。

[参考文献]

[1] 郎煜华,中村浩之[日],曾思伟,等.兰州市永登5.8级地震滑坡及其特征[J].甘肃科学学报,1996,8(增刊),67-72.  
 [2] 崔政权,李宁.边坡工程—理论与实践最新发展[M].北京:中国水利水电出版社,1999.  
 [3] 王兰民,张振中,王峻,等.随机地震荷载作用下黄土动本构关系的试验研究[J].西北地震学报,1992,14(4):61-68.  
 [4] 文宝萍,李媛,王兴林,等.黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究[M].北京:地质出版社,1997.  
 [5] 中华人民共和国国家标准.建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.  
 [6] 蒋涛,梁小华,雷军.工程地震动时程合成与模拟[M].北京:地震出版社,1992.

## ANALYSIS ON INFLUENCE OF EARTHQUAKE MOTION TO LOESS SLOPE INSTABILITY

GUO Jun-ying<sup>1,2</sup>, SHI Yu-cheng<sup>1,2</sup>

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, 730000, China)

**Abstract:** Using the theory of elastic - plastic dynamic FEM and the Drucker - Prager yielding criterion, taking the time history of earthquake motion which fitted by the graphs of standard response spectrum on I & III types of site in the standard of Aseismic Design, as the earthquake input, to a typical loess landslide, in this paper the dynamic analysis and calculate on influence of earthquake motion to loess slope instability are made. The strain characteristics of loess slope in earthquake motion progress in different PGA, T<sub>g</sub> and last times are analyzed. The result shows how the earthquake engineering characters influence on the stability of loess slope and displays the dynamic response of soil and change regularity of stress.

**Key words:** Loess slope; Dynamic analysis; Earthquake motion; Stability

---

(上接第233页)

## PROBABILITY MODEL OF STRONG EARTHQUAKE RECURRENCE AND PREDICTION FOR FUTURE EARTHQUAKE SITE IN MIDDLE - EASTERN SEGMENT OF QILIAN MT.

ZHENG Wen-jun<sup>1,2</sup>, YUAN Dao-yang<sup>1,2</sup>, HE Wen-gui<sup>1,2</sup>

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In this paper, starting with palaeoearthquakes and historic and recent earthquakes recurrence intervals for main active fault zones in middle - eastern segment of Qilian Mt. since Holocene, by calculating the ratios of recurrence interval of strong earthquake to that of average ( $T/T_a$ ), the strong earthquake recurrence probability model is established, and the model has applied to predict possibility and sites of strong earthquake. It reveals that, in this region the possible site where strong earthquake maybe occurs in future is on Maomaoshan - Jinqiang segment of Laohushan - Maomaoshan Fault.

**Key words:** Qilian Mt. ; Strong earthquake; Recurrence probability; Earthquake site;  $T/T_a$  value