

地震诱发黄土滑坡的滑距估测

卢育霞^{1,2}, 石玉成^{1,2}, 陈永明^{1,2}, 刘红玫^{1,2}

(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:认为用坡体波动振荡效应来解释地震滑坡的形成是合理的,地震动使坡体波动振荡产生的启程剧发速度会直接影响到滑后行程速度和整个滑动土体的滑移距离。最大滑距可分为地震时坡体波动振荡产生的位移和地震波动停止后滑坡的滑移距离两部分,先采用 Newmark 有限滑动位移分析模型计算前者的永久地震位移,再进一步计算后者。经海原地震滑坡实例计算,文中地震滑坡滑距计算公式实用有效。

关键词:地震滑坡; 滑距; Newmark 分析模型; 黄土地区

中图分类号: P315.9; P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2006)03-0248-04

Slippage Estimation of the Loess Landslide Triggered by Earthquake

LU Yu-xia^{1,2}, SHI Yu-cheng^{1,2}, CHENG Yong-ming^{1,2}, LIU Hong-mei^{1,2}

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

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

Abstract: It is a reasonable explanation that the slope mass vibrating process makes the slope deformed and failed during earthquake, and initial violent-slide velocity of the slope mass will affect the sliding velocity and all the slippage later. The maximum slippage could be divided into two parts for calculation, which are the slope displacement during earthquake vibration and the sliding distance after earthquake. The former will be computed by Newmark analytical method, and the later will be done further when permanent displacement has occurred. A landslide formed in Haiyuan earthquake in 1920 is taken as an example. The calculating result proves that the formulae are practical and effective.

Key words: Earthquake landslide; Slippage; Newmark analytical method; Loess area

0 引言

近几十年来,国内外许多专家为预测滑坡滑距作了大量的研究与实践工作,提出了多种预测方法^[1],这些方法基本上可概括为三类:(1)确定性物理模型,如 Heim (1932) 雪橇模型, Scheidegger (1973) 摩擦模型,以及 Voellmy (1955)、Okuda (1973)、Sassa (1988)、王家鼎 (1999) 等改进 Scheidegger 的摩擦模型;(2)统计模型,如日本的森胁宽 (1981)、Scheidegger (1993) 以及国内的一些经验公式;(3)信息模型,如刘悦等 (2001)^[2] 根据模糊信息

有关理论提出一种黄土滑坡滑距预测的模糊信息优化处理模型。确定性预测方法是基于质点运动学、滑坡运动机理研究与质量运动学相结合的各种物理模型,多适用于滑坡单体预测;统计模型和信息模型预测不侧重于滑坡机理的严格数学表达,重点在于对现有滑坡与其地质环境因素和外界作用因素关系的宏观调查与统计,获得统计规律和信息量。由于其着眼的相对范围较单体滑坡大得多,故而被广泛应用于城市或重要国土开发区的滑坡空间预测^[3]。

收稿日期:2006-03-20

基金项目:地震科学联合基金 (103101);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20060036

作者简介:卢育霞 (1978-),女 (汉族),甘肃玉门人,硕士,现主要从事岩土工程与工程地震研究工作。

我国黄土地区的几次大震,如1920年海原8.5级地震、1718年通渭7.5级地震、1654年天水8.0级地震等,不仅让人类遭受了巨大的生命财产的损失,而且在黄土区留下了广泛的滑坡地貌和灾害隐患。黄土地区地震诱发的滑坡一般都造成大型土体滑移,滑坡体本身的长度宽度跨度较大。这样的大型土体在地震动作用下产生滑动是一个非常复杂的动力过程,同时区域地形、地下水、土体含水量及土颗粒胶结性质针对单个滑坡起到不同的作用,许多学者从不同的角度运用不同的计算方法,对地震滑坡进行了研究^[4-7]。从滑坡运动机理的角度看,本文认为采用确定性物理模型来计算地震引起的惯性力作用下边坡滑移的距离更具有理论意义。

就地震诱发滑坡滑动机理的研究而言,胡广韬从动力学的角度提出了高速滑坡启程剧动机理^[4],其三个加速效应分别是临床弹性冲动加速度效应、临床峰残强降加速度效应和坡体波动振荡加速效应。其中坡体波动振荡加速效应是来自斜坡外部,通过斜坡坡体内部而起作用,当天然斜坡处于或接近临界极限平衡状态时,本地或外地发生地震,其波动振荡通过斜坡形成滑坡体的波动振荡,产生惯性力,可视为外加荷载。它会激发滑坡体骤然而迅猛的下滑,出现启程剧动,其加速度视地震强度和烈度而定。毛彦龙等从理论上对地震滑坡的形成机理——坡体波动振荡的累进破坏效应、启动效应及启程加速效应进行了详细的分析和探讨,并且从理论上提出坡体波动振荡所产生的启程剧发速度的计算公式^[5]。王家鼎等针对黄土地区几次大震诱发的高速黄土滑坡所出现的种种现象与特征提出了一种地震诱发高速黄土滑坡的机理——黄土体解体、斜抛和粉尘化效应,导出了黄土滑体斜抛运动的全过程及滑速、滑距公式^[6]。此滑距计算公式在动力变形分析中虽然考虑了孔隙气压和孔隙水压,但在实际应用时具有很大的不确定性,并且所需的参数众多,过程繁琐。

我们认为用坡体波动振荡加速效应来解释地震滑坡的形成是合理的,并且地震动使坡体波动振荡产生的启程剧发速度会直接影响到滑后行程速度和整个滑动土体的滑移距离。根据地震时滑坡坡体波动振荡的破坏效应、启动效应及启程加速效应整个过程,本文引入 Newmark 有限滑动位移分析模型^[7],推导地震引起的惯性力作用下的滑坡滑距计算公式。

1 地震滑坡的滑距计算模型

1965年 Newmark 提出了地震滑动位移分析^[8],将滑体作为一个刚塑性体,同时为简单起见还假设:①土体的静抗剪力与动抗剪力被认为是一样的,即不考虑岩土参数在地震动作用下的变化;②忽略动孔隙水压力;③临界加速度值不随变形而变,即在整个动力分析过程中临界加速度是一定值;④向上的抗剪力被认为是无限大,即不允许滑体沿滑床向上运动。

地震诱发的滑坡在滑动之前受各种自然力的作用,本身可能是非常稳定的,也可能正处在临界稳定状态。当不同类型的地震波以各自的传播方式作用到斜坡岩土体上,持续不断的波动振荡会使斜坡结构破坏,土体强度降低;当地震力作用达到某一临界值,斜坡失稳产生滑坡。

对于潜在地震滑坡,通过静力平衡分析法来确定它的地震临界加速度。将不同强度的地震动加速度应用于稳定性分析,在反复试算中得到安全系数 $F_s=1$ 时的地震动加速度,即临界地震加速度。如当坡角 β 的斜坡体受到持续地震动 $a_{(t)}$ 作用,某一瞬间滑坡体在滑动面上处于极限平衡的状态,可求得滑坡体要滑而尚未滑动所需的地震临界加速度 a_0 。而临界地震加速度的大小主要取决于斜坡岩土体的粘聚力,内摩擦角及斜坡倾角等因素。

根据坡体波动振荡加速效应的原理,我们将地震动诱发滑坡的最大滑距计算分为两个部分,即地震时坡体波动振荡产生的位移和地震波动停止后滑坡的滑移距离。前一部分采用 Newmark 有限滑动位移分析模型计算永久地震位移;确定斜坡土体产生永久地震位移后,再进一步计算地震停止后滑坡的滑移距离。

1.1 地震时坡体波动振荡产生的位移 S_1

地震纵波和横波的传播方向并不一定和斜坡的倾向或滑坡的滑动方向相一致,但从最不利情况来看,可只考虑顺滑坡滑动方向的一个水平地震力,计算时其将分解为平行滑动面的分力和垂直滑动面的分力,前者增大下滑力,后者减小正压力和阻滑力。

由于地震加速度为随机振动,为了计算更方便,我们按等效加速度法将地震加速度的随机波调整为规则的正弦波,并采用 Kohji 通过大量的土动力学实验引入震级进行修正的公式^[6]:

$$a_{(t)} = 0.1(M-1)a_{\max} \sin \frac{2\pi}{T}t \quad (1)$$

式中 $a_{\max}$ 为地震加速度峰值; T 为运动周期; M 为震

级; t 为任一时刻。

如图1所示,当地震动加速度 $a_{(t)}$ 的峰值加速度超过了临界加速度 a_0 时,滑体便产生永久位移。拟静力法得到临界加速度 a_0 后,即可计算规则的正弦波作用下半个周期内滑坡块体速度为

$$V = \int_{t_0}^{t_1} (a_{(t)} - a_0) dt \quad (2)$$

计算式(1)、(2)得

$$V = \frac{a_0 T}{2\pi} \left[2\sqrt{\frac{[0.1(M-1)a_{\max}]^2}{a_0^2} - 1} - (\pi - 2\arcsin \frac{a_0}{0.1(M-1)a_{\max}}) \right] \quad (3)$$

若大于临界加速度的地震持时为 t_d 时,地震作用下坡体波动振荡产生的位移为

$$S_1 = \frac{2t_d}{T} \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} (a_{(t)} - a_0) dt dt \quad (4)$$

$$S_1 = \frac{T \cdot t_d \cdot a_0}{2\pi^2} (\pi - 2\arcsin \frac{a_0}{0.1(M-1)a_{\max}}) \left[2\sqrt{\frac{[0.1(M-1)a_{\max}]^2}{a_0^2} - 1} - (\pi - 2\arcsin \frac{a_0}{0.1(M-1)a_{\max}}) \right] \quad (5)$$

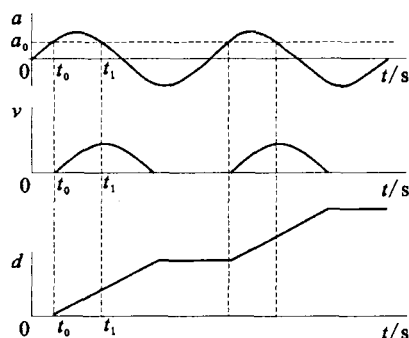


图1 Newmark 分析法示意图

Fig. 1 Sketch of Newmark analytical method.

1.2 地震停止后滑坡的滑移距离 S_2

地震停止后滑坡岩土体一般不会马上停滞。由于地震动作用引起滑面上抗滑力减少,一旦滑体沿滑面向坡下产生移动,可知滑面上岩土体的动摩擦系数远小于其静摩擦系数。地震停止后,由于岩土体已具有一定的启程剧发速度,同时受低摩擦阻的作用,在地形条件允许的情况下就可能滑得很远。

若滑坡在地震作用下的平均速度为 $\bar{V}$,有

$$\bar{V} = \frac{S_{t_1-t_0}}{t_1 - t_0} \quad (6)$$

地震波动震荡停止时滑坡剧发速度为 V_1 ,根据能量守恒与转换定理得

$$\frac{1}{2} m V_1^2 = t_d \cdot \frac{1}{2} m \bar{V}^2 \quad (7)$$

$$V_1 = \frac{a_0 T \sqrt{t_d}}{2\pi} \left[2\sqrt{\frac{[0.1(M-1)a_{\max}]^2}{a_0^2} - 1} - (\pi - 2\arcsin \frac{a_0}{0.1(M-1)a_{\max}}) \right] \quad (8)$$

地震波动停止时,滑坡体以速度 V_1 运动到 h_2 处(状态 P),然后滑坡在摩擦力的作用下开始减速运动至停滞(状态 Q),计算地震作用消失后滑坡土体继续滑移距离 S_2 ,先要计算摩擦力所做的功 A ,根据功能原理:

$$A = E(Q) - E(P) \quad (9)$$

已知 $V_2 = 0$,则

$$-mgS_2 \tan \varphi \cdot \cos \beta = -(\frac{1}{2} m V_1^2 + mgh_2) \quad (10)$$

$$S_2 = \frac{\frac{1}{2} V_1^2 + gh_2}{g \tan \varphi \cdot \cos \beta} \quad (11)$$

得到计算地震诱发滑坡滑距公式为 $S = S_1 + S_2$ 。

2 地震诱发黄土滑坡的实例验证

1920 年海原 8.5 级大地震致使宁夏南部山区地面遭到严重破坏,大量黄土滑坡灾害地貌成为分布最广的灾害形式^[10],主要分布在西吉—静宁县(Ⅸ~Ⅹ度烈度区)、南华山西麓与李俊堡(发震断裂带附近,Ⅺ~Ⅻ度烈度区)和固原三营一带 3 个不同地区。其中在西吉县一带滑坡成群发育并密集展布,以中—浅层黄土层间或黄土—红层顺层滑坡灾害类型为主,滑动面均未深切下伏第三系红色粘土岩层,大多坡角相对较平缓。

我们的研究区选择在滑坡较严重的西吉县滥泥河沿岸,苏堡乡以东 2 km 的红土川。该滑坡体大致形状还保存完好,在滑坡中上部的很多落水洞和冲沟中,深 1~3 m 范围就可见红色泥岩。经过详细测量和计算分析我们得到该滑坡体体积为 $2.14912 \times 10^7 \text{ m}^3$,最宽处达 330 m。图 2 为该滑坡体滑动前后的地表形态。

根据调查,红土川滑坡为黄土—红层顺层滑坡,滑动面即为下覆红层接触面,倾角 β 为 18.5° ,因此可近似为单一滑动面的情况进行计算;在 1920 年海原 8.5 级大地震中红土川滑坡(N 35.87° , E 105.5°)处于 X 度区,对应的地震峰值加速度约为 $0.8 \sim 1.0 \text{ g}$;滑坡距震中距离约为 107.3 km。根据 McGuire 的持时公式^[10]

$$\ln T_d = 0.19 + 0.15M + 0.35 \ln R + 0.73S + 0.23H \quad (12)$$

式中 M 和 R 分别为震级和震中距; S 为场地因子, 基岩 $S=2$, 中等土 $S=1$, 冲积土 $S=0$; H 为分量因子, 竖向 $H=0$, 水平向 $H=1$ 。可得海原大震时该处地震持时约为 58 s; 计算中可假设滑坡处大于临界加速度的持时为 $\frac{1}{3}t_d$ [5]; 海原大震时滑坡处的优

势周期 $T=0.5$ s; 岩土体的计算参数采用西吉地区黄土土力学参数^[11]: 静强度 $C=44.1$ kPa; $\varphi=17.2^\circ$; 动强度 $C=59.88$ kPa; $\varphi=13.4^\circ$; $\gamma=1.423$ kg/m³。

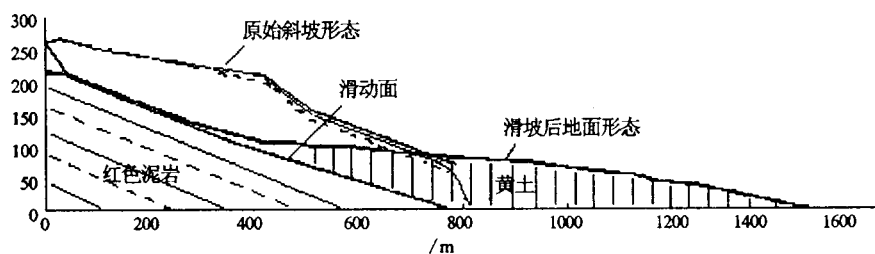


图2 红土川滑坡原始斜坡形态及滑后形态

Fig. 2 The pre-failure and the post-failure topographies of the Hongtuchuan landslide

应用这些参数,采取上述方法计算红土川滑坡在地震中的滑距,得到最终结果见表1。首先,可见处于海原大震Ⅰ度区的红土川滑坡重心滑距计算值约为 576 m,与实测值重心 560 m 比较接近,在 0.03% 误差范围内符合较好,说明本文计算模型是有效的;其次,在 0.8~1.0 g 不同强度的地震动作用下,地震动强度越大,坡体启程剧发速度和波动振荡造成的位移越大,但当地震动停止作用后,在较大地震动加速度作用下的斜坡土体的滑移距离却反而小了,这是由于大的地震作用力使斜坡土体的下滑位移增大的同时整个土体势能降低了。地震作用消失后,坡体虽然具有较大的剧发速度,但是否能滑得更远与土体相对垂直高度是密切相关的。

表1 红土川滑坡滑距的计算值与实测值比较

$a_{\max}/g$	V_1 /m·s ⁻¹	S_1/m	S_2/m	S/m	实测滑坡体 重心滑距/m
0.8	3.374	13.704	562.969	576.673	
0.9	3.886	15.927	560.685	576.612	560
1.0	4.398	18.159	558.510	576.668	

3 结语

在地震频发的黄土丘陵区,深入研究地震诱发的滑坡,对确保黄土地区道路、桥梁、电站、大坝等公共生命线工程及人民群众生命财产免遭地震与滑坡的双重袭击,具有重大的意义。就是说,如果能够预测场地是否有地震滑坡的危险,并且对潜藏滑坡危险的场地能够预测出可能的滑动范围,那么应该可以减少这种灾害带来的损失。本文地震引起的惯性力作用下黄土边坡滑移距离的计算公式,经过分析

验证,简便且实用有效。黄土场地工程建设中若需考虑潜在地震对斜坡的影响,在查明场地岩层与斜坡最危险滑裂面的情况下,通过现场测试得到场地岩土体的 C 、 φ 、 r 等计算参数,应用上述方法估测滑坡土体的活动强度,可以确定避让距离,以保证建设场地安全。

〔参考文献〕

- [1] 王恭先,徐峻岭,刘光代,等. 滑坡学与防治技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- [2] 刘悦. 一种黄土滑坡滑距预测模型[J]. 灾害学,2001,16(3): 6-11.
- [3] 殷坤龙,晏同珍. 滑坡预测及相关模型[J]. 岩石力学与工程学报,1996,15(1): 1-8.
- [4] 胡广韬. 动力滑坡学[M]. 西安:陕西科技出版社,1988.
- [5] 毛彦龙,胡广韬,赵法锁,等. 地震动触发滑坡体滑动的机理[J]. 西安工程学院学报,1998,20(4): 45-52.
- [6] 王家鼎,张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(6): 670-674.
- [7] Newmark N M. Effects of earthquakes on dams embankments[J]. Geotechnique, 1965,15(12): 139-160.
- [8] 李忠生. 地震危险区黄土滑坡稳定性研究[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [9] 单鹏飞. 宁夏西吉地区滑坡灾害地貌的成因分析[J]. 地理学报,1996,51(6): 535-542.
- [10] 蒋涛,梁小华,雷军,等. 工程地震动时程合成与模拟[M]. 北京:地震出版社,1991.
- [11] 王兰民,等. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社,2003.
- [12] 国家地震局兰州地震研究所,宁夏地震队. 1920年海原大地震[M]. 北京:地震出版社,1980.