

地震诱发高速黄土滑坡的机理研究*

A study on the mechanism of high-speed loess landslide induced by earthquake

王家鼎

张倬元

(长春科技大学环境与建设学院, 长春, 130026; 西北大学城市与资源学系, 西安, 710069) (成都理工学院工程地质所, 成都, 610059)

文 摘 针对 1920 年海原大地震 ($M_s = 8.5$), 1718 年通渭大地震 ($M_s = 7.5$) 和 1654 年天水大地震 ($M_s = 8.0$) 等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。通过动力变形分析导出了黄土滑坡斜抛运动的全过程及滑速、滑距公式。以海原大地震时, 西吉县 (10° 区) 回回川高速黄土滑坡为例, 对这些公式进行验证, 结果与实际情况相符。

关键词 黄土滑坡, 地震, 解体, 粉尘化

中图法分类号 P 642.22

作者简介 王家鼎, 男, 1962 年生, 地质工程专业博士后, 教授。从事工程地震, 工程地质及岩土工程方面的教学与科研工作。

Wang Jiading

(Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130026; Northwest University, Xi'an, 710069)

Zhang Zhuoyuan

(Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059)

Abstract In this paper, due considerations have been paid to the characteristic features and phenomena of the tremendous loess landslides induced by the 1920 Haiyuan earthquake ($M_s = 8.5$), the 1718 Tongwei earthquake ($M_s = 7.5$) and the 1654 Tianshui earthquake ($M_s = 8.0$). All of them occurred in the loess Plateau of Northwest China. Based on these features and phenomena such as large extents, high sliding speeds and long travelling distances, an inducing mechanism, e. g. the loess mass disintegration-oblique projection-collision between loess blocks and pulverization under the joint action of vertical and horizontal seismic acceleration is presented. Through dynamic deformation analysis, the whole process of loess mass oblique-projection movement and the formulae of sliding speed and travelling distance of earthquake induced loess landslide are deducted. Earthquake triggered Huihuichuan loess landslide, Xiji county, Ningxia autonomous region of huiminority, is cited as an example to verify these formulae. The computed results quite agree with the evidences in the field.

Key words loess landslide, earthquake, disintegration, pulverization

1 引 言*

在我国黄土高原上, 地震诱发的高速黄土滑坡分布广、强度大、损失惨重。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^[1]。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 km² 以上^[2]。1995 年甘肃永登 5.8 级地震也诱发了 150 余处黄土滑坡。这些灾害给人民生命财产造成巨大的损失。

从实际考察和文献中发现, 这类滑坡有以下特点:

a) 规模大、滑速高和滑距远, 滑体呈波浪状分布, 并形成堰塞湖。如海原地震时李俊堡蒿内大滑坡长 1200 m, 宽 400~800 m, 滑距达 1 000 m 左右, 由滑坡后缘至前缘, 形成 9 个明显的黄土波浪体, 并堵塞河道, 形成堰塞湖^[3]。

b) 滑坡面倾角低缓、不光滑、含水量很低。如海原地震时, 西吉回回川滑坡面平均倾角 7.5° , 不光滑, 含水量 15%。

c) 滑体宛如急泄的“黄土流”或“黄土瀑布”。这种描述见于多种文献中。如《中国民报》描述“此次劫灾, ……弥天劫尘, 不成空气 ……”, 早期调查者写道:“……黄土滑坡旋涡像瀑布似的, 吞下了房子和骆驼队 ……”。

对于这类特殊的滑坡, 人们不禁要问, 为什么如此低缓的倾角和小的含水量却会造成如此高速远程的滑坡呢? 对于这个问题, U. Close, E. Elise^[4]、谢家荣、孙崇绍、冯学才^[5]等仅作了描述, 张振中^[6]认为是黄土在地震作用下发生振陷造成的, 邹瑾敞等^[7]从地质构造方面做了简单的分析, Schreve^[8]提出过气垫效应, Catembert 提出汽化空隙气压力效应以及 Sassa^[9]用试验证明日本细粒砂土的内摩擦角随剪切速度增加而减小。这些观点都不是对地震诱发高速黄土滑坡机理的完满解答, 为此, 本文拟提出滑坡土体的解体、斜抛和粉尘化形成机理, 并推导滑速、滑距公式。

* 国家自然科学基金重点项目资助 (No. 49232050)

陕西省自然科学基金项目资助 (97D07)

到稿日期: 1998-12-09

2 黄土滑坡的土体解体 斜抛和粉尘化效应

2.1 地震力使物体抛掷现象

地震力往往分为水平向和垂直向,但目前工程界往往不考虑垂直向地震力的影响,这实质上是一种过分的简化。地震过程中,地面的宏观抛掷现象颇多。1949年12月26日日本今市市的两个6级地震时,在极震区中心的一个村庄,直径约50 cm的石臼据说被抛起20 cm,连续几次。美国1971年圣费尔南多地震时,一名值班的消防员从床上被抛起落到地板上,而床又落在他身上。我国唐山地震时,吉祥路的一个人如乒乓球一样反复抛离地面0.1 m。海原大地震时,麦场上的石碾子自地面跳起一人多高,象皮球一样上下蹦跳。宏观抛掷现象说明地震的垂直力不容忽视。水平地震力与垂直地震力的叠加,形成一种复杂的地震力,这种地震力往往使地面或建(构)筑物作水平、垂直运动,有时还有扭转,如唐山地震时丰润县方形砖烟囱扭转。据少数目击者描述,地震时烟囱的振动并非如钟摆那样单纯在一个平面内摆动,而是作蛇形多弯曲的空间兜圈子的复杂运动,有时还可见顶部跃起,张口或撞击现象^[10]。

2.2 黄土体的解体

张振中^[6]对西吉回回川地震作用下黄土斜坡稳定性采用拟静力法进行计算,其中的 c 、 φ 值是由随机地震荷载的动力学实验获得的。计算结果表明:当地震系数为0.3(8°强)时,斜坡的稳定性系数等于1,即开始失稳。而1920年海原地震时回回川的地震烈度为10度,地震系数约为0.8。这说明,如此强烈的地震完全可以使黄土斜坡失稳、解体、脱离母体。

地震力作用在每个土颗粒上,由于土颗粒的质量不同,各处土粒的排列状况不同,或者各点使用的起始应力和传递到的动荷强度不同,就会使各个土粒上的作用力在大小、方向和所产生的实际影响上都存在明显的差异,从而在土粒的接触点引起新的应力。这种应力超过一定的数值时,就会破坏土颗粒之间原来的联结强度与结构状态,使它们彼此之间成为独立的散体。原土体结构解体,总体积增大,这与前人的“动力加速度过大时,土会发生松胀现象”的观点一致。我们曾在西吉回回川滑坡旁边的未滑动斜坡上取多组原状样,同时又在回回川滑坡抛出的滑体(降落黄土)表面取了多组原状样品,在室内试验计算出它们的孔隙比列于表1。

由表1可看出:解体黄土的孔隙比是原黄土孔隙比的1.2~1.3倍。可见土体积产生了显著的膨胀。

2.3 黄土体的斜抛运动

N. M. Newmark^[11]提出的地震滑动位移分析受到普遍重视。后来 Makdis, Seed, Ambraseys, Lee, Y. J. Wiuiam

和 S. K. Samar 等也提出了一些估算法。本文根据实际地震滑坡的迹象和特征来推导滑体的斜抛运动方程。

表1 未滑动黄土与解体黄土的孔隙比

样品号	未滑动黄土 孔隙比(e_0)	解体黄土(粉尘) 孔隙比(e)
HW1, HB1	1.02	1.25
HW2, HB2	0.98	1.24
HW3, HB3	1.05	1.30
HW4, HB4	1.03	1.31
HW5, HB5	0.97	1.20

如图1所示。若某个时刻,地震加速度(水平向与垂直向的合成)以 θ 方向施加于已经被剪断而失稳的滑体质点A上,则它能否被抛起, θ 方向地震力是否大于重力在 θ 方向的分量,取决于下式

$$\ddot{u}_\theta(t) \geq g \sin \theta \quad (1)$$

其中, $\ddot{u}_\theta(t)$ 为 θ 方向的地震加速度,可表示如下:

$$\ddot{u}_\theta(t) = \sqrt{\ddot{u}_h^2(t) + \ddot{u}_v^2(t)} \quad (2)$$

式中 $\ddot{u}_h(t)$ 和 $\ddot{u}_v(t)$ 分别为水平加速度和垂直加速度,地震工程界根据大量的强震记录统计分析,认为

$$\ddot{u}_v(t) = \ddot{u}_h(t)/2 \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{\ddot{u}_v(t)}{\ddot{u}_h(t)} = \arctan \frac{1}{2} = 0.464(\text{rad})$$

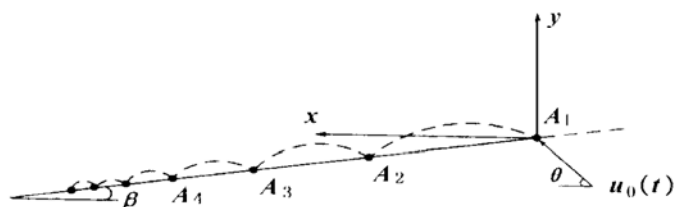


图1 滑体斜抛示意

Fig. 1 The oblique projection of landslide mass

对具体地震而言,若式(1)成立,则滑体作斜抛运动,其运动轨迹是多级斜抛,呈波浪状,这种推论与实际结果一致。如海原地震时,李俊堡蒿内大滑坡就形成9个明显的黄土波浪体^[3]。

每级滑体质点的斜抛运动参数可由斜抛运动推出:

$$\left. \begin{aligned} t^* &= \frac{2}{g} u_\theta(t) (\sin \theta - \tan \beta \cos \theta) \\ S &= \frac{1}{g} u_\theta^2(t) (\sin 2\theta - 2 \tan \beta \cos^2 \theta) \\ h &= S \cdot \tan \beta \end{aligned} \right| \quad (4)$$

式中 t^* 为每抛一次所用时间; S 为每一级斜抛运动的水平距离; h 为垂直距离; $u_\theta(t)$ 为 θ 方向的地震速度。

由于地震加速度为随机振动,为计算方便起见,我们按Seed^[12]的等效加速度法,将地震加速度的随机波调整为规则的正弦波,即

$$\ddot{u}_\theta(t) = 0.65 \ddot{u}_\theta(t)_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (5)$$

式中 $\ddot{u}_0(t)_{\max}$ 为地震加速度峰值; T 为运动周期; t 为任一时刻。

Kohji^[13] 基于大量的土动力学实验, 引入震级对式 (5) 进行了修正,

$$\ddot{u}_0(t) = 0.1(M-1)\ddot{u}_0(t)_{\max} \sin \frac{2\pi}{T}t \quad (6)$$

式中 M 为震级。

若令滑体质点落下与滑面碰撞后的速度为 V , 则

$$V = e\dot{u}_0(t) \quad (7)$$

式中 e 为黄土的恢复系数。

在地震的第一个周期里, 每一级滑体质点被抛起的速度为

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \dot{u}_0(t_1) \\ V_2 &= eV_1 + \dot{u}_0(t_2) \\ V_3 &= eV_2 + \dot{u}_0(t_3) \\ &\vdots \\ V_n &= eV_{n-1} + \dot{u}_0(t_n) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

同理, 每级滑体抛出的水平距离为

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{g} \dot{u}_{01}^2(t) (\sin 2\theta - 2\tan\beta \cos^2\theta) \\ S_2 &= \frac{1}{g} V_2^2 (\sin 2\theta - 2\tan\beta \cos^2\theta) \\ &\vdots \\ S_n &= \frac{1}{g} V_n^2 (\sin 2\theta - 2\tan\beta \cos^2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

直到不满足式 (1) 为止。

若地震的振动次数为 N , 则滑坡体在地震的持续时间里总的运动水平距离为

$$S = N \sum_{i=1}^n S_i \quad (10)$$

2.4 粉尘化效应

黄土体在被抛起的过程中, 土颗粒块体相互碰撞, 使土体积不断增大, 孔隙中又被空气迅速充填。土体在重力作用下要向下移动, 而空气阻力又阻碍土颗粒的下落。由于黄土颗粒很小, 重量很轻, 在空气阻碍下悬浮, 形成黄土尘埃。土体在斜抛、下落的过程中, 由于其厚度大, 整个土体压缩了很大一部分气体, 这部分气体不能及时排出, 便在滑体与滑床之间形成一封闭的气垫层, 使摩擦力骤减。

滑体在地震结束时获得一定的初速度, 并浮在此气垫层上运移, 从而便形成高速远程的黄土瀑布或黄土流, 也即高速黄土滑坡。

2.5 地震诱发高速黄土滑坡的形成过程

按上述分析, 地震诱发的高速黄土滑坡的全过程可描述为: 地震力 $\rightarrow$ 黄土体被剪断、解体 $\rightarrow$ 被抛起 $\rightarrow$ 多级斜抛运动(波浪状) $\rightarrow$ 粉尘化悬浮 $\rightarrow$ 形成气垫层 $\rightarrow$ 土体在地震停止时获得初速度 $\rightarrow$ 在气垫

层上运移 $\rightarrow$ 高速远程 $\rightarrow$ 黄土瀑布或土流 $\rightarrow$ 崩滑堆积而成的松散黄土体。

3 黄土滑坡滑速 滑距公式的推导

Scheidegger^[14] 曾以能量守恒的观点提出滑体的摩擦模型。Voellmy, Okuda 曾对其进行了修正。Sassa^[9] 考虑了孔隙压力的影响提出滑体运动的模型为

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin\beta - (mg \cos\beta - u) \tan\varphi \quad (11)$$

式中 m 为滑体质量; v 为滑速; u 为孔隙压力; φ 为滑体土的内摩擦角; β 为滑面倾角。

强烈的双向地震力使黄土解体, 十分疏松, 孔隙比加大, 空气充填于孔隙中并难以排出, 黄土粉尘化。此时需考虑孔隙气压和孔隙水压, 按动能定理得

$$d\left[\frac{1}{2}m(V^2 - V_0^2)\right] = mg \sin\beta ds - [mg \cos\beta - u_a + \xi(u_a - u_w)] \mu ds \quad (12)$$

式中 V_0 为地震结束后滑体质点获得的初速度; V 为滑体下滑的速度; u_a 为孔隙气压; u_w 为孔隙水压力; ξ 为系数; μ 为滑面的动摩擦系数。

关于孔隙水压力 u_w 的求取, 国内外学者在室内试验的基础上提出了多种方法, 如 Silver, Sgherif, 石原研尔和 Seed 等。Sassa 在室内土工试验的基础上由砂土库仑定律 $\tau = (\sigma - u) \tan\varphi$ 推论出如下公式:

$$\Delta u = B_D (\Delta\sigma - A_D \Delta\tau) \quad (13)$$

式中 Δu 为孔压增量; $\Delta\sigma$ 为正应力增量; $\Delta\tau$ 为剪应力增量; A_D, B_D 为剪切状态下的孔压参数。 B_D 在静三轴或直剪仪试验中可求得, 与土的饱和度及孔隙比有关, 数值在 0~1 之间, 其与饱和度的经验关系曲线如图 2 所示。 A_D 取决于剪切过程中土的膨胀情况, 其与土的孔隙比经验关系如图 3 所示(样品为中国黄土)。

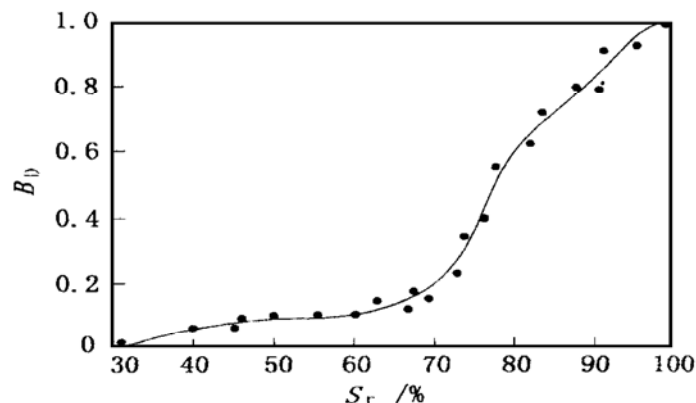
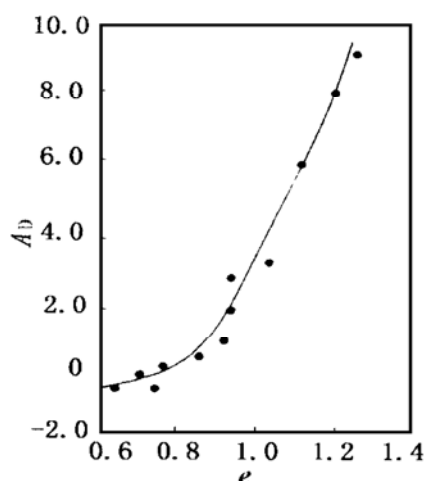


图 2 孔压参数 B_D 与饱和度关系图

Fig. 2 The relationship between pore pressure parameter B_D and degree of saturation

图3 孔压参数 A_D 与孔隙比关系图Fig. 3 The relationship between pore pressure parameter A_D and void ratio

由式(13)可推论出

$$u_w = B_D(mg \cos \beta - A_D mg \sin \beta) \quad (14)$$

滑面气垫层的孔隙气压 u_a , 本文可由下式推论:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi + \xi(u_a - u_w) \tan \phi \quad (15)$$

式中 τ 为滑面的抗剪强度; c' 为有效粘聚力, 本文研究的黄土已粉尘化, $c' = 0$; ϕ 为土的有效内摩擦角; 对于系数 ξ S. K. Vanapalli^[15] 曾建议用下式求取:

$$\xi = (S - S_r) / (100\% - S_r) \quad (16)$$

式中 S 为饱和度; S_r 为残余饱和度。仿 Sassa 方法可推论出

$$u_a = \frac{\alpha \tan \phi - \tau - \xi u_w \tan \phi}{(1 - \xi) \tan \phi} = \frac{mg \cos \beta \tan \phi - mg \sin \beta - \xi u_w \tan \phi}{(1 - \xi) \tan \phi} \quad (17)$$

式中孔隙水压力 u_w 仍按式(14)得出, 联立式(12)、(14)、(17)求解的滑速公式为

$$V = \sqrt{2gl[(1 - \cot \phi + 2\xi \mu_D B_D)y - 2\xi \mu_B D x] + V_0^2} \quad (18)$$

若滑体质点滑动停止时的水平距离为 l , 高度为 h , 则

$$V(l, h) = 0 \quad (19)$$

解式(19)得滑体质点最大滑距公式

$$l = \frac{(1 - \cot \phi + 2\xi \mu_D B_D)h + V_0^2/2g}{2\xi \mu_B D} \quad (20)$$

4 实际算例

1920年海原大地震诱发了数百处大型滑坡, 西吉县也属滑坡的重灾区, 地震烈度为 10° 。回回川滑坡是其中规模(体积 $7.66 \times 10^6 \text{ m}^3$) 较大的一个。它是在地震时瞬间发生的具有解体性质的高速黄土滑坡。在形态上至今还保存着被抛掷的痕迹。该滑坡地处黄土梁峁地区的缓斜坡地段, 不含地下水, 土质湿度不大, 含

水量在 15% 左右。滑坡坡度平缓, 土体大部分飞出谷床, 滑面裸露, 不具光滑性。滑前的自然斜坡平缓, 坡角 $5^\circ \sim 15^\circ$, 平均 7.5° , 滑动面的平均坡度 8.4° ^[6], 该滑坡剖面如图 4 所示。

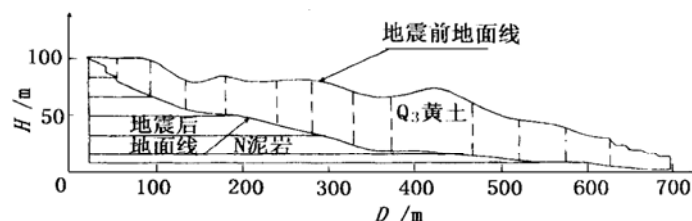


图4 回回川地震滑坡剖面

Fig. 4 Huihuichuan seismic landslide profile

由于其体积为 $7.66 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑体质点高度 $h = 50 \text{ m}$, 按 Scheidegger^[14] 方法求滑体动摩擦系数 μ 。

$$\begin{aligned} \lg \mu &= -0.15666 \times \lg(7.66 \times 10^6) + 0.62419 \\ &= -0.4533 \\ \mu &= 0.3513 \end{aligned}$$

回回川在海原地震时烈度为 10° , 对应的水平峰值加速度为 $0.8g$ 。

海原大地震($M = 8.5$)时西吉回回川的震中距为 70 km , 按 Seed 的换算公式, 其卓越周期约为 0.5 s , 持续时间为 18 s 。等效加速度曲线按式(6)计算如下:

$$\begin{aligned} \ddot{u}(t) &= 0.1(M - 1)\ddot{u}(t)_{\max} \sin \frac{2\pi}{T}t \\ &= 0.75\ddot{u}(t)_{\max} \sin \frac{2\pi}{T}t \end{aligned} \quad (21)$$

烈度 10° 所对应的水平地震峰值加速度为 $0.8g$, 按式(2)计算 θ 方向的地震加速度峰值如下:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_\theta(t)_{\max} &= \sqrt{\dot{u}_h^2(t)_{\max} + \dot{u}_v^2(t)_{\max}} \\ &= \sqrt{(0.8g)^2 + (0.4g)^2} = 0.8944g \end{aligned}$$

式(21)中的加速度振幅为

$$0.75 \times 0.8944g = 0.671g$$

按式(1)检验滑体能否抛起

$$g \sin \theta = g \sin 0.464 = 0.4475g < 0.671g \quad (22)$$

由此可见式(1)成立, 说明本地震力完全可抛起滑体。

现计算地震的第一个周期里滑体运动情况。

若取式(1)中的

$$\ddot{u}_\theta(t) = g \sin \theta$$

$$\text{则} \quad 0.671g \sin \frac{2\pi}{0.5}t = g \sin 0.464 \quad (23)$$

解之得

$$t = 0.06(\text{s})$$

说明在 0.06 s 时刻时滑体被抛起。

地震加速度 地震速度在 0.06 s 时刻的值为

$$\begin{aligned} \ddot{u}_\theta(t_1) &= \ddot{u}_\theta(0.06) \\ &= 0.671g \sin \left(\frac{2\pi}{0.5} \times 0.06 \right) = 4.5(\text{m/s}^2) \end{aligned}$$

$$\dot{u}_0(t_1) = \dot{u}_0(0.06)$$

$$= 0.671g \cdot \frac{0.5}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{0.5} \times 0.06\right) = 0.382(\text{m/s})$$

第 1 级斜抛运动所用的时间 ($\beta = 8.4^\circ = 0.1466\text{rad}$) 和平距为

$$t_1^* = \frac{2}{g} \dot{u}_0(0.06)(\sin\theta - \tan\beta \cdot \cos\theta) = 0.025(\text{s})$$

$$S_1 = \frac{1}{g} \dot{u}_0^2(0.06)(\sin 2\theta - 2\tan\beta \cdot \cos^2\theta) = 0.009(\text{m})$$

第 2 级斜抛运动是在 $t_2 = t_1 + t_1^* = 0.06 + 0.025 = 0.085\text{ s}$ 时刻开始的, 此时的地震加速度、地震速度为

$$\ddot{u}_0(t_2) = \ddot{u}_0(0.085)$$

$$= 0.671g \sin\left(\frac{2\pi}{0.5} \times 0.085\right) = 5.76(\text{m/s}^2)$$

$$\dot{u}_0(t_2) = \dot{u}_0(0.085)$$

$$= 0.671g \cdot \frac{0.5}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{0.5} \times 0.085\right) = 0.252(\text{m/s})$$

第 2 级斜抛运动所用的时间和平距按式(4)、(8)、(9)计算(设黄土的恢复系数 $e = 0.05$)。

$$t_2^* = \frac{2}{g} [\dot{u}_0(t_2) + e\dot{u}_0(t_1)](\sin\theta - \tan\beta \cos\theta)$$

$$= 0.018(\text{s})$$

$$S_2 = V_2 \cdot \cos\theta \cdot t_2^*$$

$$= [\dot{u}_0(t_2) + e\dot{u}_0(t_1)] \cdot \cos\theta \cdot t_2^* = 0.0044(\text{m})$$

同理, 可计算出第 3、4、……级斜抛运动的开始时刻、加速度、速度、所用的时间和平距如表 2。

表 2 $t_i, \ddot{u}_0(t_i), \dot{u}_0(t_i), t_i^*, S_i$ 计算值

Table 2 departure time, accelerations, velocities, durations and distances of seismic landslide mass

i	t_i	$t_{i-1} + t_{i-1}^*$ /s	$\ddot{u}_0(t_i)$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	$\dot{u}_0(t_i)$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	t_i^* /s	S_i /m
3	0.103		6.320	0.143	0.010	0.0014
4	0.113		6.500	0.079	0.006	0.0005
5	0.119		6.557	0.039	0.003	0.0001
6	0.122		6.571	0.020	0.002	0
7	0.124		6.576	0.007	0.001	0
8	0.125		6.576	0	0	0

从表 2 可看出, 第 8 级斜抛运动地震加速度值达到最大振幅值。地震加速度在半个周期 $T/2 = 0.25\text{ s}$ 时对称, 对称点是 $t = 0.125\text{ s}$ 时刻, 则在地震第一个周期里滑体做 16 级斜抛运动, 运动总平距为

$$S = 2 \times \sum_{i=1}^8 S_i = 0.03(\text{m})$$

因为海原地震的总持时为 18 s , 周期为 0.5 s , 则振动次数为 36 次。故地震过程中滑体共斜抛 16 级/周期 $\times 36$ 次 = 576 次, 总抛平距为

$$S_{\text{总}} = 36 \times S = 36 \times 0.03 = 1.08(\text{m})$$

现在进一步计算地震停止后滑坡体质心运动情况。

先求式(14)中的孔压参数 B_D, A_D , 在滑坡现场取样分析, 黄土瀑布落下的土孔隙比平均值为 $\bar{e} = 1.20$, 滑面土样的饱和度 $S_r = 40\%$ 。查图 2 和图 3 得 $B_D = 0.05, A_D = 7$, 动摩擦系数仍为 0.3513 , 随机荷载作用下黄土的动内摩擦角 ϕ 为 22° ^[6], ξ 按式(16) 计算为 0.4 , 代入式(20) 求得滑体最大滑距为

$$l = \frac{(1 - \cot\phi + 2\xi A_D B_D)h + V_0^2/2g}{2\xi B_D} = 814.35\text{m}$$

计算结果与实际相符。

参 考 文 献

- 1 刘百簏等. 1718 年通渭地震和 1654 年天水地震区航空照片判读. 地震科学研究, 1984(1): 1~ 7
- 2 国家地震局兰州地震研究所, 宁夏地震局. 1920 年海原大地震. 北京: 地震出版社, 1980
- 3 郭增建, 马宗晋. 中国特大地震研究. 北京: 地震出版社, 1988. 194~ 195
- 4 Upton Colose, Elsie Mcconnic. Where the mountains walked. The National Geographic Magazine, 1922, 12(5)
- 5 Feng Xuecai. Earthquake landslides in China. In: Proc IVth International Conference and Field workshop on Landslides. Tokyo, 1985. 339~ 346
- 6 张振中等. 黄土随机振动参数在地震滑坡分析中的应用. 西北地震学报, 1991, 13(1): 45~ 49
- 7 邹瑾敞等. 海原地震滑坡及其分布特征探讨. 内陆地震, 1996, 10(1): 2~ 5
- 8 Schreier R L. Leaking and fluidization in air layer lubricated avalanches. Geol Soc American Bulletin, 1968, 79
- 9 Sassa R. Measurement of the apparent friction angle during rapid loading by the high speed high stress ring shear apparatus——Interpretation of the relationship between landslide volume and the apparent friction during motion. In: David H Bell(editor). Landslide. 1991, 1: 545~ 552
- 10 胡聿贤. 地震工程学. 北京: 地震出版社, 1988
- 11 Newmark N M. Effects of earthquakes on dams embankments. Geotechnique, 1965, 15(2): 139~ 160
- 12 Seed H B, Idriss I M. Landslides during earthquakes due to soil liquefaction. ASCE, 1968, 94(SM5)
- 13 Kohji Tokimatsa. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT——Value and fines content. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 56~ 74
- 14 Scheidegger A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. Rock Mechanics, 1973, 5: 231~ 236
- 15 Vanapalli S K, Fredlund D G. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379~ 392