地震作用下黄土斜坡的稳定性分析预测 *

黄雅虹

(中国地震局兰州地震研究所,兰州 730000)

摘要 基于对中国西部黄土地区大量地震滑坡实例的考察分析,对影响黄土斜坡 稳定性的各类因素尤其是地震因素进行了分析,讨论了黄土斜坡滑裂面的产生机制 及几何特征.在此基础上提出了一种基于随机搜索法和遗传算法确定黄土斜坡最危 险滑裂面,进而对区域黄土地震滑坡进行预测的方法.以回回川滑坡为例进行了验 证.结果表明,该方法具有较好的效果和实用性.

主题词 西北 黄土 滑坡 灾害预测 稳定性 中国图书分类号 P315.2; P642.13

1 引言

中国的西北地区为强震的多发区.该地区黄土分布较广,由于黄土的特殊土动力性质及其 地貌方面的特点,使得黄土地震滑坡成为该地区的一种非常突出的地质灾害.本文对黄土斜坡 的稳定性问题进行了专门探讨,并为最大限度地防止或减少黄土地震滑坡灾害提供一些方法 和依据.

2 黄土斜坡稳定性的影响因素

对于黄土斜坡的稳定性一般用稳定系数来定量判定.在理论上将稳定系数定义为沿斜坡 最危险滑裂面的总抗滑力与总下滑力之比值.关于其解析表达式,前人已给出了多种,但其中 简明而有效的一种是改进型皮特桑公式,即

$$F_{s} = \frac{\sum (W_{i} \cos \alpha_{i} - U_{i}) \circ \cos \alpha_{i} \operatorname{tg} \varphi_{i} + \sum \Delta L_{i} C_{i} \cos \alpha_{i}}{\sum W_{i} \sin \alpha_{i} \cos \alpha_{i} + \frac{a}{g} W}$$
(1)

式中: W_i 为第i个土条的自重; U_i 为第i个土条所受的上浮力,对于黄土斜坡,该项一般为零; α_i 为第i个土条的滑动底面与水平面的夹角,有正负之分; φ_i 为第i个土条滑动底面处土的内 摩擦角; C为土的粘聚力; ΔL_i 为第i个土条滑动底面的长度; $\frac{a}{g}$ 为地震系数; W为滑动体的总 质量.

该式称为改进型,是因为它考虑了沿滑裂面各点的倾角一般存在差异,故首先将每个土条

收稿日期: 1997-08-28

* 地震科学联合基金资助项目(课题批准号 9400039)

本文获第四届全国青年地震工作者优秀论文三等奖.

作者简介:黄雅虹, 女, 1963年10月生, 助理研究员, 现主要从事黄土地震灾害及工程地震的研究工作.

的下滑力与抗滑力均投影在统一的水平方向上, 然 A 后再进行累加, 因此具有更普遍的适用性(图 1).

从这一定量解析式可以直观地看出,影响和决定一个斜坡稳定性的因素是复杂的,表 1 列出了影 响公式中每一参量的主要因素及其影响程度. 很显 然,其中每一参量均受多种因素的影响. 以滑裂面 %, ψ, 倾角参数 α_i为例,它与最危险滑裂面形态直接相 关,而最危险滑裂面的生成由斜坡的几何形态、周 围地质条件及土体的物理性质等因素决定,因此, α_i 也必然与这些因素密切相关.



图 1 分条计算斜坡稳定系数示意图 Fig. 1 Sketch of stable coefficient of landslip calculated by slice method.

影响因素	斜坡几	斜坡土体的	斜坡的地	斜坡的水	坡体堆积与	气候(雨雪冻	地震	
影响囚系 	何形态	物理性质	质条件	文条件	坡脚搬运	结、干燥等)	作用	
W_{i}	А	А	А	А	А	В	D	
U_i	D	D	D	А	D	В	D	
α _i	А	А	А	В	В	С	В	
φ_i	С	А	А	А	С	А	В	
ΔL_i	А	А	А	В	В	D	D	
C_i	С	Α	А	Α	С	Α	В	
$\frac{a}{g}$	Х	Х	Х	Х	Х	Х	А	

表 1 影响公式(1)中各参量的主要因素及影响程度

说明: A: 影响明显; B: 影响较明显; C: 有影响, 但不明显; D: 几乎没有影响; X: 无影响

由上述分析可知,一个黄土斜坡的稳定系数是经常波动变化的,引起这种波动变化的因素 可归为3类:

第一类是周期性的变化因素,如气候的季节性变化.

黄土斜坡的稳定系数随气候的季节变化呈现出明显的周期性波动.中国广大的西部黄土 地区,冬季气候干燥寒冷,此时,对于浅部的黄土,因冻结作用,其*C*,9值将明显增大,故斜坡 的稳定系数也将变大;而在春季融雪期间,土层解冻,但土体的水份蒸发量并不大,此时,因土 体的含水量较大,将使*C*,9值变小,从而使斜坡的稳定系数也变小;在夏季,黄土地区总体上 呈现出少雨的干热气候,土体水份的蒸发量很大,因此,土体将逐渐变得干燥坚硬,此时稳定系 数也将回升.可见,同一斜坡受到同样强度的地震作用,在不同的季节其失稳结果可能明显不 同.

第二类是缓慢的地质作用及人类工程活动等.

黄土斜坡的稳定系数随一些地质作用及人类工程活动的变化往往是呈趋势性渐变的,如 坡脚土体的自然运移或人工运移,将使稳定系数逐渐减小;相反,坡体的侵蚀和搬运又可能使 稳定系数逐渐增大.

第三类是突发性因素,如地震作用、暴雨作用等.

地震对黄土斜坡影响的机理,主要包括3个方面:

(1) 地震发生时产生的弹性振动从震源向周围介质传递时,具有一定的加速度,因此,会 在斜坡内引起一种惯性力,使下滑力或抗滑力在瞬间发生很大的变化. (2)振动作用可引起黄土结构的破坏,使黄土产生"震陷"等残余变形.振动还可以导致含水量较高的黄土层产生液化作用等.这几种情况,在效果上可广义地理解为地震引起的强振动作用致使黄土的 C, φ 值在振动过程中突然降低.

(3) 地震的强烈振动会使斜坡的坡角伴随地震过程产生暂时的倾角增量 $\Delta \beta^{[1]}$.表 2 给出 了在各种烈度下斜坡坡角的增量值 $\Delta\beta$,可以看出,当烈度达 X ~ XI 度时,坡角增量值竟高达 15°~30°.尽管这种增量的效果所持续的时间很短,但对于黄土斜坡而言,其作用是非常显著 的.这种伴随着地震的倾角增量 $\Delta\beta$ 的变化可以较好地解释为什么有些干燥而密实的低角度黄 土斜坡会在地震过程中发生"倾泻"式的失稳.以往,我们在确定地震对黄土斜坡稳定性的影 响时,一般仅考虑公式(1)中的分母项(a/g)W,现在严格看来,还应同时考虑地震作用所引 起的 α_i , C_i 及 φ_i 的变化量 $\Delta\alpha_i$, ΔC_i 及 $\Delta \varphi_i$.关于 $\Delta\alpha_i$, 可参照表2 给出.对于 ΔC_i 及 $\Delta \varphi_i$ 与地振 动之间的定量关系,初步的黄土动力实验表明,在等幅正弦循环荷载作用下,黄土的动摩擦角 φ_d 一般比静摩擦角小 3°~7°,动粘聚力 C_d 也比静粘聚力小,但相差的量值范围较大^①,目前 尚无定论.可见,用实验方法确定黄土的动、静强度 C, φ 之间的定量关系,仍然是今后需要研 究的一个重要课题.

国定全苏标准地震烈度表(6249-52)	地震系数 <u>a</u>	斜坡坡度增量 Δβ
V	0.005	15'
VI	0.01	30′
VII	0.02	$1^{\circ}10'$
VIII	0.05	3°
IX	0.1	6°
Х	0.25	15 [°]
XI	0.5	30 [°]
XII	大于 0.5	大于 30°

表 2 地震烈度与地震作用下的暂时斜坡坡度增量 Δβ^[1]

3 黄土地震滑坡最危险滑裂面的确定和稳定性分析

3.1 黄土斜坡滑裂面的产生机制及几何特征

在滑裂面的几何特征及产生机制上,岩体滑坡和黄土滑坡存在着很大的差异.岩体滑坡的 滑裂面通常发生在岩体本身固有的软弱结构面,如层理、节理、裂隙、断层面、不整合接触面上. 由于这些软弱结构面分布的复杂性,使得岩体滑坡在几何形状上往往表现出几乎是杂乱无章 的特性.而黄土滑坡的情况却不同,它的滑裂面最初是不存在的,而是在许多因素的综合作用 下,坡体具备了滑动条件才产生的.如果这种滑动条件是经过缓慢积累而逐渐达到的,那么滑 动体沿滑裂面的运动形式将首先是蠕动,而且在土体内部所有的几何面中,蠕动滑裂面上的稳 定系数最小^[2].一个蠕滑面所对应的稳定系数将随着蠕动的进行因受力条件的改变而变化. 如果蠕动发生后,土体滑动的条件一直满足,则土体将继续自动生成稳定系数最小的滑裂面并 沿其由缓慢的蠕动逐渐加快成为显著的滑动,最后形成宏观滑坡现象.如果经过初步蠕动后, 进一步滑动的条件暂时不再满足,则会在滑坡体内留下滑裂面裂隙,使整个坡体处于稳定与不 稳定之间的临界状态.

以上所述滑裂面是在静态或准静态方式下逐渐生成的,主要起因于自然的沉积、搬运、坡

脚的人工开挖、地表水渗入等.土坡滑裂面的另一种重要生成方式为动态方式,即起因于地震的作用.其特点是在地震的强烈振动下,伴随着地震加速度力的附加及坡体倾角的暂时增大, 土体所受的剪切应力迅速增加,当超过一定限度时,土体破裂产生滑裂面.伴随着地震的振动 作用,斜坡可能立刻出现宏观滑动,也可能不发生宏观滑动,仅沿着最危险滑裂面发生小位移 量的滑动,在后缘留下裂隙.这样,当以后有大量降水入渗,或再次发生地震,或滑坡体下方遭 受冲刷剥蚀,将会导致土体进一步的失稳滑动.

大量的实例表明,黄土滑坡具有如下的特征:

(1) 黄土滑坡滑裂面的几何形状,可用圆弧与折线的复合型模型来统一描述,即滑裂面总体上表现为圆弧形或对数螺线形,而局部呈折线形.

(2) 折线形滑裂面的转角一般分布在一18°~+20°的范围内(图 2),大多数转角分布在 -2°~+8°的范围内.转角角度的变化大致服从数学期望值为2、方差为6²的正态分布.

3.2 最危险滑裂面的确定

关于黄土斜坡最危险滑裂面的确定,我们曾尝试过一种比较^A、 有效的随机搜索法¹³,近来又对此方法进行了改进,其基本思想 及主要步骤如下:

(1)对于一个要确定其最危险滑裂面的具体黄土滑坡,首先通过实例类比及实际经验圈定出最危险滑裂面可能产生的范围.

(2) 以实际黄土地震滑坡滑裂面的几何统计规律为基础,建 立相应的数学模型,利用计算机随机生成一系列可能的复合型滑 裂面,并计算出相应的稳定系数.以稳定系数依次最小为标准,可 筛选出 N 条"准最危险滑裂面".

(3) 对这 *N* 条"准最危险滑裂面"进行遗传算法处理^[3,4],即 将这 *N* 条"准最危险滑裂面"看作一个"种群",将其中的每一"准



图 2 折线形滑裂面转角 示意图 Fig. 2 Sketch of corner of broken lineshaped slide surface.

最危险滑裂面"看作一条"染色体". 让各滑裂面按生物遗传中染色体变异、基因交换等原理, 以 一定的概率进行自身的变异(即让每条"准最危险滑裂面"的局部形态产生微变动)及相互之间 的局部对应区段的交换(即让各"准最危险滑裂面"之间有机会取长补短).

(4) 计算所有通过变异及基因交换新产生的滑裂面的稳定系数,并将种群中所有的滑裂面(包括原来的 N 条及后来新产生的N(N+1)/2条)汇总在一起,以稳定系数依次最小为标准,筛选出新一代的 N 条"准最危险滑裂面",组成新的"种群",然后,再进行新一轮的变异与交换.

这样,经过(3)、(4)两步骤的多次循环,最终将得到 N 条收敛在一起的滑裂面.显然,此时 其中任意一条均可能是"最危险滑裂面".

3.3 实例分析

回回川滑坡是 1920 年海原地震时形成的. 它位于宁夏西吉县城西南 10 km 处的回回川村 附近, 地处陇西盆地北部, 距海原地震震中约 70 km, 此处烈度为 X度. 该滑坡长 687 m, 宽 359 m, 厚 30~50 m. 滑坡后壁到前缘高差约为 100 m, 滑动土体约 766×10⁴ m³, 滑动面的平均角 度为 8. 4° (该地区的天然斜坡角度为 5°~15°)^[5]. 图 3 是该滑坡的典型剖面. 据黄土动强度实 验得到该滑坡 C = 58.3 kPa, $\varphi = 13.4$ °, $\gamma = 1.423$ g/ cm³. 用上述方法确定该滑坡的"最危险 滑裂面", 结果见图 3. 由图 3 可以看出, 用上述方法确定的滑裂面与实际滑裂面极为接近.

从图 3 还可以看出,采用蒙特卡罗法确定的"最危险滑裂面"的相对误差最大为24.6%左

右(即计算的最大滑动面的深度比实测值大 15 m 左右),而用遗传算法确定的"最危险滑裂面" 的相对误差最大为 10%左右(即计算的最大滑动面的深度比实测值小 6 m 左右),这说明采用 遗传算法确定的"最危险滑裂面"的位置比蒙特卡罗法确定的位置更准确、更合理.



图 3 回回川滑坡剖面及用遗传算法和蒙特卡罗法确定的"最危险滑裂面"

Fig. 3 The profile of Huihui Chuan landslip and the most dangerous slip surfaces by genetic algorithm and Monte Carlo method.

根据所确定出的最危险滑裂面,可以计算回回川斜坡的稳定性.结果表明,当不考虑地震作用时,其稳定系数 F_s=3.2,是一个相当稳定的斜坡;当烈度达到 WII度强时它已处于不稳定的临界状态;而当烈度达到 IX~X度时,其稳定系数仅为 0.916~0.533,远小于 1(表 3).可见,回回川斜坡虽为缓坡,在一定的地震力作用下,仍然会发生滑动,形成滑坡.

表 3 回回川斜坡的稳定性计算结果

а	0	0.075	0.15	0.30	0.60	强度
g	(0度)	(VII度)	(Ⅷ度)	(IX度)	(X度)	参数
$\alpha = 8^{\circ}$	3. 24	1. 983	1. 428	0. 916	0. 533	C = 44.1 kPa $\varphi = 17.2^{\circ}$ $\gamma = 1.54 \text{ g/ cm}^{3}$

4 黄土地区地震时斜坡失稳的扫描分析预测^[6]

对一个具体的黄土斜坡,

4.1

4.1.1 *C*, *φ*

 $\begin{array}{ccc} C, \varphi & \gamma \\ C, \varphi & \gamma \end{array}$

γ

4.1.2

4.1.3

(5)

Χ

•

a/g 的选择 4.1.4 a/g 由小到 根据中国烈度区划图, 大的扫描范围. 4.2 10 km 处的李家沟、 1920 年海原地震时为IX~X $C = 45 \text{ kPa}, \varphi = 17.2^{\circ}, \gamma = 1.54 \text{ g/cm}^3.$ **.** *C***.** *ϕ* γ 4 是对 该地区长度在 50 m 左右的小型黄土斜坡的稳定性扫描情况. $F_{\rm s} < 1$ 时, , Fs<1.2时, 50 m 左右的小型黄土斜坡. 38°, (1)33° (2)VII ; 30° (3)VIII ; 21° IX (4): (5)Х 10° 4 50 m 的黄土斜坡的扫描结果 3° 5° 7° 9° 11° 13° 15° 17° 19° 21° 23° 25° 27° 29° 33° 35° 37° 31° α (0度) 26.2818.60 8.55 7.05 5.43 4.45 3.65 3.09 2.77 2.47 2.20 1.97 1.92 1.79 1.56 1.45 1.37 1.26 0 (VII) 5. 02 4. 69 3.79 3.25 2.77 2.40 2.18 1.97 1.79 1.62 1.60 1.51 1.31 1.23 1.18 1.12 11.72 9.81 0.075 (₩) 7.46 6.67 4.07 3.51 2.91 2.56 2.24 1.96 1.82 1.64 1.51 1.38 1.37 1.31 1.13 1.06 1.04 1.01 0.15 (IX) 2.96 2.34 1.99 1.80 1.61 1.43 1.36 1.23 1.15 1.09 1.06 1.04 0.89 0.84 0.60 0.54 4.32 4.06 0.30 (X) 2.35 2.28 1.91 1.40 1.22 1.13 1.03 0.93 0.90 0.82 0.78 0.74 0.73 0.71 0.62 0.59 0.54 0.51 0.60 表 5 是对该地区长度为 200 m 左右的较大斜坡的稳定性扫描情况. 200 m 左右的较大的黄土斜坡: (1)23°, ; 17° (2) VII ; 13° (3) VIII ; 7° (4)IX ;

 3°

:

57

			5		20	0 m 🗄	的黄∃	上斜坡	的扫	描结	果				
α	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17 [°]	19°	21°	23°	25°	27 [°]	29°	31°
(0度) 0	9. 43	7.38	4.42	3.30	2.63	2.20	1. 82	1. 60	1. 43	1. 35	1. 21	1.12	1.01	0.93	0.87
(Ⅶ) 0.075	4.07	3.90	2.71	2.19	1.85	1.60	1. 39	1. 24	1. 14	1. 09	0. 99	0.93	0.85	0.79	0.74
(VⅢ) 0.15	2.80	2.65	1.95	1.64	1.42	1.26	1. 13	1. 02	0. 94	0. 91	0. 85	0.80	0.73	0.69	0.65
(IX) 0.30	1. 73	1.61	1.24	1.09	0.98	0.89	0. 82	0. 75	0. 70	0. 69	0. 65	0.62	0.58	0.54	0.52
(X) 0.60	1. 12	0.96	0.71	0.65	0.60	0.56	0. 53	0.48	0.47	0.46	0. 45	0.43	0.40	0.39	0.37

由以上分析可见,

本文在撰写过程中得到张振中研究员、王兰民研究员的精心指导及刘旭副研究员的帮助, 在此谨表示衷心的感谢.

1	ЕΠ.	•	, 1986. 158	~ 227.		
2	, .		, 1992, 6(1): 5	4~62.		
3	Holland J H. Genetic algorith	ms. Scientific Americ	an, July, 1992. 44~50.			
4	•		, 1992, 35(): 367 ~ 371.		
5	Zhang Zhenzhong and Wang	Lanmin. Geological	Disasters in Loess Areas	during the 1920 H	laiyuan Earthquake	. Geojoumal,
	1995, 36(2/3): 267~274.					
6			· :			. :

, 1994. 267 ~ 270.

ANALYSIS AND PREDICTION FOR STABILITY OF LOESS SLOPE UNDER THE EFFECT OF EARTHQUAKES

HUANG Yahong

(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000

Abstract

Based on a research for a great number of loess landslides caused by earthquakes in the northwest China, several factors which have an effect on stability of loess landslides are analysed, especially analysing the effect of earthquake. The mechanism of loess landslides to occur and geometric feature of sliding surface in loess slope are discussed. A fundamental approach forecasting the most dangerous sliding surface in loess slope by traditional random scouting method and genetic algorithm is introduced. A new method forecasting loess landslides in a region by using scouting analysis is suggested and it is proved to be effective and practical in test of Huihui Chuan landslides.

Northwest China, Loess, Landslide, Hazard forecast, Stability Kev words