

1995年永登地震山体变形计算机模拟与机理分析

张冬丽^{1,2}, 王兰民¹

- (1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150083)

摘要: 1995年甘肃永登5.8级地震引起了黄土山梁的酥裂震陷, 说明黄土在较小震级下也会有失稳现象. 利用三维土体的有限元计算方法, 对永登地震山体变形进行了计算机模拟, 并定量地分析了变形的机理.

关键词: 有限单元法; 计算机模拟; 机理分析

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2003)01-0077-05

0 前言

1995年7月22日永登5.8级地震是发生在黄土丘陵地区的典型震例. 宏观震中位于永登县疙瘩沟至马家山城一带, 极震区烈度为Ⅷ度^[1]. 区内大部分地区被黄土覆盖, 黄土梁(峁)上部为马兰黄土, 厚数米至30米; 下部为离石黄土; 底部基岩为第三系和白垩系的砂岩. 沟谷内为Q₄黄土状土, 厚3~10m. 永登地震震级虽然不大, 但由于震源浅, 又发生在黄土覆盖层较厚的丘陵地区, 其震害与震级相比偏于严重, 并引起了黄土的震陷和滑坡, 造成的人员伤亡及经济损失较为严重. 说明在黄土地区, 尤其是震源较浅的情况下, 即使震级较小也可产生较大震害.

为了探讨在特殊地形条件黄土的震害问题, 研究其失稳机理, 本文采用三维有限元方法对山梁土体进行模拟计算, 为黄土地区的抗震设防提供理论依据.

1 黄土的本构模型

有限元程序中所用的黄土本构模型包括静本构模型(邓肯-张模型^[2])、动本构模型(Harding-Dmievich的双曲线模型^[3])和黄土的残余应变模型^[1].

静本构模型(邓肯-张模型): 黄土的切线弹性模量可以用下式来表达:

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 kPa \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^n \quad (1)$$

式中 c 、 φ 为土的强度指标; k 、 n 和 R_f 分别为模量系数、模量指数和破坏应力比, 其中 R_f 对不同的 σ_3 会有不同的值, 可以取平均值. 看出 E_t 随应力水平的增加而降低, 随固结压力的增加而增加. 在有限元计算中, 对于静力平衡方程用中点增量法求解.

动本构模型(Harding-Dmievich的双曲线模型): 经过反复试验研究, 原状和击实黄土试样在动应力作用下的应力应变曲线均可用Harding-Dmievich的双曲线模型来描述. 动力分析过程中所采用的黄土的本构关系为非线性应力-应变模型, 是由动三轴试验所记录到的轴向动应力(σ_d)和轴向动应变(ϵ_d)的关系

得到的,即

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a + b\epsilon_d} \quad (2)$$

动力平衡方程用 Wilson- θ 法求解.

黄土的残余应变模型:黄土的震陷在土动力学中定义为随机地震作用结束后土体中的残余应变值.在震陷的动三轴实验中,残余应变被取为随机地震荷载时程作用前后试样的高度差与荷载作用前试样的高度之比^[3]

$$\epsilon_p(N) = \frac{H - H'(N)}{H} \quad (3)$$

式中 $\epsilon_p(N)$ 表示动应力往返作用 N 次所产生的残余应变; H 和 $H'(N)$ 分别表示动应力作用前和作用 N 次后的试样高度.因此,残余应变可以从试验中记录到的轴向应力和应变时程上确定.

试验和理论研究表明,黄土残余应变不仅受黄土的物性参数的影响,还受固结应力条件和等效地震作用的动应力幅值与作用次数的影响,因此需要有不同固结应力和振次下的震陷参数.已有研究成果在建立黄土残余应变的经验公式时,淘汰与残余应变相关程度不高的参量,运用非线性曲线拟合的方法,得出西北地区震陷性黄土在任一振次 ($N \leq 45$)、固结应力 ($\sigma_{1c} \leq 294$ kPa) 和动应力条件下,并经过高次项修正的残余应变经验公式^[4]

$$\epsilon_{PN} = C [(\sigma_d - \sigma_{d0})/98]^B - f_1(\sigma_{1c}, S_1, S_2) \cdot f_2(N/10) \quad (4)$$

式中 C, B 为与黄土的物性指标有关的震陷参数; σ_d 为黄土试样所受的动应力(kPa); σ_{d0} 为震陷起始动应力(kPa),由试验或参照地区性参数确定; σ_{1c} 为轴向固结应力; f_1, f_2, S_1, S_2 均为震陷参数,与黄土的含水量、液限及所受动应力有关.该经验公式经对特定场地估算,与实验结果符合较好^[4].

经过高次项修正可消除震陷曲线的高次失真现象,得到震陷经验公式

$$\epsilon'_{PN} = \epsilon_{PN} + [\sigma_d - (\frac{\sigma_{1c}}{2} + \sigma_{d0})]^3 \quad (5)$$

由此公式利用有限元计算程序,在等效结点力的作用下,可求得黄土地基的残余变形.

2 动力平衡方程的建立

考虑到黄土的惯性和粘性阻力时,整个结构的动力基本方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (6)$$

式中 $[M]$ 为系统总体质量矩阵; $[C]$ 为系统总体阻尼矩阵; $[K]$ 为系统总体刚度矩阵; $[u]$ 为节点位移向量; \dot{u} 为节点速度向量; \ddot{u} 为节点加速度向量; $\{F(t)\}$ 为地震荷载向量.

在任意给定的时间 t , 这些方程可以看作是一系列考虑了惯性力 ($[M]\{\dot{u}\}$) 和阻尼力 ($[C]\{u\}$) 的静力学平衡方程.

系统阻尼采用 Rayleigh 阻尼模式,即

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (7)$$

其中 $\alpha = \lambda_i * \omega_i$, $\beta = \lambda_i / \omega_i$. α, β 为与质量相关阻尼和与刚度相关阻尼; λ_i 为单元 i 的阻尼比,与土体应变大小相关,是某个振型的实际阻尼和临界阻尼之比; ω_i 为系统的基本频率.

3 等价结点力法

计算程序中采用的是 Serff 等提出的等价结点力法^[5].其出发点是认为地震引起的永久变形等于某种等价结点力作用下所产生的附加变形.这里等价结点力是通过应变势和静力三轴固结不排水剪试验所得

的应力应变关系来求相应于应变势 ϵ_p 的动主应力差 $\Delta\sigma_d$, 再用一种近似的方法求相应的等价结点力, 然后按静力三轴固结不排水的应力应变关系来求等价结点力作用下的附加变形, 作为地震产生的永久变形. 该方法不仅考虑了地震惯性力的作用, 而且将一种不规则的随机动荷载转化为等价荷载, 给计算分析带来了方便. 图 1 为等价结点力计算图示. 但应变势本来是根据动力试验规律和计算所得的静应力和动应力状态而求的, 在 Serff 法中等价结点力的计算中, 却又根据静力三轴固结不排水剪的应力应变关系来反推动主应力差, 这显得重复且不太合理. 另外, Serff 法中用固结不排水的静力三轴实验得到的应力应变关系代替地震时动应力残余应变关系, 也有值得进一步考虑的地方. 为了克服其不合理性, 程序中直接采用了由动力反应分析中求出的动剪应力来确定等价结点力, 并用黄土动三轴实验所得的黄土残余应变模型代替地震时残余应变关系.

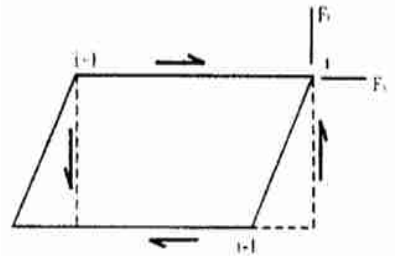


图 1 等价结点力计算(据刘汉龙等, 1995)

Fig. 1 Model of equivalence node force.

由于动剪应力随时间变化, 可用某一时段的均匀等效应力 $\tau_{av} = 0.65 \tau_{max}$ 和等效循环周数 N_{eq} 来表示. Seed 认为, 等效循环周数可按地震的震级确定, 对于 7.7.5 和 8 级地震分别取 10、20 和 30 周^[6]. 则相应于均匀等效结点力的等价结点力

$$F_h = \frac{1}{2} \tau_{av} (x_i - x_{i+1})$$

$$F_v = \frac{1}{2} \tau_{av} (y_i - y_{i+1}) \tag{8}$$

式中 F_h, F_v 分别为结点 i 的水平和竖向等价结点力. 将每个结点周围单元的结点力叠加, 可以得到总的等价结点力. 在动、静力有限元计算程序的基础上, 可进行永久变形计算.

4 永登地震山体变形模拟与震陷机理分析

1995 年永登 5.8 级地震时, 在 VIII 度区和 IX 度区内许多黄土山丘被震酥, 地裂缝广泛存在, 有的裂缝宽达 15 cm, 伴随有 30~40 cm 下陷. 有的黄土梁顶面上发生了阶梯状下错, 靠近坡顶处有碎裂现象(图 2). 坡角处破坏较轻, 顺坡面错距大致相同. 此为地震力所致.

以地处烈度为 VIII 度极震区内的疙瘩沟某一黄土梁为例, 计算其三维山坡体在地震下的震陷量. 该黄土含水量低, 密度较小, 孔隙比大于 1; 初始模量小, 在 51.33~69.5 MPa 之间, 说明其结构疏松, 抗震性能差. 山坡的坡角为 34°左右, 最大高度为 44 m; 山坡两翼的坡角在 28°~36°之间(图 3). 黄土覆盖层厚度约 20 m, 上部为马兰黄土, 下部为离石黄土上部, 黄土的参数参考永登地区的参数和已有成果中的经验值.

计算在自然状态下(无附加压力, 仅有土的自重), 山体在 50 年超越概率分别为 63.5%、10%、2% 的兰州人造地震波作用下的震陷量. 计算出的结果(表 1)表明, 土体在地震作用下, 在垂直方向和水平方向上的永久变形都是相当可观的. 在 50 年超越概率为 2% 的地震动作用下(相当于 8.6



图 2 永登地震时黄土梁阶梯状下错及碎裂现象(据张振中, 1995)

Fig. 2 The stair-like dislocation and rupture of loess on top of hill in Yongdeng earthquake.

度的地震烈度), 土体的最大震陷量发生在山脊处, 大小在 15.2~51.3 cm 之间. 以山脊为界, 水平变形以相反的方向向山坡两侧发展, 最大水平变形发生在山腰部位(图 4). 向两侧山体坡角方向, 垂直变形和水平变形量都逐渐减小. 疙瘩沟一带处于 VIII 度极震区, 介于模拟地震烈度的 7.8~8.6 度的范围内, 计算最大震陷量在 13.5~51.3 cm 之间, 与实测震陷量符合较好.

数值模拟计算结果合理解释了永登 5.8 级地震在其黄土梁区造成的梁顶面 30~40 cm 阶梯状错落和水平张裂变形现象. 从沉降变形的等值线分布图可知, 沉降最大的部位在比较平坦的梁顶中部, 显示为震陷的特征. 由于黄土山梁受地震垂直和水平力的共同作用, 产生了 1.4:1~3:1 的永久变形. 竖直方向的变形使土体下陷, 向山梁两侧的水平力使土体向外侧水平位移, 但竖向变形量大于水平位移量, 所以下陷阶梯的斜面由两侧向梁顶中部倾斜, 反映了破碎土体向着沉降中心错落的震陷特征.

表 1 山坡体 7 个控制剖面的最大震陷量

计算深度 /m	各地震烈度下的最大震陷量/cm					
	6.3 度 (47.35gal)		7.8 度 (165.60gal)		8.6 度 (389.68gal)	
	水平向	垂直向	水平向	垂直向	水平向	垂直向
17.80	-2.4	3.3	-9.6	13.5	-11.0	15.2
23.32	-2.1	4.9	-6.6	15.8	-12.3	25.4
26.02	-2.0	5.9	-5.8	16.7	-11.2	28.7
27.38	-2.2	6.5	-5.8	17.7	-11.7	30.6
32.86	-2.6	8.3	-6.2	21.5	-13.4	38.5
38.34	-2.8	9.9	-6.8	24.7	-14.3	45.8
43.82	-3.2	11.2	-7.8	27.2	-14.6	51.3

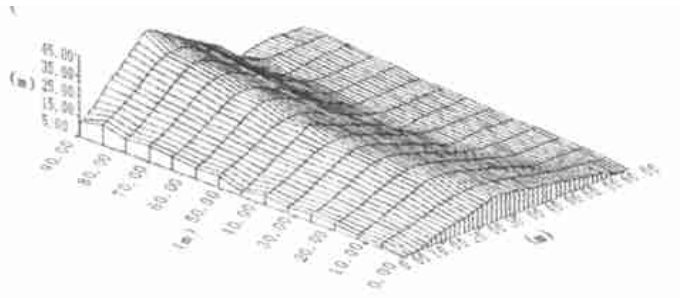
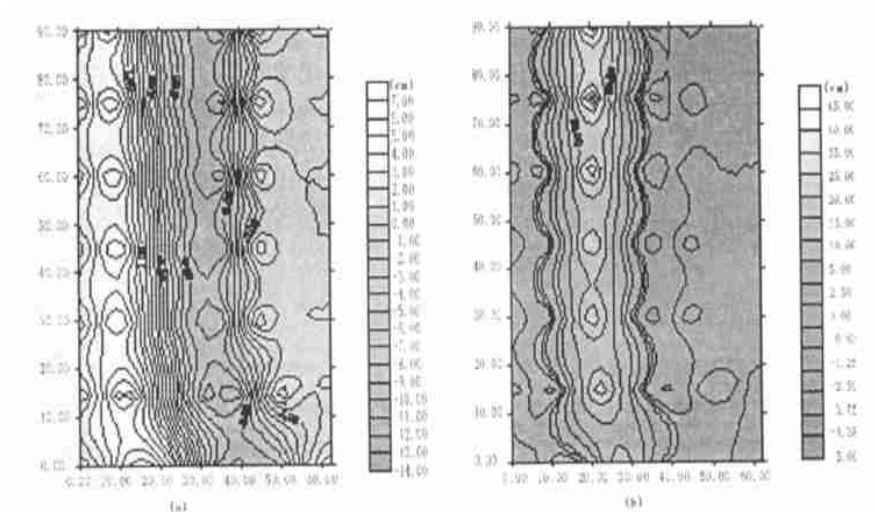


图 3 三维山体计算模型

Fig. 3 3-D Finite-Element model of loess hill.



(a) 水平变形; (b) 垂直变形

图 4 山坡体的变形等值线

Fig. 4 Contour chart of deformation on loess hill.

图 5 和图 6 为山坡产生下陷、水平裂缝而形成沿山坡顶面阶梯状下错的机理图。可以看出,黄土山体的震陷现象与土体滑坡有着最本质的区别:山体的震陷的最大震陷量在梁顶处,震陷以梁顶为界向山坡两侧发展形成阶梯状下错。而山体滑坡的一个明显特征就是存在一个大尺度的滑动面,这在山体震陷现象中是根本不存在的。图 5 为山坡体二维截面上,沿山坡表面有限元网格结点上的垂直和水平变形量示意图。图 6 为山坡顶部产生下陷、水平裂缝而形成阶梯状下错的机理图。可以看出,土体的变形特点与土体的变形方向是一致的,与所受到的地震动作用力的方向和大小是必然相关的。

5 结论

利用有限元分析方法对三维土体进行震陷量的计算与预测,结果表明,在西北黄土覆盖层较厚的地区,较小震级的地震危害也是不容忽视的。从震陷机理方面合理解释了 1995 年永登 5.8 级地震在其黄土梁区所造成的梁顶阶梯状错落和水平张裂变形现象。理论分析与现场震害实例符合较好。这说明,将有限单元法用于黄土地区的震陷量计算,为较为准确地预测在一定超越概率下的地震震陷提供了数值方法和理论依据,对于地震的预测预防、危险性分析及安全性评价具有较大的实践意义。

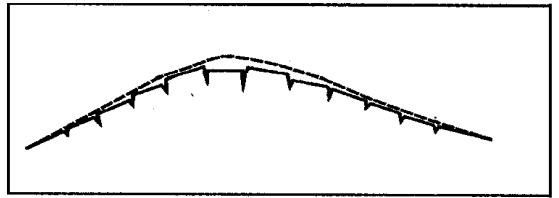


图 5 坡体剖面表面结点永久变形示意图

Fig. 5 Sketch of permanence deformation at nodes on hill surface.

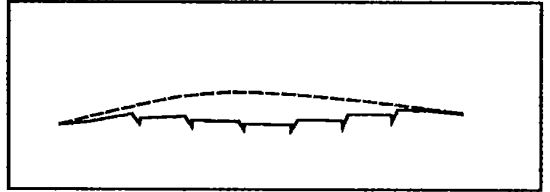


图 6 坡顶剖面变形示意图

Fig. 6 Sketch of deformation on top of hill

[参考文献]

- [1] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [3] 王兰民, 张振中. 地震时黄土震陷量的估算方法[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(3): 86—94.
- [4] 石兆吉, 王兰民. 土壤动力特性: 液化势及危害性评价[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [5] 刘汉龙, 陆兆溱, 钱家欢. 土石坝地震永久变形分析[J]. 河海大学学报, 1995, 24(1): 91—96.
- [6] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.

COMPUTER-ADDED ANALOGUE AND MECHANICS ANALYSIS ON DEFORMATION OF HILL GROUND INDUCED BY YONGDENG EARTHQUAKE IN 1995

ZHANG Dong-li^{1, 2}, WANG Lan-min¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, CSB, Harbin 150080, China)

Abstract: The subsidence and failure of loess hills induced by Yongdeng M_s 5.8 earthquake in 1995 indicates that damage exists even in moderate strong earthquake in loess area. The 3-D Finite-Element method and computer-added analogue are used to study and analyze the mechanics of deformation on loess hill in Yongdeng earthquake.

Key words: Finite-Element method; Computer-added analogue; Mechanics analysis