

有限元分析方法在黄土地基震陷预测中的应用

张冬丽¹, 王兰民¹, 王玉华²

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 天祝藏族自治县地震局, 甘肃 天祝 733200)

摘要: 将有限元方法应用于黄土地基的震陷量预测, 定量地研究了黄土地基地震沉陷特性与场地条件、基础形式、土动力特性等因素的相关关系, 为黄土地基基础的抗震增稳设计与处理提供了科学依据。

关键词: 有限元方法; 本构模型; 黄土场地; 地基震陷

中图分类号: P315.9; TV4354 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2002)03-0208-07

0 前言

大量的震害现场调查和室内试验表明, 由于黄土结构的易损性和储水性, 震陷和液化成为黄土地区主要的潜在地基震害. 尤其是在西北黄土地区位于Ⅷ度左右的地震烈度区和强烈的自重湿陷性黄土地带, 这种潜在地基震害的危害性更大. 因此, 近年来黄土地区因地震所导致的地基失效、土层震陷、土体滑坡等灾害已引起了人们的重视, 并成为地震工程界研究的重点课题之一. 为了提高黄土地的抗震强度, 解决抗震增稳问题, 为进行地震安全性评价提供理论依据, 有必要对黄土的动力特性及黄土地基的震陷特性进行更为深入细致的研究. 近二十年来黄土地震工程的研究得到了较大的发展, 但是黄土地基震陷问题的二维、三维空间的有限元预测方法, 在国内及国外文献资料中很少阐述. 我们根据西北黄土的动力特性及黄土地基的实际特点, 以现场测试和室内实验为基础, 将有限元分析方法引入黄土地基抗震问题的处理中, 对一定动荷作用下, 黄土地基(一定基础形式下)的震陷量作出预估和计算, 在二维和三维空间研究黄土地基和震陷特性.

1 黄土的本构模型

黄土的本构模型包括黄土的静本构模型、动本构模型和残余应变模型.

1.1 黄土的静本构模型(邓肯-张模型)

黄土的静本构模型可以用邓肯(Duncan)和张(Chang)^[1]提出的双曲线模型来表示. 对于黄土, 泊松比受侧压力的影响不大, 故而可以假设黄土的 μ 值是一个常量, 仅有 E 值随应力的变化而变化.

收稿日期: 2001-08-09

基金项目: 中国地震局兰州地震研究所青年地震科学基金项目(2001243); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2002036.

作者简介: 张冬丽(1974-), 女(汉族), 河南叶县人, 在职博士生, 主要从事黄土动力学及地基抗震方面的研究工作.

邓肯和张推出了切线弹性模量公式

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

式中: c 、 φ 为强度指标; k 、 n 为模量系数和模量指数; R_f 为破坏比; σ_1 为主压应力, σ_3 为围压应力; Pa 为大气压强. c 、 φ 、 k 、 n 和 R_f 均由试验确定. 在有限元计算中, 对于静力平衡方程, 用中点增量法求解.

1.2 黄土的动本构模型(Harding-Drnevich 的双曲线模型)

黄土的动本构模型可以采用 Harding-Drnevich 的双曲线模型来描述^[3,4]. 黄土的动力参数包括动弹性模量、动阻尼比、动变形(残余应变)和动强度等指标, 可以由振动三轴试验和循环三轴试验来测定. 在动力分析过程中, 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, 可用下式来表示

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

实验证明, 黄土的动剪切模量随剪应变的增大而减小, 阻尼比随剪应变的增大而增大. 而且不同的地震动荷载对于动剪切模量和阻尼比的影响不同. 因此在计算过程中, 直接采用试验得到的动剪模比(G/G_0)和阻尼比(γ)与剪应变(γ_d)的关系曲线. 动力平衡方程用 Wilson- θ 法求解.

1.3 黄土的残余应变模型

黄土的残余应变模型可以采用震陷经验公式来描述. 任一振次和任一固结应力下的黄土的残余估算应变公式^[3]为

$$\epsilon_{PN} = C [(\sigma_d - \sigma_{d0})/98]^B - f_1(\sigma_{1C}, S_1, S_2) \cdot f_2(N/10) \quad (3)$$

式中: ϵ_{PN} 表示动应力往返作用 N 次所产生的残余应变; σ_d 为黄土试样所受的动应力(kPa); σ_{d0} 为震陷起始动应力; σ_{1C} 为轴向固结应力; N 为振次; C 、 B 、 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.

经过高次项修正震陷曲线^[3]的高次失真现象:

$$\epsilon'_{PN} = \epsilon_{PN} + \left[\sigma_d - \left(\frac{\sigma_{1C}}{2} + \sigma_{d0} \right) \right]^3 \quad (4)$$

由此修正而得到的经验公式, 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 黄土的动力反应基本方程

为简化计算, 对地基土作以下假定:

- (1) 将土体看作是水平方向和地面以下深度方向均为无限延伸的非线性半无限体.
- (2) 假设在基础底面仅作用有垂直中心荷载, 且设其基底压力是均匀分布的.
- (3) 假设黄土为非饱和的, 不考虑孔隙水压力的上升或消散对震陷的影响.

考虑到黄土的惯性力和粘性阻力时, 则整个结构的动力基本方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (5)$$

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($[M]\{\ddot{u}\}$)和阻尼力

($[C]\{\dot{u}\}$) 的静力学平衡方程.

系统阻尼采用 Rayleigh 阻尼模式, 即

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6)$$

其中 $\alpha = \lambda_i \times \omega_i$, $\beta = \lambda_i / \omega_i$; 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.

设定边界条件. 假定土体底面为基岩输入面, 则底面为固定边界. 由于土体实际上是向水平向无限延伸的半无限体, 故而土体两侧边界为人工边界, 不发生侧向移动, 仅在垂直方向上有变形. 而地表面为自由边界.

3 二维地基震陷量计算实例与分析

3.1 地基模型的建立与影响条件

为了较为全面地研究西北黄土场地在不同基础形式、场地特性、固结压力和不同时期地震动荷载作用下的变形特性, 计算了两种基础形式(条形基础和筏形基础), 三种黄土场地(自由场地、水平均匀层强夯场地和非均匀层强夯场地), 六种固结压力(轴向压力分别为 100 kPa、150 kPa、200 kPa、250 kPa、300 kPa 和 350 kPa), 三个模拟地震烈度(采用兰州人造地震波, 50 年超越概率分别为 63.5%、10%、2%)及爆破试验波情况下的二维黄土地基震陷特性.

3.1.1 基础形式的选择

条形基础和筏形基础是西北黄土地区低层构筑物采取的最一般的浅基础形式. 对这两种基础下的土体进行划分时, 二维空间上仅存在土性参数的变异性. 为了便于对比研究, 参考《建筑地基基础设计规范(GBJ 7—89)》, 在计算时将条形基础的基础宽度取为 2 m, 埋深取 1.5 m, 基础和回填土的平均重度近似取为 20 kN/m³. 筏形基础的基础宽度为 14 m, 埋深亦取 1.5 m. 地基计算深度均取 15 m(将基础底面下 15 m 深处作为地震波输入面).

3.1.2 模拟地基剖面的确定

依上述地基剖面的尺寸, 选取三种黄土地基剖面(原状黄土场地, 水平均匀层强夯场地, 非均匀层强夯场地), 按地基土的容重、含水量、孔隙比和液限等指标进行分层(图 1(a)、(b)、(c)).

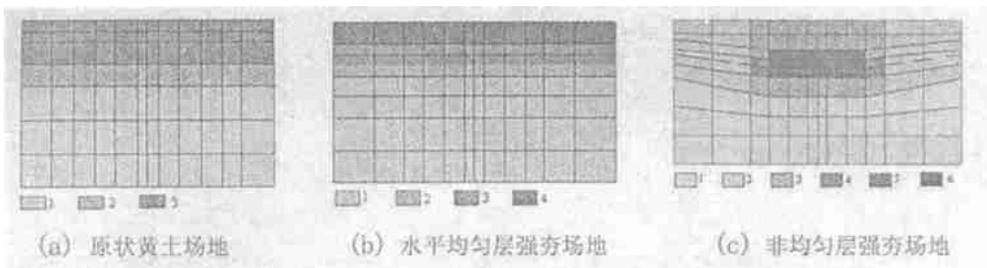


图 1 黄土地基剖面中有限单元网格划分

(图例 1~6 指土性参数不同的土层)

Fig. 1 The finite element net in profile of loess ground.

3.1.3 输入地震动时程

根据预测区的地震烈度、黄土分布的厚度及以往震害的特点, 选取适当的输入地震波. 程序计算中选取了四条地震动时程曲线, 其中三条为 50 年超越概率分别为 63.5%、10%、2% 的兰州人造波, 模拟地震烈度分别为 VII、VIII 和 IX 度的随机地震动荷载(表 1), 用以判断在某一

超越概率危险水平的潜在震源发生地震期间,得到某一具体工程场地在各地震烈度下的最大震陷量,进而对该场地的震陷特性做出评价.爆破试验波用于原状黄土场地的震陷计算,对比爆破试验现场震陷记录,检验计算结果的可靠性.按黄土地基地震反应计算的地震分量组合原则,计算中竖向加速度分量可以取为水平分量的三分之二.

表 1 计算所用地震动时程特征

项目	50 年超越概率		
	63.5%	10%	2%
模拟地震烈度	6.3	7.8	8.6
基岩峰值加速度/gal	47.35	165.6	389.68
持时/s	20.0	19.0	20.0
卓越周期	0.35	0.20	0.15
潜在震源	近震和远震	近震	近震

3.2 计算结果分析

通过有限单元法计算,针对以下几种因素影响下的震陷量结果进行了数值分析.

3.2.1 地基土性质和基础形式的影响

计算结果表明,原状非饱和黄土地基在 50 年超越概率为 2% 的地震动作用下,计算深度为 15 m 时,最大震陷量可以达到 19.7 cm(表 2),震陷系数在 0.5%~1.3% 之间;而经过强夯处理过的地基震陷系数在 0.2%~0.6% 之间,震陷量明显减小,抗震性显著提高.由表 2 可以看出,在黄土地区,地震烈度为 VII 度和 VIII 度时地震动所引起的强夯地基震陷最大值为 0.3~3.2 cm 左右,无震害;地震烈度为 IX 度时,震陷最大值为 8.9 cm 左右,震陷系数为 0.6%.其永久变形未超过容许范围,因而不会造成地基的沉陷性破坏而影响到上层建筑结构和稳定性.

表 2 三种场地震陷量对比表

50 年超越概率	基岩输入峰值 加速度/gal	垂直轴 向静压 力/kPa	计算深度为 15 m 的最大震陷量/cm					
			原状土 场地		均匀层强 夯地基		非均匀层 强夯地基	
			条形基础	筏形基础	条形基础	筏形基础	条形基础	筏形基础
63.5%	47.35	100	1.5	2.2	0.8	0.8	1.0	0.8
		150	2.2	2.9	0.7	0.9	0.8	1.0
		200	2.5	3.2	0.3	0.9	0.9	1.1
		250	2.5	3.4	0.6	0.9	0.9	1.1
		300	2.6	3.3	0.6	0.9	1.0	1.1
		350	2.7	3.2	0.6	0.8	1.0	1.3
10%	165.6	100	3.7	3.9	1.9	1.8	2.7	1.4
		150	5.6	5.3	1.8	2.3	2.4	1.9
		200	6.8	6.5	0.7	2.5	2.4	2.2
		250	7.6	7.7	1.4	2.7	2.6	2.4
		300	8.6	8.4	1.5	2.8	2.9	2.5
		350	9.3	9.7	1.7	2.4	3.2	3.1
2%	389.68	100	8.0	7.0	4.9	3.8	6.7	2.7
		150	12.7	10.7	3.9	5.2	6.2	3.6
		200	15.2	13.6	1.6	6.4	6.3	5.0
		250	16.9	16.3	2.9	7.2	6.6	5.7
		300	18.3	17.6	3.2	7.4	7.4	6.3
		350	19.7	19.3	3.3	5.9	8.4	8.9

3.2.2 水平层均匀强夯地基震陷特性

图2和图3是在50年超越概率2%的地震动作用下,轴向静压力为200 kPa时,条形基础和筏形基础形式下地基的水平变形和垂直变形等值线图。条形基础下,可以看出由于垂直轴向静压力在土体中产生附加应力的影响,地震作用后土体以基础中心轴线对称向两侧挤压,产生对称的而方向相反的水平向变形,最大震陷量产生于基础底面中心轴线上,向两侧扩展震陷量减小。对于条形基础,在2倍基础宽度处震陷已不明显。筏形基础下的震陷量在中心轴线上较大,这主要是由于在计算中施加了与条形基础相同的轴向静压力,而较大的基础底面积上作用的静压力在基础中心轴线上产生了较大的叠加应力所致。而若考虑相同的建筑物,则筏形基础下的静压力远小于条基下的静压力,其震陷量会较小。总之,对于强夯处理后地基土场均匀分布的工业与民用建筑,采用条形基础一般以满足抗震陷的要求。

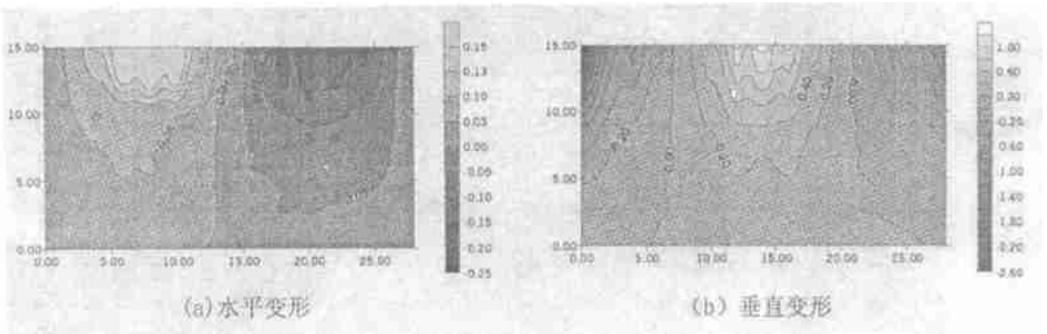


图2 条形基础下均匀地基的变形等值线图

Fig. 2 The contour of ground deformations under the strip foundation.

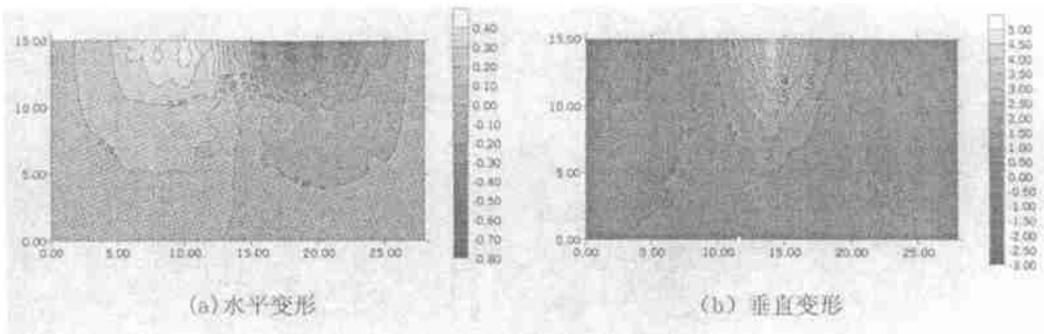


图3 筏形基础下均匀层地基的变形等值线图

Fig. 3 The contour of ground deformations under the plate foundation.

3.2.3 非均匀层强夯地基震陷特性

同等条件下,非均匀层强夯地基的震陷特性同水平均匀层强夯地基的震陷特性并无太大的区别。但就条形基础和筏形基础两种基础形式而言,筏形基础下地基的抗震性能明显比条形基础下地基的抗震性能好。表3以50年超越概率为2%的地震动作用下非均匀地基的震陷量为例,在二维地基剖面上选定地基表面的11个结点,对在不同基础形式和固结压力下的震陷量进行对比分析。可以看出,当垂直静压力相同时,筏形基础下11个结点处的震陷量的均方差和标准离差均比条形基础下的均方差和标准离差小,这说明筏形基础下地表面的沉降较条形基础下的均匀。原因在于地基土在基础底面和向两侧扩展分布的不均匀性。在基础底面及附近,土的密实度较大,向地基两侧土的密实度逐渐变小。这样,筏形基础底面面积大,虽然在基

基础面应力较集中, 但基础底面实际的震陷量与基础附近差别并不大, 有效提高了地基整体的稳定性.

表 3 50 年超越概率为 2% 的地震动作用下非均匀地基表面震陷量

基础形式	轴向静压力/kPa	地基表面结点震陷量/cm											均方差	标准离差
		20	30	40	50	60	70*	80	90	100	110	120		
筏形基础	100	-1.0	-0.4	0.1	0.7	1.5	2.7	1.5	0.7	0.1	-0.3	-1.0	0.4	1.2
	150	-1.3	-0.5	0.1	1.0	2.1	3.4	2.1	1.0	0.2	-0.5	-1.5	0.5	1.3
	200	-1.7	-0.8	0.1	1.2	2.8	4.9	2.7	1.2	0.2	-0.6	-1.8	0.6	2.1
	250	-2.1	0.9	0.1	1.5	3.3	5.8	3.2	1.4	0.2	-0.8	-2.0	0.7	2.5
	300	-2.5	-1.0	0.2	1.8	3.7	6.3	3.6	1.8	0.4	-0.8	-2.5	0.8	2.8
	350	-2.8	-1.3	0.0	1.5	4.4	8.9	4.3	1.4	0.1	-1.0	-2.6	1.1	3.5
条形基础	100	-2.0	-0.4	0.6	2.2	4.8	6.7	4.8	2.3	0.6	-0.4	-2.0	0.9	2.9
	150	-2.3	-0.7	0.8	2.6	5.8	6.2	5.9	2.5	0.5	-0.6	-1.9	0.9	3.1
	200	-1.8	-0.7	0.5	2.0	4.6	6.3	4.5	1.9	0.4	-0.5	-1.2	0.8	2.7
	250	-1.7	-0.6	0.5	2.1	4.7	6.6	4.6	2.0	0.4	-0.5	-1.3	0.8	2.7
	300	-2.0	-0.7	0.5	2.5	5.3	7.4	5.2	2.4	0.6	-0.4	-1.8	0.9	3.1
	350	-2.3	-0.8	0.6	2.7	6.0	8.4	5.9	2.4	0.5	-0.5	-1.9	1.1	3.5

* 结点编号, 70 号结点为基础底面中心

3.2.4 轴向静压力的影响

计算结果表明, 三种黄土地基在震动荷载作用下, 无轴向压力时未发生明显震陷, 最大震陷量仅在 0.001~0.01 cm 之间. 当土体表面有上覆压力时, 震陷量则骤然增大, 并且黄土地基的震陷量随轴向静压力的增大呈规律性变化. 图 4 为条形基础和筏形基础下, 非水平均匀层强夯地基遭受 50 年超越概率为 2%、10%、63.5% 的地震动作用下, 轴向静压力与地基震陷量之间的关系. 由图可以看出, 在两种基础形式下, 震陷量一开始随轴向静压力的增大而减小, 但当轴向静压力大于某一值时, 震陷量反而增大.

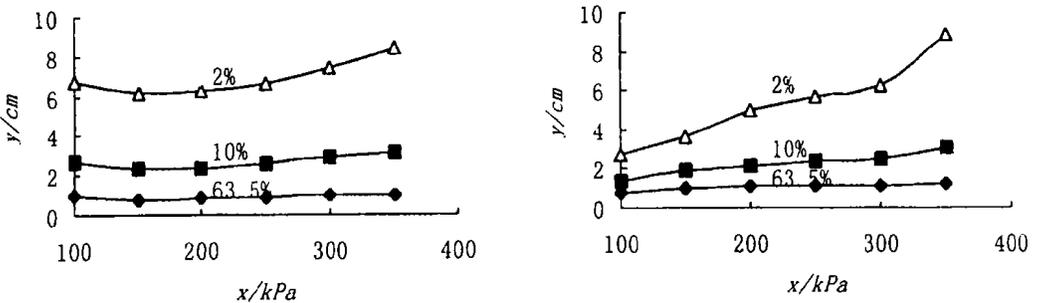


图 4 条形基础(左)和筏形基础(右)下轴向静压力(x)和地基震陷量(y)的关系

Fig. 4 The axial pressure (x) and subsidence (y) curves of strip (left) and plate (right) ground.

这种计算结果与已有的研究成果相符合, 原因可以从黄土地基的承载力方面作以解释. 黄土地基具有一定的承载力. 当地基地中的静压力小于地基承载力时, 静固结应力越大, 固结变形量越大, 黄土的大孔隙结构尚未破坏, 黄土处于压密阶段, 随固结应力的增大, 产生的震陷量逐渐减小; 当地基土中的静压力大于地基承载力时, 在静压力作用下, 黄土的大孔隙结构已遭到一定程度破坏, 黄土的部分胶结凝聚力已开始丧失, 黄土处于塑性变形阶段, 此时, 对于同一震动应力时程, 固结应力愈大, 孔隙结构的破坏程度越高, 震陷量也越大.

- [3, 4]
- []
- [1] [M] . : , 1988.
- [2] [M] . : , 1996.
- [3] [M] . , 1999.
- [4] Wang Lanmin, Zhang Zhenzhong Wang Jun. The dynamic constitutive model of loess under irregular seismic loading[A] . In: Proceeding of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering[C] , A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands Publishers 1992, 5: 2543—2548.
- [5] [J] . , 1995, 24(1): 91—96.
- [6] [M] . : , 1988.

THE APPLICATION OF THE FEM IN THE PREDICTION OF SEISMIC SUBSIDENCE OF LOESS GROUND

ZHANG Dong-li¹, WANG Lan-min¹, WANG Yu-hua²

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China; 2. Seismological
Bureau of Tianzhu Zangzu Autonomous County, Tianzhu 733200, China)

Abstract: In the study, the FEM (Finite-Element Method) are used to predict the seismic subsidence, and the relations, among the subsidence characteristic of loess ground and the site, the foundations, the soil dynamic property, can be studied quantitatively. As a method, it can provide the theoretical laws for seismic design and seismic resistance. At the same time, loess dynamics used in earthquake engineering is developed greatly.

Key words: FEM; Constructive models; Loess ground; Seismic subsidence