

塘沽新港地区建筑物不均匀震陷分析

孟上九¹, 刘汉龙¹, 袁晓铭², 高玉峰¹

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 采用不规则荷载下土的残余应变模型及土体逐步软化模型, 考虑土、结构及地震波波形的不均匀震陷的协同作用效果, 实现了对塘沽新港地区建筑物不均匀震陷的时程分析. 该分析方法不仅克服了以往震陷分析方法仅能计算均匀震陷而无法计算不均匀震陷的不足, 而且分析结果与现场实测结果较为接近.

关键词 塘沽地区; 唐山地震; 建筑物; 不均匀震陷分析

中图分类号 P315.8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2004)02-0175-04

震陷是指在地震作用下土层或地基发生的附加沉降, 有均匀震陷和不均匀震陷之分. 与均匀震陷相比, 不均匀震陷不但发生几率高, 而且危害性更大. 虽然预测不均匀震陷的大小具有重要的工程意义, 但至今还没有一种合适的预测分析方法. 唐山地震中天津塘沽软土地区建筑物发生了大量的不均匀震陷灾害, 平均幅值在 10 cm 左右, 但该地区的土层与建筑物荷载分布都比较均匀, 可能导致不均匀震陷发生的 2 个“内因”在此并不起控制作用, 因此, 应对输入地震波这一“外因”给予足够的关注. 研究表明, 地震波的不对称和不规则性对土的残余变形的发展影响很大^[1]. 一些震害现象、理论分析和试验结果^[2]显示, 建筑物的不均匀震陷是土层、建筑物荷载分配及输入地震波波形三者协同作用的结果. 在地震波水平剪切输入条件下, 建筑物对称基底的竖向地震反应(加速度和动应力)易呈反对称分布, 而且同输入波波形相近. 如果输入地震波正负不对称, 建筑物对称基底的竖向动压应力会有很大差别. 若地基土为灵敏度较高的软弱土, 这种由输入波波形引起的竖向动压应力差异很可能会使建筑物发生不均匀震陷. 在地基土和建筑物荷载分配都均匀的条件下, 输入波波形将对不均匀震陷起控制作用. 由于已有的分析方法不能考虑地震波波形的影响^[3], 所以对不均匀震陷无法给出合乎实际的计算结果. 考虑到塘沽震陷区土层和建筑物的有关计算资料比较详细, 现场不均匀震陷实测数据比较多, 本文利用考虑地震波波形特点的分析方法对该地区的不均匀震陷进行分析.

1 建筑物、土层及输入地震波的选取

1.1 建筑物选取

典型建筑物的选取与文[3]相同, 即选取塘沽地区望海楼住宅区的 4 层筏基建筑物和建港村住宅区的 3 层条基建筑物. 这两处建筑物的剖面及有限元剖分如图 1、图 2 所示. 计算中所取楼板和基础的密度为 2.5 t/m^3 , 墙体的密度为 1.9 t/m^3 , 居住间一侧空单元的密度为 0.23 t/m^3 , 楼梯间一侧空单元的密度为 0.17 t/m^3 , 土单元的密度为 2.0 t/m^3 , 楼板和墙的压缩模量为 180 MPa, 空单元的压缩模量为 80 MPa.

1.2 土层选取

分析中对望海楼和建港村住宅区选取相同的土层剖面, 土层的动力、静力及震陷参数见文[3].

1.3 输入地震波的选取

在唐山主震中没有获得塘沽震陷区的强震记录, 而输入地震波对不均匀震陷又有着重要影响, 所以选用何种地震波作为计算输入便成为计算中的一个关键问题. 研究表明, 位于发震断裂同侧的区域, 同一次地震地面运动卓越方向大体一致. 由于京、津、唐三地相距不远, 且前两者又都位于震源的西方(发震断裂同侧), 由此可推断唐山主震中京、津两地的地面运动方向具有一致性. 在唐山主震中于北京饭店测得了强震记录.

该记录波形正、负不对称,幅值较大的加速度脉冲集中在正半轴一侧,且该侧与现场北向一致.因此,本文以此记录作为计算输入,并按塘沽地区的地震烈度将加速度峰值调整为 $0.2g$.

2 不均匀震陷分析方法

采用平面动力有限元程序对上述两类典型建筑物的不均匀震陷进行分析.网格尺寸和计算参数与实际结构尽量保持一致,所做的简化处理与文[3]相同.所指不均匀震陷可理解为图1(b)中1与1'点或图2(b)中2与2'点竖向永久位移之差.计算结果并不局限于文中给出的2个计算模型,而是代表了这两处住宅群平均意义上的均匀震陷及不均匀震陷.

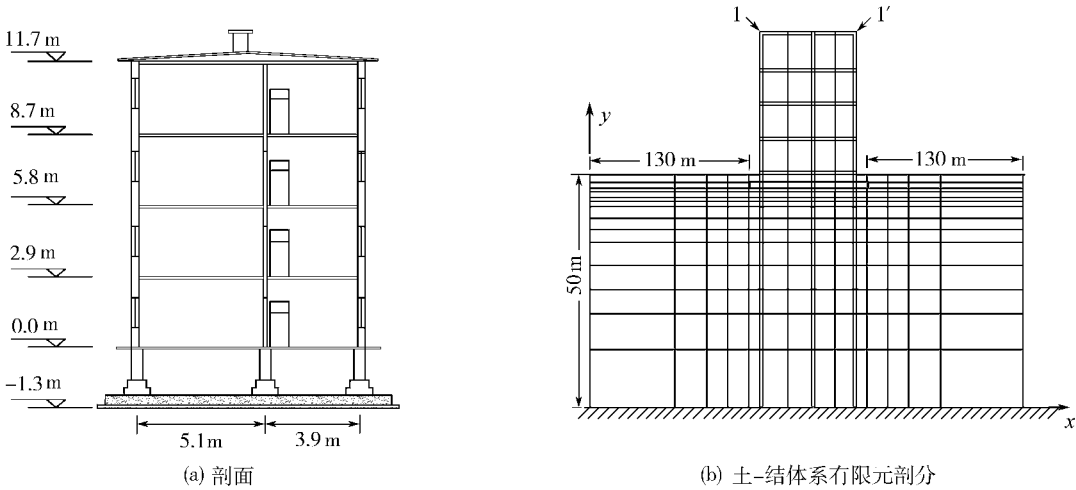


图1 望海楼建筑物剖面及土-结体系剖分示意图

Fig.1 Profile of Wanghailou building and grids of its soil-structure system

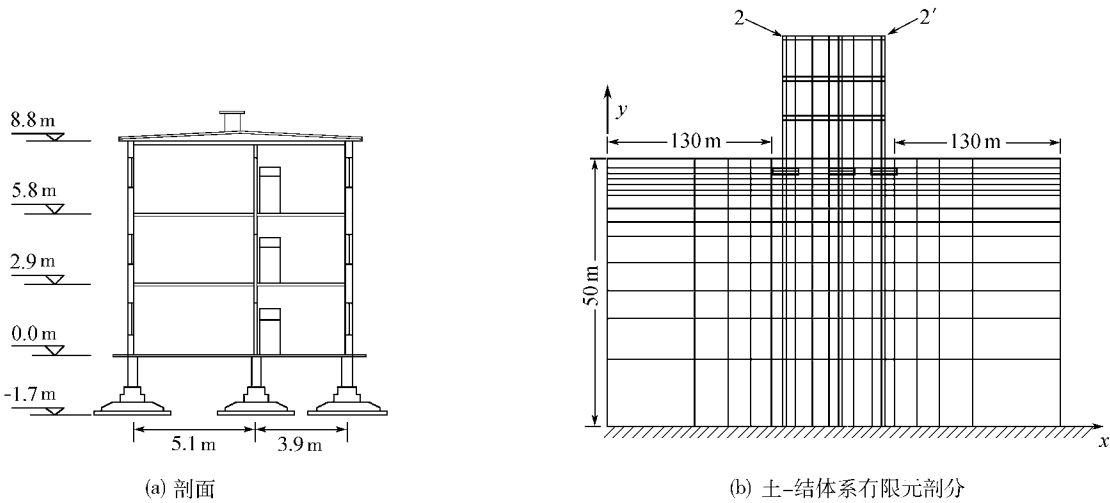


图2 建港村建筑物剖面及土-结体系剖分示意图

Fig.2 Profile of Jiangancun building and grids of its soil-structure system

2.1 不规则荷载下土的残余应变模型

通过动力分析可以获得每一土单元的动应力时程.输入不规则地震波后,建筑物基底动应力也是不规则的,故不规则动应力下土单元残余应变的合理估计是不均匀震陷分析的关键.为此,引入不规则荷载下土的残余应变增长模型.此模型放弃了以往震陷分析中对不规则应力进行等效处理的做法,并可实时地给出不规则动应力作用下土的残余应变.不规则应力完成正向加、卸载和负向加、卸载4个步骤后,模型的应力循环个数累加1次.在一个应力循环内正向加载只保留最大值,这可以滤除“连波”的干扰.不规则荷载下土的残余应变增量模型为

$$\epsilon_{pi} = \epsilon_{pi-1} + \left(\frac{\sigma_{di}}{\sigma_3 C_5} \right)^{\frac{1}{S_5}} \left(-\frac{S_1}{S_5} \right) \left(\frac{i-1}{10} \right)^{\frac{-S_1}{S_5}-1} \quad (i = 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

$$\epsilon_{pl} = 10 \left(\frac{\sigma_{dl}}{\sigma_3 C_5} \right)^{\frac{1}{S_5}} \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{-S_1}{S_5}} \quad (2)$$

式中： σ_{di} ——筛选后按序排列的动应力幅值； N ——动荷载总的循环作用次数； S_1, S_5, C_5 ——土壤震陷参数，其物理意义及对应不同土性的取值方法详见文[4]。

2.2 土体逐步软化模型

软化模型是计算土体在动荷作用下残余变形的常用模型。它的基本假定是，土体在地震等动荷作用下变软，模量降低，进而发生残余变形。可借助图 3 中的物理模型对此加以描述。即静变形主要由 A 弹簧承担，而 B 弹簧模量随振动不断减小，动荷下变形转由 B 弹簧来承担。软化模量计算式为

$$E_{ip} = \frac{1}{\frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_p}} \quad (3)$$

$$E_p = \frac{\sigma_d}{\epsilon_p} \quad (4)$$

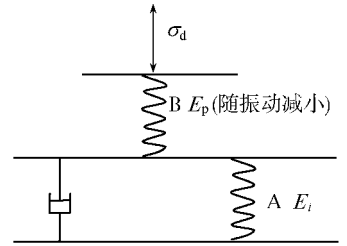


图 3 软化模型示意图

Fig.3 Sketch of softening model

式中： E_{ip} ——软化模量； E_i ——土单元初始模量； E_p ——动模量； σ_d ——土单元受到的动应力； ϵ_p ——残余应变。

以往软化模型在震陷分析中通常将不规则地震荷载等效为一定作用次数的正弦荷载，这忽略了基底两侧动应力差异带来的残余变形差异，因而既无法对不均匀震陷进行估计，也无法对变形进行时程分析。本文对软化模型进行了改进，即假定地震中土体在动荷作用下逐步软化，其表达式为

$$\frac{1}{E_{id}} = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_{di}} \quad (5)$$

$$E_{di} = \frac{\sigma_{di}}{\Delta \epsilon_{pi}} \quad (6)$$

式中： σ_{di} ——第 i 次循环作用的动应力； E_0 ——土单元初始模量； $\Delta \epsilon_{pi}$ ——通过式(1)得到的残余应变增量； E_{id} ——第 i 次动应力作用后的软化模量。

由于地基土单元的软化模量是依据其受到的实际动应力进行计算的，所以每一时刻各单元的残余应变是不相同的，即变形分析中考虑了应力波形不规则性的影响。

3 计算结果分析

望海楼和建港村建筑物对称顶点(1 点和 1' 点、2 点和 2' 点)的震陷曲线如图 4 所示。在地基土层和建筑物荷载都比较均匀的条件下，分析得到了两类典型建筑物的不均匀震陷。实测资料显示，4 层筏基建筑物的平均震陷要比 3 层条基建筑物的平均震陷大，两者差 15 cm 左右。计算值为 23 cm 左右，表明计算方法在一定程度上反映了两类典型建筑物的震陷规模和趋势。另外，计算得到的建筑物倾斜方向与宏观震害具有一致性。现场建筑物大多南侧震陷较大，即建筑物大多向南倾斜。计算中，由于输入地震波波形的不对称，且相对较大的加速度脉冲与计算模型的 x 方向(即北方向)一致，故建筑物会产生相对较大的南向惯性力。由于本文分析方法对这种不平衡惯性力导致的土体变形差异给予了考虑，所以算得了两类典型建筑物的不均匀震陷，且两类建筑物的震陷均为南侧顶点(1 点和 2 点)大些。如按文[3]方法进行计算，即不考虑输入波波形的不对称性，则上述不均匀震陷将无法获得。由于筏基有良好的整体性、较大的刚度和质量，故算得的筏基建筑物平均震陷较大，不均匀震陷较小。这一计算结果也与实测数据相符。

4 结 语

本文采用不规则荷载下土的残余应变模型及土体逐步软化模型，对唐山地震中塘沽新港地区典型建筑物的不均匀震陷进行了时程分析，并在土层和结构荷载都比较均匀的条件下，算得了两类典型建筑物的不均

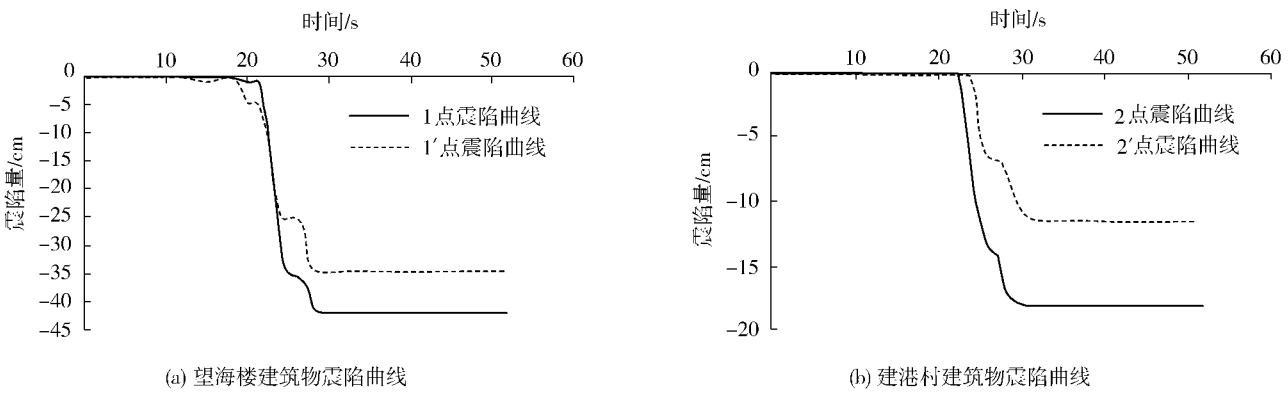


图 4 两典型建筑物震陷曲线

Fig.4 Curves of earthquake-induced settlement for two typical buildings

匀震陷.在不均匀震陷幅值、建筑物倾斜方向以及不同基础形式建筑物震陷规律等方面,本文分析结果均与现场实测数据相符.本文所提出的分析方法可以考虑输入地震波的波形特点,从而克服了原有方法仅能计算均匀震陷的不足.

参考文献:

[1] ISHIHARA K, KOYAMACHI N, KASUDA K. Strength of a cohesive soil in irregular loading[A]. In : HERION R , eds. 8thWorld Conference on Earthquake Engineering[C]. San Francisco : Sponsored by IAEE , 1984.7—14.

[2] 孟上九,袁晓铭,孙锐.建筑物不均匀震陷机理的振动台实验研究[J].岩土工程学报,2002,24(6):747—751.

[3] 石兆吉,郁寿松,翁鹿年.塘沽新港地区震陷计算分析[J].土木工程学报,1988(4):24—33.

[4] 郁寿松,石兆吉.土壤震陷试验研究[J].岩土工程学报,1989,11(4):35—44.

Earthquake-induced differential settlement of buildings in Tanggu area

MENG Shang-jiu¹, LIU Han-long¹, YAUN Xiao-ming², GAO Yu-feng¹

(1. Geo-technical Research Institute of Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;

2. Institute of Engineering Mechanics , China Seismological Bureau , Harbin 150080 , China)

Abstract : By adoption of the residual strain model of soil under irregular loading and the progressive softening model of soil and in consideration of the co-action of soil , structure , and seismic wave on the differential settlement , the process of the differential settlement of two buildings in Tanggu area is analyzed. The present method overcomes the disadvantage of the former methods , which are unable to calculate the differential settlement , and the result of the present method is in good consistence with the data from the field earthquake investigation.

Key words : Tanggu area ; Tangshan Earthquake ; building ; analysis of earthquake-induced differential settlement