

· 综述 ·

文章编号: 1006-7329(2000)01-0119-05

土—结动力相互作用研究综述(Ⅲ)

——考虑 SSDI 效应的结构抗震设计

119 - 123

25

李辉, 赖明, 白绍良
(重庆建筑大学 建筑工程学院, 重庆 400045)

TU435

摘要: 讨论了地震动的输入方式对 SSDI 的影响, 概要介绍了近二十年来国内外考虑 SSDI 的结构抗震设计规范现状及我们取得的最新研究成果。

关键词: 土—结动力相互作用; 结构抗震设计

中图分类号: TU318

文献标识码: A

地基—结构

~~土—地基—结构~~

土—结构

6 土—结动力相互作用地震动的输入 [1] - [5] [14] - [16][18] - [23]

图 20 说明在土—结动力相互作用问题中, 结构基础的运动实际上可看作由自由场地的地震动以及上部结构惯性力引起的附加地震动所产生。过去一些观点认为土—结动力相互作用体系地震动由桩尖输入, 而忽视场地土层对输入地震动的作用。受各种因素的制约, 目前获得的地震记录, 绝大多数为地表地震动或基岩地震动记录, 基岩面上不同深度土层处的地震记录 (DownHoll) 非常缺乏。因此, 在分析地基—结构体系动力相互作用时, 有必要首先计算自由场地的地震反应。

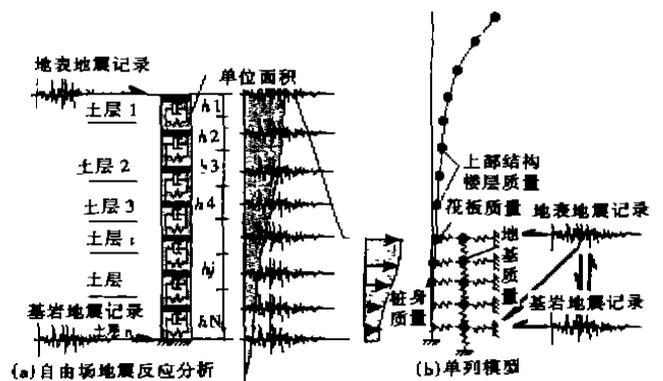


图 20 地震动的输入方式

目前, 土—结动力相互作用体系地震动的输入方式如图 20 所示。可见地震动的输入方式有地表地震记录地面输入、基岩地震记录基岩输入、地表地震记录基岩输入、以地表地震记录作为自由场地震反应的输入求解土层地震反应作为土—结相互作用体系的输入、以基岩地震记录为自由场地震反应输入求解土层地震反应作为土—结相互作用体系的输入等多种形式。对图 20(b) 所示地基土—带桩箱 (筏) 基—上部结构的简化单列质点系模型, 如果简单地将地表地震动或基岩地震动自桩尖处输入的方法是不足取的, 采用多点输入作为该土—结动力相互作用体系的输入更为合理。

为进一步说明输入方式对土—结相互作用计算结果的影响, 以图 6(b) 所示简化模型为例, 上部结构为 24 层, 桩长 18 m, 嵌岩桩径 0.8 m, 基岩面上覆盖土层厚度为 18 m, 覆盖土介质为中密粉细砂。采用 3 种输入方式, 如图 21 所示。输入地震波为 EL—Centro N.S 分量, 最大幅值为 341.7gal。

图 21(a) 为简化计算模型示意图。图 21(b) 假设地震波由桩尖处输入。此时作用在该体系各质点上的地震加速度与由桩尖处输入的地震加速度是相同的。图 21(c) 假设地震波由基岩输入。考虑

收稿日期: 1998-09-18

作者简介: 李辉 (1963-), 男, 四川人, 重庆建筑大学高级工程师, 博士生, 主要从事结构抗震研究。

基岩面上覆盖土层对输入地震波具有滤波和放大双重作用,实际输入位于基岩面上覆盖土层内的桩身各质点的地震波在幅值和频率特性上存在差异。通过自由场地震反应分析,计算出对应桩身各质点处的自由场地震反应作为桩身各质点处的地震动输入。以地面土单元的地震反应作为上部结构各质点地震反应的输入。显然,由于土层的放大作用,实际作用在上部结构上的地震动幅值将比基岩面上输入地震波大,土层的滤波作用将使作用在上部结构上的地震动的高频分量比基岩面上输入的地震波的高频分量减弱。

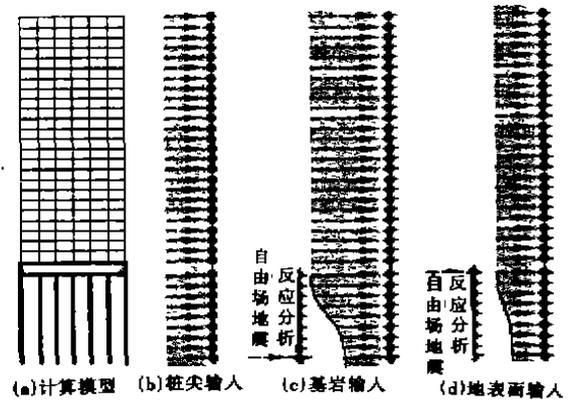


图 21 地震动输入方式的比较

图 21(d)所示为地震动由地表面输入的情况。由于地震波由地表面输入,位于地表面以下的场地土层对地表面输入的地震动具有削减作用,实际作用在地表面内土层中的桩身各质点处的地震动小于地表面输入的地震动。通过自由场地震反应分析,可求出相应桩身各质点处的自由场地震反应作为输入。以地面土单元的地震反应作为上部结构各质点地震反应的输入。

表 1 地震波不同输入方式的计算结果比较

项 目	由桩尖处输入	由基岩输入	由地表输入面
位移反应最大幅值	0.517	0.415	0.006
速度反应最大幅值	1.913	1.68	0.078
加速度反应最大幅值	7.916	10.17	2.509
水平地震作用最大幅值	522 000	750 000	400 000

按图 21 的三种地震动输入方式计算结果表明:考虑土—结相互作用的上部结构—带桩筏(箱)基—地基土体系进行地震反应分析时,地震动的输入方式不同,计算结果的差异是比较大的。

7 考虑土—结动力相互作用的结构抗震设计^{[6]~[13][24]~[27]}

由于土—结动力相互作用研究的复杂性、地基土参数取值的不确定性、基础形式的多样性,使得较多的研究工作还难于实际应用。土—结动力相互作用研究的最终目的是指导抗震设计。

过去,考虑土—结动力相互作用效应的主要是与核安全有关的抗震设计规范、标准;在这类规范中,一般要求同时采用地基阻抗法和完全有限元法进行分析。对一般房屋结构,绝大多数规范都只作了粗略的规定。如法国抗震规范(REGLES, PS, 1969)第 3.112—15 条规定,具有深基础的结构物,其地震力为浅基础的 0.9 倍,即考虑折减系数取 0.9;希腊抗震设计规范规定深基础的地震力为浅基础时的 0.83~0.91 倍;基础刚度大时为刚度小时的 0.77~0.82 倍;印度抗震设计规范规定采用筏式基础和连系梁的独立基础的建筑物的地震力分别为独立基础的 0.67~0.80 倍;中国《建筑抗震设计规范》GBJ 11—89 第 4.2.6 条规定:结构抗震计算,一般情况下可不考虑地基与结构动力相互作用的影响;Ⅲ、Ⅳ类场地上,采用箱基和刚性较好的筏基的钢筋混凝土高层建筑,若考虑地基与结构动力相互作用的影响,按刚性地基假定分析的水平地震作用,可根据结构和场地不同,折减 10%~20%。在日本,就建议作用在桩头上的水平地震作用可以按下式折减:

$$\eta = 1 - \sqrt{H} / \sqrt{D_r} \quad (1)$$

最大折减量为 70%。这里, H 是上部结构的高度, D_r 是埋入地下的基础的深度。

目前,世界上在抗震设计规范中对考虑土—结动力相互作用效应作出具体规定的只有美国

ATC3—06。规范中采用的是美国学者 Veletsos(1977)建议的方法,该方法的主要内容包括:

1) 土—结动力相互作用的效应主要影响体系的基本振型特征;考虑土—结动力相互作用效应的体系基本自振周期较基于刚性地基假定的上部结构的基本自振周期延长;考虑土—结动力相互作用效应的体系阻尼比较基于刚性地基假定的上部结构的阻尼比增大;

2) 土—结动力相互作用的效应可以通过将地基土—结构体系用刚性地基上的等效结构来代替的办法来加以考虑;

3) 等效体系的基本自振周期 T_1' 与阻尼比 β_1' 可由以下公式确定:

$$\left. \begin{aligned} T_1' &= T_1 \sqrt{1 + (k/k_r) (1 + k_r h^2/k)} \\ \beta_1' &= \beta_0 + \beta / (T_1'/T_1)^3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, T_1 为刚性地基假定下上部结构的基本自振周期; k 与 β 为刚性地基假定下上部结构的刚度和阻尼比; k_r 与 k_r 分别为地基弹簧的平移与回转刚度; β_0 为地基阻尼(辐射阻尼和材料阻尼)。

按照这个方法,只要给出与阻尼比 β_1' 相对应的地面运动反应谱,便可进行抗震分析计算了。实际上,土—结动力相互作用的效应不仅表现在使结构体系的周期与阻尼发生变化,还反映在对输入运动的改变。在 ATC3—06 中,后一种影响被忽略了。对于基础尺寸较大或埋入较深的结构,由于土—结动力相互作用中的运动相互作用的影响,实际的有效输入运动不同于自由场运动。不仅平移分量有变化,还将产生回转或/和扭转分量。

ATC3—06 建议的方法对于工程实际应用看起来是很方便的,易于为设计人员所掌握。因为只要对现有不考虑土—结动力相互作用效应的输入地面运动特征计入阻尼修正系数、用等效周期 T_1' 代替刚性地基假定下上部结构的基本自振周期 T_1 即可进行设计计算。应该注意的是:在进行常规的结构抗震设计时,结构的基本周期 T_1 及阻尼比 β 多是根据对已有房屋实测数据的统计平均建立起来的经验公式来确定的,尽管这些经验公式中并不包含地基土的特征参数,但这样确定的基本周期和阻尼比实际上并非刚性地基上的结构基本周期和阻尼比,它已经包含了土—结动力相互作用的影响,本身就是土—结动力相互作用体系的基本周期和阻尼比。

ATC3—06 建议的方法对我国从事结构抗震设计的工程技术人员来说仍显复杂。因为确定土—结动力相互作用体系的基本周期 T_1' 需要首先确定刚性基础上结构的刚度和阻尼比、地基弹簧的平移与回转刚度、地基阻尼比。由于实际工程结构地基、基础形式的多样性,使得地基弹簧的平移与回转刚度及地基阻尼比难于确定,因此要确定土—结动力相互作用体系的基本周期 T_1' 就比较困难。如何结合我国结构抗震设计规范对场地划分标准,提出更为恰当简洁的计算方法,我国广大地震工程学者对此作了不懈的努力。

与 ATC3—06 及土—结动力相互作用研究的已有成就相比,我国《建筑抗震设计规范》GBJ11—89 关于土—结动力相互作用效应的考虑是相当粗略的。存在的主要问题在于:当结构周期在 $6d/V_s$, $\omega \geq T_1 \geq 1.2T_g$ 范围内,在Ⅲ、Ⅳ类场地上的考虑土—结动力相互作用效应的水平地震作用折减系数为常值,这与目前已有的研究结果及震害调查的定性结论相悖,可以认为该规定是相当粗糙的;未对水平地震作用沿楼层的折减系数作出规定,认为水平地震作用在各楼层的折减量是相同的,没有区别均匀结构和非均匀结构地震作用在各楼层的折减量,大量研究成果表明对高层和超高层建筑,水平地震作用在各楼层的折减量是不相同的。

8 主要研究工作介绍^[17]

以下主要介绍我们在土—结相互作用方面所开展的研究工作及取得的主要研究成果。

如前所述,土—结动力相互作用问题包括运动相互作用和惯性相互作用两个方面。影响土—

结动力相互作用体系的因素较多,对土参数的计算取值争议较多,土-结动力相互作用体系模型化过程中对难于确定的因素作了必要的假设和简化,按场地类别选择地震波进行地震反应时程分析所得结果仍有较大的离散性,通过较少数量的地震反应分析,有可能得出与已有试验和震害调查相悖的结论。我们通过对土-结动力相互作用体系的理论分析和震害经验总结,对四种上部结构分别在 45~60 种场地条件下选择几十条地震波作为体系的输入进行大量的(6000 多个具体算例)地震反应分析计算,对得出的 6000 多个计算结果进行统计分析,以反应谱理论为基础,考虑场地条件、折减系数沿楼层高度分布的特点,结合国内外关于折减系数的已有结论以及我们的统计分析结果,提出考虑 SSDI 作用效应的水平地震作用折减系数 η 的半经验公式为

$$\eta_i = \left(\frac{T_i}{T_i'} \right)^{0.911 - \mu h_i(1 - \lambda_i)^b} \quad (3)$$

式中: T_i' 为考虑土-结动力相互作用的结构自振周期, s; T_i 为刚性地基条件下的结构自振周期, s; $\lambda_i = h_i/H$ 为第 i 楼层的高度系数; h_i 为第 i 层楼离地面高度; H 为结构物总高度; a 为与基础形式和结构类型有关的系数; 对抗震墙结构, $a = 3/2$; ($\eta_{\text{max}, \mu=0, \lambda_i=0} = 0.701$); 对框架-抗震墙结构, $a = 1$; ($\eta_{\text{max}, \mu=0, \lambda_i=0} = 0.789$); 对框架结构, $a = 1/2$; ($\eta_{\text{max}, \mu=0, \lambda_i=0} = 0.888$); b 为折减系数楼层分布系数; 一般取 $b = 1/2$; μ 为场地指数,按《构筑物抗震设计规范》GB50191-93 计算。

上述考虑土-结动力相互作用效应的水平地震作用折减系数的简化计算的半经验公式,与美国 ATC3-06 相比,比较合理和全面地反应了影响水平地震作用折减系数的主要因素。

参考文献:

- [1] 姜忻良,严宗达,李忠献. 多点输入的相邻结构-地基-土地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(4): 65~71
- [2] 李杰. 地震工程学基础理论研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 1995, 1~2
- [3] 关飞,胡聿贤. SH-波输入下土-结构相互作用影响参数的研究[J]. 地震工程与工程振动, 1989, 9(4)
- [4] 屈铁军,王前信. 多点输入地震反应分析研究的进展[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(5)
- [5] 廖振鹏,王皋. 论结构物的竖向地震输入[J]. 地震工程与工程振动, 1989, 3(2)
- [6] 杨翠如编译. 国际标准. 结构地震作用简介[S]. 工程抗震, 1995, (1)
- [7] 龚思礼. 我国建筑抗震的发展预测[J]. 工程抗震, 1988, (1)
- [8] 胡庆昌. 建筑结构的抗震概念设计[J]. 工程抗震, 1986, (1)
- [9] 侯忠良,周根寿. 构筑物抗震设计的新进展[J]. 工程抗震, 1992, (4)
- [10] 罗奇峰,谢礼立. 世界抗震设计规范发展趋势研究[J]. 地震工程与工程振动, 1993, 13(3)
- [11] [日]矢作枢,田克哉著. 万世昌译. 桩的抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社, 1990
- [12] 建筑抗震设计规范 GBJ11-89[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1989
- [13] 构筑物抗震设计规范 GB50191-93[S]. 北京:中国计划出版社, 1993
- [14] 胡聿贤编著. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 1988
- [15] 王松涛,曹资编著. 现代抗震设计方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1997
- [16] 范立础编著. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社, 1996
- [17] 李辉. 土-结动力相互作用[D]. 重庆建筑大学博士学位论文, 1999
- [18] F. Y. Cheng. Soil-Structure Interaction and Non-linear Site Response at the Differential Array Accelerograph Station[J]. Proceedings of Furth U.S. National Conferences on Earthquake Engineering, 1990, 2: 815~823.
- [19] L. L. Chu, A. Askar and A. S. cakmak. An Approximate Method for Soil-Structure Interaction for SH-Waves - the Born Approximation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1981, 9: 205~209
- [21] G. S. Chang. Centrifuge Modeling of Soil-Pile-Structure Interaction during Simulated Earthquake Loading[J]. Proceedings of Fourth U.S. National Conferences on Earthquake Engineering. May 20-29 1990 Ver. 2. pp805 - pp814
- [22] M. I. Todorovska. Effects of the depth of the embodiment on the system response during building-soil interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992. pp111 - pp123

- [23] Francisco J. Sanchez - Sesma. Site effects on strong ground motion[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1987, Vol. 6, No. 2. pp124 - pp132
- [24] George Gazetas and Nicos Markris. Dynamic Pile - Soil - Pile Interaction PART I : Analysis Axial Vibration[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20: 115 ~ 132
- [25] Ahmed W. Elgamal. Shear Hysteretic Elastic - Plastic Earthquake Response of soil System[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20: 371 ~ 387
- [26] Nicos akris and George Gazetas. Dynamic Pile - Soil - Pile Interaction. Part II Lateral and Seismic Response[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21: 145 ~ 162
- [27] George Mylonakis and Aspasia Nikolaou. Soil - Pile - Bridge Seismic Interaction Kinematics and Inertial Effects. Part I : Soft Soil[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1996, 26: 337 ~ 359

A Summary of Research on Soil - Structure Dynamic Interaction (III)——Structure Seismic Design

LI Hui LAI Ming BAI Shaoliang

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, Chongqing 400045, China)

Abstract: This paper discusses the influence of earthquake inputting in SSDI and summarizes the major states in seismic specification giving consideration to present states at SSDI with introduction of our new research findings in respect of SSDI.

Key Words: soil - structure dynamic interaction; structure seismic design

(上接第 99 页)

参考文献:

- [1] 刘式达,刘式适. 湍流的 KdV - Burgers 方程模型[J]. *中国科学 A 辑*, 1991, (9): 938 - 946
- [2] 管克英,高 歌. Burgers - KdV 混合型方程行波解的定性分析[J]. *中国科学 A 辑*, 1987, (1): 64 - 73
- [3] Amick CJ. bona JL. Schonbek. ME. Decay of some Nonlinear Wave Equations[J]. *J. Diff. Eqs.* 1989, (9): 938 - 946
- [4] 王明新. 非线性抛物物方程[M]. 北京:科学出版社, 106 - 114
- [5] 李志深,黄正洪. KdV - Burgers 方程的 Cauchy 问题[J]. *应用数学*, 1988, (3): 57 - 62

The Initial Value Problem of Nonlinear Evolution Equation

CHEN Yi-an¹, ZHOU Zhou-hua²

(1. Chongqing Institute of Commerce, Chongqing 400067, China; 2. Department of Applied Science and Technology, Chongqing Jianzhu University, Chongqing 400045, China)

Abstract: This paper discusses the initial value problem of the nonlinear evolution equation. The uniqueness and stability of the solutions for the problem are proved. It is also obtained that the solution of the problem blows up in a finite time.

Key Words: uniqueness; stability; blow up; Cauchy problem; KdV Burgers equation