

· 综述 ·

文章编号: 1006 - 7329(1999)05 - 0112 - 05

土 - 结动力相互作用研究综述(II)

——简化分析模型

TU318

112 ②②
-116

李 辉 赖 明 白绍良

(重庆建筑大学 建筑工程学院 400045)

摘 要 详细地分析了国内外关于土 - 结动力相互作用近二十种简化分析模型, 引入考虑土 - 结动力相互作用效应的平面和空间杆系模型。

关键词 土 - 结动力相互作用; 简化分析模型

中图法分类号 TU318

文献标识码 A

5 土 - 结动力相互作用的简化分析模型

图3所示为SR(Swing - Rocking Model)模型^[1]。该模型在结构基础部位分别设置与基础水平位移和转动有关的水平弹簧和转动弹簧的较为简单的计算模型, 主要用于了解土 - 结构动力相互作用对上部结构地震反应的影响。该模型基础处的输入地震动即为自由场地表面的加速度反应。为提高该模型高振型的分析精度, 可将水平、转动弹簧刚度作为频率的函数, 将部分地基土作为参振质量加到基础上予以考虑。该模型虽然应用了叠加原理, 但场地土只能在线性范围内考虑。由于该模型简单、实用, 仍不失为一种有效方法。

图4所示为土 - 结构动力相互作用分析的有限元模型^[1]。上部结构为梁元组成的框架, 质量集中在各个节点。结构下地基土部分采用平面应变单元, 其左右两侧用能量传递边界反应地震能量向自由场地的逸散效果; 面外用附加粘性边界模拟场地土的三次元效果, 地面为刚性边界。地震动可在自由场地任一深度处输入。将土单元底部边界改用粘性边界(日本: 奥田光男、T. K. Udaka、多田和美等)可减少土层计算深度, 节省计算单元。该模型适用于复杂的结构形式和场地条件, 有利于处理不规则的场问题及非线性问题, 且有较好的解的稳定性和收敛性。但要求计算机的容量大, 消耗机时多, 输入数据准备工作量大。

图5所示为土 - 结构动力相互作用分析的子结构模型^[1]。单元划分与有限元法相似, 该方法将

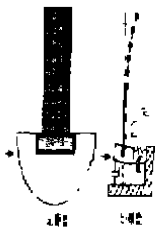


图3 SR模型

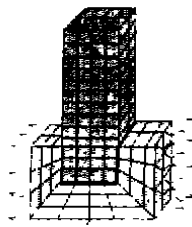


图4 有限元模型

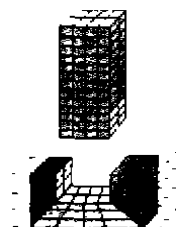


图5 子结构模型

收稿日期: 1998 - 09 - 14

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。

上部结构与地基在基础面处分为两个子结构,分别研究其反应,利用边界连续条件将两个子结构在它们的接触面处联系起来。早期对土-结动力相互作用的研究大多采用此法,目前该方法已能应用于三维地震动输入下的结构地震反应分析。子结构模型在频域可方便地用于阻抗函数法,处理线性地震反应分析;在时域可用于线性和非线性地震反应分析。除图 5 所示边界子结构模型外,还有连续子结构和体积子结构法。该方法可节省一半的计算机内存空间,计算速度较前述有限元法明显提高。但其输入数据准备工作量仍较大。

图 6 所示为桩基-上部结构分析中广泛采用的集中质量模型^{[2][3]}。图 6(b)为考虑地基弹簧不计基础参振质量的振动模型,又称 K 值模型。该方法不对地基作模型简化,而仅用地基弹簧联系桩和地基,使桩的振动分析简化,由于该方法对地基不作模型简化,难于直接求得与地基的耦合振动,但在桩本身的质量中已包括桩周土的参振质量,故可以把和桩一起振动的地基作为假想质量来考虑。

图 6(c)为考虑桩和地基耦合振动的振动模型,即潘占(Penzien)模型。该模型由左侧的桩身和与桩共位移的地基等效质量及地基弹簧组成。左侧桩身和右侧作剪切振动的天然地基的简化的质量-弹簧体系相互作用,通过等效水平弹簧联结在一起,该模型主要用于上部结构-桩基-地基土动力相互作用分析。但由于等效质量仅为一列,还必须将各层天然地基的反应值作为外力输入到等效质量上,故不能利用反应谱。

图 6(d)多并列质点系模型。为了弥补潘占模型的不足,考虑不但沿地基深度方向,而且沿水平方向,采用数列质量化的多列质点系模型。在该模型中,水平方向考虑地基质量的列数,可考虑以距桩最远的一列质量,如与先前计算的天然地基反应接近,便可确定该地基的列数及相互作用的范围。由于在该模型中不需向等效质量输入反应值,故可利用反应谱。

如果将图 6(d)多并列质点系模型简化成仅为一列质量,如图 6(e),称为单列模型。在该模型中,把相应等效地基的质量,估计在某一范围内并形成质点,合理选取地基质量和地基弹簧,就可以比较简单的模型,处理桩和地基的相互作用问题。

图 7 所示的混合模型^[4],地基及基础分析采用有限元法,将上部结构用多质点体系来代替,地基土体简化为平面应变问题,以有限元集合体代替。多质点体系与有限元集合体之间由刚性基础块联结。假设该体系在竖向只作刚体运动,包含有一刚体转动。该模型研究的重点在于了解土-结动力相互作用对地基基础的影响。

图 8 所示的杆系模型,将地基及基础均用杆单元来模拟,上部结构简化为标准的平面或空间杆单元,假设地基土水平成层,并沿深度方向划分为若干层,沿水平方向划分为若干单元,由此划分的土层单元用 Winker 弹性地基梁来代替,埋入土层中的桩简化为竖向杆单元并与弹性地基梁相耦合。目前对该模型的研究还有待进一步深入进行。

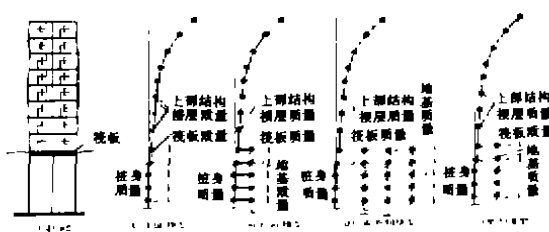


图 6 集中质量模型

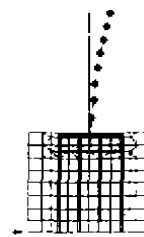


图 7 混合模型

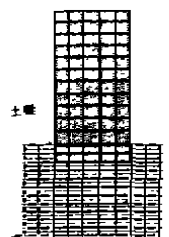


图 8 杆系模型

图 9 所示的模型,将地基土层简化为等效弹簧体系,不计土的参振质量,上部结构和地基可以简化为集中质量-弹簧体系,也可简化为平面杆模型;当考虑竖向振动时忽略水平力的作用,考虑水平力的作用时则忽略竖向力的作用,使问题尽可能简化。

图 10 为桥梁桩基平面和空间杆系模型^[2]。该模型用一个单质点体系来代表桥梁上部结构。借

鉴 J. Penzien 的方法, 用一个质量 - 弹簧体系来代表桩基础和地基, 建立了如图 10(a)、图 10(b) 和图 10(c) 所示桩基桥梁平面和空间杆系有限元力学模型。建立本模型时作如下假定: 假定土壤是有均匀各向同性的线弹性的水平层且阻尼与频率无关, 各层土壤的性质可以是不同的, 侧向土的性质在两个正交方向彼此无关, 土抗力在轴向、侧向和扭转方向不耦合, 且属于小位移问题; 等代土弹簧刚度由土介质的 m 值计算。将桩视为弹性地基上的连续梁; 而将桩群周围的土按照等刚度原则简化为抗压弹簧, 弹簧的一端固定、另一端与桩相连, 不考虑群桩中的各桩之间因土的共同振动而导致的相互影响, 这种简化计算模型可称为桩 - 土连续梁模型、如图 10(b) 所示。

桩 - 土连续梁模型没有考虑群桩间土共同振动的影响, 使桩与土的整体刚度降低, 计算出的地震响应一般偏小。当考虑各桩之间因桩尖土的共同振动而导致的相互影响时, 桩间的土可按等刚度原则模拟为二力杆, 这样一来, 在群桩之中, 桩与桩之间就有了纵横向的连接, 从而把整个桩土结构模拟成了一个空间刚架, 只是土模拟成二力杆而不能抗弯而已, 这种简化计算模型可称为桩 - 土空间刚架模型, 如图 10(c) 所示。

对于桩的抗震设计, 当采用钻孔灌注桩或桩间距较大时, 可采用桩 - 土连续梁模型; 对打入式挤密桩或桩间距较小时, 可采用桩 - 土空间刚架模型。

显然, 在群桩效应系数难于确定的情况下, 采用图 10(b) 的连续梁模型、图 10(c) 的空间刚架模型是较为恰当的; 在群桩效应系数比较确定的情况下, 图 10(a) 模型较为简单。

图 11 的弹性地基梁模型, 地基土被简化为一系列无质量等代弹簧, 与基础单元划分的节点相连, 弹簧的另一端固定。对有箱型基础的建筑物, 箱型基础可简化为板, 上部结构可简化为杆模型或平面单元, 整个箱基上部结构作为一个平面或空间体, 由地基土弹簧弹性支承在基岩上。该模型易于实现, 且用现有的动力有限元分析程序即可计算求解。

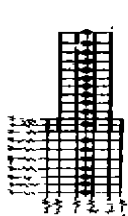


图 9 不考虑地基振动的模型

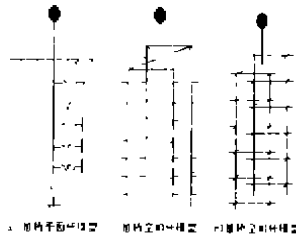


图 10 桥桩平面和空间杆系模型

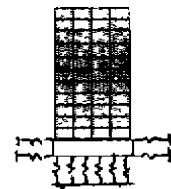


图 11 弹性地基梁模型

图 12 为 P. DANGLA 提出的一种考虑土 - 结构力相互作用的平面应变混合元模型^[5]。该模型通常包含两个子域: 第一个子域: 包括结构、基础和可能的非弹性非均质土壤、用有限元方法处理; 第二个子域由弹性均质土层所组成, 通常用边界元方法处理。该模型方法既可用于由 Luco 定义的人射 P 波、 SV 波; 也可适用于入射 Rayleigh 波。

图 13 为桩 - 土体系边界层模型^{[6][7]}。该模型在桩的周围假设有一圆环状的削弱区, 称为边界层, 如图 13 所示。为处理方便起见, 通常假设边界层和外层之间的界面在水平振动中始终保持为圆环状。边界层土的剪切模量、泊松比、质量密度及材料阻尼比分别用 G_1 、 γ_1 、 ρ_1 和 D_1 表示, 外层土的剪切模量、泊松比、质量密度及材料阻尼比分别用 G_0 、 γ_0 、 ρ_0 和 D_0 表示。内区的土可以具有较之外区为低的剪切模量和较高的材料阻尼比。调整边界层的厚度 t_m 及力学参数, 可以近似模拟桩周围高应变区内土的非线性特征以及土之间的滑移。为避免考虑应力波在边界层界面的反射, 假定内区的土是无质量的, 即 $\rho_1 = 0$ 。利用圆柱坐标内均匀介质的控制方程及内、外区的边界条件, 可导出带边界层的土的水平刚度。由于带边界层的土的水平刚度包含了内区和外区两者土的力学特性, 就使得采用近似方法模拟土的非线性、滑移及脱离成为可能。边界层内土的力学特性对于桩土体系动力反应是很敏感的。

图 14 为桩和群桩模型^{[8][9][10]}。在建立该模型时作如下假设: 土介质为线弹性水平成层半空间, 每一层土都是由一系列相互独立、向无限延伸的极薄水平弹性层所组成, 即作平面应变假设; 每层

土为均匀、各向同性的弹性层,土介质的特性在每一层内相同,但可随不同土层而变,最下面土层覆盖在刚性基岩面上;桩是完全弹性的,竖直埋入土中,它的截面是圆形的,桩与桩周围土完全接触;承台是刚性的;当为摩擦桩时,桩尖以下的土层用土柱代替;桩间土按等刚度原则模拟为二力杆,土的参振质量计入桩身质量中。通过上述假设,群桩-土体系可用空间刚架来模拟。

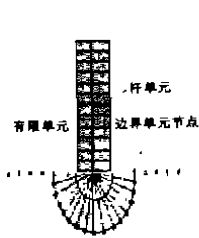


图 12 混合元模型



图 13 边界层模型

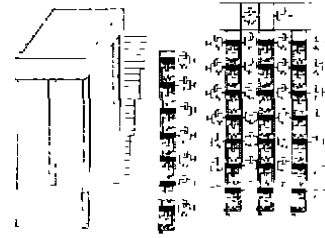


图 14 桩和群桩模型

图 15 为上部结构-带桩筏(箱)基-地基土考虑土-结动力相互作用的简化分析模型^[11]。假设箱基或筏板是刚性的;与图 6 所示集中质量模型不同之处在于考虑了地基土对水平和竖向振动的贡献,即是计入了箱基或筏板与地基土的相互作用的影响。

图 16 为具有圆形基础的上部结构-基础-地基土整体分析模型,圆形基础以下的土层作为成层土柱来模拟,这种模型的解多以解析解的形式出现。对于从宏观上了解土-结动力相互作用的效果是一种较简化的方法。

图 17 桥涵隧洞考虑土-结动力相互作用的混合模型。该方法是有限元法和边界元法相耦合的一种混合模型。该模型包含三个部分:隧洞洞壁用有限元法来处理;洞壁与周围土体之间的削弱层用细化有限单元来处理,也可用边界层来处理;周围土体用粗放的有限元来模拟;半无限地基地震动输入边界用边界元法处理。

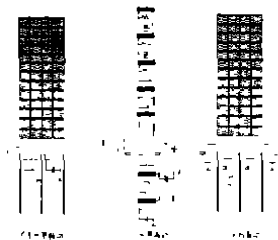


图 15 桩箱(筏)基模型

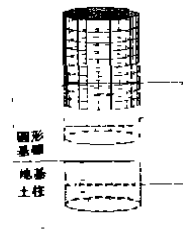


图 16 圆地基模型

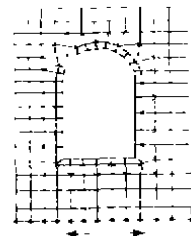


图 17 隧洞模型图

图 18 为水坝与地基动力相互作用的混合模型。与图 12 类似该模型也可分为两个子域:第一个子域包括坝体、基础和可能的非弹性非均质土壤,用有限元方法处理;第二个子域由弹性均质土层所组成,通常用边界元方法处理。

图 19 为埋置式连续管网系统或生命线工程与地基动力相互作用的模型。

土-结动力相互作用模型比较多,采用什么样的模型,还取决于预期研究的目的。如果考虑土-结动力相互作用研究的目的在于了解它对结构地震反应的影响,则上述方法均可采用。如果考虑土-结动力相互作用研究的目的还在于了解它对土体地震反应的影响,则可采用图 4、图 5、图 7、图 8、图 12、图 13、图 16、图 17、图 18、图 19。

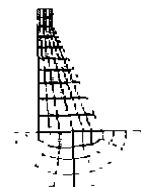


图 18 水坝有限元模型

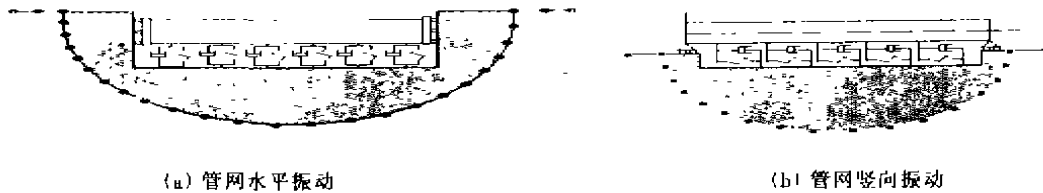


图 19 埋置式连续管网系统与地基动力相互作用的简化模型

参考文献

- [1] 王松涛, 曹 资. 现代抗震设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- [2] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996
- [3] [日] 矢作枢, 田克哉. 万世昌译. 桩的抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990
- [4] 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989
- [5] K. Urao, K. Masuda etc. Dynamic Behaviors of a Composite Foundation[C]. Earthquake Engineering, Tenth World Conference, 1992: 1801 ~ 1806
- [6] L. EL. Hifnawy etc. Seismic Response of Buildings with Pile uplift[C]. 5TH Canadian Conf. Earthquake Engineering, 1987: 181 ~ 190
- [7] K. Kobayashi. Pile - Soil Modeling in Liquefied Sand Layer in Seismic Design Method[C]. 5TH Canadian Conf. Earthquake Engineering, 1987: 1743 ~ 1748
- [8] George Gazetas and Nicos Markris. Dynamic Pile - Soil - Pile Interaction PART I: Analysis Axial Vibration[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp115 - p132, 1991.
- [9] 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
- [10] Amir M. Kaynia. etc. Dynamics of piles and pile groups in layered soil media[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1991, 10: 386 ~ 401
- [11] M. Novak. Base - Isolated Building with Soil - Structure Interaction[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, pp751 - pp765, 1989

A Summary of Research in Soil - Structure Dynamic Interaction (II) ——Simplified Analysis Model

LI Hui LAI Ming BAI Shaoliang

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

Abstract This paper discusses in detail the twenty simplified models in Soil-Structure Dynamic Interaction (Abbreviation SSDI) at home and abroad. Some new models about plane and space pole system were introduced.

Key Words Soil-Structure Dynamic Interaction; simplified analysis model