

文章编号:1000-1301(2010)04-0024-07

土-结构体系的分枝模态与约束模态混合二步法

王菲, 姜忻良

(天津大学 建筑工程学院/滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要:为了在结构设计过程中考虑土-结构非线性相互作用的影响,在线性-非线性混合的约束模态法以及分枝模态法的基础上,提出了适用于土-结构非线性相互作用体系的分枝模态与约束模态的混合方法,该方法既可考虑土体和结构的非线性特性又便于考察土-结构相互作用对上部结构的影响。在分枝模态与约束模态混合方法的基础上,进一步提出了混合二步分析法,并将其应用到地基土-框架结构地震响应分析中,算例结果表明,混合二步分析法在实现上部结构和地基土分开计算的同时,还能够考虑结构与地基土的材料非线性特性,有利于采用专业设计软件仅通过对上部结构进行分析来考虑土-结构相互作用的影响,为实际工程计算考虑土-结构相互作用的影响提供了便利的条件。

关键词:分枝模态法;约束模态法;混合二步分析法;土-结构相互作用体系;势能判据截断准则;非线性

中图分类号:TU311.4

文献标志码:A

Analysis of soil-structure interaction system based on mixed branch mode and constrained mode two-step method

WANG Fei, JIANG Xinliang

(School of Civil Engineering, Tianjin University/Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structure and Safety
(Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to introduce the effect of nonlinear soil-structure interaction during the structure design process, based on the branch mode synthesis method and the mixed linear-nonlinear constrained mode synthesis method, the mixed branch mode and constrained mode method suitable for non-linear soil-structure interaction system is proposed. The material nonlinearity of structure and soil could be considered effectively by using this method, and it is easier to inspect the influence of soil-structure interaction on superstructure. Furthermore, a mixed two-step method is also proposed on the basis of the mixed branch mode and constrained mode method and applied to the seismic analysis of soil-frame interaction system. The results indicate that the mixed two-step method could analyze superstructure and soil separately in consideration of material nonlinearity of structure and soil. This method is also beneficial to consider the effect of soil-structure interaction by only analyzing the superstructure model while using the professional design programs. It provides convenient method to consider the effect of soil-structure interaction during practical engineering calculation.

Key words: branch mode synthesis method; constrained synthesis method; mixed two-step method; soil-structure interaction system; mode cut-off criterion based on potential energy criterion; nonlinear

收稿日期:2010-03-18; 修订日期:2010-04-20

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90815025);国家自然科学基金项目(50878143);天津市应用基础及前沿技术研究计划项目(09JCZDJC25300)

作者简介:王菲(1981-),女,博士研究生,主要从事结构与土相互作用以及结构抗震研究. E-mail:wendy9724_cn@sina.com

引言

地震是当今世界上人们面临的巨大自然灾害,强震作用会使建筑物发生严重的破坏和损毁。而建筑物所以产生震害,主要是由于地面运动的结果。人们早已认识到震害与地基条件密切相关,如软土地基会对地震动起放大作用或滤波作用、土层液化会严重加剧建筑物震害^[1]。因此,在对建筑结构进行设计和研究时,考虑土-结构相互作用的影响是十分必要的。但由于模拟过程中土体单元往往数目庞大,且土体具有强非线性的特性,故通常会耗费大量的计算成本。针对这一问题,文献[2]提出了线性-非线性混合的约束模态法,该方法在降低体系自由度的同时可有效地考虑土体的材料非线性,是求解土-结构相互作用体系动力问题的有效方法。然而,采用线性-非线性混合约束模态法进行求解时,必须建立完整的土-结构相互作用体系模型,即模型在包含上部结构的同时,也需要包含地基土的部分,而现有专业设计软件考虑土体建模还存在一定困难^[3],这使得将土-结构相互作用的影响引入设计过程中受到了限制。

针对上述问题,文献[4,5]曾在分枝模态法^[6,7]的基础上提出分枝模态二步法的理论。该方法利用惯性耦合的概念^[8],将上部结构与地基土分为不同分枝,并针对各分枝采用其适用的专业分析软件分开进行计算,能够使自由度大幅度缩减而又不失其精度。然而,分枝模态二步法虽然可以充分利用现有的成熟可靠的建筑结构设计软件来考虑土-结构相互作用的影响,但是这一方法却无法考虑土体和结构的材料非线性特性,使得计算结果的适用范围受到了限制。

为此,本文在线性-非线性混合约束模态法以及分枝模态法的基础上,提出了适用于非线性土-结构相互作用体系的分枝模态与约束模态的混合方法。为了便于分析上部结构在考虑土-结构相互作用影响下的动力响应,进一步在该混合方法的基础上提出了分枝模态与约束模态混合二步分析法。该方法仅需得到相互作用耦合项并对地震动进行修正,进而利用修正地震动进行加载求解,最终可仅通过对上部结构的有限元模型进行分析即可考虑土-结构相互作用的影响。最后,将该方法应用到地基土-框架结构相互作用体系的动力分析问题上,以进一步验证本文方法的有效性。

1 分枝模态与约束模态的混合方法

分枝模态与约束模态的混合方法是根据问题的特点在各子结构之间分别采用分枝模态法与约束模态法,并将其综合进而求解的过程。

1.1 子结构的划分

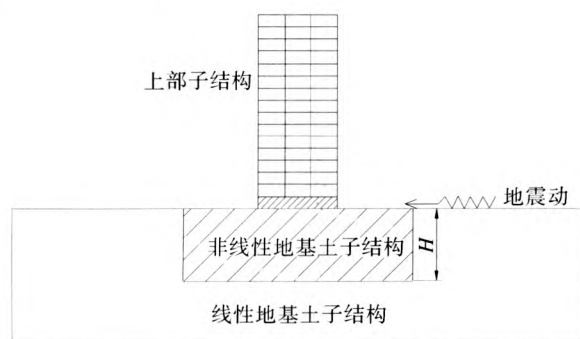


图1 子结构划分示意图

Fig. 1 Diagram of substructures

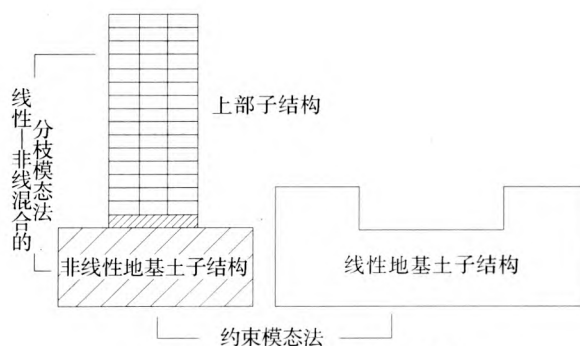


图2 各子结构采用的模态方法

Fig. 2 Mode synthesis methods adopted by each substructure

由于与结构相邻的地基土在地震激励作用下会较易进入非线性阶段,因此将土-结构相互作用体系划分为线性地基土子结构、非线性地基土子结构以及上部子结构,如图1所示。

对各子结构分别采用适当的方法进行分析,对于上部子结构和非线性地基土子结构采用分枝模态法原理进行处理,以便更有效地得到上部结构与非线性地基土交界面上的耦合项,而非线性地基土子结构与线性地基土子结构采用约束模态法进行处理,即在耦合边界上采用固定界面,便于对线性地基土子结构进行自由度的缩减,划分区域如图2所示。

1.2 分枝模态子结构分析

参照图2所示,对上部子结构和非线性地基土子结构采用分枝模态法进行分析。与传统的分枝模态法不同,为考虑土体的材料非线性,这里并不对非线性地基土进行缩减,而仅对线性上部子结构进行缩减,上部子结构和非线性地基土子结构在物理及广义坐标下的运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_s & \phi_s^T M_s R \\ R^T M_s \phi_s & M_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{u}_D \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_s & 0 \\ 0 & C_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{u}_D \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{K}_s & 0 \\ 0 & K_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_s \\ u_D \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ f_D \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\bar{M}_s$ 、 $\bar{C}_s$ 、 $\bar{K}_s$ 、 f_s 、 q_s 为上部子结构经缩减后的广义质量、阻尼、刚度矩阵、外部荷载向量以及广义位移向量, M_D 、 C_D 、 K_D 、 f 、 u_D 为非线性地基土子结构的质量矩阵、阻尼、刚度矩阵、外部荷载向量以及物理坐标下的位移向量, ϕ_s 为上部子结构的主模态矩阵, R 为上部结构刚体模态矩阵,可由基点法求得^[5]。

由于非线性地基土子结构包含了与线性地基土子结构相耦合的边界节点自由度,因此进一步将式(1)中与非线性地基土单元相关的各矩阵按照内部节点(用 I 表示)和边界节点自由度(用 B 表示)进行分块处理,则式(1)可写为:

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_s & \phi_s^T M_s R^I & \phi_s^T M_s R^B \\ R^{IT} M_s \phi_s & M_D^{II} & M_D^{IB} \\ R^{BT} M_s \phi_s & M_D^{BI} & M_D^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{u}_D^I \\ \ddot{u}_D^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_s & 0 & 0 \\ 0 & C_D^{II} & C_D^{IB} \\ 0 & C_D^{BI} & C_D^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{u}_D^I \\ \dot{u}_D^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{K}_s & 0 & 0 \\ 0 & K_D^{II} & K_D^{IB} \\ 0 & K_D^{BI} & K_D^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_s \\ u_D^I \\ u_D^B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ f_D^I \\ f_D^B \end{Bmatrix} \quad (2)$$

1.3 约束模态子结构分析

对于线性地基土子结构以脚标 L (Linear) 表示,对其采用约束模态法进行自由度的缩减,同样将其特性矩阵按照内部节点和边界节点分块处理,则其在物理坐标下的运动方程为:

$$\begin{bmatrix} M_L^{II} & M_L^{IB} \\ M_L^{BI} & M_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_L^I \\ \ddot{u}_L^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_L^{II} & C_L^{IB} \\ C_L^{BI} & C_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_L^I \\ \dot{u}_L^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_L^{II} & K_L^{IB} \\ K_L^{BI} & K_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_L^I \\ u_L^B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_L^I \\ f_L^B \end{Bmatrix} \quad (3)$$

线性地基土子结构坐标变换矩阵 T 由边界约束的子结构主模态矩阵 Φ_K 和约束模态矩阵 Φ_C 组成^[9,10]:

$$T = [\Phi_K \quad \Phi_C] = \begin{bmatrix} \phi_k & \phi_c \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad \phi_c = -K_{II}^{-1} K_{IB} \quad (4)$$

其中, ϕ_k 是截取前 k 阶子结构主模态 ϕ_n 获得的, ϕ_n 可由特征方程: $(K_{II} - \lambda M_{II}) \phi_n = 0$ 求得。故线性地基土子结构的位移可表示为:

$$\begin{Bmatrix} u_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_L^I \\ u_L^B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_k & \phi_c \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_L^I \\ q_L^B \end{Bmatrix} = T q_L \quad (5)$$

其中 $q_L = \{(q_L^I)^T \quad (q_L^B)^T\}^T$ 为线性地基土子结构的广义坐标。将式(5)代入式(3),并在方程两侧左乘 T^T (T 的转置),得到线性地基土子结构在广义坐标下的运动方程:

$$\begin{bmatrix} I & \bar{M}_L^{IB} \\ \bar{M}_L^{BI} & \bar{M}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_L^I \\ \ddot{q}_L^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_L^{II} & \bar{C}_L^{IB} \\ \bar{C}_L^{BI} & \bar{C}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_L^I \\ \dot{q}_L^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} A_L & 0 \\ 0 & \bar{K}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_L^I \\ q_L^B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_L^I \\ f_L^B \end{Bmatrix} \quad (6)$$

1.4 分枝模态与约束模态的综合求解

进一步结合耦合边界上的位移和力的协调关系:

$$f_L^B = -f_D^B, \quad u_D^B = u_L^B = q_L^B$$

将式(2)及式(6)按照对号入座的方式进行综合,可得到整体体系运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_s & \phi_s^T M_D^H R^I & 0 & \phi_s^T M_s R^B \\ R^{I^T} M_s \phi_s & M_D^H & 0 & M_D^{IB} \\ 0 & 0 & I & \bar{M}_L^{IB} \\ R^{B^T} M_s \phi_s & M_D^{BI} & \bar{M}_L^{BI} & M_D^{BB} + \bar{M}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{u}_D^I \\ \ddot{q}_L^I \\ \ddot{q}_L^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_D^H & 0 & C_D^{IB} \\ 0 & 0 & C_L^H & C_L^{IB} \\ 0 & C_D^{BI} & C_L^{BI} & C_D^{BB} + \bar{C}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{u}_D^I \\ \dot{q}_L^I \\ \dot{q}_L^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{K}_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_D^H & 0 & K_D^{IB} \\ 0 & 0 & A_L & \bar{C}_L^{IB} \\ 0 & K_D^{BI} & 0 & K_D^{BB} + \bar{K}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_s \\ u_D^I \\ q_L^I \\ q_L^B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ f_D^I \\ f_L^I \\ f_L^B + f_L^B \end{Bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,方程中整体体系广义质量矩阵中的 $\bar{M}_s$ 为上部子结构的广义质量矩阵,它体现了对上部结构自由度的缩减,而其矩阵中的非对角线项 $\phi_s^T M_s R^I$ 以及 $\phi_s^T M_s R^B$ 即为考虑了土-结构相互作用影响后产生的耦合项,这时的相互作用既包含了非线性地基土对上部结构的影响,也包含了线性地基土对上部结构的影响。

若考虑上部结构为非线性时,上部结构自由度则无法进行缩减,上部子结构也需在物理坐标下进行求解,此时式(1)可改写为:

$$\begin{bmatrix} M_s & M_s R \\ R^T M_s & M_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_D \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & C_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_D \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_D \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ f_D \end{Bmatrix} \quad (8)$$

将式(8)代替式(1)后继续按照上述过程进行综合求解,即可得到非线性上部结构及非线性土体相互作用体系的动力响应。

另外,在上述求解过程中涉及如何从完备的子结构主模态中截取 ϕ_s 、 ϕ_k 以形成坐标变换矩阵的问题,体系自由度的缩减就体现在这一过程中,分析结果的精确性也往往决定于模态截断方法的选择^[11]。本文对子结构主模态的截断拟采用基于势能判据的截断准则^[12]。

综上所述,对线性上部子结构和非线性地基土子结构采用线性-非线性混合的分枝模态法,便于考察上部结构在其基底的动力响应;对非线性地基土子结构和线性地基土子结构则采用约束模态法,便于更复杂情况的子结构划分及界面处理。两种方法能够在广义坐标和物理坐标下进行良好的结合,适用于土-结构相互作用问题的求解。

2 混合二步分析法

上述提出的分枝模态与约束模态的混合方法,缩减了线性上部结构与线性地基土的自由度,提高了计算效率,为了进一步提高计算效率及便于在实际工程中的应用,提出一种基于分枝模态与约束模态混合方法的二步分析法。

2.1 缩减上部结构自由度的二步分析法

求解式(7)并返回物理坐标,就能求得所需的参数,但这些参数一般不能满足专业设计的需求(如建筑结构中的配筋等)。深入分析式(7)可知,非对角项 $\phi_s^T M_s R^I$ 以及 $\phi_s^T M_s R^B$ 是考虑土-结构相互作用的耦合项,若将式(7)改写为如下式(9)、(10)的形式,

$$\bar{M}_s \ddot{q}_s + \phi_s^T M_s R^I \ddot{u}_D^I + \phi_s^T M_s R^B \ddot{q}_L^B + \bar{C}_s \dot{q}_s + K_s q_s = f_s \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} R^{IT} M_s \phi_s & M_D^{II} & 0 & M_D^{IB} \\ 0 & 0 & I & \bar{M}_L^{IB} \\ R^{BT} M_s \phi_s & M_D^{BI} & \bar{M}_L^{BI} & M_D^{BB} + \bar{M}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{u}_D^I \\ \ddot{q}_L^I \\ \ddot{q}_L^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & C_D^{II} & 0 & C_D^{IB} \\ 0 & 0 & \bar{C}_L^{II} & \bar{C}_L^{IB} \\ 0 & C_D^{BI} & \bar{C}_L^{BI} & C_D^{BB} + \bar{C}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{u}_D^I \\ \dot{q}_L^I \\ \dot{q}_L^B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & K_D^{II} & 0 & K_D^{IB} \\ 0 & 0 & A_L & 0 \\ 0 & K_D^{BI} & 0 & K_D^{BB} + \bar{K}_L^{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_s \\ u_D^I \\ q_L^I \\ q_L^B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s^I \\ \bar{f}_L^I \\ \bar{f}_L^B + f_L^B \end{Bmatrix} \quad (10)$$

式(9)可进一步改写为如下形式:

$$\bar{M}_s \ddot{q}_s + \bar{C}_s \dot{q}_s + \bar{K}_s q_s = \bar{f}_s - \phi_s^T M_s R^I \ddot{u}_D^I - \phi_s^T M_s R^B \ddot{q}_L^B \quad (11)$$

不难发现,式(11)即表示上部结构在广义坐标下的运动方程,式中上部结构与线性、非线性地基土子结构之间的耦合项 $-\phi_s^T M_s R^I \ddot{u}_D^I - \phi_s^T M_s R^B \ddot{q}_L^B$ 是作为荷载项出现的,由于已求得整体体系的运动方程式(7),故式(11)自然满足。因此在混合二步分析法中,可首先对式(7)进行求解,得到耦合项 $\phi_s^T M_s R^I \ddot{u}_D^I$ 和 $\phi_s^T M_s R^B \ddot{q}_L^B$ 后,将耦合项移到方程的右边,以荷载的面目出现,与原地震动一起形成新的地震动,称为修正地震动。至此,完成了混合二步分析法中的第一步分析。

在第二步分析中,便可利用成熟的专业设计软件建立上部结构的初始模型,如图3所示。按照式(11)采用修正地震动进行加载计算,即可求得考虑土-结构相互作用影响的上部结构地震响应结果。

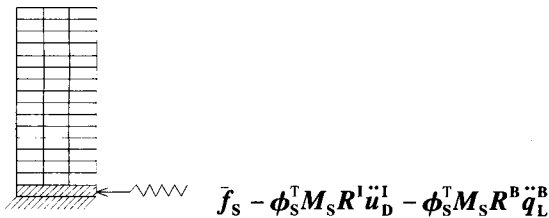


图3 上部结构初始模型

Fig. 3 Original model of superstructure

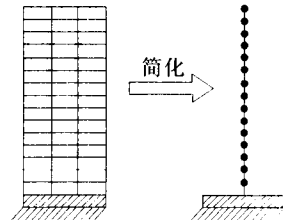


图4 上部子结构简化模型

Fig. 4 Simplified model of superstructure

若上部结构为非线性时,将综合后的运动方程同样改写为形如式(9)、式(10)的表达式,则有上部子结构的运动方程:

$$M_s \ddot{u}_s + C_s \dot{u}_s + K_s u_s = f_s - M_s R^I \ddot{u}_D^I - M_s R^B \ddot{q}_L^B \quad (12)$$

后续计算过程与前述相同,不再赘述。

2.2 简化结构的二步分析法

对于上述提出的混合二步分析法,可根据工程实际的需要,作相似性简化,如图4所示。对于图中左侧的上部子结构,可将其原本复杂的框架结构简化为图中右侧的质量串体系,在简化过程中需遵循以下原则:(1)简化结构的高度与原结构一致;(2)简化结构与原结构材料特性一致;(3)简化结构的质量分布与原结构一致;(4)在实际模拟计算中,第一周期、第一振型尽可能和原结构的第一周期、第一振型相同。

采用该简化模型代替原上部子结构并与非线性、线性地基土子结构按照分枝模态与约束模态的混合方法进行求解,可获得简化模型相互作用的耦合项。在该过程中,由于简化模型的动力特性与原始模型一致,因此完全可以代替原始模型来求解耦合项,使计算过程得到了极大的简化,同时又不失耦合项的求解精度。随后,通过修正地震动对初始上部结构模型进行加载即可得到考虑了非线性土-结构相互作用影响的上部结构动力响应。

因此,混合二步分析法首先利用分枝模态与约束模态的混合方法,以体系较少的自由度获得了相互作用

的耦合项,进而利用该耦合项对地震动进行修正,从而使得上部结构与土体的“分开”计算成为可能,有利于利用专业设计软件通过建立上部结构的有限元模型,在考虑土 - 结相互作用影响的情况下,进行截面设计和变形验算。为实际工程计算引入土 - 结构相互作用的影响提供了便利的条件。

3 地基土 - 框架结构地震响应分析

现仅以一个 15 层 3 跨框架结构为例,采用简化结构的二步分析法进行模拟来验证本文方法的有效性。考虑上部结构为非线性,框架每跨 6 m,层高 3.2 m,楼板质量为 19 600 kg,假定楼板刚度无穷大。采用筏片基础,基础高 2 m,宽 18 m。柱子截面采用 500 mm×500 mm,梁为 600 mm×300 mm。地基土地质参数如表 1 所示,整体土域的范围取为上部结构水平尺寸的 10 倍,即土域宽 180 m,土体深度为 30 m。土体两端采用黏弹性人工边界,底部固定。非线性地基土子结构采用 DP 本构模型。在水平方向输入地震动,采用天津地区地震动加速度时程曲线,采样间隔时间为 0.02 s,地震动加速度峰值为 3.10 m/s²,原始地震动如图 5 所示。

表 1 地基土地质参数

Table 1 Geologic parameters of soil

编号	厚度 /m	弹模 /Pa	泊松比 μ	内聚力 /Pa	摩擦角 $\Phi/(^{\circ})$	湿容重 $\gamma/(kg/m^{-3})$
1	2	4.8E7	0.40	24 250	14.5	1 835
2	12	1.32E8	0.40	14 139	17.3	1 820
3	9	1.83E8	0.35	16 167	24.4	2 023
4	7	2.73E8	0.35	16 500	23.9	2 040

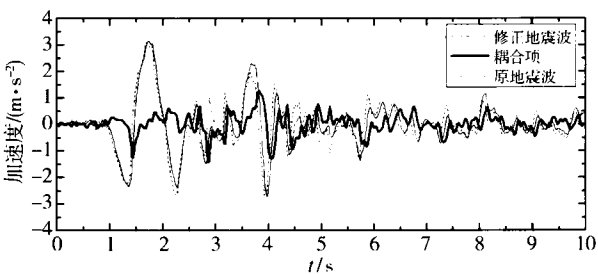


图 5 原地震动、修正地震动及耦合项时程曲线

Fig. 5 Time history acceleration of the original, modified earthquake ground motion and the coupled item

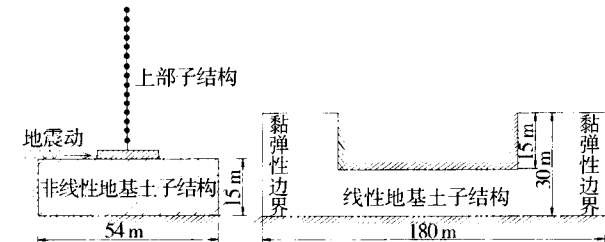


图 6 计算模型及子结构划分示意图

Fig. 6 Diagram of the calculation model and substructures

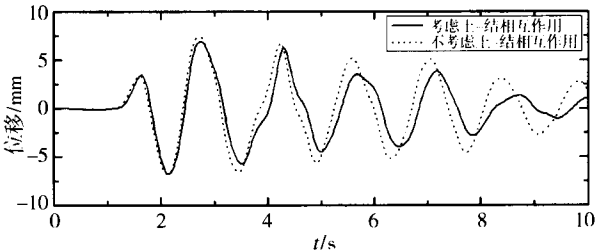


图 7 最大层间位移时程曲线

Fig. 7 Time history curves of the maximum relative displacement

分析过程中,首先将上部子结构简化为质量串体系。要求简化模型在高度以及质量分布上与原结构一致,并保证基频及其对应的 1-阶振型与原结构相同,且与原模型采用同样的非线性本构关系,以保证简化模型与原模型具有相同的非线性动力特性。现算得原结构基频 $f=0.716\ 68\text{ Hz}$,简化结构基频 $f=0.716\ 65\text{ Hz}$,两结构基频相近,振型相同,可知简化模型能够很好地代替原结构模型进行下一步的计算。

利用得到的简化结构替换原上部子结构,将相互作用体系划分为上部子结构、非线性地基土子结构以及线性地基土子结构,如图 6。分析可知,非线性地基土子结构的宽度取为上部结构水平尺寸的 3 倍,深度取为 15 m 足可将进入塑性的土体包含在区域内。图 6 同时给出了各子结构的边界条件。将简化的上部子结构、非线性地基土子结构以及缩减后的线性地基土子结构进行综合求解,可得到土 - 结相互作用的耦合项 $-M_sR^B\ddot{u}_D^B-M_sR^B\ddot{q}_L^B$,进而利用该耦合项对原始地震动进行修正,耦合项及修正地震动如图 5 所示。

采用上述计算得到修正地震动进行混合二步分析法中的第二步计算,对初始上部结构模型在修正地震动的激励下进行地震响应分析,可得到其最大层间位移时程曲线如图 7 所示。作为对比,图中同时给出了基础为固定端结构最大层间位移的时程曲线,两种方法计算得到的最大层间位移均发生在框架结构的第 4 层。由对比结果可看出,考虑相互作用的框架结构最大层间位移要小于未考虑相互作用的情况,这与以往研究中

得到的结论一致。

上述算例的求解过程实现了上部结构与土体的“分开”计算,并且在缩减体系自由度的同时能够考虑土体和结构的材料非线性特性,方法在满足精度的同时降低了计算成本,提高了计算效率。

4 结语

本文在线性-非线性混合约束模态法以及分枝模态法的基础上,提出了适合于土-结构相互作用体系非线性动力分析的分枝模态与约束模态的混合方法。该方法既可考虑土体和结构的非线性特性又便于考察土-结构相互作用对上部结构的影响。同时在分枝模态与约束模态混合方法的基础上进一步提出了混合二步分析法,该方法首先利用分枝模态与约束模态的混合方法求解模型(或简化模型)的相互作用耦合项,以对地震动进行修正;其次建立初始上部结构模型并采用修正地震动进行加载,即可最终求得考虑了非线性土-结构相互作用影响的上部结构地震响应分析结果。混合二步分析法在实现上部结构和地基土分开计算的同时,考虑了结构与地基土相互作用影响及材料非线性特性,有利于采用专业设计软件,通过以基础为固定端假定的上部结构有限元模型进行分析来考虑土-结构相互作用的影响,为实际工程计算引入土-结构相互作用影响提供了有效途径。

参考文献:

- [1] 吕西林. 复杂高层建筑结构抗震理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 482-579.
- [2] 姜忻良, 王 菲. 线性-非线性混合的约束模态综合法及实践[J]. 天津大学学报, 2010, 43(5): 385-391.
- [3] Wolf J P. Spring-dashpot-mass models for foundation vibrations[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26: 931-949.
- [4] 姜忻良, 严土超. 分枝模态二步分析法及其在液体-结构-桩土体系中的应用[J]. 振动工程学报, 1994, 7(4): 346-350.
- [5] 姜忻良, 严土超, 丁学成. 筒体结构-桩-土相互作用的分枝模态-二步分析法[J]. 天津大学学报, 1995, 6: 796-801.
- [6] Gladwell G M L. Branch mode analysis of vibrating systems[J]. Sound Vibration, 1964, 1: 41-59.
- [7] 楼梦麟. 结构动力分析的子结构方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 51-56.
- [8] 王文亮, 杜作润. 结构振动与动态子结构方法[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1985: 229-258.
- [9] Kyung R G, Shin H C. Dynamic Analysis of structures using constrained component mode synthesis[C]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. California, Monterey, 2002: AIAA-2002-4797.
- [10] Craig R R. Substructure method in vibration[J]. Trans ASME, 1995, 117: 207-213.
- [11] Wamsler M. On the selection of the mode cut-off number in component mode reduction[J]. Engineering with Computers, 2009, 25: 139-146.
- [12] 姜忻良, 王 菲. 基于势能判据的约束模态综合法截断准则[J]. 振动与冲击, 已采用待发表.