

文章编号: 1004- 4574(2009) 05- 0088- 06

土-结构动力相互作用几种计算模型的比较

宋贞霞¹, 海平^{1,2}, 胡颖平¹

(1江苏省结构工程重点实验室(苏州科技学院), 江苏 苏州 215011; 2中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对目前在土-结构动力相互作用分析中基础常采用实体单元、结构采用梁单元, 建模过程中经常遇到的基础和结构不同单元的连接问题, 通过在基础表面添加刚臂连接单元的方法来模拟基础和结构的连接, 并分析对比了实体单元、实体单元-刚臂-梁单元、实体单元-梁单元 3种模型在考虑土-结构相互作用时的动力反应, 计算结果显示: 采用刚臂连接单元方法的计算结果精度与实体单元的相同, 但计算效率高。

关键词: 土-结构动力相互作用; 刚性连接; 动力分析; 单元连接

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Comparison of several simulating models for dynamic soil-structure interaction

SONG Zhen-xia¹, DING Hai-ping^{1,2}, HU Ying-ping¹

(1 Jiangsu Key Laboratory of Structural Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract At present, in the dynamic soil-structure interaction analysis, the base is modeled by solid element and the superstructure by beam, the problem of connection between different elements occurs. To solving the connection method of different elements, rigid arm beams are added between the upper beam elements and lower solid elements. Various models are established and the different results are analyzed. Some significant conclusions are drawn out: the calculation results of the model with rigid arm beam elements is similar to the model of solid elements, but more efficient in calculation.

Key words soil-structure interaction; rigid connection; dynamic analysis; element connection

对于土-结构相互作用的数值分析, 选取合理的计算模型是决定计算准确的一个关键因素, 如何建模能够迅速精确的求解是目前亟需解决的问题。对需要大量重复计算寻求规律的思路分析型的研究来说, 即使选取合理的二维计算模型, 往往也要花费过多的计算机时。考虑土-结构相互作用的计算模型有很多种^[1-2], 这些建模方法广泛应用于目前的商业有限元程序之中。ANSYS是大型通用有限元计算软件, 有多种单元模型, 在很多领域有广泛的应用, 也应用于土-结构动力相互作用的分析^[3,7]。利用 ANSYS进行土-结构动力反应分析, 可采用梁单元模拟梁, 实体单元模拟土和基础, 也可用实体单元来模拟梁以提高计算精度并获得更加丰富的内容, 但全部采用实体单元则计算效率较低。因此, 我们经常分别采用梁单元和实体单元来模拟梁和土体, 然而梁单元和实体单元如果连接不好会使计算结果有所差别^[4]。本文采用 ANSYS软件建立考虑土-结构动力相互作用的二维模型, 分别对实体单元(全部采用实体单元, 其中土体为 Plane 42 上部结构取一榀框架, 采用 Shell 63)、实体单元-刚臂-梁单元(如图 2 上部结构采用梁柱单元, 下部土体采用实

收稿日期: 2009- 02- 16 修订日期: 2009- 08- 21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAC13B02); 江苏省结构工程重点学科项目

作者简介: 宋贞霞(1979-), 男, 助理工程师, 博士研究生, 主要从事地震工程领域研究。E-mail: zx_song@163.com

体单元,上下单元连接部位采用刚臂连接单元)、实体单元-梁单元(上部结构采用梁柱单元,下部土体采用实体单元,上下单元直接耦合自由度)3种基于时域人工边界的有限元模型进行土-结构相互作用的动力分析,并比较了以上3种情况下的计算精度,为土-结构相互作用研究打下基础。

1 计算模型的确定及验证

1.1 ANSYS梁单元和实体单元介绍

运用 ANSYS 进行结构动力分析时,对上部结构常采用梁单元模拟,对下部的基础和土体则需要采用实体模型进行建模。图 1 所示梁单元,在每一个节点具有 3 个自由度,分别为: u_x (x 平动)、 u_y (y 平动)、 R_z (z 转动);而平面实体单元在每一个节点只具有两个平动自由度,分别为: u_x (x 平动)、 u_y (y 平动)。当我们建立整体模型来分析结构反应时,就需要考虑建模不同单元模型之间的连接问题^[4]。

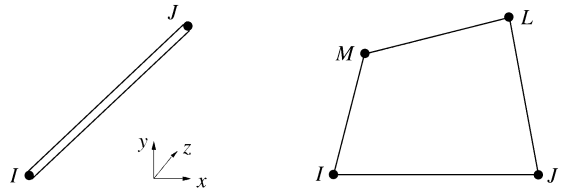


图 1 梁单元与平面实体单元模型

Fig 1 Beam element and plane solid element models

1.2 加刚臂连接单元模型简介

在建立考虑土-结构相互作用的计算模型时,经常会碰到不同类型单元的连接,如剪力墙结构三维模型中的壳单元和实体单元、框架结构中的梁单元和实体单元等,这时对这两种单元进行简单的节点压缩或耦合是不够的。文献[4]提出不同单元的连接采用加刚臂的方法,这种方法在土-结构相互作用分析模型中同样有效。本文采用的加刚臂连接单元方法如图 2 所示,刚臂采用梁单元 Beam 3 弹性模量取为柱的 10 倍^[4]。通过这种方法,可以克服实体单元和梁单元耦合产生的转动自由度丢失的问题。

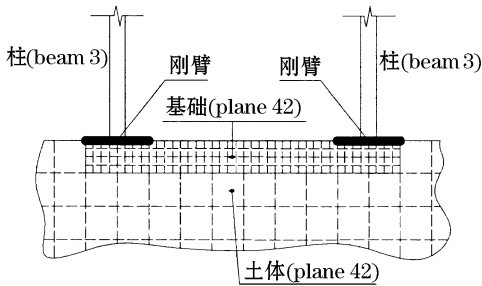


图 2 刚臂示意图

Fig 2 Sketch of rigid arm

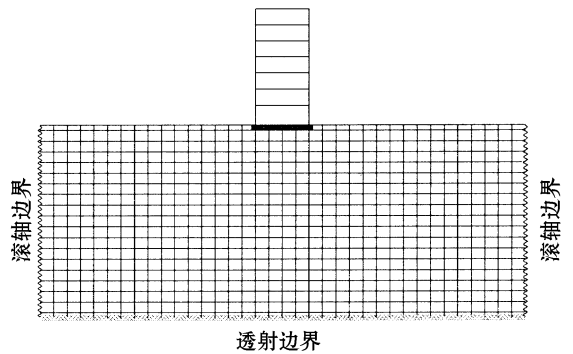


图 3 土与结构相互作用计算模型

Fig 3 Calculation model of soil-structure interaction

1.3 计算模型的建立

本文采用改进的 ANSYS 软件进行考虑土-结构动力相互作用的计算^[6],土-结构相互作用分析模型见图 3,上部结构采用 Beam3,基础及土体采用 Plane 42,侧边界采用滚轴边界,底边采用人工透射边界^[5],材料参数的选用见表 1,土体网格大小 $1\text{m} \times 1\text{m}$,基础附近网格局部细化。输入地震波选用 El Centro 波和 Taft 波(图 4 和图 5)。

表 1 材料参数选用表

Table 1 Parameters of materials

材料	单元	弹性模量 / ($10^{10}\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	泊松比	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	材料阻尼
土	Plane 42	0.02	0.35	1800	0.05
基础	Plane 42	2.0	0.2	2500	0.02
梁	Beam 3	2.8	0.2	2500	0.02
	Shell 63	2.8	0.2	2500	0.02
柱	Beam 3	3.0	0.2	2500	0.00
	Shell 63	3.0	0.2	2500	0.02
刚臂	Beam 3	30	0.2	2500	0.02

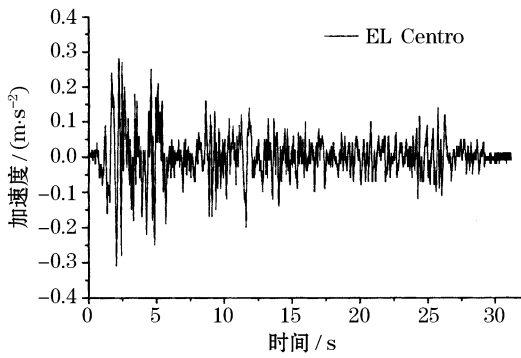


图 4 EL Centro地震波加速度历程记录

Fig 4 Acceleration time history of EL Centro earthquake wave

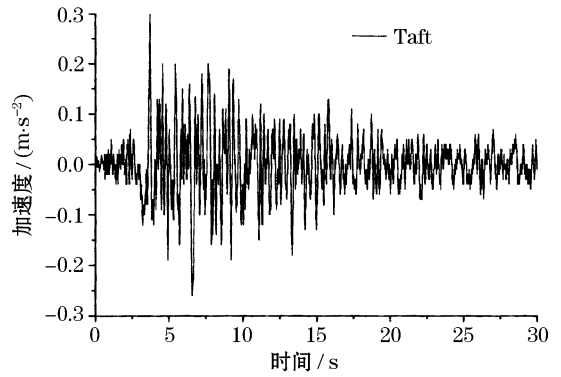


图 5 Taft地震波加速度历程记录

Fig 5 Acceleration time history of Taft earthquake wave

2 土-结构相互作用分析中 3种计算模型中的比较

采用实体单元模拟梁柱建模时, 计算精度很高但是耗费时间; 采用梁单元模拟上部结构计算速度很快但只能得到有限的信息; 在动力分析时我们通常只需得到结构的轴力、弯矩、加速度、速度、位移等基本信息, 这时可以采用梁单元模拟上部框架结构。但是由于梁单元与实体单元直接耦合会发生旋转自由度丢失, 引起弯矩不能传递的问题, 所以必须改进建模方法, 下面通过添加刚臂连接单元改进建模方法分别计算并比较实体单元、实体单元-刚臂-梁单元、实体单元-梁单元这 3 种建模方法计算结果的差异。在这个比较过程中, 我们认为按实体单元方法建模的计算结果为精确解, 用梁单元和刚臂连接单元的方法分别建模, 并用这个计算结果与实体建模计算结果进行对比。

2.1 考虑 SSI 时 3种计算模型的楼层位移时程的比较

图 6 和图 7 选取了结构楼层 1、楼层 4 和楼层 7 的位移时程曲线。

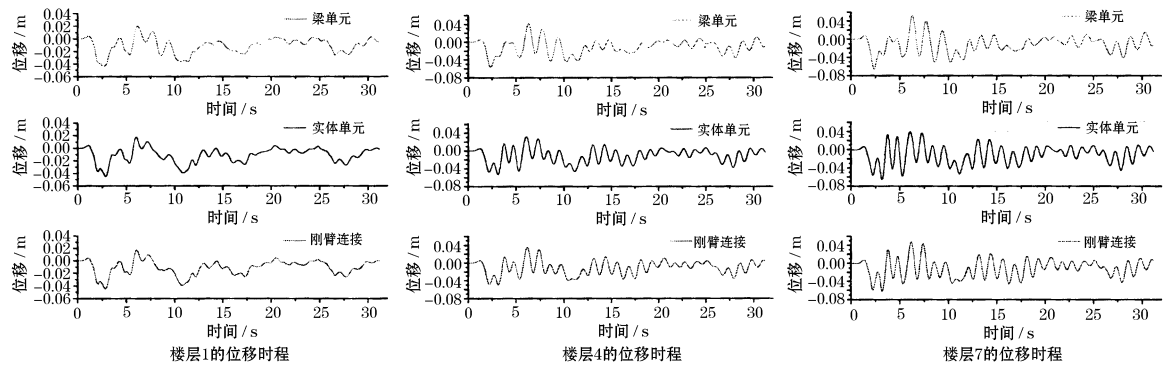


图 6 EL Centro波输入下楼层位移时程

Fig 6 Displacement time histories of floors under input of EL Centro wave

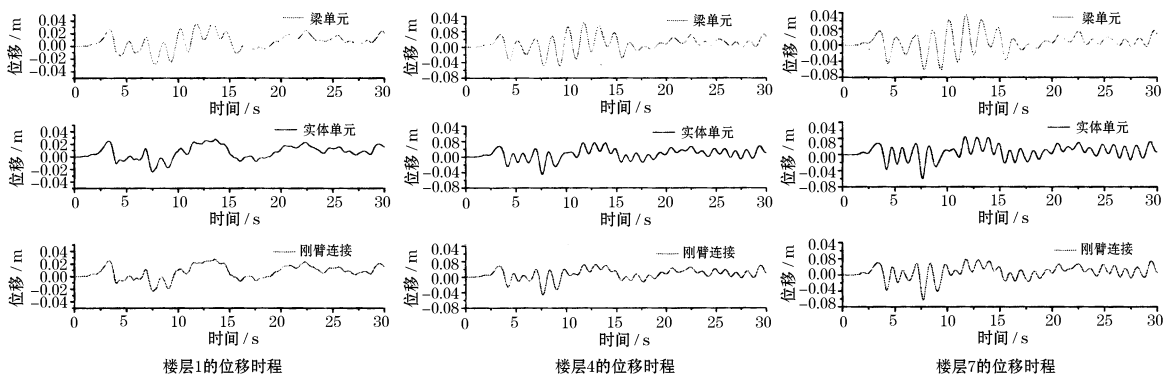


图 7 Taft波输入下楼层位移时程

Fig 7 Displacement time histories of floors under input of Taft wave

通过图 6和图 7所示的 3个楼层的位移时程曲线比较可以看出, 通过添加刚臂连接单元, 楼层位移反应更接近用实体单元建模的计算结果。

2 2 考虑 SSI时 3种计算模型的加速度时程的比较

下面图 8和图 9给出了楼层 1、楼层 4和楼层 7的加速度时程曲线。为了分析对比结构振动的频谱特性, 图 10和图 11是楼层加速度反应谱特性曲线。

通过图 8- 11的加速度时程曲线、加速度反应谱曲线可以看出, 添加刚臂连接单元很好的解决了梁单元与实体单元的连接问题, 对比这 3种计算模型, 本文提出的方法可以很好的传递框架底层的弯矩, 计算结果与实体单元建模方法计算结果基本一致。

2 3 楼层最大层间位移对比

进行结构动力分析时, 我们往往最关心的是结构的层间位移, 图 12和图 13列出了 3种模型的最大层间位移。

通过图 12和图 13楼层最大层间位移曲线可以看出, 上部结构采用梁单元建模时由于底层弯矩不能正确传递, 与实体单元计算结果对比差距非常大, 而添加刚臂连接单元后, 楼层最大层间位移规律基本与实体单元结果一致。

2 4 计算效率对比分析

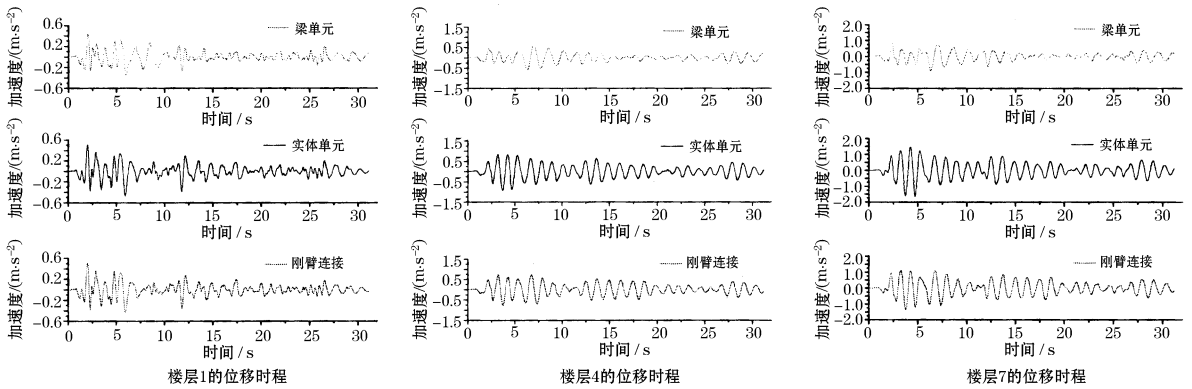


图 8 E1Centro波输入下楼层加速度时程

Fig 8 Acceleration time history of floors under input of E1Centro wave

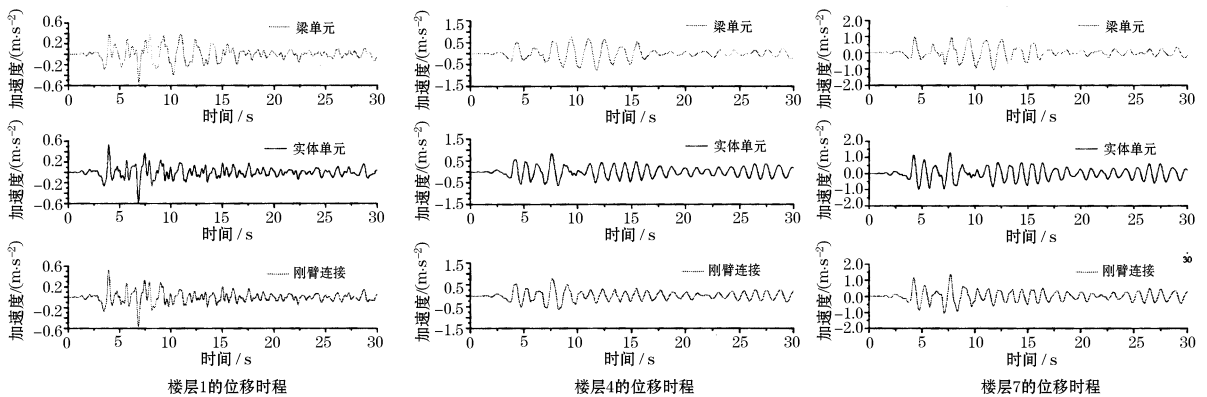


图 9 Taft波输入下楼层加速度时程

Fig 9 Acceleration time history of floors under input of Taft wave

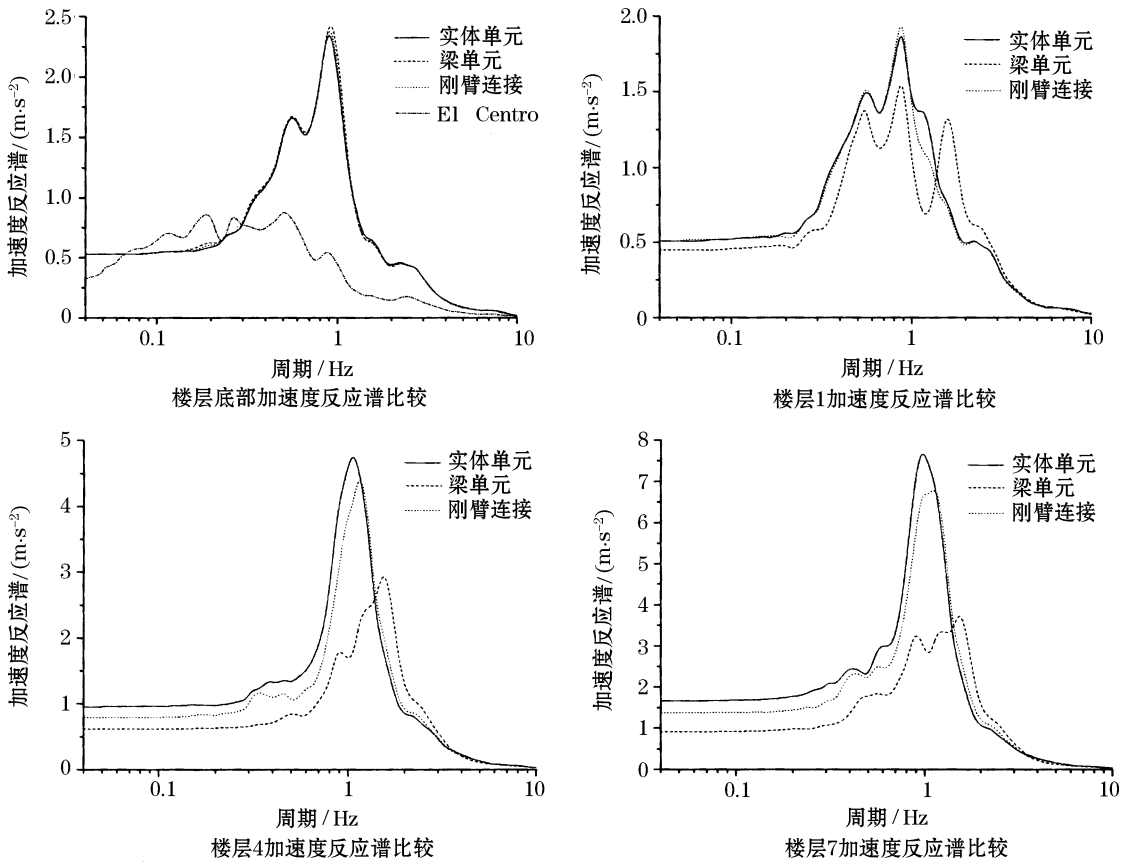


图 10 El Centro 波输入下楼层加速度反应谱比较

Fig 10 Comparison of acceleration response spectra of floors under input of El Centro wave

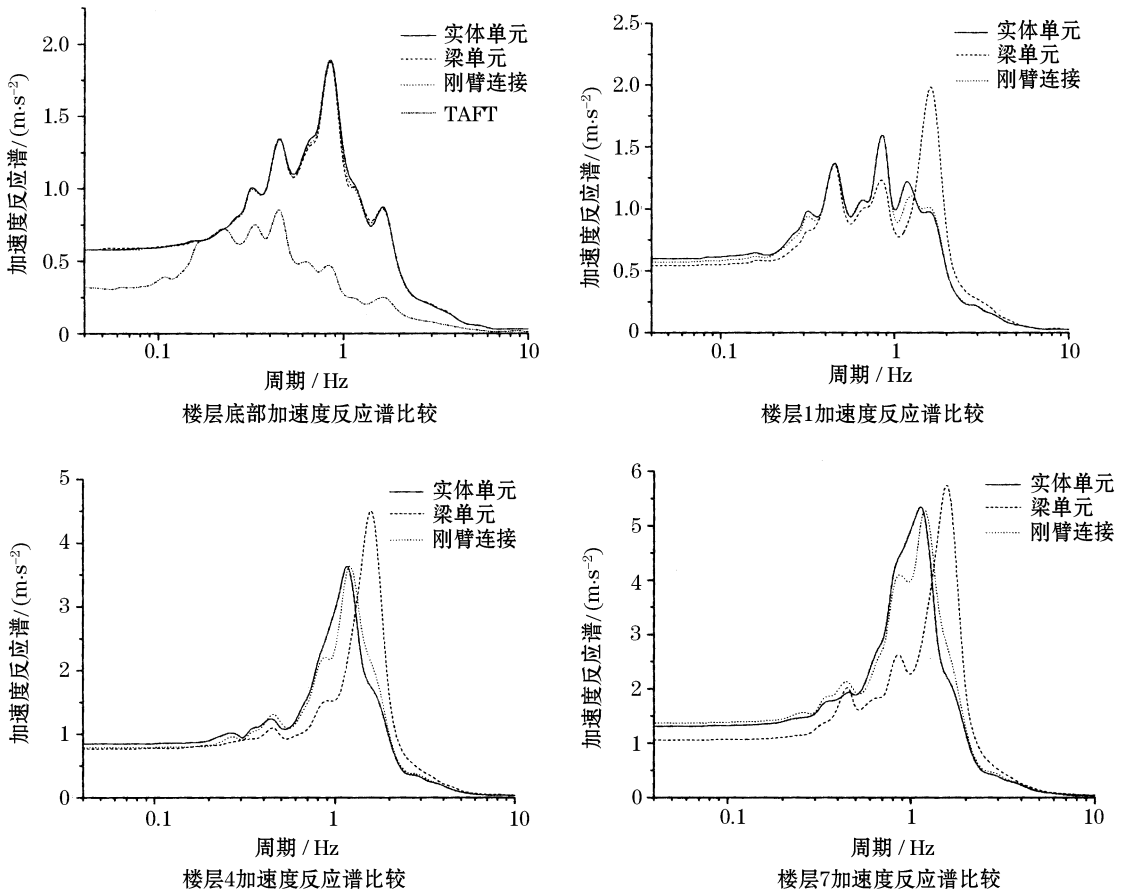


图 11 Taft 波输入下楼层加速度反应谱比较

Fig 11 Comparison of acceleration response spectra of floors under input of Taft wave

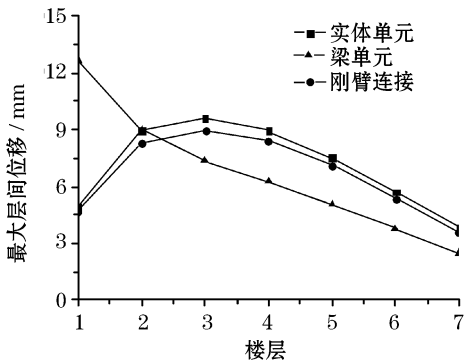


图 12 E1Centro波输入下最大层间位移比较图

Fig 12 Comparison of maximum story drifts under input of E1Centro wave

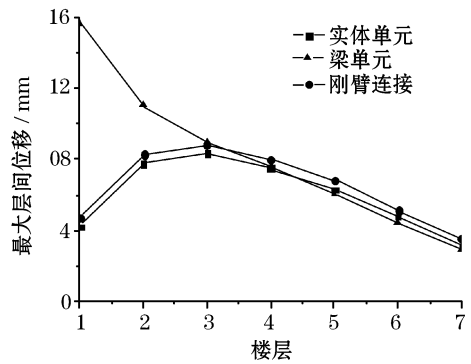


图 13 Tafti波输入下最大层间位移比较

Fig 13 Comparison of maximum story drifts under input of Tafti wave

表 2 计算效率统计

Table 2 Statistics of calculation efficiency

模型类别	实体单元	梁单元	刚臂连接
计算时间	E1Centro波	15815	8764
	Tafti波	15529	7109

通过表 2可以看出本文提出的添加刚臂连接单元的建模方法, 具有与梁单元建模同等的计算效率, 计算时间短, 效率高。

3 小结

通过本文的分析, 可以得到以下结论:

(1) 梁单元与实体单元之间连接时添加刚臂连接单元的作用是显著的, 刚臂在传递弯矩时起了效果。因此建议在建立考虑土-结构动力相互作用的模型时, 可以在遇到不同单元之间的连接时加入刚臂连接单元模拟这种效果, 同时兼顾效率和精度;

(2) 添加刚臂连接单元后的梁单元模型计算结果和实体单元建模计算结果是一致的, 说明在结构动力反应时程分析时可以采用梁单元计算来取代实体单元。在接下来的计算分析中, 将采用梁单元来模拟梁柱, 而基础及下部土体采用平面应变单元模拟, 就可以计算上部结构的动力反应。

参考文献:

[1] 李辉, 赖明, 白绍良. 土-结构动力相互作用研究综述 (II) - 简化分析模型 [J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 25(5): 112- 116.

[2] 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.

[3] 何益斌, 夏栋舟, 黄欣荣, 闫岩. 土-桩-框架结构动力相互作用非线性有限元模拟 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2008, 24(3): 428- 432

[4] 孙战金, 张其林. 有限元计算模型过程中不同单元的连接 [J]. 建筑结构. 2005, 35(9): 62- 65.

[5] 廖振鹏. 工程波动理论导论 (第二版) [M]. 科学出版社, 2004.

[6] 孔戈, 丁海平, 金星, 周健, 张冬茵. 多次透射边界在 ANSYS 软件中的应用 [J]. 工程抗震与加固改造. 2005, 27(2): 67- 70.

[7] 陈波, 吕西林, 李培振, 陈跃庆. 用 ANSYS 模拟结构-地基动力相互作用振动台试验的建模方法 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 126- 131.