

# 考虑土-结构相互作用的上海中心 大厦地震反应<sup>1</sup>

姜忻良 老浩寅 李博强

(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** 采用 ANSYS 有限元软件建立土-桩-上海中心大厦相互作用简化模型。其中, 桩土区采用等效模型, 近域土体定为塑性区, 用 DP 模型模拟; 外围的土域定为弹性区, 用超单元来模拟。对考虑土-桩-结构相互作用的整体结构和以刚性地基为假定的上部结构分别进行地震反应分析, 并完成了比较。最后, 在整体结构中提取上部结构与下部结构处的加速度反应与原地震波叠加, 形成修正地震波, 为输入修正地震波能考虑相互作用因素来分析相同结构的精细模型地震反应提供了条件。

**关键词:** 土-结构相互作用 桩土等效 超单元 地震反应分析 修正地震波

## 引言

动力时程分析作为一种研究结构在地震作用下可靠性的有效手段, 已被广泛应用于不规则结构中。作为中国国内第二高楼, 上海中心大厦的结构形式十分复杂, 卢啸等(2012; 2011)为研究上海中心大厦在地震作用下的动力特性与抗震性能, 在刚性基础假定下对精细模型与简化模型进行了动力时程分析。本文对考虑土-结构相互作用的上海中心大厦简化模型进行了地震反应分析, 在卢啸等(2012; 2011)已建好的 MARC 简化模型基础上, 提取构件的相关参数, 在 ANSYS 有限元软件中进行等效建模, 并进一步模拟了上海中心大厦的地下室、基础以及周围的土体, 从而建成了整体模型, 并对其进行了抗震分析。

## 1 模型介绍

### 1.1 上部结构模型介绍

上海中心大厦简化模型主要考虑巨柱、核心筒、伸臂桁架以及连梁, 对于外框架可以暂时不考虑。为了尽量减少模型中的不确定因素, 除去了上海中心大厦的塔顶, 仅考虑结构楼层部分, 此模型也称为鱼骨模型(图1)。核心筒主要采用了双梁模型来模拟, 另外, 为了保证巨柱在简化后不出现局部振动, 在巨柱和筒体之间插入了刚性链杆来对巨型的侧向自由度

<sup>1</sup> 基金项目 国家自然科学基金项目(51278335); 国家自然科学基金项目(51178308); 国家自然科学基金重大研究计划项目(90815025)

[收稿日期] 2013-01-27

[作者简介] 姜忻良, 男, 生于1951年。教授。主要从事结构与土相互作用以及结构抗震研究。E-mail: jiangxinliang@126.com

进行约束，近似考虑楼板对巨柱的约束作用。

在 ANSYS 模型中，巨柱、核心筒、伸臂桁架、刚臂采用 3D 梁单元模拟；链杆用刚度很大的弹簧单元模拟；连梁用剪切弹簧单元模拟。鱼骨模型属于平面模型，为全面考虑简化模型的平面特性，采用三维建模但约束平面外自由度的方式进行，简化模型如图 1 所示。图 2 为 MARC 模型转换为 ANSYS 上部结构的模型。

本文在卢啸等（2012；2011）简化模型基础上，提取构件的相关参数，再在 ANSYS 软件中进行等效建模。卢啸等（2012；2011）所采用的 MARC 模型里的本构关系是基于构件层次上的本构关系，而在 ANSYS 中作者输入的是基于材料的本构关系，这就需要考虑构件本构和材料本构之间的等效。

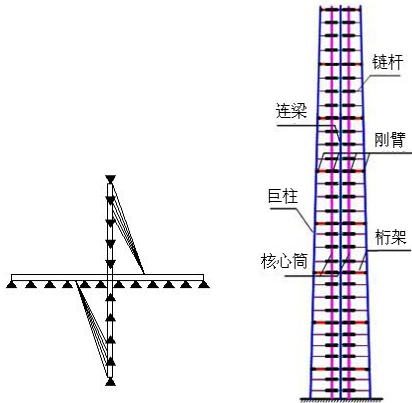


图 1 简化模型示意图

Fig.1 Diagram of the simplified model

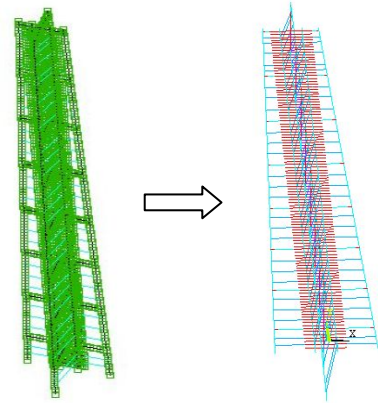


图 2 MARC 模型转为 ANSYS 模型

Fig.2 MARC model converted to ANSYS model

表 1 给出了上述两种模型进行模态分析后自振周期的比较。图 3 是两种模型在上海人工波大震作用下的顶点位移时程比较。可以看出，两种模型自振周期的最大偏差只有 2.16%，同时，两种模型计算出的顶点位移也基本一致，这说明二者的质量和刚度大致相同，动力特性相符，可以认为 ANSYS 上部结构建模是正确的。

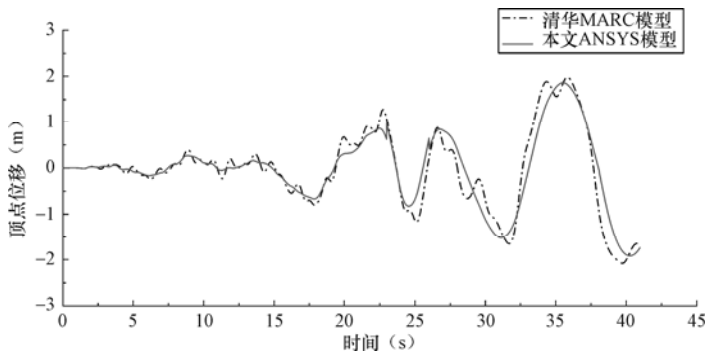


图 3 MARC 与 ANSYS 上部结构顶点位移时程对比

Fig.3 Comparison of displacement time history on top point between MARC and ANSYS upper-structure

表 1 MARC 与 ANSYS 上部结构前五阶周期比较 (单位: s)

Table 1 Comparison of the first five periods between MARC and ANSYS upper-structure

周期	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
MARC 模型	9.302	3.354	1.590	0.957	0.633
ANSYS 模型	9.311	3.356	1.588	0.952	0.647
相对偏差	0.097%	0.06%	-0.12%	-0.52%	2.16%

## 1.2 下部结构模型介绍

上海中心大厦的地下室采用延伸上部结构的等效方法, 由于地下室不是研究的重点, 只需保证其质量刚度和实际情况相符即可。上海中心大厦基础形式采用的是桩筏基础, 面积为  $8250\text{m}^2$ , 筏板厚 6m, 埋深 30m, 桩数 955 根, 桩径 1m, 桩长在核心筒内为 86m, 核心筒外为 82m。桩的混凝土等级为 C45。此外, 根据上海中心大厦详勘报告并进行归纳综合, 其地下土层可大致分为 4 层, 具体参数见表 2。

表 2 土体参数

Table 2 Parameters of soil

土体	深度 (m)	弹性模量 ( $\text{N/m}^2$ )	黏聚力 ( $\text{N/m}^2$ )	内摩擦角 ( $^\circ$ )	膨胀角 ( $^\circ$ )
第 1 层土	15	$2.38 \times 10^7$	15200	10.8	0
第 2 层土	15	$4.28 \times 10^7$	17140	13.4	0
第 3 层土	85	$7.44 \times 10^7$	18170	17.3	0
第 4 层土	40	$9.76 \times 10^7$	20170	20.8	0

### 1.2.1 桩土区域等效

本文对桩土区域进行了数值模拟, 得到其应力-应变关系曲线。根据上海中心大厦桩土区域桩的分布, 选取具有代表性的桩土复合特征体元来代替整个桩土复合体区域 (管晔, 2009) 并通过设立弹簧来考虑周边土对其的影响, 弹簧参数根据胡克定律以及弹性应力-应变关系联合推导。桩的直径为 1m, 桩周围土体区域的长度、宽度和高度均为 3m, 如图 4 所示。另外, 本文同样将桩土复合特征体元的 Y 向自由度约束住, 以便进行平面分析。

与桩土复合特征体元近似, 对 X 向及 Z 向分别进行单轴压缩数值模拟试验, 并将其应力-应变关系假定为双线性等向强化模型, 求得相关数据如表 3。

表 3 桩土复合特征体元相关参数

Table 3 Parameters of pile and soil complex feature element

	初始弹性模量 $E$ ( $\text{N/m}^2$ )	屈服强度 $f_y$ ( $\text{N/m}^2$ )	强化阶段弹性模量 $E'$ ( $\text{N/m}^2$ )
X 向	$1.25 \times 10^8$	$1.18 \times 10^5$	$1.89 \times 10^7$
Z 向	$2.41 \times 10^9$	$2.14 \times 10^6$	$1.43 \times 10^8$

以上为求得的 X 向及 Z 向各参数, 当计算垂直地震结构的响应时, 采用 Z 向相关数据; 当计算水平地震结构的响应时, 则采用 X 向相关数据。本文主要研究的是上海中心大厦的水平地震反应, 故采用 X 向数据。

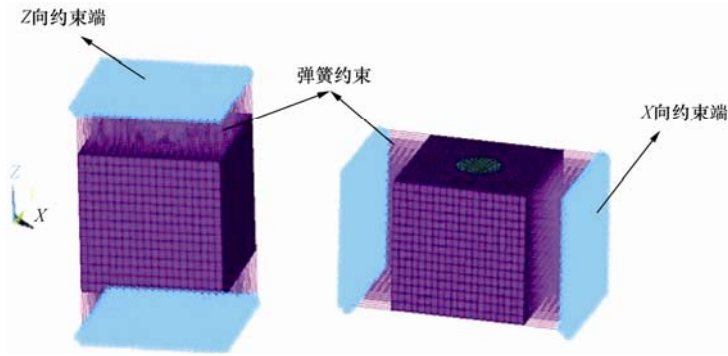


图 4 桩土复合特征体元

Fig.4 Pile and soil complex feature element

### 1.2.2 外围土域

对于桩土区外围的土域，若用常规的有限元法会涉及到庞大的自由度数目和复杂的运算过程，致使模拟过程耗费大量机时（管晔，2009）。在大量实际工程中（王菲等，2012），外围的土域在地震作用下并非全部土体都进入非线性阶段，而是仅仅在上部结构下方的某些区域出现非线性特征，绝大多数区域仍然处于线性阶段。因此本文将地下室及桩土复合体周围一定范围内的土体（两边宽度各取基础宽度的 2 倍）定为塑性区，用 DP 模型模拟；外围的土域定为弹性区，用超单元来模拟。对于弹性区域土体，取值范围为两边各 300m（王菲等，2012），由于土体范围取得较大，按照土与结构相互作用原理，边界条件对计算结果影响不大，故采用自由边界。

最终整体简化模型如图 5 所示。

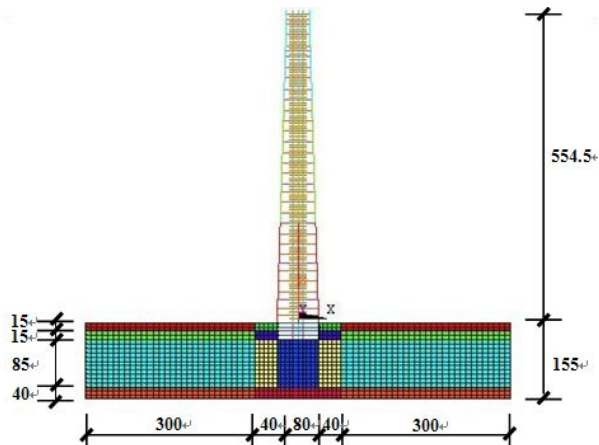


图 5 上海中心大厦整体模型（单位：m）

Fig.5 Over-all model of Shanghai Center Tower

## 2 动力分析

### 2.1 模态分析

本文将考虑土-结构相互作用的整体模型与以刚性地基为假定的上部结构两种模型计算

结果进行了比较,表 4 给出了整体模型和上部结构模型前五阶自振周期。可以看出,在考虑了土-结构相互作用后,整个体系的自振频率减小,自振周期相应增大。

表 4 整体结构与上部结构前五阶周期比较 (单位: s)

Table 4 Comparison of the first five periods between whole model and upper-structure model

周期	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
整体结构模型	14.665	4.747	4.222	4.217	3.115
上部结构模型	9.311	3.356	1.588	0.952	0.647
周期比值	1.575	1.414	2.658	4.429	5.123

## 2.2 动力时程分析

本文采用了以下 3 条地震波进行动力时程分析,1 条为上海人工波,2 条为天然地震波——适用于上海四类场地土的 Loma Prieta earthquake 波 (1989 年旧金山波) 和美国的 Superstition Hills 地震波 (马千里等, 2008), 如图 6、7、8 所示。

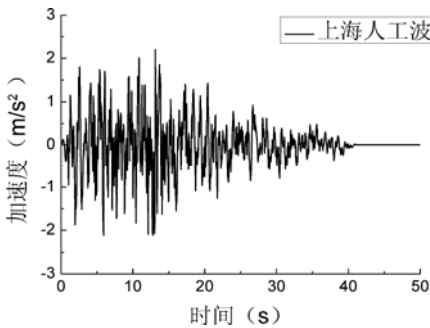


图 6 上海人工波

Fig.6 Artificial wave from Shanghai

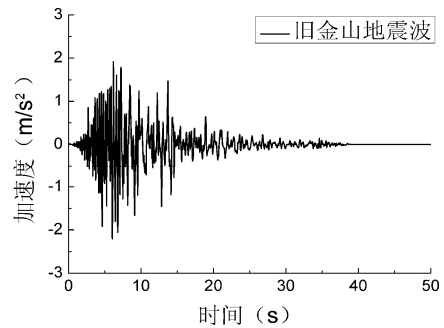


图 7 旧金山地震波

Fig.7 Earthquake wave from San Francisco

图 9、10、11 分别给出了在以上三种地震波作用下,以刚性基础假定的上部结构和考虑土-结构相互作用的整体结构两种模型相同顶点 (核心筒处顶点) 的位移时程曲线对比。

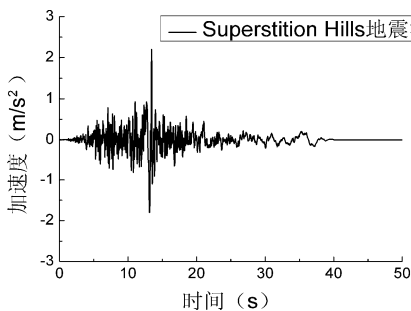


图 8 Superstition Hills 地震波

Fig.8 Earthquake wave from Superstition Hills

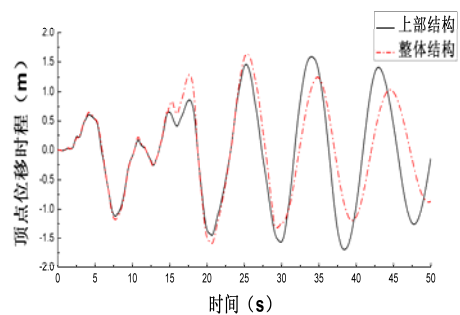


图 9 上海人工波震波顶点位移时程对比

Fig.9 Comparison of displacement time history on top point of Shanghai artificial wave

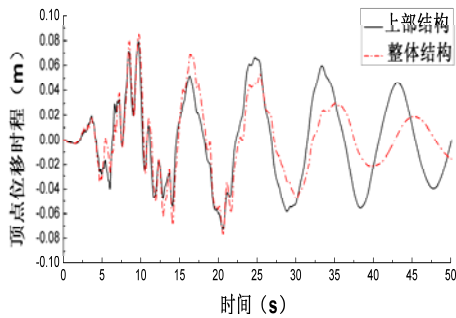


图 10 旧金山地震波顶点位移时程对比

Fig.10 Comparison of earthquake wave on top point of San Francisco earthquake wave

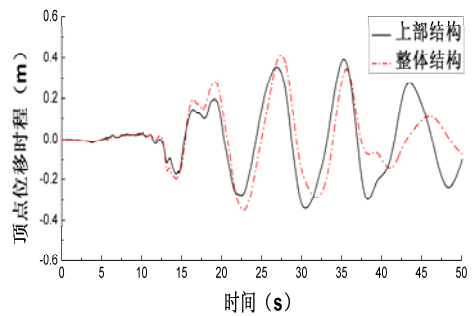


图 11 Superstition Hills 地震波顶点位移时程对比

Fig.11 Comparison of earthquake wave on top point of Superstition Hills earthquake wave

图 12、13、14 分别给出了两种结构在三种地震波作用下最大层间位移的时程曲线对比。两种模型计算得到的最大层间位移均发生在上海中心大厦结构的第 7 层（此处层的含义其实为区段，上海中心大厦共 8 个区段）。

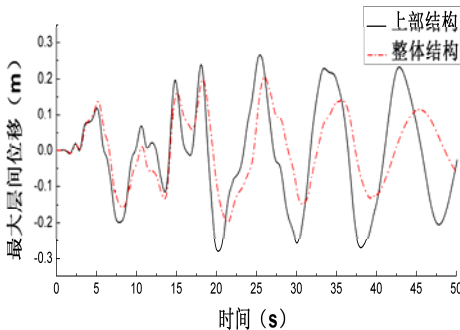


图 12 上海人工波最大层间位移时程对比

Fig.12 Comparison of max layer displacement time history of Shanghai artificial wave

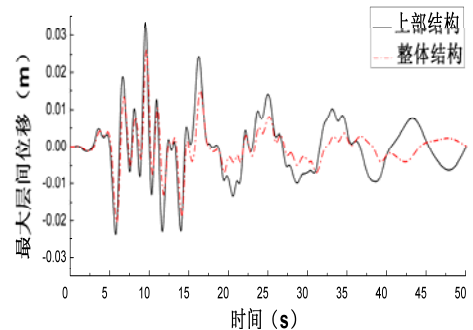


图 13 旧金山地震波最大层间位移时程对比

Fig.13 Comparison of max layer displacement time history of San Francisco earthquake wave

由图 9 至图 11 可以看出，对同一种地震波，考虑土-结构相互作用之后，结构顶点峰值位移比刚性地基假定的上部结构位移峰值偏大，此时结构顶层的位移由基础的转动、基础的平动和上部结构自身变形三部分组成。而从图 12 至图 14 的层间位移可以发现，考虑土-结构相互作用之后，结构的层间位移比以刚性地基为假定的偏小，说明考虑相互作用后结构的自身变形（绝对变形）减小（窦立军等，1999）。

### 2.3 修正地震波

杨书燕（2006）、王菲（2010）、姜忻

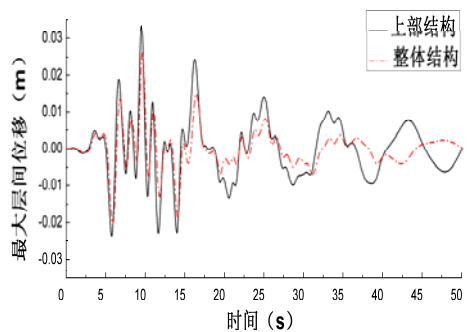


图 14 Superstition Hills 地震波最大层间位移时程对比

Fig.14 Comparison of max layer displacement time history of Superstition Hills earthquake wave

良等（1995）采用动态子结构方法，将上部结构与下部结构在接触面上（子结构界面）的加速度耦合项与原地震波进行叠加，形成修正地震波，同时将其施加到以刚性地基为假定的上部结构中，以此来间接考虑土对结构的影响。本文则在整体结构中直接提取上部结构底部与地下室顶部交界处各点的平均加速度与原地震波进行叠加，作为修正地震波施加于上部结构，见图 15。

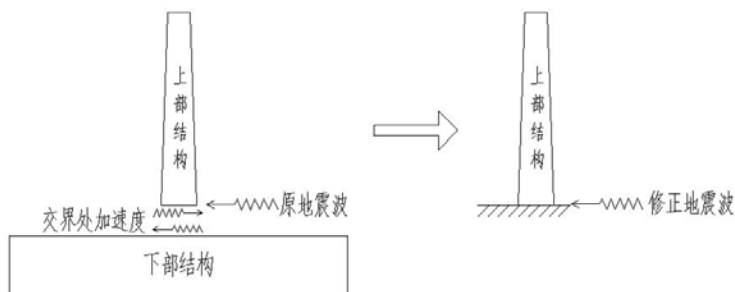


图 15 修正地震波提取过程

Fig.15 Extraction process of modified earthquake wave

现仅以上海人工波为例，将其施加到 ANSYS 整体模型中，原始地震波、上部结构与下部结构处的加速度时程及修正地震波见图 16。

将上述计算得到的修正地震波施加到固定端情况下的 ANSYS 上部结构模型中进行地震响应分析，得到其顶点位移时程曲线，如图 17 所示，由于修正地震波在原结构上施加，位移曲线应完全吻合，出现的误差是由于本例中用截面平均加速度时程代替截面各加速度时程所致。

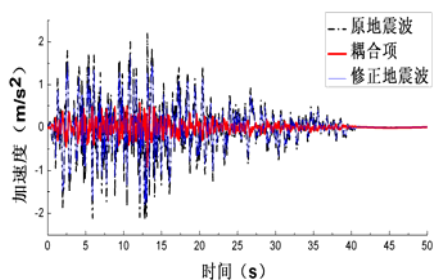


图 16 原上海人工波、耦合项及修正地震波

Fig.16 Original Shanghai artificial wave, coupling term and modified earthquake wave

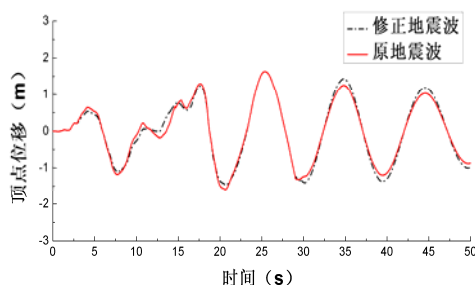


图 17 上海人工波顶点位移时程对比

Fig.17 Comparison of displacement time history on top point of Shanghai artificial wave

以上做法的意义在于，由于简化模型的动力特性与精细模型的动力特性一致或基本一致，因此，提取简化模型上部结构与下部结构处的加速度反应与精细模型时也一致，这样就为采用输入修正地震波来考虑相互作用因素的相同结构精细模型地震反应分析提供了条件。

### 3 结论

通过以上分析可以得出以下结论：

(1) 考虑土-结构相互作用后的结构自振频率变小, 自振周期相应增大, 即考虑了土-结构相互作用之后整个体系柔性增加。

(2) 考虑土-结构相互作用后的结构在地震作用下, 结构顶点的位移峰值变大, 原因是此时结构顶点的位移不仅包括结构本身的变形, 还包括土体的变形以及土体转动引起的结构位移。应当注意的是, 就结构自身的变形以及层间位移来说, 其数值却比与以刚性地基为假定的上部结构要小。

(3) 本文采用求得地基处耦合内力与输入地震波叠加形成修正地震波的方法, 为输入修正后地震波能考虑相互作用因素来分析相同结构的精细模型动力反应提供了条件。

## 参考文献

- 窦立军, 杨柏坡, 刘光和, 1999. 土-结构动力相互作用几个实际应用问题. 世界地震工程, **15** (4): 62—68.
- 管晔, 2009. 考虑土与结构相互作用的天津站交通枢纽工程地震反应分析. 天津: 天津大学.
- 姜忻良, 严士超, 丁学成, 1995. 筒体结构-桩-土相互作用的分枝模态——二部分析法. 天津大学学报, **28** (6): 797—801.
- 卢啸, 陆新征, 叶列平, 2012. 超高层建筑地震动强度指标探讨. 土木工程学报, **45**: 292—296.
- 卢啸, 陆新征, 张万开等, 2011. 特大地震下超高层建筑的倒塌模拟. 中国科学: 技术科学, **41** (11): 1405—1416.
- 马千里, 陆新征, 叶列平, 2008. 层屈服后刚度对地震响应离散性影响的研究. 工程力学, **25** (7): 133—141.
- 王菲, 姜南, 2012. 土-结构三维动力分析的线性-非线性混合子结构法. 工程力学, **29** (1): 155—161.
- 王菲, 2010. 地基土-高层建筑相互作用的动态子结构法. 天津: 天津大学.
- 杨书燕, 2006. 特殊地形上结构非线性地震反应的研究. 天津: 天津大学.



# Seismic Response of Shanghai Center Tower in Consideration of Soil-Structure Interaction

Jiang Xinliang, Lao Haoyin and Li Boqiang

(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 this paper, we developed a simplified model of soil-pile-Shanghai Center Tower by using ANSYS software. The equivalence of soil and pile was used to simplify the study region, and the nearby soil simulated with DP model was plastic region and the periphery soil simulated with super unit was elastic region. We performed seismic response analysis on the whole model considered the soil-pile-structure interaction and the superstructure model based on the assumption of rigid foundation. Finally, we introduced the concept of modified earthquake wave which could provide conditions for getting the dynamic response of the same structure's refined model with consideration of the soil-structure interaction.

**Key words:** Soil-structure interaction; The equivalence of soil and pile; Super unit; Seismic response analysis;  
Modified earthquake wave