

建筑群结构-土-结构相互作用的影响参数研究

王淮峰¹, 楼梦麟¹, 陈希², 翟永梅³

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092;

3. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要: 采用有限元方法, 建立一系列土-结构系统的三维模型, 研究了地震动激励方向及频谱成分、土层剪切波速及阻尼比、基础形式及埋深、上部结构楼层数等对结构-土-结构相互作用(SSSI)规律的影响。分析结果表明, 在垂直于结构物排列方向的地震动激励下, SSSI效应几乎为零; SSSI效应的大小与地震波频谱成分密切相关; 剪切波速小、阻尼小、基础埋深浅, 则SSSI效应明显; 两边结构与目标结构的楼层数相同时, SSSI效应最明显。

关键词: 结构-土-结构相互作用; 土-结构相互作用; 参数化研究; 高层建筑群

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

Parametric Study on Structure-Soil-Structure Interaction of High-rise Buildings

WANG Huai Feng¹, LOU Meng Lin¹, CHEN Xi², ZHAI Yong Mei³

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With finite element method, a series of three-dimensional models of structures and soil were built to study the influence of seismic motion directions, the spectrum composition, shear wave velocities and damping ratios of the subsoil, the foundation forms and depths, floor numbers on structure-soil-structure interaction (SSSI) effect. The calculation result shows that SSSI effect can be ignored when the seismic motion is perpendicular to buildings' orientation. SSSI effect is directly bound up with the spectrum composition of the seismic wave. SSSI effect is apparent if the shear wave velocity is slow, the damping ratio is small and the foundation depth is shallow, and especially the floor numbers of buildings are the same.

Key words: structure-soil-structure interaction (SSSI); soil-structure interaction; parametric study; high-rise buildings

随着社会和经济建设的不断发展, 城市的建设用地日益紧张, 为了满足持续膨胀人口的需求, 一方面建筑物的高度越来越大, 大量的高层甚至超高层建筑不断涌现, 另一方面相邻建筑之间的间距却越来越小, 因此在很多经济发达地区, 尤其是我国沿海一带软土地基上建造了大量的相邻很近的高层建筑。建筑物的振动会通过土体向外辐射能量, 由于波在建筑物之间产生反射等原因, 建筑物的动力特性和地震反应不可避免地受到与其相邻的建筑物的影响。

土-结构相互作用 (soil-structure interaction, SSI) 是地震工程中的重大研究课题, 几十年来一直得到国内外的广泛重视和研究。而结构-土-结构相互作用 (structure-soil-structure interaction, SSSI) 是近 40 年来提出的研究课题, 属于土-结构相互作用问题的一个分支领域, 它研究在外加荷载或者地震激励下, 相邻建筑物之间的动力反应, 即一个建筑物的地震反应, 不仅要受到周围地基土的影响, 同时还要受到与其相邻的建筑物通过地基土对其施加的影响。

随着对土-结构相互作用研究的日趋深入, 各种实验手段和理论方法被用于分析 SSSI 问题, 极大地促进了这一研究领域的发展。Whitman^[1]于 1969 年指出基础间通过土体相互作用的重要性, Warburton 等^[2-4]在 1969—1972 年间的研究工作标志着 SSSI 研究的开始。SSSI 研究的快速发展得益于核电站的大规模建设。在日本国际工程贸易部 (MITI) 的授权下, 日本核动力工程公司 (NUPEC) 于 1994—2002 年间计划并进行了一系列野外实验和实验室实验,

收稿日期: 2012-02-20

第一作者: 王淮峰(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为土-结构动力相互作用。E-mail: forgotten_wang@yahoo.com.cn

通讯作者: 楼梦麟(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土-结构动力相互作用。E-mail: lml@tongji.edu.cn

称作“相邻结构的动力相互作用模型实验”^[5-8]. 有关 SSSI 问题的研究成果详见文献^[9].

由于已有研究工作的模型过于简化及方法过于复杂,研究成果较难应用于实践. 计算机技术的快速发展使得采用三维模型研究 SSSI 成为可能. 本文对通用有限元程序 ANSYS 进行二次开发,构建并行计算系统^[10-11],通过有限元方法建立了一系列典型高层框架结构-土层系统的三维模型,计算了地震作用下,三幢高层结构的动力响应,研究了 SSSI 效应的影响参数.

1 数值分析模型及评价方法

采用 3 幢相同的 12 层建筑为分析模型,3 幢建筑的相对位置及柱网布置见图 1、图 2. 该建筑为现浇混凝土框架结构,长 $L=42.0\text{ m}$,宽 $B=14.1\text{ m}$,层高 $h=3.6\text{ m}$,基频 1.29 Hz . 柱截面 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$,框架梁截面 $250\text{ mm}\times 600\text{ mm}$,走道梁截面 $250\text{ mm}\times 400\text{ mm}$. 基础为箱型基础,埋深 $H_b=3.5\text{ m}$. 结构间距采用量纲为一参数 $\bar{D}=D/B$ 来衡量,其中 D 为相邻两建筑之间的净距. 土层厚度 $H=30\text{ m}$,剪切波速 $v_s=150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,土体阻尼模型采用滞后阻尼^[12],阻尼比 $\xi=0.05$. 根据文献^[13]的研究,人工边界的引入将导致地震激励源范围减少,其适用性需要进一步研究,因此本文将土层范围取得足够大,以减小边界的影响. 沿质点振动方向,土层从结构边缘外拓 $21H$;沿垂直质点振动方向,土层从结构边缘外拓 $2H$;经验算,计算误差可以控制在 5% 以内. 网

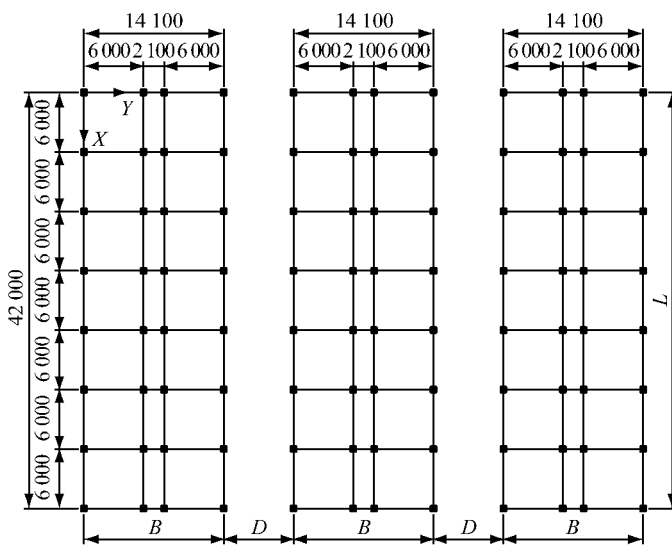


图 1 计算结构体系平面图(单位:mm)

Fig.1 Structure arrangement plan (unit: mm)

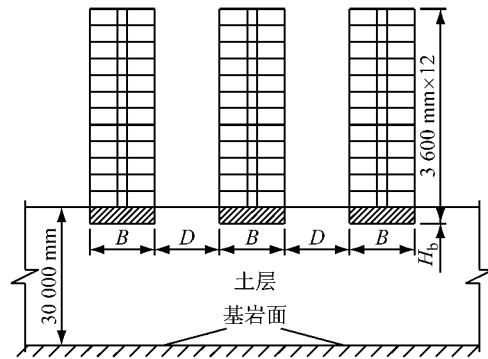


图 2 计算结构体系立面图

Fig.2 Structure arrangement elevation

格划分的大小,对于土-结构动力相互作用问题的计算非常重要,本文按 $1/8$ 的最小波长为限值来划分有限元网格. 地震波为由基岩竖直接传播的剪切波,共 3 条,加速度峰值调整为 $0.35\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,其时程及傅氏谱见图 3. 表 1 给出了 3 条地震波的相关信息. 建模时,结构梁柱采用 beam188 单元,桩采用 pipe16 单元,楼板及箱基采用 shell63 单元,土体采用 solid45 单元. 由于多结构-土层系统的自由度数巨大,且本文的工况数众多,因此作为探索性研究,忽略了土体的非线性特性及基础与土体的接触非线性.

表 1 地震波资料

Tab.1 Data of seismic waves

序号	编号	类型	地点	地震时间
1	R1	人工基岩波	上海	
2	P0214	实测基岩波	Livermore	19800124 19:00
3	P0125	实测基岩波	Friuli	19760506 20:00

本文主要考虑两边建筑对中间建筑的影响. 对应于每种工况,均计算单独一幢建筑-土层系统的地震反应(以 $\bar{D}=0$ 表示). 采用地震激励方向上基底剪力峰值的相对百分比作为 SSSI 的影响系数来评价结构间相互影响,即

$$e = \frac{V - V^*}{V^*} \times 100\%$$

式中: V, V^* 分别为地震波激励下 3 幢建筑相邻时中间幢建筑、单幢建筑的基底剪力峰值或简谐波激励下 3 幢建筑相邻时中间幢建筑、单幢建筑的基底剪力稳定值.

2 影响参数研究

2.1 输入地震波特性的影响

地震动分别沿平行于建筑物排列方向(即质点

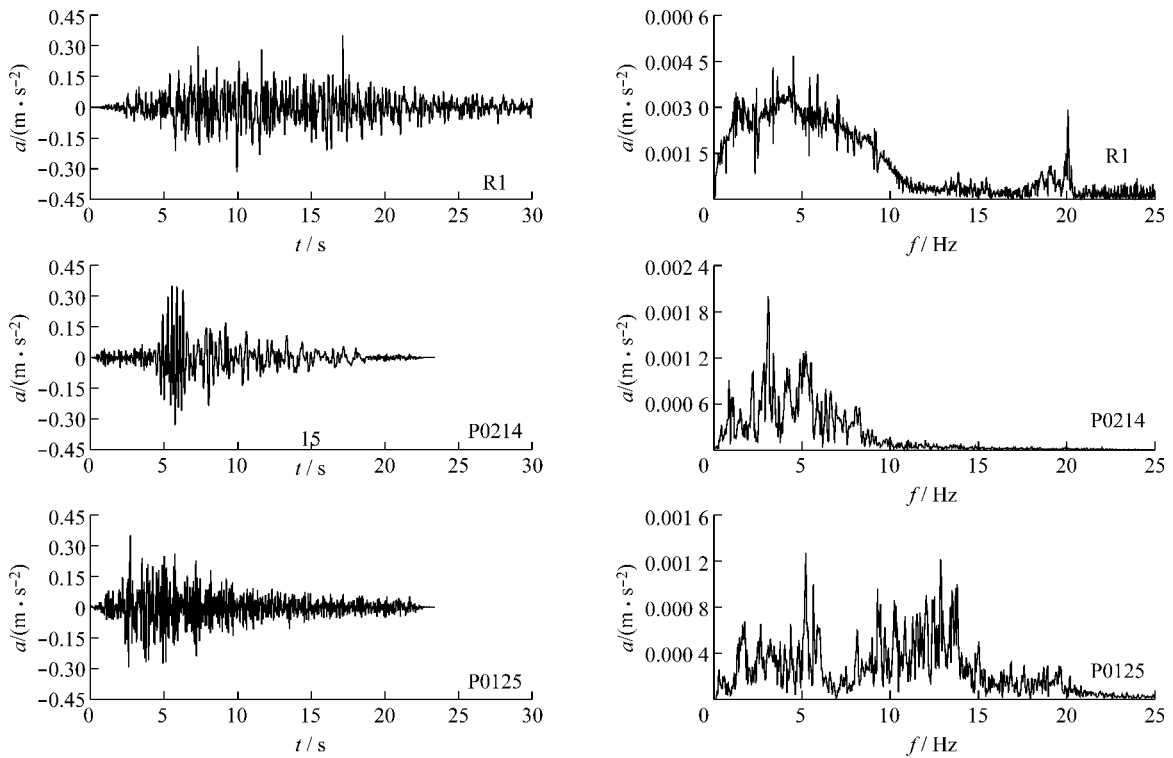


图 3 地震波时程及傅氏谱

Fig.3 Time histories and Fourier spectrums of seismic waves

沿 Y 向振动)和垂直于建筑物排列方向(即质点沿 X 向振动)输入时,影响系数差别很大,见图 4.当地震动沿垂直于建筑物排列方向激振时,不论结构间距如何,影响系数的曲线一直稳定在零轴附近,即相邻结构的存在基本不会对目标结构物的基底剪力产生影响.而当地震动沿平行于建筑物排列方向激振时,相邻结构的存在大大改变了目标结构的地震反应,基底剪力的峰值可增大 40% ($\bar{D}=0.1$).随着结构间距的增大,影响系数趋于零.因此,以下的分析均采用地震动沿平行于建筑物排列方向激振.

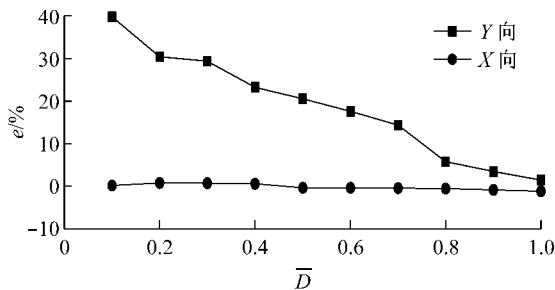


图 4 不同地震动激励方向下影响系数曲线(R1 地震波)
Fig.4 Influence coefficient curves on different excitation directions (R1 lateral excited)

3 条地震波激励下,影响系数随结构间距的变化见图 5.相邻结构的存在导致了基底剪力的较大改

变,当 $\bar{D}=0.1$ 时,基底剪力可增大 58%.随着结构间距的变大,相邻结构对基底剪力的影响迅速减小.当 $\bar{D}=1.0$ 时,影响已趋近于零.不同地震波作用下,影响系数随结构间距的变化规律基本一致,但相邻结构对基底剪力产生的影响大小差异很大,这主要源于地震波频谱成分的不同.由图 6 可知,相邻结构产生的影响与外源激励的频率密切相关,在 $\bar{D}=0.5$ 时,基底剪力可增大近 50%(当外源激励为 $f=1.06$ Hz 的简谐波时).相邻结构的存在不仅有可能增大结构的动力反应,在某些情况下也可能减小结构的动力反应,产生有利影响.

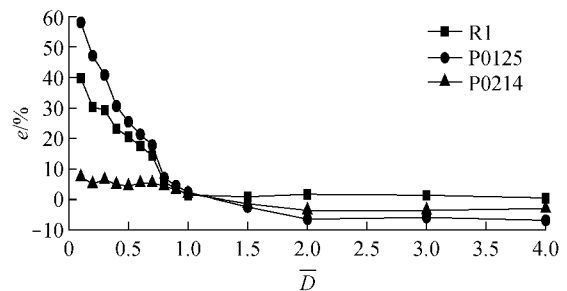


图 5 不同地震波激励下的影响系数曲线
Fig.5 Influence coefficient curves with different seismic waves

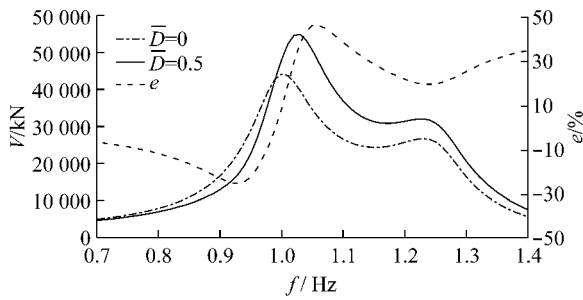


图 6 不同频率简谐波激励下基底剪力稳定值

Fig.6 Steady value of base shear excited by steady-state wave with different frequencies

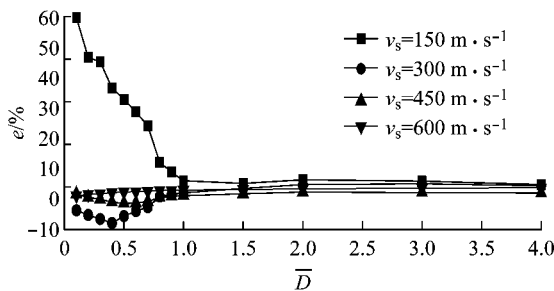


图 7 不同土层剪切波速下的影响系数曲线 (R1 地震波横向激励)

Fig.7 Influence coefficient curve with different shear wave velocities (R1 lateral excited)

2.2 土层剪切波速及阻尼比的影响

土层剪切波速反应了土体的软硬程度,是影响 SSI 的关键因素之一.由图 7 可知,土层剪切波速也对 SSSI 有很大影响,剪切波速越低,土层越软弱,相邻结构产生的影响越明显.当剪切波速 v_s 达到 $450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不论结构间距如何,相邻结构产生的影响已基本可以忽略.不同剪切波速下相邻结构产生的影响量值不同,但当 $\bar{D}=1.0$ 时,影响系数均已趋近于零.由图 8 可知,阻尼比越大,影响系数越小,反之亦然.在不同阻尼比下,影响系数随结构间距的变化规律基本相同,当 $\bar{D}=1.0$ 时,影响已趋近于零.

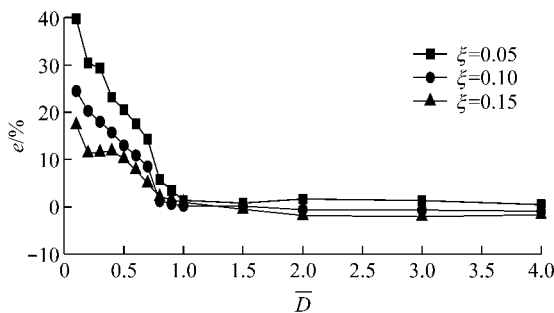


图 8 不同土层阻尼比下的影响系数曲线 (R1 地震波横向激励)

Fig.8 Influence coefficient curve with different damping ratios (R1 lateral excited)

2.3 基础形式及埋深的影响

由于基础形式及埋深不同,土对结构的约束作用不同,土-结构系统的动力反应有所差异.但当考察 SSSI 时,基础形式及埋深产生的影响并不大,如图 9 所示,当基础形式为 2.5 m 箱基、3.5 m 箱基、4.5 m 箱基、5.5 m 箱基及 18.0 m 桩基时,影响系数的曲线基本一致.箱基埋深加深,影响系数稍有减小的趋势,基础采用桩基的影响系数最小.这是因为上部结构振动带动基础振动进而影响相邻结构的程度减小.从能量角度看,上部结构质量不变,基础的埋深及质量增大,与周围土体结合变好,地震动能量由土体通过基础传导到上部结构后,再返回基础及土体的能量就减小,从而,对相邻结构的影响就减小.

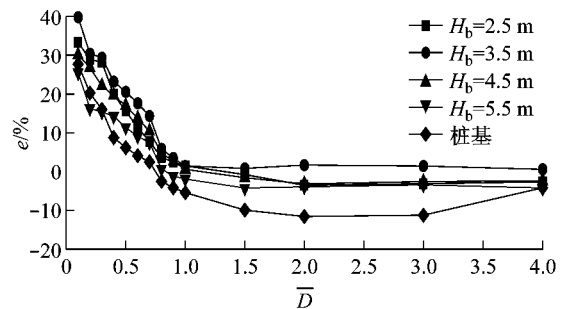


图 9 不同基础形式及埋深下的影响系数曲线 (R1 地震波横向激励)

Fig.9 Influence coefficient curve with different foundation forms and depths (R1 lateral excited)

2.4 上部结构的影响

分别计算了不同楼层数的影响系数,各楼楼层数见表 2,计算结果见图 10、图 11.可知,当 3 幢结构楼层数相同时,随着结构楼层数的增加,SSSI 效应的影响范围有所增加,但影响量值不一定增加,且楼层数为 16 层时的最大影响系数大于 12 层和 20 层,

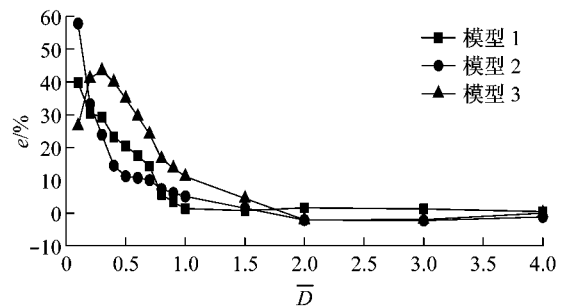


图 10 中间结构不同楼层数下的影响系数曲线 (R1 地震波横向激励)

Fig.10 Influence coefficient curve with different numbers of floors of middle building (R1 lateral excited)

表 2 各模型楼层数

Tab.2 Numbers of floors of each models

模型	楼层数/层		
	左边楼	中间楼	右边楼
1	12	12	12
2	16	16	16
3	20	20	20
4	4	12	4
5	20	12	20

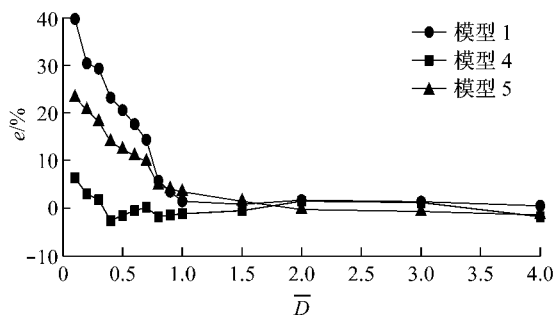


图 11 两边结构不同楼层数下的影响系数曲线(R1地震波横向激励)

Fig.11 Influence coefficient curves with different numbers of floors of lateral buildings (R1 lateral excited)

这主要是由结构频率和地震波频谱成分的相对关系导致的. 当两边结构楼层数较高时, 对中间结构的影响较大, 反之亦然. 但影响最大情况发生在两边结构楼层数与中间结构楼层数相同时, 这主要是因为衍生波与结构频率一致, 发生共振现象导致的.

3 结论

本文采用有限元方法, 建立了一系列土-结构系统的三维模型, 研究了地震动激励方向及频谱成分、土层剪切波速及阻尼比、基础形式及埋深、上部结构楼层数等对结构-土-结构相互作用规律的影响. 分析结果表明, 在垂直于结构物排列方向的地震动激励下, SSSI 效应几乎为零; SSSI 效应的大小与地震波频谱成分密切相关; 剪切波速小、阻尼小、基础埋深浅, 则 SSSI 效应明显; 两边结构与目标结构的楼层数相同时, SSSI 效应最明显.

由以上的分析结果可知, 相邻结构的存在会严重影响目标结构的地震响应, 因此, 迫切需要更加深入地研究 SSSI 现象及其对结构地震响应的影响. 同时, 也需要对已有重要建筑或建筑群的动力响应进行分析.

参考文献:

- [1] Whitman R V. The current status of soil dynamics[J]. Applied Mechanics Reviews, 1969,22:1.
- [2] Richardson J D. Forced vibrations of rigid bodies on a semi-infinite elastic medium[D]. Nottinghamshire: University of Nottingham Department of Mechanical Engineering, 1969.
- [3] Warburton G B, Richardson J D, Webster J J. Forced vibrations of two masses on an elastic half space[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions, ASME, 1971,38(1):148.
- [4] Warburton G B, Richardson J D, Webster J J. Harmonic responses of masses on an elastic half space[J]. Journal of Engineering for Industry, ASME, 1972,194:193.
- [5] Nakagawa S, Kuno M, Naito Y, et al. Forced vibration tests and simulation analyses of a nuclear reactor building[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998,179(2):145.
- [6] Kitada Y, Hirotsu T, Iguchi M. Models test on dynamic structure-structure interaction of nuclear power plant buildings[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999,192(2/3):205.
- [7] Xu J, Costantino C, Hofmayer C, et al. Seismic response prediction of NUPEC's field model tests of NPP structures with adjacent building effect [C]//2004 ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference. San Diego, 2004:1-11.
- [8] Broc D. Soil structure interaction: theoretical and experimental results[C]//2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (PVP2006/ICPVT-11); Pressure Vessel Technologies for the Global Community. Vancouver[s. n.]: 2006:1-6.
- [9] Lou M, Wang H, Chen X, et al. Structure-soil-structure interaction: Literature review [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011,31(12):1724.
- [10] 夏江, 陈清军. 高性能计算在复杂场地土地震反应分析中的应用[J]. 高性能计算技术, 2007(1):60.
XIA Jiang, CHEN Qingjun. High performance computing in complex topography seismic response analysis [J]. High Performance Computing Technology, 2007(1):60.
- [11] 白建方, 楼梦麟. 并行计算系统的构建及其在土木工程中的应用[C]//岩土工程数值方法与高性能计算学术研讨会. 大连:[出版社不详], 2007:30-33.
BAI Jianfang, LOU Menglin. Construction and application to civil engineering of parallel computing systems[C]//Seminar on Numerical Method in Geotechnical Engineering and High Performance Computing. Dalian:[s. n.], 2007:30-33.
- [12] 楼梦麟, 潘旦光. 滞后阻尼在土层时域分析中的应用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2004,32(3):281.
LOU Menglin, PAN Danguang. Hysteretic damping application in time domain analysis of soil layer[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004,32(3):281.
- [13] 楼梦麟, 潘旦光, 范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2003,31(7):757.
LOU Menglin, PAN Danguang, FAN Lichu. Effect of vertical artificial boundary on seismic response of soil layer[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003,31(7):757.