

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.012

高层结构非线性地震反应分析

胡小勇

(武汉铁路局,湖北 武汉 430030)

摘要:从国内外地震记录库中挑选出 2 条具有丰富长周期信息的长周期地震波,利用正交化 HHT 法对 2 条地震波进行时-频特征分析计算,同时以 2 条常用地震波为参照,进行时-频特征的比对分析。然后,以一实际高层结构为例,利用 ANSYS 有限元软件建立有限元数值模型,分别以前 4 条地震波为输入,进行该高层结构的非线性动力反应分析。结果表明:高层结构对不同类型地震波的过滤作用不同,对长周期地震波的过滤作用更加明显;长周期地震波作用下的结构响应明显大于普通地震波作用下的结构响应,其中位移响应较加速度响应明显。

关键词:正交化 HHT 法;长周期地震动;非线性动力反应;地震动特性;高层结构

中图分类号:TU 443

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2014)06-0529-06

Analysis of nonlinear seismic response of high-rise structure

HU Xiaoyong

(Wuhan Railway Bureau, Wuhan 430030, China)

Abstract: Two long-period seismic waves with abundant long-period information were selected from earthquake records databases from all over the world. The frequency and spectrum characteristics of these two seismic waves were investigated with the orthogonal HHT (Hilbert-Huang transform) method, and compared with those of two commonly used seismic waves. A complex high-rise building was selected as a case study, in which a finite element model was established with the ANSYS software, and nonlinear dynamic response analysis was conducted on the complex high-rise building with the four seismic waves mentioned above as an input. The results show that the complex high-rise building has different effects in filtering seismic waves, and it can filter long-period seismic waves significantly. In addition, the structure's seismic response to long-period seismic waves is greater than it is to common seismic waves, and the displacement response is more significant than the acceleration responses.

Key words: orthogonal HHT; long-period earthquake; nonlinear response analysis; earthquake properties; high-rise structure

近年来,随着高层结构、大跨度桥梁及大型体育馆等自振周期较长的结构不断涌现,该类高层结构的抗震性能日益成为工程界需要解决的难题之一^[1-2]。地震动特性很复杂,受到震源、震中距和场地条件等因素的影响,尤其是远场软土地场上的地震地面运动包含丰富的长周期成分,会对大型且自振周期较长的建筑结构造成严重的破坏。如 1983 年日本海中部 7.7 级地震,距离震中约 270 km 的新潟市大型油罐附属物被破坏并有流体溢出^[3];1985 年墨西哥大地震,400 km 以外的墨西哥城内部分周期较长的高层结构破坏严重^[4];2003 年日本的十胜冲地震,距离震中较远的某地区大型储油罐产生溢流,引起重大火灾^[5]。国内有学者对长周期地震动特性及反应谱进行过研究^[6-8],并有部分学者研究了该类地震动作用下的高层结构地震反应^[9-10],但现行抗震设计规范关于长周期地震动方面的要求和规定还有很大的空缺,已无法满足日益发展的高层及超高层的设计需求。

为了考察高层结构在不同类型地震动下的地震反应规律,本文从世界地震记录库中选取 2 条具有丰富长周期信息的地震波,首先利用正交化 HHT(Hilbert-Huang transform)法对这 2 条长周期地震波进行时-频特性分析,并将其与 2 条常用的普通地震波进行对比。然后,以一高层结构为研究对象,建立有限元数值模型,

分别以前面4条地震波为输入,计算其在不同地震动输入下的动力响应。

1 理论与方法概述

1.1 OHHT 原理介绍

OHHT(orthogonal Hilbert-Huang transform)方法主要思路是将原始信号 $x(t)$ 采用EMD(empirical mode decomposition)分解方法,得到有限个IMF(intrinsic mode function)分量,然后利用希尔伯特变换得到希尔伯特谱。对任一正交化IMF分量 $C(t)$ 作Hilbert变换有^[11]:

$$\hat{C}(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

式中: P ——柯西主值(cauchy principal value); t ——时间变量; τ ——时间步长。通过构造简析信号,对所有IMF进行希尔伯特变换,用频率-时间显示,就是原始信号 $x(t)$ 的希尔伯特谱 $H(\omega, t)$:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt}$$

式中: $a_j(t)$ ——瞬时幅值; $\omega_i(t)$ ——瞬时频率。

$H(\omega, t)$ 具有良好的局部分辨率,能很好地表述时间、频率上原始信号的幅值变化。同时正交化HHT方式是自适应的,无能量泄露,且适用范围广。

1.2 结构弹塑性本构模型的选取

采用基于应力-应变的结构弹塑性本构模型对钢筋、混凝土2种不同材料构件进行等效处理^[12]。数值模拟中,材料强度特征服从von Mises屈服条件。von Mises屈服面及双线性等向硬化模型的应力-应变曲线在主应力空间形状见图1。

von Mises 准则的屈服条件定义为

$$f = \sqrt{3} \sqrt{J_2} - y(H_a) = 0$$

式中: $y(H_a)$ ——单轴屈服应力; J_2 ——第二不变应力偏量。从而将等效应力表达为 $\sqrt{3} \sqrt{J_2}$ 。

上述模型所需提供的计算变量有: $y(H_a)$ 、弹性模量 E 、泊松比 μ ,屈服后切线模量 E_t 。

1.3 时程分析方法方程介绍

多自由度体系在动力荷载作用下,其运动方程为^[13]

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K} \mathbf{y} = -\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}_g$$

式中: $\mathbf{M}$ ——体系的质量矩阵; $\ddot{\mathbf{y}}$ ——体系的加速度响应; $\mathbf{C}$ ——体系的阻尼矩阵; $\dot{\mathbf{y}}$ ——体系的速度; $\mathbf{K}$ ——体系的刚度矩阵; $\mathbf{y}$ ——体系的位移响应; $\ddot{\mathbf{x}}_g$ ——地面运动加速度激励。式(4)中,阻尼假定为与速度相关的黏滞阻尼,工程中常用瑞利阻尼建模来实现,具体表达式如下:

$$\mathbf{C} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{K}$$

式中: a_0 、 a_1 ——瑞利阻尼的质量比例系数和刚度比例系数,通过结构的前两阶自振频率确定。

2 地震波的选取与频谱特性分析

为了分析不同类型地震波对高层结构的地震反应影响,本文分别从1985墨西哥8.1级地震(TLHB-EW地震记录)、1999年发生于台湾7.6级集集地震(TCU087-NS地震记录)记录中选取2条具有典型长周期信息的地震波进行分析,并选取2条常用的普通地震波EL-Centro-NS波和Taft-EW波作为对比参考。图2为所选的4条地震波加速度时程图。

地震记录的频谱分布对高层结构的响应有很大影响,可以从反应谱显现出来。分别求出4条地震波的反应谱,见图3。长周期基岩地震波和普通基岩地震波的时-频特征对比见表1。由图3可以看出,2条长周期地震波的反应谱在周期大于1s后谱值显著大于2条普通地震波,具有较明显的长周期特征,因此对自振周期较长的高层结构地震反应的影响将较为明显。

运用正交化HHT方法对长周期地震波进行时-频分布分析,按本文理论计算所选4条地震波的Hilbert谱,见图4。

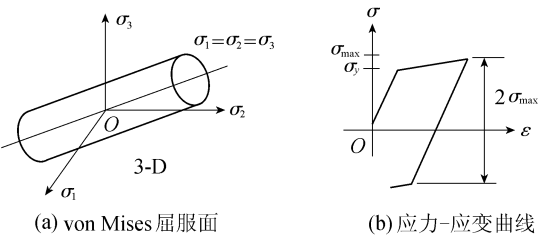


图1 双线性等向硬化模型

Fig. 1 Bilinear isotropic hardening model

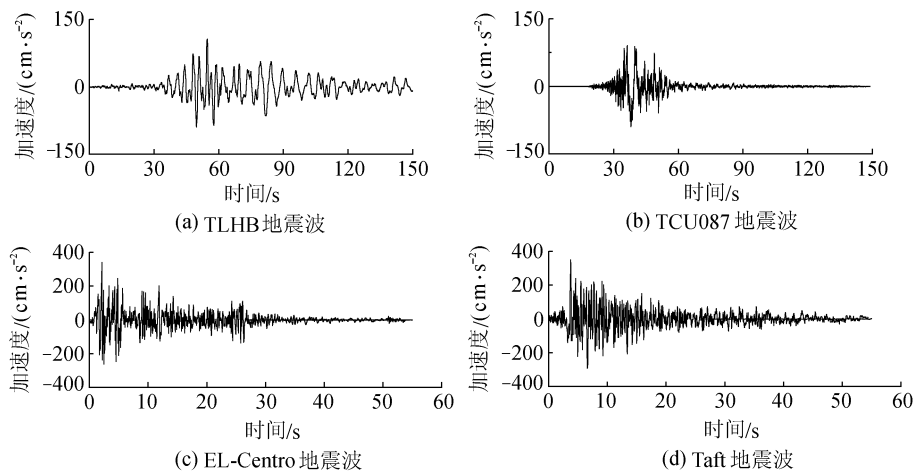


图 2 本文所选的地震动记录

Fig. 2 Time history curves for four seismic waves

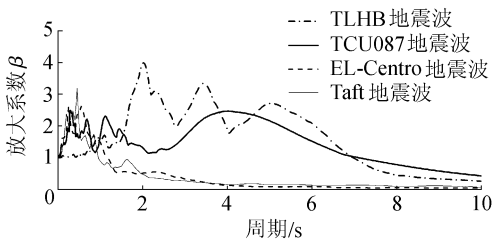


图 3 本文所选地震记录的反应谱 ($\zeta=5\%$)

Fig. 3 Standard acceleration response spectrums for four seismic waves ($\zeta=5\%$)

表 1 地震波的时-频特征对比

Table 1 Time and frequency characteristics of seismic waves

地震波	加速度峰值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	持续 时间/s	动力放大 系数 $\beta_{\max}$	特征 周期/s
TLHB	106.67	150.00	4.01	2.02
TCU087	-135.88	150.00	5.40	1.93
EL-Centro	341.72	53.74	2.49	4.05
Taft	175.93	54.44	2.86	1.40

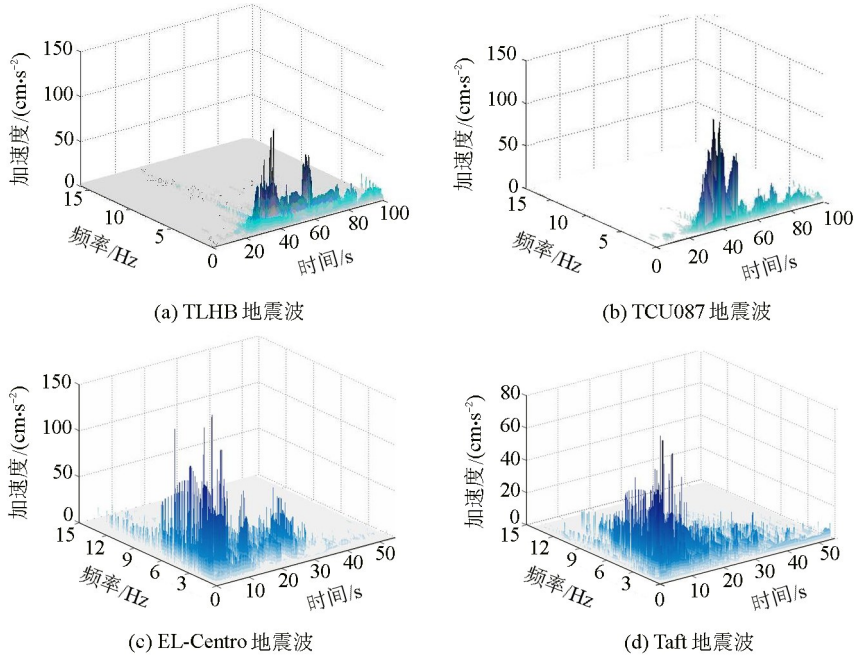


图 4 4 条地震波的时-频谱

Fig. 4 Three-dimensional time-frequency spectrums for four seismic waves

由图 4 三维时-频谱可以看出,2 条长周期地震波 (TLHB 波和 TCU087 波) 的时-频分布与普通基岩地震波 (EL-Centro 波和 Taft 波) 的时-频分布有很大的不同:长周期地震波的能量主要集中在低频段,分布比较集中,大于 5 Hz 的成分基本为零;而普通地震波能量的频率成分比较丰富,在 0 ~ 15 Hz 都有较大分布;在时域分布上,长周期地震波能量较为分散,作用时间较长,低频成分主要在 60 s 之后,而普通基岩地震波能量较

集中,作用时间短,30 s 以后基本分布为零。

3 有限元数值模型的建立

本文以某高层建筑为例进行地震反应分析^[14],该建筑上部结构为21层巨型钢框架结构体系。框架的层高为4 m,每边9跨,跨度为5.4 m,结构平面尺寸为48.6 m×48.6 m,结构构件尺寸及布置参见文献^[14],其材料参数见表2。该建筑主体结构采用钢框架加外围支撑的形式,属于典型的平面不规则和竖向刚度不规则的高层结构。采用大型有限元软件 ANSYS14.0 建立有限元数值模型^[15],其中梁、柱采用 BEAM188 单元模拟,楼板采用 SHELL63 单元模拟,图5为 ANSYS 有限元数值模型示意图。

在结构动力分析之前,首先对有限元数值模型进行模态分析。本文采用分块兰索斯法对图5有限元数值模型进行模态分析,该方法效率较高且精度较好。部分自振频率见表3。由表3可以看出,该结构的第1阶自振频率是0.58 Hz,具有较长的自振周期。

4 不同类型地震波作用下高层结构非线性地震反应分析

按照 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》的要求^[16],抗震在防烈度为7度多遇地震和7度罕遇地震情况下,需要分别将输入地震加速度激励的幅值调整到35 cm/s²和220 cm/s²。图6~8分别为该高层结构的加速度峰值放大系数、位移包络图和层间位移角包络图。

表3 结构自振特性

Table 3 Self-vibration characteristics of structure																
阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50
频率/Hz	0.58	1.69	3.32	4.54	6.19	8.41	8.8	9.35	9.58	10.11	14.08	16.71	18.47	19.01	19.62	19.98

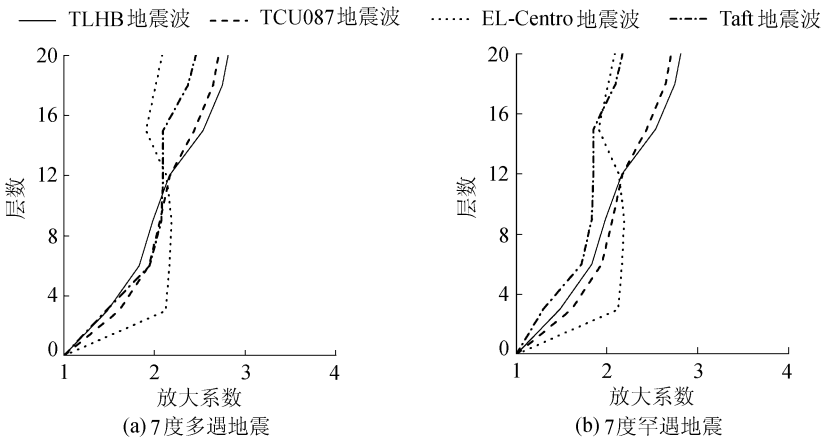


图6 结构楼层加速度放大系数包络图

Fig. 6 Story acceleration amplification factor envelope diagram

从图6可以看出,长周期地震波作用下高层结构上半部分各层加速度峰值放大系数均大于普通地震波作用下的结果,且随楼层的升高有逐渐增大的趋势。从图7可以看出,不同类型地震波激励下,高层结构楼层最大位移、层间位移角随着楼层的升高,变化趋势一致;但长周期地震对高层结构响应的影

表2 材料属性

Table 2 Material parameters of structural components

部位	材料类型	弹性模量/ GPa	密度/ (g·cm ⁻³)	泊松比
横梁	钢材	210	7.80	0.30
柱子	钢筋混凝土	47	3.20	0.20
基础承台	混凝土	30	2.50	0.20
腹杆	钢	210	7.80	0.30
弦杆	钢	210	7.80	0.30
斜撑	钢	210	7.80	0.30

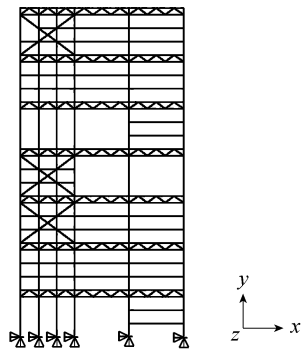


图5 ANSYS有限元数值模型示意图

Fig. 5 Finite element numerical model of complex structure

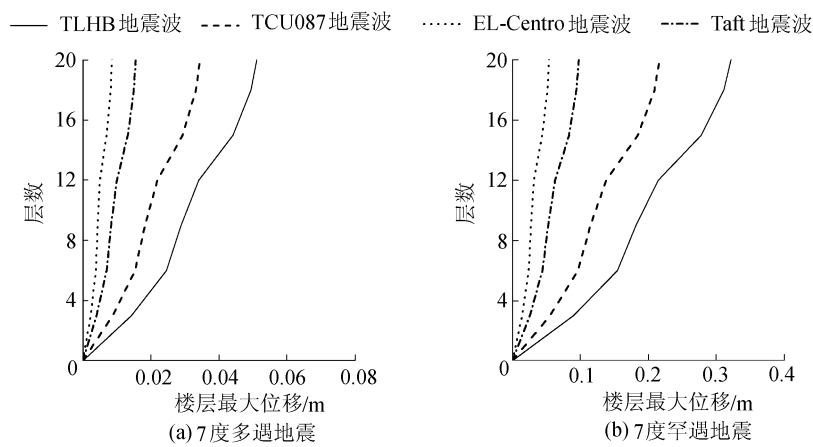


图 7 结构楼层位移包络图

Fig. 7 Story displacement envelope diagram

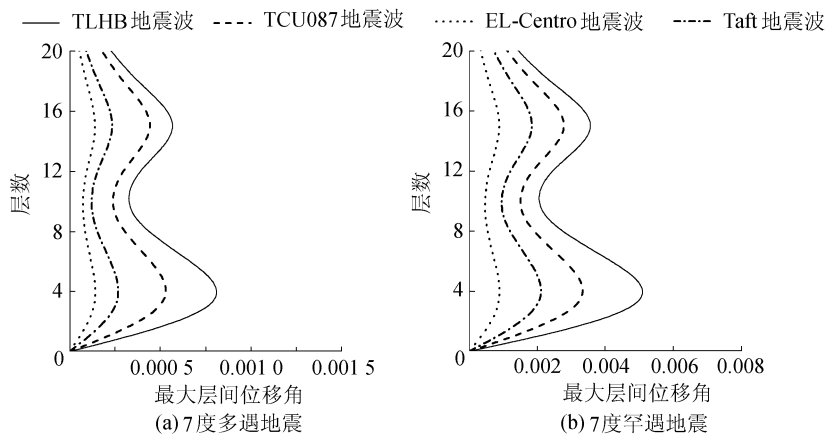


图 8 结构层间位移角包络图

Fig. 8 Story drift angle envelope diagram

对比图 6 和图 7 可以看出,不同地震波对高层结构加速度和位移的响应敏感度不同,高层结构的位移响应对长周期地震波对比较敏感。

为了深入了解高层结构响应的时-频特征,以两类地震波作用下高层结构的加速度反应为研究对象,运用正交化 HHT 方法对其进行时-频分布分析,由于篇幅限制,本文只列出 7 度罕遇地震作用下高层结构顶层处地震反应的时-频谱,见图 9。

对比不同地震波作用下高层结构响应的时-频谱图,可以看出:高层结构对不同地震波的过滤作用明显不同,对于长周期地震波有更加明显的过滤作用,且高层结构顶层响应的能量分布更为集中,主要位于低频部分,分布在 0 ~ 3 Hz,大于 3 Hz 以上基本没有分布;相对而言,普通地震波作用下高层结构顶层反应的能量分布较为分散,在 0 ~ 9 Hz 呈递减分布,反映出高层结构在长周期地震波作用下,非线性程度更剧烈,滞回耗能能力更强,刚度降低更明显。

5 结 论

- a. 长周期地震波持续时间都比较长,且低频成分比较丰富,频带分布狭窄,主要集中在 0 ~ 3 Hz;普通地震波的频谱成分比较丰富,在频域上较宽广,主要分布在 0 ~ 10 Hz 范围内。
- b. 高层结构对不同地震波的过滤作用明显不同,对于长周期地震波过滤作用更加明显。说明在长周期地震波作用下,非线性程度更剧烈,滞回耗能能力更强,刚度降低更明显。
- c. 不同类型地震波作用下,高层结构体系的地震反应及其频谱特性明显不同:长周期地震波作用下结构响应明显大于普通地震波作用下的结构响应,其中位移响应较加速度响应明显。所以应对建于深厚软土地场上的建筑给予充分关注,避免发生共振破坏。

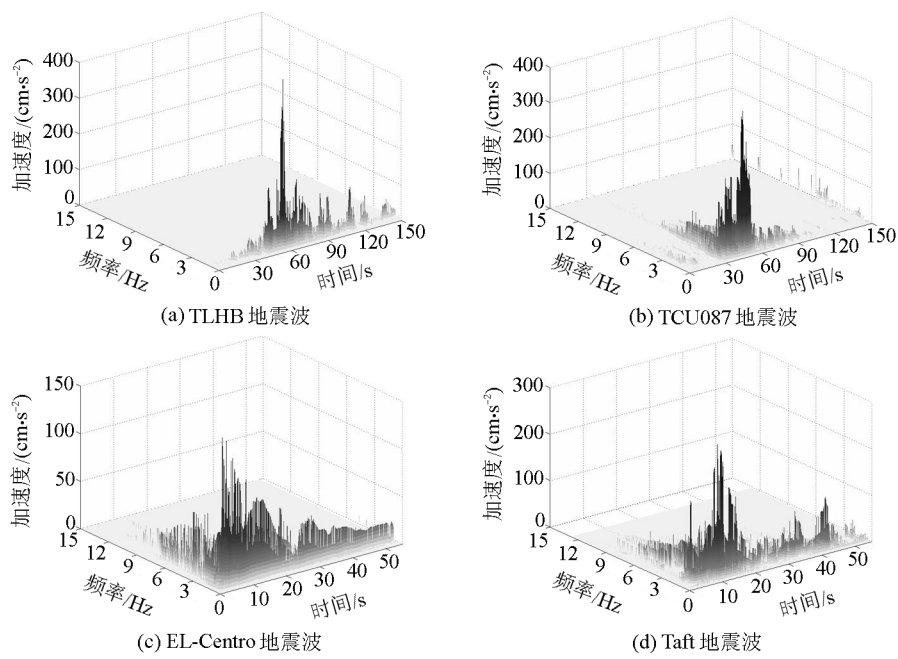


图9 结构顶层反应的时-频谱

Fig. 9 Three-dimensional time-frequency spectrum of roof motion response

参考文献:

[1] 林家浩,张亚辉,赵岩.大跨度结构抗震分析方法及近期进展[J].力学进展,2001,31(3):350-360. (LIN Jiahao,ZHANG Yahui,ZHAO Yan. Seismic analysis methods of long-span structures and recent advances[J]. Advances in Mechanics,2001,31(3):350-360. (in Chinese))

[2] 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.

[3] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006.

[4] 谢礼立,周雍年,胡成祥,等.地震动反应谱的长周期特性[J].地震工程与工程振动,1990,10(1):1-19. (XIE Lili,ZHOU Yongnian,HU Chengxiang,et al. Characteristics of response spectra of long-period earthquake ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1990,10(1):1-19. (in Chinese))

[5] 李春锋,张昕.长周期地震动衰减关系研究的迫切性[J].地震地磁观测与研究,2006,27(3):1-8. (LI Chunfeng,ZHANG Yang. Urgency of the study of long-period ground motion[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2006,27(3):1-8. (in Chinese))

[6] FACCIOLI E,PAOLUCCI R,REY J. Displacement spectra for long periods[J]. Earthquake Spectra,2004,20(2):347-376.

[7] FACCIOLI E,CAUZZI C,PAOLUCCI R. Long period strong ground motion and its use as input to displacement based design[J]. Earthquake Geotechnical Engineering,2007,6:23-51.

[8] 徐龙军,胡进军,谢礼立.特殊长周期地震动的参数特征研究[J].地震工程与工程振动,2008,28(6):20-27. (XU Longjun,HU Jinjun,XIE Lili. On characteristics of ground motion parameters for special long-period ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2008,28(6):20-27. (in Chinese))

[9] 丁海平,刘启方,金星.长周期地震动三维有限元数值模拟方法[J].地震工程与工程振动,2006,26(5):27-31. (DING Haiping,LIU Qifang,JIN Xing. A method of numerical simulation for long-period strong ground motion by 3-D FEM[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2006,26(5):27-31 (in Chinese))

[10] 杨伟林,朱升初,洪海春,等.汶川地震远场地震动特征及其对长周期结构影响的分析[J].防灾减灾工程学报,2009,29(4):473-478. (YANG Weilin,ZHU Shengchu,HONG Haichun,et al. Characteristics of far-field ground motion of Wenchuan earthquake and the effect on long-periodic structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2009,29(4):473-478. (in Chinese))

[11] HUANG N E,SHEN Z,LONG S R,et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London,1998,454:903-906.

[12] 吕明林,金国芳,吴晓涵.钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M].上海:同济大学出版社,1997.

[13] CLOUGH R W,PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. New York: Mc Graw-Hill,1993.

[14] 阴光华,陈清军.地震波反演与土-结构动力相互作用[J].力学季刊,2010,31(2):256-264. (YIN Guanghua,CHEN Qingjun. Inversion of ground motion and analysis of soil-structure dynamic interaction[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2010,31(2):256-264. (in Chinese))

[15] SAEED M. Finite element analysis:theory and application with ANSYS[M]. New York:Prentice Hall,2007.

[16] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S].