

地震动的小波分析技术在高层结构抗震设计中的应用研究^①

张长浩^{1,2}, 封建湖¹, 王勋涛¹, 王 虎¹

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 济南市规划设计研究院 建筑分院, 山东 济南 250101)

摘要: 利用具有良好时频局部化性质的小波基函数时频分析真实地震动, 提出一种可行的基于小波分析法调整地震动的方法。实际地震波(El Centro 波和 TH2TG055 波)经过调幅、小波变换和标准反应谱拟合得到调整后的地震波, 将其输入到拟建结构模型中进行地震反应分析, 对比层间剪力、层间位移及层间位移角等几方面的计算结果, 表明选取小波分析后的地震波作为结构时程分析输入能够得到比较准确的数值, 满足结构抗震设计的需要, 在工程应用方面具有一定的应用参考价值。

关键词: 地震加速度; 小波分析; 重构; 高层钢筋混凝土框架-核心筒结构; 地震动输入; 时程分析
中图分类号: P315.9; TU973 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2016)05-0728-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0728

Application of Wavelet Analysis in Seismic Design of a High-rise Structure

ZHANG Chang-hao^{1,2}, FENG Jian-hu¹, WANG Xun-tao¹, WANG Hu¹

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Department of Architecture, Jinan City Planning and Design Institute, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: Earthquake engineering is a strong focus of civil engineering research, but the primary problem in this respect is the input of seismic motion. In this paper, the time-frequency localization nature of the wavelet function is used to analyze real ground motion, and a feasible method based on wavelet analysis is proposed. The actual seismic wave of El-Centro and TH2TG055 are adjusted by amplitude adjustment, wavelet transform, and standard response spectra fitting, and are then input into a structural model to analyze the seismic response. During seismic response analysis, this paper also analyzes results of story shear force, inter layer displacement, and story drift angle. Results show an improvement in the transformed seismic waves that meet the needs of earthquake resistant engineering and are useful in engineering applications.

Key words: seismic acceleration; wavelet analysis; reconstruction; high-rise RC frame-corewall structure; ground motion input; time history analysis

0 引言

地震是人类所面临最严重的自然灾害之一, 有史以来其所造成的生命财产损失不可计数。地震灾害

与其他自然灾害(如风灾、水灾等)的显著区别在于, 几乎所有的人员伤亡和经济损失都与工程结构及构筑物的破坏密切相关^[1]。2015 年 4 月 25 日 14 时 11

① 收稿日期: 2015-09-14

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2013JM7002)

作者简介: 张长浩(1985—), 男(汉族), 山东济南人, 博士研究生, 工程师, 从事结构动力分析与结构抗震研究。

E-mail: zch0825@sina.com。

析。小波函数的定义为: 设 $\Psi(t)$ 为一平方可积函数, 即 $\Psi(t) \in L^2(R)$, 若其傅里叶变换 $\hat{\Psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) e^{-i\omega t} dt$ 满足允许条件:

$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty$$

则称为基本小波或母小波。

信号的小波变换一般分为 2 种: 连续小波变换和离散小波变换。信号 $x(t)$ 的连续小波变换可以定义为以函数族 $\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为积分核的积分变换, 即:

$$CWT\{x(t); a, b\} = \int x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt$$

式中: * 号代表复共轭; a 表示尺度因子; b 表示时间因子。通过调整 a 的大小可对小波函数进行伸缩, 改变 b 可以对小波进行定位, 整个小波变换可以看作以母函数 $\phi(t)$ 为镜头的显微镜。

小波(Wavelet)分析提供一种可以将频域和时域分析联系起来的方法, 能够表述地震波信号的时频局部性质, 从而了解到一条地震波中哪些时刻的频率成分与结构的基本周期相近等问题^[5-6]。小波分析方法的理论和过程比较复杂, 本文以 MATLAB 为平台提供常用的小波函数-Daubechies (dbN)。该平台具有如下基本性质: 正交性、双正交性、紧支撑性、连续小波变换及离散小波变换, 支撑长度为 $2N-1$, 滤波器长度为 $2N$, 并呈近似对称性^[7], 可进行地震波正交分解, 将频域划分为不同相邻的频带, 然后在不同频带中进行调整, 以达到拟合设计反应谱的目的。

1.2 小波方法在地震工程中的应用

地震波的滤波、平稳信号和非平稳信号消噪等领域是利用小波分析方法研究的侧重点。一个波形可以看做是一个复杂的函数或模拟信号, 也可以被看做是一种复杂的随机振动现象。它由有不同振幅和不同频率的谐波分量叠加而成, 地震波就是其中之一^[8]。相对于其他学科领域, 地震工程界应用小波分析方法较晚。直到本世纪初, 小波分析方法才在地震工程学的地震动分析和建筑构件的探伤等^[9]问题中得到应用。李英民等^[10]把随机振动理论用小波分析方法应用于工程结构的抗震问题中; 谢异同^[11]明确阐述用小波方法模拟地震动、调整地震动、调整完后的地震动作为地震动输入结构求解地震响应等问题; 一些学者利用小波的变化在能量泄露等方面进行研究; 在桩基完整性检测中应用小波

分析, 这也是其在结构损伤检测中具体应用的体现^[12]; 刘铁等^[13]利用小波包合成的方法模拟人工地震波。由此可见, 不断深入研究小波分析理论, 将其技术与工程结构抗震结合起来, 将在抗震工程领域得到不断的深入和拓展。

基于小波分析技术变换调整实际地震动具体步骤如下:

(1) 选取真实地震动记录

抗震设计的第一步即是确定设计地震动(地面运动参数或地面运动时程等), 合理的地震动输入是保证设计结果正确的必要条件, 并应尽量满足拟建工程场地地震动的三要素。使地震动的频谱特性、持续时间和峰值加速度更接近规范所规定的的地震动参数来作为抗震设计计算依据。将地震动记录的反应谱与拟建工程场地的标准反应谱相一致作为选波的基本原则^[14]。

(2) 根据建筑抗震设计规范^[4]表 5.1.2-1 峰值加速度的规定, 采用比例法调整选取的实际地震动的加速度幅值, 即:

$$\alpha'(t) = \frac{A'_{\max}}{|A|_{\max}} a(t) \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 和 $|A|_{\max}$ 分别为所选用天然地震波记录的加速度时程和加速度峰值; $\alpha'(t)$ 和 A'_{\max} 分别为调整后的地震动加速度时程和加速度幅值。

(3) 利用 Nigam 法计算地震动反应谱

Nigam 法是指在全部的计算过程中没有引入任何的近似计算方法, 也不会产生任何截断误差和舍入误差, 其具有较高的精度。目前常采用这种精确解法——Nigam 法用于常规处理地震工程的强震记录^[15]。

(4) 比较地震动反应谱和设计反应谱

在 $[0.1, T_g]$ 平台段控制地震动记录加速度反应谱值的平均值, 要求所选地震动记录加速度谱在该周期段的平均值与拟建工程场地的设计反应谱在该平台段的平均值相差 10% 之内; 第二周期段是对结构基本周期 T_1 附近 $[T_1 - \Delta T_1, T_1 + \Delta T_2]$ 段加速度反应谱平均值进行控制, 要求与设计反应谱在该段的平均值相差在 10% 之内, 在选择一地震动记录时, $\Delta T_1 \leq \Delta T_2 = 0.5$ s 为宜。

(5) 求解 k_1, k_2

$$k_1 = T_g / T'_g \quad (2)$$

$$k_2 = \overline{T_g} / \overline{T'_g} \quad (3)$$

式中: T'_g 为地震动反应谱在 $[0.1, T_g]$ 平台段的均值(面积); $\overline{T_g}$ 为设计反应谱在结构基本周期 T_1 附近

$[T_1 - \Delta T_1, T_1 + \Delta T_2]$ 段的均值; $\overline{T_g}$ 为地震动反应谱在结构基本周期 T_1 附近 $[T_1 - \Delta T_1, T_1 + \Delta T_2]$ 段的均值(面积);

(6) 利用小波函数将调幅后的实际地震动记录进行分频,将频域分为相邻的不同频带;相应频带的幅值与 k_1 、 k_2 相乘,调整地震动记录以改变这两个频段的均值,从而达到拟合设计反应谱的目的。调整后重新组合各分量,按照建筑抗震规范要求检查地震动的峰值加速度是否满足,若不满足,则需要继续进行整。

(7) 重复以上调整步骤,直到达到选波方案的要求。

2 地震动的小波分析

2.1 实际地震动选取

在选取实际地震动记录时,要依据拟建工程场地条件和峰值加速度,使其选择的实际地震动记录与要拟合的设计反应谱差距不能太大,要求拟建工程场地条件与实际地震动记录的场地条件相类似,峰值加速度要接近建筑抗震设计规范规定,同时要考虑到实际地震动记录的持续时间满足建筑抗震规范要求。时程分析所用到的地震动峰值加速度如表 1 所列。按照上文所述步骤,本文选取 El Centro 波和 TH2TG055 波,根据拟建工程场地抗震设防烈度 VI 度、场地类别 II 类、地震分组第三组、地震加速度时程的最大值 18 cm/s^2 和 125 cm/s^2 ,采用比例法调整实际地震动的加速度幅值,进行多遇、罕遇地震下的小波变换调整。

表 1 时程分析所用地震动峰值加速度(单位: cm/s^2)

Table 1 PGA in time history analysis (Unit: cm/s^2)

地震影响	Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
多遇地震	18	35(55)	70(110)	140
罕遇地震	125	220(310)	400(510)	620

注:括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 $0.15g$ 和 $0.30g$ 的地区

2.2 地震动的小波变换和比较

多遇地震下调幅 El Centro 波并计算出调幅后的加速度反应谱,与设计反应谱进行对比,如图 2(a)、(b)所示。通过对比图 2(b)可知,二者在 $[0.1, T_g]$ ($[0.1, 0.45]$) 平台段和 $[T_1 - \Delta T_1, T_1 + \Delta T_2]$ ($[0.5, 1.5]$) 段差距较大,故利用小波变换调整此地震动记录拟合设计反应谱。本文利用 Matlab 软件中提供的小波函数 Daubechies(db3)对 El Centro 波进行正交分解,将其分解为 6 个频带。利用重构命令 wrcoef 对各层小波进行重构,并绘出图形,如图 2(c)所示。图 2(d)是对各层小波运用傅里叶变

换后画出的各层小波谱密度曲线,可以看出曲线重叠较少,所以利用小波函数较好地得到分解地震动的效果。利用式(2)、(3)求得反应谱 $[0.1, T_g]$ 和 $[T_1 - \Delta T_1, T_1 + \Delta T_2]$ 平台段的面积调整系数 k_1 、 k_2 ,将调整系数乘以频率段的小波幅值。将调整后的各小波重新组合,与调整前的地震动进行对比[图 2(e)]。对经过小波变换调整的地震动的幅值重新调幅,使其峰值加速度符合建筑抗震规范规定,然后比较计算地震动的反应谱与设计反应谱,如图 2(f)所示。经过计算,可以得到调整后的反应谱在 $[0.1, T_g]$ 和 $[T_1 - \Delta T_1, T_1 + \Delta T_2]$ 平台段差距缩小,利用两段下的面积比可得到二者之间的相对误差分别为 2.962% 和 2.637% ,调整后的拟合误差都在 10% 以内,符合选波方案的规定,达到了调整地震动记录的目的。根据表 1 和上述方法,对罕遇地震下的 El Centro 波进行调幅和小波变换,结果如图 3 所示,调整后的拟合误差在 10% 以内。

为验证该方法的合理性,输入高层结构进行对比分析,图 4 是 TH2TG055 波经过调幅和小波变换得到的结果。其结果满足要求,可以作为结构时程分析中输入的地震动记录。

3 地震动输入高层结构分析

3.1 结构体系介绍

山东省济南市某地块商业综合体项目由高层公寓式酒店、商务综合楼及多层商业裙房组成,总建筑面积约为 18 万 m^2 。其中商务综合塔楼总高度为 150.45 m ,地上 34 层,设有 3 层地下室;综合楼标准层层高为 4.1 m ,其底部四层层高均为 4.5 m ;平面布置为矩形,典型楼层平面长度、宽度分别为 54.8 m 、 36.8 m 。采用框架-核心筒结构作为抗侧力体系,并以地下室顶板作为嵌固端。该塔楼的建筑剖面图与标准层平面图如图 5 所示。核心筒外围墙体的厚度,从底部加强区的 $700 \text{ mm}/500 \text{ mm}$ 逐渐减小到 $400 \text{ mm}/400 \text{ mm}$ 。核心筒内部的墙体厚度根据计算和构造的需要沿高度变化,厚度取值范围为 $300 \sim 250 \text{ mm}$ 。结构第三层及其下各层框架柱截面尺寸均为 $1\ 250 \text{ mm} \times 1\ 250 \text{ mm}$,第四层至十五层之间的框架柱截面尺寸变为 $1\ 200 \text{ mm} \times 1\ 200 \text{ mm}$ 、 $1\ 150 \text{ mm} \times 1\ 150 \text{ mm}$ 。结构各层框架梁的高度为 $850 \sim 700 \text{ mm}$ 。本工程选用梁板的混凝土等级为 C30,柱墙的混凝土等级为 C40~C60。

3.2 模型建立与计算

本工程位于 VI 度抗震设防烈度区,设计基本加

速度为 $0.05g$, 地震分组为第三组, 场地类别 II 类, 特征周期为 $T_g=0.45\text{ s}$, 结构阻尼比取 0.05 , 基本风压荷载标准值 $\omega_0=0.45\text{ kN/m}^2$ (按 50 年一遇风压), 地面粗糙程度为 C 类。结构整体设计分析采用 SATWE 程序, 选择 ABAQUS 进行调整地震动前、后输入高层时程分析。结构计算模型如图 6 所示。

本文取 15 阶振型进行分析, 考虑了扭转耦联和偶然偏心的影响, 结构振型清晰, 自振特性良好。第 1 平动周期 $T_1=4.71\text{ s}$ (Y 向平动), 周期比 $T_i/T_1=0.76$; 结构 X、Y 向最大位移与层平均位移比值的最大值为 1.13, 满足规范规定的不宜大于 1.2; 最大层间位移角为 $1/1105$, 出现在第 23 层, 小于规范规定的框架-核心筒层间位移角最大值 $1/800$; 结构

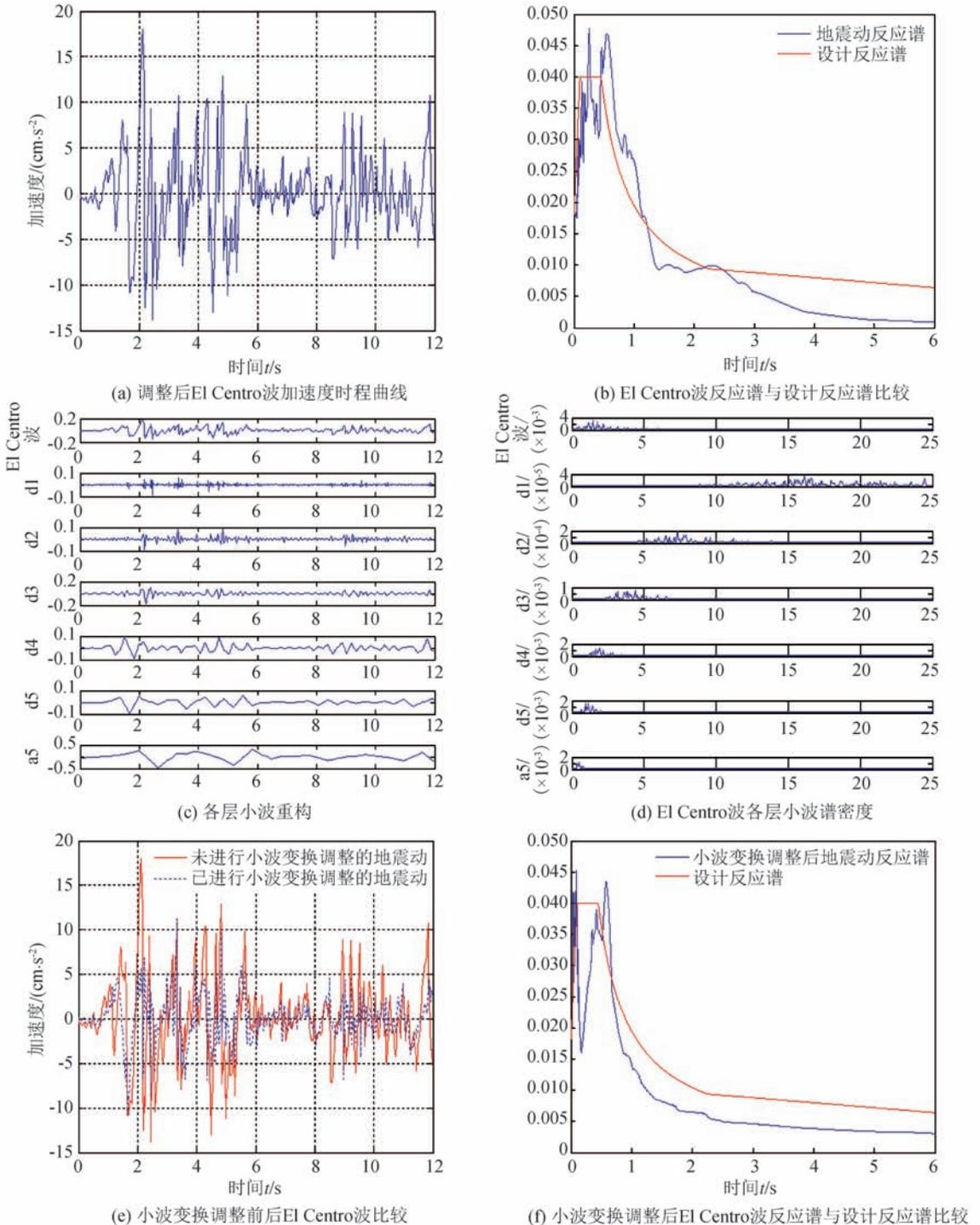
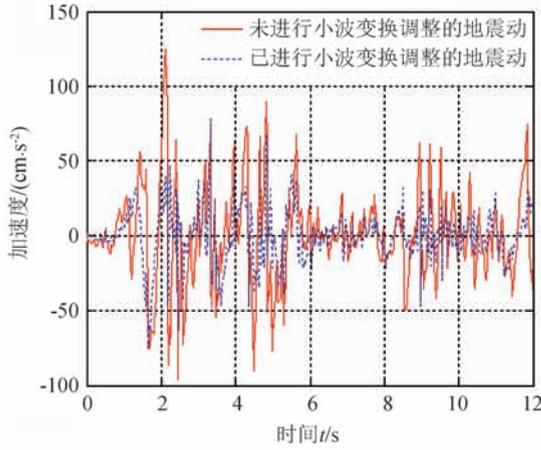
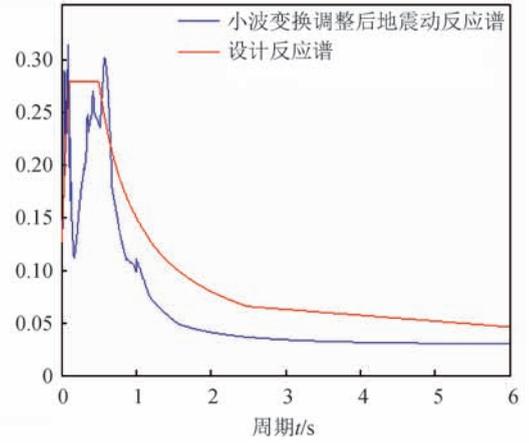


图 2 多遇地震下 El Centro 波调幅和小波变换分析过程

Fig.2 Amplitude modulation and wavelet transform process El Centro wave under frequent earthquakes



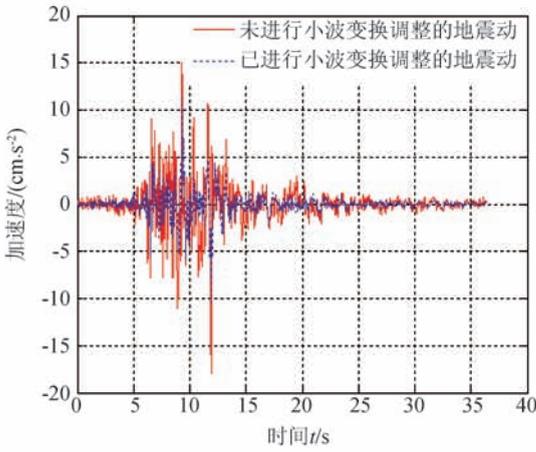
(a) 小波变换调整前后El Centro波比较



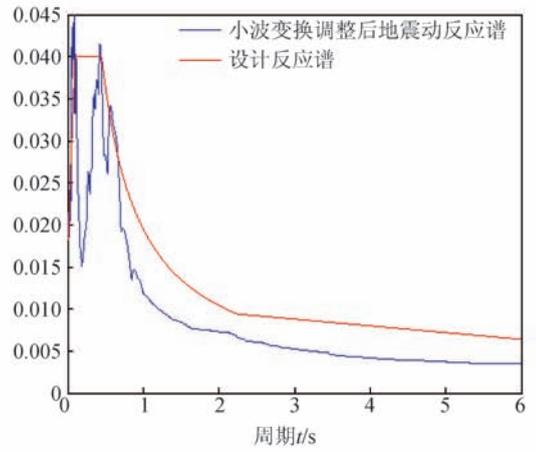
(b) 小波变换调整后El Centro波反应谱与设计反应谱比较

图 3 罕遇地震下 El Centro 波调幅和小波变换分析比较

Fig.3 Amplitude modulation and wavelet transform analysis of El Centro wave under rare earthquakes

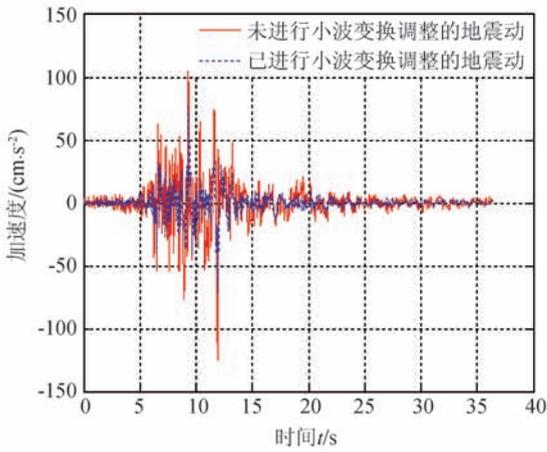


(I) 小波变换调整前后TH2TG055波比较

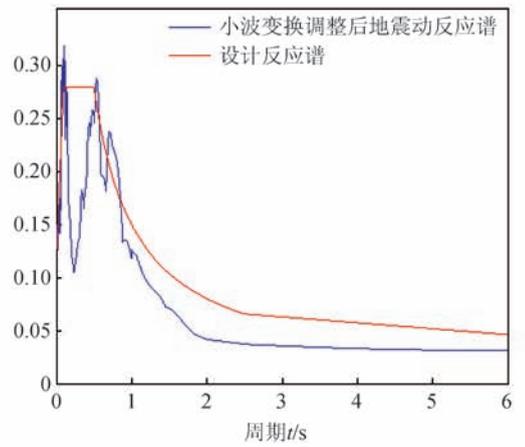


(II) 小波变换调整后TH2TG055波反应谱与设计反应谱比较

(a) 多遇地震



(I) 小波变换调整前后TH2TG055波比较

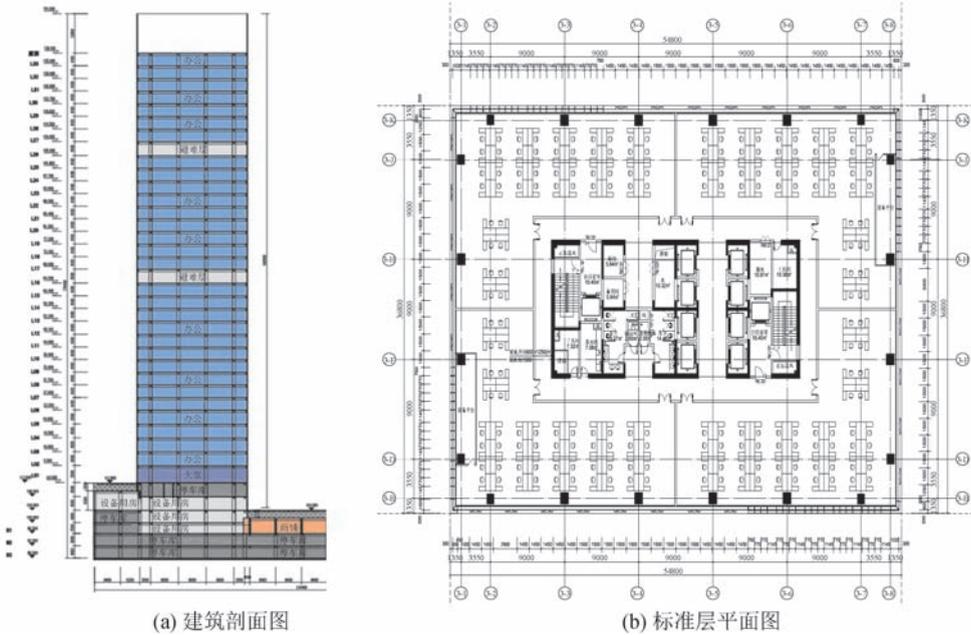


(II) 小波变换调整后TH2TG055波反应谱与设计反应谱比较

(b) 罕遇地震

图 4 不同地震下 TH2TG055 波调幅和小波变换分析比较

Fig.4 Comparison between amplitude modulation and wavelet transform analysis of TH2TG055 wave under frequent and rare earthquakes

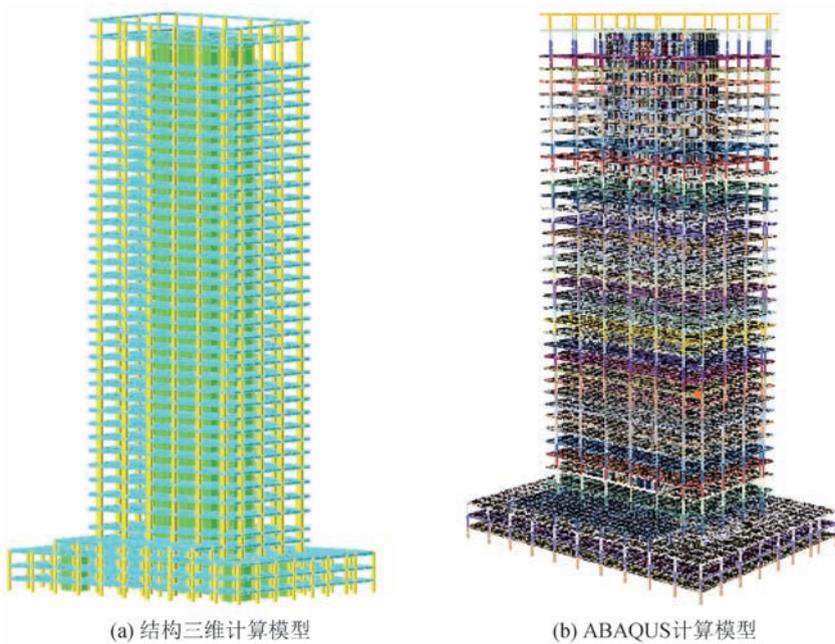


(a) 建筑剖面图

(b) 标准层平面图

图5 建筑剖面图及标准层平面图

Fig.5 Architectural section and plan layout of the typical floor



(a) 结构三维计算模型

(b) ABAQUS计算模型

图6 结构三维计算模型及 ABAQUS 计算模型

Fig.6 Three-dimensional calculation model and ABAQUS calculation model of the structure

最小刚度比为 1.13, 在结构的 12 层, 最小楼层抗剪承载力为 0.86 kN, 满足规范要求, 结构竖向规则, 没有形成薄弱层。结构整体稳定性验算大于 1.4 但小于 2.7, 表明结构体系是稳定的, 但需要考虑重力二阶效应的不利影响。其余指标均满足规范要求, 结构抗侧力构件的平面布置合理有效。

3.3 地震动输入高层结构时程分析

实际地震波经过调幅、小波变换和标准反应谱

拟合得到调整后的地震波, 将其输入到拟建结构模型中进行时程分析, 为结构的抗震设计提出新方法。本文进行时程分析时选取第二节小波变换调整前、后实际地震动——El Centro 波 (简称 E 波) 和 TH2TG055 波 (简称 H 波), 有效持续时间均不小于 5 倍的结构基本周期; 地震波按双向输入, 主次方向加速度最大值的比例为 1:0.85, 符合拟建场地多遇、罕遇地震作用下的要求。

图 7 是多遇地震下,变换前、后 E 波、H 波输入高层结构弹性时程分析主方向计算结果。从图 7(a)看出,每条地震波基底剪力值均大于振型分解反应谱法计算结果的 65%,并且计算结果也不大于 135%;结构基底剪力平均值大于振型分解反应谱法求得的底部剪力的 80%。选取变换后的地震波输入结构进行弹性时程分析满足规范的要求。变换前后四种波各层剪力数值中绝大多数与反应谱数值明显接近,反映出数值集中特性。由层间位

移图可见,变换后的地震波弹性时程分析结果均值与反应谱计算结果相差较小,仅相差 3.90%,而变换前两者相差 5.51%;变换前后地震波顶层位移离散性最大的一条波与反应谱分析得到的顶层位移分别相差 15.4% 和 12.6%。通过对比图 7(c),弹性时程法和反应谱法计算所得层间位移角均未超过位移角限值 1/800,满足规范要求,且变换后的地震波层间位移角数值离散性较小,整体向反应谱曲线靠近。

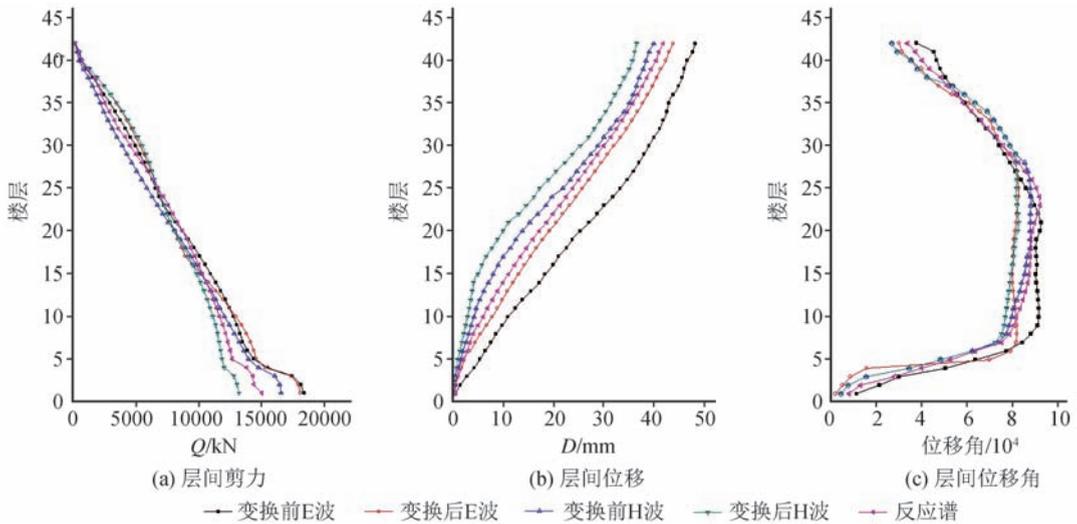


图 7 多遇地震下结构弹性时程分析结果比较

Fig.7 Elastic time-history analysis results of structure under frequent earthquakes

从图 7 得出:将经过小波分析变换后的地震波输入结构模型进行弹性时程分析,计算结果与反应谱法计算的数值较为接近,计算指标满足规范要求。这为改进结构抗震设计提供了新的方法。

随着结构动力模型的不断完善和数值计算效率的大幅提高,结构非线性动力分析日渐成熟,并越来越广泛地应用于复杂结构的抗震设计和性能评估。动力弹塑性时程分析是预测结构地震响应以及评估结构抗震性能的有效方法,已被多国相关设计规范所采用^[16]。该分析方法是一种直接基于结构动力方程的数值方法,可以得到结构在地震作用下各时刻各个质点的位移、速度、加速度和构件的内力,给出结构开裂和屈服的顺序,发现应力和变形集中的部位,获得结构的弹塑性变形和延性要求,进而判明结构的屈服机制、薄弱环节及可能的破坏类型。其存在的主要问题是计算量大,但随着计算机计算能力的不断增强,该方法也已在结构抗震性能分析中经常使用^[17]。本文采用 ABAQUS 对高层结构进行罕遇地震作用下的弹塑性时程分析,将图 3、4 调幅

和变换前后四条波作为输入波,研究小波分析变换实际地震动前后对结构动力响应的差异。该模型中墙板混凝土本构采用 ABAQUS 自带的混凝土损伤模型,梁混凝土本构采用纤维梁模型^[18-19],钢材采用双线性动力硬化模型,考虑包辛格效应,屈强比取 1.2,极限应力所对应的极限塑性应变取 0.025^[20];墙板单元采用 S4R 多层壳单元^[21-22],梁单元采用 B31 单元。采用显示算法进行弹塑性时程分析,计算结果指标如图 8 所示。

罕遇地震作用约为多遇地震作用的 7 倍,设防地震作用的 2.33 倍。但从图 8 结果可以看出,罕遇地震和多遇地震结构底部地震剪力之比平均为 4~5 倍,说明部分构件通过非线性行为退化刚度消减了地震作用,且在罕遇地震作用下结构整体的宏观变形是满足规范要求的。罕遇地震下结构仍能保持直立,主方向最大层间位移角为 1/294,远小于规范限值 1/100。由表 2 可知,结构弹塑性时程分析输入的调整前、后 El Centro 波和 TH2TG055 波得到的基底剪力、顶层位移、层间最大位移角值相差不大于 20%,在统计意

义上符合规范规定,认定选取的地震波有效。图8(d)是前6s该结构第10层的内力时程曲线,可见内力最大值分别在2.7s和5s时出现;同样,从图8(e)

可知位移角最大值在2.3s和5.8s时出现。从图8可以看出,应用小波分析法变换前、后2种波的离散性较小,曲线光滑并趋于一致。

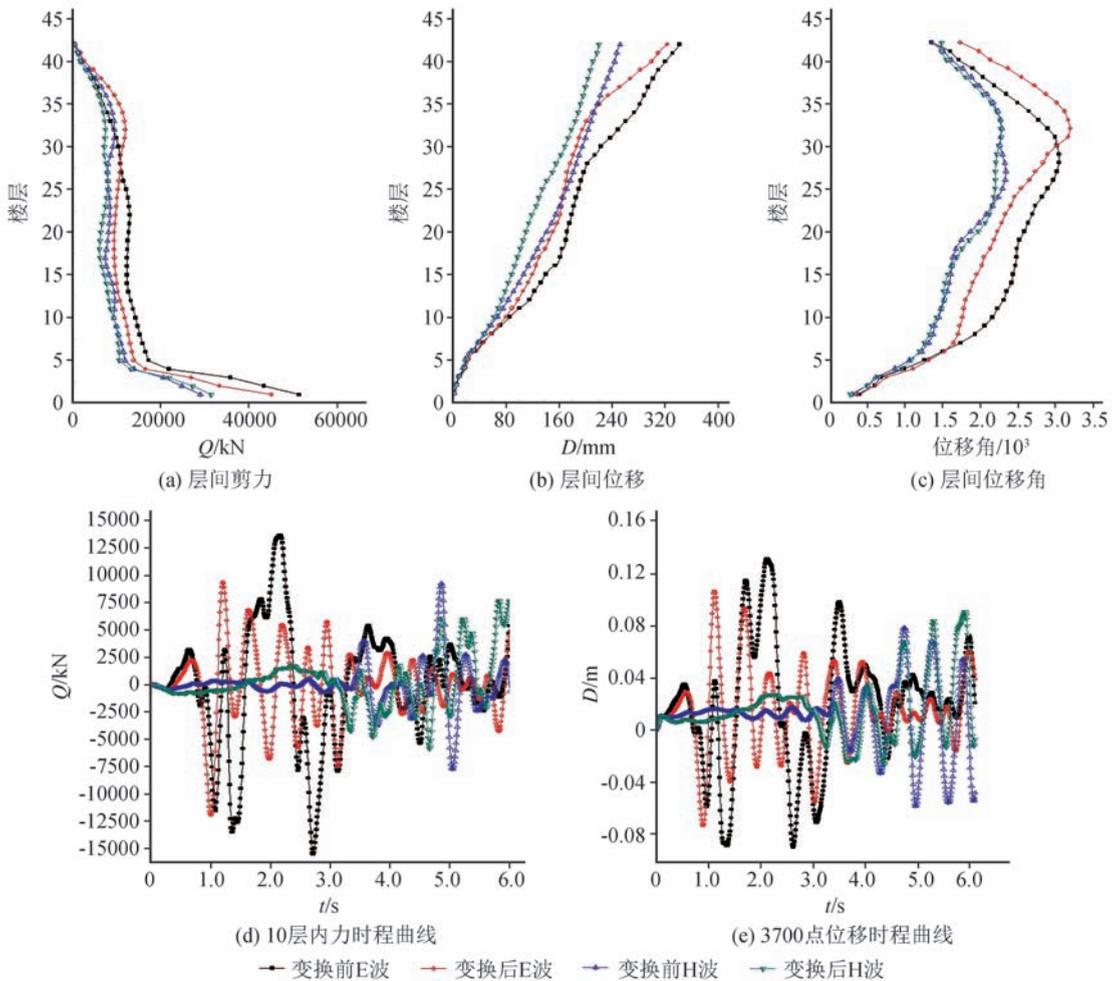


图8 罕遇地震下结构弹塑性时程分析结果比较

Fig.8 Elastoplastic time-history analysis results of structure under rare earthquakes

表2 地震波小波分析前、后计算结果对比

Table 2 Comparison between calculation results before and after wavelet analysis

类别	El Centro波			TH2TG055波		
	前	后	相对差值/%	前	后	相对差值/%
基底剪力	51 454	45 150	14.2	28 983	31 493	8.7
顶层位移	342.3	323.7	5.7	252.4	220.4	14.5
层间最大位移角	1/294	1/322	9.5	1/408	1/426	4.4

4 结语

详细介绍了基于小波分析方法变换调整真实地震动的过程,选取不同时段的不同频带进行重构,重新排列组合频率分布和频率含量,能够实现调整后的地震动时-频非平稳性;同时,将小波变换后的地震动的反应谱与目标反应谱进行拟合,可以得到频率非平稳特性的地震动时程,并一定程度上

保留原始时程的非平稳特性和持续时间。在工程实践中,比较作为结构时程分析调整前、后的实际地震波计算结果,发现其在各方面均具有较小的离散性,能更好地满足结构时程分析的需要。在相同的条件下,可以选取小波分析后的地震波作为结构时程分析输入,其能够为结构计算提供相对较为准确的数值,进一步为结构抗震设计的改进和完善提供新途径。

参考文献(References)

- [1] 李英民,刘立平.工程结构的设计地震动[M].北京:科学出版社,2011.
LI Ying-min, LIU Li-ping. Design Ground Motion of Engineering Structure[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 张镭于,刘立健,刘召和,等.基于小波包分析的人造地震波合成及应用[J].水利与建筑工程学报,2011,9(1):51-54.
ZHANG Lei-yu, LIU Li-jian, LIU Zhao-he, et al. Compound and Application of Artificial Seismic Wave Based on Wavelet Packet Analysis[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(1): 51-54. (in Chinese)
- [3] 王宁,吴云,张燕.时频分析方法在形变数据中的应用研究[J].地震工程学报,2014,36(2):413-420.
WANG Ning, WU Yun, ZHANG Yan. The Application of Time-frequency Analysis Methods in Deformation Data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 413-420. (in Chinese)
- [4] GB 50011-2010,建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
GB 50011-2010, Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [5] Mukherjee S, Gupta V K. Wavelet-based Generation of Spectrum-compatible Time-histories [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9-12): 799-804.
- [6] Suarez L E, Montejó L A. Generation of Artificial Earthquakes Via the Wavelet Transform [J]. Journal of Solids and Structures, 2005, 42(21-22): 5905-5919.
- [7] 马乐为,钟晓璐,谢异同,等.基于 MATLAB 语言的地震波动力特性分析方法[J].陕西科技大学学报,2009,27(1):130-134.
MA Le-wei, ZHONG Xiao-jun, XIE Yi-tong, et al. Dynamic Characteristics Analysis Method of the Earthquake Waves on the Basis of MATLAB Language[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2009, 1(27): 130-134. (in Chinese)
- [8] 赵续宏.基于小波分解的多层建筑物地震反应与设计研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
ZHAO Xu-hong. Research on Seismic Response and Design of Multi-story Buildings Based on Wavelet Method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 程伟,黎连修,辅小荣.异型线圈在磁粉探伤中的应用[J].无损检测,2003,25(7):374-384.
CHENG Wei, LI Lian-xiu, FU Xiao-rong. Application of Special-shaped Coil to Magnetic Particle Inspection [J]. Nondestructive Examination, 2003, 25(7): 374-384. (in Chinese)
- [10] 李英民,刘立平,赖明.工程地震动随机功率谱模型的分析与改进[J].工程力学,2008,25(3):43-48.
LI Ying-min, LIU Li-ping, LAI Ming. Analysis and Improvement of Power Random Spectra of Strong Ground Motions for Engineering Purpose[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 43-48. (in Chinese)
- [11] 谢异同.小波分析方法在地震工程中的应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2002.
XIE Yi-tong. Application of Wavelet Analysis in Earthquake Engineering[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2002. (in Chinese)
- [12] 吴琛,周瑞忠.基于小波变换的结构地震响应与能量计算分析[J].地震工程和工程振动,2006,26(6):42-48.
WU Chen, ZHOU Rui-zhong. Earthquake Response Analysis and Energy Calculation Based on Wavelet Transform [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6): 42-48. (in Chinese)
- [13] 刘铁.地震波的时频分析及人工合成[D].武汉:华中科技大学,2007.
LIU Tie. Time-Frequency Analysis of Earthquakes and Generation of Artificial Earthquakes[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007. (in Chinese)
- [14] 崔杰.小波调整地震动输入高层结构的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
CUI Jie. The Research of Earthquake Ground Motion Input in High-level Structure Adjustment Based on Wavelet[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] 张长浩.地震波模拟分析与工程结构动力响应研究[D].西安:长安大学,2012.
ZHANG Chang-hao. Simulate the Seismic Wave and Analysis Dynamic Response of Engineering Structures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [16] 赵作周,胡好,钱稼茹.中美规范关于地震波的选择与框架-核心筒结构弹塑性时程分析[J].建筑结构学报,2015,2(36):10-18.
ZHAO Zuo-zhou, HU Yu, QIAN Jia-ru. Comparison of Ground Motion Selection between Chinese and American Methods and Elasto-plastic Time History Analysis of Frame-core Wall Structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 2(36): 10-18. (in Chinese)
- [17] 杨小涛.复杂高层框架结构罕遇地震作用下动力弹塑性分析[D].武汉:武汉理工大学,2011.
YANG Xiao-tao. Dynamic Elastic-Plastic Analysis of a Complex High-rise Framed Structure under Rare Earthquakes [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [18] 马千里,叶列平,陆新征,等.采用逐步增量弹塑性时程方法对 RC 框架结构推覆分析侧力模式的研究[J].建筑结构学报,2008(2):132-140.
MA Qian-li, YE Lie-ping, LU Xin-zheng, et al. Study on Lateral Load Patterns of Pushover Analysis Using Incremental Dynamical Analysis for RC Frame Structures [J]. Journal of Building Structures, 2008(2): 132-140. (in Chinese)

- LU Xian-long, QIAN Zeng-zhen, TONG Rui-ming, et al. Uplift Field Tests and Displacement Prediction on Belled Piers in Gobi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1871-1875. (in Chinese)
- [5] 鲁先龙, 乾增珍, 崔强. 黄土地基掏挖扩底基础抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 648-652.
LU Xian-long, QIAN Zeng-zhen, CUI Qiang. Experimental Investigation on Uplift Behavior of Belled Piers in Loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 648-652. (in Chinese)
- [6] Pacheco M P, Danziger F A B, Pereira Pintoc. Design of Shallow Foundations under Tensile Loading for Transmission Line Towers: an Overview[J]. Engineering Geology, 2008, 101(3-4): 226-235.
- [7] MORS H. Methods of Dimensioning for Uplift Foundations of Transmission Line Towers[C]//Conference Internationale des Grands Reseaux Electrique a Haute Tension. Paris: international Council on Large Electric System, 1964, 210: 1-14.
- [8] Stas C V, Kulhawy F H. Critical Evaluation of Design Methods for Foundations under Axial Uplift and Compression Loading[R]. California: Electric Power Research Institute USA, 1984.
- [9] 鲁先龙, 杨文智, 童瑞铭, 等. 输电线路掏挖基础抗拔极限承载力的可靠度分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(1): 9-15, 44.
LU Xian-long, YANG Wen-zhi, TONG Rui-ming, et al. Reliability Analysis of Ultimate Uplift Bearing Capacity of Belled Pier Foundation in Transmission Line Engineering[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(1): 9-15, 44. (in Chinese)
- [10] GB50007—2011, 建筑地基基础设计技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB50007—2011, Code for Design of Building Foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)
- [11] DL/T 5219—2014, 架空输电线路基础设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
DL/T 5219—2014, Technical Code for Design Foundation of Overhead Transmission Line[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese)
- [12] 鲁先龙, 程永锋, 戈壁抗拔基础承载性能试验与计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
LU Xian-long, CHENG Yong-feng. Experimental and Numerical Study on the Uplift Bearing Capacity of Foundations in Gobi[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese)

(上接 737 页)

- [19] 曹金凤, 王旭春, 孔亮. Python 语言在 Abaqus 中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
CAO Jin-feng, WANG Xu-chun, KONG Liang. Application of the Python Language in Abaqus[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 吕西林, 苏宁粉, 周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 5(32): 19-25.
LV Xi-lin, SU Ning-fen, ZHOU Ying. IDA-based Seismic Fragility Analysis of a Complex High-Rise Structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 5(32): 19-25. (in Chinese)
- [21] 林旭川, 陆新征, 廖志伟, 等. 基于分层壳单元的 RC 核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报, 2009(3): 49-54.
LIN Xu-chuan, LU Xin-zheng, MIAO Zhi-wei, et al. Finite Element Analysis and Engineering Application of RC Core-tube Structures Based on the Multi-layer Shell Elements[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 49-54. (in Chinese)
- [22] Zheng Ming Huang. Inelastic and Failure Analysis of Laminated Structure by ABAQUS Incorporated with a General Constitutive Relationship[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007, 26(11): 1135-1181.