

文章编号:1674-2974(2016)09-0066-10

水平弹性双参数位移谱模型^{*}

王国弢^{1,2†}, 胡克旭¹, 李富荣¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 四川农业大学 土木工程学院, 四川 都江堰 611830)

摘要:为了得到可供基于位移抗震设计使用的水平弹性位移谱,首先采用 Campbell-Bozorgnia 地面运动预测方程,研究了矩震级、断层距和场地类别对水平弹性位移谱的影响;然后指出了我国《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 中设计反应谱存在的问题;最后针对设计反应谱的不足,提出了包含场地地震动峰值加速度和速度的水平弹性双参数位移谱模型.研究表明:位移谱平台段起始周期是确定位移谱谱形的重要参数,其主要受矩震级的影响,随矩震级的增加而显著增加;场地地震动峰值速度与峰值加速度之比与矩震级存在正的强相关性,矩震级的影响可以通过在位移谱模型中包含该比值来体现;本文提出的双参数位移谱能较好地拟合实际强震记录位移谱;提供每一设防水准的地震动峰值加速度和速度区划图,并在抗震规范中给出每一设防水准的各类场地地震动峰值加速度和峰值速度的场地放大系数,可在规范中实现本文提出的双参数位移谱模型.本文的研究结果可为我国抗震设计规范的制订和修改提供参考.

关键词:位移谱;矩震级;阻尼;峰值加速度;峰值速度

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Horizontal Elastic Double Parameter Displacement Spectra Model

WANG Guo-tao^{1,2†}, HU Ke-xu¹, LI Fu-rong¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji Univ, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Sichuan Agricultural Univ, Dujiangyan, Sichuan 611830, China)

Abstract: To obtain the elastic horizontal displacement spectra that can be applied to displacement-based seismic design, the influences of moment magnitude, rupture distance, and site classes on the displacement spectra were examined using the ground motion prediction equation of Campbell and Bozorgnia. The deficiencies of design spectra in existing seismic design code of buildings (GB 50011-2010) were pointed out and an elastic horizontal displacement spectra model using double parameters, peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV), was proposed to compensate for the deficiencies. The results show that the starting period of the constant displacement plateau (T_D) is an important parameter to determine the spectral shape of the displacement spectra. It is mainly affected by moment magnitude and is increased significantly with the increases of the moment magnitude. The peak ground velocity-to-acceleration (PGV/PGA) ratio is strongly dependent on the moment magnitude, and thus the significant influence of the moment magnitude can be captured by the inclusion of the PGV/PGA ratio in the model. The pro-

* 收稿日期:2015-08-29

基金项目:国家科技支撑计划重点项目(2009BAJ28B02)

作者简介:王国弢(1980-),男,贵州安顺人,同济大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: 802212wgt@tongji.edu.cn

posed model is capable of fitting real displacement spectra and can be applied to the seismic design codes by providing the peak acceleration and velocity zonation maps for each seismic precautionary level and giving the peak acceleration and velocity site amplification factor corresponding to the each level in the seismic design codes. The results can provide the reference for the revisions of seismic design codes in our country.

Key words: displacement spectrum; moment magnitude; damping; peak ground acceleration; peak ground velocity

随着社会经济和建造技术的发展以及各种结构控制技术的应用,高层、超高层、大跨空间结构等长周期结构越来越多,传统的基于承载力加延性构造措施的抗震设计方法难以合理有效地保证长周期结构的抗震安全性.基于位移的性能设计方法的引入在一定程度上保证了目标地震作用下结构的变形能力.然而,由于缺少可用的设计位移谱,阻碍了该方法的推广应用.

为了建立合理可靠的位移谱,国内外学者做了一些研究. Tolois 和 Faccioli^[1], Athanassiadou 等^[2]及谢礼立等^[3]分别根据所选择的强震数字加速度记录初步探讨了震级、场地类别和震中距对位移谱的影响,但并未提出可供使用的位移谱方程或模型. Bommer 和 Elnashai^[4], Akkar 和 Bommer^[5]及 Faccioli 等^[6]通过回归分析分别建立了不同周期和阻尼比范围内的位移谱预测方程,但这些方程包含了震级、距离等参数,而世界各国的抗震规范中普遍采用的是地震动参数(如地震动峰值加速度、峰值速度和反应谱值等)来描述反应谱,所以这些位移谱预测方程并不便于规范采用.曹加良等^[7]采用 80 条水平向强震记录(加速度峰值大于 0.1 g),通过回归分析建立了相应于我国抗震规范设防烈度且可供工程实用的 3 折线位移谱(周期为 0~10 s,阻尼比为 10%~40%),但该位移谱不能体现震级对位移谱谱形的影响,不符合实际强震记录位移谱的统计特征.

鉴于以往研究的不足,本文首先利用 Campbell-Bozorgnia 预测方程,在 0~10 s 周期范围内,研究了矩震级、断层距和场地类别对阻尼比为 5% 的水平弹性位移谱的影响,得到强震记录位移谱的统计特征,然后提出包含地震动峰值加速度和速度且符合强震记录位移谱统计特征的水平弹性双参数位移谱模型(周期为 0~10 s,阻尼比为 0.5%~30%).由于该模型仅包含两个地震动参数,所以便于抗震规范采用.

1 Campbell-Bozorgnia 预测方程

Kenneth W. Campbell 和 Yousef Bozorgnia 从太平洋地震工程研究中心的强震地面运动数据库中选择了 64 次地震的 1 561 条地面加速度记录,利用这些记录通过回归分析形成了地面水平运动的地面峰值加速度(PGA)、地面峰值速度(PGV)、地面峰值位移(PGD)和阻尼比为 5% 的线弹性拟加速度反应谱(PSA)的预测方程^[8],以下将其简称为 Campbell-Bozorgnia 预测方程.在太平洋地震工程研究中心下一代衰减项目中,不同的研究者共提出了 5 个地面运动预测方程^[8-12].虽然这些方程由不同的强震记录组和拟合技术所形成并具有不同的形式,但由 5 个方程所计算得到的地面运动参数的中值是基本相同的^[13]. Campbell-Bozorgnia 预测方程是其中的一个方程.该方程具有如下函数形式:

$$\ln Y = \ln \hat{Y} + \epsilon \sigma_T \quad (1)$$

式中, Y 和 \hat{Y} 分别为地面运动参数(PGA, PGV, PGD 和 PSA)的观察值和地面运动参数几何均值(中值)的估计; ϵ 为标准正态随机变量; σ_T 为总标准差.

上式中 $\ln \hat{Y}$ 可表达为:

$$\ln \hat{Y} = f_{\text{mag}} + f_{\text{dis}} + f_{\text{flt}} + f_{\text{hng}} + f_{\text{site}} + f_{\text{sed}} \quad (2)$$

式(2)中, f_{mag} , f_{dis} , f_{flt} , f_{hng} , f_{site} 和 f_{sed} 分别为震级项、距离项、断裂机制项、上盘效应项、场地类别项和盆地反应项.

Campbell-Bozorgnia 预测方程的适用范围及式(2)中各项的具体形式可参见文献^[8].

2 位移谱的影响分析

为了研究矩震级、断层距和场地类别对位移谱的影响,本文采用式(2)计算了各类场地上不同矩震级和断层距组合下的拟加速度谱中值,并要求在该组合下计算得到的地震动峰值加速度中值不小于

0.05 g(主要考虑到峰值加速度小于 0.05 g 的地震地面运动通常不会对结构构成威胁). 与拟加速度谱相应的位移谱可采用拟谱关系求得, 该关系如下:

$$PSA(\xi, T) = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 S_d(\xi, T) \quad (3)$$

式中, ξ 代表阻尼比; T 代表单自由度体系的自振周期; $PSA(\xi, T)$ 和 $S_d(\xi, T)$ 分别是阻尼比为 ξ , 周期为 T 时, 弹性单自由度体系的拟加速度谱谱值和位移谱谱值.

根据 Campbell 和 Bozorgnia 的研究^[8], 采用如此变换关系所得到的位移谱是可靠的. 关于场地分类的问题, 不同国家的研究机构和抗震规范对场地类别给出了不同的分类标准. 美国 ASCE 7-10^[14] 规范的标准是根据地表 30 m 深度范围以内的平均剪切波速 ($V_{s,30}$) 的大小将场地划分为 A, B, C, D, E 和 F 六类. 由于 Campbell-Bozorgnia 预测方程中采用的是 $V_{s,30}$ 来描述场地类别, 所以本文采用 ASCE 7-10 中的场地分类标准. 根据 Boore 和 Atkinson 的研究^[9], 当分别取 $V_{s,30} = 1\ 070$ m/s, 525 m/s, 255 m/s 和 150 m/s 时, 场地类别分别相应于 ASCE 7-10 中的 B, C, D 和 E 类场地.

2.1 矩震级的影响

图 1 给出了在 0~10 s 周期范围内, B 类场地, 断层距 R_{rup} 为 10 km (R_{rup} 为观测点到断裂面的最近距离), 矩震级 M_w 为 5, 6, 7 和 8 时的位移谱 (限于篇幅, 本文仅给出该情况, 在其余场地类别及断层距下, 矩震级对位移谱的影响与此相同). 由图 1(a)(b)(c) 和 (d) 可知, 在不同的震级下, 位移谱谱值随周期的统计规律为: 当矩震级较小时 (如 $M_w = 5$, 见图 1(a)), 位移谱谱值先随周期的增加而增加 (上升段), 达到峰值后, 谱值保持不变 (平台段), 随周期的增加, 在某一周期点处平台段结束, 谱值随周期的增加而减小 (下降段), 最后趋于地震动峰值位移 PGD (峰值地面位移段); 随着矩震级的增加, 位移谱平台段起始周期 (图 1(a) 和 (b) 中的 T_D) 显著增加, 位移谱峰值地面位移段、下降段和平台段将逐渐位于 10 s 范围外; 如当矩震级等于 6 时 (见图 1(b)), 在 0~10 s 的周期范围内, 位移谱仅存在上升段和平台段, 而当矩震级等于 7 和 8 时 (见图 1(c) 和 (d)), 在 0~10 s 的周期范围内, 位移谱仅存在上升段. 此外, 对比图 1(a)(b)(c) 和 (d) 可知, 位移谱谱值随矩震级的增加而增加. 因此矩震级对位移谱的谱值和谱形均有显著影响, 而位移谱平台段起始周期 T_D 是控制位移谱谱形的重要参数.

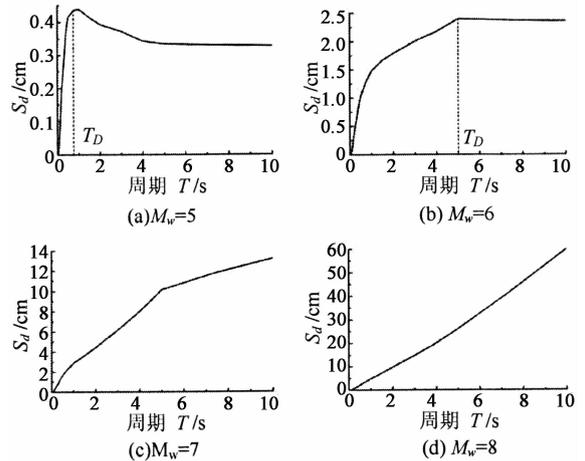


图 1 $R_{rup} = 10$ km 时 B 类场地各矩震级位移谱
Fig. 1 Displacement spectra for site class B evaluated for $R_{rup} = 10$ km, $M_w = 5, 6, 7$ and 8

2.2 断层距的影响

工程中地震波传播途径对地震动的影响一般采用场地到震源的距离来考虑. Campbell-Bozorgnia 预测方程中采用观测点到断裂面的最近距离 (R_{rup}) 来描述场地到震源的距离.

图 2 给出了在 0~10 s 周期范围内, B 类场地, 矩震级 M_w 为 7, 断层距 R_{rup} 为 10, 30 和 50 km 时的位移谱及其标准化位移谱 (对 $T = 10$ s 处的位移谱谱值 S_{d10} 标准化; 限于篇幅, 本文仅给出该情况, 在其余场地类别及矩震级下, 断层距对位移谱的影响与此相同). 由图 2(a) 和 (b) 可知: 位移谱的谱值随断层距的增加而减小, 但断层距对位移谱的谱形无影响.

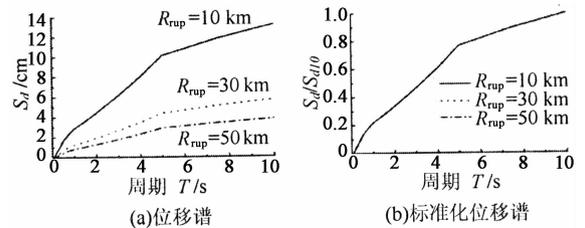


图 2 $M_w = 7$ 时 B 类场地
各断层距位移谱及其标准化位移谱
Fig. 2 Displacement spectra and its normalized spectra for site class B evaluated for $M_w = 7$, $R_{rup} = 10, 30$ and 50 km

2.3 场地类别的影响

图 3 给出了在 0~10 s 周期范围内, 矩震级 M_w 为 7, 断层距 R_{rup} 为 10 km 时, B, C, D 和 E 类场地的位移谱及其标准化位移谱 (对 $T = 10$ s 处的位移谱谱值 S_{d10} 标准化; 限于篇幅, 本文仅给出该情况, 在其余矩震级及断层距下, 场地类别对位移谱的影响

与此相同),由图 3(a)和(b)可知;当由 B 类场地变化到 E 类场地时,位移谱谱值逐渐增大;在 0 到大约 3 s 的周期范围内,场地类别对位移谱的谱形有一定影响;在大约 3 s 范围外,场地类别对位移谱的谱形无影响;虽然场地类别对位移谱的谱形有一定地影响,但与矩震级的影响相比,场地类别的影响较小。

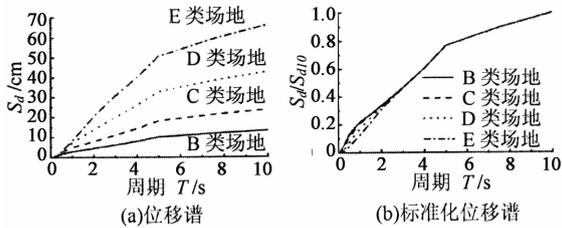


图 3 $M_w=7, R_{rup}=10$ km 时
各类场地位移谱及其标准化位移谱

Fig. 3 Displacement spectra and its normalized spectra for various site classes evaluated for $M_w=7$ and $R_{rup}=10$ km

3 抗震规范设计反应谱存在的问题

目前,我国各主要抗震设计规范^[15-18]普遍采用的是基于承载力加延性构造措施的抗震设计方法,因而这些规范中给出的设计反应谱为加速度反应谱。与规范设计加速度谱相应的位移谱(以下简称为拟位移谱)可根据拟谱关系(见式(3))求得。本节主要根据上节得到的实际强震记录位移谱的统计特征来指出《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010,以下简称 2010 规范)中拟位移谱所存在的问题。为方便比较,本文按 2010 规范 8 度罕遇地震作用求拟位移谱,其余设防烈度下的拟位移谱的变化规律与其相同。

图 4 给出了特征周期 $T_g=0.25$ s 和 0.95 s 时,各阻尼比下 2010 规范的拟位移谱。由图 4 可知:拟位移谱谱值总是随周期的增大而显著增大;当特征周期 $T_g=0.25$ s 时,随阻尼比的增大,拟位移谱存在大阻尼比谱值大于小阻尼比谱值的现象,即不同阻尼比位移谱曲线存在交叉现象。根据 2.1 节的分析可知,矩震级对位移谱谱形有显著的影响,不同震级下,位移谱谱值并不会总随周期的增加而增加。2010 规范设计反应谱的下降段形式不合理(第二下降段取为直线下降)是导致拟位移谱谱值总随周期的增加而增加的主要原因。此外,位移谱谱值总是随着阻尼比的增大而减小^[19],即不同阻尼比的位移谱曲线不会出现交叉现象。因此,2010 规范的拟位移谱不符合上述强震记录位移谱的统计特征。

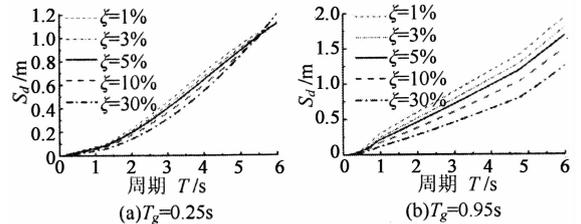


图 4 2010 规范拟位移谱

Fig. 4 Pseudo-displacement spectra in GB50011-2010

图 5 给出了 B 类场地、矩震级 M_w 为 7 和断层距 R_{rup} 为 10 km 时,由 Campbell-Bozorgnia 预测方程计算的拟加速度谱和位移谱。由图 5 可知:拟加速度谱的特征周期(下降段起始周期)为 0.15 s,而位移谱平台段起始周期已在 10 s 以外,两者不存在 5 倍的关系。2010 规范设计反应谱第二下降段的起始周期取为特征周期的 5 倍,该值不应作为位移谱平台段起始周期的取值。

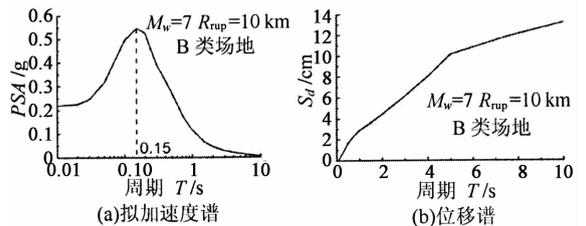


图 5 Campbell-Bozorgnia 方程计算的
拟加速度谱和位移谱

Fig. 5 Pseudo-acceleration spectra and displacement spectra obtained from Campbell-Bozorgnia equation

另外,2010 规范中场地类别只对设计反应谱平台段的长度有影响,对平台段高度无影响,不符合现有的研究结果^[20-22]。

综上所述,2010 规范中的拟位移谱不适用于基于位移的抗震设计。

4 水平弹性双参数位移谱模型

根据以上分析可知:矩震级对位移谱谱形影响显著,主要表现为位移谱平台段起始周期 T_D 随矩震级的增加而显著增加,导致 0~10 s 周期范围内谱形不断随矩震级的变化而变化。因此,合理可靠的位移谱模型应能体现矩震级对其谱形的影响。

4.1 场地 PGV/PGA 比与矩震级的相关性

由于目前世界各国的抗震规范中普遍采用的是地震动参数(如地震动峰值加速度、峰值速度和反应谱谱值等)来描述反应谱,所以如果在位移谱模型中包含矩震级这个参数,该模型将不便于规范采用。

图6给出了B,C,D和E类场地的地震动峰值速度与峰值加速度之比(PGV/PGA)随矩震级和断层距的变化(PGV 和 PGA 的值采用Campbell-Bozorgnia预测方程计算得到).由图6可知:各类场地的 PGV/PGA 随矩震级的增大而增大且基本不随断层距的增加而变化,说明矩震级与 PGV/PGA 存在正的强相关性.因此,可根据矩震级与某一类场地的 PGV/PGA 的相关性,将矩震级对位移谱谱形的影响转化为该类场地的 PGV/PGA 对位移谱谱形的影响,即将 T_D 表达为 PGV/PGA 的函数.此外,根据Newmark反应谱理论^[23],加速度控制区和速度控制区交点所对应的周期 T_C (相应于2010规范设计谱的特征周期)也可表达为 PGV/PGA 的函数.这样本文仅采用 PGA 和 PGV 这两个参数来描述位移谱.

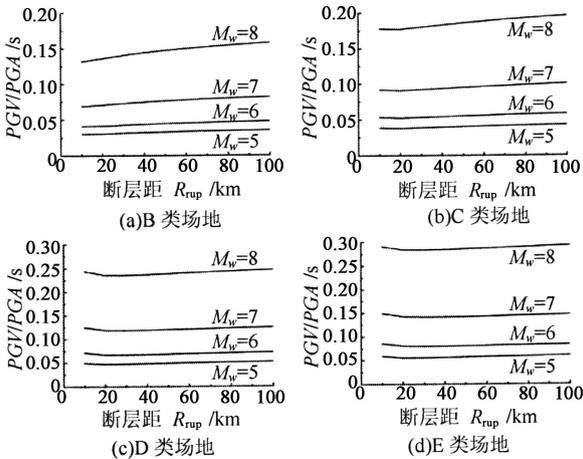


图6 各类场地 PGV/PGA 随矩震级和断层距的变化
Fig. 6 Change of PGV/PGA for various site classes with moment magnitude and rupture distance

4.2 阻尼比为5%的水平弹性双参数位移谱

在0~10 s的周期范围内,本文将阻尼比为5%的双参数位移谱取为如下形式:

$$S_d(T) = \begin{cases} \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 [1 + (\beta_{\max} - 1) \frac{T}{T_B}] PGA, & 0 \leq T \leq T_B \\ \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \beta_{\max} PGA, & T_B \leq T \leq T_C \\ \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \beta_{\max} \left(\frac{T_C}{T}\right)^\gamma PGA, & T_C \leq T \leq T_D \\ \frac{\beta_{\max} T_C^2 T_D^{(2-\gamma)}}{4\pi^2} PGA, & T \geq T_D \end{cases} \quad (4)$$

式(4)是通过修改2010规范设计反应谱的第二下降段形式和控制周期,并利用拟谱关系所得.式

中, PGA 为场地地震动峰值加速度; β_{\max} 为动力系数最大值, $\beta_{\max} = PSA_{\max}/PGA$ (PSA_{\max} 为与位移谱相应的拟加速度谱平台高度,拟加速度谱可由位移谱采用拟谱关系求得); γ 为 T_C 至 T_D 区段的拟加速度谱下降段衰减系数,取为 PGV/PGA 的函数(详见下文); T_B , T_C 和 T_D 为反应谱的控制周期(见图7),均取为 PGV/PGA 的函数(详见下文).

根据本文2.1节的分析可知:仅当矩震级较小时(如 $M_w=5$),在 $T < 10$ s的范围内,位移谱才会出现下降段且此时不考虑位移谱下降段,在长周期范围内,是偏于保守的.因此,在0~10 s的周期范围内,本文建议的双参数位移谱模型并没有包含下降段.

图7给出了本文双参数位移谱及其拟加速度谱的半对数坐标图形(图中 T_D 随矩震级的增加而增加,当 $T_D > 10$ s后,在0~10 s的周期范围内,不存在位移平台段).

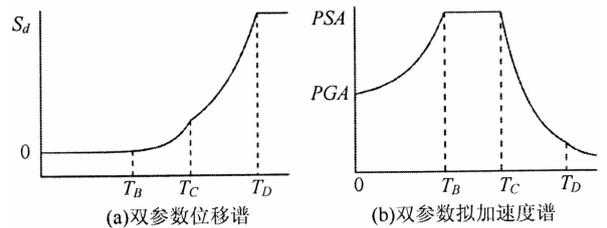


图7 双参数位移谱及其拟加速度谱
Fig. 7 Double parameter displacement spectra and its pseudo-acceleration spectra

本文采用Campbell-Bozorgnia预测方程计算了各种矩震级 M_w 和断层距 R_{rup} 组合下四类场地(B,C,D和E类场地)的位移谱(阻尼比为5%)、地震动峰值加速度 PGA 和峰值速度 PGV ,然后以误差最小原则,采用自动搜索的方式利用式(4)对每一位移谱进行拟合并提取相应的谱特征参数.这些特征参数包括动力系数最大值 β_{\max} ,控制周期 T_C 和下降段衰减系数 γ ,而对于控制周期 T_D ,本文采用式(5)^[24]估算,该式能较为合理地反映矩震级对 T_D 的影响:

$$T_D = 10^{(M_w - 5)/2} \quad (5)$$

此外,借鉴ASCE 7-10中的方法,将控制周期 T_B 取为 T_C 的0.2倍,即:

$$T_B = 0.2 T_C \quad (6)$$

本文将双参数位移谱与实际强震记录位移谱之间的误差取为相对误差,相对误差采用下式计算:

$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{S_d(T_i) - S_d^*(T_i)}{S_d(T_i)} \right]^2} \quad (7)$$

式中, e 为双参数位移谱与实际强震记录位移谱之

间的相对误差; $S_d(T_i)$ 和 $S_d^*(T_i)$ 分别为周期点 T_i 处双参数位移谱和实际强震记录位移谱的谱值; n 为计算误差时采用的位移谱上的周期点数.

误差最小原则是保证所提取的特征参数能在 0~10 s 的周期范围内,使双参数位移谱(见式(4))与实际强震记录位移谱(由 Campbell-Bozorgnia 预测方程计算得到)的误差最小. 自动搜索方式是采用步长累加的途径,在某一动力系数最大值处搜索出最小误差时的特征参数,然后再从不同动力系数最大值处的特征参数中选择出误差最小的一组作为最后所提取的特征参数. 在自动搜索过程中,动力系数最大值的取值范围为实际地震记录动力系数最大值的 0.8~1 倍(实际地震记录动力系数最大值定义为实际地震记录拟加速度谱最大值除以相应的地震动峰值加速度),步长取为实际地震记录动力系数最大值的 0.01 倍;下降段衰减指数 γ 的取值范围为 0.5~2,步长取为 0.01.

图 8 给出了 B 类场地双参数位移谱特征参数 T_C , T_D 和 γ 与 PGV/PGA 之间的散点图,图中曲线为拟合线. 拟合线表明了 T_C , T_D 和 γ 随 PGV/PGA 的变化趋势. 由图可知: T_C 和 T_D 随着 PGV/PGA 的增加而增加,而 γ 随着 PGV/PGA 的增加而减小;与 T_C 随 PGV/PGA 的变化相比, T_D 随 PGV/PGA 的变化更激烈,说明 PGV/PGA 对 T_D 的影响更显著. 其余场地类别的 T_C , T_D 和 γ 随 PGV/PGA 的变化规律与 B 类场地相同.

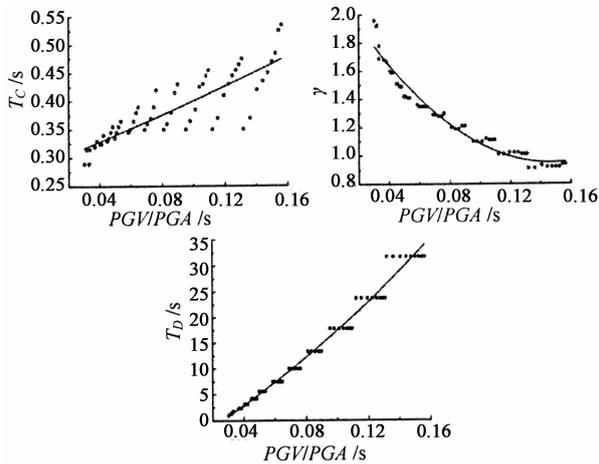


图 8 B 类场地 T_C , T_D 和 γ 与 PGV/PGA 之间的散点图

Fig. 8 Scatter diagram between various characteristic parameters (T_C , T_D and γ) and PGV/PGA for site class B

本文将 T_C , T_D 和 γ 取为 PGV/PGA 的二次函数,其函数形式如下式:

$$T_C = a_1 + a_2 \left(\frac{PGV}{PGA} \right) + a_3 \left(\frac{PGV}{PGA} \right)^2 \quad (8)$$

$$T_D = a_4 + a_5 \left(\frac{PGV}{PGA} \right) + a_6 \left(\frac{PGV}{PGA} \right)^2 \quad (9)$$

$$\gamma = a_7 + a_8 \left(\frac{PGV}{PGA} \right) + a_9 \left(\frac{PGV}{PGA} \right)^2 \quad (10)$$

在式(8)~式(10)中, $a_1 \sim a_9$ 为回归系数. 本文按 PGV/PGA 的取值范围对各类场地的双参数位移谱的特征参数进行分类,然后对分类后的特征参数进行回归分析,得到了式(8)~式(10)中各类场地的回归系数和动力系数最大值 β_{max} 的估计值,这些系数列于表 1. 各类场地 PGV/PGA 的取值范围是根据实际地震位移谱谱形发生显著变化来确定的,如对 B 类场地而言,当 $0.03 \leq PGV/PGA < 0.037$ 时,实际强震位移谱存在上升段、平台段、下降段和峰值地面位移段(位移谱谱形见图 1(a));当 $0.037 \leq PGV/PGA < 0.069$ 时,实际强震位移谱存在上升段和平台段(位移谱谱形见图 1(b));当 $0.069 \leq PGV/PGA < 0.156$ 时,实际地震位移谱仅存在上升段(位移谱谱形见图 1(c)和(d)). 此外,由于场地类别对 T_D 的影响较弱,故各类场地的 T_D 均可采用 B 类场地的回归系数估计值计算.

图 9 给出了 B 类场地,矩震级 M_w 为 5, 6, 7 和 8, 断层距 R_{rup} 为 10 km 时,根据表 1 中系数计算的双参数位移谱与实际强震位移谱的对比. 由图 9 可知:当矩震级较小时(如 $M_w = 5$),由于本文双参数位移谱未包含下降段,所以在长周期范围内偏于保守;在其余情况下,本文提出的双参数位移谱能较好地拟合相应场地的实际强震位移谱. 这说明了本文模型下降段衰减形式和位移谱平台段起始周期的取值是合理的.

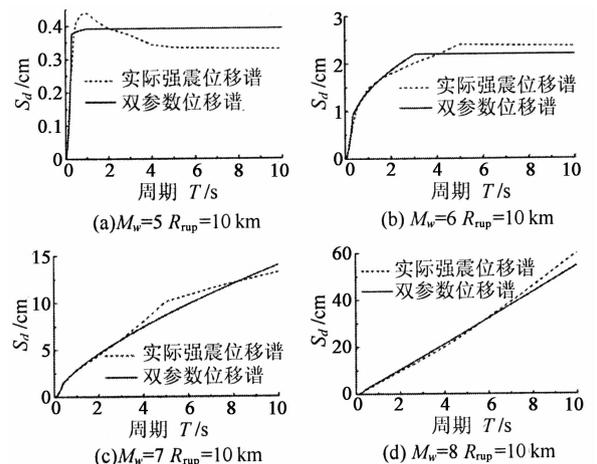


图 9 B 类场地双参数位移谱与实际强震位移谱的对比

Fig. 9 Comparison between double parameter displacement spectra and displacement spectra from earthquake ground motion for site class B

表1 回归系数 $a_1 \sim a_9$ 和动力系数最大值 β_{max} 的估计值

Tab.1 Estimated values for $a_1 \sim a_9$ and β_{max}

场地类别	PGV/PGA 的取值范围	\hat{a}_1	\hat{a}_2	\hat{a}_3	\hat{a}_4	\hat{a}_5	\hat{a}_6	\hat{a}_7	\hat{a}_8	\hat{a}_9	$\hat{\beta}_{max}$
B类	$0.030 \leq PGV/PGA < 0.037$	-4.71	311.56	-4 832.80	8.47	-691.55	14 699.00	-15.39	1 156.60	-19 271.00	2.00
	$0.037 \leq PGV/PGA < 0.069$	0.30	-0.05	19.73	-9.29	368.26	-1577.20	3.20	-57.33	441.96	2.00
	$0.069 \leq PGV/PGA < 0.156$	0.45	-2.05	14.86	—	—	—	1.96	-11.53	30.89	1.89
C类	$0.038 \leq PGV/PGA < 0.048$	1.56	-62.83	810.38	-3.13	58.45	1324.50	18.93	-790.83	9031.90	1.97
	$0.048 \leq PGV/PGA < 0.092$	0.06	9.04	-49.54	-7.80	239.22	-578.09	2.41	-22.68	112.19	2.01
	$0.092 \leq PGV/PGA < 0.199$	0.44	0.34	4.14	—	—	—	1.87	-7.53	13.28	1.97
D类	$0.049 \leq PGV/PGA < 0.063$	0.86	-28.02	369.06	-13.77	485.52	-3701.7	7.00	-200.32	1826.4	1.89
	$0.063 \leq PGV/PGA < 0.125$	0.04	9.39	-37.43	-6.29	149.11	-136.42	2.30	-16.61	65.26	2.00
	$0.125 \leq PGV/PGA < 0.255$	0.48	0.89	4.52	—	—	—	1.83	-6.07	9.53	2.07
E类	$0.059 \leq PGV/PGA < 0.076$	-0.83	30.50	-149.46	-16.56	504.11	-3 433.8	-2.09	135.83	-1 256.5	1.81
	$0.076 \leq PGV/PGA < 0.149$	0.71	-4.94	44.38	-6.32	126.38	-106.48	2.97	-30.25	130.99	2.01
	$0.149 \leq PGV/PGA < 0.343$	0.13	5.99	-6.36	—	—	—	1.68	-3.68	3.74	2.20

注:表中“—”表明此时 $T_D > 10$ s,故表中未给出 a_4, a_5 和 a_6 的估计值。

4.3 各阻尼比水平弹性双参数位移谱

位移谱阻尼调整系数被定义为:

$$\eta_d(\xi, T) = \frac{S_d(\xi, T)}{S_d(5\%, T)} \quad (11)$$

式中, η_d 代表位移谱阻尼调整系数; $S_d(\xi, T)$ 和 $S_d(5\%, T)$ 分别是周期为 T , 阻尼比为 ξ 和 5% 时的位移谱谱值。

采用位移谱阻尼调整系数将阻尼比为 5% 的位移反应谱调整到阻尼比不同于 5% 的位移反应谱是建立不同阻尼比位移谱的有效方法。目前, 国内外研究者对位移谱阻尼调整系数进行了广泛的研究。王国弢等^[25] 和 Rezaeian 等^[26] 详细地分析了地震动持时、矩震级、断层距和场地类别对位移谱阻尼调整系数的影响, 指出地震动持时和矩震级是影响位移谱阻尼调整系数的主要因素并根据持时与矩震级的正的强相关性, 提出了以阻尼比、周期和矩震级为变量的位移谱阻尼调整系数回归模型。

本文利用 Rezaeian 等提出的位移谱阻尼调整系数模型和 Campbell-Bozorgnia 预测方程求出各阻尼比(0.5%~30%)位移谱中值, 然后采用式(4)对其进行拟合。

图 10 给出了拟合的双参数位移谱及其拟加速度谱的图形。图中 T'_B 和 T'_C 分别是阻尼比不同于 5% 的双参数位移谱的第一和第二控制周期; T_B 和 T_C 分别是阻尼比为 5% 的双参数位移谱的第一和第二控制周期; T_D 为位移谱平台段起始周期。由图 10 可知: 当阻尼比小于 5% 时, $T'_B > T_B, T'_C > T_C$; 当阻尼比大于 5% 时, $T'_B < T_B, T'_C < T_C$ 。本文将 T'_B 至 T'_C 的区段称为常加速度区, 将 T'_C 至 T_D 的区段称

为速度控制区, 将 $T > T_D$ 的区段称为常位移区。

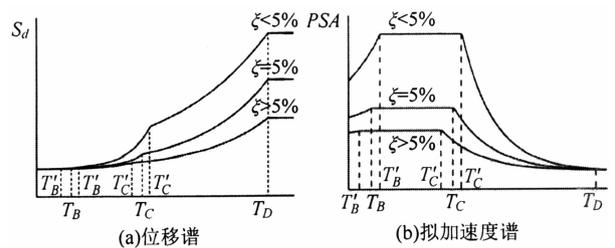


图 10 拟合的双参数位移谱及其拟加速度谱
Fig. 10 Fitted double parameter displacement spectra and its pseudo-acceleration spectra

根据拟合的各阻尼比双参数位移谱可分别得到常加速度区、速度控制区和常位移区的阻尼调整系数数据。本文将常加速度区、速度控制区和常位移区的阻尼调整系数方程取为如下形式:

$$\eta_{da} = 1 + \frac{(0.05 - \xi)}{b_1 + b_2 \xi}; \max(T_B, T'_B) \leq T < \min(T_C, T'_C); \quad (12)$$

$$\eta_{dc}(T) = [b_3 \ln\left(\frac{\xi}{0.05}\right)^2 + b_4 \ln\left(\frac{\xi}{0.05}\right)] \times \ln(T) + 1 + \frac{(0.05 - \xi)}{b_5 + b_6 \xi}; \max(T_C, T'_C) \leq T < T_D; \quad (13)$$

$$\eta_{d10} = 1 + \frac{(0.05 - \xi)}{b_7 + b_8 \xi}, T \geq T_D. \quad (14)$$

式中, $0.5\% \leq \xi \leq 30\%$; η_{da} 为常加速度区的阻尼调整系数; $\eta_{dc}(T)$ 为速度控制区的阻尼调整系数; 当 $T_D \leq 10$ s 时, η_{d10} 为常位移区的阻尼调整系数, 当 $T_D > 10$ s 时, η_{d10} 为 10 s 处阻尼调整系数; $b_1 \sim b_8$ 为回归系数。

由于除阻尼比和周期外,震级是影响阻尼调整系数的主要外部因素^[25-26],而震级与 PGV/PGA 存在正的强相关性,所以本文将各区的阻尼调整系数数据按 PGV/PGA 分为三组,对每组数据,通过回归分析可得到系数 $b_1 \sim b_8$ 的估计值,这些估计值

表 2 回归系数 $b_1 \sim b_8$ 的估计值
Tab. 2 Estimated values for $b_1 \sim b_8$

PGV/PGA 取值范围	\hat{b}_1	\hat{b}_2	\hat{b}_3	\hat{b}_4	\hat{b}_5	\hat{b}_6	\hat{b}_7	\hat{b}_8
$0.030 \leq PGV/PGA < 0.037$	0.058	2.070	0.124	0.006	0.095	1.810	0.120	2.224
$0.037 \leq PGV/PGA < 0.069$	0.049	2.244	0.080	-0.020	0.063	1.489	0.167	1.652
$0.069 \leq PGV/PGA < 0.156$	0.042	2.439	0.068	-0.025	0.045	1.415	0.161	1.322

本文借鉴 2010 规范中的方法,采用确定各阻尼比位移谱的特征参数(常加速度区的阻尼调整系数、第二控制周期和下降段衰减指数)来确定各阻尼比位移谱。

取各阻尼比(0.5%~30%)的双参数位移谱模型为:

$$S_d(T) = \begin{cases} \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 [1 + (\eta_{da}\beta_{\max} - 1) \frac{T}{T'_B}] PGA & 0 \leq T \leq T'_B \\ \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \eta_{da}\beta_{\max} PGA & T'_B \leq T \leq T'_C \\ \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \eta_{da}\beta_{\max} \left(\frac{T'_C}{T}\right)^{\gamma'} PGA & T'_C \leq T \leq T_D \\ \eta_{da} \frac{\beta_{\max} (T'_C)^{\gamma'} T_D^{(2-\gamma')}}{4\pi^2} PGA & T \geq T_D \end{cases} \quad (15)$$

式中, $T'_B = 0.2T'_C$, 当阻尼比为 5% 时, $T'_B = T_B$, $T'_C = T_C$; β_{\max} 为阻尼比为 5% 时的动力系数最大值; γ' 为速度控制区的双参数拟加速度谱下降段衰减指数,当阻尼比等于 5% 时, $\gamma' = \gamma$. 与双参数位移谱相应的拟加速度谱可由拟谱关系求得. 本文不考虑阻尼比对位移平台段起始周期 T_D 的影响,即各阻尼比双参数位移谱的 T_D 相同。

式(15)中位移谱的特征参数 T'_C 和 γ' 可根据式(12)~式(14)中的阻尼调整系数推导出. 在双参数位移谱的速度控制区(相应于 T'_C 至 T_D 的区段)的某一周期点 T_1 处,根据阻尼调整系数的定义有:

$$\begin{aligned} \eta_{dv}(T_1) \left(\frac{T_1}{2\pi}\right)^2 \beta_{\max} \left(\frac{T_C}{T_1}\right)^{\gamma} PGA &= \\ \left(\frac{T_1}{2\pi}\right)^2 \eta_{da}\beta_{\max} \left(\frac{T'_C}{T_1}\right)^{\gamma'} PGA &\Rightarrow \\ T'_C = T_1 \left(\frac{\eta_{dv}(T_1)}{\eta_{da}}\right)^{1/\gamma'} \left(\frac{T_C}{T_1}\right)^{\gamma/\gamma'} &\quad (16) \end{aligned}$$

列于表 2. 由于矩震级是影响阻尼调整系数主要因素,场地类别的影响较弱^[25-26],所以表 2 中的回归系数适用于各类场地. 此外,表 2 给出的 PGV/PGA 值为 B 类场地的 PGV/PGA 值, B 类场地的地震动参数可由地震动区划图给出(见下文).

当 $T_D \leq 10$ s 时,在双参数位移谱的常位移区(相应于 $T \geq T_D$ 的区段),根据阻尼调整系数的定义有:

$$\begin{aligned} \eta_{d10} \frac{\beta_{\max} (T_C)^{\gamma} (T_D)^{(2-\gamma)}}{4\pi^2} PGA &= \\ \eta_{da} \frac{\beta_{\max} (T'_C)^{\gamma'} (T_D)^{(2-\gamma')}}{4\pi^2} PGA &\quad (17) \end{aligned}$$

当 $T_D > 10$ s 时,在 $T=10$ s 处有:

$$\begin{aligned} \eta_{d10} \left(\frac{10}{2\pi}\right)^2 \beta_{\max} \left(\frac{T_C}{10}\right)^{\gamma} PGA &= \\ \left(\frac{10}{2\pi}\right)^2 \eta_{da}\beta_{\max} \left(\frac{T'_C}{10}\right)^{\gamma'} PGA &\quad (18) \end{aligned}$$

由式(16)和式(17)可得:

$$\gamma' = \gamma + \frac{\ln [\eta_{d10}/\eta_{dv}(T_1)]}{\ln (T_1/T_D)} \quad (19)$$

由式(16)和式(18)可得:

$$\gamma' = \gamma + \frac{\ln [\eta_{d10}/\eta_{dv}(T_1)]}{\ln (T_1/10)} \quad (20)$$

将式(19)与式(20)对比可知:两者唯一的区别是等式右边第二项分母的取值不同,所以下降段衰减指数可仅采用式(19)计算,但当 $T_D > 10$ s 时,取 $T_D = 10$ s. 由于 $T = 1$ s 通常会位于速度控制区内,为了计算的方便,可将式(19)和(20)中的 T_1 取为 1,但当 T_D 接近于 1 s 或 1 s 不在速度控制区内时,建议取 $T_1 = [T_C + \min(T_D, 10)]/2$.

图 11 给出了 B 类场地,矩震级 M_w 为 5.5, 6.5 和 7.5,断层距 R_{rup} 为 10 km(相应的 PGV/PGA 值分别为 0.033, 0.050 和 0.095),阻尼比为 0.5%, 2%, 5%, 15% 和 30% 时,本文双参数位移谱与实际强震记录位移谱的对比. 由图 11 可知:除了矩震级等于 5.5 且阻尼比小于 5% 的情况外,本文各阻尼比下的双参数位移谱能较好地拟合实际强震记录位移谱,且本文双参数位移谱总随阻尼比的增大而减小,不存在大阻尼比谱值大于小阻尼比谱值的现象。

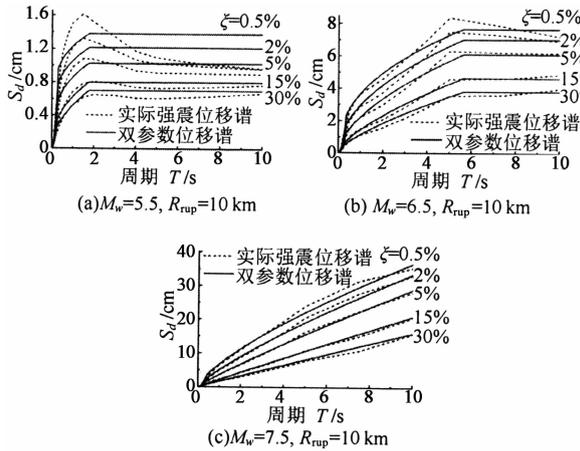


图 11 B 类场地各阻尼比双参数位移谱与实际强震位移谱的对比

Fig. 11 Comparison between Double parameter displacement spectra and displacement spectra from earthquake ground motion for site class B for various damping ratio

5 本文模型在抗震规范中的实现

由于目前世界上大多数国家抗震规范中设计反应谱的地震动参数均是地震区划图的形式给出,而本文建议的双参数位移谱采用了场地地震动峰值加速度 PGA 和地震动峰值速度 PGV 这两个地震动参数,所以应以这两个地震动参数作为地震区划的指标,并以区划图的形式给出。由于影响 PGA 和 PGV 的因素包括地震环境和场地类别两个方面,本文认为可以将这两个方面分别在地震区划和抗震设计规范中加以考虑。在地震区划中主要考虑地震环境(震级和断层距)对 PGA 和 PGV 的影响。为此,可以针对某一场地类别(如基岩或本文中的 B 类场地)编制相应于某一设防水准的峰值加速度和峰值速度两张配套的区划图。场地类别的划分方法及其对基岩峰值加速度和基岩峰值速度的影响则在抗震设计规范中考虑。因此,可引入一对场地类别放大系数 F_a (加速度放大系数)和 F_v (速度放大系数),某类场地的设计峰值加速度和峰值速度由下式确定:

$$PGA = F_a PGA' \quad (21)$$

$$PGV = F_v PGV' \quad (22)$$

式中, PGA' 和 PGV' 是某一设防水准下的基岩设计峰值加速度和峰值速度,由区划图提供;而相应的各类场地放大系数 F_a 和 F_v 由抗震设计规范提供。

F_a 和 F_v 的具体形式应利用在类似地震环境下在不同类别场地上实测的强震记录用统计方法确定。关于 F_a 和 F_v 的确定,将另作文论述。

因此,提供每一设防水准的地震动峰值加速度和速度区划图,并在抗震规范中给出每一设防水准

的各类场地地震动峰值加速度和速度的场地放大系数,可在规范中实现本文提出的双参数位移谱模型,但模型中的系数应采用规范所适用的地震环境区域的实际强震记录来确定。

对于我国的结构抗震设计而言,双参数位移谱模型中的系数应根据我国实际强震记录来确定,尤其在长周期范围内,模型系数应根据我国大量高质量数字强震记录来确定,这尚有待于我国数字强震仪的增设及数字强震记录的收集。

6 结论

基于 Campbell-Bozorgnia 预测方程,本文研究了矩震级、断层距和场地类别对位移谱的影响,指出了 2010 规范设计反应谱所存在的问题,提出了包含场地地震动峰值加速度和速度的水平弹性双参数位移谱模型,并给出了在抗震设计规范中引入该位移谱模型的方法。基于以上研究工作,得到如下结论:

1) 位移谱平台段起始周期是确定位移谱谱形的重要参数,其主要受矩震级的影响,随矩震级的增加而显著增加;断层距对平台段起始周期无影响;当平台段起始周期小于 3 s 时,场地类别对其有一定影响,但影响较弱;当平台段起始周期大于 3 s 时,场地类别对平台段起始周期无影响。

2) 位移谱谱值随矩震级的增大而增大,随断层距的增大而减小;场地越软,位移谱谱值越大。

3) 《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 中设计反应谱的下降段形式不合理导致采用拟谱关系求得的拟位移谱谱值在任何条件下均随结构自振周期的增加而增加,不符合实际强震记录位移谱的统计特征;2010 规范设计反应谱第二下降段的起始周期取为特征周期的 5 倍,该值不能体现震级对位移谱平台段起始周期的影响,不应作为平台段起始周期的取值;当特征周期较小时,2010 规范拟位移谱存在大阻尼比谱值大于小阻尼比谱值的现象,不符合实际强震记录位移谱的统计特征。

4) 《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 中设计反应谱的拟位移谱不适用于基于位移的抗震设计。

5) 场地地震动峰值速度与峰值加速度之比 PGV/PGA 与震级存在正的强相关性,震级对位移谱平台段起始周期及其阻尼调整系数的影响可通过将该周期和系数取为场地 PGV/PGA 比的函数来间接考虑。

6) 本文提出的水平弹性双参数位移谱模型的公式合理且由于将位移谱的特征参数及其阻尼调整系数均取为场地 PGV/PGA 比的函数,该模型能体现

矩震级对位移谱的影响,符合实际强震记录位移谱的统计特征.

7)提供每一设防水准的地震动峰值加速度和速度区划图,并在抗震规范中给出每一设防水准的各类场地地震动峰值加速度和速度的场地放大系数,可在规范中实现本文提出的双参数位移谱模型.

8)本文的研究结果可为我国抗震设计规范的制订和修改提供参考.

参考文献

- [1] TOLOIS S, FACCIOLI E. Displacement design spectra [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 1999, 3(1): 107-125.
- [2] ATHANASSIADOU C J, KARAKOSTAS C Z, MARGARIS BN, *et al.* Displacement spectra and displacement modification factors, based on records from Greece [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(12): 1640-1653.
- [3] 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): 1-20.
XIE Li-li, ZHOU Yong-nian, HU Cheng-xiang, *et al.* Long period characteristic of ground motion response spectrum [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1990, 10(1): 1-20. (In Chinese)
- [4] BOMMER J J, ELNASHAI A. Displacement spectra for seismic design [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 1999, 3(1): 1-32.
- [5] AKKAR S, BOMMER J J. Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36(10): 1275-1301.
- [6] FACCIOLI E, PAOLUCCI R, REY J. Displacement spectra for long periods [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(2): 347-376.
- [7] 曹加良, 施卫星, 刘文光, 等. 长周期结构相对位移反应谱研究 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(7): 63-70.
CAO Jia-liang, SHI Wei-xing, LIU Wen-guang, *et al.* Relative displacement response spectrum of a long-period structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(7): 63-70. (In Chinese)
- [8] CAMPBELL K W, BOZORGNIA Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD, and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01s to 10.0s [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 139-171.
- [9] BOORE D M, ATKINSON G M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10s [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 99-138.
- [10] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 67-97.
- [11] CHIOU B S, YOUNGS R R. NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 173-215.
- [12] IDRISSE I M. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 217-242.
- [13] BOMMER J J, STAFFORD P J, AKKAR S. Current empirical ground-motion prediction equations for Europe and their application to Eurocode 8 [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8(1): 5-26.
- [14] ASCE 7-10. Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Washington, DC: American Society of Civil Engineers, 2010: 203-205.
- [15] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 33-35.
GB 50011-2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010: 33-35. (In Chinese)
- [16] DBJ08-9-2013 建筑抗震设计规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013: 36-38.
DBJ08-9-2013 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Planning Press, 2013: 36-38. (In Chinese)
- [17] CECS 160: 2004 建筑工程抗震性态设计通则 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 17-22.
CECS 160: 2004 General for performance-based seismic design of buildings [S]. Beijing: China Planning Press, 2004: 17-22. (In Chinese)
- [18] JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 17-18.
JTG/T B02-01-2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [J]. Beijing: China Communications Press, 2008: 17-18. (In Chinese)
- [19] LIN Y Y, CHANG K C. Study on damping reduction factor for buildings under earthquake ground motions [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(2): 206-214.
- [20] CROUSE C B, MCGUIRE J W. Site response studies for purpose of revising NEHRP seismic provisions [J]. *Earthquake Spectra*, 1996, 12(3): 407-439.
- [21] 薄景山, 李秀领, 刘德东, 等. 土层结构对反应谱平台值的影响 [J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(4): 29-33.
BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LIU De-dong, *et al.* Effects of soil layer construction on platform value of response spectra [J]. *Earthquake Engineering and Earthquake Vibration*, 2003, 23(4): 29-33. (In Chinese)
- [22] 李平, 薄景山, 孙有为, 等. 场地类型对反应谱平台值的影响 [J]. *地震工程与工程振动*, 2011, 31(1): 25-29.
LI Ping, BO Jing-shan, SUN You-wei, *et al.* Effects of site types on flat section values of response spectra [J]. *Earthquake Engineering and Earthquake Vibration*, 2011, 31(1): 25-29. (In Chinese)
- [23] NEWMARK N M, HALL W J. *Earthquake spectra and design* [M]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 1982: 35-36.
- [24] FEMA. HAZUS-MH 2.1 Technical manual [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2003: (4-7)-(4-9).
- [25] 王国改, 胡克旭, 周礼奎. 位移谱阻尼调整系数模型研究 [J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2014, 41(11): 48-57.
WANG Guo-tao, HU Ke-xu, ZHOU Li-kui. Study on damping scaling factor model for displacement response spectra [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(11): 48-57. (In Chinese)
- [26] REZAEIAN S, BOZORGNIA Y, IDRISSE I M, *et al.* Spectral damping scaling factors for shallow crustal earthquakes in active tectonic regions [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2012: 1-142.