

赵万松,耿淑伟,董满生.抗震设计反应谱特征周期研究[J].地震工程学报,2017,39(3):0502-0508.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0502

ZHAO Wan-song, GENG Shu-wei, DONG Man-sheng. Research on Characteristic Periods of Seismic Design Response Spectrum [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 0502-0508. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0502

抗震设计反应谱特征周期研究^①

赵万松¹, 耿淑伟¹, 董满生²

(1.合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009; 2.合肥工业大学 交通运输工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:搜集整理 1933—2015 年美国西部地区 166 个有详细钻孔资料台站场地上的 1 237 条水平方向强震记录,按照我国建筑抗震设计规范(GB 50011-2010)中反应谱的形状对强震记录的加速度反应谱进行拟合,提取反应谱的特征周期。分析特征周期随场地类别、震级、震中距的变化特征;按特征周期分区统计计算不同场地类别上的特征周期平均值,并与我国现行的建筑抗震设计规范中给定的特征周期值进行对比研究;最后探讨地震动峰值加速度对特征周期的影响。根据研究分析结果提出关于抗震设计反应谱特征周期值的改进建议。

关键词:强震记录;场地类别;特征周期;地震动峰值加速度

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)03-0502-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0502

Research on Characteristic Periods of Seismic Design Response Spectrum

ZHAO Wan-song¹, GENG Shu-wei¹, DONG Man-sheng²

(1.School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

2.School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: In this study, we collected 1,237 horizontal strong ground motion records, including detailed borehole data, from the 1933—2015 period at 166 sites in the Western United States. We fit the standard response spectrum to the Chinese Code for the Seismic Design of Buildings (GB 50011-2010) and extracted the characteristic periods of the response spectrum. In this paper, we discuss the influences of site, magnitude, and epicentral distance on the characteristic period of the response spectrum and prove that these periods increase when the site becomes soft. The characteristic periods of the response spectrum increase with increasing magnitude within the same scope of epicentral distance. With increases in the epicentral distance, the characteristic period lengthens within the same range of magnitude. The magnitude and epicentral distance have some influence on the characteristic period. With respect to a single factor of magnitude or epicentral distance, which influences the characteristic period values at the same site classification, research shows that the magnitude has more influence than distance. We divide characteristic

① 收稿日期: 2016-04-08

基金项目: 国家山区公路工程技术研究中心开放课题(gsgzj-2014-05)

作者简介: 赵万松(1991—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事结构抗震与地震工程研究。E-mail: zhaowansong163@163.com。

通信作者: 耿淑伟(1965—),女,辽宁抚顺人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事地震工程研究。

periods at class II sites into three zones. The method for partitioning the characteristic periods at other sites is the same as that at class II sites. We determined the scope of the characteristic period of the acceleration response spectrum according to the seismic ground motion parameters zonation map of China (GB 18306-2015). We statistically analyzed the averages of the characteristic period of the response spectrum at different sites based on the zones of the characteristic periods and discuss the reasonable characteristic period values in the current seismic design code. Compared with the characteristic period values in the Code for Seismic Design of Buildings in China, we found most of the statistical characteristic period values to be larger. We divided the strong motion records of class II sites into groups based on their scopes of magnitude and distance. We calculated the average peak ground acceleration for each group and, based on the general rule that peak ground acceleration decreases with decreases in magnitude and increases in the epicentral distance, we ascertained the partitions of the peak ground acceleration. We found the partition of peak ground acceleration for site I₀, I₁, and III I classes to be the same as that at class II sites. Next, we calculated the average characteristic period value in each zone of peak ground acceleration for different sites and discuss the influence of the seismic peak ground acceleration on the characteristic periods. Our results show that the characteristic period of the response spectrum has clear distinctions within different partitions of the peak ground acceleration. Based on these results, we offer some proposals regarding the characteristic periods of the response spectrum.

Key words: strong motion records; site classification; characteristic period; seismic peak ground acceleration

0 引言

反应谱特征周期是研究地震动频谱特性的重要参数,也是建筑结构抗震设计中确定设计反应谱的重要特征参数。加速度反应谱在抗震设计规范中是以地震影响系数曲线的形式给出,而特征周期的大小控制着地震影响系数曲线平台段的宽窄,因此合理的确定特征周期值对抗震设计起到至关重要的作用。我国现行的建筑抗震设计规范(GB 50011-2010)^[1](以下简称“10 规范”)是根据场地类别和设计地震分组给出不同的特征周期值。影响反应谱特征周期的主要因素包括震源机制、震级大小与震中距、传播介质与途径以及局部场地条件等,其中震级大小、震中距和场地条件是相对易于考虑的因素,这在我国的建筑抗震设计规范中通过设计地震分组来体现。关于反应谱特征周期研究的主要成果有:薄景山等^[2]研究土层结构和输入地震动对反应谱特征周期影响的结果表明,在地震动输入相同的情况下,特征周期随覆盖层厚度的增大而增大,存在软弱土层时也使特征周期增大。郭晓云等^[3]以汶川地震一次地震的反应谱为基础,统计了反应谱特征周期在不同场地、不同断层距和不同烈度分组内的取值,统计结果表明特征周期平均值随着场地变软有增大趋

势,统计的远场反应谱特征周期比规范中特征周期偏大。李小军等^[4-5]研究了4类场地条件对反应谱特征周期影响的特点及规律,给出了每一类场地特征周期变化的经验关系和建议的各类场地特征周期取值,并得出反应谱特征周期随场地类别由II到IV和地震动强度的加大而明显加大。夏峰等^[6]对天津地区的覆盖层土动力学参数的统计分析得出,反应谱特征周期值受峰值加速度的影响明显。孔宇阳等^[7]统计分析武汉地区典型土类动力非线性参数表明,与规范值相比,反应谱特征周期的统计平均值和实验值结果基本一致,计算结果真实合理。董娣等^[8]通过分析震源机制对近场地震动反应谱的影响得出,震源机制不仅影响反应谱的峰值大小和位置,而且在一定程度上影响反应谱的形状。

本文在前人研究的基础上,利用含有最近几年美国西部地区的强震记录对抗震设计反应谱特征周期进行系统的研究分析,以期能为抗震设计规范修订时特征周期值的调整提供参考。

1 数据资料

实际强震记录是对地震作用的直接了解,各国抗震设计规范均以此为依据。各国地震动特征随地

质构造条件有一定的差别,但主要的影响因素是震级、距离、场地条件。换句话说,其他国家和地区的强地震动数据也可以用来研究我国抗震设计规范中反应谱特征参数的规定。美国西部地区的强震记录非常丰富,其中有些有钻孔资料的记录其场地类别完全可以按我国的场地分类标准进行场地划分,因此可以直接用于我国的规范制定。

本文选用文献[9]中搜集的美国西部地区有详细钻孔资料的台站场地 166 个,按照我国建筑抗震设计规范(GB 50011-2010)中规定的场地类别划分方法用覆盖层厚度和等效剪切波速划分为 4 类,其中 I 类分为 I₀ 和 I₁ 两个亚类)场地,其中属于 I₀ 类场地 7 个, I₁ 类场地 14 个; II 类场地 112 个; III 类场地 31 个; IV 类场地 2 个。选取 1933—2015 年间上述 166 个有详细钻孔资料的台站场地上的水平方向强震记录共 1 237 条,其中 I₀ 类场地上 23 条, I₁ 类场地上 57 条, II 类场地上 743 条, III 类场地上 408 条, IV 类场地上 6 条。所选强震记录的地震震级范围为 3.6~7.5 级,每条记录的峰值加速度均大于 10 gal,且均在自由地表或建筑物(低于 3 层)的地下室或一层处取得,以减少土与结构之间相互作用对强震记录造成的影响。所选强震记录的震级-震中距分布见图 1。可以看出,强震记录分布范围比较均匀。

2 特征周期影响因素分析

按我国建筑抗震设计规范(GB50011-2010)中

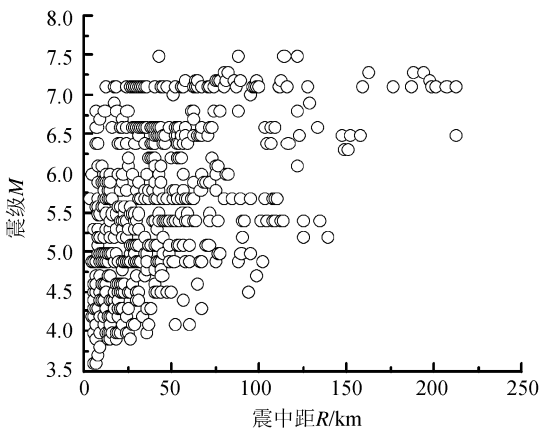


图 1 强震记录的震级-震中距分布图

Fig.1 Magnitude and epicentral distance distribution of strong motion records

反应谱的形状对强震记录的加速度反应谱进行拟合,提取反应谱的特征周期。考虑场地类别、震级、震中距对特征周期取值的影响,将各类场地上按震级、震中距分组统计计算特征周期均值列于表 1。由于 IV 类场地上的强震记录相对缺乏,所以本文统计未包含 IV 类场地。从表 1 可以看出,各类场地上的特征周期均值总体变化趋势为:在同一震级范围内随震中距的增大而增大,在同一震中距范围内随震级的增大而增大。

为了研究震级对特征周期 T_g 的影响规律,对比相同场地类别、相同震中距范围、不同震级对 T_g 影响,如图 2 所示。同样,对比相同场地类别、相同震级范围、不同震中距对 T_g 影响,如图 3 所示。由

表 1 各类场地上按震级、震中距分组统计计算特征周期均值(单位:s)

Table 1 Statistically averages of the characteristic period according to the scope of magnitude and epicentral distance (Unit:s)

场地类别	震级 M	震中距 R/km				
		$0 < R \leq 10$	$10 < R \leq 30$	$30 < R \leq 50$	$50 < R \leq 100$	$R > 100$
I_0	$3.6 \leq M < 4.5$	-	0.30(2)	-	-	-
	$4.5 \leq M < 5.5$	-	-	0.20(2)	0.20(2)	0.55(2)
	$5.5 \leq M < 6.5$	0.20(2)	-	0.367(3)	-	-
	$6.5 \leq M \leq 7.5$	-	0.30(2)	0.417(6)	0.40(2)	-
I_1	$3.6 \leq M < 4.5$	0.25(2)	-	-	-	-
	$4.5 \leq M < 5.5$	0.20(2)	0.217(6)	-	0.75(2)	-
	$5.5 \leq M < 6.5$	-	0.483(12)	0.283(6)	-	-
	$6.5 \leq M \leq 7.5$	0.40(2)	0.35(12)	0.988(8)	0.70(4)	0.90(1)
II	$3.6 \leq M < 4.5$	0.165(32)	0.213(64)	0.170(10)	0.20(2)	-
	$4.5 \leq M < 5.5$	0.218(40)	0.287(65)	0.330(27)	0.342(37)	0.40(8)
	$5.5 \leq M < 6.5$	0.409(22)	0.427(64)	0.431(50)	0.440(53)	0.975(4)
	$6.5 \leq M \leq 7.5$	-	0.738(24)	0.565 (103)	0.583(80)	1.017(58)
III	$3.6 \leq M < 4.5$	0.20(4)	0.333(20)	-	0.30(4)	-
	$4.5 \leq M < 5.5$	0.330(24)	0.384(73)	0.458(53)	0.353(23)	0.450(16)
	$5.5 \leq M < 6.5$	0.30(4)	0.487(15)	0.40(31)	0.521(20)	0.835(18)
	$6.5 \leq M \leq 7.5$	0.50(5)	0.568(32)	0.677(14)	0.890(42)	1.930(10)

注:表中括号内的数字为反应谱条数,“-”表示相应分组内没有记录,下同。

图 2(a)可以看出,各震中距范围内的特征周期随着震级的增大而增大;由图 2(b)可以看出,在震中距 $10 < R \leq 30$ 、 $50 < R \leq 100$ 和 $R > 100$ 范围内,特征周期随着震级的增大而增大,而在其他震中距范围内并未表现依次增大的规律。对比图 2 中(a)和(b)可知,不同场地类别上特征周期随震级的变化规律

是不同的。由图 3(a)可以看出,各震级范围内的特征周期随着震中距的增大而增大;由图 3(b)可以看出,在 $6.5 \leq M \leq 7.5$ 范围内,特征周期随着震中距的增大而增大,其他震级范围内特征周期在相邻震中距之间出现波动。对比图 2 和图 3 可以看出,震级对特征周期的影响比震中距更明显。

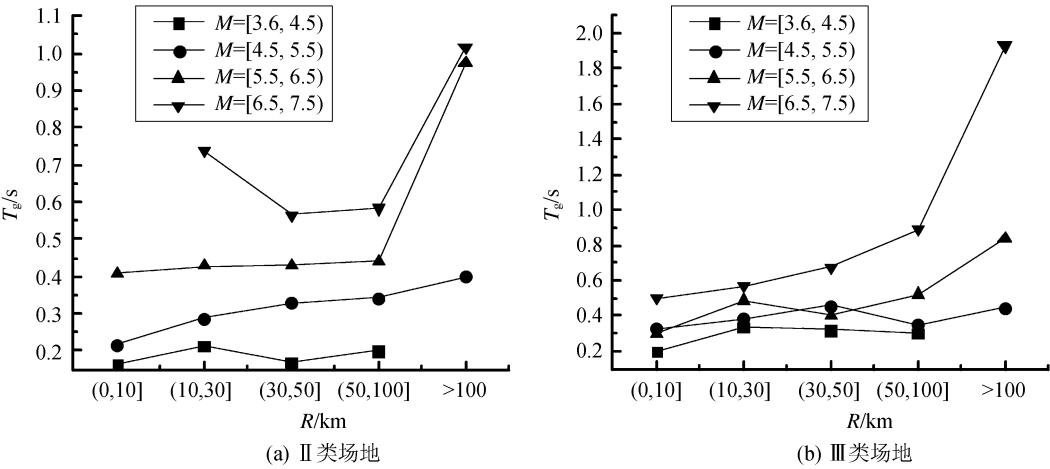


图 2 T_g 随震级变化关系曲线
Fig.2 Variation curves of T_g with magnitude

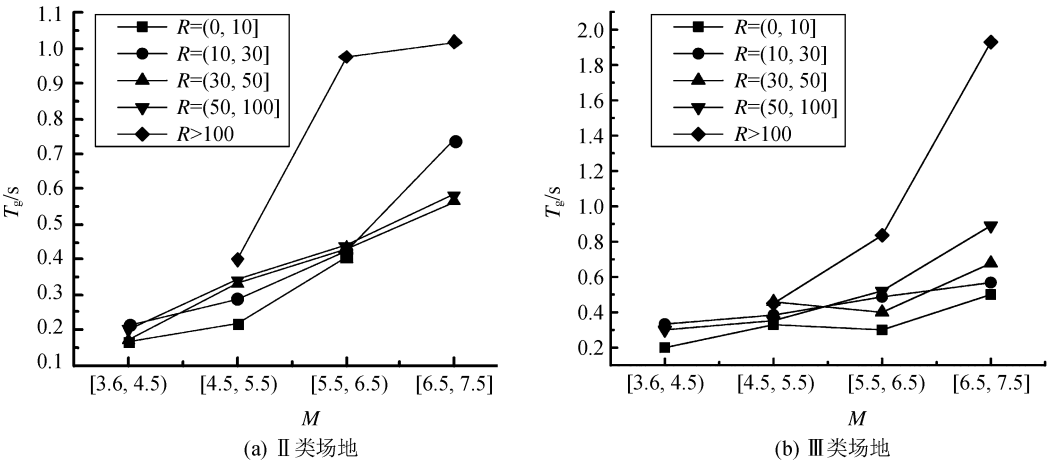


图 3 T_g 随震中距变化关系曲线
Fig.3 Variation curves of T_g with epicentral distance

3 考虑特征周期分区和地震动峰值加速度分区的特征周期研究

建筑抗震设计规范中给出的 I_0 、 I_1 、 III 、 IV 类场地反应谱特征周期是根据 II 类场地反应谱特征周期确定的,本节也以 II 类场地为基准来研究其他类场地上特征周期的取值。中国地震动参数区划图 (GB 18306-2015)^[10] 将特征周期按 0.35 s、0.40 s、0.45 s 进行分区,并给出各分区地震动加速度反应谱特征周期范围(表 2)。特征周期划分的 0.35 s、

0.40 s、0.45 s 区即对应于设计地震分组的第一组、第二组、第三组。

表 2 地震动加速度反应谱特征周期分区范围(单位:s)
Table 2 The scope of characteristic period of the acceleration response spectrum (Unit:s)

地震动加速度反应谱特征 周期 T_g 分区值	地震动加速度反应谱特征 周期 T_g 范围
0.35	$T_g \leq 0.40$
0.40	$0.40 < T_g < 0.45$
0.45	$T_g \geq 0.45$

由表 1 和表 2 可确定Ⅱ类场地上特征周期分区为: $3.6\leq M<4.5$ 和 $4.5\leq M<5.5$ 为 0.35 s 区, $5.5\leq M<6.5$ 时 $R\leq 100$ km 为 0.40 s 区, $5.5\leq M<6.5$ 时 $R>100$ km 和 $6.5\leq M\leq 7.5$ 为 0.45 s 区。 I_0 、 I_1 和Ⅲ类场地上特征周期分区同Ⅱ类场地,计算每类场地各特征周期分区内的特征周期均值(表 3)。

表 3 各类场地上按特征周期分区统计计算特征周期均值(单位:s)

Table 3 Statistically averages of the characteristic period according to the partition of characteristic period (Unit:s)

加速度反应谱特征周期分区值	场地类别			
	I_0	I_1	Ⅱ	Ⅲ
0.35	0.313(8)	0.309(12)	0.262(285)	0.390(217)
0.40	0.30(5)	0.417(18)	0.430(189)	0.448(70)
0.45	0.390(10)	0.615(27)	0.689(269)	0.855(121)

对比表 3 的结果和“10 规范”中给定的特征周期值可知, I_0 、 I_1 类场地上各分区内特征周期均值均大于规范值,Ⅱ类场地上 0.40 s 区和 0.45 s 区比规范值大、0.35 s 区比规范值小,Ⅲ类场地上 0.45 s 区比规范值大、0.35 s 和 0.40 s 区比规范值小。 I_0 类场地各分区比规范值分别大 0.113 s、0.05 s、0.09 s, I_1 类场地各分区比规范值分别大 0.059 s、0.117 s、0.265 s,Ⅱ类场地 0.40 s 区和 0.45 s 区分别比规范值大 0.03 s 和 0.239 s,Ⅲ类场地 0.45 s 区比

规范值大 0.205 s。表 3 中 0.45 s 区的特征周期均值比规范中设计地震分组第三组的值大较多,本文建议规范中各类场地上各设计地震分组内的特征周期值在原来的基础上增加 0.05 s。

“10 规范”中规定特征周期应根据建筑所在地的设计地震分组和场地类别确定,其中设计地震分组反映了地震震级、震中距对特征周期的影响。但规范中尚未考虑设计基本地震加速度值(本文采用地震动峰值加速度)对特征周期取值的影响,也就是说,相同的场地类别、相同的设计地震分组、不同的设计地震基本加速度对应的特征周期是一样的。为了验证特征周期取值是否与设计地震基本加速度有关,下文将这一问题进行初步探讨。

地震动峰值加速度分区值采用中国地震动参数区划图(GB 18306-2015)中给出的范围:0.05g (0.04g~0.09g)、0.10g (0.09g~0.14g)、0.15g (0.14g~0.19g)、0.20g (0.19g~0.28g)、0.30g (0.28g~0.38g)、0.40g ($\geq 0.38g$)。中国地震动参数区划图是根据Ⅱ类场地编制的,本文以Ⅱ类场地上的峰值加速度来确定地震动峰值加速度分区值范围。选用峰值加速度为 0.04g 及以上的强震记录共 829 条。将Ⅱ类场地上的强震记录按震级、震中距分组,计算各分组内峰值加速度均值列于表 4。

表 4 Ⅱ类场地峰值加速度均值(单位:cm/s²)

Table 4 The averages of peak acceleration on class Ⅱ site (Unit:cm/s²)

震级 M	震中距 R /km				
	$0<R\leq 10$	$10<R\leq 30$	$30<R\leq 50$	$50<R\leq 100$	$R>100$
$3.6\leq M<4.5$	97.910(21)	64.764(13)	42.484(3)	-	-
$4.5\leq M<5.5$	198.233(34)	140.306(36)	95.343(11)	56.107(12)	-
$5.5\leq M<6.5$	386.370(22)	244.664(64)	180.655(46)	82.882(29)	61.299(1)
$6.5\leq M\leq 7.5$	-	307.250(24)	200.819(103)	122.540(74)	60.086(36)

根据表 4 的计算结果,同时考虑地震动峰值加速度随震级减小、震中距增加应随之减小的一般性规律进行适当补充调整,可确定峰值加速度分区为: $3.6\leq M<4.5$ 、 $R>10$ km, $4.5\leq M<5.5$ 、 $R>50$ km, $5.5\leq M<6.5$ 和 $6.5\leq M\leq 7.5$ 、 $R>100$ km 划分到 0.05g 区; $3.6\leq M<4.5$ 、 $0<R\leq 10$ km, $4.5\leq M<5.5$ 、 $30<R\leq 50$ km, $5.5\leq M<6.5$ 和 $6.5\leq M\leq 7.5$ 、 $50<R\leq 100$ 划分到 0.10g 区; $4.5\leq M<5.5$ 、 $10<R\leq 30$ km, $5.5\leq M<6.5$ 、 $30<R\leq 50$ km 划分到 0.15g 区; $4.5\leq M<5.5$ 、 $0<R\leq 10$ km, $5.5\leq M<6.5$ 、 $10<R\leq 30$ km, $6.5\leq M\leq 7.5$ 、 $30<R\leq 50$ km 划分到 0.20g 区; $6.5\leq M\leq 7.5$ 、 $10<R\leq 30$ km 划分到 0.30g 区; $5.5\leq M<6.5$ 和 $6.5\leq M\leq 7.5$ 、 0

$<R\leq 10$ km划分到 0.40g 区。按照此分区范围计算 I_0 、 I_1 、Ⅱ、Ⅲ类场地上特征周期在各峰值加速度分区内的平均值(表 5)。为了更具体体现峰值加速度对特征周期的影响,将Ⅱ类场地上震级为 $5.5\leq M<6.5$ 和 $6.5\leq M\leq 7.5$ 范围内各峰值加速度分区的特征周期均值进行对比,结果见图 4。

由表 5 可以看出,各类场地在峰值加速度小于 0.15g 时,特征周期随着峰值加速度的增大而减小,且衰减较快;在峰值加速度大于 0.15g 时,随着峰值加速度的增大变化规律不明显;相同场地类别、不同峰值加速度分区内特征周期的均值差别较明显。由图 4 可看出,在相同场地类别、相同震级范围、相同震中距范围内不同峰值加速度区的特征周期值不尽

相同,即峰值加速度对特征周期的取值有一定的影响。

表 5 按峰值加速度分区统计计算特征周期均值(单位:s)

Table 5 Statistically averages of the characteristic period according to the partition of peak acceleration (Unit:s)

场地类别	地震动峰值加速度分区值					
	0.05g	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g
I ₀	-	0.40(2)	0.367(3)	0.417(6)	0.30(2)	0.20(2)
I ₁	0.80(1)	0.733(3)	0.250(12)	0.641(22)	0.35(12)	0.40(2)
II	0.656(65)	0.479(135)	0.376(82)	0.462(201)	0.738(24)	0.409(22)
III	0.845(14)	0.607(68)	0.372(62)	0.458(50)	0.568(32)	0.388(7)

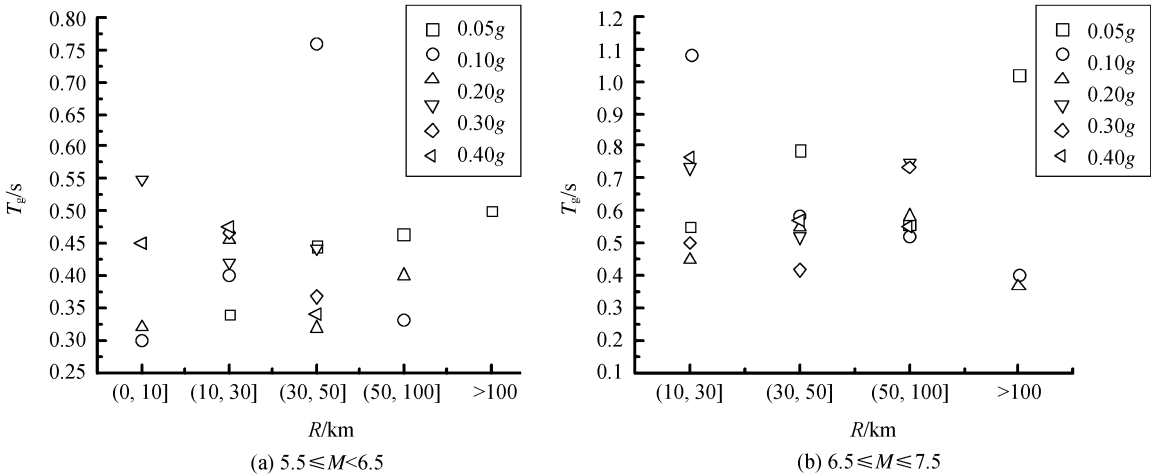


图 4 II 类场地各峰值加速度分区特征周期均值对比图

Fig.4 Contrast figure about characteristic period of class II site in each partition of peak acceleration

5 结语

本文以严格按我国建筑抗震设计规范进行场地类别划分的美国西部地区的强震记录为基础,统计分析抗震设计反应谱特征周期取值随场地类别、震级、震中距的变化特征,又按特征周期分区和地震动峰值加速度分区对特征周期取值进行研究。研究表明,特征周期随着场地类别的提高而增大,震级对特征周期的影响要大于震中距;建议抗震设计规范中各类场地上各设计地震分组内的特征周期值在原来的基础上增加 0.05 s,并应适当考虑地震动峰值加速度对特征周期取值的影响。由于特征周期是确定抗震设计反应谱的重要特征参数,其对建筑结构的抗震设计起到至关重要的作用,所以对特征周期合理取值的研究具有一定的现实意义。

参考文献(References)

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.GB50011-2010,Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building

Press,2010.(in Chinese)
[2] 薄景山,李秀领,刘德东,等.土层结构对反应谱特征周期的影响[J].地震工程与工程振动,2003,23(5):42-45.
BO Jing-shan,LI Xiu-ling,LIU De-dong,et al.Effects of Soil Layer Construction on Characteristic Periods of Response Spectra[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2003,23(5):42-45.(in Chinese)
[3] 郭晓云,薄景山,巴文辉.汶川地震反应谱特征周期统计分析[J].地震工程与工程振动,2013,33(2):55-59.
GUO Xiao-yun,BO Jing-shan,BA Wen-hui.Statistical Analysis of Period of Response Spectrum Based on Wenchuan Strong Ground[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2013,33(2):55-59.(in Chinese)
[4] 李小军,彭青.不同类别场地地震动参数的计算分析[J].地震工程与工程振动,2001,21(1):29-36.
LI Xiao-jun,PENG Qing.Calculation and Analysis of Earthquake Ground Motion Parameters for Different Site Categories [J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2001,21(1):29-36.(in Chinese)
[5] 李小军,彭青,刘文忠.设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J].世界地震工程,2001,17(4):34-41.
LI Xiao-jun,PENG Qing,LIU Wen-zhong.Consideration of Site Effects for Determination of Design Earthquake Ground Motion Parameters[J].World Earthquake Engineering,2001,17 (4):34-41.(in Chinese)

[6] 夏峰,宋成科,孟庆筱,等.天津地区的覆盖层土动力学参数统计分析[J].地震工程学报,2015,37(1):48-54.
XIA Feng, SONG Cheng-ke, MENG Qing-xiao, et al. Analysis of Soil Dynamic Parameters of Overburden in the Tianjin Area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 48-54. (in Chinese)

[7] 孔宇阳,廉超,李井冈,等.武汉地区典型土类动力非线性参数的统计分析[J].地震工程学报,2014,36(4):832-837.
KONG Yu-yang, LIAN Chao, LI Jing-gang, et al. Statistical Analysis of Dynamic Nonlinear Parameters of Typical Soils in Wuhan Area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 832-837. (in Chinese)

[8] 董娣,桑向国,刘锐,等.震源机制对近场地震动反应谱的影响[J].西北地震学报,2008,30(1):6-10.
DONG Di, SANG Xiang-guo, LIU Rui, et al. Effects of Focal Mechanism on Near Field Response Spectrum of Ground Motion [J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(1): 6-10. (in Chinese)

[9] 耿淑伟.抗震设计规范中地震作用的规定[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2005.
GENG Shu-wei. Earthquake Action Provision in Seismic Design Code [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2005. (in Chinese)

[10] GB18306-2015,中国地震动参数区划图[S].北京:中国标准出版社,2015.
GB18306-2015, Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)

(上接 487 页)

[17] Rice J R, Rudnicki J W. A Note on Some Features of the Theory of Localization of Deformation [J]. International Journal of Solids and Structures, 1980, 16(7): 597-605.

[18] Borja R I. Bifurcation of Elastoplastic Solids to Shear Band Mode at Finite Strain [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(46): 5287-5314.

[19] 黄茂松,李学丰,钱建固.各向异性砂土的应变局部化分析[J].岩土工程学报,2012,34(10):1772-1780.
HUANG Mao-song, LI Xue-feng, QIAN Jian-gu. Strain Localization of Anisotropic Sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1772-1780. (in Chinese)

[20] Dietsche A, Steinmann P, Willam K. Micropolar Elastoplasticity and Its Role in Localization [J]. International Journal of Plasticity, 1993, 9(7): 813-831.

[21] Tejchman J, Bauer E, Wu W. Effect of Fabric Anisotropy on Shear Localization in Sand During Plane Strain Compression [J]. Acta Mechanica, 2007, 189(1-4): 23-51.

[22] 衡帅,杨春和,张保平,等.页岩各向异性特征的试验研究[J].岩土力学,2015,36(3):609-616.
HENG Shuai, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Experimental Research on Anisotropic Properties of Shale [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 609-616. (in Chinese)

[23] 陈天宇,冯夏庭,张希巍,等.黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014(9):1772-1779.
CHEN Tian-yu, FENG Xia-ting, ZHANG Xi-wei, et al. Experimental Study on Mechanical and Anisotropic Properties of Black Shale [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(9): 1772-1779. (in Chinese)

[24] Chang J, Chu X, Xu Y. Finite-element Analysis of Failure in Transversely Isotropic Geomaterials [J]. International Journal of Geomechanics, 2014: 04014096.

[25] Lade P V, Jakobsen K P. Incrementalization of a Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(7): 647-659.

[26] Lade P V. Failure Criterion for Cross-anisotropic Soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(1): 117-124.