

用于强震动记录选取的 *EPA* 均值目标谱的确定^{*}

李琳¹, 任叶飞², 温瑞智², 冀昆²

(1. 哈尔滨学院 黑龙江省地下工程技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨, 150086;
2. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨, 150080)

摘要: 强震动记录的选取对结构分析的结果影响极大, 现行抗震设计规范对于强震动记录选取的规定比较宽泛, 匹配结果难以达成。以区划图和抗震设计规范为依据, 采用强震动记录数据建立符合抗震设防要求的有效峰值加速度 (*EPA*) 均值目标谱, 并将其用于强震动记录选取。*EPA* 均值目标谱体现了场地条件和地震环境对反应谱形状的控制作用, 与规范标准谱相比更符合实际的谱形特征。采用 *EPA* 均值目标谱全周期匹配选取记录, 结果表明匹配程度显著优于规范目标谱, 基本满足全周期匹配各周期点上反应谱均值与目标谱相对误差小于 20% 的规范要求。

关键词: 目标谱; 强震动记录; *EPA* 均值目标谱

中图分类号: P315.914

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0584-10

0 引言

随着强震动观测技术的发展, 强震动记录数据逐步累积, 在结构动力时程分析中使用天然强震动记录已成为抗震设计的趋势。对于一般建设工程, 根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 规定, 正确选择输入的地震加速度时程曲线, 要满足地震动三要素的要求, 即频谱特性、有效峰值和持续时间均要符合规定。这个规定对于设计人员而言过于宽泛、缺乏可操作性。

针对这一现状, 国内很多学者提出了以局部匹配地震影响系数曲线为目的的强震动记录选取方法。杨溥和李英民 (2000) 提出基于规范标准反应谱平台段和结构基本自振周期段的双频段控制选波方案。卢啸等 (2014) 针对超高层建筑提出采用结构若干自振周期对应谱加速度的几何平均数作为与结构相关的周期指标。张颖楚等 (2017) 提出考虑反应谱特征周期控制的思路。任叶飞等 (2018) 提出考虑分周期段匹配的原则。以上这些方法基于结构动力特性的目标周期点或

者周期区段局部匹配设计反应谱, 虽然有较好的匹配度, 但是采用的是与结构自振周期有关的方法, 当结构刚度退化明显时结构周期就难以确定, 若考虑结构周期在地震反应中的变化则操作较为复杂繁琐, 工程设计普遍适用性较差。曲哲等 (2011) 提出等效周期对于非线性地震反应的意义, 建议采用与结构周期无关的基于地震信息的选取方法。冀昆等 (2017) 提出全周期权重匹配法, 针对传统匹配方案在非目标周期段匹配效果较差和整体谱型控制不太理想的问题, 利用全周期段匹配结果相对误差修改权重函数, 整理总结了一套包含地震信息筛选和调幅匹配的完整强震动记录选取流程。但选波相对误差的控制也难以符合“其平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符”的要求。总体上, 国内研究的主要方向在于用数学的方法降低强震动记录与规范谱之间的匹配误差, 少有对目标谱的讨论 (李琳等, 2016), 在本质上并不能解决规范谱谱形与实际观测记录不符的内在问题。国外学者 (Hancock, Bommer,

^{*} 收稿日期: 2019-02-28.

基金项目: 黑龙江省地下工程技术重点实验室开放项目——地下结构输入地震动记录的选取方法研究 (2017-HXYKF-07)、中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项——强震动记录中的奇异波形机理研究 (2017B07) 和哈尔滨青年博士科研启动基金项目——强震动记录的工程选取及应用研究 (HODF2016-011) 联合资助

2006; Iervolino *et al*, 2006) 研究发现持时对基于位移的需求指标没有显著影响, 而对基于能量模型的需求指标会产生影响, 并指出持时对结构损伤的影响也与结构模型自身有关。持时指标受限于其本身的不确定性和离散性, 并不适合作为选波的首要条件, 因此, 在建立目标反应谱时并没有作为考虑条件。

本文尝试以实际观测记录建立以目标 EPA 为依据的 EPA 均值谱, 建立具有实际观测强震动记录特征的目标谱, 以期在未来规范中完善时程分析地震动输入选取的要求和规定提供一种新的解决思路。

1 强震动记录数据库

强震动记录数据库的选取是研究地震动输入选取的基本前提。本文中采用的强震动记录数据库由 PEER 的 NGA - WEST1 (2009) 地震地面运动数据库和 2008 年以来新增 3 次较大地震的记录组成, 其中 NGA - WEST1 数据 3 512 组, 记录矩震级 4.27 ~ 7.9 级, 震源距 0.4 ~ 558 km; 2011 年日本 Tohoku 9.0 级地震 (141 组)、2008 年四川汶川 8.0 级地震 (129 组)、2010 新西兰 7.1 级地震 (43 组), 强震动记录数据库按场地分布的情况如图 1 所示。记录反应谱采用 5% 阻尼比, 在周期范围内按周期的对数等间隔, 选取了 105 个周期处的谱值。采用 2 个水平方向加速度反应谱的几何平均值作为建立 EPA 均值谱的计算依据。

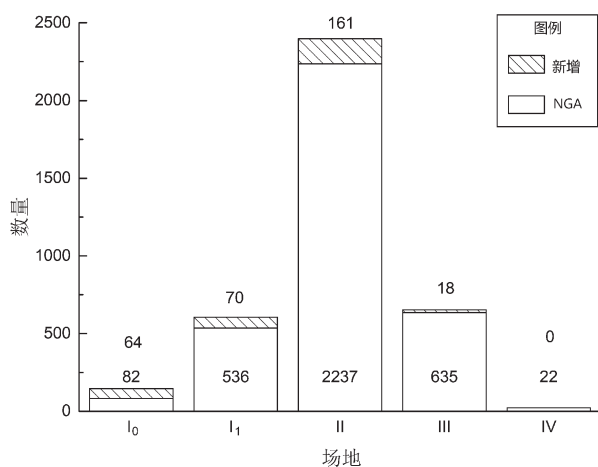


图1 不同场地类别的强震动记录数量
Fig. 1 The histograms of selected different strong-motion records

2 EPA 均值目标谱

使用抗震规范中的地震影响系数曲线、用静力方法确定地震作用是十分有效且偏于安全的。但是将其用于时程分析选取强震动记录的匹配目标谱时, 由于人为提高长周期部分的谱值及平滑处理, 使其缺乏实际反应谱的整体谱型特征, 因而在强震动记录选取中难以进行全周期整体谱型匹配。地震影响系数曲线是由特征周期和最大峰值加速度共同确定的。其中, 特征周期与场地类别和抗震设计分组 (分区) 有关, 最大峰值加速度由抗震设防烈度确定。即场地类别、设计分组和抗震设防烈度三者共同确定一条地震影响系数曲线, 称为规范目标谱。在强震动记录选取中, 相同场地类别、设计分组和抗震设防烈度的工况匹配同一谱型的目标谱。因此, 考虑由以上 3 个主要参数建立具有实际记录反应谱谱型的 EPA 均值目标谱。具体建立方法如下:

(1) 确定特征周期并进行抗震设计分组。分组统计的目的是为时程分析强震动记录选取拟合新的目标反应谱, 同时与现行抗震规范目标谱衔接。因此不直接将距离和震级作为控制参数, 而是分 2 种情况 (基本及多遇、罕遇) 由强震动记录反应谱的特征周期来确定强震动记录的分组 (分区)。根据美国 ATC - 3 中的固定频段方法和概率法 (刘文锋等, 2009) 来计算反应谱的特征周期并比较, 两者具有显著相关关系。概率法主观性强, 本文采取固定频率法确定特征周期 (T_g):

$$T_g = 2\pi \frac{EPV}{EPA} \quad (1)$$

$$EPA = S_A / 2.5 \quad (2)$$

$$EPV = S_v / 2.5 \quad (3)$$

式中: EPA 为有效峰值加速度; S_A 为 5% 阻尼比加速度反应谱 0.1 ~ 0.5 s 频段的平均值; EPV 为有效峰值速度; S_v 为 5% 阻尼比速度反应谱在 0.5 ~ 2 s 频段的平均值 (高孟潭, 2015)。

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015) 特征周期调整表 (表 1), 确定各分区地震动特征周期范围。以 II 类场地为例, 在基本及多遇地震情况下: 当 $T_g < 0.4$ s 时, 标记为 1 区 (1 组) 记

录; 当 $0.4\text{ s} < T_g < 0.45\text{ s}$ 时, 标记为 2 区 (2 组) 记录; 当 $T_g > 0.45\text{ s}$ 时, 标记为 3 区 (3 组) 记录。罕遇地震动加速度反应谱特征周期应比基本地震动特征周期提高 0.05 s 进行分区 (分组)。

表 1 场地基本地震动反应谱特征周期 T_g 调整表
Tab. 1 Characteristic periods of reponse spectra
with four site classes of T_g

特征周期 分区	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
1 区	0. 20	0. 25	0. 35	0. 45	0. 65
2 区	0. 25	0. 30	0. 40	0. 55	0. 75
3 区	0. 30	0. 35	0. 45	0. 65	0. 90

(2) 按场地类别和抗震设计分组建立子数据库。目前, 国外抗震规范通常采用场地地表以下 30 m 范围内的平均剪切波速 V_{s30} 代表场地条件, 并按 V_{s30} 对建筑场地进行分类。但是, 我国建筑场地分类标准是地表以下 20 m 深度土层范围内的等效剪切波速 V_{s20} 和剪切波速大于 500 m/s 的土层覆盖层厚度。吕红山和赵凤新 (2007)、冀昆 (2014) 利用大量国内外强震观测台站的钻孔剪切波速资料分析提出的我国场地类别和 V_{s30} 的对应关系。本文结合我国抗震设计规范中关于 I_0 和 II 场地分类的规定, 给出了场地类别和 V_{s30} 的对应关系, 如表 2 所示。

表 2 场地类别与 V_{s30} 对应关系
Tab. 2 The correspondence relationship between the VS30 and site classes
单位: m/s

场地类别	I ₀	I ₁ /I	II	III	IV
吕红山和赵凤新 (2007)	—	> 510	260 ~ 510	150 ~ 260	< 150
冀昆 (2014)	—	> 550	260 ~ 550	160 ~ 260	< 160
本文	> 800	550 ~ 800	260 ~ 550	160 ~ 260	< 160

按场地分类和抗震设计分组分别统计基本及多遇、罕遇地震强震动记录数量分布情况, 见表 3、表 4、图 2 及图 3。I₀ 类场地和 IV 类场地记录

数量较少, 分别为 86 组和 18 组, 按分区 (分组) 统计 2 区数量不足 10 组记录。因此, 仅选取 I₁, II, III 类场地的 3 个分区建立 EPA 均值目标谱。

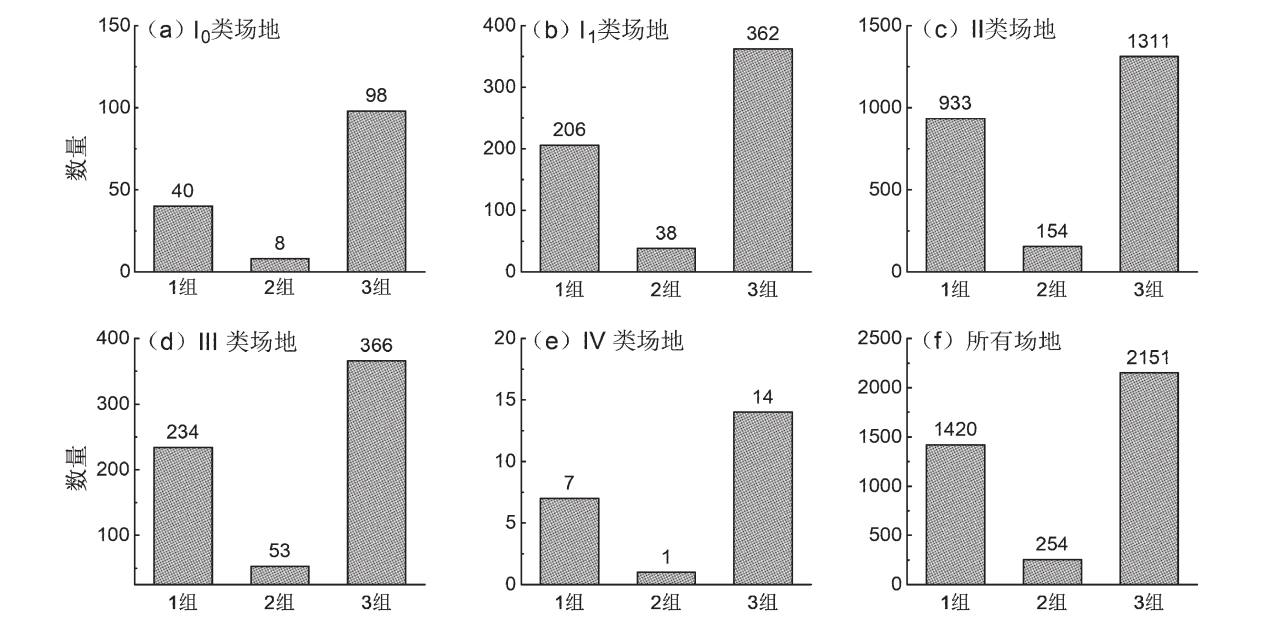


图 2 基本及多遇地震不同场地及设计分区记录数量分布图
Fig. 2 The histograms of selected strong-motion records with site classes
and design groups of moderate and small earthquakes

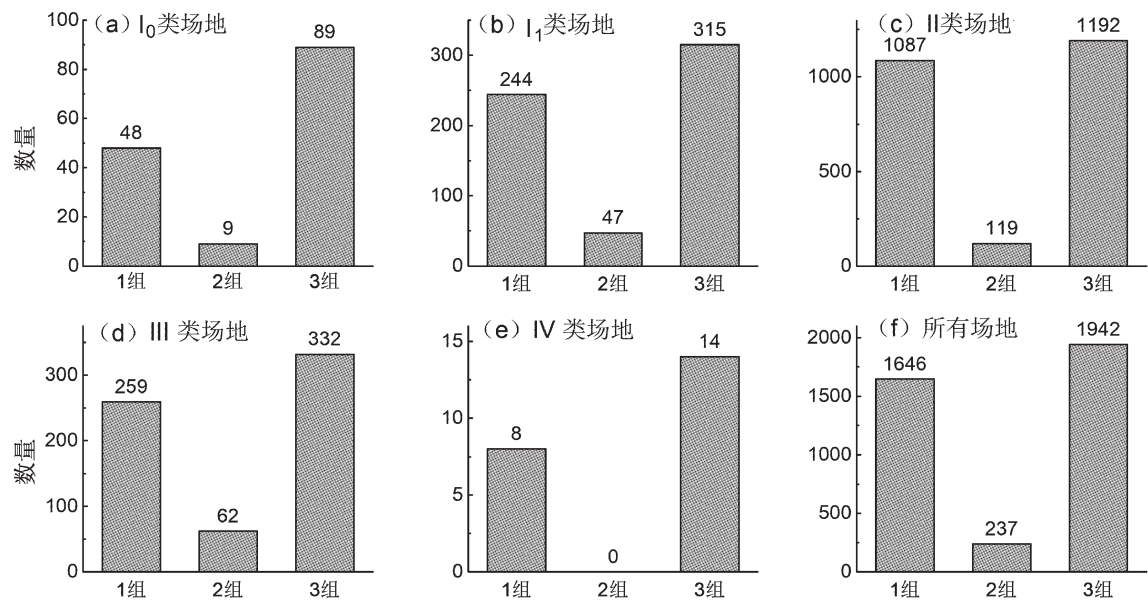


图3 罕遇地震不同场地及设计分区记录数量分布图

Fig. 3 The histograms of selected strong - motion records with site classes and design groups of sever earthquakes

表3 基本及多遇地震不同场地及设计分区记录数量

Tab. 3 The number of strong - motion records with site classes and design groups of moderate and small earthquakes

多遇	I_0	I_1	II	III	IV	合计
1区	40	206	933	234	7	1 420
2区	8	38	154	53	1	254
3区	98	362	1 311	366	14	2 151
合计	146	606	2 398	653	22	3 825

表4 罕遇地震不同场地及设计分区记录数量

Tab. 4 The number of strong - motion records with site classes and design groups of sever earthquakes

罕遇	I_0	I_1	II	III	IV	合计
1区	48	244	1 087	259	8	1 646
2区	9	47	119	62	0	237
3区	89	315	1 192	332	14	1 942
合计	146	606	2 398	653	22	3 825

(3) 放缩记录生成EPA均值目标谱。将子数据库中每一条强震动记录反应谱按目标EPA与实际记录EPA的比值进行放缩,再取平均值作为EPA均值目标谱,用于强震动记录谱匹配的目标谱。其中目标EPA值为时程分析所用地震加速度时程的最大值(表5),由抗震设防烈度确定;实际记录EPA值由频段固定法求得。

本文选取了II, II, III类场地的3个抗震设计分组(分区)共9个子数据库,每个子数据库分别建立6个抗震设防烈度即6个EPA均值目标谱。基本及多遇地震EPA均值目标谱见图4,罕遇地震EPA均值目标谱见图5。为方便查找,将目标谱按场地类别、设计分组、抗震设防烈度和地震情况进行6位阿拉伯数字编号。前2位代表场地类别,“11”代表I类场地,“20”代表II类场地,“30”

代表III类场地;第三位“1”“2”“3”分别代表设计分组1区、2区、3区;第四位“6”“7”“8”“9”代表设防烈度;第五位为“1”用于设计基本地震加速度为0.15g和0.30g的地区,其余为“0”;最后一位“0”代表基本及多遇地震,“1”代表罕遇地震。

表5 时程分析所用地震加速度时程的最大值

Tab. 5 The peak value of selected strong - motion records in time - history analysis 单位: cm/s^2

抗震设防烈度	6	7	8	9
多遇	18	35 (55)	70 (110)	140
罕遇	125	220 (310)	400 (510)	620

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

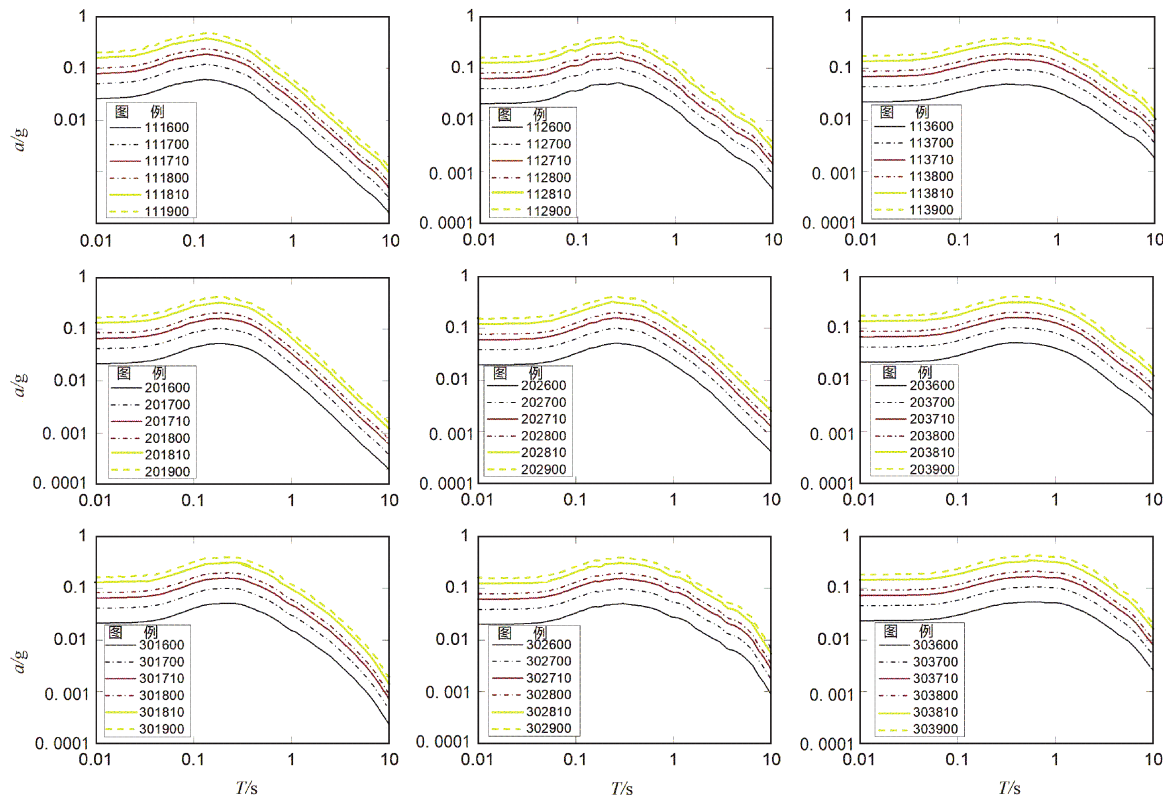


图 4 基本及多遇地震 *EPA* 均值目标谱

Fig. 4 The *EPA* mean spectrum of moderate and small earthquakes

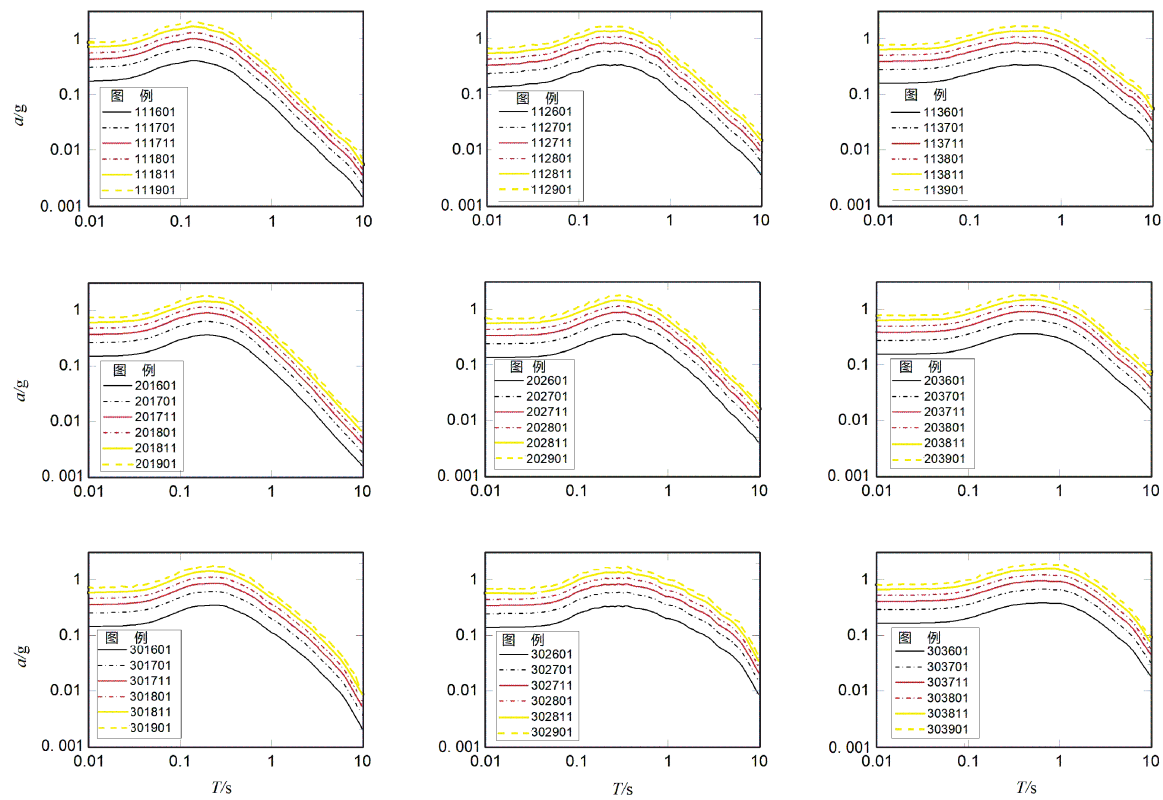


图 5 罕遇地震 *EPA* 均值目标谱

Fig. 5 The *EPA* mean spectrum of severe earthquakes

由图4和图5可见, *EPA* 均值目标谱的谱型随场地类别和设计分组变化显著。以 II 类场地为例, 分别对比基本及多遇地震、罕遇地震的规范目标

谱和 *EPA* 均值目标谱, 如图6, 7所示。由图可见, *EPA* 均值目标谱的最大值都大于规范目标谱; 各场地类型中, 按分组二者谱变化趋势一致。在

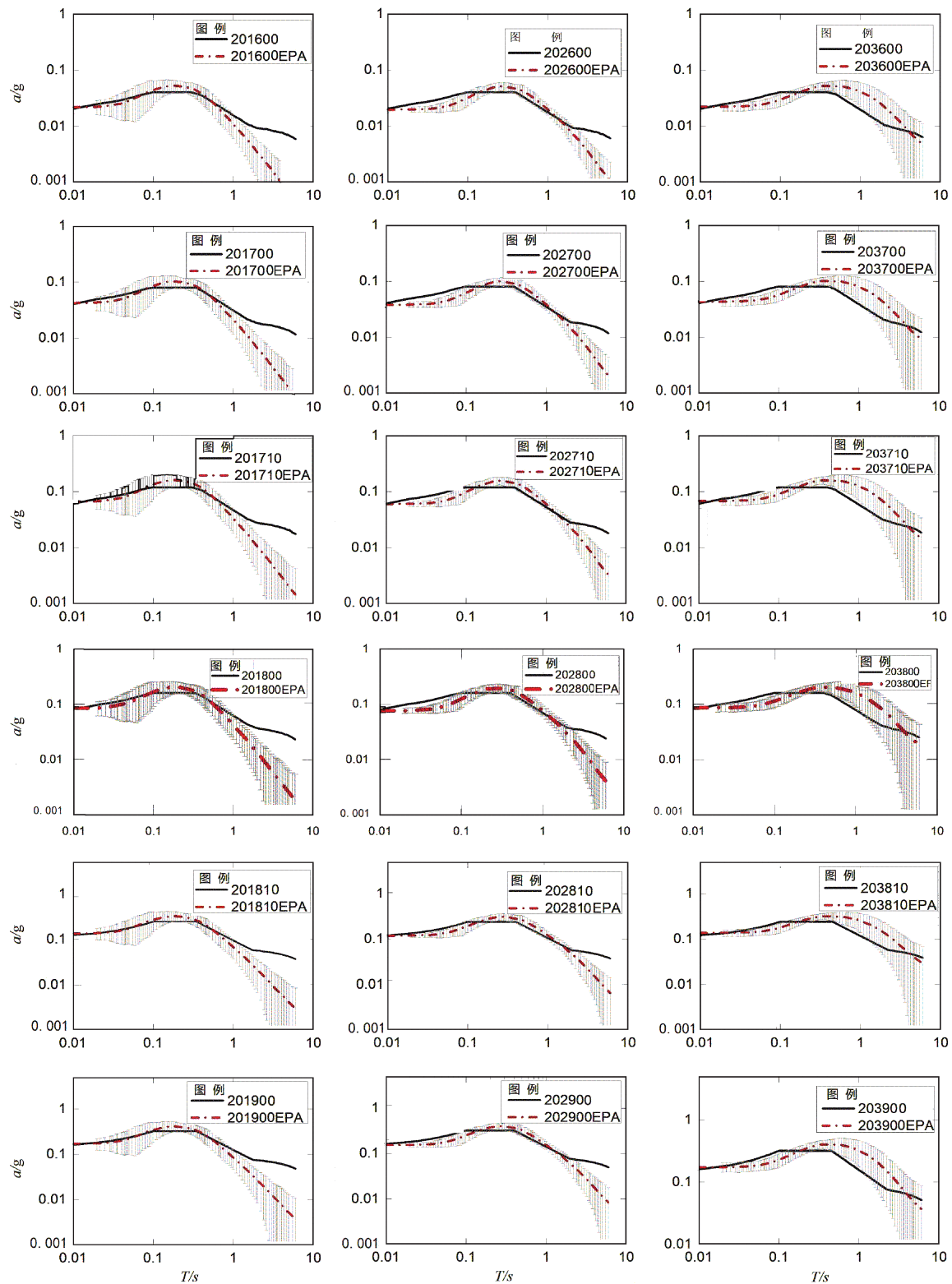


图6 基本和多遇地震 II 类场地规范目标谱和 *EPA* 均值目标谱对比图

Fig. 6 The comparison diagram between codes spectra and *EPA* spectra of moderate and small earthquakes

设计分组为 1 区的情况下, 规范目标谱与 *EPA* 均值目标谱在中长周期段差距显著, 前者大于后者, 这与规范目标谱人为提高长周期谱值有关。特别值得注意的是, 在设计分组为 3 区的情况下, 情况相反, 在中长周期段 *EPA* 均值目标谱显著大于规范目标谱。这是由于实际强震动记录反应谱特征

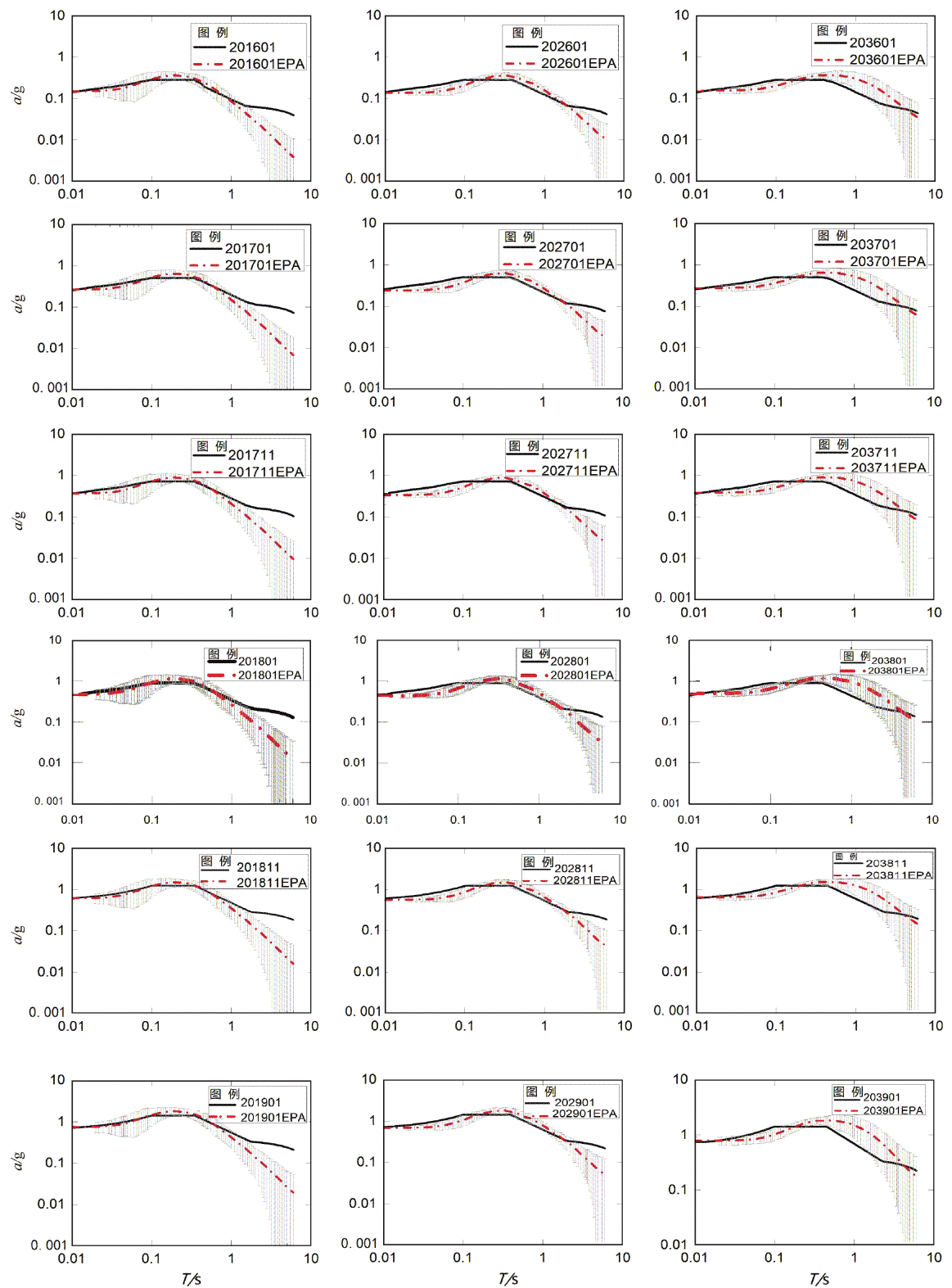


图 7 罕遇地震 II 类场地规范目标谱和 *EPA* 均值目标谱对比图

Fig. 7 The comparison diagram between codes spectra and *EPA* mean spectra of severe earthquakes

周期的分布范围较广其值更大，使反应谱曲线整体向长周期方向偏移。由此可见，当设计分组为1区时，以规范目标谱为强震动记录选取的依据将偏于安全，因此，对于设计分组为3区的情况建议提高规范中的谱值。

3 EPA 均值目标谱选波

以Ⅱ类场地为例，分别以规范目标谱和EPA均值目标谱为强震动记录选取的匹配目标在各工况进行记录选取，篇幅所限仅以6度1组多遇地震为例说明选波过程和结果。采用目标谱谱形匹配的方法选取强震动记录，选波要求选取一组记录使其均值与目标谱全周期匹配，以所选记录反应谱各周期点均值与目标谱的相对误差反应来匹配程度。强震动记录的初选条件为场地类型符合目标要求，即要求 $260\text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 510\text{ m/s}$ ，其他参数不做要求，可通过放缩系数调节反应谱增加匹配度。

以规范谱为目标选取7条记录，见图8，以EPA均值谱为目标选取相同数量记录，见图9。由图8可见，在匹配规范目标谱中，平台段和长周期段相对误差较大，超出了各周期点相对误差小于20%的要求。由图9可见，全周期段目标谱谱形匹配效果较好，基本符合各周期点相对误差小于20%的要求。为表示其它工况下的目标谱匹配结果，引用平均相对误差，用绝对值表示，即所选7条强震动记录反应谱的平均值与目标谱相对误差绝对值在各周期点的均值。该值越大说明匹配情况越差，反之匹配越好。为体现在强震动记录选取中目标谱谱型变化对匹配结果的显著影响，对各工况下匹配目标谱的平均相对误差的变化加以量化，用匹配EPA目标谱与匹配规范目标谱的平均相对误差表示，即表6、7中的“变化”。在不

同工况下该变化的最大值为71.2%，最小值为12.6%。即匹配EPA目标谱能显著降低全周期目标谱匹配相对误差，达到更好的匹配效果。多遇地震下谱型匹配规范目标谱和EPA均值目标谱的全周期段相对误差均值，见表6、7。

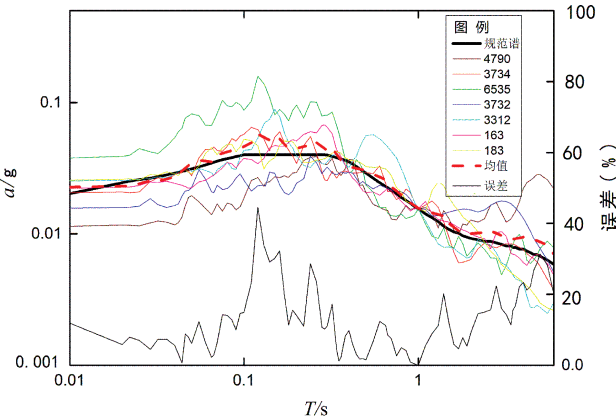


图8 匹配201600规范目标谱选取记录
Fig. 8 The selected strong - motion records and the relative error of matching the code spectrum

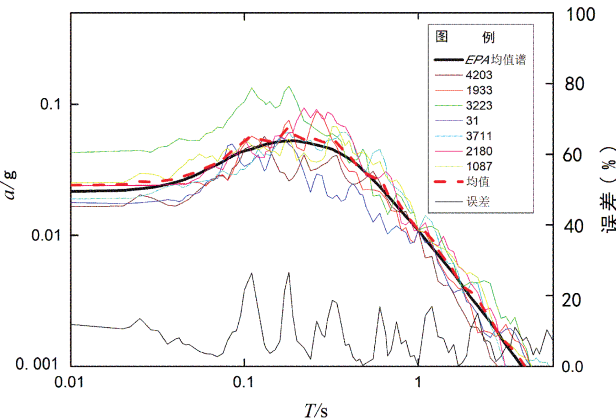


图9 匹配201600EPA均值目标谱选取记录
Fig. 9 The selected strong - motion records and the relative error of matching the EPA spectrum

表6 多遇地震谱型匹配相对误差 (%)

Tab. 6 The relative error of matching the spectrum of moderate and small earthquakes (%)																		
分组	6 度			7 度			7 度 0.15 g			8 度			8 度 0.3 g			9 度		
	规范	<i>EPA</i>	变化	规范	<i>EPA</i>	变化	规范	<i>EPA</i>	变化	规范	<i>EPA</i>	变化	规范	<i>EPA</i>	变化	规范	<i>EPA</i>	变化
1 区	12.5	8.0	-36.0	9.2	8.0	-12.6	9.4	8.0	-15.3	9.2	8.0	-13.8	14.2	8.5	-39.9	14.2	6.3	-55.5
2 区	11.7	5.5	-53.1	12.7	5.5	-57.1	15.7	5.5	-65.1	12.8	6.3	-50.7	9.8	6.6	-32.8	9.8	6.6	-32.8
3 区	8.6	3.3	-61.1	11.4	3.3	-70.8	11.5	3.3	-71.2	11.6	4.2	-64.0	10.2	5.2	-49.3	10.2	5.2	-49.3
均值	-	-	-50.1	-	-	-46.8	-	-	-50.5	-	-	-42.9	-	-	-40.7	-	-	-45.9

表 7 罕遇地震谱型匹配相对误差 (%)

Tab. 7 The relative error of matching the spectrum of sever earthquakes (%)

分组	6 度			7 度			7 度 0.15 g			8 度			8 度 0.3 g			9 度		
	规范	EPA	变化	规范	EPA	变化	规范	EPA	变化	规范	EPA	变化	规范	EPA	变化	规范	EPA	变化
1 区	12.7	7.1	-44.1	12.5	5.2	-58.7	12.5	7.7	-38.3	14.0	5.7	-59.3	9.5	6.6	-30.4	10.2	5.9	-42.5
2 区	11.7	4.6	-61.1	11.6	6.7	-42.6	11.7	7.2	-38.0	11.6	7.2	-37.7	9.0	6.1	-31.6	9.8	6.6	-32.9
3 区	9.1	5.0	-45.5	14.3	4.4	-69.4	9.9	4.0	-59.7	10.0	4.8	-51.7	10.2	6.7	-34.8	9.1	6.3	-30.8
均值	—	—	-50.2	—	—	-56.9	—	—	-45.3	—	—	-49.6	—	—	-32.3	—	—	-35.4

4 结论

本文的主要目的是解决规范中目标谱谱形与实际观测记录不符的问题，并给出合理的物理解释。得出的主要结论如下：

(1) 基于强震动记录数据库，结合《中国地震动参数区划图》和《建筑抗震设计规范》，提出了 EPA 均值谱的概念。EPA 均值目标谱是直接通过现有强震动记录反应谱建立的符合场地类别和特征周期分区的一种均值目标谱。

(2) 将 EPA 均值目标谱作为强震动记录谱形匹配的目标谱应用于选波，并与规范目标谱谱型匹配结果比较，可减少 50% 左右的匹配误差，显著地提高了全周期谱型匹配的强震动记录选取记录均值与目标谱的匹配程度，达到满足规范对强震动记录谱型匹配的要求。另外，随着强震动记录的增加，EPA 均值目标谱将不断地加以调整和改善。

参考文献：

高孟潭. 2015. GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材 [M]. 北京:中国质检出版社.

冀昆,温瑞智,任叶飞. 2017. 适用于我国抗震设计规范的天然强震

记录选取[J]. 建筑结构学报,38(12):57-67.

冀昆. 2014. 基于 H/V 谱比法的场地特征分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

李琳,温瑞智,冀昆. 2016. 强震动记录选取的目标谱确定方法[J]. 世界地震工程,32(1):188-194.

刘文锋,付兴潘,于振兴,等. 2009. 反应谱特征周期的统计分析[J]. 青岛理工大学学报,30(5):1-7.

卢啸,陆新征,叶列平,等. 2014. 适用于超高层建筑的改进地震动强度指标[J]. 建筑结构学报,35(2):15-21.

吕红山,赵凤新. 2007. 适用于中国场地分类的地震动反应放大系数[J]. 地震学报,29(1):67-76.

曲哲,叶列平,潘鹏. 2011. 建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究[J]. 土木工程学报,44(7):10-21.

任叶飞,张颖楚,冀昆,等. 2018. 全国省会城市建筑结构时程分析推荐地震动输入[J]. 建筑结构,48(增刊2):284-290.

杨溥,李英民. 2000. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报,33(6):33-37.

张颖楚,温瑞智,冀昆. 2017. 基于第五代地震动区划图的强震动记录选取方法[J]. 工程抗震与加固改造,39(增刊1):29-33.

Hancock J, Bommer J J. 2006. A state-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage[J]. Earthquake Spectra,22(3):827-845.

Iervolino I, Manfredi G, Cosenza E. 2006. Ground motion duration effects on nonlinear seismic response[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,35(1):21-38.

GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S].

GB 50011—2010,建筑抗震设计规范(2016 版)[S].

The *EPA* Mean Spectrum for the Selection of the Strong Ground Motion Records

LI Lin¹, REN Yefei², WEN Ruizhi², JI Kun²

(1. Key Laboratory of Underground Engineering Technology of Heilongjiang Province, Harbin University, Harbin 150086, Heilongjiang, China)

(2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

The strong – motion records selection has a lot of influence on the analysis result of the earthquake resistant design, and has been become a hot issue in the field of earthquake engineering. On the selection of strong – motion records, details of the provisions codes are sketchy in the current seismicity, and then they are hardly carried out. Firstly, the concept of the *EPA* mean spectrum is proposed on the basis of strong – motion recordings database for the selection, combined with seismic zoning map. The shape of the *EPA* mean spectrum reflects the influence of site effect. Compared with the target design spectrum in the code, it's more reasonable and close to real records spectrum. Then, the selection results show that the matching degree has improved significantly, using the *EPA* mean spectrum as the target. The results using *EPA* mean spectrum would satisfy the regulation that the matching degree is less than 20% during the selection. Finally, the method of the *EPA* mean spectrum provide an innovative approach for the seismic design ground motion selection.

Keywords: target spectrum; strong – motion records selection; the *EPA* mean spectrum