

DOI:10.11918/202001083

中美抗震规范地震记录选取比较

徐朝阳^{1,2}, 温瑞智^{1,2}, 任叶飞^{1,2}, 冀 昆^{1,2}, 王宏伟^{1,2}, 徐培彬^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080;
2. 地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080)

摘 要: 为研究国内外强震动记录选取方案存在的差异,以中国建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)和美国建筑与其他结构的最小设计荷载和相关标准(ASCE/SEI 7-16)为例,对比其记录选取结果和结构响应的差异. 本文通过设计谱参数转换,在中国同一设防水准的两个工况下分别按照两国规范的方法进行地震动记录选取,并分别输入到 4 层和 12 层混凝土框架结构中,对层间位移角和层间剪力进行了对比. 结果表明:中国规范基于单一方向选取和调幅,可能导致另一方向的地震动与目标谱匹配度不高,计算结果离散度偏大;美国规范采用最大方向谱选取,具有更明确的物理意义;此外,中国规范仅规定了记录反应谱的相对误差,而美国规范规定了反应谱的下限. 虽然中国做法避免了结果的保守,但是可能导致一条或几条记录与目标谱差距过大,容易造成结果存在离散性不可控;建议结合二者的优点,在控制相对误差的同时,也引入下限限制的遴选机制.

关键词: 记录选取; 美国规范; 中国规范; 记录调幅; 谱匹配

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)10-0061-10

Comparison of ground motion selection in seismic design codes between China and United States

XU Zhaoyang^{1,2}, WEN Ruizhi^{1,2}, REN Yefei^{1,2}, JI Kun^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, XU Peibin^{1,2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;
2. Key Lab of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration
(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China)

Abstract: In order to study the differences in ground motion selection schemes at home and abroad, code for seismic design of buildings (GB 50011—2010) and minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16) were taken as examples, and the corresponding selection results were compared. Through the conversion of design spectrum parameters, ground motion records were selected at the same seismic fortification level under two working conditions according to the methods in two codes, which were then used as dynamic time history input for 4-story and 12-story concrete frame structures to compare the story displacement angle and story shear force. Results show that the selection and amplitude scaling based on a single direction according to the Chinese seismic code may result in a low matching degree in the other direction and a large dispersion of the calculation results. The American seismic code adopts the maximum direction spectrum, which has clearer physical meaning. In addition, the Chinese code only specifies the relative error of the recorded response spectrum, while the American code specifies the lower limit of the spectrum. Although the Chinese code avoids the conservativeness of the results, it may lead to significant disparities between one or more records and the target spectrum, which may cause the dispersion of the results to be uncontrollable. Hence, it is suggested to combine the advantages of the two methods to control the relative error and the lower error limit.

Keywords: ground motion selection; American code; Chinese code; record amplitude scaling; spectral matching

随着中国强震动记录的积累和结构弹塑性时程

分析的普及,相关工程设计人员对强震动记录的选择工作逐渐重视. 虽然面向抗震规范的地震动记录选取基本思路与流程是基本一致的,即记录初选、确定目标谱及记录放缩与匹配 3 个基本步骤,但不同国家抗震规范中的记录选取方案之间存在较大差异^[1]. 中国 GB 50011—2010 建筑抗震设计规范^[2] (以下简称中国规范)仅明确规定了加速度时程的

收稿日期: 2020-01-16
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500802);
国家自然科学基金(51908518);
黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2019E036)
作者简介: 徐朝阳(1991—),男,博士研究生;
温瑞智(1968—),男,研究员,博士生导师
通信作者: 温瑞智,ruizhi@iem.ac.cn

最大值,而初选条件、匹配周期等并没有明确规定.作为初选条件的地震动影响参数范围(震级和距离)在中国规范规定相对模糊,国内学者从不同角度提出了地震动记录的选取方案,例如冀昆等^[3]提出的地震动全周期匹配法、杨浦等^[4]提出的局部周期段匹配法以及陈波等^[5]研究的双频段周期匹配法等.除匹配方法外,李爽等^[6]和吕大刚等^[7]认为目标谱的谱形也会对记录的选取结果产生较大影响.

美国建筑与其他结构的最小设计荷载和相关标准 ASCE/SEI 7-16^[8](以下简称美国规范)相较于中国规范,甚至美国之前的 ASCE/SEI 7-10 版本规范都做了全面修订,包括更多的记录选取数量,新的双向反应谱输入方案,更完备的近场地震动选择依据等.和美国规范相比,中国规范并没有明确对记录初选条件,即地震动影响参数范围(震级和距离)明确规定,目标谱匹配周期也较为宽松,采用平均反应谱与目标谱相对误差来判断选波结果,并没有定义下限值.对于三维地震动输入方面的规定也仅有幅值比例要求.

针对以上差异,为了系统性地对国内外抗震规范下的记录选取方法进行对比,本文通过目标谱转换,在同一设防水准下分别按照两国规范的方法进行地震动记录选取,并分别输入到 4 层和 12 层框架结构中进行对比.

1 结构模型参数

本文计算所依据的结构为不同层数的两个三维混凝土框架模型,依据中国规范的设防烈度设计配筋.模型 1 为 4 层框架结构,层高均为 3.6 m, x 方向跨度为 8 m,共 5 跨, y 方向跨度为 6 m,共 3 跨,采用 C30 混凝土,钢筋采用 HPB300 和 HRB335;模型 2 为 12 层框架结构,1 层为 5.7 m,2 层为 4.2 m,其余均为 3.3 m, x 、 y 方向跨度均为 8 m,共 5 跨,采用 C40 混凝土,钢筋采用 HRB335,表 1 给出了相关结构参数,两个框架结构的一阶自振周期分别为 0.61 s 和 1.96 s.

表 1 结构模型构件截面尺寸参数

Tab. 1 Members section size parameters for structural models				
结构	楼层	截面规格/mm		
		柱	梁	板
4 层框架	1~4	700×700	700×300	120
	1~2	600×600	650×250	120
12 层框架	3~4	550×550	650×250	120
	5~8	500×500	650×250	120
	9~12	400×400	650×250	120

2 中国抗震规范地震动记录选取

2.1 记录初选与调幅

本文随机选用了两种工况:罕遇地震设防烈度 7 度(0.15 g)、场地类别 II 类、设计地震分组第二组(工况 1),和罕遇地震设防烈度 8 度(0.20 g)、场地类别 I₁类、设计地震分组第三组(工况 2),进行地震动记录的选取.

记录选取前首先对地震动和场地参数范围进行初选,冀昆等^[9-10]依据不同的震级、震中距范围和场地条件确定了初选条件.但为保证足够的初选记录数量,初选震级 M_w 定为 5.5~8 级,场地条件由 V_{S30} 的范围确定,从美国太平洋地震研究中心(PEER)数据库中初选了 330 条记录.本节采用保持反应谱谱形不变的线性调幅,调幅目标谱是规范设计谱,调幅系数是由满足规范目标峰值加速度 A_{PG} 的条件下确定.

2.2 反应谱匹配

中国规范在记录选取时,满足“多组时程波的平均地震影响系数曲线与振型分解反应谱法所用的地震影响系数曲线相比,在对应于结构主要振型的周期点上相差不大于 20%”的条件.目前国内关于地震动记录匹配的方法有很多,本节采用优化权重最小二乘匹配方法,该方法是全周期最小二乘法的优化,改进了全周期匹配表现差周期段的缺点,用此方法的优势是同种工况可采用同一组选波结果,大大减小了工作量.虽然中国规范要求了中国对于水平两个方向地震动记录幅值比例为 1:0.85,但是本文没有事后对其进行专门的幅值调整,而是尊重了地震动的本来特性,选取时仅对记录的某个水平方向分量进行匹配,另一个分量采用与该分量相同的调幅系数^[11].最后选出 5 条天然地震动记录,而 2 条人造地震动由 Seismomatch 软件完成,地震信息见表 2.选出的 7 条地震动反应谱及其均值谱与目标谱比值见图 1.由图 1 可知,选出的地震动在结构主要振型周期点上满足与目标谱相差 20% 的条件,且谱形与目标谱相似.

3 美国抗震规范中地震动记录选取

由于中美规范在地震动参数的定义上有较大差异,导致二者无法直接对比分析.因此在进行基于美国抗震规范的记录选取工作之前,首先应先进行中美元标谱的地震动参数转换.

3.1 地震动参数转换

中国规范采用了三设防水准,即多遇地震、设防地震和罕遇地震,其 50 a 超越概率分别对应 63.2%、

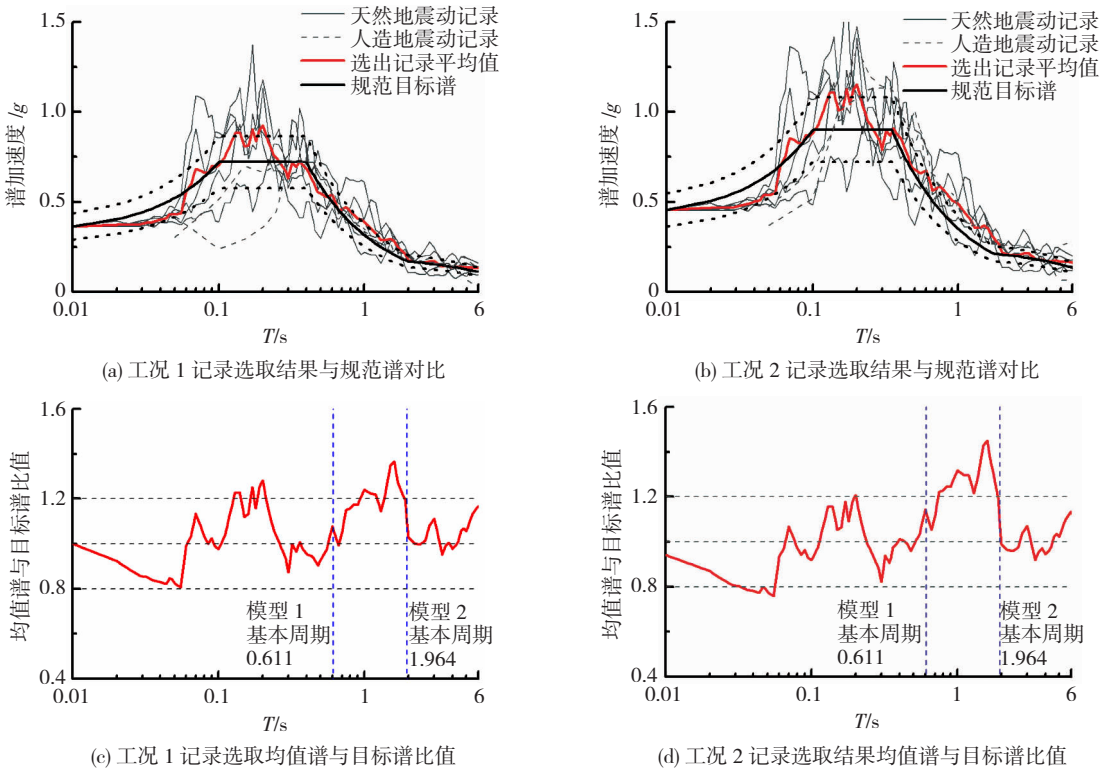


图 1 中国规范方法选出的地震动及其均值谱与目标谱比值

Fig. 1 Ground motion selected by Chinese code and the ratio of mean spectrum to target spectrum

表 2 中国规范选出的地震动信息

Tab. 2 Seismic information selected by Chinese code					
地震事件	M_w	记录名称	$V_{S30}/(m \cdot s^{-1})$	震源距/km	调幅系数
工况 1	Loma Prieta	LOMAP\HYN064. AT2	735. 440	75. 240	7. 301
		LOMAP\HYN334. AT2			
	Kocaeli, Turkey	KOCAELI\MSK000. AT2	445. 660	92. 140	8. 226
		KOCAELI\MSK090. AT2			
	Landers	LANDERS\BRS000. AT2	370. 080	95. 020	2. 729
		LANDERS\BRS090. AT2			
	Kocaeli, Turkey	KOCAELI\IST090. AT2	595. 200	90. 540	8. 116
		KOCAELI\IST180. AT2			
	Denali, Alaska	DENALI\PS11 - 66. AT2	376. 100	190. 300	5. 064
		DENALI\PS11336. AT2			
工况 2	Hector Mine	HECTOR\JGB022. AT2	525. 790	207. 930	—
		HECTOR\JGB112. AT2			
	Loma Prieta	LOMAP\BVC220. AT2	391. 010	75. 700	—
		LOMAP\BVC310. AT2			
	Denali, Alaska	DENALI\PS11 - 66. AT2	376. 100	190. 300	6. 330
		DENALI\PS11336. AT2			
	Hector Mine	HECTOR\HBS090. AT2	624. 940	70. 670	5. 941
		HECTOR\HBS180. AT2			
	Kocaeli, Turkey	KOCAELI\MSK000. AT2	445. 660	92. 140	10. 283
		KOCAELI\MSK090. AT2			
工况 2	Hector Mine	HECTOR\29P090. AT2	635. 010	69. 960	6. 814
		HECTOR\29P360. AT2			
	Hector Mine	HECTOR\JTN090. AT2	686. 120	76. 820	5. 717
		HECTOR\JTN180. AT2			
	Morgan Hill	MORGAN\SJL270. AT2	543. 630	58. 360	—
		MORGAN\SJL360. AT2			
工况 2	Hector Mine	HECTOR\RIV090. AT2	389. 950	131. 180	—
		HECTOR\RIV360. AT2			

注:调幅系数为“—”表示此记录为半人造地震动.

10% 和 2% ~ 3% ;而美国规范仅仅采用了单设防水准,即基于目标风险的最大考虑地震 (MCE_R),其 50 a 超越概率为 2%,因此张桂铭等^[12]和吴桂芳^[13]认为 MCE_R 与罕遇地震位于同一设防水准.而本文为保证地震动参数的准确对应,参照罗开海等^[14]的思路,将罕遇地震分为 4 个等级,即 50 a 超越概率分别为 3%、2.67%、2.33% 和 2%,分别对应中国烈度的 6 度区、7 度区、8 度区和 9 度区中的罕遇地震,中国规范给出的 50 a 超越概率地面运动峰值加速度见表 3.

表 3 GB 50011—2010 规定的地震地面运动峰值加速度

Tab. 3 Peak acceleration of seismic ground motion specified in GB 50011—2010

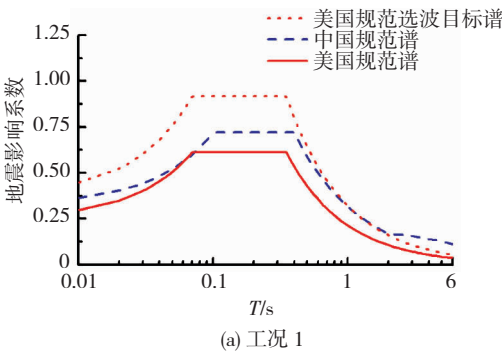
50 a 超越概 率/%	峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)					
	6 度 (0.05 g)	7 度 (0.10 g)	7 度 (0.15 g)	8 度 (0.20 g)	8 度 (0.30 g)	9 度 (0.40 g)
63.20	18	35	55	70	110	140
10.00	50	100	150	200	300	400
3.00	125	—	—	—	—	—
2.67	—	220	310	—	—	—
2.33	—	—	—	400	510	—
2.00	—	—	—	—	—	620

在场地分类上,中国规范按照土层等效剪切波速和场地覆盖层厚度,将建筑的场地类别分为五类(其中 I 类分为 I_0 和 I_1 两个亚类);而美国规范仅仅依赖 V_{s30} 对场地进行分类. Lü 等^[15]比较了中美场地分类方法,利用 V_{s20} 与 V_{s30} 的转换,将中国规范的五类场地与美国的五类场地进行对照.陶林惠等^[16]更详细的将场地分类列成表格.本文将延用以上学者的场地分类对照,对地震动记录进行选取.

根据中国规范规定的基本地震烈度和地震分组,按照罗开海等^[14]的参数转换思路,将美国规范的地震动参数由式(1)、(2)确定:

$$S_s = 2.5\gamma_{CN}A_{CC}/F_a,$$

$$S_1 = 2.5\gamma_{CN}T_gA_{CC}/F_v.$$



式中: S_s 、 S_1 分别为最大考虑地震下 (MCE_R), B 类场地短周期和 1 s 周期的谱加速度, F_a 和 F_v 分别为与中国规范 II 类场地相对应的某类场地的调整系数, A_{CC} 为中国规范与基本烈度相对应的基本地面运动峰值加速度, T_g 为中国规范与地震分组相对应的特征周期, γ_{CN} 为重现期调整系数.

中国规范依据震级和震中距划分了 3 个地震分组,为充分考虑此方面的不同,在进行地震动参数转换时,应依据中国规范不同烈度分区、不同场地、不同地震分组分别进行计算,最终求得美国规范对应的地震动参数值,表 4 列出本文两种工况的地震动转换参数.

表 4 中美地震动参数转换表

Tab. 4 Conversion table of ground motion parameters between Chinese and American Codes

场地 类别	参数 名称	I ₁		场地 类别	II	
		7 度 (0.15 g)	8 度 (0.20 g)		7 度 (0.15 g)	8 度 (0.20 g)
B	S_s	1.018	1.193	C	0.764	0.895
	$S_1(1)$	0.286	0.336		0.214	0.251
	$S_1(2)$	0.344	0.403		0.244	0.286
	$S_1(3)$	0.401	0.470		0.275	0.322
C	S_s	0.764	0.895	D	0.768	0.962
	$S_1(1)$	0.153	0.179		0.138	0.166
	$S_1(2)$	0.183	0.215		0.162	0.195
	$S_1(3)$	0.214	0.251		0.186	0.225

注: S_1 括号内的数字代表设计地震分组.

因此针对本文中的两种工况,分别将中国规范的参数转换为美国规范的参数,其中工况 1 将场地对应于 C 类,工况 2 也将场地对应于 C 类.图 2 给出了两种工况下中美规范谱的对比,可见同种工况下,中国规范的规范谱要大于美国规范的规范谱.对于记录选取依据的目标谱,美国规范规定地震动记录选取时,目标谱值为规范设计谱值的 1.5 倍,经对比,在本文两种工况下,美国规范的目标谱在 0.5 s 到 2.0 s 周期段基本与中国规范目标谱一致.这也是本文所选取框架结构的自振周期所在范围.

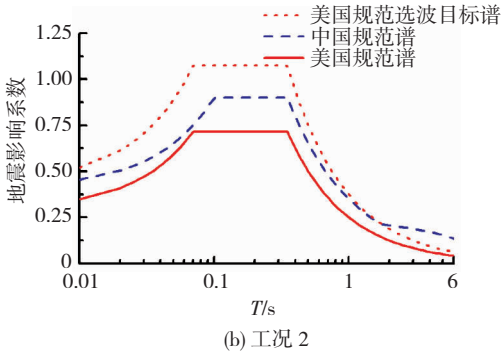


图 2 中美规范谱对比

Fig. 2 Comparison of design spectrum between Chinese code and American code

3.2 记录调幅与匹配

不同于中国规范,美国规范的初选条件更加明确,为保证选取结果的可比性,本文选用与中国规范相同的初选记录库,同时选用与中国规范相同的线性调幅.在调幅时对地震动记录的最大方向谱进行放缩,而不是某一观测方向的记录,其中最大方向谱为 Boore 等^[17]提出的与观测仪器布设方向无关的用来表征两正交水平向地震动的 100 分位数强度指标,其值参照式(3),即两正交水平向的强震动记录时程在 0°至 180°范围内每旋转 θ 角度后,计算相应的反应谱值,并对不同周期 T_i 的不同 θ 条件下对应的值取 100 分位数.

$$A_{\text{CCROT}}(t,\theta) = A_{\text{CC1}}(t,\theta) \times \cos(\theta) + A_{\text{CC2}}(t,\theta) \times \sin(t,\theta), \tag{3}$$

式中: A_{CCROT} 为旋转后的加速度时程, A_{CC1} 和 A_{CC2} 分别为两观测方向的加速度时程, θ 为旋转角度, t 为时刻.

美国规范规定经过放缩后的地震动,其最大方

向谱的均值在目标周期内不小于 90%.其中目标周期段为 $0.2T$ 和 T_{MIN} 中的较小值到 $2.0T$ 之间,其中 T_{MIN} 表示质量参与系数为 90%时的周期, T 表示结构基本周期.两框架结构的目标周期分别为 $0.12 \sim 1.3 \text{ s}$ 和 $0.38 \sim 4.0 \text{ s}$.通过最小二乘周期段匹配法,对目标周期段进行误差排序得到天然地震动的选取结果.

对于美国规范人造地震动的生成,同样采用 Atik 等^[18]提出的 RspMatch2010 方法,对调幅后的两水平正交分量地震动记录进行修正,使得在目标周期内,人造地震动的最大方向谱平均值不小于目标谱值的 110%,并依据要求排除了近断层地震动.虽然美国规范要求选取不少于 11 条地震动作为结构的输入,且对于天然和人造地震动比例的选择并没有进行严格的规定,但为保证与中国规范对比的一致性,本文依然选取了 7 条地震动,选取天然记录和人造记录的比例也定为 5:2.最终依据美国规范选出的 7 条地震动见图 3,地震信息见表 5.

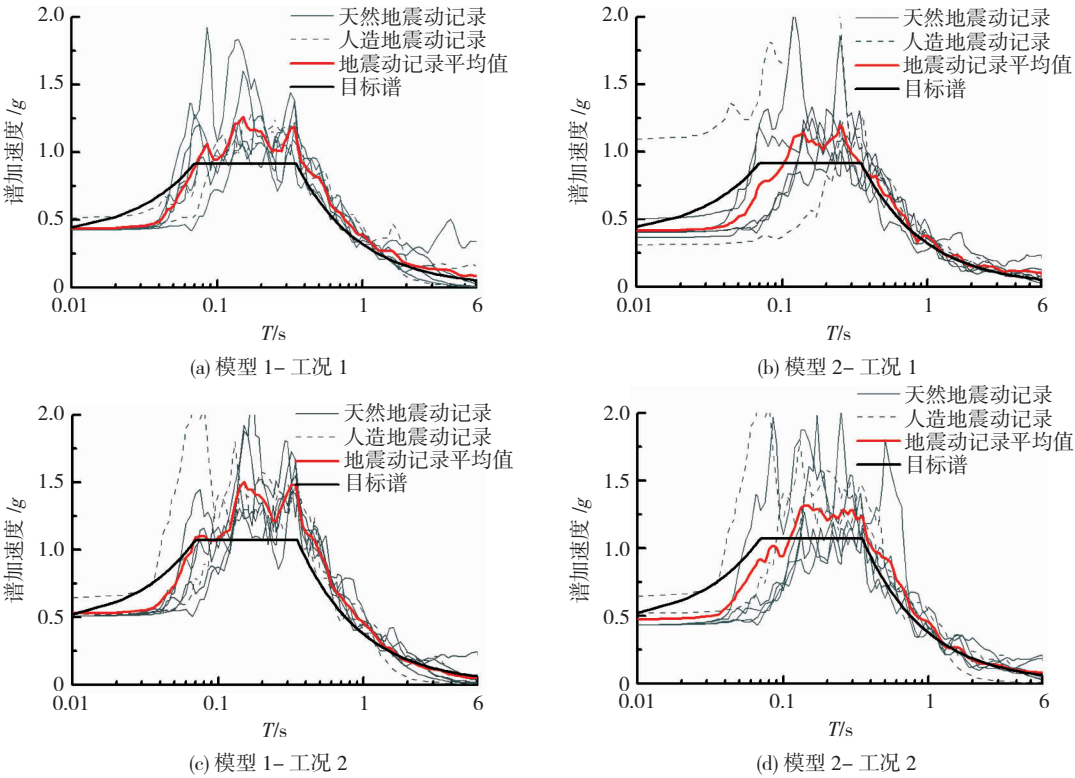


图 3 美国规范选出地震动
Fig. 3 Ground motions selected by American code

4 选取结果比较

通过上述步骤,依据中美抗震规范选取工况 1、2 下适用于模型 1 和模型 2 的地震动记录.然后分别将选取结果双向输入到两个结构模型中进行弹塑性时程分析,计算并对比结构的层间位移角和层间剪力.

4.1 中美目标谱下的记录结果对比

本节的相同地震条件指,选用第 1 节中的两种工况,分别用两种规范下的选波结果作为地震动输入分别对 4 层和 12 层框架结构进行双向输入,计算得到两模型在两种工况下的层间位移角和层间剪力,见图 4、5.

表 5 美国规范选出的地震动信息
Tab.5 Information of ground motion selected by American code

地震事件		M_w	记录名称	$V_{S30}/(m \cdot s^{-1})$	震源距/km	调幅系数
模型 1 工况 1	Mammoth Lakes-02	5.7	MAMMOTH.J\J-CVK090. AT2	382.120	16.430	2.367
			MAMMOTH.J\J-CVK180. AT2			
	Chi-Chi, Taiwan-04	6.2	CHICHI.04\CHY087N. AT2	505.200	42.930	4.245
			CHICHI.04\CHY087E. AT2			
	Denali, Alaska	7.9	DENALI\PS09-13. AT2	382.500	93.200	5.359
			DENALI\PS09103. AT2			
	Manjil, Iran	7.4	MANJIL\ABBAR-L. AT2	723.950	40.430	0.742
			MANJIL\ABBAR-T. AT2			
模型 2 工况 1	Mammoth Lakes-03	5.9	MAMMOTH. AH\A-CVK090. AT2	382.130	17.050	1.679
			MAMMOTH. AH\A-CVK180. AT2			
	Livermore-02	5.4	LIVERMOR\B-LMO265. AT2	550.880	17.800	—
			LIVERMOR\B-LMO355. AT2			
	Hector Mine	7.1	HECTOR\BBL016. AT2	406.700	70.060	—
			HECTOR\BBL106. AT2			
	Hector Mine	7.1	HECTOR\HBS090. AT2	624.940	70.670	3.737
			HECTOR\HBS180. AT2			
模型 1 工况 2	Chi-Chi, Taiwan-04	6.2	CHICHI.04\CHY087N. AT2	505.200	42.930	4.031
			CHICHI.04\CHY087E. AT2			
	Hector Mine	7.1	HECTOR\29P090. AT2	635.010	69.960	5.576
			HECTOR\29P360. AT2			
	Denali, Alaska	7.9	DENALI\PS11-66. AT2	376.100	190.300	5.422
			DENALI\PS11336. AT2			
	Hector Mine	7.1	HECTOR\JTN090. AT2	686.120	76.820	4.423
			HECTOR\JTN180. AT2			
模型 2 工况 2	Livermore-02	5.4	LIVERMOR\B-LMO265. AT2	550.880	17.800	—
			LIVERMOR\B-LMO355. AT2			
	Hector Mine	7.1	HECTOR\BBL016. AT2	406.700	70.060	—
			HECTOR\BBL106. AT2			
	Hector Mine	7.1	HECTOR\MCR180. AT2	387.120	93.270	8.223
			HECTOR\MCR270. AT2			
	Mammoth Lakes-02	5.7	MAMMOTH.J\J-CVK090. AT2	382.120	16.430	2.842
			MAMMOTH.J\J-CVK180. AT2			
模型 1 工况 2	Chalfant Valley-02	6.2	CHALFANT.A\A-CVK000. AT2	382.120	36.630	7.060
			CHALFANT.A\A-CVK090. AT2			
	Mammoth Lakes-03	5.9	MAMMOTH. AH\A-CVK090. AT2	382.130	17.050	2.017
			MAMMOTH. AH\A-CVK180. AT2			
	Chi-Chi, Taiwan-04	6.2	CHICHI.04\CHY087N. AT2	505.200	42.930	5.098
			CHICHI.04\CHY087E. AT2			
	Landers	7.3	LANDERS\TUJ262. AT2	550.110	165.010	—
			LANDERS\TUJ352. AT2			
模型 2 工况 2	Livermore-01	5.8	LIVERMOR\A-STP093. AT2	650.050	57.380	—
			LIVERMOR\A-STP183. AT2			
	Hector Mine	7.1	HECTOR\MCR180. AT2	387.120	93.270	7.014
			HECTOR\MCR270. AT2			
	Manjil, Iran	7.4	MANJIL\ABBAR-L. AT2	723.950	40.430	0.760
			MANJIL\ABBAR-T. AT2			
	Chi-Chi, Taiwan-04	6.2	CHICHI.04\CHY087N. AT2	505.200	42.930	4.349
			CHICHI.04\CHY087E. AT2			
模型 2 工况 2	Hector Mine	7.1	HECTOR\FFP180. AT2	436.140	84.010	5.647
			HECTOR\FFP270. AT2			
	Hector Mine	7.1	HECTOR\JTN090. AT2	686.120	76.820	4.772
			HECTOR\JTN180. AT2			
	Landers	7.3	LANDERS\TUJ262. AT2	550.110	165.010	—
			LANDERS\TUJ352. AT2			
	Livermore-01	5.8	LIVERMOR\A-STP093. AT2	650.050	57.380	—
			LIVERMOR\A-STP183. AT2			

注:调幅系数为“—”表示此记录为半人造地震动.

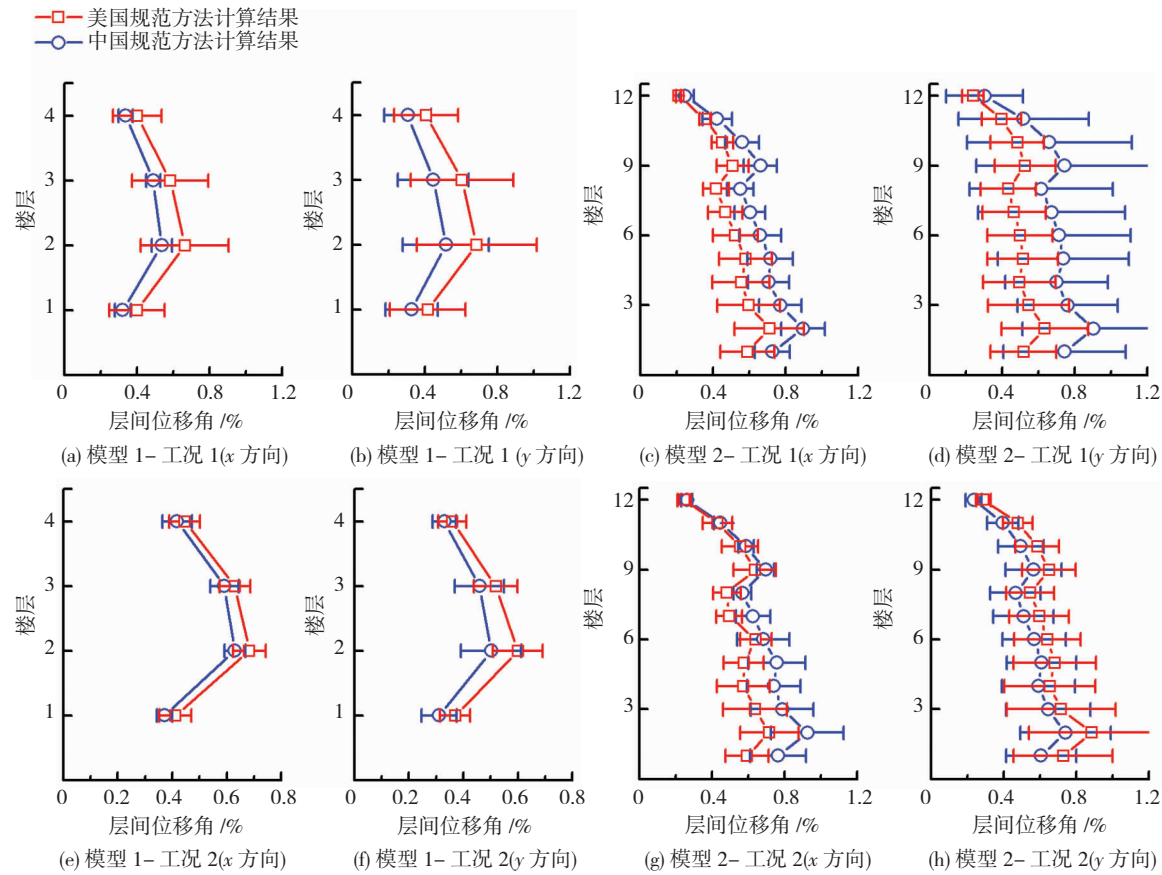


图 4 中美目标谱下层间位移角计算结果对比

Fig. 4 Comparison of story drifts between Chinese and American Target Spectrums

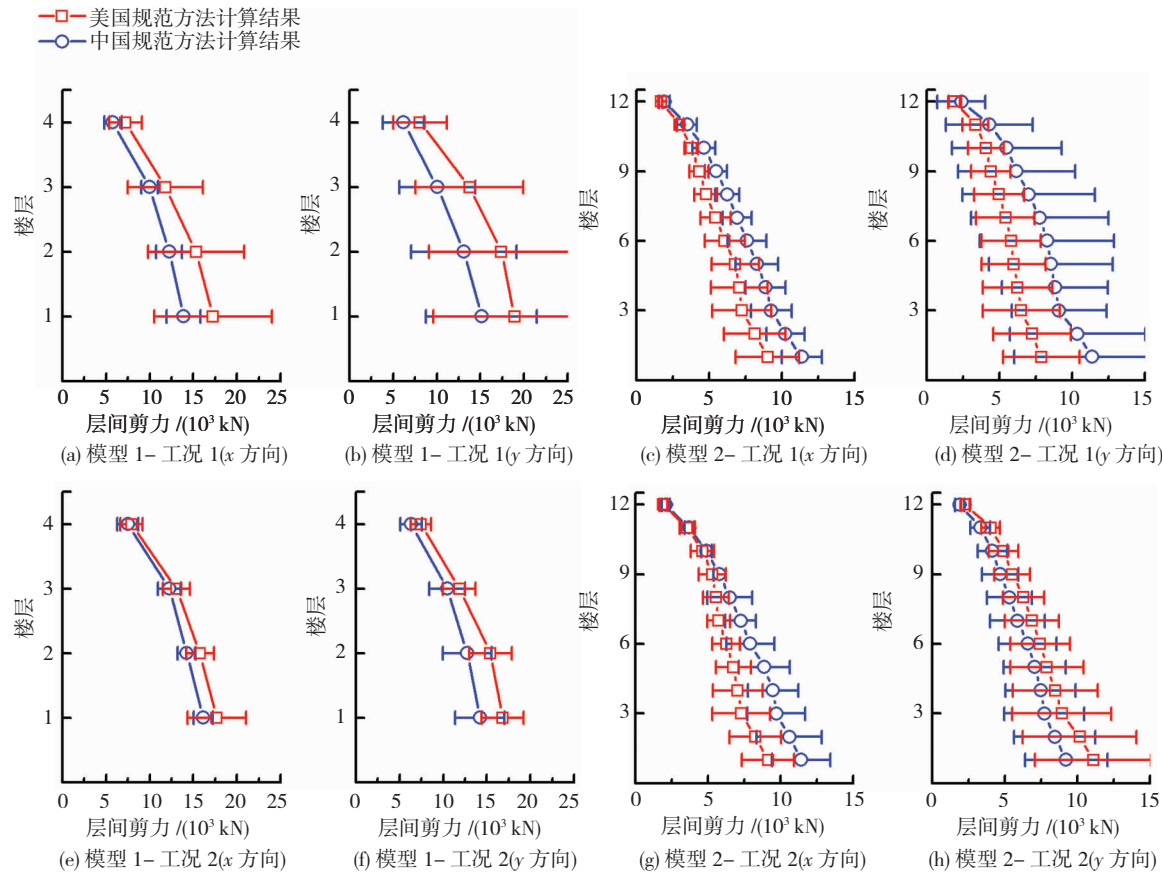


图 5 中美目标谱下底部剪力计算结果对比

Fig. 5 Comparison of story forces between Chinese and American Target Spectrums

由对比结果可知,在两种工况下,模型 1 采用美国规范选取记录得到的层间位移角和层间剪力的平均值和标准差均大于中国规范. 作为受一阶振型控制的模型 1,虽然中美规范在一阶周期处的目标反应谱值差别不大,但是从图 3 的记录选取结果来看,美国规范目标谱选波结果的平均反应谱结果均高于目标谱,这主要是由于选波时中国规范仅规定了记录反应谱的相对误差,而美国规范规定了下限,在实际记录选取操作中一般要保证最后平均谱的结果不低于目标谱,这种做法避免了结果的保守,但是可能导致选出的一条或几条记录与目标谱差距过大,这也是造成最后结果存在离散性差异的原因. 模型 2 由于并不单纯受自振周期控制,因此得到的中、美规范下的层间位移角和底部剪力平均值之间没有明显的大小规律. 由于中国规范选波时只考虑了某个方向的反应谱匹配(即本文的 x 方向),未考虑 y 方向,从而导致 y 方向的中国规范记录选取结果可能会离

散性较大,如模型 2 - 工况 1 所示.

4.2 中美匹配方法下的记录结果对比

由于目标谱对选波结果的影响较大,因此为排除不同目标谱的结果差异性,现将两种方法目标谱统一,即均采用中国规范目标谱,分别按 2、3 节的方法选取地震动,再次比较两种方法的计算结果,见图 6、7.

图 6 和 7 中表明,当二者统一目标谱后,模型 1 中的层间位移角和底部剪力的平均值基本相同,目标谱不同导致的结果差异性消失;而美国规范的标准差依然大于中国. 模型 2 中除工况 2 的 y 方向,美国规范的层间位移角和底部剪力的平均值依然小于中国,说明美国规范选出的记录与目标谱匹配度高于中国; x 方向中国规范的标准差小于美国, y 方向中国的标准差大于美国,这与中国规范选波时只考虑 x 方向有关,美国规范的标准差在两个方向上差异较小.

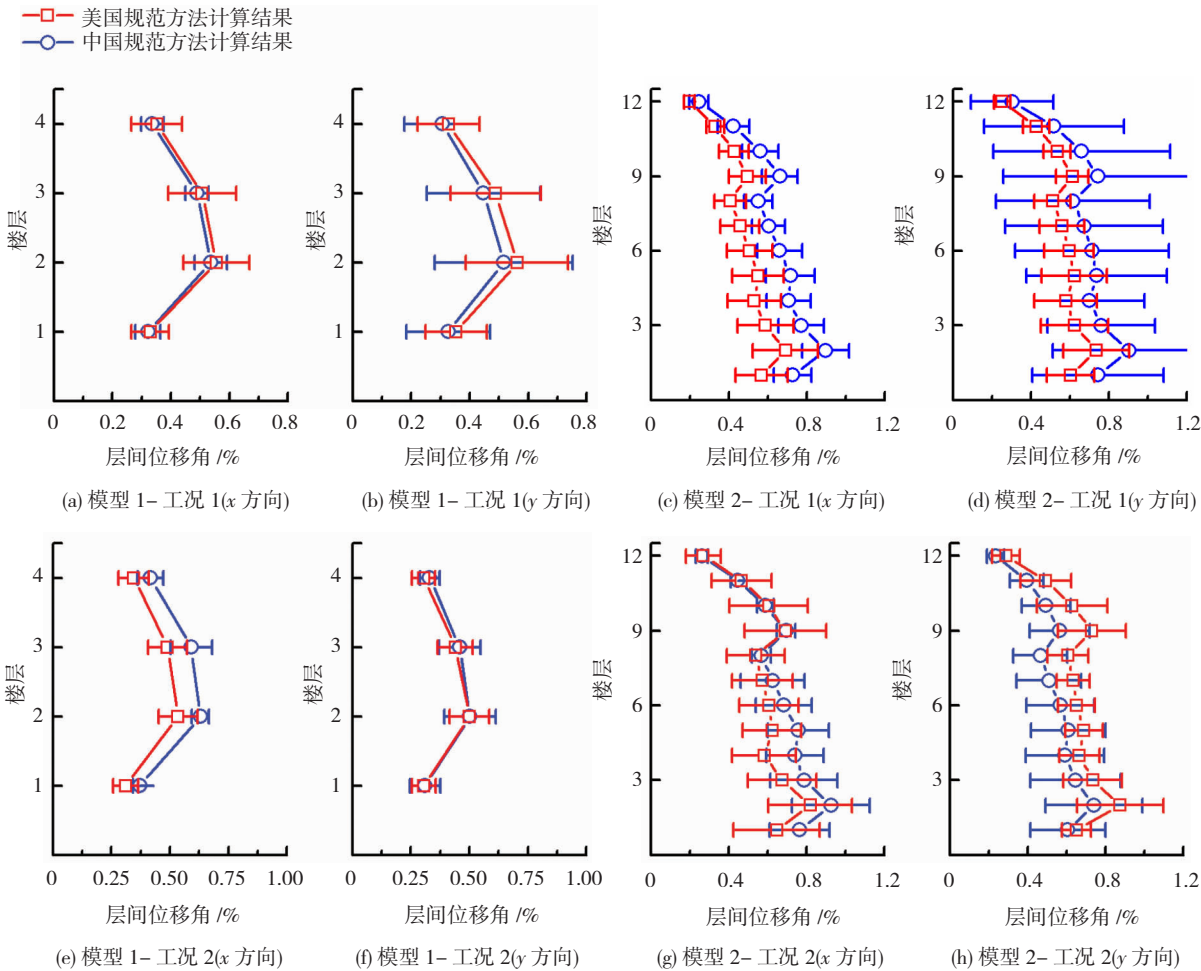


图 6 中美匹配方法下层间位移角计算结果对比

Fig. 6 Comparison of story drifts between Chinese and American Matching Methods

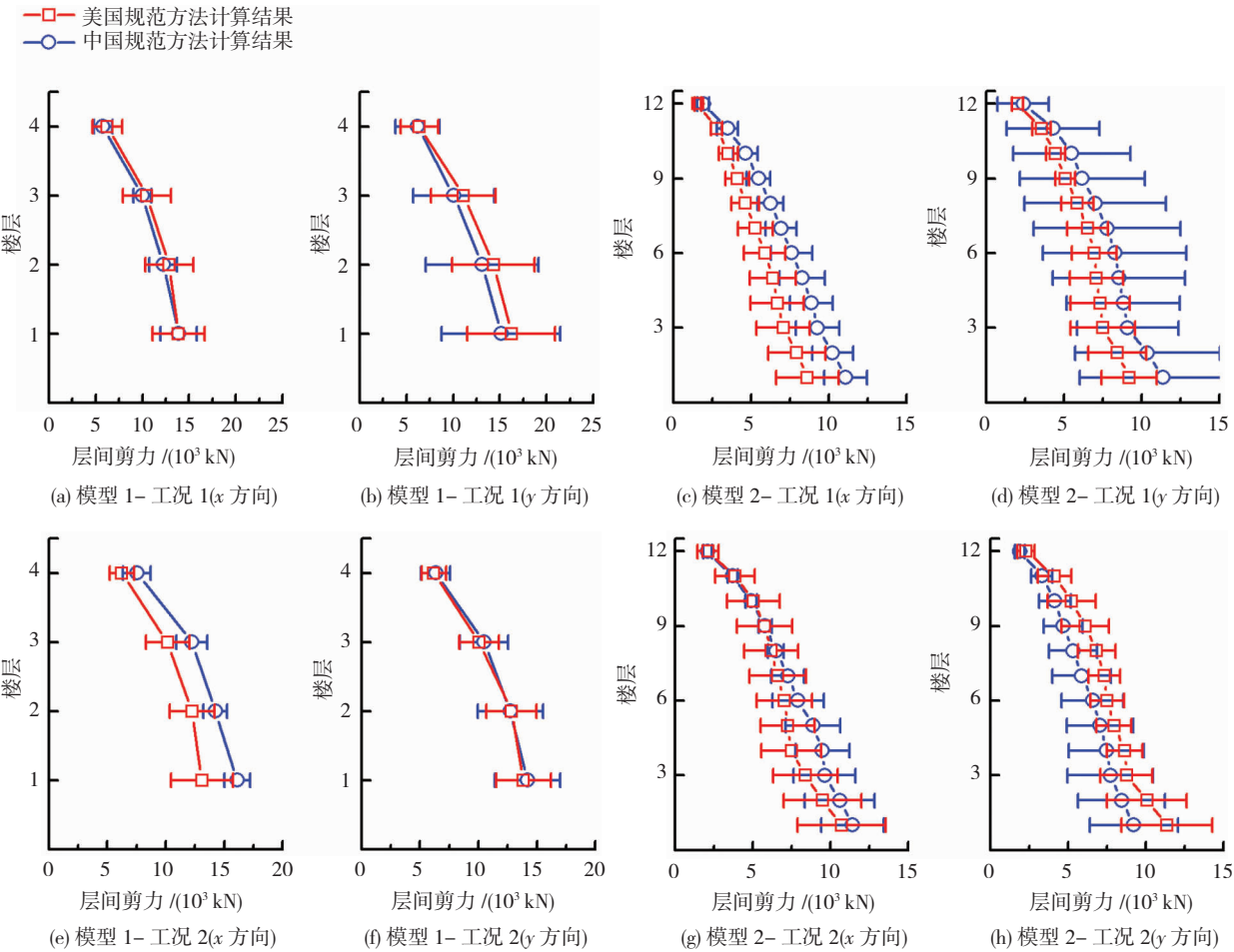


图 7 中美匹配方法下底部剪力计算结果对比

Fig. 7 Comparison of story forces between Chinese and American Codes Matching Methods

5 结 论

本文分别按照中国规范和美国规范进行地震动选取,以 4 层和 12 层框架结构为算例,对比了二者方法的表现,得到如下结论:

1) 中国抗震规范在地震动记录选取时没有明确可操作的双向地震动选取方案,如基于单一方向选取和调幅,可能导致另一方向的地震动与目标谱匹配度不高,使得计算结果离散度偏大. 美国抗震规范采用最大方向谱选取,虽然计算复杂,但是具有更明确的物理意义,可以较好体现记录不同合成方向的最大谱响应.

2) 记录选取时中国规范仅规定了记录反应谱的相对误差,而美国规范规定了下限,在实际记录选取操作中一般要保证最后平均谱的结果不低于目标谱,这种做法虽然避免了结果的保守,但是可能导致选出一条或几条记录与目标谱差距过大,这也是造成最后结果存在离散性差异的原因.

建议结合二者的优点,在控制相对误差的同时,也引入下限限制的遴选机制.

参考文献

[1] 温瑞智,冀昆,任叶飞. 结构时程分析中多层次强震动记录输入选取研究综述[J]. 地震工程与工程振动,2019,39(5):1
WEN Ruizhi, JI Kun, REN Yefei. Review on selection of strong ground motion input for structure time-history dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2019,39(5):1. DOI:10.13197/j. eeev. 2019. 05. 1. wenrz. 001.

[2] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京:中国工业出版社,2010
Code for seismic design of buildings:GB 50011—2010[S] Beijing: China Architecture and Buildings Press,2010

[3] 冀昆,温瑞智,任叶飞. 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,2017,38(12):57
JI Kun, WEN Ruizhi, REN Yefei. Ground motion recordings selection for seismic design code[J]. Journal of Building Structures, 2017,38(12):57. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2017. 12. 007

[4] 杨浦,李英民,赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指[J]. 土木工程学报,2000,33(6):33
YANG Pu, LI Yingmin, LAI Ming. A new method for selecting input waves for time-history analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000,33(6):33. DOI:10.15951/j. tmgcxb. 2000. 06. 005

[5] 陈波,温增平. 考虑目标谱不确定性及谱形的实际地震动记录优化选取和调整方法[J]. 建筑结构学报,2015,36(11):99
CHEN Bo, WEN Zengping. Optimized real ground motion selection

- and scaling method considering uncertainty and spectral shape of target spectrum[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11): 99. DOI:10.14006/j.jzjgxb. 2015. 11. 013
- [6] 李爽,周洪圆,刘向阳,等. 基于中国规范的近断层区抗震设计谱研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(2): 7
LI Shuang, ZHOU Hongyuan, LIU Xiangyang, et al. Study on near-fault seismic design spectra based on Chinese code for seismic design of buildings[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(2): 7. DOI:10.14006/j.jzjgxb. 2018. 0664
- [7] 吕大刚,刘亭亭,李思雨,等. 目标谱与调幅方法对地震动选择的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(4): 21
LÜ Dagang, LIU Tingting, LI Siyu, et al. Investigation of effects of target spectrum and amplitude scaling methods on selection of ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(4): 21. DOI:10.13197/j.eeev. 2018. 04. 21. lvdg. 004
- [8] Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures; ASCE/SEI 7-16[S]. America; Structural Engineering Institute, 2016
- [9] 冀昆,温瑞智,任叶飞. 中国抗震规范强震记录选取的初选条件研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 44
JI Kun, WEN Ruizhi, REN Yefei. Study on the initial of selection criteria strong motion records for Chinese seismic code[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 44. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme. 2016. 01. 005
- [10] 冀昆. 我国不同抗震设防需求下的强震动记录选取研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018
JI Kun. Strong ground motion selection for multiple levels of seismic fortification demand in China[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018
- [11] 刘沛,杨文健. 中美抗震设计中地震波选取方法比较研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(6): 7
LIU Pei, YANG Wenjian. Comparative study on the ground motion selection methods in Chinese and American codes[J]. Structural Engineers, 2013, 29(6): 7. DOI:10.15935/j.cnki.jgges. 2013. 06. 007
- [12] 张桂铭,刘文锋. 中、美、欧、日抗震规范对比[J]. 建筑结构, 2014, 44(9): 61
ZHANG Guiming, LIU Wenfeng. Comparison of Chinese, American, European, Japanese seismic code[J]. Building Structure, 2014, 44(9): 61. DOI:10.19701/j.jzjg. 2014. 19. 012
- [13] 吴桂芳. 中美抗震规范地震作用的比较分析[J]. 建筑结构, 2012, 42: 193
WU Guifang. Comparison of seismic loads between GB 50011—2010 and IBC—2009[J]. Building Structure, 2012, 42: 193. DOI:10.19701/j.jzjg. 2012. s1. 043
- [14] 罗开海,王亚勇. 中美欧抗震设计规范地震动参数换算关系的研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(8): 103
LUO Kaihai, WANG Yayong. Research on conversion relationships among the parameters of ground motions in seismic design codes of China, America and Europe[J]. Building Structure, 2006, 36(8): 103. DOI:10.19701/j.jzjg. 2006. 08. 027
- [15] LÜ Hongshan, ZHAO Fengxin. Site coefficients suitable to China site category[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 20(1): 71
- [16] 陶林惠,李杰. 中美抗震设计规范主要地震动参数的对比研究[J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 122
TAO Linhui, LI Jie. Comparative study on the main parameters of ground motions in seismic design codes in China and America[J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 122. DOI:10.16516/j.gedi. issn2095-8676. 2015. 03. 024
- [17] BOORE D M, WATSON-LAMPREY J, ABRAHAMSON N A. Orientation-independent measures of ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 96(4A): 1502.
- [18] ATIK L A, ABRAHAMSON N. An improved method for nonstationary spectral matching[J]. Earthquake Spectra, 2010, 26(3): 601. DOI:10.1193/1.3459159

(编辑 赵丽莹)