

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.024

中美抗震设计规范主要地震动参数的对比研究

陶林惠, 李杰

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 通过对中美抗震规范中抗震设防标准、建筑物类别、场地类别、用于结构设计的地面运动取值及特征周期等参数的对比分析, 表明由于中美规范抗震设计理念的差异, 在确定抗震设防的基准地震及用于结构设计的地面运动取值时具有不同的地震危险性特征, 同时给出中美规范建筑物类别、场地类别划分的差异及对应关系, 比较了中美规范确定特征周期的相关影响参数, 提出中美规范主要地震动参数的相互转换方法, 可为今后海外项目抗震设计提供参考。

关键词: 抗震设计; 地震动参数; 场地类别; 对比

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-00122-05

Comparative Study on the Main Parameters of Ground Motions in Seismic Design Codes in China and America

TAO Linhui, LI Jie

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: By the comparison and analysis about the seismic design codes of China and America about the seismic precaution criterion, the building classification, the site classification, the ground motion acceleration for structure design and the characteristic period, it presents differences of the seismic hazard characteristics between Chinese code and American code when determining the seismic precaution criterion and the ground motion acceleration for structure design because of the difference of seismic design concept, shows the relationship on the building and the site classification, also compare the relative parameters of the characteristic period, finally the conversion relationships between the parameters of ground motions in Chinese code and American code are proposed to provide the reference for the seismic design of overseas projects in the future.

Key words: seismic design; parameters of ground motions; site classification; comparison

在经济全球化新形势下, 随着国家“走出去”战略的实施, 越来越多的国内企业进入国际市场承揽项目, 许多国外项目在设计过程中不可避免需应用到美国规范, 直接要求采用美国规范进行设计, 或在采用中国规范设计前需提交中美规范差异的对比分析, 以获得业主认可批准, 其中将涉及中美抗震规范地震动参数的相互转换。因此, 这就对国内设计人员提出了较高的要求, 不仅需熟练地掌握和应用美国规范, 且需熟知中美抗震规范的差异以及地震动参数的相互转换。相比而言, 美国规范中抗震

设计相关条款与我国规范差异较大, 设计人员对美国抗震相关规范的理解、应用难度较高。通过对中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1] 和美国规范 ASCE/SEI 7—10《Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures》^[2] 中主要地震动参数相关条款差异的对比分析, 探讨了两者的相互转换, 可为海外工程设计人员提供参考。

1 抗震设防标准

针对建筑结构可能遭遇各种不同等级的地震作用的情形, 抗震标准对结构、构件制定相应的设防目标, 满足结构在地震作用下的保证使用功能、人身安全等要求。

中国抗震规范总则中明确规定了建筑抗震设计

收稿日期: 2015-06-09

作者简介: 陶林惠(1969), 女, 重庆人, 高级工程师, 学士, 主要从事建筑结构设计研究工作(e-mail) taolinhui@gedi.com.cn。

时的基本设防目标, 即通常所说的三水准设防目标: 小震不坏、中震可修、大震不倒。小震、中震、大震即为抗震规范中的多遇地震、基本地震和罕遇地震, 50年超越概率分别为63%、10%和2~3%的地震。基本地震的重现期为475年, 按规范中地震基本烈度区划或地震动参数区划对当地的规定采用。多遇地震、罕遇地震的重现期分别为50年和1 642~2 475年。“小震不坏”指建筑物在遭受多遇地震作用时, 一般不受损坏或不需修理即可继续使用; “中震可修”指在基本地震作用下, 可能对建筑物造成一定的损坏, 但经一般性修理仍可使用; “大震不倒”指建筑物能抵抗高于本地区抗震设防烈度的罕遇地震作用而不发生倒塌或危及生命的严重破坏。根据中国抗震规范要求, 通过“两阶段”设计方法, 即采用多遇地震作用的承载力、弹性变形验算的第一阶段, 和必要时进行弹塑性变形验算的第二阶段, 从而实现“三水准”的设防目标。

美国规范 ASCE/SEI 7—10 较之前的 ASCE/SEI 7—05 版本有较大改动, 为保证建筑物在全国范围内具有统一的抗倒塌能力水准, 采用地震工程学家在 NEHRP 2009 中提出的“基于风险目标的最大考虑地震”^[3] (Risk-Target Maximum Considered Earthquake 简称 MCE_R), 给出美国范围内 B 类场地, 阻尼比为 5% 时, 结构在 0.2 s 和 1.0 s 的加速度谱值等值线图, 即 MCE_R 地面运动地图。美国规范的“基于风险目标的最大考虑地震”大致相当于中国规范的“罕遇地震”。在进行抗震设计时, 将美国规范的“基于风险目标的最大考虑地震”除以系数 1.5, 从而得到美国规范的“设计地震”, 与中国规范的“基本地震”相当。为了对结构进行弹性计算, 美国规范将“设计地震”反应谱除以反应谱修正系数 R , 得到弹性计算反应谱, 概念上大体与中国规范的“多遇地震”相当, 修正系数 R 根据结构的延性性质来取值, 对延性较差的结构取值较小, 对延性较好的结构取值较大。同时美国针对不同结构形式的建筑物抗震性能和抗震等级, 根据建筑物遭受地震作用可维持的功能, 提出四个性能水准, 即“正常工作”、“尚可使用”、“生命安全”和“临近倒塌”^[4]。

2 建筑物设防类别

中国抗震规范指明所有建筑的抗震设防类别划

分按现行国家抗震设防分类标准^[5]执行, 根据使用功能和灾害后果, 将抗震设防类别及其抗震设防标准分为特殊设防、重点设防、标准设防和适度设防四类, 分别简称为甲、乙、丙、丁类。

与中国规范类似, 美国规范对建筑物根据重要性、用途及灾害后果, 进行了 I、II、III 和 IV 共 4 个分类, 如表 1 所示。

表 1 建筑物重要性分类

Table 1 The Importance Category of Buildings

中国 GB 50011—10	美国 ASCE/SEI 7—10
甲类: 重大建筑工程和地震可能发生特别重大灾害后果的建筑	IV 类: 非常重要或破坏产生严重次生灾害的建筑
乙类: 地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的生命线相关建筑	III 类: 地震破坏时造成人员重大伤亡或中断生命线相关的建筑
丙类: 除甲、乙、丁类外的建筑	II 类: 除其它 I、III、IV 类外的建筑
丁类: 使用人员少且不致产生次生灾害的建筑	I 类: 破坏时造成较小人员伤亡的建筑

可见, 在对建筑物的重要性进行分级时, 中美规范均考虑了建筑物的重要性、用途和地震破坏时对使用人员的危害和可能产生的次生灾害后果等因素。通过建筑物重要性等级的划分, 相应调整相关抗震设计要求, 是实现经济、合理减轻地震灾害的有效措施。

对于不同重要性等级的建筑物, 中国抗震规范基于本地区抗震设防烈度作相应调整以确定抗震措施和地震作用。中国规范对丙类建筑要求按本地区抗震设防烈度确定地震作用及抗震措施; 对乙类要求按本地区设防烈度确定地震作用, 同时按比本地区设防烈度高一度的要求加强抗震措施; 对甲类则用高于本地区抗震设防烈度的要求确定地震作用, 且按比本地区设防烈度高一度的要求加强抗震措施; 对于丁类建筑一般按按本地区抗震设防烈度确定地震作用, 但允许适度降低抗震措施。可见, 中国规范不是通过重要性系数来调整地震作用, 对于地震设计状况, 重要性系数均取为 1.0。

与中国规范不同, 美国 ASCE/SEI 7—10 根据建筑物重要性等级的划分, 取相应的结构重要性系数, 以调整地震作用的大小。I、II 类建筑的重要性系数为 1.00, III 类建筑的结构重要性系数为 1.25, IV 类建筑的结构重要性系数为 1.50。在建筑物重要性分级的基础上, 结合本地区设计地震的大小,

采用短周期反应谱加速度参数 S_{DS} 或 1 秒周期反应谱加速度参数 S_{D1} ，即可确定建筑物的抗震类别，一共分为 A、B、C、D、E、F 共 6 个抗震类别，进而确定各个抗震等级规定结构设计和细节要求。

3 场地类别

中国和美国规范对场地类别划分依据的指标和参数有很大差别。中国规范采用平均剪切波速和覆盖层厚度作为评定指标的双参数分类方法，将场地划分为 I、II、III、IV 共 4 类，其中 I 类又分 I_0 、 I_1 两个亚类。等效剪切波速 v_{s20} 的计算深度取覆盖层厚度和 20m 两者的较小值。

美国规范在进行场地类别划分时，以表层 30m 的等效剪切波速 v_{s30} 为主，同时综合考虑标贯击数和不排水剪强度等指标，共分为 A、B、C、D、E、F 共 6 类场地，其中 F 类为地震作用下易破坏或发生震陷的土，例如液化土、高敏感性黏土、拌和较差的水泥土。美国规范根据剪切波速分类与中国规范分类的差异如表 2 所示。

表 2 中美抗震规范场地分类比较

Table 2 Comparisons on Site Classification Between Chinese Code and American Code

标准	场地类别				
中国	剪切波速 $V_{s20} = 150$ 250 500 800 m/s				
	$I_1 (h < 3)$	$I_1 (h < 3)$	$I_1 (h < 5)$	$I_1 (h = 0)$	$I_0 (h = 0)$
	II ($3 \leq h < 15$)	II ($3 \leq h < 50$)			
	III ($15 \leq h < 80$)	IV ($h \geq 50$)	II ($h \geq 5$)		
	IV ($h \geq 80$)				
美国	剪切波速 $V_{s30} = 183$ 366 762 1 524 m/s				
	E	D	C	B	A

注：剪切波速单位为 m/s； h 为中国规范覆盖层厚度，m； V_{s20} 为中国规范地表以下 20 m 深度范围内岩土层的等效剪切波速，m/s； V_{s30} 为美国规范场地表层 30 m 内岩土层的等效剪切波速，m/s。

由于中美规范场地分类的标准不同，在场地没有详细地质资料的条件下，很难准确地对中美场地类别进行转换。但经常源于实际工程的需要，在地质资料不完备的条件下仍需对中美场地类别进行转换。为了研究中美场地分类的相关性，文献[6]以台湾集集地震为例对场地分类问题进行研究，认为中国规范和美国规范的场地分类有较好的相关性，在一定条件下可进行转换；文献[7]中在收集的台

站场地的详细勘探资料基础上，对比中国与美国规范的场地分类指标，并给出了中国等效剪切波速 v_{s20} 与美国规范等效剪切波速 v_{s30} 的转换关系式；在文献[8]中给出了根据等效波速来进行中美场地类别的转换，如表 3：

表 3 中美抗震规范场地分类转换

Table 3 The Conversion of Site Classification Between Chinese Code and American Code

中国规范向美国规范转换		美国规范向中国规范转换	
GB 50011 —2010	ASCE/SEI 7—10	ASCE/SEI 7—10	GB 50011 —2010
I	$v_{s20} \geq 1500$ m/s, A	A	I_0
	$v_{s20} < 1500$ m/s, B	B	$v_{s30} \geq 760$ m/s, I_0
	$v_{s20} \geq 760$ m/s, B		$v_{s30} < 760$ m/s, I_1
II	$v_{s20} < 760$ m/s, C	C	$v_{s30} \geq 510$ m/s, I_1
	$v_{s20} \geq 330$ m/s, C		$v_{s30} < 510$ m/s, II
III	$v_{s20} < 330$ m/s, D	D	$v_{s30} \geq 260$ m/s, II
	$v_{s20} \geq 160$ m/s, D		$v_{s30} < 260$ m/s, III
IV	$v_{s20} < 160$ m/s, E	E	$v_{s30} \geq 150$ m/s, III
	E		$v_{s30} < 150$ m/s, IV

确定场地类别后，中国规范结合地震分组，考虑震级大小和震中距的影响，确定地震作用计算的反应谱特征周期，但没有对反应谱的峰值加速度进行调整。对于相同的地震设防烈度，反应谱峰值加速度在不同场地条件下仍是固定不变的。

美国规范中特征周期 $T_s = S_{D1} / S_{DS} = F_v S_1 / F_a S_s$ ， F_v 、 F_a 为场地类别调整系数，根据不同场地类别进行取值， S_s 、 S_1 为基于 5% 阻尼比在 B 类场地条件下，分别对应于结构周期 0.2 s 和 1.0 s 的加速度反应谱值。美国规范针对不同场地条件，分别给出了相应的场地调整系数，从而改变反应谱峰值加速度和特征周期，因此反应谱峰值加速度 S_{DS} 是随场地条件变化的。

由于不同的场地条件会对地震波的强度和频率产生不同的影响，从而影响反应谱的峰值和形状，由此可见，美国规范在考虑场地类别对反应谱影响时比中国规范更为全面、合理。

4 地震危险性及其地面运动取值

中国和美国抗震设计均采用反应谱进行地震作用计算，通过加速度反应谱将各个基准地震的地面运动特性，由动力放大系数转换为结构加速度响应。

中国抗震规范采用的基准地震为50年超越概率为10%或重现期为475年的“基本地震”,在《中国地震动参数区划图》(GB18 306—2001)中的“两图一表”,给出了全国各地抗震设计基本地震动参数,包括地震动峰值加速度、反应谱特征周期及其调整。同时抗震规范中还给出了各级“基本地震”所对应的“多遇地震”和“罕遇地震”地面加速度值及相对应的地震影响系数,从而得到小震和大震作用下的反应谱,以满足结构抗震两阶段设计方法的计算需求,实现“三水准”的设防目标。

美国规范 ASCE/SEI7-10 采用“基于风险目标的最大考虑地震”^[3] (Risk-Target Maximum Considered Earthquake 简称 MCE_R), 在区划图中不仅给出美国范围内 B 类场地, 阻尼比为 5% 时, 结构在 0.2 s 和 1.0 s 的结构响应加速度谱值等值线图, 还给出地面峰值加速度值。之前的 ASCE/SEI 7—05 版规范采用的“最大考虑地震”, 统一取为 50 年超越概率为 2% 的地震, 但由于不同地区地震时地面运动峰值的差异性, 使得按此设计的建筑物在全国范围内不具有统一的抗倒塌能力水准。美国规范 ASCE/SEI 7—10 考虑到各地危险性曲线形状的差异, 在 50 年超越概率 2% 的地面运动为基础, 采用了“定值地面运动”方法对断层研究明确的地区进行调整, 提出基于风险目标的 MCE_R , 从而使按此设计的全美建筑具有相同的抗倒塌裕度, 即有着统一的地震倒塌风险。在进行抗震设计时, 美国规范的“设计地震”为“基于风险目标的最大考虑地震”的 2/3, 因此美国的“设计地震”在全美范围内不具有统一超越概率水平。在对结构进行弹性计算, 将美国规范的“设计地震”反应谱除以反应谱修正系数 R , 得到弹性计算反应谱。

可见, 两国的设计地震危险性特征是不同的, 采用的基准地震不具有相同的超越概率。

5 中美地震动参数转换

虽然两国的基准地震没有相同的危险性特征, 但经常迫于实际工程的设计需求, 要对地震动参数进行转换。在进行地震动参数转换时, 可采取中国“罕遇地震”与美国“基于风险目标的最大考虑地震”的地面峰值加速度近似相当的原则。中国规范明确给出了罕遇地震的地面峰值加速度值, 而美国规范给出的是“基于风险目标的最大考虑地震”结构

响应的峰值加速度参数 S_s , 该值为地面峰值加速度乘以动力放大系数。在美国规范中 S_s 与地面峰值加速度并非为定值, 该值可参考 UBC97 中的动力放大系数, 近似取为 2.5。

对于已知的基于中国规范的地震动参数, 可由下式换算得到美国规范的地震动参数。

$$S_s = 2.5 A_{PGA} / F_a \quad (1)$$

式中: A_{PGA} 为中国规范罕遇地震的地面峰值加速度, 根据地震安平报告或抗震规范中给出的罕遇地震地面运动峰值加速度(见表 4)取值。

表 4 中国规范罕遇地震地面峰值加速度值 (cm/s^2)

Table 4 The Peak Ground Acceleration Value for Rarely Occurred Earthquake in Chinese Code (cm/s^2)

地震影响	6 度	7 度 (0.10g)	7 度 (0.15g)	8 度 (0.20g)	8 度 (0.30g)	9 度
罕遇地震	125	220	310	400	510	620

根据美国规范中 S_s 与 F_a 的对应关系, 经过转换后绘制成各场地条件下形成 F_a 与 $1/S_s$ 的关系曲线(见图 1), 由中国规范地震烈度、场地类别即可确定美国规范参数 S_s 、 F_a 的数值。

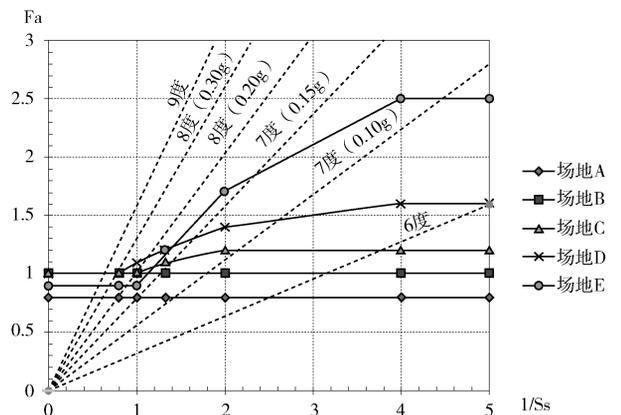


图 1 F_a 与 S_s 数值确定图

Fig. 1 The Figure for Determination of F_a and S_s

同样地, 由下式确定即可确定 S_1 :

$$S_1 = 2.5 A_{PGA} T_g / F_v \quad (2)$$

式中: T_g 为场地特征周期。

因中国规范制定地震风险区划图时所采用的地震衰减关系主要参考了美国西部地区^[4], 而美国规范 ASCE/SEI 7—10 在采用“基于风险目标的最大考虑地震”对地面运动调整时, 西部地区的地面参数值虽有所提高, 但其“设计地震”实际上仍基本保

持了50年内10%超越概率水准^[9-16],与中国规范的“基本地震”相当,有着相似的地震危险性基础。因此,在确定 S_1 时也可在美国区划图中找到等于 S_S 值的场地,通常可以找到 S_S 取值相同的多个美国场地单元,从中选取位于美国西部地区的一处场地作为近似场地,从而根据美国区划图确定 S_1 。

对于已知的基于美国规范的地震动参数,可由下式换算得到中国的地震动参数:

$$A_{PGA} = F_a S_S / 2.5 \quad (3)$$

$$T_g = F_v S_1 / 2.5 A_{PGA} \quad (4)$$

由公式(4)即可得到对应于中国规范罕遇地震的地面峰值加速度及场地特征周期,从而确定该地在中国规范中的烈度分区,进而确定相应的抗震设计参数。

6 结论

作为当今抗震设计规范的先进代表,美国抗震规范在海外工程中得到广泛应用,其先进的抗震理念引领着各国结构抗震设计的发展。源于理解、掌握美国规范的迫切需求,中美抗震规范差异的对比分析一直是国内研究的热点。在此通过对中美抗震规范主要地震动参数差异的对比分析及相互转换的探讨,以期设计人员掌握和应用美国规范起到抛砖引玉的作用。

参考文献:

- [1] 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 and Building Press, 2010
- [2] ASCE/SEI 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures [S]. 2010.
- [3] BSSC. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures [R]. FEMA 302 / 303, Part 1 and Part 2, 2009 Edition, Washington, 2010.
- [4] 杨卓兴. 中美高地震风险区钢筋混凝土框架结构抗震规定及性能对比研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [5] GB 50223—2001, 建筑工程抗震设防分类标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] 黄雅虹, 吕悦军, 彭艳菊. 国内外不同抗震设计规范中场地分类方法的内在关系研究[J]. 震灾防御技术, 2009, 4(1): 80-90.
HUANG Yahong, LU Yuejun, PENG Yanju. Study on the Relations of Site Classification Methods in Seismic Design Standards Between China and Abroad [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009, 4(1): 80-90.
- [7] 郭锋, 吴东明, 许国富, 等. 中外抗震设计规范场地分类对应关系[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(2): 63-66.

- GUO Feng, WU Dongming, XU Guofu, et al. Site Classification Corresponding Relationship Between Chinese and the Overseas Seismic Design Codes [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(2): 63-66.
- [8] LU Hongshan. Characterization of Different Site Category Method on Strong Ground Motion [C] // 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [9] 赵海艳, 张渊, 王月栋, 等. 美国 NEHRP 推荐抗震设计条文地震动参数的研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(增刊): 349-353.
ZHAO Haiyan, ZHANG Yuan, WANG Yuedong, et al. Research on Strong Ground Motion Parameters of NEHRP Recommended Seismic Provisions [J]. Industrial Construction, 2014, 44(Supp): 349-353.
- [10] 郁静红. 核电站常规岛主厂房结构抗震性能设计[J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 102-106.
YU Jinghong. Performance Based Seismic Design of the Main Power Building in Conventional Island of Nuclear Power Plant [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(2): 102-106.
- [11] QI Yongle, HAN Xiaolei. Failure Mode Classification of Reinforced Concrete Columns Using Fisher Method [J]. Journal of Central South University of Technology, 2013, 10(20): 2863-2869.
- [12] QI Yongle, ZHOU Xinxian, XIE Candong. Research on Deformation Index Limits of RC Shear Wall Based on Material Damage [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 1(507): 322-327.
- [13] 戚永乐, 万海涛. 核岛侧常规岛主厂房山墙抗倒塌能力分析[J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 70-74.
QI Yongle, WAN Haitao. The Capacity of Resisting Collapse of the Main Power Building Gable Nearby Nuclear Island [J]. Southern Energy Construction, 2015, 1(1): 70-74.
- [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): 103-107.
LUO Kaihai, WANG Yayong. Research on Conversion Relationships Among the Parameters of Ground Motions in Seismic Design Codes of China [J]. Building Structure, 2006, 36(8): 103-107.
- [15] 刘立平, 谭明子, 李英民, 等. 基于 SSI 效应的结构抗震设计方法的中美规范对比[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊): 253-256.
LIU Liping, TAN Mingzi, LI Yingmin, et al. Comparison of Structural Aseismic Design Method Based on Soil Structure Interaction Effect Between Chinese Code and American Code [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Supp): 253-256.
- [16] 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 Xiaojun, PENG Qing. Calculation and Analysis of Earthquake Ground Motion Parameters for Different Site Categories [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 29-36.