

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.039

# 中美钢筋混凝土结构抗震设计理念的对比研究

李龙龙, 朱琳, 李丙扬

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

**摘要:** 美国规范在国际工程上应用比较多,因此对美国规范(ASCE 7—10)中混凝土结构体系的抗震设计方法进行了研究,主要包括地震设计反应谱、混凝土结构的地震作用计算和调整以及混凝土结构的侧移限值等,对 ASCE 7—10 的抗震设计理念进行了讨论,并与中国抗震规范(GB 50011—2010)进行了对比。研究表明与中国抗震规范相比,美国规范的抗震设计理念应用比较灵活,设计人员选择的空間比较大。

**关键词:** 混凝土结构;抗震理念;规范;反应谱;侧移限值

中图分类号: TU37

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2017)05—0211—05

## Comparison of Structure Concrete Seismic Design Principal Between Chinese and USA codes

LI Longlong, ZHU Lin, LI Bingyang

(China Water Resources Bei Fang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The seismic design of building represents the principal and superiority of the codes, and also is the difficult point of structure design. American codes has important impacts on the international engineering. More and more engineers need to master the designing method of international engineering. So this paper analyzed the seismic design in ASCE7—10, including design response spectrum, and calculated the seismic load effect and story drift limitation. Compared with the Chinese code GB50011—2010, the seismic principle of ASCE7—10 is discussed. The results indicate that the seismic principal of USA codes is flexible compared to Chinese codes which will leave the designer more options.

**Keywords:** structure concrete; seismic measures; code; response spectrum; story drift limitation

目前世界各国的工程设计标准在设计理念、设计原则、设计要求等诸多方面均存在许多差别。不同的国家有不同的经验,尽管都能保证结构的安全,但是其安全度不同,其结构设计方法也具有多样性。因此有必要研究国外的设计方法,不仅使国内同行了解其他发达国家的设计方法,更为重要的是有助于参与国际竞争。美国规范在国际工程设计中应用比较广泛,因此关于美国规范的研究成果也比较多。文献[1—6]研究了美国规范风荷载的计算方法,并与中国规范风荷载的计算方法进行了对比。魏力<sup>[7]</sup>研究了中美砌体设计规范的异同。周建方等<sup>[8]</sup>对比研究了中美规范水工闸门的计算方法。侯建国等<sup>[9]</sup>从分项系数设计表达式的相当安全系数的角度,对中美规范混凝土构件抗震承载力验算的安全度设置

水平进行了计算分析和比较,获得了中美规范混凝土构件抗震承载力安全度设置水平差异的定量结果。江辉等<sup>[10]</sup>从能量角度对中国抗震规范(GB 50011—2001)和美国规范 UBC1997 在近断层区域的适用性进行了检验。李赫等<sup>[11]</sup>将美国规范(IBC 2006、UBC 1997)与中国抗震规范(GB 50011—2010)在制定目标和技术细节上做了对比分析,最后通过工程实例比较了相同条件下三者地震力的差异。吴桂芳<sup>[12]</sup>对比分析了中国抗震规范(GB 5011—2010)和美国规范(IBC 2009)的抗震设防目标、场地类别和地震作用的计算方法。严奉婷等<sup>[13]</sup>将中国抗震规范(GB 5011—2010)和美国规范(ASCE 7—05)中计算地震作用的主要参数进行了对比,并给出了二者之间的转换关系。李剑<sup>[14]</sup>对比研究了中国抗震

规范(GB 5011—2010)与美国规范(IBC 2000、UBC 97 和 ASCE 7—95)的抗震设计方法、地震作用计算以及混凝土结构的抗震措施。

建筑结构的抗震设计方法集中体现着规范的设计理念,也最能体现规范的技术先进性。抗震设计包含地震作用计算和抗震措施两方面内容,而以往文献[9—15]主要研究了美国规范的地震作用计算方法或者抗震措施的部分内容,缺少对地震设计理念的整体把握。因此本文对美国规范(ASCE 7—10)和中国规范(GB 5011—2010)中关于钢筋混凝土结构体系的抗震设计方法进行了对比研究,力求更好的理解和应用中美规范的设计理念,为涉外工程提供参考。

## 1 设计加速度反应谱对比

美国规范<sup>[16]</sup>(ASCE 7—10)中的地震影响系数曲线如图 1 所示。图中的控制参数可以按下式计算:

$$S_{ds} = \frac{2}{3} S_{ms} \quad (1)$$

$$S_{dl} = \frac{2}{3} S_{ml} \quad (2)$$

$$S_{ms} = F_a S_s \quad (3)$$

$$S_{ml} = F_v S_1 \quad (4)$$

$$T_0 = 0.2 \frac{S_{dl}}{S_{ds}} \quad (5)$$

$$T_g = \frac{S_{dl}}{S_{ds}} \quad (6)$$

式中: $S_s$  和  $S_1$  是按 B 类场地、5% 的阻尼比、采用 50 年超越概率为 1% ~ 2% 的地震峰值加速度,计算得到的周期为 0.2 s 和 1.0 s 时对应的地震影响系数; $S_{ds}$  是设计反应谱的最大地震影响系数; $S_{dl}$  是周期为 1 s 时对应的设计反应谱地震影响系数。 $F_a$  和  $F_v$  为考虑场地类别影响而采用的调整系数,其取值分别见表 1 和表 2。

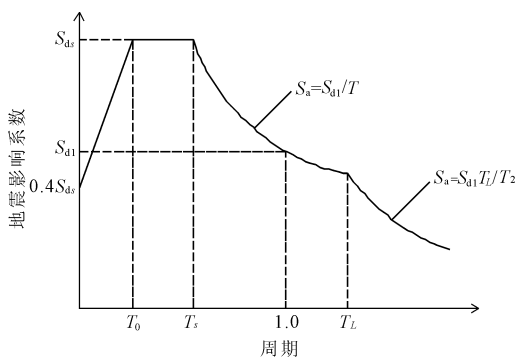


图 1 ASCE 7—10 的地震影响系数曲线

表 1 场地调整系数  $F_a$  的取值

场地类型	$F_a$				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	根据地震安全评估确定				

表 2 场地调整系数  $F_v$  的取值

场地类型	$F_v$				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	根据地震安全评估确定				

同样烈度条件的反应谱形状,随着震源机制、震级大小、震中距远近和场地类别等的变化,有较大的差别。中国抗震规范<sup>[17]</sup>(GB 50011—2010)采用场地特征周期予以反映。但是上述因素只影响反应谱的形状,对反应谱的幅值不产生影响。而 ASCE 7—10 采用场地调整系数  $F_a$  和  $F_v$  反映震源机制、震级大小、震中距远近和场地类别等因素变化的影响。由式(1)至式(6)可知,场地调整系数  $F_a$  和  $F_v$  不仅可以影响反应谱的形状,也可以影响反应谱的幅值。由表 1 和表 2 可以看出,随着场地变的越“柔”,场地调整系数  $F_a$  和  $F_v$  变的越大,反应谱的幅值变的越大。这是由于“柔”性场地的周期比较接近地震波的卓越周期,场地吸收的地震能量增多。

地震反应谱曲线自坐标原点向右依次分为加速度控制段、速度控制段和位移控制段,且地震影响系数逐渐减小。随着建筑物高度的增大,地震作用逐渐起控制作用,此时建筑物的周期主要处在反应谱的速度控制段。对于特别高或者特别“柔”的建筑物,其周期才会处在位移控制阶段。因此反应谱的速度控制阶段对于地震作用的计算影响最大。按照中国抗震规范(GB 50011—2010),根据地震分组和场地类别确定  $T_L$  在 1.0 s ~ 4.5 s 范围内;ASCE 7—10 中  $T_L$  在 4 s ~ 16 s 范围内。因此 ASCE 7—10 中反应谱的速度控制阶段要比中国规范(GB 50011—

2010)中的长。虽然两国规范中建筑结构自振周期的计算方法存在差异,但是对于同一建筑物可能会导致按 ASCE 7—10 计算结构的地震影响系数处在反应谱的速度控制阶段,而按 GB 50011—2010 计算结构的地震影响系数处在反应谱的位移控制阶段。

## 2 混凝土结构体系主要抗震措施对比

ASCE 7—10 规定地震作用计算可以采用底部剪力法、振型分解反应谱法和时程分析法。计算得到的地震作用需要按下式调整:

$$V = \frac{I_e}{R} V_0 \quad (7)$$

式中:  $V_0$  为调整之前的地震作用;  $V$  为调整后的地震作用;  $I_e$  为结构重要系数;  $R$  为地震作用调整系数,  $R$  的取值可以根据表 3 确定。ASCE 7—10 将结构的抗震等级分为四等,结构的抗震等级按表 4 确定。由表 4 可以看出,ASCE 7—10 中的抗震等级只与地震最大影响系数  $S_{ds}$  有关,且最大地震影响系数  $S_{ds}$  包含场地土动力特性对结构地震作用的影响,而 GB 50011—2010 中的抗震等级与建筑物的地震设防标准、结构体系和建筑高度有关,与场地土的动力特性无关。

由式(7)和表 3 可知,调整后的地震作用要比按反应谱计算的结果小。在结构处于线弹性阶段的前提下,直接调整地震作用计算结果与调整地震影响系数是一样的。为了便于对比,根据结构类型直接对最大地震影响系数进行调整。表 5 为 ASCE 7—10 中抗震等级与调整后的最大地震影响系数的对应关系。从表 5 可以看出,在设防地震相同的情况下,对于不同结构体系和延性不同的同类结构体系,其地震作用调整系数  $R$  不相同,最大地震影响系数也不相同。而在 GB 50011—2010 中,最大地震影响系数与设防烈度是一一对应的,不会随着结构体系和结构延性的不同而变化。

ASCE 7—10 中地震影响系数曲线的控制参数  $S_s$  和  $S_1$  是采用 50 年超越概率为 1% ~ 2% 的地震峰值加速度计算得到的。地震影响系数  $S_s$  与 GB 50011—2010 中罕遇地震的影响系数相当<sup>[13]</sup>。 $S_s$  按式(1)和式(3)调整并考虑结构的地震作用调整系数  $R$  后得到计算结构地震作用的实际地震影响系数最大值(相当于 GB 50011—2010 中的小震影响系数)。

图 2 为不同  $R$  值确定的大震影响系数和小震影响系数的对应关系。为了便于与 GB 50011—2010 对比,将 GB 50011—2010 中大震影响系数和小震影响系数的对应关系同时列于图 2 中。从图 2 中可以看出:相同的烈度条件下,当  $R = 3$  时,ASCE 7—10 的小震影响系数大于 GB 50011—2010 的小震影响系数,ASCE 7—10 相对比较保守;当  $R \geq 5$  时,ASCE 7—10 的小震影响系数小于 GB 50011—2010 的小震影响系数,GB 50011—2010 相对比较保守;随着设防烈度的提高,GB 50011—2010 变的越保守。从表 3 可以看出,  $R \geq 5$  的情况比较多,说明相同烈度的情况下,计算结构的地震作用时,ASCE 7—10 采用的实际地震影响系数相对比较小。

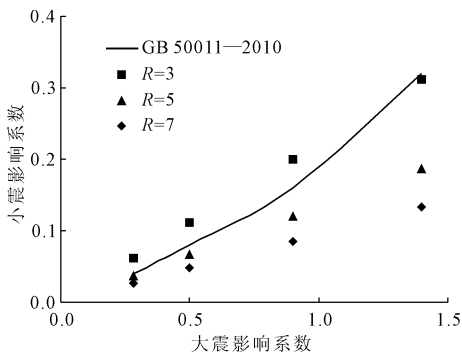


图 2 中美规范中大震影响系数与小震地震影响系数对应关系

表 3 ASCE 7—10 中结构抗震设计调整系数

结构类型	地震作用调整系数 $R$	侧移调整系数 $C_d$
特殊抗震墙	5.0	5.0
普通抗震墙	4.0	4.0
特殊框架 + 特殊抗震墙	7.0	5.5
特殊框架 + 普通抗震墙	6.0	5.0
中等框架 + 特殊抗震墙	6.5	5.0
中等框架 + 普通抗震墙	3.0	2.5
特殊框架	8.0	5.5
中等框架	5.0	4.5
普通框架	3.0	2.5

注:框架抗震墙结构中框架的抗震调整系数按纯框架结构确定。

表 4 ASCE 7—10 中混凝土结构的抗震等级与地震影响系数的关系

结构抗震等级	A	B	C	D
$S_{ds}$	$S_{ds} < 0.067$	$0.067 \leq S_{ds} < 0.33$	$0.33 \leq S_{ds} < 0.5$	$0.5 \leq S_{ds}$

表 5 ASCE 7—10 中不同结构的抗震等级与实际地震影响系数最大值的对应关系

结构抗震类型	不同结构地震影响系数最大值								
	特殊抗震墙	普通抗震墙	特殊框架 + 特殊抗震墙	特殊框架 + 普通抗震墙	中等框架 + 特殊抗震墙	中等框架 + 普通抗震墙	特殊框架	中等框架	普通框架
A	< 0.03	< 0.04	< 0.02	< 0.03	< 0.03	< 0.06	< 0.02	< 0.03	< 0.06
B	0.03 ~ 0.07	0.04 ~ 0.08	0.02 ~ 0.05	0.03 ~ 0.06	0.03 ~ 0.05	0.060 ~ 0.101	0.02 ~ 0.04	0.03 ~ 0.07	0.060 ~ 0.101
C	0.07 ~ 0.10	0.08 ~ 0.13	0.04 ~ 0.07	0.06 ~ 0.08	0.05 ~ 0.08	0.011 ~ 0.170	0.04 ~ 0.06	0.07 ~ 0.10	0.011 ~ 0.170
D	0.1 ≤	0.13 ≤	0.07 ≤	0.08 ≤	0.08 ≤	0.17 ≤	0.06 ≤	0.1 ≤	0.17 ≤

ASCE 7—10 规定地震作用引起的侧移按下式计算:

$$\Delta = \frac{C_d}{I_e} \delta_{\max} \quad (8)$$

式中:  $\delta_{\max}$  为根据调整后的地震作用  $V$  按弹性方法计算的侧移;  $C_d$  为结构的侧移调整系数, 可以按表 3 确定。对于混凝土结构, ASCE 7—10 规定侧移与层高比值的限值统一为 0.02。结合表 3 和式(8)可以确定不同结构体系的实际侧移限值, 结果见表 6。从表 6 中可以得到, 规范<sup>[18]</sup>(JGJ 3—2010) 中的侧移限值要比 ASCE 7—10 的规定严格。但是考虑到设定侧移限值目的、地震作用的计算和侧移计算模型的差异, 不应直接对二者进行对比。JGJ 3—2010 规定按弹性方法计算的风荷载或多遇地震引起的楼层间最大水平位移与层高之比不宜超过表 6 的限值。此规定是为了保证在风荷载或多遇地震作用下, 建筑物的附属结构构件不至因层间侧移过大而破坏, 属于正常使用极限状态验算的范畴。根据表 3 可知, 对于不同的结构体系或者不同延性的同类结构体系, 其侧移调整系数  $C_d$  是不相同的, 从而导致其侧移限值不相同。因此 ASCE 7—10 中地震作用下的侧移限值与结构的正常使用状态没有关系, 而是与结构的延性耗能性能有关。ASCE 7—10 设定侧移限值的目的是使结构具有必要的抗侧移刚度, 防止结构侧移过大而发生倒塌。这与中国规范 GB 50011—2010 设定中大震作用下的弹塑性层间位移限值或者抗震性能设计<sup>[16]</sup> 时的位移限值的目的一致。

根据 ASCE 7—10 进行抗震设计时, 首先选定结构的延性等级, 然后确定地震作用调整系数  $R$  和侧移调整系数  $C_d$ , 最后计算结构的地震作用、确定结构侧移限值和其他抗震措施。在设防标准不变的情况下, 设计者可以选用不同的延性等级。这就意味着设计者可以自由选择地震作用调整系数  $R$  和侧移调整系数  $C_d$ , 调节结构强度要求和延性要求的相对关系。因此, ASCE 7—10 的抗震设计方法可以概括为“强度不足, 延性保证; 延性不足, 强度保证”, 应

用比较灵活; 而 GB 50011—2010 的抗震方法为“三标准设防、两阶段设计”, 可以理解为“强度必须保证, 延性根据设防标准和结构体系确定”, 即强度和延性必须保证, 要求比 ASCE 7—10 严格。

表 6 ASCE 7—10 与 JGJ 3—2010 中结构侧移限值的对比

结构类型	ASCE 7—10 实际侧移限值	JGJ 3—2010 侧移限值
特殊抗震墙	1/250	1/1000
普通抗震墙	1/200	1/1000
特殊框架 + 特殊抗震墙	1/275	1/800
特殊框架 + 普通抗震墙	1/250	1/800
中等框架 + 特殊抗震墙	1/250	1/800
中等框架 + 普通抗震墙	1/125	1/800
特殊框架	1/275	1/550
中等框架	1/225	1/550
普通框架	1/125	1/550

注: JGJ 3—2010 中侧移限值只与结构体系有关。

### 3 结 论

本文从混凝土结构体系抗震设计的角度研究了美国混凝土结构的抗震设计方法和理念, 并与中国的抗震设计方法进行了对比。得到主要结论如下:

(1) 美国规范的抗震设计理念为“强度不足, 延性保证; 延性不足, 强度保证”, 应用比较灵活; 而 GB 50011—2010 的抗震方法为“三标准设防、两阶段设计”, 可以理解为“强度必须保证, 延性要求根据设防标准和结构体系确定”。

(2) 美国规范中场地类别对结构地震作用计算影响很大, 不仅可以影响地震反应谱的形状, 也可以影响地震反映谱的幅值。地震作用计算时, 需要根据具体的场地条件对地震峰值加速度予以调整。

(3) 与中国规范相比, ASCE 7—10 采用的地震反应谱速度控制阶段比较长。相同烈度的情况下, 计算地震作用时, 美国规范的地震峰值加速度比中国规范的小; 且烈度越高, 二者的差距越大, 中国规范越保守。

## 参考文献:

- [1] 刘刚. 中国与美国规范风荷载计算分析比较[J]. 钢结构, 2010, 25(2): 47-53.
- [2] 王永华. 中美规范风荷载的计算比较[J]. 电力勘测设计, 2012(1): 67-70.
- [3] 吴纯华. 浅议中美规范风荷载计算对比[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(6): 95-98.
- [4] 袁鑫. 中美规范风压计算的差异与转换方法[J]. 建筑结构, 2000, 30(4): 33-35.
- [5] 张维秀, 王为, 张元琦. 中美规范风荷载的对比分析[J]. 石油化工设计, 2014, 31(4): 61-64.
- [6] 金峰, 陈瑞金. 中美结构设计规范风荷载计算比较[J]. 石油化工设计, 2011, 28(4): 55-59.
- [7] 魏力. 中美砌体规范的对比研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 1-77.
- [8] 周建方, 丁伟. 中美水工钢闸面板设计公式比较分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(6): 180-182.
- [9] 侯建国, 李健祥, 李扬. 中美混凝土结构抗震承载力验算安全度设置水平的比较[J]. 土木工程学报, 2010(S1): 177-185.
- [10] 江辉, 朱晔. 中美主要抗震设计规范加速度谱的近断层地震动能量检验[J]. 地震学报, 2008, 30(5): 508-517.
- [11] 李赫, 罗超英, 刘军, 等. 中美抗震规范的差异对比研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(9): 123-126.
- [12] 吴桂芳. 中美抗震规范地震作用的比较分析[J]. 建筑结构, 2012(S1): 193-196.
- [13] 严奉婷, 张炎. 中美抗震设计规范地震作用主要参数比较和转换[J]. 钢结构, 2012, 27(S1): 84-87.
- [14] 李剑. 中美抗震规范的地震作用计算与钢筋混凝土结构抗震措施的比较研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2005: 1-132.
- [15] 朱文静, 伍雨林, 夏文娟, 等. 中美抗震规范地震作用计算方法对比分析[J]. 土木工程与管理学报, 2009, 26(3): 79-85.
- [16] ASCE/SEI. Minimum Design Loads for Buildings and other Structures: ASCE 7—10[S]. U.S.A: ASCE/SEI, 2010.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [19] 柳春光, 吕晓莹, 张士博. 基于MOPSO的RC单柱墩全寿命抗震性能多目标优化设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 1-4.

~~~~~

(上接第195页)

- [4] 黎盼. 断层破碎带地段隧道施工力学行为研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [5] 包德勇. 高压富水隧道断层破碎带突涌水分析与工程对策[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(5): 123-128.
- [6] 黄劲. 公路隧道富水断层破碎带施工风险评估[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [7] 彭超. 公路隧道穿越浅埋断层破碎带工程处理技术[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1): 134-138.
- [8] 祝云华. 复杂地质条件下隧道塌方处治分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 138-141.
- [9] 孙星亮, 侯永会. 断层破碎带隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(2): 9-12.
- [10] 杨红军, 方建勤. 隧道断层破碎带对隧道施工稳定性的影响研究[J]. 公路, 2009, 12(12): 196-200.
- [11] 高啸也, 黄锋, 彭焱森, 等. 断层破碎带隧道施工阶段围岩分级研究[J]. 公路, 2009, 12(12): 196-200.
- [12] 宋瑞刚, 张顶立, 文明. 穿越断层破碎带深埋隧道围岩失稳的突变理论分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 289-292.
- [13] 中华人民共和国. 公路隧道设计规范: JTGD 70—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] 扈世民, 张顶立, 郭婷, 等. 大断面黄土隧道变形特征分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 117-122.
- [15] Xiao J Z, Dai F C, Wei Y Q, et al. Cracking mechanism of secondary lining for a shallow and asymmetrically-loaded tunnel in loose deposits[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014, 43(7): 232-240.