

余湛, 石树中, 沈建文, 刘峥, 2008. 从中国、美国、欧洲抗震设计规范谱的比较探讨我国的抗震设计反应谱. 震灾防御技术, 3(2): 136—144.

从中国、美国、欧洲抗震设计规范谱的比较 探讨我国的抗震设计反应谱¹

余 湛¹⁾ 石树中²⁾ 沈建文³⁾ 刘 峥³⁾

1) 同济大学, 上海 200092

2) 浙江省地震局, 杭州 310013

3) 上海市地震局, 上海 200062

摘要 本文分析了中国、美国、欧洲3种抗震设计规范的地震动参数取值, 并比较了3种抗震设计反应谱。结果表明, 总体上说, 欧洲、美国规范的加速度短周期反应谱高于中国规范。但随着周期的扩大, 由于中国规范中反应谱的下降指数较小, 导致了我国规范中的反应谱逐渐接近并可能超过了欧洲、美国规范。本文的结果可为我国未来抗震设计规范修订, 以及地震安全性评价工作中确定设计反应谱提供参考。

关键词: 抗震设防 反映谱 设计地震动参数 长周期

引言

沈建文等(2004)指出, 重大工程地震安全性评价(以下简称“安评”)得出的一致概率反应谱的长周期部分, 通常低于我国抗震设计规范谱。由于一般工业与民用建筑采用规范设计谱, 所以上述差异将造成长周期重大工程的抗震设防标准低于一般民用建筑的问题。规范设计谱是根据大量强震记录的统计数据, 并结合工程经验和国家的经济实力确定的, 而地震安全性评价的一致概率谱则是按照综合概率法得到的, 两者在方法上存在着根本的区别。由于两者都给出了抗震设防标准, 因此, 在安评工作中如何确定设计地震动参数已成为工程地震界普遍关注的问题。

在看到一致概率谱与我国规范设计谱的差异时, 人们自然会联想到与国外抗震规范反应谱进行比较。本文拟通过比较中国、美国、欧洲3个抗震规范及其发展, 讨论设计反应谱、特别是长周期段的取值问题, 以供工程地震界参考。

1 基金项目 浙江省重点科研社会发展项目(2005C23075)

【收稿日期】2008-03-02

【作者简介】余湛, 男, 生于1981年。同济大学土木工程学院硕士研究生。主要从事工程地震研究。

E-mail: yuxuan19810313@163.com

目前，在世界各国的抗震规范中，设计反应谱的计算大多采用相近的思路，即根据各地的地震构造和地震活动性研究结果，确定给定设防水准下地震动加速度峰值和反应谱，并通过地震力调整系数来得到设计地震动参数。考虑到各国规范中采用的设防水准和地震力调整系数有所差异，为了便于统一各国抗震规范反应谱的比较标准，本文采用同一设防水准下的地震动加速度反应谱进行比较。

1 中国、美国、欧洲抗震规范中反应谱及近期演变

抗震设计反应谱通常采用 3 个参数进行描述，即最大地震影响系数 α_{\max} 、特征周期 T_g 和长周期段反应谱曲线的衰减指数 γ 。在中国、美国、欧洲的抗震规范中，都采用了上升段、平台段（加速度控制段）、下降段（速度和位移控制段）的 3 段或 4 段谱型。以下简要介绍中国、美国、欧洲抗震规范中的 3 种设计反应谱。

1.1 中国建筑抗震设计规范

中国的《建筑抗震设计规范（GB50011-2001）》（中华人民共和国建设部等，2001）以地震影响系数 α 的形式给出设计谱，地震影响系数由设计基本地震加速度、设计地震分组、场地类别以及阻尼比确定。设计反应谱曲线包括 4 段：直线上升段、平台段、曲线下降段和直线下降段。特征周期 T_g 根据场地类别和设计地震分组查表确定。阻尼比的影响通过参数 η_1 、 γ 、 η_2 考虑。由于大多数工程中阻尼比都取为 0.05，所以在下面的反应谱比较中，阻尼比均取为 0.05。

$$\text{上升段:} \quad \alpha = [0.45 + 5.5T] \alpha_{\max} \quad T < 0.1s$$

$$\text{水平段:} \quad \alpha = \alpha_{\max} \quad 0.1s \leq T \leq T_g$$

$$\text{曲线下降段:} \quad \alpha = (T_g / T)^{0.9} \alpha_{\max} \quad T_g < T \leq 5T_g$$

$$\text{直线下降段:} \quad \alpha = [0.2^{0.9} - 0.02(T - 5T_g)] \alpha_{\max} \quad 5T_g < T \leq 6s$$

与上一版抗震设计规范 GBJ11-89 相比，GB50011-2001 反应谱周期范围由 3s 扩展到了 6s，增加了直线下降段。特征周期由近震和远震控制，改为由设计地震分组控制，如表 1 所示。与 GBJ11-89 相比，I、II、III 类场地设计特征周期约增加了 0.05s。此外，GB50011-2001 还规定，计算 VIII 度、IX 度罕遇地震作用时，特征周期应增加 0.05s，以考虑大地震反应谱较宽的影响。

表 1 特征周期值 (s)

Table 1 Values of characteristic period (s)

设计地震分组	场地类别			
	I	II	III	IV
第一组	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.30	0.40	0.55	0.75
第三组	0.35	0.45	0.65	0.90

1.2 美国 NEHRP 规范

美国 NEHRP 规范由建筑抗震安全理事会（Building Seismic Safety Council）主持编写，每 3 年修订一次，为推荐性规范（Building Seismic Safety Council, 2004）。一般来说，美国

NEHRP 规范中有关反应谱的规定将在下一版的 UBC 中体现, 因此有一定的前瞻意义。美国 NEHRP2003 规范中地震影响系数的表达式为:

$$\text{上升段: } S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS} \quad 0 \leq T \leq T_0$$

$$\text{水平段: } S_a = S_{DS} \quad T_0 \leq T \leq T_S$$

$$\text{曲线下降一段: } S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad T_S \leq T \leq T_L$$

$$\text{曲线下降二段: } S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad T_L \leq T$$

其中: 参数 $S_{DS} = (2/3) F_a S_S$, $S_{D1} = (2/3) F_v S_1$, 分别为周期 0.2s 与 1s 处的设计地震动加速度值; S_S 、 S_1 为反应谱 0.2s 与 1s 处 B 类土 (相当于基岩) 上重现期 2500 年 (大致相当于 50 年超越概率 2%) 的设防加速度值, 该值可从 USGS 提供的美国各地的地震动参数区划图中查到; 系数 F_a 、 F_v 是由土类别及 S_S 、 S_1 共同决定的场地影响系数, 见表 2 和表 3, 此系数相当于场地放大系数。

表 2 美国 NEHRP2003 规范中场地系数 F_a 值

Table 2 Values of site coefficient F_a in NEHRP2003

场地类型	周期 0.2s 基岩有效峰值加速度/g				
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.5$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1$	$S_S \geq 1.25$
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

表 3 美国 NEHRP2003 规范中场地系数 F_v 值

Table 3 Values of site coefficient F_v in NEHRP2003

场地类型	周期 1s 基岩有效峰值加速度/g				
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 \geq 0.50$
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

平台段起始周期 $T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS}$, 平台段终止周期 $T_S = S_{D1} / S_{DS}$, T_L 为与地震分区及震级有关的长周期段过渡周期, 可从 USGS 给出的美国各区长周期段过渡周期图中查出。美国 NEHRP 2003 规范中直接给出了 T_L 图, 按地理位置大致分为 4s、6s、8s、12s 和 16s。

在长周期方面, 美国 NEHRP85、88、91 版规范中曲线下降一段采用 2/3 的衰减指数, NEHRP97 和 NEHRP2000 规范中衰减指数修改为 1。与上一版 NEHRP2000 规范相比,

NEHRP2003 规范增加了 T^{-2} 下降段，其下降速度大于一段，控制周期 T_L 为速度控制段与位移控制段的过渡周期，其数值与震级有一定对应关系，见表 4。

表 4 美国 NEHRP2003 规范中震级与长周期过渡周期的对应关系

Table 4 Corresponding relation of magnitude and long-period transition period in NEHRP2003

M	6.0—6.5	6.5—7.0	7.0—7.5	7.5—8.0	8.0—8.5	8.5—9.0
$T_L(s)$	4	6	8	12	16	20

1.3 欧洲规范 EU8

欧洲规范 EU8 以加速度影响系数给出设计反应谱曲线 (European Committee for Standardization, 2003), EU8 在 2003 版草案中给出的反应谱表达式为:

$$\text{上升段: } S_e = a_g S [1 + 1.5 \frac{T}{T_B}] \quad 0 \leq T \leq T_B$$

$$\text{水平段: } S_e = 2.5 a_g S \quad T_B \leq T \leq T_C$$

$$\text{曲线下降一段: } S_e = 2.5 a_g S [\frac{T_C}{T}] \quad T_C \leq T \leq T_D$$

$$\text{曲线下降二段: } S_e = 2.5 a_g S [\frac{T_C T_D}{T^2}] \quad T_D \leq T \leq 4$$

其中: a_g 是与地震分区相关的分区系数, 可从欧洲各国设防地震动参数图中查到; S 为场地放大系数, 由场地土类别决定; T_B 、 T_C 、 T_D 同样为只由场地土类别决定的特征周期。

EU8 在 2003 版草案中将弹性反应谱分为两类, 规定在利用危险性分析方法时, 对场点贡献最大的地震面波震级 $M_s \geq 5.5$ 时, 采用第一类弹性反应谱。本文所比较的也正是第一类弹性反应谱, 见表 5。

表 5 欧洲规范 EU8 中第一类弹性反应谱的各参数值

Table 5 Parameters describing the recommended Type 1 elastic response spectrum

场地类别	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1	0.15	0.4	2.0
B	1.2	0.15	0.5	2.0
C	1.15	0.20	0.6	2.0
D	1.35	0.20	0.8	2.0
E	1.4	0.15	0.5	2.0

2 设计地震反应谱 3 个参数的比较

2.1 平台段值的比较

在中国的 GB50011-2001 规范中, a_{\max} 由设防地震动强度决定, 场地条件的影响未得到体现。

在美国的 NEHRP 规范中, 从 94 版开始通过 2 个场地影响系数 F_a 和 F_v 来调整不同场地

的谱形,平台段值 S_{DS} 包含了与场地相关的调整系数 F_a ,而 F_a 随着设防地震动参数 S_S 的增大而减小。

在欧洲规范 EU8 中,平台段值 $S_e=2.5a_g S$,由场地影响系数 S 和地震分区系数 a_g 决定,平台段值同样也随着场地及各地设防地震动参数影响而发生变化。

2.2 特征周期的比较

在中国的 GB50011-2001 规范中,平台段起始周期取为定值 0.1s,终止周期 T_g 根据设计地震分组(考虑到近远震及震源机制)与场地类别确定。

在美国的 NEHRP2003 规范中,平台段起始周期 T_0 ($T_0=0.2S_{D1}/S_{DS}=0.2F_v S_1/F_a S_S$) 和平台段终止周期 T_S ($T_S=S_{D1}/S_{DS}=F_v S_1/F_a S_S$) 都随着场地影响系数 F_a 、 F_v 和地震动参数取值 S_S 、 S_1 而改变。

在欧洲规范 EU8 的反应谱中,平台段起始周期 T_B 和终止周期 T_C 是在考虑了近、远震影响的基础上,根据场地土类别进行判定的。

从以上比较可见,3 个规范都注重场地条件及近、远震对特征周期的影响,其中,美国的规范还考虑了地震动强度对特征周期的影响,而中国和欧洲的规范则未体现。

2.3 衰减指数的比较

衰减指数 γ 是对长周期部分影响最为显著的因素。在中国的 GB50011-2001 规范中,曲线的下降一段延续了与 89 规范相同的衰减指数 0.9。在美国的 NEHRP2003 规范中,除保留了与 NEHRP2000 相关的规定外,还增加了衰减指数为 2 的长周期下降段。在欧洲规范 EU8 中,长周期下降一段与二段的衰减指数分别为 1 和 2。

从以上 3 个规范衰减指数的修订与对比中,可以看出:

(1) 中国 GB50011-2001 规范中的曲线下降段衰减指数 0.9,低于美国和欧洲规范 0.5 倍 T_g 到 6s 的直线下降区间段,大部分对应于美国 NEHRP2003 规范衰减指数为 1 的下降区间段。如果将周期延长到美国 NEHRP2003 规范中衰减指数为 2 的下降控制段,则中国 GB50011-2001 规范中长周期下降趋势将更显保守。

(2) 美国 NEHRP 规范中衰减指数有较大变动,反应谱在长周期段的下降速度加快,这反映出长周期结构设防标准有降低的趋势。

(3) 欧洲规范 EU8 中的反应谱在 2s 前的下降一段取用 1 的衰减指数,与美国 NEHRP2003 规范取值相同。而在 2s 到 4s 的下降二段衰减指数为 2,比美国 NEHRP2003 规范中曲线下降一段的下降速度更快。

3 中国、美国、欧洲现行规范反应谱值的对比

为了便于直观的比较 3 种规范反应谱值的差异程度,以下就典型情况对 3 种规范反应谱值做定量对比。

3.1 土类对比

由于土的分类在 3 种规范中的划分方法有所不同,为了便于对比,根据土层的剪切波速并结合罗开海等(2006)提出的方法,对 3 种规范中土的类型进行转换。3 种规范的土类剪切波速对比情况如表 6 所示,按照上述类比方法,中国 I 类土对应美国 B 类、欧洲 A 类;中国 IV 类土对应美国 E 类、欧洲 D 类。

表 6 3 种规范中各土类的剪切波速 (m/s)

Table 6 Shear wave velocity of different soil types in the codes from different countries

土层剪切波速	A	B	C	D	E
美国 NEHRP2003 规范	>1500	760—1500	370—760	180—370	<180
欧洲规范 EU8	>800	360—800	180—360	<180	其它
中国 GB50011-2001 规范		>500 (I)	250—500 (II)	140—250 (III)	<140 (IV)

3.2 地震动参数对比

目前, 中国规范采用多遇和罕遇地震作为设计地震动参数, 罕遇地震相当于 50 年超越概率 2%—3% 的抗震设防水准, 与美国地震动参数区划图中提供的 2500 年重现期的谱加速度的抗震设防水平大致相同。针对此种情况, 本文取用中国规范罕遇地震下的反应谱与美国规范的设防谱加速度进行对比。设防水平分别取Ⅶ度 (0.1g) 和Ⅷ度 (0.2g) 2 种情况。美国 NEHRP2003 规范的双参数中的 S_S , 按照中国规范Ⅶ度、Ⅶ度罕遇地震下的最大地震作用取值, 分别为 0.5g 和 0.9g; 而从美国双参数区划图中可得到对应于 S_S 等于 0.5g 的参数 S_1 取值在 0.15g—0.25g 之间, 对应于 S_S 等于 0.9g 的参数 S_1 取值在 0.25g—0.4g 之间, 此处取较为保守的 0.25g 和 0.4g。中国 GB50011-2001 规范按保守值取设计地震分组的第三组。美国 NEHRP2003 规范中的长周期过渡周期 T_L 根据震级关系依次取为Ⅶ度 4s, Ⅷ度 6s。由于欧洲规范采用单一的设防标准, 即 50 年超越概率 10% 对应重现期 475 年, 因此, 中国、欧洲规范的对比取用相同的 50 年 10% 的标准。

3.3 反应谱对比

按照以上条件本文给出了中国 GB50011-2001 规范、美国 NEHRP2003 规范、欧洲规范 EU8 在 2 种场地上的反应谱对比。图 1—图 4 表示罕遇地震下 (相当于 50 年超越概率 2%—3%) Ⅶ度区 I 类、IV 类场地, 以及Ⅷ度区 I 类、IV 类场地的中国、美国规范反应谱对比。图 5 和图 6 表示基本烈度下Ⅷ度区 I 类、IV 类场地的中国、欧洲规范反应谱对比 (Ⅶ度区结果与Ⅷ度区结果相似)。

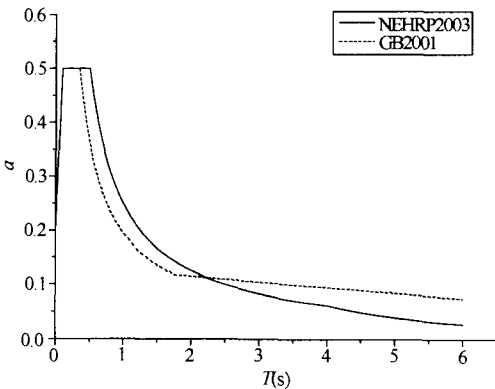


图 1 Ⅶ度区 I 类场地罕遇地震的中国、美国规范反应谱对比

Fig.1 Comparison for response spectrum between codes of China and the U.S. in site I under rare earthquake of intensity VII

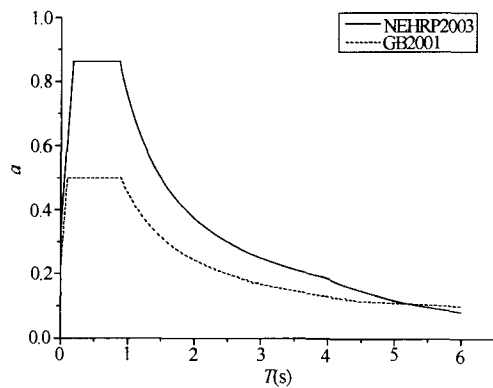


图 2 Ⅶ度区 IV 类场地罕遇地震的中国、美国规范反应谱对比

Fig.2 Comparison for response spectrum between codes of China and the U.S. in site IV under rare earthquake of intensity VII

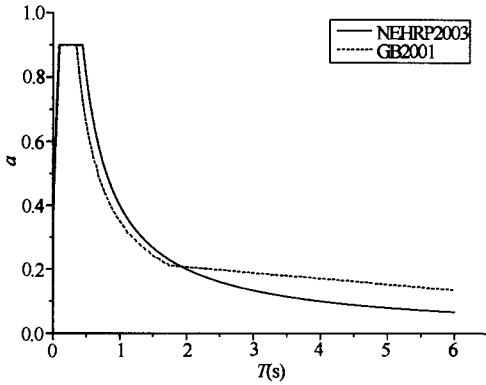


图3 VIII度区 I 类场地罕遇地震的中国、美国规范反应谱对比

Fig.3 Comparison for response spectrum between codes of China and the U.S. in site I under rare earthquake of intensity VIII

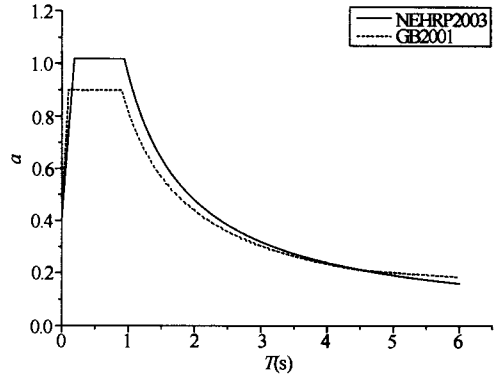


图4 VIII度区 IV 类场地罕遇地震的中国、美国规范反应谱对比

Fig.4 Comparison for response spectrum between codes of China and the U.S. in site IV under rare earthquake of intensity VIII

从图 1—图 4 中可以看出：在统一标准为 50 年超越概率 2% 的情况下，对于 I 类场地，中国规范相比美国规范的特征周期值偏小；而在 IV 类场地，中国规范和美国规范的特征周期值大体相当。同时，对于 IV 类场地，由于美国规范场地放大系数的影响，其平台值高于中国规范；但由于中国和美国规范中衰减指数以及下降段表达式的差别，对于 I 类场地在周期 2s 以后，中国规范的反应谱进入直线下降段，其中长周期反应谱值大于美国规范；对于 IV 类场地，虽然美国规范平台值明显高于中国规范，但 5s 以后中国规范平台值开始大于美国规范。

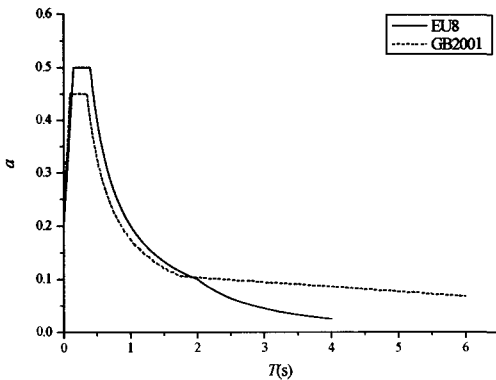


图5 基本烈度下 VIII 度区 I 类场地中国、欧洲规范的反应谱对比

Fig.5 Comparison for response spectrum between codes of China and Europe in site I of basic intensity VIII

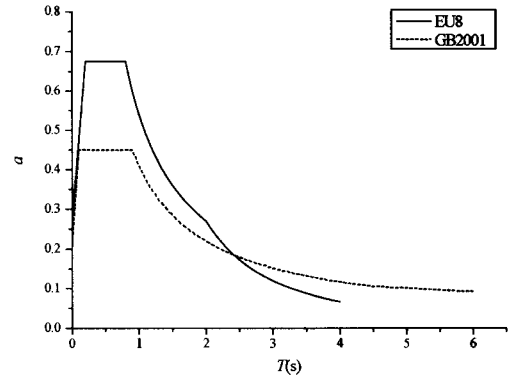


图6 基本烈度下 VIII 度区 IV 类场地中国、欧洲规范的反应谱对比

Fig.6 Comparison for response spectrum between codes of China and Europe in site IV of basic intensity VIII

从图 5 和图 6 可以看出：在对应 50 年超越概率 10% 的情况下，欧洲规范中反应谱的平台值要高于中国规范，特征周期值大体相近；但由于中国和欧洲规范中衰减指数以及下降段表达式的差别，对于 I 类场地在周期 2s 以后和 IV 类场地在周期 2.5s 以后，欧洲规范的长周期反应谱值迅速低于中国规范。

4 结论和建议

从上述的比较可以看出,总体上说,现行的欧洲和美国规范的设计反应谱短周期部分高于中国规范。但随着周期的加大,由于中国规范反应谱下降指数较小,使得中国规范的反应谱逐渐接近并超过欧洲和美国规范。

本文的结果可作为我国未来规范修订的参考。这里需主要考虑的问题是:地震影响系数最大值是否有必要随场地调整?长周期段衰减指数取值是否可适当增大?

本文的结果也可作为安评工作中确定设计反应谱的参考。从工程安评实例看,一致概率谱在长周期段的取值普遍低于我国现行的规范谱。沈建文等(2004)曾用极端典型的算例对此进行过讨论。我国的安评规范没有规定与安评场地相关的一致概率反应谱一定要高于相应的规范谱。从理论上说,当潜在震源、衰减、土层反应等安评各环节的不确定性均较小,安评的结果较可靠时,在不同特征周期的结构取相同风险水平(一致概率)的意义上,应该提供安评所得到的场地相关谱,或在此基础上标定的标准谱。若考虑到现行安评的各环节尚有较大的不确定性时,长周期段可以取适当保守的结果。但应该清楚,我国规范谱长周期段的下降指数是相对较为保守的。

另一方面,欧洲规范对大于4s的长周期段,建议采用与位移谱相结合的方式来决定设防地震动参数。当长周期段加速度谱值过低时,有可能使加速度反应谱在一定程度上因为取值太小而失去控制作用。随着长周期及超长周期建筑的增多,对长周期结构的抗震设计值得进行深入研究。

参考文献

- 罗开海,王亚勇,2006.中美欧抗震设计规范地震动参数换算关系的研究.建筑结构,36(8):103—107.
- 沈建文,石树中,2004.一致概率谱与规范谱.地震学报,26(1):94—101.
- 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局,2001.建筑抗震设计规范(GB50011-2001).北京:中国建筑工业出版社.
- Building Seismic Safety Council,2004.2003 Edition NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures,FEMA450,Part 1 (Provisions) and Part 2 (Commentary),developed for the Federal Emergency Management Agency,Washington,DC.
- European Committee for Standardization,2003.Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings DRAFT No. 6 Version for Translation (Stage 49), January 2003.

Discussing the Seismic Response Spectrum of China from the Comparison of Seismic Codes of China, American and Europe

Yu Zhan¹⁾, Shi Shuzhong²⁾, Shen Jianwen³⁾ and Liu Zheng³⁾

1) Tongji University, Shanghai 200092, China

2) Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China

3) Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China

Abstract This article analyses the seismic parameters and their trend in seismic codes of China, American and Europe. The results illustrate that, generally speaking, the short period acceleration response spectra in Europe and American are higher than China. However, with the increasing of the periods, the spectra of China will close and even overpass that of the other two codes, because of the smaller index in long periods. Our results can be used as references in the work of code revising and response spectra determination in seismic safety evaluation.

Key words: Seismic design; Response spectrum; Design parameters of ground motion; Long period