

江辉, 朱晞. 2008. 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. 地震学报, 30(5): 508-517.
Jiang Hui, Zhu Xi. 2008. Testing the acceleration spectra given by China and USA seismic codes based on energy supply in near-fault region. *Acta Seismologica Sinica*, 30(5): 508-517.

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^{*}

江 辉^{*} 朱 希

(中国北京 100044 北京交通大学土木建筑工程学院)

摘要 近场地震通常有显著的脉冲型高能输入, 有必要从能量角度对现行抗震规范进行有效性检验, 以探讨规范加速度设计谱能否体现近断层区域地震地面运动的能量耗散需求。基于本文作者所建议的 5% 阻尼比下谱速度与输入能量等效速度之间关系, 推导了与当前中、美主要抗震设计规范(GB50011-2001, UBC97)加速度谱相容的输入能量谱, 并对其适用范围进行了讨论。将其与基于实际近断层记录分组所得的输入能量设计谱进行对比表明, 我国 GB50011-2001 规范除软土地场地的 9 度罕遇烈度外均难以体现近场地震的能量要求, 有必要对设计谱平台高度进行调整; 而美国 UBC97 规范则在除 S_A 类场地之外的其它条件下均能较好地与 15 km 范围内的近场能量需求相吻合, 从而也证明了本文推导方法的正确性。

关键词 近断层地震动 能量检验 抗震规范 谱速度放大因子

文章编号: 0253-3782(2008)05-0508-10 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Testing the acceleration spectra given by China and USA seismic codes based on energy supply in near-fault region

Jiang Hui^{*} Zhu Xi

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For near-fault ground motion, there should be a remarkable impulsive energy supply. Therefore, it is essential to check the validity of actual seismic design codes with energy balance concept. Based on the relationship between the spectrum velocity and the input energy equivalent velocity with 5% damping ratio, the input energy spectra compatible with main China and USA seismic codes were derived, and the accuracy and applicability were verified by using near-fault records. The recommended energy input design spectrum (EIDS) applicable to the distance of 0—15 km from fault was introduced to check the validity of modern seismic codes. Comparison tests show that the GB50011-2001

* 基金项目 国家自然科学基金(50278002, 50578007)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(200040004025)资助。

收稿日期 2007-12-10 收到初稿, 2008-08-13 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: jianghui@bjtu.edu.cn

Code of China can just match the energy effect of near-fault ground motion to a certain extent only under seldom occurred earthquake with fortification intensity of 9 degree for site soil of III and IV, indicating that the impact of near-fault effect has not been embodied in the current code acceleration spectrum. In order to make the design spectrum be applicable to near-fault region, it is necessary to adjust the spectrum platform parameters. On the contrary, for distinct fault distance and site soil, the UBC97 Code of USA can match well with the energy supply of near-fault ground motion except for the site soil of hard rock (S_A). Accordingly, correctness of the formula derivation in this paper is certified.

Key words: near-fault ground motion; energy test; seismic design code; spectrum velocity amplification factor

引言

近十几年来,尤其是1999年我国台湾地区的集集(Chi-Chi)地震发生以来,靠近活动断层区域的地震动特性和震害特征引起了地震工程和工程抗震界的广泛关注。近断层地震(也称近场地震)一个显著的特征,就是靠近活动断层区域的长持时脉冲型高能量输入(Somerville *et al*, 1997),对建筑和桥梁结构提出了更高的能量耗散需求(Chou, Uang, 2000; 公茂盛等, 2003)。鉴于近场地震的特殊性和对结构的重要影响,美国在1994年Northridge地震的3年后,颁布了1997版统一建筑规范UBC97(International Council of Building Officials, 1997),是世界上首部从理论上明确考虑0—15 km断层范围内近场效应的抗震设计规范,通过引入近场因子对标准加速度设计谱进行调整。1995年Kobe地震和1999年Chi-Chi地震发生后,日本和我国台湾分别修订了本地区抗震设计规范,加强了近场区的设防措施。而我国现行建筑抗震设计规范(GB50011-2001)(国家质量监督检验检疫总局,中华人民共和国建设部,2001)对于靠近活动断层区域的结构抗震采取最小避让距离的办法来处理,还没有从专用设计反应谱的角度对近场问题进行解决,是需要深入讨论的问题。而自UBC97规范颁行以来,随着1999年土耳其Kocaelia、Duzce地震和我国台湾Chi-Chi地震的发生,又积累了相当数量的靠近活动断层区域的强震记录,有必要对我国GB50011-2001规范和美国UBC97规范在近断层区域的适用性展开基于能量效应的检验和重新认识。本文在推导了与谱加速度相容的等效能量需求计算方法的基础上,收集了世界范围内的近断层强震记录,对GB50011-2001和UBC97规范进行了以能量为指标的适用性检验,获取了两种规范的有效范围,提出了我国规范改进的方向,可供此类区域抗震设计参考。

1 GB50011-2001 和 UBC97 规范对跨越断层区域结构抗震设计的规定

1.1 我国建筑抗震设计规范 GB50011-2001 的规定

我国于2001年颁行了新的建筑抗震设计规范(GB50011-2001),针对建设场地内存在的发震断层提出了评估要求,但只是根据建筑设防类别规定了发震断层的最小避让距离(表1),说明我国抗震规范虽然认识到断层的危害性,但缺乏专用的近场区加速度设计谱。

而我国一些重要的城市，如成都、乌鲁木齐、兰州和西宁等均处于地震的近场区范围，如何合理进行近断层区结构的抗震设防和设计已成为突出的问题。

1.2 美国 UBC97 规范考虑近场地震特征的设计谱规定

美国 UBC97 规范是世界上首部明确考虑了近断层地震效应的抗震设计规范。以 50 年超越概率 10% 把全美国划分为 5 个地震区，对应的有效峰值加速度分别为 $0.075g$, $0.15g$, $0.20g$, $0.30g$ 和 $0.40g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)，其中需要考虑近场效应的 Zone 4 区主要分布在西海岸加州境内。

在该规范中，根据矩震级(M_w)、活动断层的年滑移量(S_R)等指标将断层划分为 A, B, C 三类。对于 Zone 4 区，根据靠近断层的距离和断层类型给出了近场因子 N_a 和 N_v 的取值

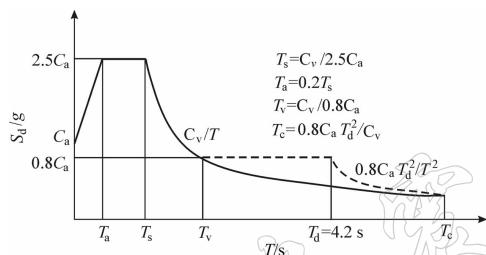


图 1 UBC97 标准谱(实线)与近场谱(虚线)对比(5% 阻尼比)

Fig. 1 Comparison between standard spectrum (solid line) and near-fault spectrum (dashed line) of UBC97 Code (5% damping ratio)

表 1 GB50011-2001 规范对发震断裂最小避让距离(单位: m)的规定

Table 1 The shortest giving-way distance (m) from active fault after the GB50011-2001 Code

设防烈度	建筑抗震设防类别			
	甲	乙	丙	丁
8	专门研究	300	200	
9	专门研究	500	300	

(表 2)，通过地面反应系数 C_a 和 C_v 对设计谱进行调整。图 1 给出了 UBC97 规范标准谱与近场谱的对比，可以看出，通过 N_a 和 N_v 的调整，考虑近场效应的近场设计谱长周期下降段与对应的标准设计谱有所不同，近场设计谱存在高度为 $0.8C_a$ 的第二平台段，而标准谱在对应周期段是以 C_v/T 为斜率衰减的，近场设计谱考虑了中长周期结构在近场下更强的地震需求。但值得注意的是，UBC97 规范近场因子是根据矩震级小于 7.0 的地震记录得到的，且采用的记录较少，有必要结合近年来获得的记录对其适用性进行检验。

表 2 UBC97 规范对近场因子 N_a 和 N_v 的规定
Table 2 Near-fault factor N_a and N_v after UBC97 Code

断层类型	震源描述	断层距离							
		$\leq 2 \text{ km}$		5 km		10 km		15 km	
		N_a	N_v	N_a	N_v	N_a	N_v	N_a	N_v
A	$M_w \geq 7.0, S_R \geq 5.0$	1.5	2.0	1.2	1.6	1.0	1.2	1.0	1.0
B	介于 A 类与 C 类间的其它情况	1.3	1.6	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
C	$M_w \leq 6.5, S_R \leq 2.0$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

2 与规范加速度设计谱相容的能量谱推导及其适用范围讨论

2.1 地震记录数据库

由于结构的地震响应与其靠近断层的距离有直接关系，本文在挑选地震记录时将断层距作为主要条件之一。结合 UBC97 规范的定义，3 个条件分别是：① 断层投影距离 $d_f \leq 15$

km; ② 地面峰值加速度 $a_{pg} \geq 0.05g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$); ③ 矩震级 $M_w \geq 5.0$. 符合条件的地震事件列于表 3. 从表中可看出, 所选记录主要来自美国历次地震和我国台湾地区的 Chi-Chi 地震, 而美国地质调查局和我国台湾地区的场地分类标准并不相同, 二者只能近似统一, 且有部分近断层记录没有更加详细的场地资料, 难以按照现行的抗震设计规范给出精确的分类. 因此本文结合美国地质调查局和我国台湾地区的场地分类标准, 将美国地质调查局的 A 类、B 类场地和我国台湾地区的基岩场地作为本文的 S_1 (rock soil) 场; 将美国地质调查局的 C 类场地和我国台湾地区的中等场地作为本文的 S_2 (median soil) 场; 将美国地质调查局的 D 类场地和我国台湾地区的土层场地作为本文的 S_3 (soft soil) 场. 同时, 为了考虑断层距的影响, 所挑选近场强震记录按照断层距离 0—5 km、5—10 km 和 10—15 km 分成 3 类. 根据上述分类方法, 将所得 16 次主要地震事件(表 3)中符合条件的 109 组、214 条地震记录(按照本文的选波标准, 成组记录中若只有一个方向符合要求, 则只挑选符合标准的单个水平分量)分为 9 组(表 4). 场地 S_1 根据断层距 3 个类别划分依次有 29 条、22 条、32 条; 场地 S_2 依次有 16 条、18 条、10 条; 场地 S_3 依次有 30 条、27 条、30 条.

表 3 所选择的地震事件

Table 3 Earthquakes selected for analysis

编号	地震事件	日期	震级(M_w)	记录数
1	Chi-Chi	1999-09-20	7.6	78
2	Coyote Lake	1979-08-06	5.7	10
3	Hollister	1974-11-28	5.2	7
4	Kocaeli	1999-08-17	7.4	7
5	Loma Prieta	1989-10-18	6.9	14
6	Northridge	1994-01-17	6.7	26
7	San Francisco	1957-03-22	5.3	2
8	Cape Mendocino	1992-04-02	7.1	4
9	Duzce, Turkey	1999-11-12	7.1	4
10	Imperial Valley	1979-10-15	6.5	40
11	Livermore	1980-01-27	5.4	3
12	Lytle Creek	1970-09-12	5.4	2
13	Landers	1992-06-28	7.3	2
14	Parkfield	1966-06-28	6.1	5
15	Kobe	1995-01-16	6.9	8
16	Westmorland	1981-04-26	5.8	2

表 4 所选择地震记录按场地土类型和断层距分组

Table 4 Earthquake records grouped after soil type and fault distance

场地类型	断层距 d_f 记录分组			合计
	0—5 km	5—10 km	10—15 km	
硬场地(S_1)	29/15	22/11	32/17	83/43
中等场地(S_2)	16/8	18/9	10/5	44/22
软场地(S_3)	30/15	27/14	30/15	87/44

注: 每组中斜线前的数字为地震记录条数, 斜线后的数字为地震记录组数.

2.2 基于加速度设计谱的能量谱推导

为了对规范设计谱从能量角度加以检验, 需要寻找谱加速度与输入能量等效速度之间关系. 基于谱速度与输入能量等效速度间关系(江辉, 2007), 推导了与规范加速度设计谱相容的输入能量等效速度谱的计算方法:

1) 对单质点弹性体系运动微分方程进行积分分析可知, 当阻尼比 $\xi < 0.10$ 时, 可忽略其影响, 有阻尼弹性 SDOF(single degree of freedom)系统绝对谱加速度 a_s 与拟谱速度 v_{ps} 之间存在如下的关系:

$$a_s(T, \xi) = \omega v_{ps}(T, \xi) \Rightarrow \\ v_{ps}(T, \xi) = a_s(T, \xi)/\omega \quad (1)$$

式中, T 为体系自振周期, ω 为体系自振圆频率, 从而可由设计谱加速度求得对应周期的拟谱速度.

2) 根据 Hudson (1962) 的研究结果, 除了在特别长周期段, 谱速度 v_s 与 v_{ps} 差别微小. 结合式(1), 则存在

$$v_{ps}(T, \xi) \cong v_s(T, \xi) \Rightarrow \\ v_s(T, \xi) = a_s(T, \xi)/\omega \quad (2)$$

在 5% 阻尼条件下, 引入谱速度放大因子 Ω_{v_s} (江辉, 2007), 可由谱速度 v_s 计算输入能量等效速度

$$v_e = v_s \cdot (1/\Omega_{v_s}) \Rightarrow v_e = [a_s(T, \xi)/\omega] \cdot (1/\Omega_{v_s}) \quad (3)$$

式中, Ω_{v_s} 为所定义的谱速度放大因子, 按式(4)和表 5 取值为

$$\Omega_{v_s} = \begin{cases} a_1 T / T_1 & 0 < T \leqslant T_1 \\ a_1 + a_2 (T - T_1) & T_1 < T < 5.0 \text{ s} \end{cases} \quad (4)$$

式中, T_1 为拐点控制周期; a_1 和 a_2 为拟合系数, 回归分析表明断层距是影响参数分布的主要因素, 其取值见表 5. 即可由式(3)推导得到与规范设计谱加速度相容的输入能量等效速度 v_e .

2.3 适用范围讨论

然而, 式(2)的成立是有条件的. 尽管 Hudson(1962)指出除了特别长周期外该式均成立, 但没有给出明确的定量范围, 有必要对其适用区间进行研究. 这是从谱加速度推导能量等效速度的核心基础之一. 并且由于 GB50011-2001 和 UBC97 规范设计谱在中长周期段对结构应具有的抗侧能力有一个最低要求, 从而规定了下平台. 若根据这一规定, 用式(2)计算所得的拟谱速度会随着周期的增大而迅速增大, 这显然也是不对的. 倪永军(2001)在由加速度谱求解对应位移谱时也发现了在高阻尼条件下的长周期段存在位移值随周期迅速增大的问题, 提出采用地震地面运动最大位移(d_{pg})来予以限制, 但并未对其产生原因进行讨论. 欧洲 Eurocode 8 规范(European Committee for Standardization, 2003)发现类似问题的存在, 因而规定长周期段谱位移值不能大于地震地面运动最大值 d_g , 并建议

$$d_g = 0.025a_g \cdot S \cdot T_c \cdot T_D \quad (5)$$

其中, a_g 为设计地震加速度, S 为场地类型参数, T_c 为加速度设计谱曲线上平台末端周期, T_D 为设计谱常位移段开始周期.

图 2 给出了通过谱分析所得的两条地震记录(表 6)的拟速度谱和速度谱. 表 6 中 t_d 为 95% 强震持时(Trifunac, Brady, 1975). 当周期小于 2.4 s 时, 拟谱速度和谱速度能很好吻合; 超过 2.4 s 之后, 二者之间差别随着周期延长而逐渐增大, 从数值的角度证明了式(2)的成立是有周期范围的.

为了探讨式(2)近似关系成立的有效周期范围, 这里利用所选择的 109 组地震记录, 分 3 类场地计算了拟谱速度与谱速度的比值分布, 并对平均值按照 80% 的置信区间(比值在 0.8—1.2 之间)分析其有效周期范围(图 3). 为了图形的清晰, 图中仅列出部分记录和每类场地所有记录计算结果的均值. 可以看出, 在中短周期范围内, 拟谱速度均能与谱速度较好吻合, 二者比值在以 1.0 为中值的区间内分布; 当结构周期超过一定范围后, 二者差别

表 6 用于验证的两条近场地震记录

Table 6 2 near-fault seismic records used for testing conformation

记录台站	地震事件	M_w	d_f/km	$a_{pg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	$v_{pg}/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	有效持时 t_d/s	T_g/s	T_p/s
Pacoima Dam	1971 San Fernando	6.7	0	1201.5	112.5	7.05	0.6	1.8
Rinaldi	1994 Northridge	6.7	0	821.2	166.1	7.04	1.3	1.7

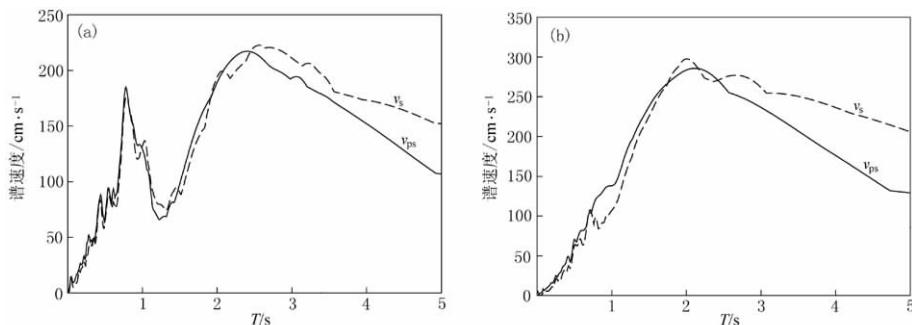
图 2 实际记录的拟速度谱(v_{ps})与速度谱(v_s)对比(5%阻尼比). (a) Pacoima Dam; (b) Rinaldi

Fig. 2 Comparison between the pseudo velocity spectrum and velocity spectrum of earthquake records (5% damping ratio). (a) Pacoima Dam; (b) Rinaldi

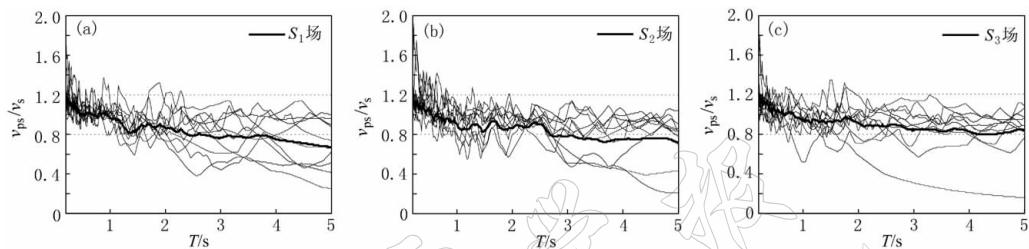


图 3 不同场地拟谱速度、谱速度比值分布(5%阻尼比)

(a) S_1 场地; (b) S_2 场地; (c) S_3 场地

Fig. 3 Ratio of pseudo spectrum velocity over spectrum velocity for different soil types (5% damping ratio)

(a) Site soil of S_1 ; (b) Site soil of S_2 ; (c) Site soil of S_3

增大,且随着场地土的变软,分界周期延长。具体来说,对于 S_1 , S_2 和 S_3 三类场地,其 80% 置信区间拐点周期分别为 2.4 s, 2.8 s 和 4.0 s。对有效周期范围的分析可以部分解释欧洲 Eurocode 8 规范从谱加速度求解对应谱位移时在长周期段上飘的原因,也为下文由谱加速度推导的能量等效速度给出了进行数值对比的有效周期范围。图 4 给出了按照本文建议方法[式(2)一式(4)]所得的与 GB50011-2001、UBC97 规范加速度设计谱相容的能量等效速度谱。可以看出,随着场地土变软,能量需求增大;随着断层距下降,能量需求上升,与实际记录计算所得规律相一致。同时也应该看到,由于式(2)成立的有效周期范围在不同场地是不一样的,分别为 0—2.4 s(S_1 场地)、0—2.8 s(S_2 场地)和 0—4.0 s(S_3 场地),因而图 4 中各类场地超过对应周期段的能量等效速度值是没有参考价值的。因此,本文的讨论主要集中在所界定的有效周期范围内进行。

3 抗震设计规范加速度谱的能量检验

在收集世界范围内的近场强震记录的基础上,本文作者采用半理论、半经验的方法提出了适用于 0—15 km 断层范围、与峰值加速度 $a_{pg}=0.4g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)相对应的输入能量设计谱(energy input design spectra, 缩写为 EIDS)(江辉, 朱晞, 2006),并分 3 类场地(S_1 , S_2 , S_3)和 3 种断层距离(0—5 km, 5—10 km, 10—15 km)分别给出了输入能量等效速度谱的拐点周期和平台高度取值。图 5 给出了 S_1 和 S_2 场地建议设计谱与实际记录计算

值的对比。本文以所建议的能量设计谱为基础, 对我国现行建筑抗震设计规范和美国 UBC97 规范进行能量检验, 讨论其是否能够适用于此类区域考虑近场效应的抗震需求。

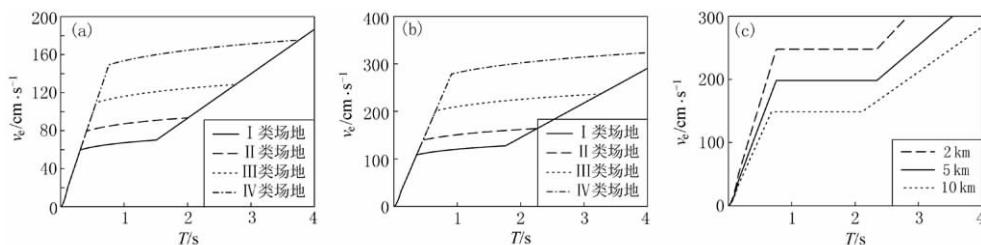


图 4 与 GB50011-2001 和 UBC97 规范加速度设计谱相容的输入能量等效速度谱

(a) 与 GB50011-2001 规范 8 度罕遇烈度所对应的等效速度谱; (b) 与 GB50011-2001 规范 9 度罕遇烈度所对应的等效速度谱; (c) 与 UBC97 规范 Zone 4 区 S_c 场地所对应的等效速度谱

Fig. 4 Energy input equivalent velocity spectrum compatible with the design acceleration spectrum of GB50011-2001 as well as UBC97 Code

(a) Corresponds to GB50011-2001 Code under seldom occurred earthquake with fortification intensity of 8 degree; (b) Corresponds to GB50011-2001 Code under seldom occurred earthquake with fortification intensity of 9 degree; (c) Corresponds to UBC97 Code under site soil of S_c in Zone 4

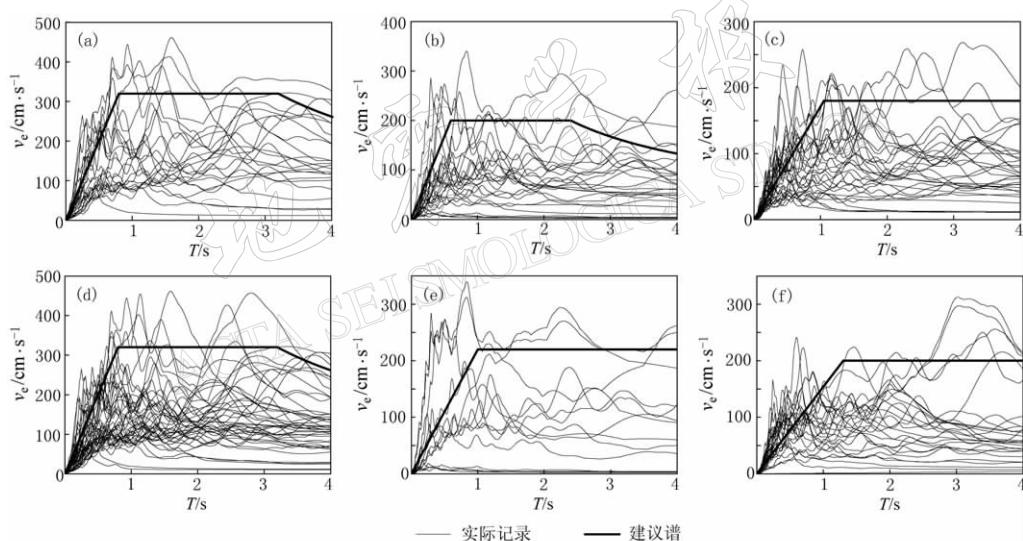


图 5 输入能量设计谱与实际地震记录计算值的对比

(a)、(b)、(c) 分别为 S_1 场地 0—5 km、5—10 km、10—15 km 断层距下的对比;

(d)、(e)、(f) 分别为 S_2 场地 0—5 km、5—10 km、10—15 km 断层距下的对比

Fig. 5 Comparison between advised EIDS and computation value from earthquake records

(a), (b) and (c) are for distance of 0—5 km, 5—10 km and 10—15 km under site soil of S_1 , respectively; (d), (e) and (f) are for distance of 0—5 km, 5—10 km and 10—15 km under site soil of S_2 , respectively

由于中美两国在场地划分方法上的不同: 美国的抗震设计规范(NEHRP、UBC97 等)以地表以下 30 m 范围内的土层平均剪切波速作为场地分类指标; 而我国建筑抗震规范(GB50011-2001)则采用双指标的场地分类方法, 即 20 m 深度范围内的平均剪切波速和剪切波速大于 500 m/s 土层上的土层覆盖层厚度。利用工程勘探波速测试资料对中美两国的场地土分类指标进行了对比(吕红山, 赵凤新, 2007)。结果表明, 中国的 I 类场地包含了美国的全部 A 类、B 类和部分 C 类场地; 中国的 II 类场地则介于美国的 C 类与 D 类场地之

间；中国的Ⅲ类场地介于美国的D类与E类场地之间；中国的Ⅳ类场地则全部为美国的E类场地。因此，结合前面地震记录分组的原则，将本文S₁场地分别与我国GB50011-2001规范的Ⅰ类场地，以及美国UBC97规范的S_A和S_B场地，S₂场地与GB50011-2001规范的Ⅱ类、Ⅲ类场地，以及UBC97规范的S_C和S_D场地，S₃场地与GB50011-2001规范的Ⅳ类场地，以及UBC97规范的S_E场地相对应进行了比较。

图6给出了用江辉和朱晞（2006）所建议的输入能量设计谱和与GB50011-2001、UBC97规范设计谱中考虑近场效应的Zone 4区相容的能量等效速度谱的对比结果。对于3种峰值加速度（分别对应8度罕遇地震、9度多遇地震、9度罕遇地震），与GB50011-2001规范的Ⅰ类场地设计谱相容的能量谱在0—2.4 s的范围内均明显低于S₁场地3种断层距的建议能量谱（图6a），表明GB50011-2001规范低估了硬场近断层脉冲效应下的地震动需求。对GB50011-2001规范的Ⅱ类场地，9度罕遇地震设计谱所对应能量与S₂场地的10—15 km组较为接近，但在0—2.8 s的有效周期范围内，8度罕遇地震和9度多遇地震结果则偏低较多（图6b）。随着场地土变软，Ⅲ类和Ⅳ类场地9度罕遇地震下规范谱所对应能量均与建议的S₂和S₃场地5—10 km组能量需求接近，且当周期大于1 s之后还稍超过后者。说明此种条件下的设计谱值能较好地考虑近场能量需求（图6c, d）。但是在0—4 s的区间内，仍明显小于0—5 km组的建议值，且8度罕遇地震和9度多遇地震所对应值仍偏低很多。说明不能有效地应用于断层0—5 km范围内的抗震设计。总体来看，当反应谱峰值加速度对应于9度罕遇地震时，GB50011-2001规范能在除Ⅰ类、Ⅱ类之外的其它场地条件下考虑离开断层5 km范围之外的能量需求，其它烈度条件下则明显偏低较多，低估了以输入能量形式的加载需求。从平台拐点周期来看，江辉和朱晞（2006）所建议的输入能量设计谱与规范设计谱大体对应。

对于UBC97规范所规定的S_A场地，在0—2.4 s的有效区间内，3种断层范围（2 km, 5 km, 10 km）下与设计谱相容的能量谱均明显低于本文S₁场3种断层距建议能量谱（图6e）。表明UBC97规范即使考虑了近场因子的作用，在S_A场地下的谱值仍偏低。其可能的原因在于规范中S_A场地的地面反应系数C_a和C_v在数值上对N_a和N_v的计入权重是最低的。同时本文所挑选的硬场记录主要来自我国台湾地区的Chi-Chi地震，与美国UBC97规范近场因子的记录基础区别较大。对于UBC97规范的S_B场地，当周期小于2.4 s时，2 km组设计谱所对应能量与S₂场地所建议5—10 km和10—15 km二组很接近（图6f）。之后的线性升高则应该是由于转换关系失效导致的，在各图中均存在类似情况。在S_C场地，UBC97规范2 km、5 km和10 km三组设计谱对应能量均有较大幅度提升。2 km组能量介于建议谱0—5 km和5—10 km二组之间，而5 km组设计谱则与建议的10—15 km组基本重合，只是拐点周期低于后者（图6g）。随着场地进一步变软，对于S_D场地，在0—2.8 s的有效周期范围内，UBC97规范2 km、5 km和10 km三组设计谱对应能量均与建议谱0—5 km、5—10 km和10—15 km三组之间比较接近，拐点周期也相当接近（图6h）。对于UBC97规范的软场地S_E，在0—4 s的有效周期范围内，其2 km组平台值超过了建议谱0—5 km组。其5 km组也超过了建议谱5—10 km组，而剩下的两组则几乎完全重合，拐点周期也相当接近（图6i）。说明对于S_E场地，UBC97规范考虑近场效应的设计谱能较好地体现场地的能量特征。同时图6i也从另一个角度说明，江辉和朱晞（2006）所建议的输入能量设计谱能较好地体现靠近断层场地的地震动能量需求。

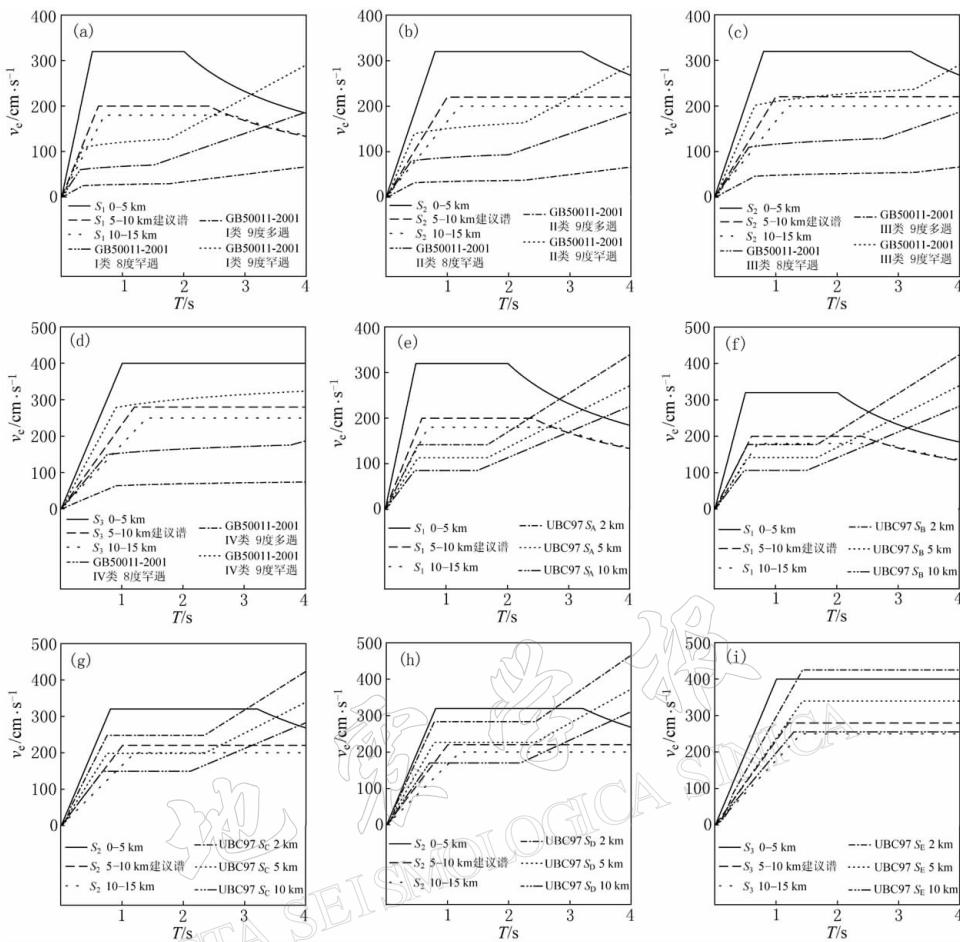


图 6 建议的输入能量设计谱与 GB50011-2001、UBC97 规范 Zone 4 区相容能量谱的比较

(a)、(b)、(c)、(d) 分别为 S_1 场地建议谱与 GB50011-2001 规范 I 类场地对比、 S_2 场地建议谱与 GB50011-2001 规范 II 类场地对比、 S_2 场地建议谱与 GB50011-2001 规范 III 类场地对比、 S_3 场地建议谱与 GB50011-2001 规范 IV 类场地对比；(e)、(f)、(g)、(h)、(i) 分别为 S_1 场地建议谱与 UBC97 规范 S_A 场地对比、 S_1 场地建议谱与 UBC97 规范 S_B 场地对比、 S_2 场地建议谱与 UBC97 规范 S_C 场地对比、 S_2 场地建议谱与 UBC97 规范 S_D 场地对比、 S_3 场地建议谱与 UBC97 规范 S_E 场地对比。

Fig. 6 Comparison between advised EIDS and equivalent energy spectrum from GB50011-2001 as well as UBC97 Code

(a) Between EIDS for site soil of S_1 and I of GB50011-2001 Code; (b) Between EIDS for site soil of S_2 and II of GB50011-2001 Code; (c) Between EIDS for site soil of S_2 and III of GB50011-2001 Code; (d) Between EIDS for site soil of S_3 and IV of GB50011-2001 Code; (e) Between EIDS for site soil of S_1 and S_A of UBC97 Code; (f) Between EIDS for site soil S_1 and S_B of UBC97 Code; (g) Between EIDS for site soil of S_2 and S_C of UBC97 Code; (h) Between EIDS for site soil S_2 and S_D of UBC97 Code; (i) Between EIDS for site soil of S_3 and S_E of UBC97 Code

将 UBC97 规范(图 6e—i)与 GB50011-2001 规范(图 6a—d)对比可看出,由于 UBC97 规范考虑了近断层效应,对设计谱平台高度和宽度均做了调整,与其相容的等效能量谱也更好地考虑了近场地地震能量需求,除 S_A 场地明显偏低外,随着场地土的变软其相容能量与实际地震需求能更好吻合,且在 S_E 场地稍微超过了江辉和朱晞(2006)所建议的 S_3 场地 0—5 km 组设计谱值,说明该规范在软土场地的设计谱取值是较为合理的。而与 GB50011-2001 规范所相容的能量需求在不同场地均存在不同程度的偏低,尤其是硬场最

为明显，有必要对设计谱平台高度予以调整。

4 结论

通过本文的研究，可获得以下结论：

1) 在推导了由谱加速度求解与其相容的能量需求计算方法的基础上，用收集到的世界范围内的靠近断层 15 km 之内的近场强震记录，提取了与抗震设计规范(GB50011-2001、UBC97)相容的输入能量谱，并按 3 类场地统计获得了周期适用范围分别为 0—2.4 s, 0—2.8 s 和 0—4.0 s.

2) 通过与我国规范相容能量谱和作者所建议的输入能量设计谱的对比表明，我国 GB50011-2001 规范除在Ⅲ类和Ⅳ类场地下 9 度罕遇烈度地震下能一定程度体现近断层地震的能量效应外，在其它设计峰值加速度条件下均远低于近断层 0—15 km 范围内的能量需求，速度脉冲效应对结构破坏的影响在目前的规范设计谱曲线中没有得到考虑，有必要对平台高度进行调整，而平台对应拐点周期相对吻合较好。

3) 与 UBC97 规范相容的能量谱除在基岩场地(S_A)偏低外，其它场地和断层距条件下平台高度和拐点周期均与江辉和朱晞(2006)所建议的 0—15 km 断层内的输入能量设计谱吻合较好。表明该规范采用近场因子(N_A , N_V)考虑近场效应是必要的，只是需要对 S_A 场地的设计谱参数作进一步的修正。与 UBC97 规范的对比也从另一角度印证了本文推导方法的正确性和作者所建议能量谱的合理性。

需要说明的是，由于记录的缺乏，我国现行规范设计谱在统计时所依据的资料中基本没有近断层记录，因此得出上述结论也是可以理解的。但随着我国经济实力的增强和西部大开发的深入展开，大量跨越或接近活动断层区的结构势必出现，对规范设计谱进行考虑近场效应的修正势在必行。

感谢审稿专家的宝贵意见和建议。

参 考 文 献

- 公茂盛, 谢礼立, 章文波. 2003. 地震动输入能量衰减规律的研究[J]. 地震工程与工程振动, 23(3): 15—24.
- 国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国建设部. 2001. 建筑抗震设计规范(GB50011-2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 16—18.
- 江辉, 朱晞. 2006. 近断层区的输入能量设计谱及其在基于能量抗震设计中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 26(5): 102—108.
- 江辉. 2007. 近场地震下桥梁结构基于性能抗震设计的能量方法[D]. 北京: 北京交通大学: 77—81.
- 吕红山, 赵凤新. 2007. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 29(1): 65—76.
- 倪永军. 2001. 桥梁结构抗震设计的设计地震与基于位移的抗震设计方法[D]. 北京: 北方交通大学: 26—27.
- Chou, C C, Uang C M. 2000. Establishing absorbed energy spectra: an attenuation approach[J]. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 29: 1441—1445.
- European Committee for Standardization. 2003. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings(prEN 1998-1:2003)[S]. Brussels: Management Centre: rue de Stassart: 27.
- Hudson D E. 1962. Some problems in the application of spectrum techniques to strong motion earthquake analysis[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 52(2): 180—199.
- International Conference of Building Officials. 1997. 1997 Uniform Building Code[S]. Whittier, California: International Conference of Building Officials, 2: 34—35.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, Abrahamson N A. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. *Seism Res Lett*, 68(1): 199—222.
- Trifunac M D, Brady A G. 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 65: 581—626.