

缺乏近断层强震观测资料地区抗震 设计规范反应谱研究^{*}

李新乐^{1),*} 窦慧娟¹⁾ 朱 晞²⁾ 孙建刚¹⁾

1) 中国辽宁大连 116600 大连民族学院土木建筑工程学院

2) 中国北京 100044 北京交通大学土木建筑工程学院

摘要 根据最近几次的近断层地震观测记录研究显示,在现行结构抗震设计规范中很少考虑近断层效应的影响,对于缺乏近断层强震观测资料地区,抗震设计规范的改进方法及近断层效应的设计参数还没有统一结论.本文基于 UBC97 近断层因子设计理念,在收集世界范围内近断层观测记录的基础上,按场地和震级进行分类,建立了中长周期关键点处的加速度谱需求的衰减关系式,推导给出了缺乏近断层观测资料地区近断层影响因子的震级和断层距的关系式.并以我国现行的建筑抗震设计规范为基础,建议了近断层影响因子的参考取值和修正后的反应谱曲线,为我国结构抗震设计提供了参考.

关键词 近断层强震记录 谱需求 设计反应谱 近断层影响因子

中图分类号: P315.9 **文献标识码**: A

引言

Bertero(1976)在研究中首次指出 San Fernando 地震获得的近断层地震记录的重要意义和对结构的重要影响后,人们越来越关注这一问题对现行设计方法和抗震设计规范的影响.美国在 1994 年 Northridge 地震发生 3 年后,给出了考虑近断层效应的建筑统一规范 UBC97(International Council of Building Officials, 1997),它是目前唯一一部采用近断层影响因子的形式对设计反应谱进行改进的抗震规范.但是,由于地震发生的不确定性,以及各国对地震的重视程度和经济等因素的影响,可直接基于观测记录进行统计分析的地区和国家为数不多,而现实情况却往往需要对这些地区和国家的工程结构进行抗震设计.在目前还无法改变这一状态的情况下,如何将临近地区或世界范围内的研究成果应用到缺乏强震观测资料的地区,对于我国这样一个多地震的国家具有重要理论意义和现实价值.为此,本文在对缺乏地震观测资料地区近断层效应的估计方法进行讨论的基础上,由回归得到的近断层地震动特征谱值衰减关系式推导,给出了我国近断层强震效应对设计谱曲线的影响因子,为进一步研究提供参考.

1 美国 UBC97 近断层影响因子

美国 UBC97 规范中以 50 年超越概率 10%把美国分为 5 个地震区: zone1, zone2A,

* 2007-01-18 收到初稿, 2007-05-15 决定采用修改稿.

† 通讯作者. e-mail: lixinle@dlnu.edu.cn

zone2B, zone3 和 zone4, 对应的有效峰值加速度分别为 0.75, 1.5, 2.0, 3.0 m/s² 和 4.0 m/s². 其中, 需要考虑近断层效应的 zone4 主要是在西海岸加州境内. 考虑到近断层效应对不同周期结构影响的区别, UBC97 对反应谱的短周期段(加速度敏感区)和中等周期段(速度敏感区)分别定义了不同的近断层因子 N_a 和 N_v , 如表 1 所示.

表 1 UBC97 近断层因子 N_a 和 N_v 取值

震源机制	震源描述	N_a			N_v			
		≤2 km	5 km	10 km	≤2 km	5 km	10 km	15 km
A	$M_w \geq 7, SR \geq 5$	1.5	1.2	1.0	2.0	1.6	1.2	1.0
B	介于 A 与 C 之间	1.3	1.0	1.0	1.6	1.2	1.0	1.0
C	$M_w \leq 6.5, SR \leq 2$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

注: SR 系断层滑移速率, 单位为 mm/a.

2 缺乏近断层资料地区近断层设计谱的研究方法

目前近断层地震动研究中存在的问题有: ① 单个地区或国家的强震近断层记录并不多, 主要分布在美国、日本、我国台湾和部分欧洲国家(如土耳其), 即使在这些地区或国家, 也只是有限数量的近断层记录, 单独一个地区或国家建立近断层地震动参数的衰减关系式有一定的困难; ② 烈度是一个宏观的概念, 到目前为止, 由于近断层问题的复杂性以及研究时间短等原因, 还没有见到适用于近断层区 0~15 km 的烈度与加速度的关系式. 为解决这一问题, 我们可以将世界范围内所有近断层记录一起分析考虑, 直接借鉴到强震记录缺乏的地区. 虽然这一方法仅可作为权宜之计, 但也有其合理性:

1) 从近断层记录发生的震源看, 均为板内浅源构造地震; 从地域上看, 有美洲(美国)、欧洲(土耳其)和东亚(日本、中国台湾)的观测记录, 空间上分布广阔. 因此, 得到的衰减关系应理解为世界范围内“平均场地”上的回归规律, 对我国这种板内地震发生频繁的国家具有一定指导意义.

2) 利用建立在远场上的烈度转换方法得到的近断层区地震动参数预测结果, 其误差未必比目前采用的基于世界范围内大量统计资料的场地相关参数预测结果的小.

本文采用 UBC97 给出的断层距来表示这一影响距离(图 1). 记录均取自 Pacific Earthquake Engineering Research Center (2004). 这些记录均满足以下特征: ① 矩震级 (M_w) 在 4.5~8.0 之间; ② 台站到断层的平面投影距离 R 不大于 15 km; ③ 台站的场地特征明确, 平均剪切波速大于 180 m/s; ④ 记录至少有一个水平向分量峰值加速度大于

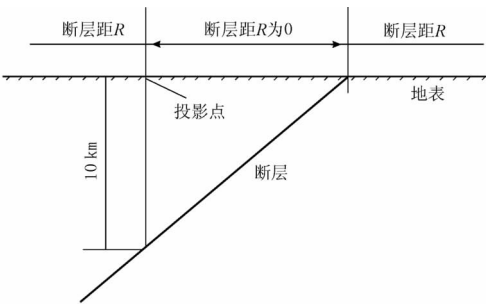


图 1 断层距 R 定义

表 2 近断层地震动按场地和震级分类

场地类型	$M_w < 6.5$	$6.5 \leq M_w < 7.0$	$7.0 \leq M_w$
硬土场/组	21	12	22
软土场/组	32	16	29
地震事件/次	15	8	7

0.2 m/s².

我们参照以上标准在世界范围内 30 次地震中选出 132 组近断层强震记录，如表 2 所示.

3 基于近断层地震动统计分析的设计谱建立

3.1 近断层地震动谱需求的建立

为了研究近断层效应对设计反应谱的影响，需建立 0.3 s 和 1.0 s 周期处的谱需求衰减关系(Chai *et al* , 2000)，来预测相应的谱值. 首先计算单自由度结构在近断层记录激励下阻尼比 5%的弹性加速度反应谱，并对加速度控制区平台中心周期处(约在 0.3 s 处)的谱值 $S_{a, 0.3}$ 和速度控制区中心(约在 $T=1.0$ s 处)的谱值 $S_{a, 1.0}$ 进行非线性回归分析，得到近断层地震动谱需求经验衰减关系. 为较准确地反映反应谱加速度控制区和速度控制中心谱值的变化规律，本文在预测 0.3 s 和 1.0 s 周期处谱值时，采用多点综合控制(李新乐，2005)的方法给出回归结果. 其目的是尽可能将平台中心和下降段中心的谱值预测得更为准确，尽量消除某一坐标处谱值的急剧变化引起的误差. 取加速度敏感区中心和速度敏感区中心谱需求 $S_{a, 0.3}$ 和 $S_{a, 1.0}$ 分别为

$$S_{a, 0.3} = (S_{a, 0.28} + S_{a, 0.29} + S_{a, 0.3} + S_{a, 0.31} + S_{a, 0.32})/5 \tag{1}$$

$$S_{a, 1.0} = (S_{a, 0.99} + S_{a, 1.0} + S_{a, 1.01})/3 \tag{2}$$

表 3 中震级基岩 $S_{a, 0.3}$ 和 $S_{a, 1.0}$ 回归结果

震级范围	项目	T	c ₁	c ₂	c ₃	σ
6.5≤M _w <7.0	S _{a, 0.3}	0.28	7.536	0.170	−0.596	0.116
		0.29	7.260	0.186	−0.456	0.129
		0.30	7.117	0.233	−0.540	0.127
		0.31	7.180	0.276	−0.796	0.197
		0.32	7.241	0.342	−1.040	0.245
	S _{a, 1.0}	0.99	2.876	1.353	−2.449	0.171
		1.00	2.156	1.420	−2.364	0.161
		1.01	1.270	1.512	−2.295	0.153

本研究采用如下形式的近断层地震动衰减模型：

$$\lg Y = c_1 + c_2 M_w + c_3 \lg (R^2 + 10^2)^{0.5} \pm \sigma \tag{3}$$

式中，Y 为地震动预测参数； M_w 为矩震级；R 为断层距； c_1, c_2, c_3 为回归系数；σ 为标准差.

由于篇幅有限，在此仅列出了由式(3)回归得到的中震级的谱需求 $S_{a, 0.3}$ 和 $S_{a, 1.0}$ 系数，如表 3 所示.

3.2 近断层影响因子的推导及设计谱的修正

按照 Chopra 和 Chintanapakdee(2001)及倪永军(2001)建议的拐点周期定义(图 2)，采用下式确定：

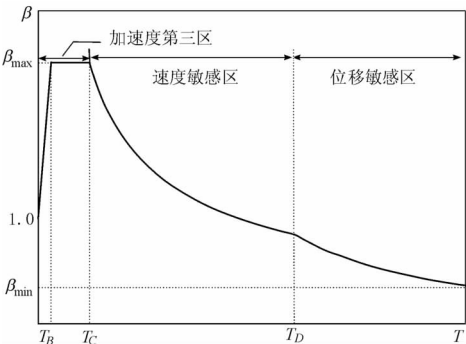


图 2 典型加速度设计谱曲线

$$T_C = 5 \frac{v_{pg}}{a_{pg}} \quad T_B = \frac{T_C}{4} \quad T_D = 8 \frac{d_{pg}}{v_{pg}} \quad (4)$$

式中, a_{pg} , v_{pg} 和 d_{pg} 分别为峰值加速度、峰值速度和峰值位移。

抗震设计加速度谱曲线 $S_a(T) = Z \cdot \beta(T)$ 可采用动力放大系数 $\beta(T)$ 描述, Z 是 50 年超越概率 10% 的设计地面加速度

$$\begin{cases} 0 \leq T < T_B & \beta(T) = 1 + \frac{T}{T_B}(\beta_{\max} \cdot \eta - 1) \\ T_B \leq T < T_C & \beta(T) = \beta_{\max} \cdot \eta \\ T_C \leq T < T_D & \beta(T) = \beta_{\max} \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C}{T}\right)^K \\ T_D \leq T & \beta(T) = \beta_{\max} \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2}\right)^K \end{cases} \quad (5)$$

式中, η 为阻尼修正因子; K 为反应谱下降段衰减因子。

反应谱的取值

$$S_{a, 0.3}(M_W, R) = \max[S_{a, 0.3}(M_W, R) |_{\text{表3}}, \beta(T)_{T=0.3} \cdot Z] \quad (6)$$

$$S_{a, 1.0}(M_W, R) = \max[S_{a, 1.0}(M_W, R) |_{\text{表3}}, \beta(T)_{T=1.0} \cdot Z] \quad (7)$$

定义近断层影响因子为

$$N_A(M_W, R) = S_{a, 0.3}(M_W, R) / [\beta(T)_{T=0.3} \cdot Z] \quad (8)$$

$$N_V(M_W, R) = S_{a, 1.0}(M_W, R) / [\beta(T)_{T=1.0} \cdot Z] \quad (9)$$

则近断层设计谱曲线表达式应采用近断层影响因子修正如下:

$$\begin{cases} 0 \leq T < T_B & \beta'(T) = 1 + \frac{T}{T_B}(N_A \cdot \beta_{\max} \cdot \eta - 1) \\ T_B \leq T < T'_C & \beta'(T) = N_A \cdot \beta_{\max} \cdot \eta \\ T'_C \leq T < T'_D & \beta'(T) = N_V \cdot \beta_{\max} \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C}{T}\right)^K \\ T'_D \leq T & \beta'(T) = N_V \cdot \beta_{\max} \cdot \eta \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2}\right)^K \end{cases} \quad (10)$$

$$S_a(T) = Z \cdot \beta'(T) \quad (11)$$

$$T'_C = T_C \cdot (N_A / N_V)^K \quad T'_D = 8 \frac{d_{pg}}{v_{pg}} \quad (12)$$

4 我国近断层影响因子的建议取值

为分析我国近断层效应对结构抗震的影响, 根据公式(1)~(12), 以建筑抗震设计规范(国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国建设部, 2001)5%阻尼设计谱曲线为基础, 采用与本研究相当的场地类型(Ⅱ类场地), 设计地震动峰值取地震区划图中 4 m/s^2 区峰值($Z=4 \text{ m/s}^2$), $\beta_{\max}=2.25$, 设计地震第一组、Ⅱ类场地的设计特征周期 $T_g=0.35 \text{ s}$ 、衰减指数 $\gamma=0.9$ 、加速度敏感区平台中心($T=0.3 \text{ s}$)和速度敏感区中心($T=1.0 \text{ s}$)动力放大系数 $\beta(T)$ 分别为

$$\begin{cases} \beta(T)_{T=0.3 \text{ s}} = \beta_{\max} & 0.1 \text{ s} \leq T \leq T_g \\ \beta(T)_{T=1.0 \text{ s}} = \beta_{\max} \left(\frac{T_g}{T}\right)^{0.9} & T_g < T \end{cases} \quad (13)$$

由于我国设计规范习惯上是烈度给出设计地震动的大小，为建立烈度与震级的关系，本文根据我国建筑抗震设计规范(国家质量监督检验检疫总局，中华人民共和国建设部，2001)规定，采用倪永军(2001)椭圆形地震烈度衰减关系，推导出我国东部和西

表 4 地震烈度和震级的对应关系

烈度	中国东部	中国西部
	M_w	M_w
6	5.42	5.58
7	6.11	6.27
8	6.80	6.97
9	7.48	7.66

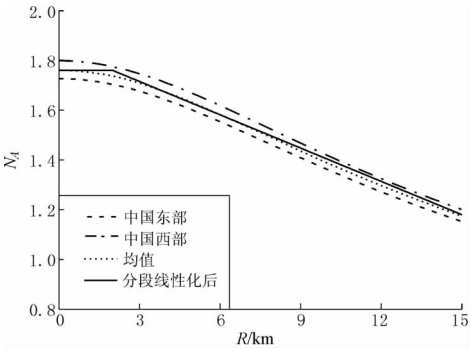


图 3 地震烈度为 8 度时 N_A 随断层距(R)变化

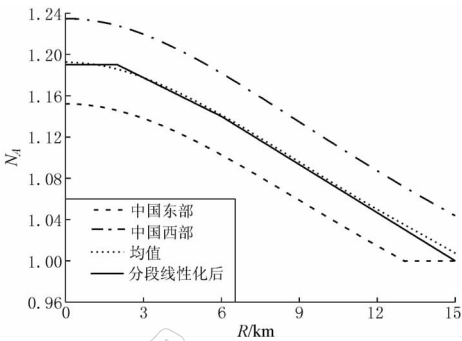


图 4 地震烈度为 9 度时 N_A 随断层距(R)变化

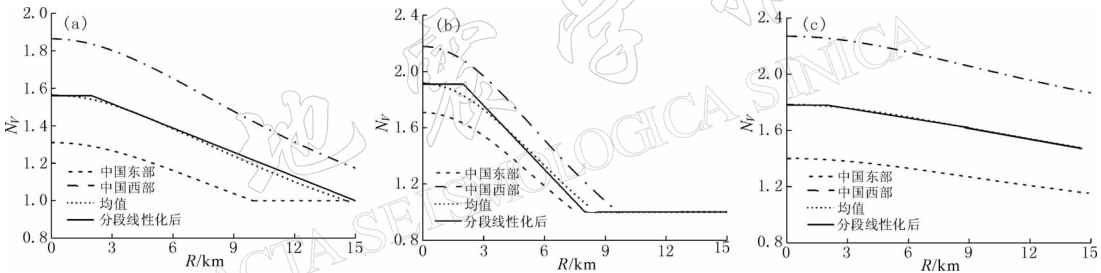


图 5 地震烈度为 7, 8, 9 度时 N_V 随断层距(R)变化
(a) 烈度为 7 度; (b) 烈度为 8 度; (c) 烈度为 9 度

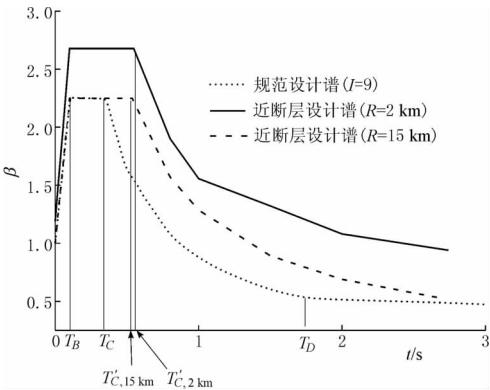


图 6 地震烈度为 9 度时设计谱修正

表 5 建议的我国基岩近断层修正因子

烈度 I	断层距 R/km	N_A	N_V
7	2	1.0	1.56
	15	1.0	1.0
8	2	1.76	1.91
	8		1.0
9	15	1.18	1.0
	2	1.19	1.78
	6	1.14	
	9		1.62
	15	1.0	1.47

部烈度 I 与震级 M_w 的对应关系(表 4)。结合表 3 回归关系式即可确定烈度和近断层因子的取值，可得到如图 3~5 的近断层影响因子衰减曲线。由图可见：① 西部近断层影响因子 N_A 和 N_V 要显著大于东部值，地震烈度 I

<7 度时近断层效应可不予考虑;② N_V 值一般大于 N_A 值,说明近断层效应对反应谱速度敏感区的影响要比加速度敏感区的影响更大,说明近断层地震动对中、长周期结构的地震反应影响较大,并且显著大于 UBC97 规定值;③ 随断层距增大, N_A 和 N_V 值逐渐减小,但部分值甚至在断层距为 15 km 时还大于 1.0.

为便于应用,本文将得到东部和西部近断层影响因子进行简单平均并分段线性化(实线).表 5 给出了我国基岩(即 II 类场地)近断层影响因子参考取值,并在图 6 中示出了地震烈度为 9 度时考虑和不考虑近断层效应的设计谱曲线.由图 6 可见考虑近断层效应的谱曲线明显变“胖”、中长周期段提高得更明显.

5 结论

本文对缺乏近断层地震动观测记录的国家 and 地区近断层效应问题进行了探讨,以抗震设计中典型的设计谱曲线为基础,建立了近断层影响因子的震级、断层距表达式,给出了弹性加速度设计谱修正方法,并以我国建筑抗震规范为基础,给出了近断层影响因子变化趋势和建议取值.结果表明,近断层效应对我国抗震设计规范反应谱曲线的影响相当显著.建议的近断层因子大于 UBC97 规范值,由于我国地震的危险性和复杂性,该近断层因子是否合理尚需进一步研究.

参 考 文 献

- 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:20-80.
- 李新乐. 2005. 近断层区桥梁结构的设计地震与抗震性能研究[D]. [学位论文]. 北京:北京交通大学:54-80.
- 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]. [学位论文]. 北京:北方交通大学, 26-27.
- Bertero V V. 1976. Establishment of design earthquakes: Evaluation of present methods[C]// *Proceedings International Symposium on Earthquake Structure Engineering*, Vol. 1, St. Louis: University of Missouri-Rolla: 551-580.
- Chopra A K, Chintanapakdee C. 2001. Comparing response of SDOF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions[J]. *Earthquake Engng Struct Dyn*, **30**(12): 1 769-1 789.
- Chai Juin-Fu, Loh Chin-Hsiung, Chen Chao-Yu. 2000. Consideration of the near-fault effect on seismic design code for sites near the Chelungpu Fault[J]. *Journal of Chinese Institute of Engineering*, **23**(4): 447-454.
- International Council of Building Officials. 1997. *1997 Uniform Building Code*[S]. Whittier, California: International Conference of Building Officials, Vol. 2: 34-235.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. 2004. *PEER Strong Motion Database*[EB/OL]. version 2. [2005-12-30]. <http://peer.berkeley.edu/smcat>.

RESPONSE SPECTRUM OF SEISMIC DESIGN CODE FOR ZONES LACK OF NEAR-FAULT STRONG EARTHQUAKE RECORDS

Li Xinle¹⁾ Dou Huijuan¹⁾ Zhu Xi²⁾ Sun Jiangang¹⁾

1) College of Architecture and Civil Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China

2) College of Architecture and Civil Engineering, Beijing JiaoTong University, Beijing 100044, China

Abstract: It was shown from the study on the recently near-fault earthquake ground motions that the near-fault effects were seldom considered in the existing Chinese seismic code. Referring to the UBC97 design concept for near-fault factors, based on the collected world-widely free-site records of near-fault earthquakes ground motions classified by earthquake magnitude and site condition, the attenuation relationship expressions of the acceleration spectrum demand at the key points within the long period and moderate period were established in term of the earthquake magnitude and the site condition. Furthermore, the near-fault factors' expressions about the earthquake magnitude and the fault distance were deduced for the area lack of near-fault strong earthquake records. Based on the current Chinese Building Seismic Design Code, the near-fault effect factors and the modified design spectral curves, which were valuable for the seismic design, were proposed to analyze the seismic response of structures.

Key words: near-fault strong earthquake records; spectral demand; design response spectrum; near-fault effect factor