

考虑震级影响的规范阻尼修正系数评估

郝安民¹, 周德源¹, 李亚明², 张 晖²

(1. 同济大学 结构工程防灾所, 上海 200092; 2. 上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200092)

摘要: 规范采用阻尼修正系数(DMF)调整阻尼比不同于 5% 时的弹性反应谱, 然而未考虑矩震级的影响. 美欧规范 DMF 是基于位移反应谱, 而中国规范 DMF 是基于绝对加速度反应谱. 对同类场地不同矩震级范围内 DMF 的统计分析表明, 除 E 类场地外, 矩震级 $M_w > 6.5$ 时, 基于位移反应谱的中值 DMF 与美欧规范值比较接近, 基于绝对加速度反应谱的中值 DMF 与中国规范值比较接近; 而矩震级 $M_w = 5.5 \sim 6.5$ 时, 中值 DMF 与各规范值有明显差异, 采用规范 DMF 是偏于不安全的. 对 E 类场地, 规范 DMF 多数情况下稍偏于保守. 最后, 利用非线性回归分析, 提出了不同矩震级范围时各类场地 DMF 表达式.

关键词: 阻尼修正系数; 弹性反应谱; 矩震级

中图分类号: TU 311.3

文献标识码: A

Evaluation of Damping Modification Factors in Codes with a Consideration of Effect of Earthquake Magnitude

HAO Anmin¹, ZHOU Deyuan¹, LI Yaming², ZHANG Hui²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Architectural Design & Research Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Damping modification factors (DMF) are used in current codes to adjust elastic response spectral values corresponding to 5% of viscous damping to other damping levels. However, the impact of moment magnitude (M_w) is not considered in codes. The DMF in the NEHRP 2003 and Eurocode 8 are derived from displacement response spectra while those in the China 2010 are obtained from absolute acceleration response spectra. Based on the DMF for different moment magnitude ranges computed from seismic records located at the same site class, except for site Class E, statistical analysis of results shows that the median DMF for $M_w > 6.5$ derived from displacement response spectra are close to those values in NEHRP 2003 and Eurocode 8 while

those derived from absolute acceleration response spectra are similar to those values in China 2010. However, the DMF for $M_w = 5.5 \sim 6.5$ are obviously different from those values in codes, further, the DMF in codes are probably unsafe. Besides, for site Class E, the DMF in codes are in most cases slightly conservative. Finally, nonlinear regression analyses are used to develop expressions for DMF corresponding to various site classes and moment magnitude ranges.

Key words: damping modification factors; elastic response spectra; moment magnitude

阻尼修正系数(DMF)用于调整粘滞阻尼比不同于 5% 时的弹性反应谱. 现行抗震规范^[1-2]中阻尼修正系数通常取决于结构的等效粘滞阻尼, 在某些情况下, 也与结构的等效周期有关. Newmark 等^[3]研究成果被应用于现有结构的性能评估和加固指导手册 ATC-40^[4] 和 FEMA273/356^[5-6]. Ramirez 等^[7-8]的研究成果被应用于 NEHRP^[2, 9] 中耗能减震结构体系. EC8^[1] 采用了 Bommer 等^[10] 的研究结果. 文献^[11]就不同学者提出的阻尼修正系数进行了详细讨论. 近年来, 考虑震级、场地和距离影响, 国内外学者对阻尼修正系数进行了更为深入的研究, 指出地震动参数对阻尼修正系数有重要影响^[12-13].

本文首先对比中美欧抗震规范, 指出了对阻尼修正系数进行进一步研究的必要性, 然后对本文采用的地震动记录进行分组并计算每组阻尼修正系数的中值, 接着与中美欧规范中的阻尼修正系数进行对比, 最后通过非线性回归分析, 提出了阻尼修正系数预测方程.

1 抗震规范中阻尼修正系数

本文位移、速度和加速度各自的反应谱阻尼修

收稿日期: 2011-01-05

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2009BAJ28B02)

第一作者: 郝安民(1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为工程抗震. E-mail: tjham02@163.com

通讯作者: 周德源(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂结构分析与抗震. E-mail: dyzhou@tongji.edu.cn

正系数分别定义为

$$DMF_d = \frac{S_d(T, \xi)}{S_d(T, 5\%)} \quad (1)$$

$$DMF_v = \frac{S_v(T, \xi)}{S_v(T, 5\%)} \quad (2)$$

$$DMF_a = \frac{S_a(T, \xi)}{S_a(T, 5\%)} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: T 为结构自振周期; ξ 为阻尼比; $S_d(T, \xi)$, $S_v(T, \xi)$ 和 $S_a(T, \xi)$ 分别为相应于给定的周期和阻尼比的弹性位移反应谱、速度反应谱和绝对加速度反应谱, $S_d(T, 5\%)$, $S_v(T, 5\%)$ 和 $S_a(T, 5\%)$ 分别为相应于给定的周期和 5% 阻尼比的弹性位移反应谱、速度反应谱和绝对加速度反应谱. 本文研究的周期范围 0.01~6.0 s, 阻尼比为 2%、3.5%、

5%、10%、15%、20%、25%、30%、40% 和 50% 共 10 个不同值. 根据式(1)~(3) 计算每个地震记录的阻尼修正系数.

考虑到规范中阻尼修正系数是用于调整阻尼比不同于 5% 时的设计谱, 而设计谱均考虑了不同场地的影响. 因而首先须考虑各规范有关场地类别的划分, 鉴于地表厚度 30 m 内平均剪切波速 \bar{v}_s 作为场地类别划分的重要指标, 表 1 给出了不同规范中基于剪切波速的场地类别划分情况. 从中可以看出, 本文采用的美国 NEHRP^[2] 中 B, C, D, E 四类场地大致相当欧洲 EC8^[1] 中的 A, B, C, D 四类场地, 中国规范^[14] 中 I₀, I₁~II, II~III, III~IV 场地.

表 1 基于平均剪切波速场地类别划分标准

Tab.1 Codes of site classification based on average shear-wave velocity

场地标准	平均剪切波速 $\bar{v}_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				
	A (I ₀)	B (I ₁)	C (II)	D (III)	E (IV)
NEHRP	>1500	760~1500	360~760	180~360	<180
EC8	>800	360~800	180~360	<180	
中国	>800	500~800	250~500	150~250	<150

注: I₀~IV 相应于中国规范, A~E 相应于美欧规范设计.

2 地震动加速度时程记录

地震记录来源于 NGA (next generation attenuation) 强震数据库, 选取 50 次地震中 450 个记录, 最小矩震级为 5.6, 距离 (采用观测点到断层破裂面的最短距离) 为 10~100 km, 考虑到距离对阻尼修正系数的影响可忽略^[15], 首先根据文献^[16] 对矩震级进行分类, 然后对每一类按 NEHRP^[2] 场地类别进一步细分为 B~E 四类. 基于震级和场地类别的地震记录分组见表 2.

表 2 基于矩震级和场地类别的地震记录分组

Tab.2 Classification of accelerograms based on moment magnitude and site class

矩震级	场地类别	记录数目	矩震级	场地类别	记录数目
5.5~6.5	B	36	>6.5	B	32
	C	80		C	80
	D	80		D	80
	E	38		E	24

3 规范 DMF 与中值 DMF 对比

图 1~图 3 给出了 B, D, E 三类场地时 (C, D 两

类场地结论相似) 不同矩震级范围的中值 DMF_d 与 NEHRP^[2] 耗能减震 (反应谱控制周期 T_0 参照美国加州首府萨克拉曼多, 依次为 0.07, 0.09, 0.10 和 0.17 s,)、EC8^[1] (控制周期 T_B 依次取 0.15, 0.15, 0.20 和 0.20 s) 推荐的 DMF 之间对比 (限于篇幅, 文中仅列出阻尼比为 2% 和 20% 的情况). 可看出: 第一, $M_w > 6.5$ 时, 中值 DMF_d 与美欧规范推荐值比较接近; $M_w = 5.5 \sim 6.5$ 时, 中值 DMF_d 与美欧规范推荐值多数情况下有明显不同. 第二, $M_w > 6.5$ 时, 在规范值的平台段, 当 $\xi < 5\%$ 时, 中值 DMF_d 随周期的增大而缓慢减少, 当 $\xi > 5\%$ 时, 中值 DMF_d 随周期的增大而稍有增大. 总体看来, 当阻尼比较大时, 在长周期范围内中值 DMF_d 与规范推荐值十分吻合. 第三, $M_w = 5.5 \sim 6.5$ 时, 除 E 类场地外, 中值 DMF_d 随周期变化显著, 当周期大于 2~3 s 时, 中值 DMF_d 与规范值差异随着周期和阻尼比的增大而变得十分显著. 对 E 类场地, 中值 DMF_d 与规范值相差较小, 特别是长周期时. 第四, 在周期为 1 s 左右区间内, 中值 DMF_d 几乎不随周期变化, 且该区间的长度随场地变软略有增长, 当 $\xi > 5\%$ 时, 中值 DMF_d 略小于规范值, 当 $\xi < 5\%$ 时, 中值 DMF_d 略大于规范值.

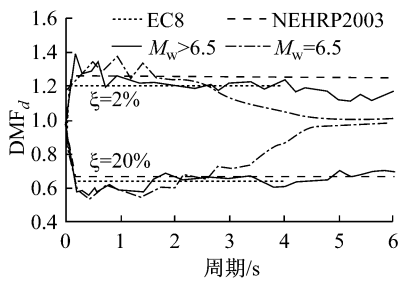


图 1 B 类场地时中值 DMF_d 与美欧规范值对比

Fig. 1 Comparison between median DMF_d and DMF used in the EC8^[1] and NEHRP^[2] for site Class B

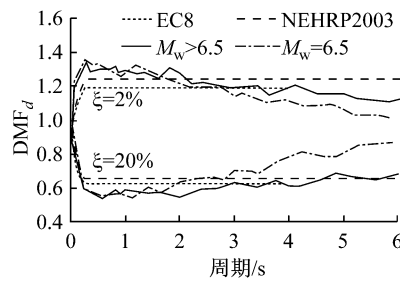


图 2 D 类场地时中值 DMF_d 与美欧规范值对比

Fig. 2 Comparison between median DMF_d and DMF used in the EC8^[1] and NEHRP^[2] for site Class D

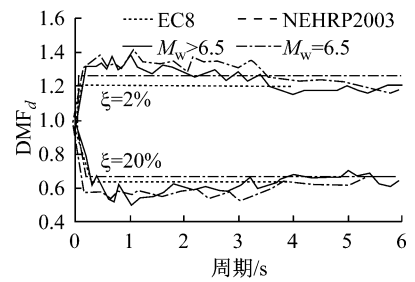


图 3 E 类场地时中值 DMF_d 与美欧规范值对比

Fig. 3 Comparison between median DMF_d and DMF used in the EC8^[1] and NEHRP^[2] for site Class E

图 4~图 6 给出了 B, D, E 三类场地时(C, D 两类场地结论相似)相应于不同矩震级范围的中值 DMF_d 与中国抗震规范^[14] (特征周期 T_g 依次取 0.25, 0.35, 0.55 和 0.75 s) 值之间对比(限于篇幅,文中仅列出阻尼比为 2% 和 10% 的情况). 可以看出:第一, DMF_d 随周期显著变化. 第二, 除 E 类场地外, 当 $\xi < 5\%$ 时, 在矩震级较大时中值 DMF_d 大于规范值, 在矩震级较小时中值 DMF_d 更接近于规范值,

即随着周期的增加先略大于规范值然后略小于规范值; 当 $\xi > 5\%$ 时, 对于较大的矩震级, 中值 DMF_d 与规范值通常比较接近, 而对于较小的矩震级, 中值 DMF_d 与规范值差异显著, 特别是在长周期范围内. 第三, 对 E 类场地, 除阻尼比大于 20% (图中未给出) 的长周期之外, 中值 DMF_d 与规范值通常差异不大.

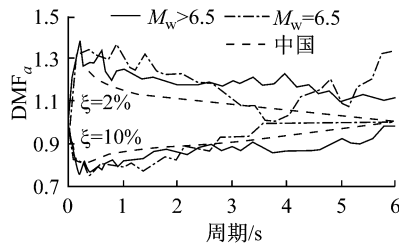


图 4 B 类场地时中值 DMF_d 与中国抗震规范值对比

Fig. 4 Comparison between median DMF_d and DMF used in China^[14] for site Class B

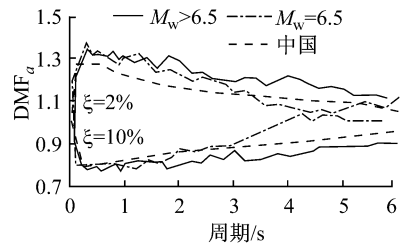


图 5 D 类场地时中值 DMF_d 与中国抗震规范值对比

Fig. 5 Comparison between median DMF_d and DMF used in China^[14] for site Class D

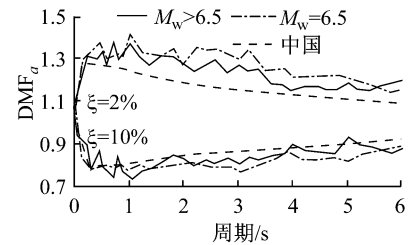


图 6 E 类场地时中值 DMF_d 与中国抗震规范值对比

Fig. 6 Comparison between median DMF_d and DMF used in China^[14] for site Class E

4 非线性回归分析

为便于结构抗震设计, 对结果进行非线性回归分析, 建立阻尼修正系数的数学表达式. 考虑到 E 类场地时, 矩震级对阻尼修正系数影响不大, 故对 E 类场地忽略矩震级的影响. 本文中位移谱阻尼修正系数基于 Lin^[13] 建议函数的基础上, 给出建议表达式:

$$DMF_d = 1 - \alpha \frac{T^\beta}{(T + \lambda)^\gamma}, 0.01 \leq T \leq 6.0 \quad (4)$$

式中: T 为结构自振周期. 其中系数 α, β, γ 和 λ 取决于阻尼比 ξ ($0.02 \leq \xi \leq 0.5$):

$$\begin{cases} \alpha = a + b \ln \xi \\ \beta = c + d \xi \ln \xi \\ \gamma = e + f \xi^2 + g \xi^{-0.5} + h \xi^{-1} \\ \lambda = i \end{cases} \quad (5)$$

对于绝对加速度谱阻尼修正系数, 本文提出的表达式为

$$DMF_a = \text{EXP}(\alpha + \beta T^2 + \gamma T^3) \quad (6)$$

式中, $0.2 \leq T \leq 6.0$, 其中系数 α, β 和 γ 取决于阻尼比 ($0.02 \leq \xi \leq 0.5$):

$$\begin{cases} \alpha = a + b \xi + c \xi^{0.5} \\ \beta = d + e \xi^{0.5} \\ \gamma = f + g \xi^{0.5} \end{cases} \quad (7)$$

当 $0 < T \leq 0.2$ s 时,采用线性插值,取 $T=0$ s 表 3.
时, $DMF_d = 1$. 式(5)和式(7)中参数 $a \rightarrow i$ 可参见

表 3 非线性回归分析参数
Tab.3 Parameters of nonlinear regression analyses

矩震级	场地	阻尼修正系数	回归参数								
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
>6.5	B类		0.978	0.325	279.9	0.528	279.6	0.426 4	0.168	-0.011 5	0.000 4
	C类		1.014	0.339	275.0	0.090	275.1	0.119 1	0.041	-0.000 3	0.000 4
	D类		1.039	0.347	276.5	0.249	276.4	0.275 7	0.900	-0.004 1	0.000 5
5.5~6.5	B类	DMF_d	7.371	2.454	0.892	-0.958	3.056	-0.227 8	-0.067	0.006 3	1.000 0
	C类		6.330	2.101	0.841	-0.740	2.930	-0.303 7	-0.018	0.003 2	1.000 0
	D类		4.693	1.561	0.748	-0.782	2.388	-0.122 7	-0.058	0.006 0	1.000 0
>5.5	E类		1.087	0.366	270.0	1.798	268.9	0.953 2	0.333	-0.022 4	0.000 6
>6.5	B类		0.829	4.020	-4.609	-0.040	0.166	0.004 3	-0.017		
	C类		0.867	3.863	-4.724	-0.031	0.128	0.003 4	-0.014		
	D类		0.869	3.663	-4.702	-0.034	0.145	0.003 9	-0.016		
5.5~6.5	B类	DMF_a	0.933	4.092	-5.103	-0.072	0.323	0.007 9	-0.033		
	C类		0.844	4.777	-4.872	-0.071	0.329	0.008 3	-0.037		
	D类		0.928	4.265	-5.131	-0.069	0.309	0.007 7	-0.033		
>5.5	E类		-0.261	1.243	-0.396	-0.108	0.434	0.043 5	-0.494		

图 7~图 8 以 D 类场地为例给出了 DMF_d 和 DMF_a 回归曲线与中值曲线之间的对比(限于篇幅仅给出 D 类场地),可看出,本文建议 DMF 表达式可较好地反映矩震级对 DMF 的影响。

5 结论

通过对各场地类别下不同矩震级范围内的阻尼修正系数进行统计和回归分析,对中美欧规范阻尼修正系数进行了评估,得出的主要结论是:

(1) 除 E 类场地外,矩震级 $M_w > 6.5$ 时,基于位移反应谱的中值 DMF 与美欧规范值比较接近,基于绝对加速度反应谱的中值 DMF 与中国规范值比较接近;而矩震级 $M_w = 5.5 \sim 6.5$ 时,因阻尼效果的降低,中值 DMF 与各规范值存在明显差异,采用规范 DMF 是偏于不安全的。

(2) 对于 E 类场地,矩震级的影响较小,可以忽略. 对于中等周期,美欧规范 DMF 稍偏于保守,对于长周期,美欧规范 DMF 与中值 DMF_d 十分接近;除阻尼比大于 20% 的长周期之外,中国规范 DMF 通常稍偏于保守。

(3) 为提高中美欧规范阻尼修正系数的准确性,应考虑矩震级对 DMF 的影响,对现行规范 DMF 进行进一步修正。

参考文献:

[1] Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings [S]. Brussels:[s. n.], 2004.

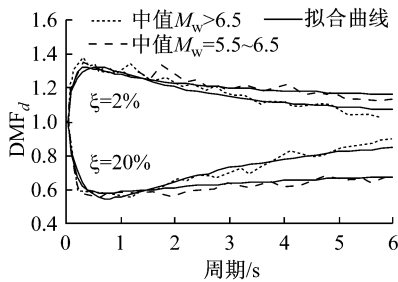


图 7 D 类场地 DMF_d 回归分析曲线与中值曲线
Fig.7 Comparison of DMF_d between median values and results of regression analysis for site Class D

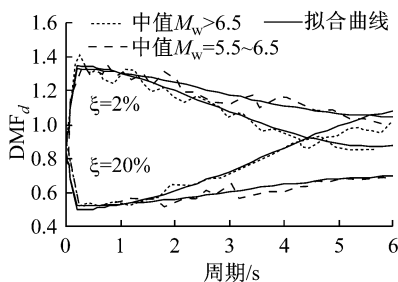


图 8 D 类场地 DMF_a 回归分析曲线与中值曲线
Fig.8 Comparison of DMF_a between median values and results of regression analysis for site Class D

- [2] NEHRP—2003. Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [3] Newmark N M, Hall W J. Earthquake spectra and design EERI monograph series [M]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- [4] ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings [S]. Redwood City: Applied Technology Council, 1996.
- [5] FEMA-273. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [6] FEMA-356. NEHRP pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [7] Ramirez O M, Constantinou M C, Whittaker A S, et al. Elastic and inelastic seismic response of buildings with damping systems[J]. Earthquake Spectra. 2002, 18(3): 531.
- [8] Ramirez O M, Constantinou M C, Whittaker A S, et al. Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems [M]. Buffalo: State University of New York. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2000.
- [9] NEHRP—2000. Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [10] Bommer J J, Elnashai A S, Weir A G. Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes [C]// Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland: New Zealand Society for Earthquake Engineering Inc, 2000; Paper No 207.
- [11] Cardone D, Dolce M, Rivelli M. Evaluation of reduction factors for high-damping design response spectra[J]. Bulletin of Earthquake Engineering. 2009, 7(1): 273.
- [12] Lin Y Y, Miranda E, Chang K C. Evaluation of damping reduction factors for estimating elastic response of structures with high damping[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2005, 34(11): 1427.
- [13] Lin Y, Chang K. Effects of site classes on damping reduction factors[J]. Journal of Structural Engineering. 2004, 130(11): 1667.
- [14] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [15] Cameron W I, Green R A. Damping correction factors for horizontal ground-motion response spectra[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2007, 97(3): 934.
- [16] Campbell K W, Bozorgnia Y. Campbell-bozorgnia NGA empirical ground motion model for the average horizontal component of PGA, PGV, PGD and SA at elected spectral periods ranging from 0.01—10.0 seconds (Version 1.1)[R]. Berkeley: [s. n.], 2006.

• 下期文章摘要预报 •

火灾高温下隧道衬砌管片力学性能试验

闫治国,朱合华,梁利

为了获得隧道衬砌管片在火灾高温时的力学性能与响应,对钢筋混凝土及钢纤维混凝土两种管片开展了不同温度-荷载工况下的火灾试验研究.试验中升温曲线采用碳氢(HC)曲线.试验结果表明:在火灾高温作用下,衬砌管片的内力状态发生显著变化,相当于经历了加卸载作用,加重了损伤.初始预加荷载显著影响衬砌管片高温后承载力的大小,初始预加荷载越大,高温后的承载力越小,且钢筋混凝土管片高温后的承载力要大于钢纤维混凝土管片.对于钢筋混凝土管片,最高温度显著影响管片高温承载力的大小,最高温度越高,高温承载力越小;而对于钢纤维混凝土管片,最高温度的影响相对较小.