

文章编号: 1000-582X(2011)10-068-08

## 双周期标准化的位移放大系数谱

童根树, 蔡志恒, 张磊

(浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 采用理想弹塑性滞回模型, 分析了 4 类场地共 370 条地震波作用下, 单自由度体系的动力响应, 得到了弹塑性体系与相应弹性体系间最大位移的关系, 建立了等延性的位移放大系数谱  $C_d$ , 用以评估新建或已有结构体系的弹塑性变形。考虑了二阶效应和阻尼比的影响, 并采用 2 个特征周期  $T_{ga}$  和  $T_{gR}$  对周期进行标准化 ( $T_{ga}$  和  $T_{gR}$  将整个周期划分为: 加速度敏感区、速度敏感区和位移敏感区), 标准化后的位移放大系数谱, 保留了特征周期处的谷值特性, 消除了场地类别的差异。结果表明: 二阶效应和阻尼比对位移放大系数都有影响, 并随周期变化, 在特征周期附近的影响最为明显。

**关键词:** 理想弹塑性滞回模型; 位移放大系数; 特征周期; 二阶效应; 谷值特性

**中图分类号:** TU352.1

**文献标志码:** A

## Normalized inelastic deformation ratio spectra

Tong Gen-shu, Cai Zhi-heng, ZHANG Lei

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** This paper analyzed seismic response of SDOF elastic-perfectly plastic (EPP) hysteretic systems considering  $P-\Delta$  effect. It used totally 370 earthquake records belonging to four site and soil conditions to calculate the inelastic deformation ratios ( $C_d$ ) with different ductility, and used the characteristic periods  $T_{ga}$  and  $T_{gR}$  to normalize the  $C_d$  spectra to keep the valley spectral values at these two periods. Results indicate that both  $P-\Delta$  effect and damping ratio have significant effects on  $C_d$ , especially nearby the characteristic periods.

**Key words:** elastic-perfectly plastic hysteretic model; inelastic deformation ratio; characteristic period;  $P-\Delta$  effect; valley characteristic

在抗震设计中,除了要求结构能够抵抗地震作用引起的地震力外,还要使侧移限制在一定的范围内,以避免影响结构的正常使用或耐久性能。同时,出于经济方面的考虑,要求结构在经历大振作用下保持无损是不现实的,而且历次的地震灾害表明:一些房屋在经历大震后,产生了相当大的塑性变形却没有倒塌,所以,抗震设计都允许利用结构的塑性变形,而相对于弹性分析,非线性地震反应的时程分析非常耗时,因此,有必要研究和建立弹塑性最大变形

$\Delta_{max}$ 与弹性变形  $\Delta_e$  之间的关系,以避免复杂的弹塑性侧移计算,尤其是在概念设计阶段,快速而具有足够精度的估算变得尤为重要。

现有研究<sup>[1-7]</sup>较为一致的看法是,影响位移放大系数  $C_d$  的主要因素是:结构自振周期、延性系数、阻尼比、场地类别。Riddell<sup>[8]</sup>的研究表明后期刚度的存在会减小位移放大系数,但是这种影响并不明显,可以偏于安全地用不具有后期刚度的理想弹塑性体系来计算弹塑性位移。Chopra<sup>[9]</sup>采用  $T_c$  (加速度敏

收稿日期: 2011-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908203)

作者简介: 童根树(1963-),男,浙江大学教授,博士生导师,主要从事钢结构稳定性研究, (E-mail) hmtang6778@sina.com。

感区与速度敏感区的临界结构周期)标准化的  $C_d$  谱,也得到同样的结论,而且发现这种影响主要集中在加速度敏感区。Amador<sup>[10]</sup>和 Lin<sup>[11]</sup>则分别建立等效单自由度体系的  $C_d$  谱来计算低高度砖混结构和规则多层体系的顶层位移。但这些研究都未采用或仅仅采用 1 个特征周期来对周期进行标准化,会造成统计结果的失真。

近年来,强度折减系数  $R$  得到了进一步研究<sup>[12]</sup>,出现了利用  $R$  来计算弹塑性位移的“间接法”: $C_d = \mu/R$ 。Miranda<sup>[13]</sup>的研究显示间接法获得的  $C_d$  可能会小于直接通过数值计算获得的  $C_d$ ,意味着间接法会低估结构的最大弹塑性位移,这是非常危险的。事实上,由于  $R$  谱是统计分析获得的,即

$$R = (\sum_{i=1}^n R_i)/n, \quad (1)$$

与其统计意义一致的  $C_d$  应为

$$C_d = (\sum_{i=1}^n C_{di})/n = (\sum_{i=1}^n u/R_i)/n = \frac{\mu}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}, \quad (2)$$

间接法则为

$$C_d = \mu/R = n\mu/(\sum_{i=1}^n R_i). \quad (3)$$

可见,式(2)与式(3)存在着明显的差异,有必要建立单独的  $C_d$  谱。

应用理想弹塑性滞回模型计算  $C_d$  谱,采用 2 个特征周期  $T_{ga}$  和  $T_{gr}$  对周期进行标准化处理,以避免对结果直接平均带来的统计失真,同时考虑二阶效应和阻尼比对  $C_d$  的影响。

## 1 理论基础

### 1.1 理想弹塑性滞回模型

分析采用的滞回模型如图 1 所示,A 曲线为结构完全保持弹性时的反应,最大地震力及最大弹性位移分别为  $F_e$  和  $\Delta_e$ ,B 曲线为 EPP 滞回模型时的动力反应, $F_y$ 、 $\Delta_y$  和  $\Delta_{max}$  分别为给定延性时的屈服力、屈服位移和最大塑性位移。

图 1 中,此时的位移延性: $\mu = \Delta_{max}/\Delta_y$ , (4)

$$\text{折减系数: } R = F_e/F_y = \Delta_e/\Delta_y, \quad (5)$$

$$\text{位移放大系数: } C_d = \Delta_{max}/\Delta_e = \mu/R. \quad (6)$$

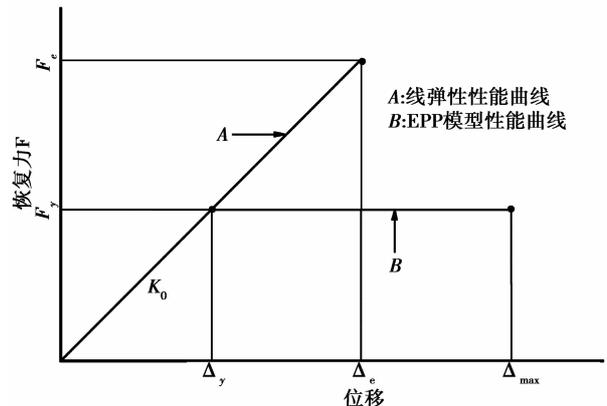


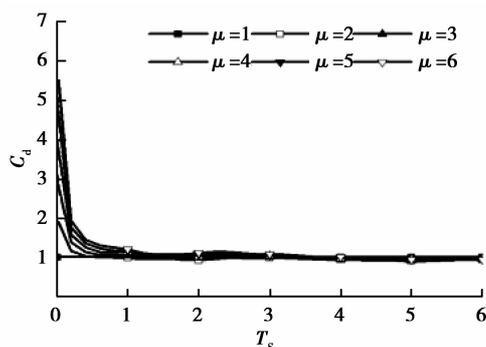
图 1 理想弹塑性滞回模型

### 1.2 2 个特征周期 $T_{ga}$ 和 $T_{gr}$

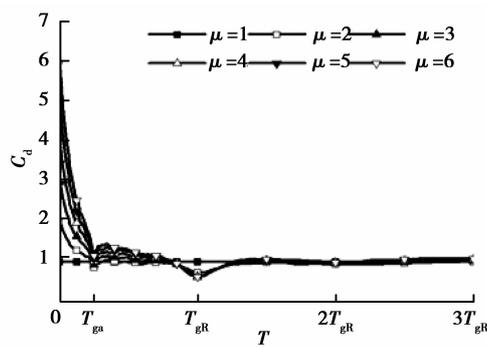
Miranda<sup>[14]</sup>在分析软土地条件下的地震力折减系数  $R$  谱时发现,不同地震波作用下的  $R$  谱峰值点对应的结构周期并不相同,Miranda 将其定义为特征周期  $T_{gr}$ ,若对  $R$  谱仅仅进行简单的算术平均(即相同结构自振周期下,对大量不同地震波输入下分析得到的数据,进行简单的相加,然后平均)将使获得的  $R$  谱没有明显的峰值特性,统计结果失真,因此,应先对周期用  $T_{gr}$  进行标准化处理。事实上, $R$  谱在特征周期  $T_{ga}$  处也呈现一较小的峰值( $T_{ga}$  为加速度反应峰值对应结构周期),所以应该采用 2 个特征周期  $T_{ga}$  和  $T_{gr}$  来进行标准化处理。

由式(6)可知,在等延性情况下, $R$  峰值点处的  $C_d$  谱应出现谷值。同样出于保留谷值特性的目的, $C_d$  谱应采用 2 个特征周期  $T_{ga}$  和  $T_{gr}$  对横轴周期进行标准化。

对于 2 个特征周期谷值现象的解释是:在特征周期处,对于弹性体系,容易发生共振, $\Delta_e$  较大,而在塑性情况下,结构的滞回耗能有效地减弱了共振的影响,使得  $\Delta_{max}$  并不如  $\Delta_e$  大,所以, $C_d$  出现谷值。从图 2(a)、(b)可见,周期经过标准化的  $C_d$  谱,较好地保留了单条地震波的谷值特性。



(a) 周期未标准化的  $C_d$  平均谱



(b) 周期未标准化的  $C_d$  平均谱

图 2 A 类场地的  $C_d$  平均谱

### 1.3 分析方法

计算模型如图 3 所示,由底部弯矩动力平衡得

$$[m(\ddot{y}+a_g)+c\dot{y}+F(k,y,\dot{y})] \cdot h = Py, \quad (7)$$

$$\text{转化为 } m\ddot{y}+c\dot{y}+[F(k,y,\dot{y})-\theta K_0 y] = -ma_g, \quad (8)$$

式中: $m$  是系统质量; $y$  是系统相对位移; $F(k,y,\dot{y})$  是结构恢复力; $c$  是系统阻尼; $k$  是切线刚度; $K_0$  是初始弹性刚度; $a_g$  是地震加速度; $\theta = P/hK_0$  是二阶效应系数。

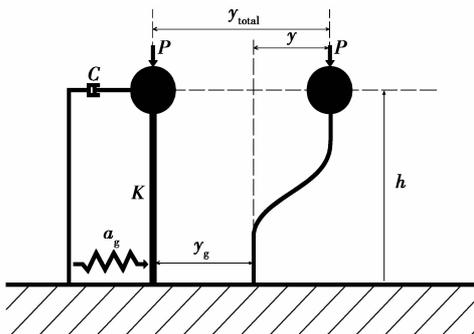


图 3 考虑  $P-\Delta$  效应的结构模型

计算  $C_d$  的步骤如图 4 所示。采用自编的 C++ 程序进行动力时程分析,为了避免因数值计算方法产生计算阻尼而导致过大的误差,文中采用无计算阻尼的中点加速度法。计算周期为  $0 \sim 6T_{gR}$ , 分别考虑了延性  $\mu$  为 2、3、4、5、6, 阻尼比  $\xi$  为 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 二阶效应系数  $\theta$  为 0, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 共 150 种组合。滞回模型为 EPP 模型, 并采用 2 个特征周期  $T_{ga}$  和  $T_{gR}$  对  $C_d$  谱横轴周期进行归一化处理: 将周期分为  $0 \sim T_{ga}$ ,  $T_{ga} \sim T_{gR}$  和  $T_{gR} \sim 6T_{gR}$  3 段: 在  $0 \sim T_{ga}$  段, 用  $T_{ga}$  对周期无量纲化, 即  $T/T_{ga}$ ; 在  $T_{ga} \sim T_{gR}$  段, 周期用  $T_{gR}$  无量纲化; 而在  $T_{ga} \sim T_{gR}$  段, 将区间  $T_{ga} \sim T_{gR}$  分成 120 段, 获得 119 个内插值点, 对所有地震波下的 119 个点的谱值进行直接相加并进行统计分析。

## 2 等延性位移放大系数

采用 EPP 滞回模型分析位移放大系数  $C_d$  时, 影响  $C_d$  的参数主要有: 延性  $\mu$ 、二阶效应系数  $\theta$  和阻尼比  $\xi$ 。为了反应各参数的影响, 采用如下公式

$$C_d = C_{d\mu} C_{d\theta} C_{d\xi},$$

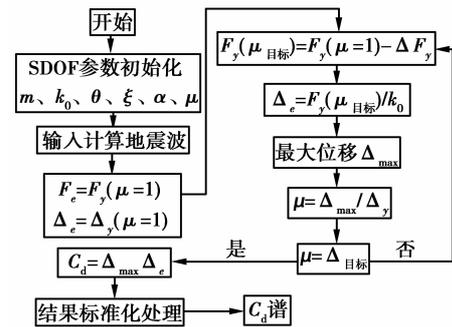


图 4 考虑  $P-\Delta$  效应的  $C_d$  谱计算程序框图

式中: $C_{d\mu}$  为基准谱, 采用阻尼比  $\xi = 0.05$ ,  $\theta = 0.000$ , 反应不同延性的影响; $C_{d\theta}$  为二阶效应调整系数, 以考虑不同二阶效应的影响; $C_{d\xi}$  为阻尼调整系数, 考虑不同阻尼比的影响。

### 2.1 基准位移放大系数 $C_{d\mu}$

采用 EPP 滞回模型, 各类场地条件下,  $\xi = 0.05$  时的  $C_{d\mu}$  平均谱 (即具有 50% 保证率的  $C_{d\mu}$  谱, 记为  $C_{d\mu, 50\%}$ ), 见图 5 所示。横轴周期经过 2 个特征周期  $T_{ga}$  与  $T_{gR}$  的标准化后, 很好地保留了  $C_{d\mu}$  谱在  $T_{ga}$  与  $T_{gR}$  附近的谷值特性, 尤其是在  $T_{gR}$  附近。而且, 不同场地情况下的  $C_{d\mu}$  谱形状与数值都比较接近, 主要是由于横轴已经包含了与场地类别相关的特征周期。 $C_{d\mu}$  变化规律也相仿: 当  $T$  接近于 0 时,  $C_{d\mu}$  都趋近于对应的  $\mu$ ;  $T < T_{ga}$  时,  $C_{d\mu}$  基本随  $T$  线性减小, 从大于 1 减小到 1 附近;  $T_{ga} < T < T_{gR}$  时,  $C_{d\mu}$  大致先升后降, 并且下降到 1 以下;  $T_{gR} < T < 1.5T_{gR}$  时,  $C_{d\mu}$  逐渐上升, 接近 1; 当  $T > 1.5T_{gR}$  时,  $C_{d\mu}$  基本保持在 1 附近, 意味着此时满足等位移准则。此外,  $\mu$  的影响集中在  $T < T_{ga}$  和  $T_{ga} < T < T_{gR}$  的中间段, 在这 2 个周期段中, 延性越大,  $C_{d\mu}$  值越大,  $T > T_{gR}$  后, 不同延性下的  $C_{d\mu}$  基本无差异。在 CECS160-2004 (2004)<sup>[15]</sup> 中选用  $C_{d\mu}$  基本小于 1, 在长周期  $T > T_{gR}$  是满足要求的, 而对于短周期  $T < T_{gR}$  则显得偏低, 尤其是对于周期  $T < T_{ga}$ , 过低地估计了  $C_{d\mu}$  的大小, GB50011-2001(2008)<sup>[16]</sup> 中的  $C_{d\mu}$  介于 1.3~2.2, 一方面, 对于长周期显得偏大, 使得侧移要求过于严格, 另外, 对于  $T < T_{ga}$  则也存在着偏小的危险。

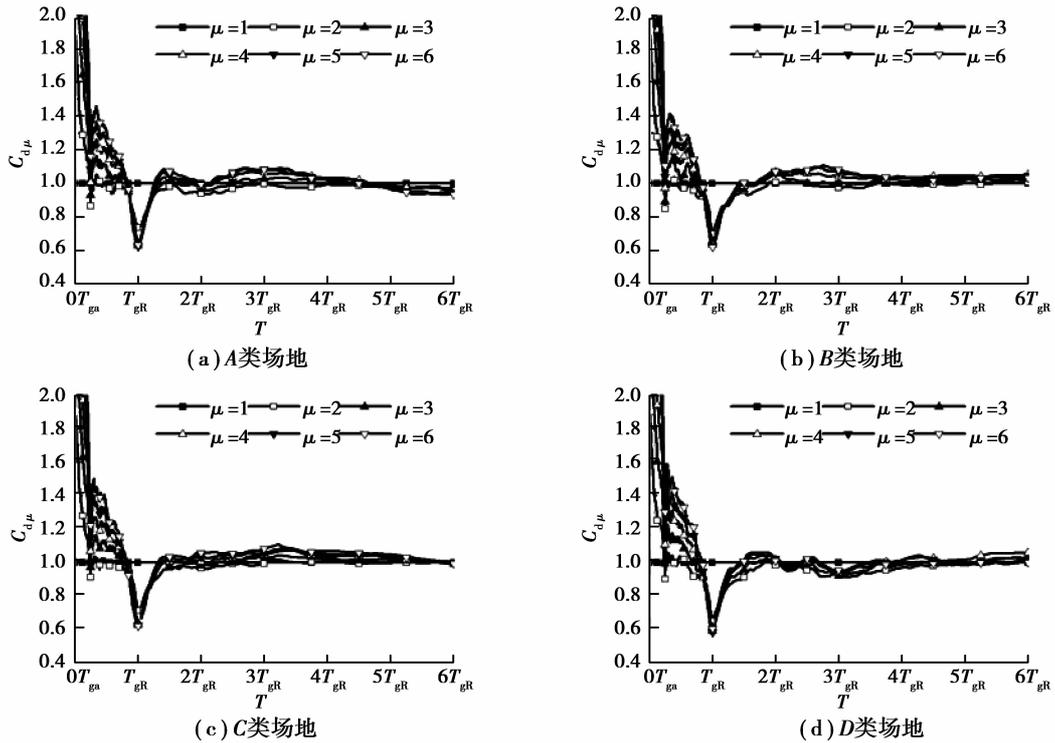


图 5 不同场地  $C_{d\mu,50\%}$  谱

图 6 为  $C_{d\mu}$  谱相应的变异系数 COV (coefficient of variation)。当  $T < T_{ga}$  时,变异系数基本随周期增加而增大,在  $T = T_{ga}$  附近达到峰值,大致在 0.2~0.4 之间;当  $T > T_{ga}$  时,变异系数基本在定值附近波

动,且波动幅度较小,基本在 0.2~0.35 之间。延性对 COV 的影响贯穿于整个周期,延性越大,COV 越大。与  $C_{d\mu,50\%}$  谱相同,周期经过标准化的 COV 谱受场地影响也非常小,基本可以忽略。

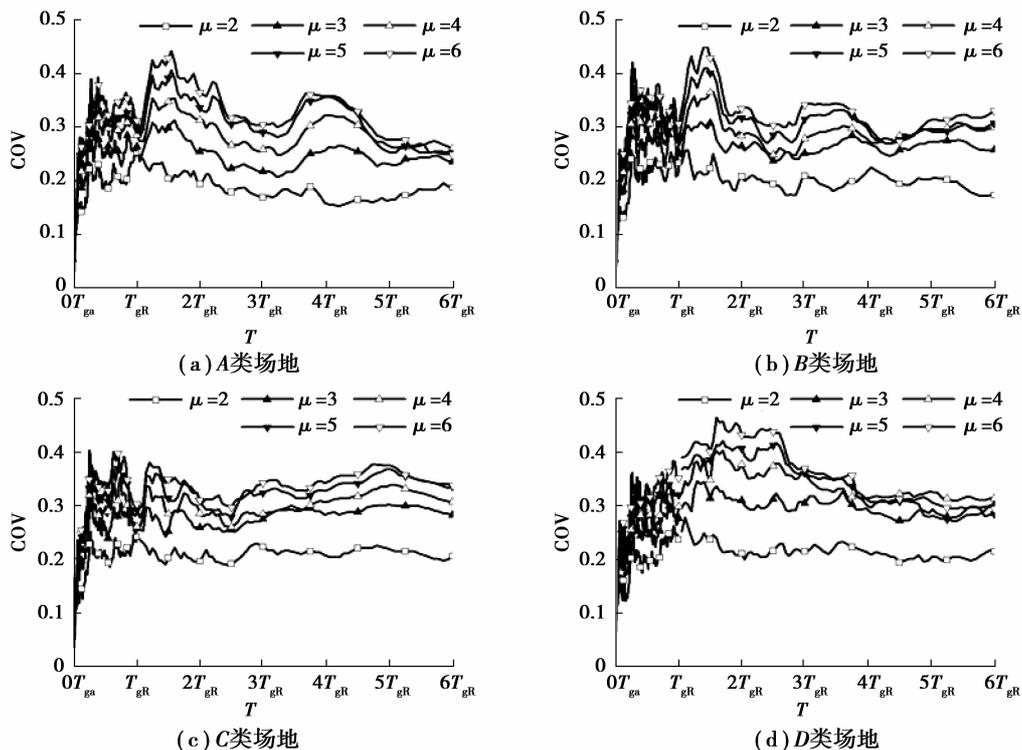


图 6 不同场地  $C_{d\mu}$  变异系数

在设计中,根据结构重要性的不同,除了采用平均谱(50%保证率)外,还可以采用具有更高保证率的  $C_{d\mu}$  谱,通过下式获得: $C_{d\mu} = C_{d\mu,50\%} + t \cdot \sigma = C_{d\mu,50\%} + t \cdot COV \cdot C_{d\mu,50\%} = C_{d\mu,50\%} (1 + t \cdot COV)$ ,其中  $t$  为不同保证率时的保证率系数,对应于 90% 保证率的保证率系数为  $t=1.282$ 。由于标准化后的  $C_{d\mu,50\%}$  谱和 COV 谱受场地影响都很小,因此,可以用 4 类场地的平均谱来代替不同场地类别下  $C_{d\mu}$  谱。

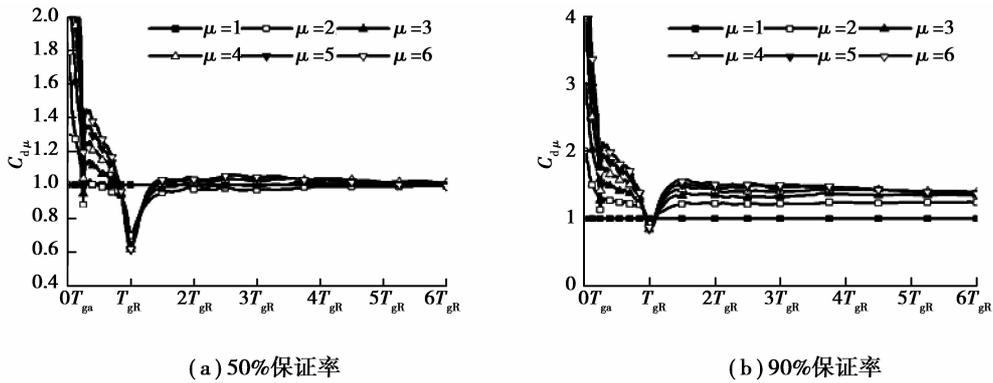


图 7 四类场地平均谱

$\eta_{\mu}$  拟合如下:

$$T \leq T_{ga}: C_{d\mu} = \mu + (C_{\mu a} - \mu)(T/T_{ga}),$$

$$T_{ga} < T \leq T_{gR}: C_{d\mu} = C_{\mu a} \left( \frac{T_{gR} - T}{T_{gR} - T_{ga}} \right)^{0.7} +$$

$$C_{\mu R} \left( \frac{T - T_{ga}}{T_{gR} - T_{ga}} \right)^{0.3},$$

$$T_{gR} < T \leq 1.3T_{gR}: C_{d\mu} = C_{\mu R} + (C_{\mu g} - C_{\mu R})(T - T_{gR}) / (0.3T_{gR}),$$

$$T > 1.3T_{gR}, C_{d\mu} = C_{\mu g}.$$

根据保证率不同,50%保证率和 90%保证率的参数分别为

$$C_{\mu a}: 1, 0.85 + 0.15\mu;$$

$$C_{\mu R}: 1 - 0.7(\mu - 1)\mu^{-1.25}, 1 - 0.3(\mu - 1)\mu^{-1.25};$$

$$C_{\mu g}: 1, 0.55 + 0.45\mu^{0.5}$$

拟合结果与统计值对比如图 8 所示。

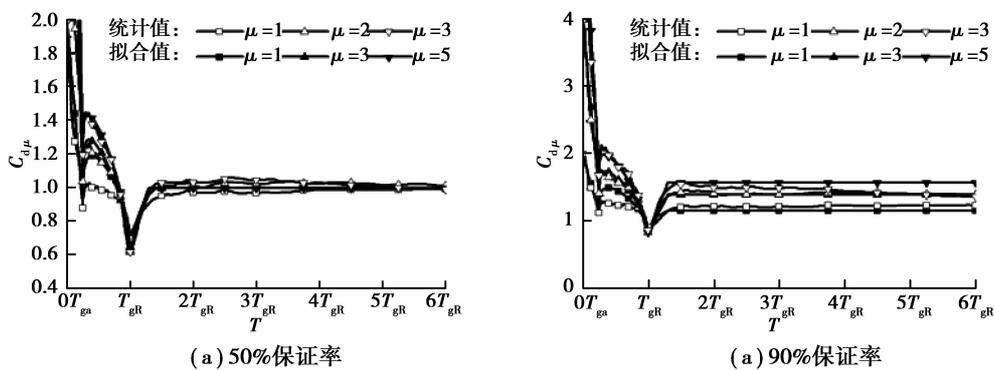


图 8 四类场地拟合谱

### 2.2 P-Δ 效应的影响 $C_{d\theta}$

从图 9(a)、(b)可以发现,考虑了  $P-\Delta$  效应后,不同场地类别下的  $C_{d,50\%}$  和  $C_{d,90\%}$  值差异同样不大,因此,依然可以用四类场地平均谱来考虑不同场地

图 7(a)、7(b)分别为 4 类场地平均  $C_{d\mu,50\%}$  谱和  $C_{d\mu,90\%}$  谱。对于  $C_{d\mu,90\%}$  谱,一个显著的变化在于整体数值的提高,此外, $T > T_{gR}$  后的  $C_{d\mu,90\%}$  也受延性  $\mu$  的影响, $\mu$  越大, $C_{d\mu,90\%}$  越大,其原因在于 COV 受延性的影响,GB50011-2001(2008)中也反映了同样的现象:延性越大, $C_{d\mu}$  值越大。尽管整体数值提高,但在  $T_{ga}$  与  $T_{gR}$  附近的谷值特性并没有消失。

类别下的  $C_d$  谱。所以二阶效应调整系数可以通过下式获得: $C_{d\theta} = \text{四类场地平均 } C_{d,\theta \neq 0.000} / \text{四类场地平均 } C_{d,\theta = 0.000}$ ,如图 10 所示。其中  $C_{d,\theta = 0.000}$  即为上面的基准谱  $C_{d\mu}$ 。

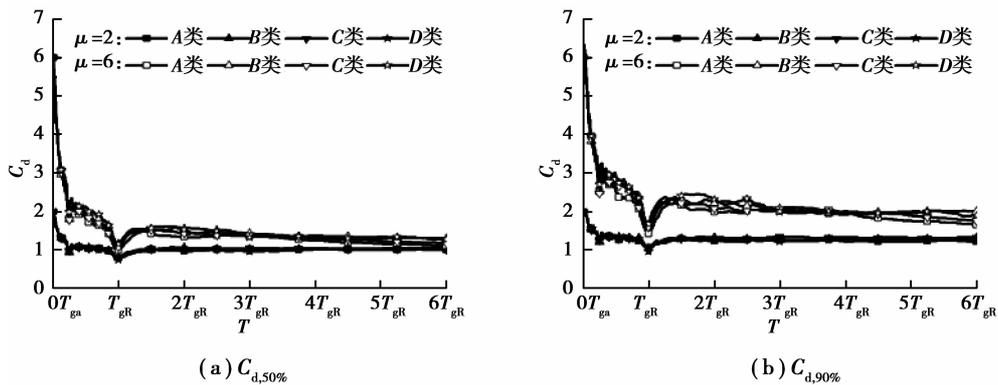


图 9  $\theta=0.050$  时四类场地  $C_d$  谱

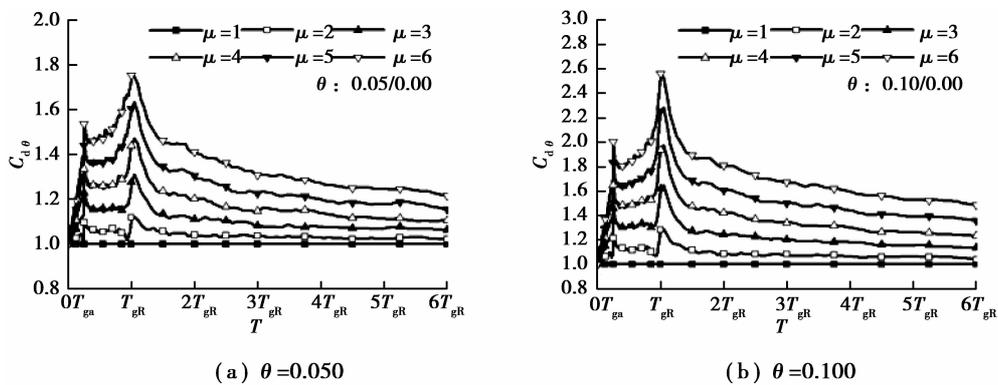


图 10 二阶效应调整系数  $C_{d\theta}$

由图 10 可知:二阶效应的存在增大了位移放大系数,而且,二阶效应系数  $\theta$  越大,  $C_{d\theta}$  越大;随着延性  $\mu$  的增大,  $C_{d\theta}$  也增大,意味着考虑二阶效应后,高延性的位移增大系数  $C_d$  更大,这与  $\theta=0.000, T > T_{gR}$  的  $C_d$  不随延性变化差异非常大,其原因在于,延性越大,其位移越大,在考虑二阶效应后,必然受到更大的影响;此外,不同周期的  $C_{d\theta}$  并不一样,在 2 个特征周期  $T_{ga}$  与  $T_{gR}$  处呈现峰值,这是由于在特征周期处,存在共振效应的影响,位移大于非特征周期处,二阶效应的影响更加明显,因此,对周期处于特征周

期附近的结构体系,更要注意二阶效应的不利影响,尤其是在  $T_{gR}$  附近。

对  $C_{d\theta}$  拟合如下,图 11 为相应的拟合结果

$$\begin{aligned}
 T \leq T_{ga} : C_{d\theta} &= 1 + 2(\mu - 1)\theta T / T_{ga}, \\
 T_{ga} < T \leq T_{gR} : C_{d\theta} &= 1 + (\mu - 1) \theta \left[ 1.5 + 1.5 \left( \frac{T - T_{ga}}{T_{gR} - T_{ga}} \right)^{8.5 - \mu} + 0.5 \left( \frac{T_{gR} - T}{T_{gR} - T_{ga}} \right)^{0.025/\theta} \right], \\
 T > T_{gR} : C_{d\theta} &= 1 + 3(\mu - 1) \theta \left( \frac{\mu - 1}{10T/T_{gR} + \mu - 11} \right)^{0.5}.
 \end{aligned}$$

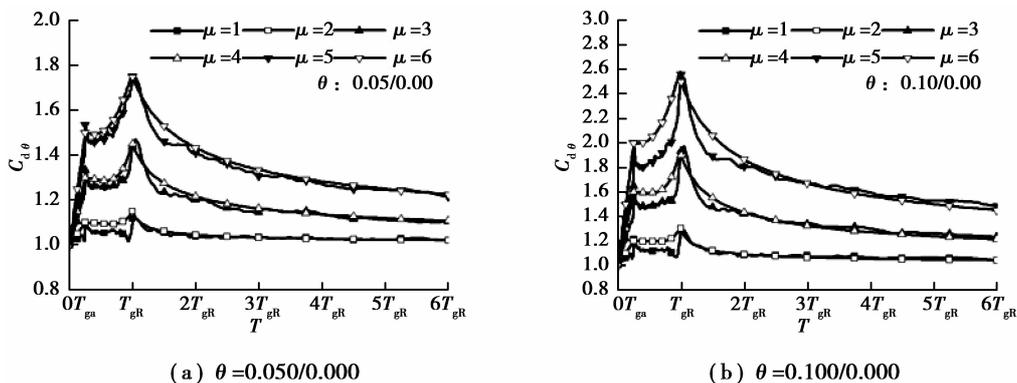


图 11  $C_{d\theta}$  统计值与拟合值对比

### 2.3 阻尼比的影响 $C_{d\xi}$

$C_{d\xi} = C_{d,\xi \neq 0.05} / C_{d,\xi = 0.05}$  用于对基准谱  $C_{d\mu}$  进行调整,以考虑不同阻尼比的影响。

图 12 为不同情况下的  $C_{d\xi}$ ,可以发现:不同延性  $\mu$  时的  $C_{d\xi}$  并无多大差异,因此,阻尼对  $C_{d2}$  的影响并不随延性变化;阻尼比  $\xi$  越小,  $C_{d\xi}$  也越小,对于阻尼比  $\xi < 0.05$ ,  $C_{d\xi}$  都基本小于 1,说明阻尼比越小,位移放大系数越小,反之,位移放大系数越大,是否意味着阻尼比的存在是一种不利因素呢?通过下式来解释:

$$C_{d\xi} = \frac{C_{d,\xi < 0.05}}{C_{d,\xi = 0.05}} = \frac{\Delta_{\max,\xi < 0.05} / \Delta_{e,\xi < 0.05}}{\Delta_{\max,\xi = 0.05} / \Delta_{e,\xi = 0.05}} = \frac{\Delta_{\max,\xi < 0.05} / \Delta_{\max,\xi = 0.05}}{\Delta_{e,\xi < 0.05} / \Delta_{e,\xi = 0.05}}$$

由于阻尼耗能的存在,使得  $\Delta_{e,\xi = 0.05} < \Delta_{e,\xi < 0.05}$ ,  $\Delta_{\max,\xi = 0.05} < \Delta_{\max,\xi < 0.05}$ ,而阻尼对弹性体系的影响要大于对塑性体系的影响,即:  $\Delta_{e,\xi = 0.05} / \Delta_{e,\xi < 0.05} < \Delta_{\max,\xi = 0.05} / \Delta_{\max,\xi < 0.05}$ ,因此存在

$$\frac{\Delta_{\max,\xi < 0.05} / \Delta_{\max,\xi = 0.05}}{\Delta_{e,\xi < 0.05} / \Delta_{e,\xi = 0.05}} < 1.$$

所以,  $C_{d\xi} < 1$  并不能说阻尼是不利影响,相反,阻尼的存在起着一种有利的作用。

从图 12 还可以得到:不同场地类别下,周期经过标准化的  $C_{d\xi}$  区别不大;不同二阶效应系数下的  $C_{d\xi}$  有差异,  $\theta$  越大,  $C_{d\xi}$  越接近 1,意味着随着二阶效应的增大,阻尼所起的作用减弱。  $C_{d\xi}$  实际上受阻尼比和二阶效应的双重影响。

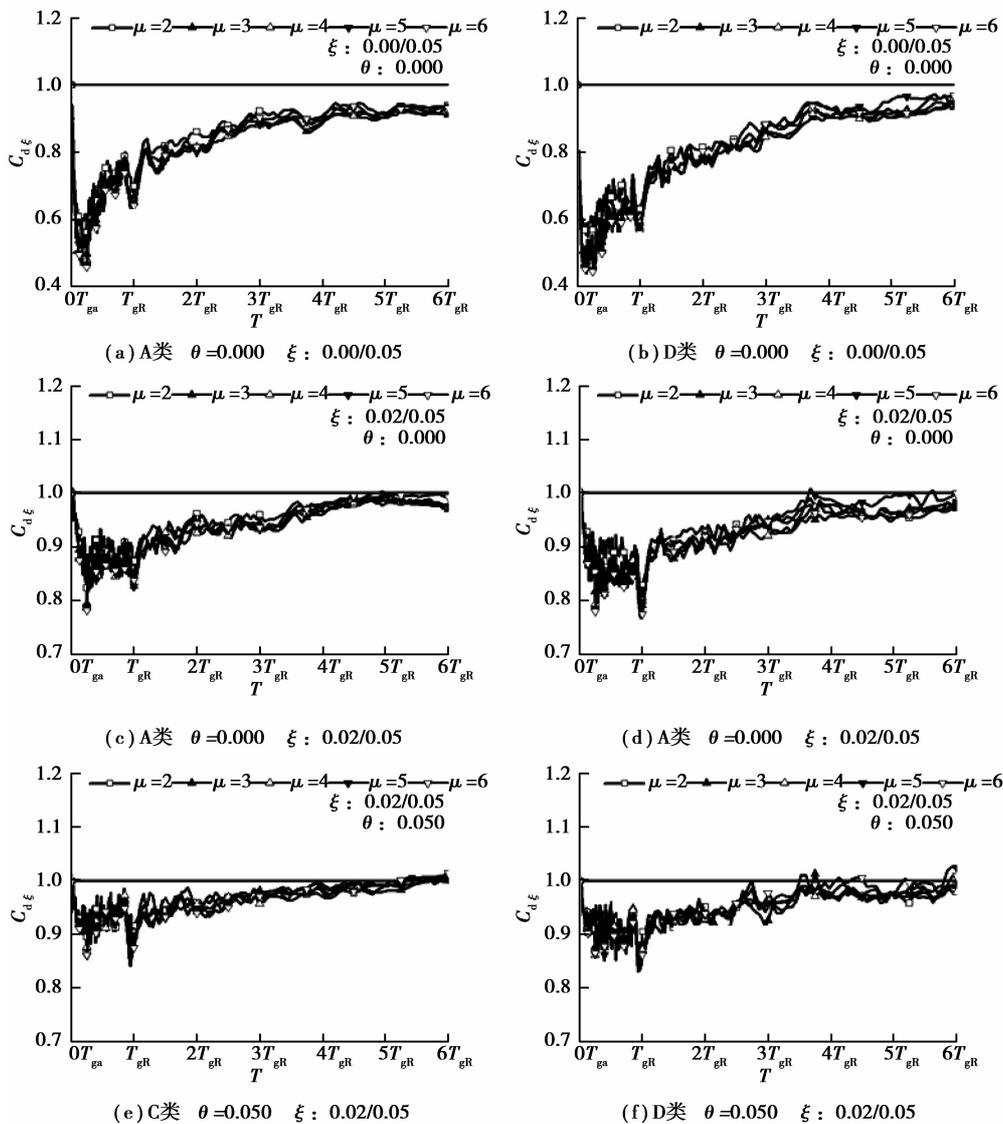


图 12 不同条件下的  $C_{d\xi}$

由于场地类别和延性系数对  $C_{d\xi}$  的影响并不大,所以,对于相同阻尼比,相同二阶效应系数的  $C_{d\xi}$ ,可以取其平均值来代替不同情况下的  $C_{d\xi}$ 。拟合如下

$$\begin{aligned} T \leq T_{ga} : C_{d\xi} &= 1 + (C_\xi - 1)(T/T_{ga}), \\ T_{ga} < T \leq T_{gR} : C_{d\xi} &= C_\xi, \\ T > T_{gR} : C_{d\xi} &= 1 + 5(C_\xi - 1)/[4 + (T/T_{gR})^2], \\ C_\xi &= 1 - \left(0.135 - \xi + \frac{0.006}{0.029 + \theta}\right) \left[1 - \left(\frac{\xi}{0.05}\right)^{0.5}\right]. \end{aligned}$$

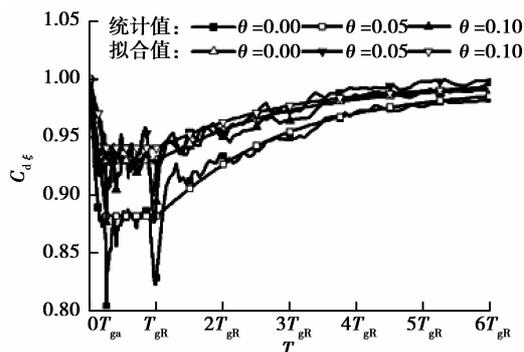


图 13  $C_{d\xi}$  统计值与拟合值对比 ( $\xi$ : 0.02/0.05)

### 3 结 论

通过分析 EPP 模型的单自由度体系在不同场地类别下的  $C_d$  谱,并考虑二阶效应和阻尼比对  $C_d$  的影响,得到如下结论:

1) 周期经过标准化的  $C_d$  谱很好地保留了特征周期处的谷值特性,避免了统计失真。

2) 长周期结构  $C_d$  趋近于 1, 满足等位移准则。

3) 二阶效应对  $C_d$  影响明显, 影响系数  $C_{d0}$  均大于 1, 二阶效应越大, 影响越大, 在特征周期处影响最显著, 尤其是在  $T_{gR}$  处。

4) 阻尼比对  $C_d$  的影响系数  $C_{d\xi}$  不受延性影响, 但随二阶效应变化, 二阶效应的增大会减弱阻尼比的影响。

5) 周期经过标准化的  $C_{d\xi}$ 、 $C_{d0}$ 、 $C_{d\xi}$ , 在不同场地类别下, 差异不大, 因为特征周期已经包含了场地类别的影响。

#### 参考文献:

[1] JORGE R G, MIRANDA E. Inelastic displacement ratios for evaluation of structures built on soft soil sites [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(6): 679-694.

[2] TOTHONG P, CORNELL C A. An empirical ground-motion attenuation relation for inelastic spectral displacement [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(6): 2146-2164.

[3] JORGE R G, MIRANDA E. Probabilistic estimation of maximum inelastic displacement demands for performance-based design [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(9): 1235-1254.

[4] CHENOUDA M, AYOUB A. Inelastic displacement ratios of degrading systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(6): 1030-1045.

[5] MOLLAIOLI F, BRUNO S. Influence of site effects on inelastic displacement ratios for SDOF and MDOF systems [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2008, 55(2): 184-207.

[6] RUPAKHETY R, SIGBJORNSSON R. Ground-motion prediction equations (GMPEs) for inelastic displacement and ductility demands of constant-strength SDOF systems [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2009, 7(3): 661-679.

[7] BOZORGNIA Y, HACHEM M M, CAMPBELL K W. Deterministic and probabilistic predictions of yield strength and inelastic displacement spectra [J]. Earthquake Spectra, 2010, 26(1): 25-40.

[8] RIDDELL R, GARCIS J E, GARCES E. Inelastic deformation response of SDOF systems subjected to earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 515-538.

[9] CHOPRA A K, CHINTANAPAKDEE C. Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: single-degree-of-freedom bilinear systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(9): 1309-1319.

[10] AMADOR T G, OSCAR Z C, JORGE R G. Displacement-based seismic assessment of low-height confined masonry buildings [J]. Earthquake Spectra, 2009, 25(2): 439-464.

[11] LIN Y Y, MIRANDA E. Estimation of maximum roof displacement demands in regular multistory building [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(1): 1-11.

[12] TONG G S, ZHAO Y F. Seismic force modification factors for modified-clough hysteretic models [J]. Engineering Structures, 2007, 29(11): 3053-3070.

[13] MIRANDA E. Estimation of inelastic deformation demands of SDOF systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(9): 1005-1012.

[14] MIRANDA E. Site-dependent strength-reduction factors [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119: 3503-3519.

[15] CECS160-2004. 建筑工程抗震性态设计通则(试用)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.

[16] GB50011-2001. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.