

文章编号: 1000-6869(2006)01-0060-06

A_y-D_y 格式地震需求谱及其在结构性能 抗震设计中的应用

王东升^{1,2}, 李宏男², 赵颖华¹, 王国新²

- (1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁大连 116026;
2. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 在结构基于位移抗震设计的改进能力谱法基础上建议了屈服谱加速度和屈服位移 (A_y-D_y) 格式的地震需求谱, 其特点是: 过原点的射线与不同位移延性系数的需求谱曲线相交, 各个交点对应的周期都相同, 从而为在结构基于位移抗震设计方法中实现“小震不坏、中震可修和大震不倒”的多级性能目标提供了方便。借助于 Pushover 分析具体给出了一钢筋混凝土框架结构在不同风险水平地震作用下抗震性能评价实例。

关键词: 基于性能抗震设计; 基于位移抗震设计; 多级性能目标; 能力谱法; 屈服位移
中图分类号: TU352.1 TU318.1 **文献标识码:** A

Inelastic seismic demand spectrum with A_y-D_y format and its application in performance based seismic design

WANG Dongsheng^{1,2}, LI Hongnan², ZHAO Yinhua¹, WANG Guoxin²

- (1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Inelastic seismic demand spectrum with yield spectral acceleration-yield displacements format is introduced to the improved capacity spectrum method in order to consider multiple performance objectives in displacement based seismic design, because it has the advantage of that structural periods represented by radial lines intersecting demand spectra with different ductility factors are all the same. The multiple performance objectives are usually expressed as that designed structures can resist against minor earthquake without any damage, resist against moderate earthquake with repairable structural damage and resist against strong earthquake without collapse. Seismic performance evaluations of a RC frame using pushover analysis and capacity spectrum method under different earthquake design levels are illustrated as an example.

Keywords: performance based seismic design; displacement based seismic design; multiple performance objectives; capacity spectrum method; yield displacement

1 引言

近几次城市破坏性地震造成了巨额的经济损失, 使人们认识到基于生命安全性的抗震设计已不适合社会的发展, 提出了基于性能的抗震设计思想^[1]。与传统的考虑强度的设计相比, 位移更能反映结构在强烈地震作用下的非线性反应性态, 以位移作为设计目标,

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(50025823)、国家自然科学基金青年基金资助项目(50308027)和中国博士后基金资助项目(2004035544)。

作者简介: 王东升(1974—), 男, 内蒙古库伦旗人, 工学博士, 副教授。

收稿日期: 2004 年 10 月

可以很好地控制结构在地震时的功能状态,因此基于位移的抗震设计方法得到了较大发展^{2~10}。

目前比较受到大家关注的可实现基于位移的结构抗震设计的是 Chopra 等¹¹和 Fajfar 等¹²提出的改进能力谱方法。该方法首先通过非线性静力分析获得结构能力曲线并将多自由度系统转化为等效的弹塑性单自由度系统,其次是采用谱加速度和谱位移分别作为纵横坐标画在同一张图上的 ADRS 谱(AD 格式)同时表示地震强度需求和位移需求,再引入弹塑性谱获得“折减”了的系统地震需求曲线,最后通过结构能力曲线和地震需求曲线的交点求解系统位移反应(图 1)。Xue 等^{8,9}在改进能力谱法基础上引入了一个“能力谱图折减系数”,将图解分析过程变为解析分析过程。这些方法都是以位移为设计目标,以位移延性系数作为辅助变量来确定系统的周期或刚度参数,通过迭代完成设计工作。罗文斌和钱稼茹¹⁰与上述工作采用 ADRS 谱不同,采用了以规范加速度反应谱生成的人造波建立的特征延性系数谱,其横坐标为屈服位移,纵坐标为位移延性系数,谱参数为屈服强度系数(定义为屈服强度与系统重力比)。Aschheim¹³、戴君武等¹⁴都指出与传统设计采用的刚度参数相比,系统的屈服位移更为稳定,对强度依赖不大。Aschheim¹³还建议了横坐标为屈服位移,纵坐标为屈服强度系数的等延性系数的“屈服点谱”(yield point spectra)用于结构基于位移的抗震设计或抗震性能评估。

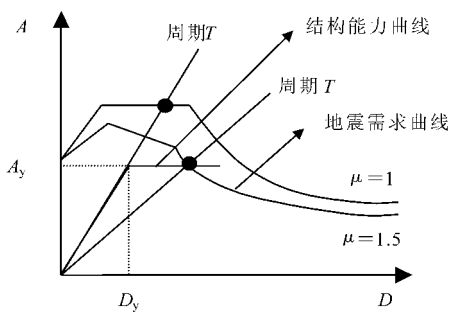


图 1 改进能力谱法求系统地震反应

Fig 1 Estimating structural seismic demands by improved capacity spectrum method

本文将常用的 AD 格式的地震需求谱变为与“屈服点谱”相近的 A_y-D_y 格式,其特点是:过原点的射线与不同位移延性系数的需求谱曲线相交,各个交点对应的周期都相同,这就为利用改进能力谱法直接实现可考虑多级性能目标的基于位移的结构抗震设计提供

了便利。所谓多级性能目标是指在不同风险水平地震作用下可以接受的结构最大破坏程度,在设计上多级性能目标可近似表述为“小震不坏、中震可修和大震不倒”。

2 A_y-D_y 格式的地震需求谱及性质

由弹性反应谱理论,在小阻尼比条件下,弹性加速度谱 $S_{a,e}$ 和弹性位移谱 $S_{d,e}$ 满足如下关系

$$S_{a,e} = \frac{4\pi^2}{T^2} S_{d,e} \quad (1)$$

式中, T 为周期。

由弹塑性反应谱理论,等延性系数的弹塑性位移谱 $S_{d,p}$ 与弹性位移谱 $S_{d,e}$ 满足如下关系

$$S_{d,p} = \mu \frac{S_{d,e}}{R} \quad (2)$$

式中, μ 为位移延性系数,假定为常数; \bar{R} 表示多条地震波统计平均的弹性位移谱与等延性系数下统计平均的折减了的弹性位移谱之比^[15,17]。

\bar{R} 与我们通常所说的等延性强度折减系数谱 $R(\mu, T)$ 有所不同,后者通常表示多条地震波的弹性位移谱与等延性系数下折减了的弹性位移谱之比的统计平均^[16,17]。在一些文献中常将式(2)中的 \bar{R} 取为 $R(\mu, T)$,并基于式(2)由弹性设计位移谱间接建立弹塑性设计位移谱,但这样间接建立的弹塑性设计位移谱与弹性设计位移谱在统计意义(通常表示多条地震波最大位移反应结果的平均)上并不能很好对应,文献[17]中对此有详细论述。从统计意义一致角度考虑,等延性系数的弹塑性位移谱 $S_{d,p}$ 与弹性位移谱 $S_{d,e}$ 更为合理的关系应为式(2),且不应以 $R(\mu, T)$ 代替 \bar{R} 。

利用式(2)间接建立统计意义一致的弹塑性位移反应谱,需要解决 \bar{R} 的计算问题。 \bar{R} 与 $R(\mu, T)$ 之间存在密切关系,文献[17]通过理论分析指出:当假定地震波 i 的弹塑性位移谱 $S_{d,p}^{(i)}$ 和强度折减系数谱 $R^{(i)}$ 为相互独立的统计变量时,可以在统计上认为有 $\bar{R} = R(\mu, T)$ 成立,但进一步通过不同场地各 20 条地震波的统计分析表明,该假定仅在周期 T 小于 0.2s 时近似成立。在实际工程问题中当周期 T 小于 3s 可较粗略地认为不同场地条件 $\bar{R} \approx R(\mu, T)$,但是随着场地变软和位移延性系数变大,这样做会变得越来越偏于不安

全。在统计分析基础上结合等延性强度折减系数谱 $R(\mu, T)$ 的已有研究成果, 给出了 \bar{R} 的表达式^[17]

$$\bar{R} = \frac{R(\mu, T)}{\phi} \quad (3)$$

式中, ϕ 为修正系数, 综合考虑场地条件、位移延性系数、周期等影响因素后, 可稍偏安全地按表 1 取值; $R(\mu, T)$ 为平均等延性强度折减系数谱, 取为 Fajfar^[12] 给出的 VIDIC 公式的简化形式

$$\begin{cases} R(\mu, T) = (\mu - 1) \frac{T}{T_0} + 1 & T \leq T_0 \\ R(\mu, T) = \mu & T \geq T_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $T_0 = 0.65\mu^{0.3}T_c$, T_c 为地震动特征周期。

表 1 修正系数 ϕ

Table 1 Modified factor ϕ

场地条件	ϕ		
	$\mu \leq 2$	$2 < \mu \leq 4$	$4 < \mu \leq 6$
硬土	1.0	1.1	1.2
中硬(软)土	1.0	1.1	1.2
软土	1.0	1.2	1.3

注: 适用周期: 0.05~5s(硬土地场地条件); 0.05~3s(中硬(软)土地场地条件和软土地场地条件)。

图 2 给出了周期在 0.05~3s 范围内, 位移延性系数为 6, 不同场地的统计平均弹塑性位移谱与由式(2)及式(3)间接由弹性位移谱计算的结果的对比(加速度峰值 0.4g)。它们两者很相近, 计算结果稍大, 偏于安全。

将式(2)右侧的位移延性系数 μ 移至左侧, 则有

$$D_y = \frac{S_{d,p}}{\mu} = \frac{S_{d,e}}{R} \quad (5)$$

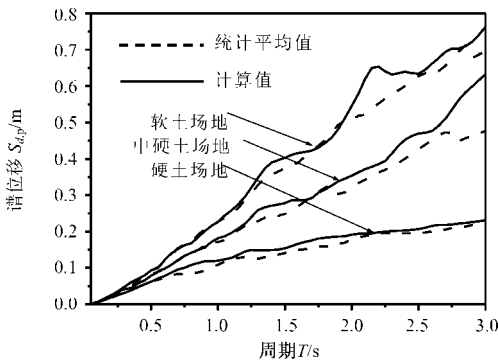


图 2 统计平均弹塑性位移谱与计算结果的对比 (位移延性系数 $\mu = 6$)

Fig 2 Comparison between statistical elasto-plastic displacement spectra and results of equation(2) (displacement ductility factor $\mu = 6$)

式中, D_y 为屈服位移谱, 表示结构(周期为 T)能够保持弹性状态的最大许可位移反应。

考虑式(1), 则表述系统屈服强度的屈服加速度谱为

$$A_y = \frac{4\pi^2}{T^2} D_y = \frac{S_{a,e}}{R} \quad (6)$$

以 D_y 为横坐标, A_y 为纵坐标建立与 $A-D$ 格式相类似的地震需求谱, 其中曲线上各点与原点(0,0)连线的斜率表示周期。质量为 M 的单自由度系统强度需求和位移需求为

$$F_y = MA_y \quad (7)$$

$$D = \mu D_y \quad (8)$$

由式(5)和式(6)可以看出 A_y-D_y 格式的地震需求谱满足如下一个性质: 过原点的射线与不同位移延性系数的需求谱曲线相交, 各个交点对应的周期都相同。这就为实现可考虑多级性能目标的基于位移的结构抗震设计提供了便利, 传统的 $A-D$ 格式的地震需求谱不具备这个性质(参考图 1), 这一点较早由侯钢领等^[18]指出。

图 3 给出了由附录 1 中 20 条硬土地地震记录计算得到的平均 A_y-D_y 格式的地震需求谱, 其中周期计算至 5s, 加速度峰值为 1.0m/s²。

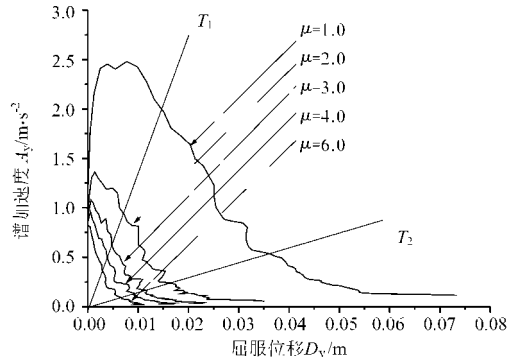


图 3 A_y-D_y 格式的地震需求谱

Fig 3 Inelastic seismic demand spectrum with yield spectral accelerations-yield displacements format

3 结构抗震性能评价应用实例

某 6 层现浇钢筋混凝土框架结构(图 4), 按 8 度 I 类场地抗震设防(《建筑抗震设计规范》(GBJ 11-89)), 横向承重。梁、柱的混凝土强度等级为 C30, 主筋 HRB335, 箍筋 HPB235, 柱端配箍筋 $\Phi 10 @ 100$ 。柱配

筋见表2。

利用 Pushover 分析和能力谱方法评价该结构在 8 度多遇地震(小震)和罕遇地震(大震)下的抗震性能。分析中假定楼板为无限刚性。

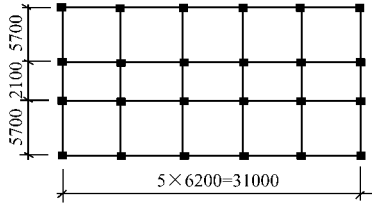


图4 框架1~6层平面图
Fig. 4 First sixth floor plans

表2 框架柱配筋情况
Table 2 Column reinforcement details

类别	层	$b \times h / \text{mm}$	纵筋(一侧)
柱	1	450 × 450	2Φ25(上端) 3Φ25+2Φ28(下端)
	2, 3	450 × 450	2Φ25(上、下端)
	4, 5, 6	400 × 400	2Φ25(上、下端)

(1)确定地震作用:依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001),取小震、中震和大震条件下加速度峰值分别为 $a_s = 0.07g$ 、 $a_m = 0.2g$ 和 $a_l = 0.4g$ 。地震需求谱采用 A_y-D_y 格式(图6),加速度峰值取为中震 $0.2g$,为附录1中20条硬土地地震波建立的平均谱。没有采用规范谱的原因是考虑由弹性加速度谱转化为弹性位移谱会在长周期段产生误差^[19]。

(2)框架 Pushover 分析:取横向一榀框架利用 DRAIN-2DX 分析程序建立分析模型,混凝土柱采用纤维梁柱单元(类型15)模拟。水平荷载分布 $P^T = [0.17, 0.34, 0.51, 0.68, 0.85, 1.00]$,为倒三角形形式。分析得到的基底剪力和顶层位移如图5所示,利用等能量准则转化为理想弹性形式,对应屈服剪力 $V_y = 721\text{kN}$,屈服位移 $\hat{\delta}_y = 0.046\text{m}$ 。

(3)将多自由度系统转化为等效单自由度系统:采用 Fajfar^[12] 给出的方案,假定位移形状 $\Phi^T = [0.11, 0.25, 0.38, 0.51, 0.63, 1.00]$,楼层集中质量矩阵 $M = \text{diag}(129.5, 116.6, 116.6, 116.6, 116.6, 86.8)$ (单位:t)。计算得到等效质量 $M^* = \Phi^T M \Phi = 308\text{t}$,参与系数 $\Gamma = (\Phi^T M \mathbf{1}) / (\Phi^T M \Phi) = 1.62$,等效水平屈服恢复力 $F_y = V_y / \Gamma = 445\text{kN}$,屈服位移 $D_y = \hat{\delta}_y / \Gamma = 0.028\text{m}$ 。

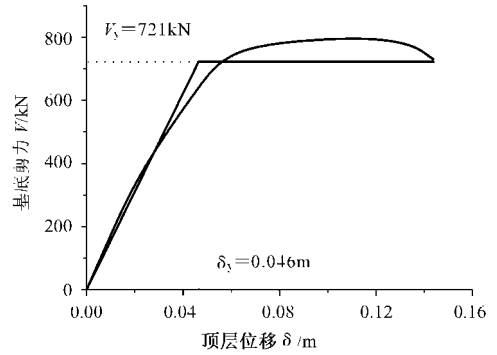


图5 基底剪力-顶层位移关系
Fig. 5 Base shear-top floor displacement relationship

(4)采用能力谱法计算等效单自由度系统位移反应:由系统等效质量 $M^* = 308\text{t}$,屈服力 $F_y = 445\text{kN}$,则对应屈服谱加速度 $A_y = F_y / M^* = 1.44\text{m/s}^2$,考虑屈服位移 $D_y = 0.028\text{m}$,在图6上找到对应点A,过A点与原点做一射线与不同位移延性系数的各条谱曲线相交,该射线对应结构周期 $T = 0.88\text{s}$ 。一般情况小震作用下结构保持弹性,设 $T = 0.88\text{s}$ 射线与位移延性系数 $\mu = 1$ 谱曲线交于B点,则由B点横坐标计算小震下的位移反应 $D_s = (0.05/a_m) \times a_s = 0.018\text{m} < 0.028\text{m}$,满足弹性假设要求。中震作用下系统位移反应由A点对应的位移延性系数确定,从图6可以看出它在 $\mu = 1$ 和 $\mu = 2$ 之间而接近于 $\mu = 2$,由 $T = 0.88\text{s}$ 射线与延性系数 $\mu = 1$ 和 $\mu = 2$ 交点的纵坐标(谱加速度)和A点对应的纵坐标(谱加速度)进行线性插值得到 $\mu = 1.8$,则中震作用下位移 $D_m = 1.8 \times 0.028 = 0.05\text{m}$ 。大震作用下系统的位移反应则需要将屈服强度或屈服位移降为原来的 (a_m/a_l) 倍(a_m 为图6所对

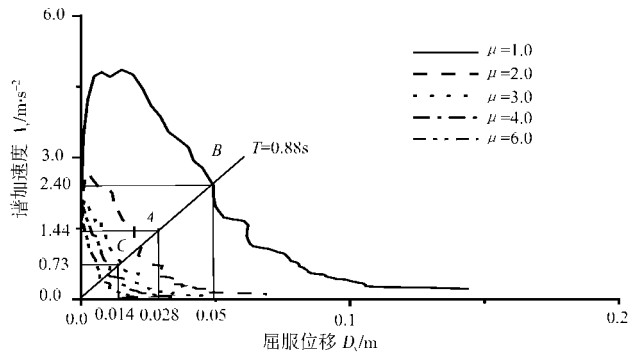


图6 A_y-D_y 地震需求谱与能力谱法求等效系统反应
Fig. 6 Estimating equivalent structural response by inelastic seismic demand spectrum with A_y-D_y format and capacity spectrum method

应的加速度峰值),若以屈服位移为准有 $D_y^* = 0.028 \times 0.2/0.4 = 0.014m$, 找到 $T = 0.88s$ 射线上对应 D_y^* 的 C 点,由 C 点对应的位移延性系数 $\mu \approx 3$ (求解与 A 点方法相同) 计算大震作用下系统的位移反应 $D_l = 3 \times 0.028 = 0.084m$.

也可以利用式(3)和式(4)由解析的方法求解等效单自由度系统反应的位移延性系数。以大震作用为例,系统发生弹性反应时 ($\mu = 1$) 对应谱加速度为 $2.40m/s^2$ (B 点),大震作用下对应的谱加速度为 $0.73m/s^2$ (C 点),则折减系数 $\bar{R} = 2.40/0.73 = 3.28$ 。地震动特征周期 $T_c = 0.38s$,等效单自由度系统周期为 $0.88s$,经简单推算知等位移准则成立,则位移延性系数 $\mu = \phi \bar{R} = 3.6$,约大于图解结果 20%。

(5)计算框架结构地震反应与性能评价:由等效单自由度系统反应乘以参与系数 Γ 就可以得到框架结构的顶层位移反应,进一步以此作为目标位移由 Pushover 分析结果确定框架结构的层间位移反应。小震作用下,框架顶层位移反应为 $\hat{q} = D_s \Gamma = 0.018 \times 1.62 = 0.029m < 0.046m$,框架基本处于弹性工作状态,对应最大层间位移角 $1/560$,小于规范^[21]要求的 $1/550$,发生在第 4 层;大震作用下,框架顶层位移反应为 $\hat{q} = D_l \Gamma = 0.084 \times 1.62 = 0.136m$,Pushover 分析顶层位移达到 $0.14m$ 时计算已经发散并终止,此时对应最大层间位移角为 $1/40$,大于规范^[21]要求的 $1/50$,发生在第 4 层,说明大震作用下结构可能会倒塌。总体上看,该框架结构不太满足“大震不倒”的性能抗震设计目标。图 7 给出了小震和大震条件下框架的层间位移角分布。

在本节的最后,简要解释一下前面大震作用下等效单自由度系统位移延性系数的求解方法。

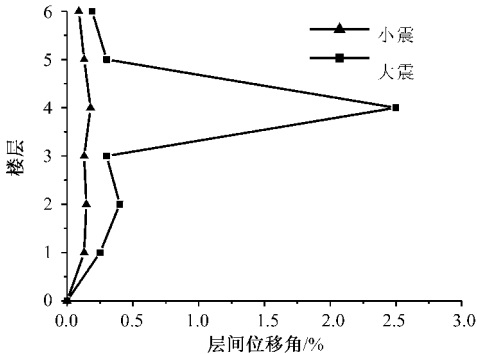


图 7 层间位移角分布

Fig. 7 Distribution of story drift angle

地震作用下弹塑性单自由度系统的运动方程为

$$m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + f(x, t) = -m_x \ddot{a}_g(t) \quad (9)$$

式中, m_x 和 c_x 分别是系统的质量和阻尼系数; $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 和 $\ddot{x}(t)$ 分别是系统的位移反应、速度反应和加速度反应; $f(x, t)$ 是系统的恢复力; $\ddot{a}_g(t)$ 为输入地震加速度。

设系统屈服位移为 x_y ,则屈服力为 $f_{x,y} = k_x x_y$, k_x 为系统刚度系数。定义无量纲时间过程 $\mu_x(t) = x(t)/x_y$,在小阻尼比假定条件下方程(9)可归一化为如下形式^[20]

$$\begin{aligned} \ddot{\mu}_x(t) + 2\xi_x \omega_x \dot{\mu}_x(t) + \omega_x^2 \frac{f(x, t)}{f_{x,y}} \\ = -\frac{\omega_x^2 \cdot R_x}{\beta_x(\omega_x, \xi_x)} \frac{\ddot{a}_g(t)}{\max(|\ddot{a}_g|)} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, ω_x 为系统圆频率; ξ_x 为系统阻尼比; $R_x = f_{x,e}/f_{x,y}$ 为强度折减系数, $f_{x,e}$ 是系统承受的弹性地震力,在小阻尼比条件下有 $f_{x,e} = m_x \beta_x(\omega_x, \xi_x) \times \max(|\ddot{a}_g|)$; $\beta_x(\omega_x, \xi_x)$ 为地震动 $\ddot{a}_g(t)$ 的放大系数反应谱。

定义位移延性系数 $\mu_x = \max(|x(t)|)/x_y$,即系统最大位移反应与屈服位移之比,则 $\mu_x = \max(|\mu_x(t)|)$ 为 $\mu_x(t)$ 的最大值。从式(10)可以看出强度折减系数 R_x 和位移延性系数 μ_x 关系与加速度峰值是无关系的,但是 R_x 确定则与加速度峰值有关(式(11))。若假定 R_x 已知,先由式(10)确定 μ_x ,再乘以 x_y ,就可以得到式(9)对应的系统最大位移反应。

本文中地震作用下等效弹塑性单自由度系统强度折减系数为

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{m_x \beta_x(\omega_x, \xi_x) a_l}{f_{x,y}} = \frac{m_x \beta_x(\omega_x, \xi_x) a_m}{f_{x,y} \frac{a_m}{a_l}} \\ &= \frac{m_x \beta_x(\omega_x, \xi_x) a_m}{f_{x,y}} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, a_l 和 a_m 分别为大震、中震对应的加速度峰值。

式(11)中的最后一项与图 6 中震作用下的 A_y D_y 格式的地震需求谱相对应,注意到此时系统的实际屈服强度 $f_{x,y}$ 已经被假想为“ $f_{x,y}$ ”,降为 $f_{x,y}$ 的 (a_m/a_l) 倍。在周期 T 一定条件下,屈服位移和屈服强度是成比例的,相应的实际屈服位移 x_y 也被假想为降至原来的 (a_m/a_l) 倍。这样通过将屈服强度或屈服位移假想为降至原来的 (a_m/a_l) 倍,就可以利用中震作用下的地

震需求谱来确定大震作用下等效单自由度系统反应的位移延性系数。

参 考 文 献

[1] Seacoc Vision 2000 Committee. Performance-based seismic engineering [R]. Structural Engineering Association of California, Sacramento, 1995.

[2] Mervyn J Kowalsky, M J Nigel Priestley, Gregory A Macrae. Displacement-based design of RC bridge columns in seismic regions[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24(12): 1623—1643.

[3] G M Calvi, GR Kingsley. Displacement-based seismic design of multi-degree-of-freedom bridge Structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24(9): 1247—1266.

[4] M S Medhekar, D J L Kennedy. Displacement-based seismic design of buildings-theory[J]. Engineering Structures, 2000, 22(3): 201—209.

[5] M S Medhekar, D J L Kennedy. Displacement-based seismic design of buildings-application [J]. Engineering Structures, 2000, 22(3): 210—221.

[6] T B Panagiotakos, M N Fardis. A displacement based seismic design procedure for RC building and comparison with EC8 [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30(10): 1439—1462.

[7] Anil K Chopra, Rakish K Goel. Direct displacement based design; use of inelastic vs. elastic design spectra [J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(1): 47—64.

[8] Qiang Xue. A direct displacement seismic design procedure of inelastic structures[J]. Engineering Structures, 2001, 23(11): 1453—1460.

[9] Qiang Xue, Cheng-Chung Chen. Performance based seismic design of structures: a direct displacement based approach [J]. Engineering Structures, 2003, 25(14): 1803—1813.

[10] 罗文斌, 钱稼茹. 钢筋混凝土框架基于位移的抗震设计 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 22—29.

[11] Anil K Chopra, Rakish K Goel. Capacity demand diagram method for estimating seismic deformation of inelastic structures, SDOF System [R]. University of California, Berkeley, PEER Report 1999/02.

[12] Peter Fajfar. Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(9): 979—993.

[13] Mark Aschheim. Seismic design based on the yield displacement

[J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(4): 581—600.

[14] 戴君武, 张敏政, 黄玉龙. 偏心结构扭转振动研究中几个基本参量的讨论 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 38—43.

[15] Rafael Riddell, Jaime E Garcia, Eugenio Garces. Inelastic deformation response of SDOF systems subjected to earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 515—538.

[16] Eduardo Mirand, Vitelmo V Bertero. Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design [J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(2): 357—379.

[17] 王东升, 李宏男, 王国新. 统计意义一致的弹塑性设计位移谱 [J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(1): 87—92.

[18] 侯钢领, 何政, 吴斌等. 钢筋混凝土结构的屈服位移 Chopra 能力谱损伤分析与性能设计 [J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 29—35.

[19] 周雍年, 周正华, 于海英. 设计反应谱长周期区段的研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 15—18.

[20] 王东升, 李宏男, 王国新. 双向地震作用弹塑性反应谱研究 [J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 248—254.

[21] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范 [S].

附录 1 硬土地地震记录

Appendix 1 Earthquake records in hard site

编号	台站	地震	断层距 km	分量	PGI g	PGV cm·s ⁻¹	PGD cm
1	117El Centro Array #9	Imperial Valley (40/5/19 Ms7.2)	8	I—ELC 180	0.31	29.8	13.3
				I—ELC 270	0.21	30.2	23.9
2	1095 Taff Lincoln School	Kern County (52/7/21 Ms7.7)	41	TAF021	0.16	15.3	9.2
				TAF111	0.18	17.5	9.0
3	1652Anderson Dam	Loma Prieta (89/10/18 Ms7.1)	20	AND270	0.24	20.3	7.7
				AND360	0.24	18.4	6.7
4	23Coolwater	Landers (92/6/28 Ms7.4)	21	CLW—LN	0.28	25.6	13.7
				CLW—TR	0.42	42.3	13.8
5	24157 LA- Baldwin Hills	Northridge (94/1/17 Ms6.7)	31	BLD090	0.24	14.9	6.2
				BLD360	0.17	17.6	4.8
6	24389 LA- Century City	Northridge (94/1/17 Ms6.7)	25	CCN090	0.26	21.1	6.7
				CCN360	0.22	25.2	5.7
7	90021LA-N Westmoreland	Northridge (94/1/17 Ms6.7)	29	WST000	0.40	20.9	2.3
				WST270	0.36	20.9	4.2
8	Tcu045	ChiChi (99/9/20 Ms7.6)	24	TCU045—N	0.50	39.0	14.3
				TCU045—W	0.47	36.7	50.7
9	Tcu047	ChiChi (99/9/20 Ms7.6)	33	TCU047—N	0.41	40.2	22.2
				TCU047—W	0.30	41.6	51.1
10	Tcu095	ChiChi (99/9/20 Ms7.6)	43	TCU095—N	0.71	49.1	24.5
				TCU095—W	0.38	62.0	51.8