

# 承载力退化体系中各延性系数下的地震力计算

童根树<sup>1</sup>, 叶 贇<sup>1,2</sup>, 张 磊<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 建筑设计研究院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 对承载力退化的修正理想弹塑性(MEPP)、剪切滑移(SSP)和双线性(BIL)滞回模型的单自由度体系进行弹塑性动力时程分析,得到了考虑承载力退化时不同场地、延性系数等参数组合下双周期标准化的地震力调整系数谱,结果表明:承载力退化对 BIL 和 SSP 模型的影响不大,对 MEPP 模型的影响则随退化值增大而增大. 计算了承载力有退化的 MEPP 模型的基底剪力影响系数谱  $\alpha_{EK}$ ,并给出了简化计算公式,进而得到与退化模型等效的理想弹塑性模型. 对有退化模型的承载力需求是理想弹塑性模型的  $\alpha_{EK}$  倍,同时变形能力绝对值也为相同延性系数的理想弹塑性模型的  $\alpha_{EK}$  倍.

**关键词:** 延性系数; 地震力调整系数; 基底剪力; 退化; 理想弹塑性体系

中图分类号: TU973.31

文献标志码: A

## Seismic Force with Different Ductility Factor in Strength Degrading System

TONG Genshu<sup>1</sup>, YE Yun<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** This paper presents an analysis of the seismic force modification factor  $R$  of single degree of freedom system including strength degrading modified elastic-perfectly plastic (MEPP) model, bilinear elastic (BIL) model and shear-slipped elastic-plastic (SSP) model for different site and ductility factors. Results reveal that the strength degradation has almost no influence on the  $R$  spectra of BIL and SSP model, but for MEPP model, its influence increases with the degradation, which cannot be neglected. The system coefficient spectra of base shear  $\alpha_{EK}$  were constructed to analyze the influence of the degradation of strength on seismic force modification factors. An ideal elastic-plastic model is proposed which is equivalent to the degradation model. For the strength degrading system, the strength demand and the

deformation-capacity demand are found to be  $\alpha_{EK}$  times of the ideal elastic-perfectly plastic model.

**Key words:** ductility factor; seismic force modification factor; base shear; degradation; elastic-perfectly plastic system

节点和构件具有的塑性变形能力反映了结构在 地震时经受不可恢复的变形和消耗地震能量的能力,表征这种能力的指标是延性系数. 目前国内外文献对如何定义延性系数有不同做法,变形能力和屈服位移的取值存在多种约定.

Park<sup>[1]</sup>总结对比了 4 种定义屈服位移  $\Delta_y$  和最大位移  $\Delta_u$  的方法,认为混凝土结构的屈服位移  $\Delta_y$  的取法应该取原点和曲线段上  $0.75P_{max}$  点 ( $P_{max}$  为峰值承载力)的连线和直线  $y=P_{max}$  的交点,如图 1 所示,最大位移取  $P_{max}$  时对应的位移是相对保守的,承载力下降一定数值时对应的位移是更接近于实际的最大位移. Park 并没有给出具体的下降值.

Kazemi<sup>[2]</sup>定义位移延性系数时屈服位移  $\Delta_y$  的取法和 Park 相同,极限位移  $\Delta_u$  则取承载力下降到峰值承载力的 80% 时对应的位移(图 1). Usami 等<sup>[3]</sup>采用了两种延性定义,  $\delta_m/\delta_y$  和  $\delta_{95}/\delta_y$ , 屈服位移  $\delta_y$  的取法是取曲线直线段的末端,  $\delta_m$  为峰值承载力时对应的位移,  $\delta_{95}$  取承载力下降到峰值承载力的 95% 时对应的位移,见图 2. 文献<sup>[4]</sup>将结构荷载位移曲线采用两折线理想化,第 1 段取弹性刚度,第 2 段终点取荷载位移曲线上结构允许达到的最大位移点,两折线的折点的确定则要求两折线下的面积等于曲线下的面积来确定. FEMA356 没有规定有效的延性系数如何确定.

等位移准则和等能量准则,都仅与延性系数有关,近二十年的研究<sup>[5-6]</sup>也表明,延性系数是决定地

收稿日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51078328, 50908203), 浙江省重点科技创新团队(2010R50034)

第一作者: 童根树(1963—),男,教授,工学博士,博士生导师,主要研究方向为钢结构稳定和抗震. E-mail: tonggs@ccea.zju.edu.cn

通讯作者: 叶 贇(1987—),男,工学硕士,主要研究方向为钢结构抗震. E-mail: iyeyun@yahoo.com.cn

震力的决定性因素,因此最大位移和屈服位移的取值非常重要.但是人为给定一个方法(例如人为给定下降 15% 的点作为计算最大位移的点),不仅难有依据,也不易被广泛接受.

本文研究承载力有退化模型的地震力折减系数.考察位移延性系数  $\mu = \Delta_{max} / \Delta_y$  相同时,不同承载力退化程度(例如变形达到  $\Delta_{max} = \mu \Delta_y$  时承载力退化 10%, 20%, 30% 等等)的模型,分析对比其地震力折减系数的差别.通过这种分析,了解不同延性系数定义下对应的地震力的差别,进而得到与退化模型等效的理想弹塑性模型,为地震力计算的合理化提供依据.

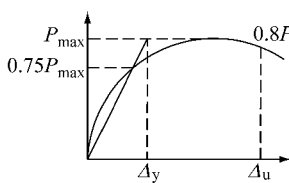


图 1 混凝土结构

Fig.1 Concrete structures

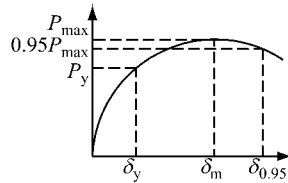


图 2 钢结构

Fig.2 Steel structures

### 1 分析方法

如规范 CECS160—2004<sup>[7]</sup> 中,通过对中震弹性地震力折减来获得弹塑性地震力,采用

$$F_{EK} = CF_e = F_e / R \quad (1)$$

式中:  $F_e$  为弹性地震力,  $R = 1/C$  为相应的地震力调整系数,它与  $\mu$  有关.

给体系输入地震波,进行弹塑性动力时程响应分析,研究其延性开展,与设定的延性能力进行比较,有差别时调整屈服承载力,直至延性开展与设定的延性能力相等,这样确定的屈服承载力就是设计应该采用地震力,与弹性最大基底剪力的比值即为结构影响系数.对结构体系输入大量不同地震波进行分析,对数据进行统计分析,得到各种弹塑性反应谱.

理想弹塑性 (elastic-perfectly plastic, EPP) 体系在给定延性下的地震力是

$$F_{EK} = \frac{F_e}{R_0} = \frac{\mu V_y}{R_0} \quad (2)$$

式中:  $R_0$  为理想弹塑性体系的地震力调整系数;  $V_y$  为地震承载力的峰值.记  $K$  为初始弹性刚度,  $K'$  为后期刚度,  $\alpha$  为后期刚度系数(可为负),则有

$$K' = \alpha K \quad (3)$$

$\Delta V_y$  是变形达到最大值时地震承载力的退化量:

$$\Delta V_y = -\alpha K (\mu - 1) \Delta_y = -\alpha (\mu - 1) V_y \quad (4)$$

$$F'_{EK} = \frac{F_e}{R'} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta F_{EK}}{F_{EK}} = \frac{F'_{EK} - F_{EK}}{F_{EK}} = \frac{R_0}{R'} - 1 \quad (6)$$

式(5)~(6)中:  $F'_{EK}$  为有退化模型的地震力;  $\Delta F_{EK}$  为有退化模型的地震力相对于 EPP 模型的地震力的变化;  $R'$  为有退化体系的地震力调整系数.

可得承载力退化值和后期刚度系数关系,见表 1.

表 1 承载力退化值和后期刚度系数  $\alpha$  关系

Tab.1 Relationship of strength degrading and post-stiffness factors

	$\Delta V_y / V_y$				
	10%	20%	30%	40%	50%
$\mu = 2$	-0.100	-0.200	-0.300	-0.400	-0.500
$\mu = 4$	-0.033	-0.067	-0.100	-0.133	-0.167
$\mu = 6$	-0.020	-0.040	-0.060	-0.080	-0.100

从美国 Berkeley 大学地震工程研究中心网站下载地震加速度纪录共 370 条,各地震记录的加速度反应峰值对应的周期是  $T_{ga}$ ,地震力调整系数  $R_\mu$  谱峰值点对应的周期是  $T_{gR}$ <sup>[8-9]</sup>. 四类场地统计平均意义上的  $T_{ga}$  分别为: 0.307, 0.364, 0.404, 0.494 s;  $T_{gR}$  分别为: 2.244, 2.096, 2.347, 3.166 s. 在统计平均的意义上,  $T_{gR}$  是  $T_{ga}$  的 5.5~6.7 倍. 反应谱曲线上将周期分为  $0 \sim T_{ga}$ ,  $T_{ga} \sim T_{gR}$  和  $T_{gR} \sim 6T_{gR}$  三段: 在  $0 \sim T_{ga}$  段,用  $T_{ga}$  对周期量纲一化;在  $T_{ga} \sim 6T_{gR}$  段,周期用  $T_{gR}$  量纲一化;在  $T_{ga} \sim T_{gR}$  段,将区间分成 100 段,获得 99 个内插值点,对所有地震波下的 99 个点的谱值直接相加并进行统计分析.

图 3 是真实地震波下人字撑框架和人字撑架抗侧力与层侧移角的关系,层侧移角定义为层间位移与层高的比值,见文献[10]第十章. 据此抽象出承载力退化条件下的 EPP 滞回曲线模型如图 4 所示,称为修正理想弹塑性 (modified elastic-perfectly plastic, MEPP) 模型. 图中,  $V'_y$  为考虑不同参数组合下的地震承载力的峰值.

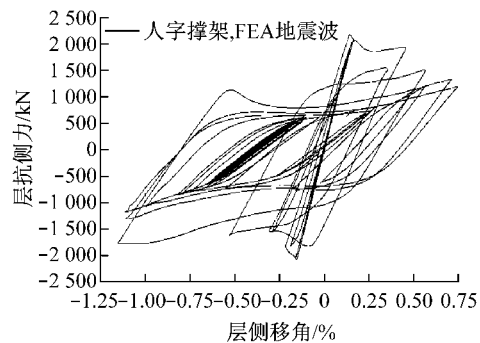


图 3 支撑架的滞回曲线

Fig.3 Hysteretic response of braced frames

图 4 所示,当位移越过屈服位移  $\Delta_y$ (1 点),结构进入屈服后阶段,承载力退化至 2 点;此后以初始刚度卸载,由于  $V'_y=V_y$ ,到 3 点后,承载力不退化;继续到达原始屈服压位移,即 4 点;如继续卸载,承载力退化至 5;此时结构有最大输入加速度,速度反向,以初始刚度加载,到达  $V_y$ (6 点)后,承载力不退化,至 7 点(上一步最大位移,2 点),如此结构做反复振动。

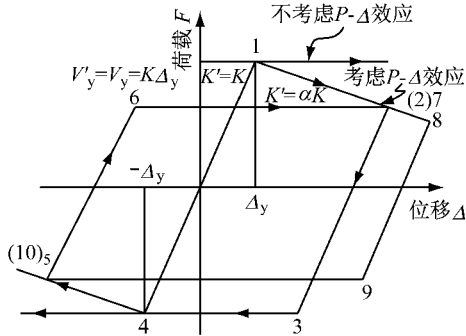


图 4 MEPP 模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of MEPP models

利用 MEPP 及剪切滑移(SSP)、双线性(BIL)模型,通过自编 C++程序得到了考虑不同自振周期、延性、承载力退化系数等参数组合下的双周期标准化的地震力调整系数  $R_\mu$ 。其中 SSP 模型是剪切滑移模型(shear-slip model),具有一次性耗能能力(one-off),描述中心支撑长细比很大的框架的恢复力特征;BIL 模型是无耗能能力的二段式弹性模型(bilinear-model),可描述橡胶支座。

定义  $\theta$  为  $P-\Delta$  二阶效应系数<sup>[8-10]</sup>。MEPP 模型和 EPP 模型受到  $P-\Delta$  效应的最大区别在于,图 4a 中的  $V'_y=V_y$ ,且  $y < \Delta_y$  时,  $K'=K$ ,文献[9]中  $V'_y=(1-\theta)K\Delta_y < V_y$ ,且  $y < \Delta_y$  时刚度是  $(1-\theta)K < K$ ,故刚度退化系数与二阶效应系数相等时,二阶效应对模型的影响更大。

单条地震力分步计算中,在  $\alpha=-0.1, \theta=0.05, \mu=6, T=T_{gR}$  的条件下输入 A 类 1060-N-AT2\_01 地震波。在地震波加速度输入过程中,输出位移  $\Delta$  和恢复力  $F$  的关系,最后得出的修正 EPP 模型滞回曲线模型。由图 5 可见,程序是准确的。

## 2 修正 EPP 模型

### 2.1 地震力调整系数 $R_\mu$ 谱

$\mu=2, \theta=0$ , 阻尼比  $\xi=0.05$  时,四类场地刚度退化系数  $\alpha$  分别为 0、-0.1、-0.2、-0.3、-0.4、

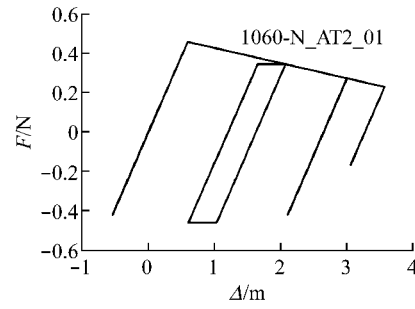


图 5 MEPP 模型示意图

Fig.5 Output diagram of MEPP model

-0.5 时的地震力调整系数  $R_\mu$  谱如图 6 所示。图中,  $R_{\mu,50\%}$  为地震力调整系数的平均谱,考虑承载力退化系数后:

(1) 承载力退化模型的地震力调整系数较  $\alpha=0$  均下降。承载力退化会导致由来回振动转变到单向偏移的现象,导致更大的侧向位移。位移增大,意味着在相同调整系数情况下,延性需求增大,进而削弱了结”构的防倒塌能力。为了获得与不考虑承载力退化系数时相同的延性需求,必须减小调整系数,以减小位移。

(2) 对于相同位移延性系数,特定的自振周期  $T$ ,地震力调整系数  $R_\mu$  随承载力退化绝对值的增大而减小,在  $0 < T < T_{g\alpha}$  段基本相同,在  $T_{g\alpha} < T < 6T_{gR}$  变化幅度相对较大,  $T=T_{g\alpha}$  和  $T=T_{gR}$  时存在峰值。

(3) 长周期下,随周期延长,整体变化趋于接近。

(4) 四类场地的标准化  $R_\mu$  谱非常接近,场地类别依然是影响  $R_\mu$  的主要因素之一,其影响隐含在横轴周期中。总体而言,D 类场地的地震力调整系数最大。

A~D 四类场地  $R_\mu$  的变异系数  $C_{ov}$  谱如图 7 所示,各类场地  $C_{ov}$  均在 0.2 左右波动。不同承载力退化下的谱也非常接近。

### 2.2 基底剪力的承载力退化影响系数 $\alpha_{EK}$

为了反映承载力退化对地震基底剪力的影响,引入参数  $\alpha_{EK} = F'_{EK}/F_{EK} = R_{\mu,\alpha}/R_{\mu,0}$  ( $R_{\mu,0}$  指  $\alpha=0$  时的  $R_\mu, R_{\mu,\alpha}$  指不同  $\alpha$  值但不为 0 时的  $R_\mu$ ) ,如  $\alpha=-0.5, \mu=2$  时,A 类场地,共 106 条地震波,每条地震波 200 个数据点,总共 21 200 个  $F'_{EK}/F_{EK}$  数据,其平均谱即为

$$\alpha_{EK,50\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F'_{EK}}{F_{EK}}$$

图 8 为  $\mu=2$  时 MEPP 模型的影响系数平均谱。图 8 表明:  $T$  接近于 0 时,  $\alpha_{EK}$  都趋近于 1;  $T < T_{g\alpha}$  时,  $\alpha_{EK}$  受周期变化的影响显著,基本随线性增加;  $T_{g\alpha} <$

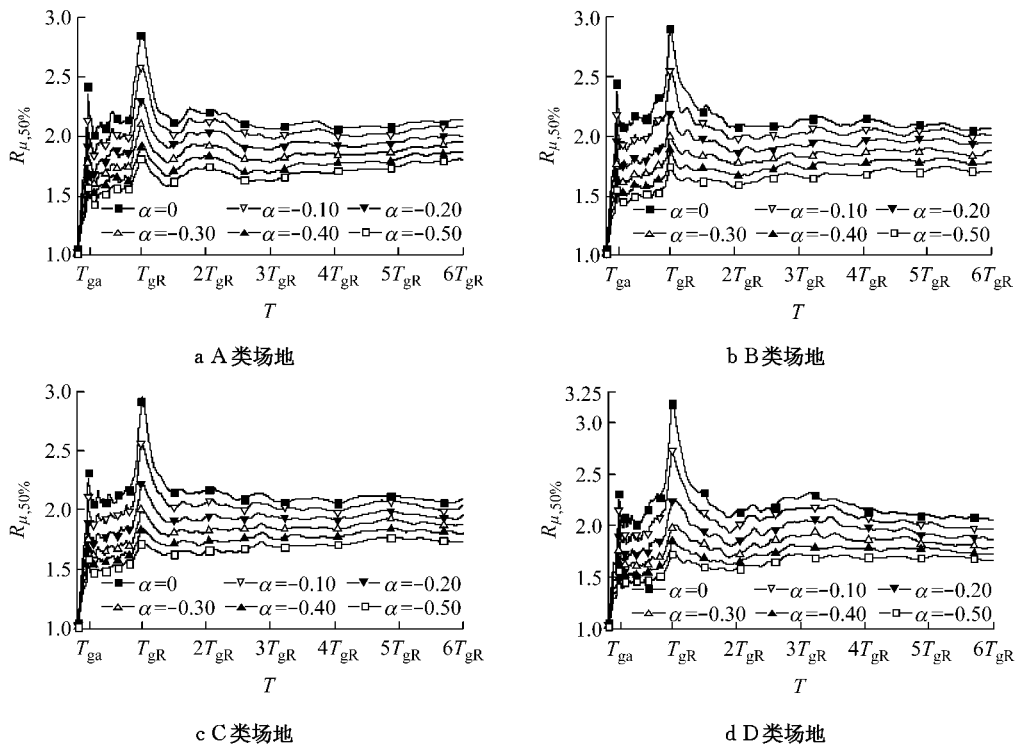


图6 MEPP模型,平均谱( $\mu=2$ )

Fig.6 MEPP model, 50% guarantee rate spectra( $\mu=2$ )

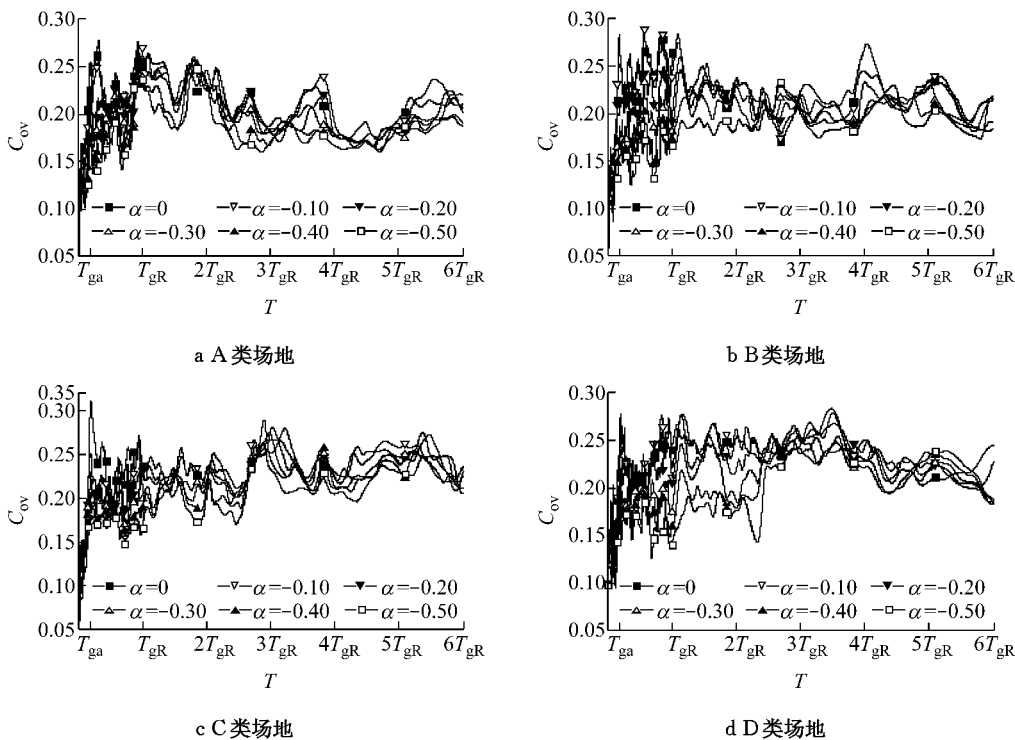


图7 MEPP模型,变异系数

Fig.7 MEPP model, coefficients of variation

$T < T_{gR}$ 时,除去两个周期处的峰值及其邻近区域,中间段存在一个水平波动段。 $T_{gR} < T < 2T_{gR}$ 时, $\alpha_{EK}$ 逐渐下降; $T > 2T_{gR}$ 时, $\alpha_{EK}$ 相对稳定, $\alpha = -0.5$ 趋近于1.3,这个差别在抗震设计中是不容忽视的。

由图8知,D类场地影响系数谱 $\alpha_{EK}$ 在相同承载力退化值时最大。为得到承载力退化值相同但延性不同对MEPP模型影响系数谱 $\alpha_{EK}$ 的影响,图9给出了D类场地, $\theta=0, \xi=0.05, \mu=4, 6$ 时MEPP模型

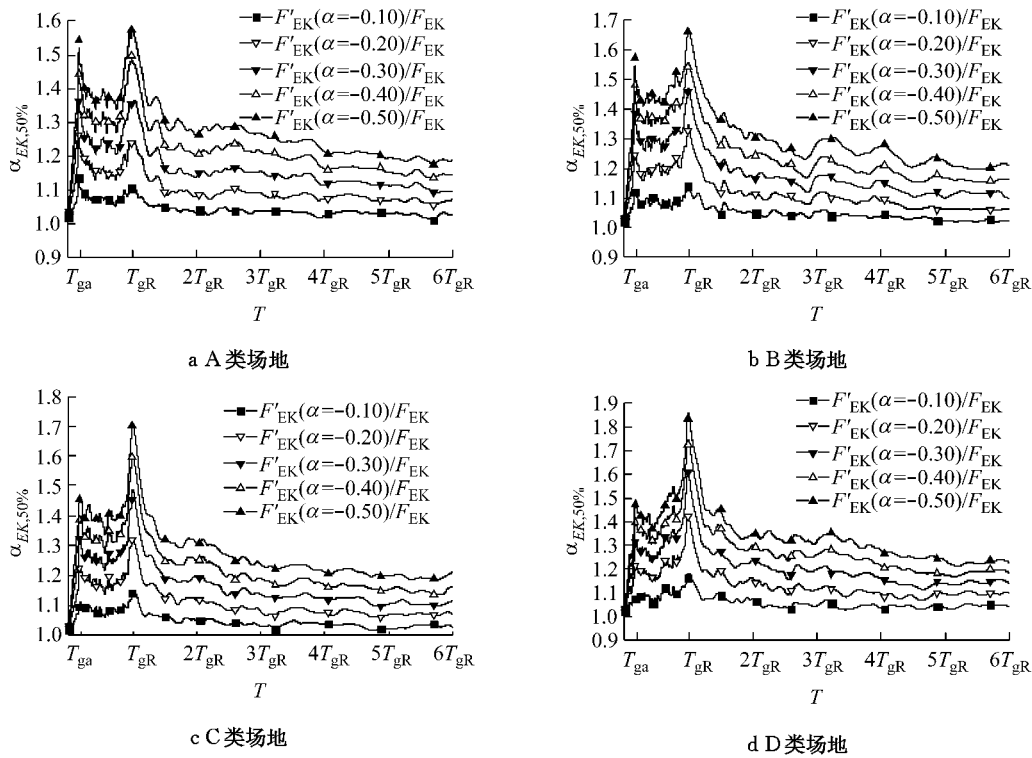


图 8 MEPP 模型,影响系数平均谱( $\mu=2$ )

Fig.8 MEPP model, 50% guarantee rate spectra of influence coefficients( $\mu=2$ )

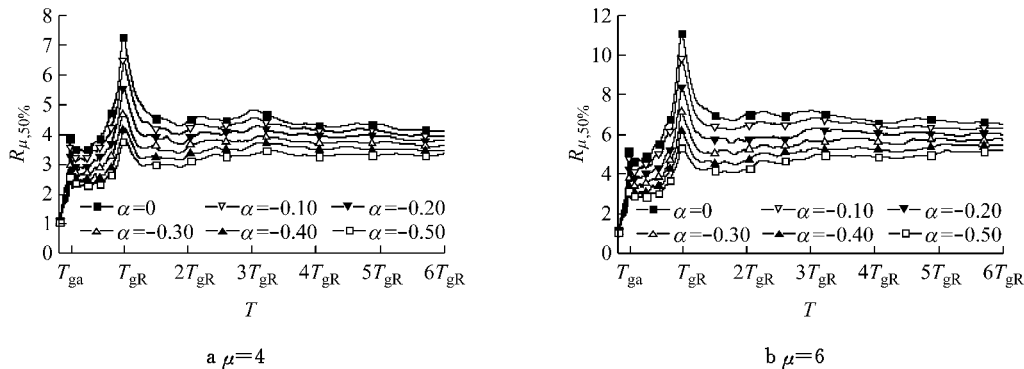


图 9 MEPP 模型,平均谱( $\mu=4,6$ )

Fig.9 MEPP model, 50% guarantee rate spectra( $\mu=4,6$ )

$R_\mu$  谱,曲线形状与  $\mu=2$  时类似,谱值不同。

影响系数  $\alpha_{EK}$  谱见图 10.  $\mu=4$  和  $\mu=6$  时刚度退化取值和  $\mu=2$  时不同,但承载力下降的幅度和  $\mu=2$  时相同或者接近,  $\alpha_{EK}$  的曲线形状粗略地相似.  $\mu=4, 6$  时,  $\alpha_{EK}$  在  $T=T_{ga}$  处的波峰几乎消失,然后增加,直到  $T_{gR}$  处达到最大值,然后以较慢的速率下降,  $\mu$  越大,下降越慢. 对比图 10 和图 8 可知,承载力退化的幅度是比退化刚度更为重要的参数,地震力延性系数谱直接与承载力的下降幅度成正比.

### 2.3 基底剪力的影响系数拟合谱

从前面分析得到:不同承载力退化值及不同延性系数时的影响系数是不一样的,两者都对影响系数产生显著影响,拟合如下:

$$\alpha_{EK} = 1 + (0.7 + 0.1\mu) \frac{\Delta V_y}{V_y} \cdot \frac{T}{T_{ga}}, T < T_{ga} \quad (7)$$

$$\alpha_{EK} = 1 + (0.7 + 0.1\mu) \frac{\Delta V_y}{V_y}, T_{ga} < T < 1.5T_{gR} \quad (8)$$

$$\alpha_{EK} = 1 + (0.7 + 0.1\mu) \frac{\Delta V_y}{V_y} \cdot \frac{10}{(T/T_{gR})^a + 8}, T > 1.5T_{gR} \quad (9)$$

其中:

$$a_{\mu=2} = 7.75\alpha^3 + 10.45\alpha^2 + 4.478\alpha + 2.05 \quad (10)$$

$$a_{\mu=4} = 21.19\alpha^2 + 9.273\alpha + 2.04 \quad (11)$$

$$a_{\mu=6} = 134.1\alpha^2 + 26.27\alpha + 2.489 \quad (12)$$

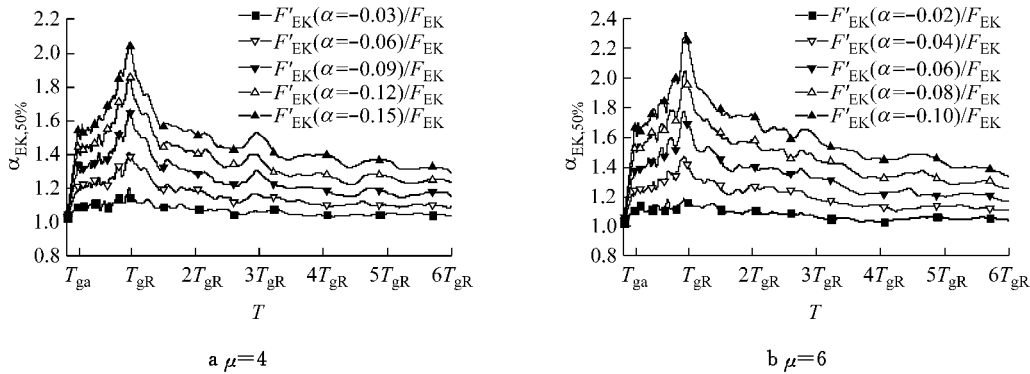


图 10 MEPP 模型,影响系数平均谱

Fig.10 MEPP, 50% guarantee rate spectra of influence coefficient

D 类场地,  $\theta=0, \xi=0.05, \mu=2, 4, 6$  时部分拟合结果对比如图 11 所示. 图中,以实心图例表示的代表计算值,以空心图例表示的曲线为拟合曲线.

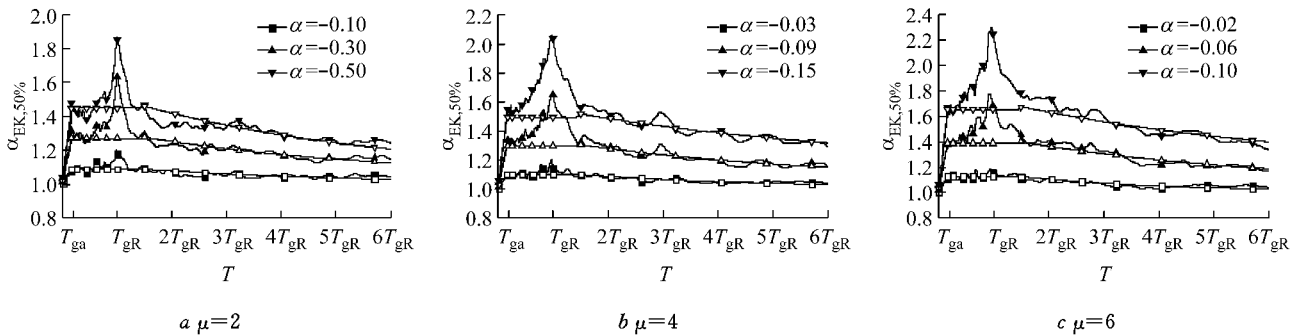


图 11 MEPP 模型,影响系数拟合谱

Fig.11 MEPP, 50% guarantee rate spectra of the influence fitting coefficients

2.4 与退化模型等效的理想弹塑性模型

$\alpha_{EK}$  的物理意义是:退化体系与理想 EPP 体系的延性系数相同、初始刚度相同的结构,承载力需求的比值. 如图 12 所示,  $\Delta_{max}$  和  $\Delta_y$  分别为理想弹塑性体系最大位移和屈服位移;  $\Delta'_{max}$  和  $\Delta'_y$  为有退化模型最大位移和屈服位移;两者初始刚度相同,延性系数相同,则:

$$\mu' = \Delta'_{max} / \Delta'_y = \mu = \Delta_{max} / \Delta_y \quad (13)$$

$$\Delta'_y / \Delta_y = F'_{EK} / F_{EK} = \alpha_{EK} \quad (14)$$

因此等效模型的屈服位移和最大位移分别为

$$\Delta_y = \Delta'_y / \alpha_{EK} \quad (15)$$

$$\Delta_{max} = \Delta'_{max} \cdot \Delta_y / \Delta'_y = \Delta'_{max} / \alpha_{EK} \quad (16)$$

式(15)–(16)写成

$$F'_{EK} = \alpha_{EK} F_{EK} \quad (17a)$$

$$\Delta'_{max} = \alpha_{EK} \Delta_{max} \quad (17b)$$

即:如果结构承载力有退化,那么为了得到与理想弹塑性模型的延性等效(即具有相同的抗震性能),则对有退化的结构的承载力的要求是理想弹塑性结构的  $\alpha_{EK}$  倍,对变形能力(绝对值)的需求也是相同延性

系数的理想弹塑性模型的  $\alpha_{EK}$  倍.

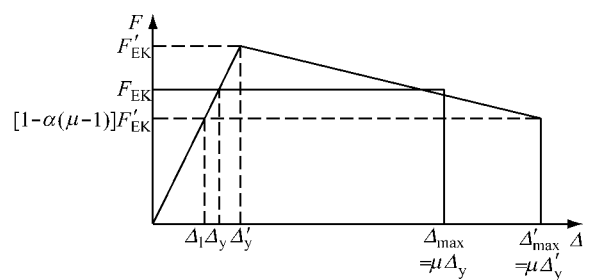


图 12 MEPP 模型与 EPP 模型等效

Fig.12 MEPP model with its equivalent EPP model

注意  $F_{EK} = F'_{EK} - \Delta F_{EK} \neq [1 - \alpha(\mu - 1)] F'_{EK}$ , 可得到  $\Delta F_{EK} \neq \alpha(\mu - 1) F'_{EK}$ , 即两个体系承载力的差别不等于退化体系的承载力退化量. 故定义延性时,屈服位移和最大位移的取值需要配套. 取承载力退化了  $\alpha(\mu - 1)$  倍处的位移为最大位移时,相配套的屈服位移应取  $\Delta'_y$ , 如取  $F = K\Delta$  和  $F = (1 + \alpha - \alpha\mu) \cdot F'_{EK}$  的交点(图 12 的  $\Delta_1$ ), 则延性系数估算偏大. 以偏大的延性系数计算结构影响系数,得到的地震作

用偏小.

### 3 SSP 模型

如图 13 所示,  $\theta=0, \xi=0.05, \mu=2, 4, 6$  时 B 类场地不同承载力退化系数时 SSP 模型的  $R_\mu$  谱与 MEPP 模型相比,  $R_\mu$  谱稍有降低, 不同承载力退化

曲线更加趋近. 与无退化的 SSP 模型的比值如图 14 所示. 影响系数谱与 MEPP 模型相比最大不同在于其峰值只有一个, 在  $T=T_{ga}$  处, 其值约为 1.25.  $T$  接近于 0 时  $\alpha_{EK}$  趋近于 1;  $T < T_{ga}$  时,  $\alpha_{EK}$  基本随  $T$  线性增加;  $T_{ga} < T < 6T_{gR}$  时,  $\alpha_{EK}$  虽有波动, 但总体下降, 慢慢趋于平缓. 承载力退化对其曲线影响较 MEPP 模型小.

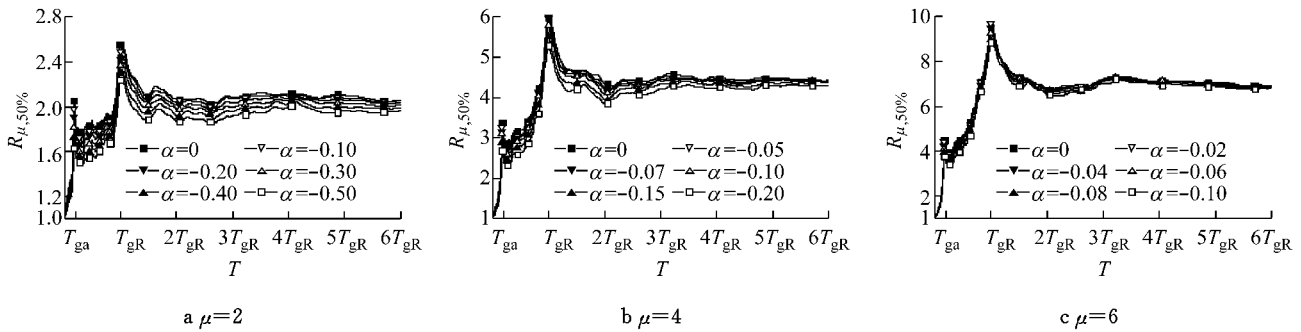


图 13 SSP 模型,  $R_\mu$  平均谱

Fig. 13 SSP model, 50% guarantee rate spectra of  $R_\mu$

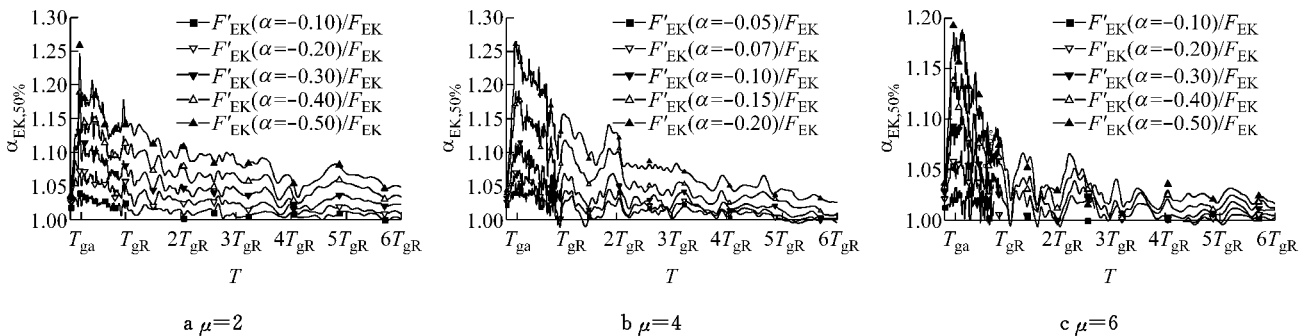


图 14 SSP 模型, 影响系数谱

Fig. 14 SSP model, influence coefficient spectra

### 4 BIL 模型

$\theta=0, \xi=0.05, \mu=6$ , 退化系数  $\alpha$  分别为 0、-0.02、-0.04、-0.06、-0.08、-0.10 时, 对 BIL 模型在 D 类场地的地震力调整系数  $R'_\mu$  进行了分

析, 如图 15 所示. 各场地标准化的  $R'_\mu$  谱形状相似, 谱值稍有差别. 其在  $T_{ga} < T < T_{gR}$  时的  $R'_\mu$  谱基本没有变化; 在  $T_{gR} < T < 2T_{gR}$  时, 承载力退化系数  $\alpha$  绝对值越大, 减小得稍多, 当  $\alpha=-0.1$  时减小 13% 左右, 远小于修正 EPP(MEPP)模型和 SSP 模型, 可见承载力退化对 BIL 模型的影响很小.

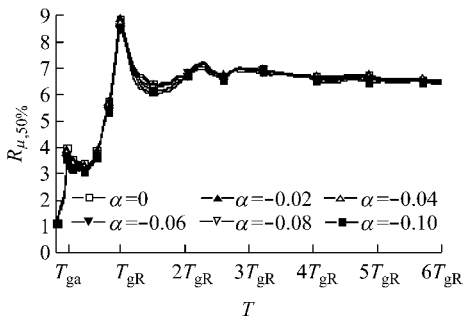


图 15 BIL 模型, 平均谱

Fig. 15 BIL model, 50% guarantee rate spectra

### 5 结论

本文考虑了延性和承载力退化影响, 对三种有退化 MEPP, SSP, BIL 模型相关的地震力调整系数谱进行研究, 谱曲线以周期  $T_{ga}$  和  $T_{gR}$  进行双周期标准化, 保留了  $R$  谱在  $T_{ga}$  和  $T_{gR}$  处的峰值特征. 结论如下:

(1) MEPP模型的承载力退化值对地震力调整

(下转第 1157 页)