

考虑 $P - \Delta$ 效应的弹塑性反应谱归一化

蔡志恒, 童根树

(浙江大学 土木工程系, 310058 杭州, czh1984@139.com)

摘要: 为了获得考虑 $P - \Delta$ 效应的强度折减系数 R 谱和弹塑性动力放大系数 β 谱, 对理想弹塑性 (EPP) 滞回模型的单自由度体系在地震作用下的响应进行分析, 得到不同场地类别、结构自振周期、位移延性、阻尼比和二阶效应的反应谱, 并利用 2 个特征周期 T_{ga} 和 T_{gR} 对横轴进行标准化处理. 结果表明: 周期标准化的 R 谱和 β 谱很好地保留了特征周期处的峰值特性, 延性、结构周期、二阶效应和阻尼比都对 β 谱起着显著影响, 利用 β 谱来计算弹塑性地震力, 要比采用 R 来对弹性地震力折减的结果更加理想.

关键词: 理想弹塑性滞回模型; 地震力折减系数; 动力放大系数; 特征周期; 二阶效应

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)06-0127-05

Inelastic spectrum normalization considering $P - \Delta$ effects

CAI Zhi-heng, TONG Gen-shu

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, 310058 Hangzhou, China, czh1984@139.com)

Abstract: To investigate strength reduction factor R and dynamic magnification factor β , dynamic response of single degree of freedom (SDOF) elastic-perfectly plastic (EPP) hysteretic system are analysed. The influence of site types, natural vibration periods, displacement ductilities, damping ratios and $P - \Delta$ effect coefficients are taken into account. The characteristic periods T_{ga} and T_{gR} are used to normalize the R spectra and β spectra. Results indicate that ductility, damping ratio and $P - \Delta$ effect coefficient all have obvious effect on R and β . β produces more ideal effect than R on elastic-plastic seismic force calculation.

Key words: elastic-perfectly plastic hysteretic model; seismic force reduction factor; dynamic magnification factor; characteristic period; $P - \Delta$ effect

结构在遭遇达到设防烈度的地震作用下, 能经受一定程度的塑性变形, 对结构的安全并没有不利的影响. 因此, 现有的抗震规范, 都允许结构在遭受本地区抗震设防烈度的地震影响时进入塑性阶段. 但非线性分析较为复杂和耗时, 此时, 对简化的弹塑性地震力计算便出现了 2 种研究方向: 间接法和直接法. 间接法是通过将弹性地震力折减来获得弹塑性地震力; 直接法是建立与弹性反应谱类似的弹塑性动力放大系数谱 β_μ 谱, 弹塑性地震力可以利用公式 $F_\mu = k\beta_\mu G$ 直接获得, 其中 k 为地震区域系数, G 为结构质量. 已有研

究^[1-5] 表明: 震中距和震级对强度折减系数 R 影响较小, 而场地条件、阻尼比、滞回模型对 R 存在着不可忽视的影响. 文献[6] 首次用特征周期 T_{gR} 对 R 谱进行归一化处理, 很好地保留了 R 谱的峰值特性. 文献[7-8] 对特征周期作了进一步研究, 分析了修正克拉夫模型和双折线模型的 R 谱. 在大震作用下, 结构的塑性变形将比弹性极限变形大好几倍, 此时结构受重力二阶效应的影响将变得尤为明显, 因此, 折减系数 R 和弹塑性动力放大系数 β 都应考虑二阶效应的影响. 文献[9] 建议在设计中采用强度需求放大系数 $\alpha = 1/(1 - \mu\theta)$, 以考虑 $P - \Delta$ 效应的影响, 并被 1977 年的墨西哥抗震规范采用; 而我国的建筑工程抗震性态设计通则^[10] 给出的楼层剪力放大系数则为 $\alpha = 1/(1 - \theta)$; 二者存在巨大的差异. 文献[11-12]

收稿日期: 2009-12-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078328).

作者简介: 蔡志恒(1984—), 男, 博士研究生;

童根树(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

的研究也认为应该考虑 $P-\Delta$ 效应的影响. 由于 2 个特征周期 T_{ga} (弹性动力放大系数峰值对应周期) 和 T_{gR} (R 谱峰值对应周期) 并不一致, 本文基于 EPP 滞回模型, 进一步研究 2 个周期标准化的 R 谱和 β 谱, 同时考虑二阶效应的影响.

1 分析方法

对单自由体系, 由底部弯矩动力平衡得

$$[M(\ddot{x} + a_g) + c\dot{x} + F(k_1, x, \dot{x})] \cdot h = Px. \tag{1}$$

式(1)等价为

$$m(\ddot{x} + c\dot{x} + [F(k_1, x, \dot{x}) - \theta K_0 x] = -ma_g. \tag{2}$$

式中: m 为系统质量; x 为系统相对位移; $F(k_1, x, \dot{x})$ 为结构恢复力; c 为系统阻尼; k_1 为切线刚度; K_0 为初始弹性刚度; a_g 为地震加速度; θ 为二阶效应系数, $\theta = P/hK_0$.

2 地震力折减系数

2.1 不考虑 $P-\Delta$ 效应的地震力折减系数

采用 EPP 滞回模型, 各类场地条件下, $\xi = 0.05$ 时的 R 平均谱 (即具有 50% 保证率的 R 谱) 见图 1(a)、1(b). 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 R 谱在 T_{ga} 与 T_{gR} 附近的峰值特性. 而且, 不同场地情况下的 R 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. R 变化规律也相仿: 当 T 接近于 0 时, R 都趋近于 1; $T < T_{ga}$ 时, R 基本随 T 线性增加; $T_{ga} < T < T_{gR}$ 时, R 大致先降后升; $T_{ga} < T < 2T_{gR}$ 时, R 逐渐下降; 当 $T > 2T_{gR}$ 时, R 趋近于 μ , 满足等位移准则.

2.2 考虑 $P-\Delta$ 效应的地震力折减系数

二阶效应系数 $\theta = 0.05$ 时的地震力调整系数平均谱见图 1(c)、1(d), 考虑二阶效应系数后, 对比图 1(a)、1(b) 可见: 1) 地震力调整系数下降. 由于 $P-\Delta$ 效应, 结构容易出现偏振现象, 位移增大, 意味着在相同调整系数情况下, 延性需求增大, 为了获得与不考虑二阶效应时相同的延性需求, 必须减小调整系数, 以减小位移; 2) 地震力调整系数依然在 T_{ga} 与 T_{gR} 处呈现峰值; 3) 整体的变化趋势有略微的改变, 随周期延长和延性增大调整系数有增大现象.

3 动力失稳

考虑 $P-\Delta$ 效应后, 当折减系数过大时, 结构容易发生动力失稳, 其本质在于位移过大, 因此定

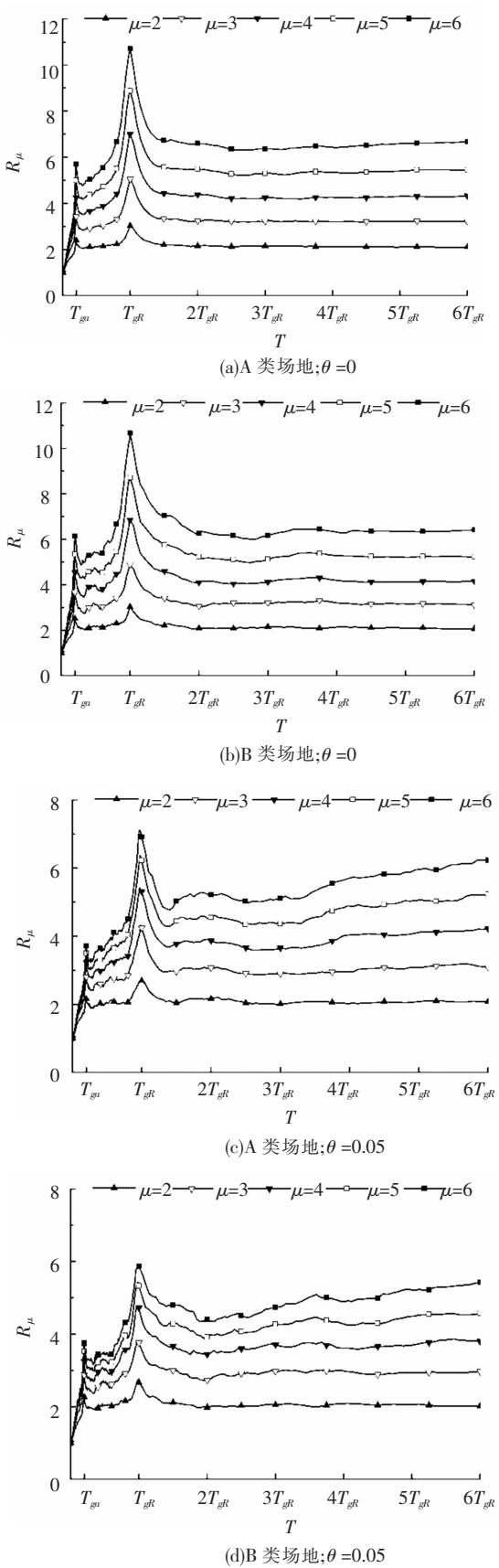


图 1 周期标准化的 R 谱

义如下动力失稳参数: $\Delta_{\max 1}$ 为不考虑二阶效应的弹性最大位移, μ_1 为延性开展系数; $\Delta_{\max 2}$ 为考虑二阶效应时的弹性最大位移, μ_2 为延性开展

系数. 当 $\Delta_{\max 2} \leq \Delta_{\max 1} / (1 - \mu_1 \theta) = \Delta_{\lim}$ 时, 结构的振动反应是稳定的; 当 $\Delta_{\lim} < \Delta_{\max 2} \leq 2\Delta_{\lim}$ 时, 结构的振动反应是半稳定的; 当 $\Delta_{\max 2} > 2\Delta_{\lim}$ 时, 结构容易发生动力失稳, 是不稳定的.

4 动力放大系数

4.1 不考虑 $P-\Delta$ 效应时的动力放大系数谱

图 2 为 A 类场地, $\theta = 0, \xi = 0.05$ 时, 不考虑 $P-\Delta$ 效应时的标准化的动力放大系数平均谱, 可见, 弹性状态 ($\mu = 1$) 时在 T_{ga} 与 T_{gr} 附近, 较好地保留了峰值特性, 尤其是 T_{ga} 处, 峰值最为明显, 但随着延性系数 μ 的增加, 峰值越来越不明显, 也可以从这里解释折减系数谱中峰值特性的来源: 结构保持弹性状态 ($\mu = 1$) 时, 在 2 个特征周期处发生共振, 反应剧烈, 随着延性增加, 塑性耗能增大, 共振反应趋于平缓, 延性越大, 耗能越大, 动力放大系数谱越平缓, 而折减系数 $R_\mu = F_e / F_u = \beta_e / \beta_\mu$, 此时就可以保留弹性谱的峰值特性, 延性越大, 峰值特性越明显.

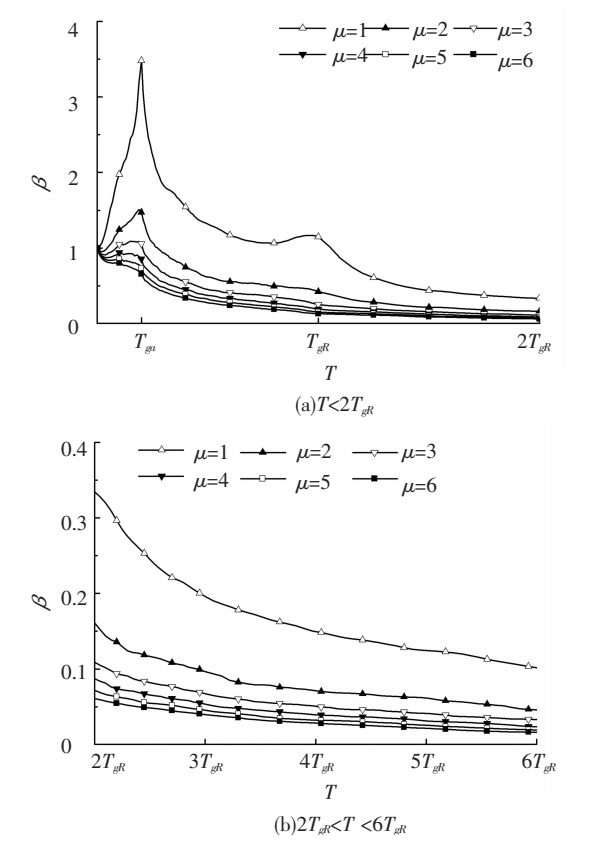


图 2 周期标准化的 β 谱

4.2 考虑 $P-\Delta$ 效应时的动力放大系数谱

考虑 $P-\Delta$ 效应后的弹性动力放大系数平均谱见图 3(a)、3(b), 二阶效应系数对其影响主要集中在 $T < T_{ga}$ 时, 二阶效应系数越大, 动力放大系数 β 越大; 而当 $T > T_{ga}$ 后, 二阶效应的影响开

始变得不明显, 尤其是当 $T > T_{gr}$ 时, 几乎没有差异. 但从图 3(c)、3(d) 中可以发现, 在延性系数 $\mu = 6$ 时, 无论是 $T < T_{ga}$ 或是 $T > T_{ga}$, 动力反应平均谱受二阶效应的影响都非常明显, 二阶效应

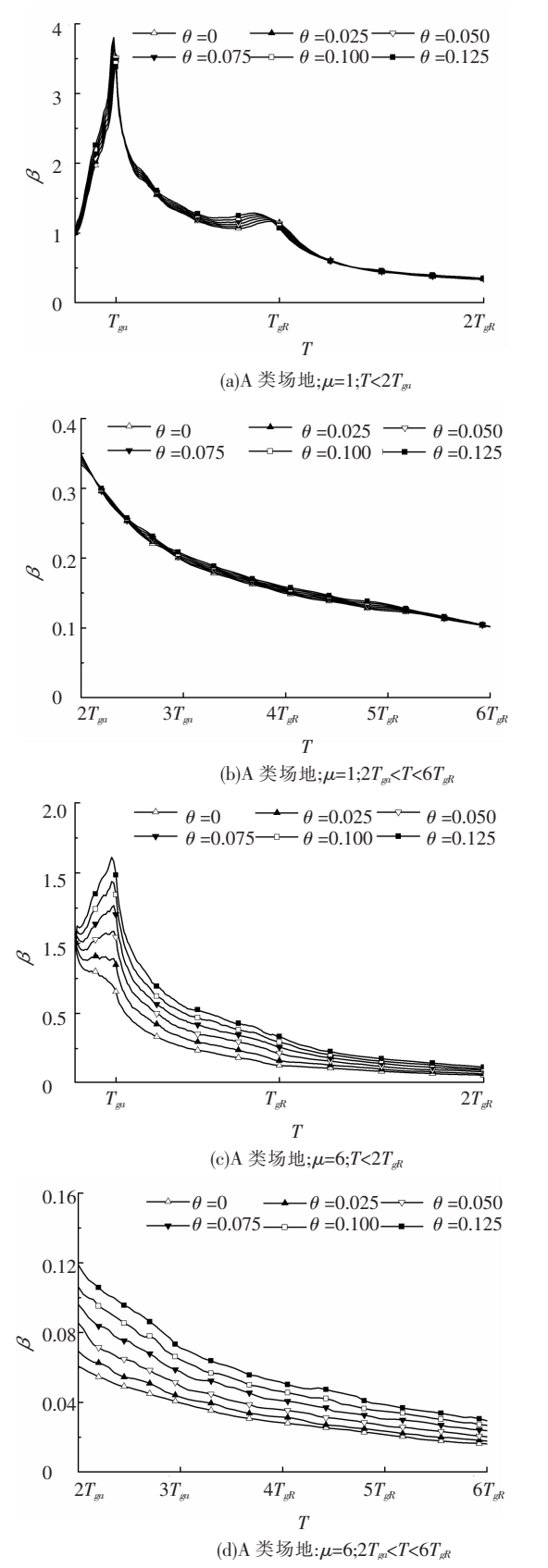


图 3 不同二阶效应系数时的 β 谱

系数越大,动力放大系数 β 也越大,这是由于允许结构发生塑性变形后,其位移增大,那么二阶效应的影响肯定增大.在弹性动力反应谱及 $\mu=6$ 的动力反应谱中, T_{ga} 附近的峰值特征都很明显,只是延性增大后, T_{gR} 处的峰值特性逐渐消失.

4.3 动力放大系数拟合谱

由以上分析可知,不同二阶效应系数及不同延性系数时的动力放大系数是不一样的,两者都对动力放大系数产生显著影响,拟合关系为

$$T \leq T_{ga} \text{ 时, } \beta = 1 + (\beta_{T_{ga}} - 1) \left(\frac{T}{T_{ga}} \right);$$

$$T_{ga} < T < T_{gR} \text{ 时,}$$

$$\beta = \beta_{T_{ga}} + (\beta_{T_{gR}} - \beta_{T_{ga}}) \left(\frac{T - T_{ga}}{T_{gR} - T_{ga}} \right)^m;$$

$$T \geq T_{gR} \text{ 时, } \beta = \beta_{T_{gR}} \frac{1 + q}{\left(\frac{T}{T_{gR}} \right)^p + q}.$$

1) 平均谱参数的取值. $T = T_{ga}$ 时, $\beta_{T_{ga}} = \frac{\kappa_a}{\mu^{0.5\kappa_a} - 0.82} (1 + 2\mu\theta)$; $T = T_{gR}$ 时, $\beta_{T_{gR}} = \frac{\kappa_R}{\mu^{0.90} - 0.50} [1 + 3(\mu - 1)\theta]$; κ_a 在 A、B、C、D 类场地分别为 0.62、0.62、0.59、0.59; κ_R 在 A、B、C、D 类场地分别为 0.575、0.505、0.605、0.725; $p = 0.12\mu + 0.67, q = 0.28\mu - 0.97 - 1.6(\mu - 1)\theta$ (A 类场地); $p = 0.10\mu + 1.15, q = 0.26\mu - 0.76 - (\mu - 1)\theta$ (B、C、D 类场地); $m = 0.3(T_{gR} - T)/(T_{gR} - T_{ga}) + 0.2 - 0.1\mu$.

2) 90% 保证率谱的取值. $T = T_{ga}$ 时, $\beta_{T_{ga}} = \frac{\kappa_a}{\mu^{0.4\kappa_a} - 0.88} (1 + 2\mu\theta)$; $T = T_{gR}$ 时, $\beta_{T_{gR}} = \frac{\kappa_R}{\mu^{0.80} - 0.60} [1 + 3(\mu - 1)\theta]$; κ_a 在 A、B、C、D 类场地分别为 0.52、0.52、0.52、0.485; κ_R 在 A、B、C、D 类场地分别为 1.07、0.80、0.98、1.03; $p = 0.10\mu + 0.38, q = 0.20\mu - 1.00 - (\mu - 1)\theta$ (A 类场地); $p = 0.16\mu + 0.74, q = 0.60\mu - 1.20 - 2(\mu - 1)\theta$ (B、C、D 类场地); $m = 0.3(T_{gR} - T)/(T_{gR} - T_{ga}) + 0.2 - 0.1\mu$.

4.4 阻尼比对动力放大系数的影响

为了反映阻尼比对动力放大系数的影响,本文引入参数 $\eta = \beta_{\xi \neq 0.05} / \beta$, 因此获得阻尼比 $\xi = 0.05$ 的动力放大系数后,可以利用 η 对其调整来获得不同阻尼比时的动力放大系数.图 4 为不同场地类别、不同二阶效应系数、不同阻尼比时的 η 值,从图中可以得到:1) 弹性状态下的 η 较塑性

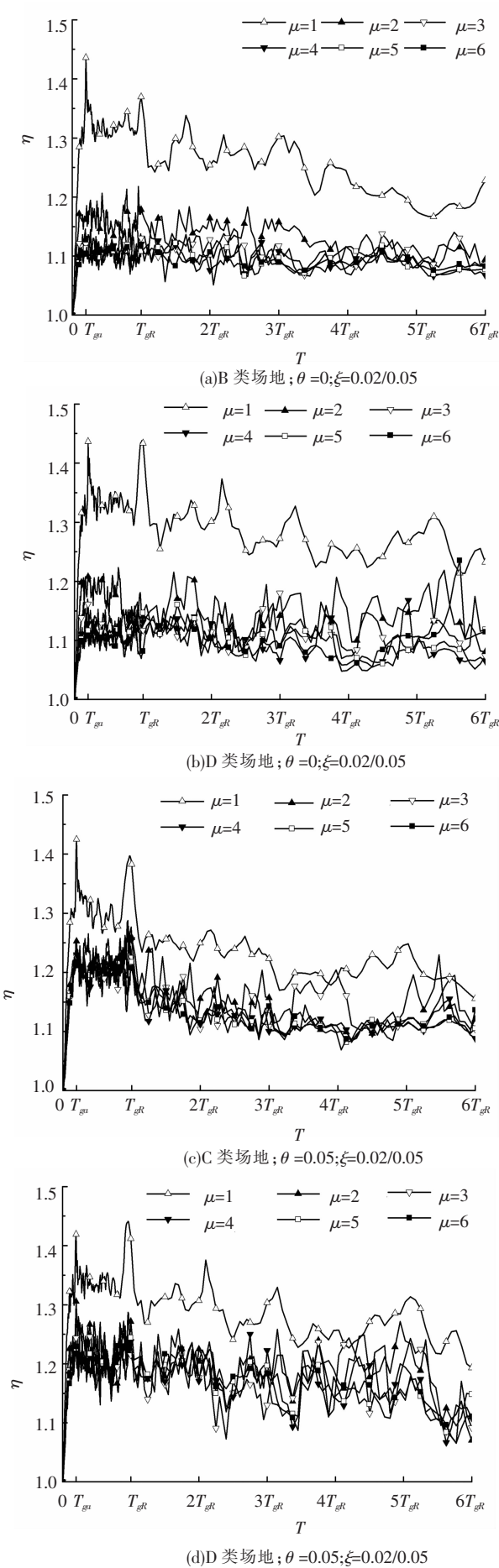


图 4 不同条件的 η 谱

时大,此时在 T_{ga} 与 T_{gR} 处也呈现峰值;2) 弹性状态时的 η 基本不受二阶效应系数影响,而塑性时的 η 随着二阶效应系数增大而增大;3) 场地类别对 η 影响不大.

5 结 论

1) 对理想弹塑性(EPP)滞回模型的单自由度体系在4类场地,370条地震波下的地震响应进行分析,研究弹塑性地震力计算中所需的折减系数 R 和动力放大系数 β ,考虑了延性、阻尼比和二阶效应的影响. 结果表明:周期用 T_{ga} 与 T_{gR} 标准化的 R 谱能很好地保留 T_{ga} 与 T_{gR} 附近的峰值特征; $P-\Delta$ 效应对 R 影响非常明显,考虑 $P-\Delta$ 效应的 R 值要明显小于不考虑 $P-\Delta$ 效应的 R 值,在抗震设计中不容忽视.

2) 提出了判断 EPP 弹塑性体系动力稳定、半稳定和动力不稳定的标准. 用所建立弹塑性动力放大系数谱 β 谱来计算弹塑性地震力,要比采用 R 来对弹性地震力折减的结果更加理想.

3) 给出了考虑二阶效应的 50% 保证率和 90% 保证率 β 谱的拟合公式. 从公式可以看出, $P-\Delta$ 效应大致使地震力增大到 $1+2\mu\theta$ 倍,近似于 $1/(1-2\mu\theta)$.

4) 阻尼比对 β 的影响,与场地类别关系不大. 对 β_e 谱的影响与二阶效应系数无关,随阻尼比增大, β_e 值减小;对 β_μ 的影响与延性无关,随二阶效应系数增大,影响增强. 阻尼比对 β_e 的影响要大于对 β_μ 的影响,但随着二阶系数的增大,对两者的影响趋近.

参考文献:

[1] RIDDELL R, HIDALGO P, CRUZ E. Response modification factors for earthquake resistant design of short period structures [J]. Earthquake Spectra, 1989, 5 (3): 571 - 590.

[2] VIDIC T, FAJFAR P. Consistent inelastic design spectra: strength and displacement [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23: 507 - 521.

[3] LI H L, SANG W H. Determination of ductility factor considering different hysteretic models [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28: 957 - 977.

[4] BORZI B, ELNASHAI A S. Refined force reduction factors for seismic design [J]. Engineering Structures, 2000, 22: 1244 - 1260.

[5] 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.

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

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

[8] 赵永峰, 童根树. 双折线弹塑性滞回模型的结构影响系数 [J]. 工程力学, 2008, 25 (1): 61 - 70.

[9] ROSENBLUTH E. Slenderness effects in building [J]. Journal of Structures Division, 1965, 91 (1): 229 - 252.

[10] 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.

[11] TONG G S, ZHAO Y F. $P-\Delta$ effects on seismic force modification factors for modified-clough and EPP hysteretic models [J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12 (4): 579 - 593.

[12] HAN S W, KWON O S, LEE L H. Investigation of dynamics $P-\Delta$ effect on ductility factor [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2001, 12 (3): 249 - 266.

(编辑 魏希柱)