

P-Δ效应对结构残余位移需求的影响

刘巴黎¹, 李芝轩¹, 胡进军^{2,3}, 谢礼立^{2,3}

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为揭示 P-Δ 效应对基于损伤结构残余位移延性需求的影响规律, 基于 Park-Ang 损伤模型建立单自由度体系基于损伤的残余位移延性系数 μ_{res} 谱, 研究场地类别、弹性稳定系数 θ 、极限延性系数 μ_u 以及滞回模型对基于损伤 μ_{res} 谱的影响。通过回归分析, 建立考虑 P-Δ 效应的基于损伤 μ_{res} 谱预测方程, 对比分析基于延性和基于损伤 μ_{res} 谱的差异。研究结果表明: 场地类别对基于损伤 μ_{res} 谱的影响不超过 10%; 不考虑 P-Δ 效应时, μ_u 对基于损伤 μ_{res} 谱的影响超过 20%, 考虑 P-Δ 效应时, μ_u 对基于损伤 μ_{res} 谱的影响超过 50%; 与基于损伤理论的 μ_{res} 谱相比, 基于延性理论的 μ_{res} 谱估计趋于保守; 构建了考虑 P-Δ 效应的基于损伤 μ_{res} 谱比预测方程。研究结果可用于结构残余位移延性需求准确评估以及结构抗震韧性评价。

关键词: P-Δ 效应; 残余位移; 延性需求; 损伤指数; 性能化设计

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

Influence of P-Δ effect on the structural residual displacement demands

LIU Bali¹, LI Zhixuan¹, HU Jinjun^{2,3}, XIE Lili^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;
3. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: To reveal the effect of P-Δ on the residual displacement ductility demand of structures, the damage-based residual displacement ductility demand ratio spectrum μ_{res} of single degree of freedom (SDOF) systems was conducted based on the Park-Ang damage model. The data were statistically processed to evaluate the effect of soil type, elastic stability coefficient θ , ultimate ductility coefficient μ_u and hysteretic model on damage-based μ_{res} . A prediction equation was proposed to estimate damage-based μ_{res} of SDOF systems through regression analysis. The differences of μ_{res} based on damage approach and ductility approach were compared and analyzed. Results show that the error in the estimation of damage-based μ_{res} when mean values along the earthquake population are considered without any soil distinction is inside 10%. When the P-Δ effect is not considered, the influence of μ_u on damage based μ_{res} exceeds 20%. When the P-Δ effect is considered, the influence of μ_u on damage based μ_{res} exceeds 50%. The ductility-based μ_{res} tend to be conservative compared to the damage-based ones. Finally, the prediction equation for the estimate of damage-based μ_{res} is proposed, which can be applied to the evaluation of residual displacement ductility demand ratio and seismic resilience.

Key words: P-Δ effect; residual displacement; ductility demand; damage index; performance-based design

0 引言

在大震作用下, 工程结构的 P-Δ 效应较为明显, 结构从弹性阶段往复运动转变为弹塑性阶段单向偏移

收稿日期: 2024-06-24; 修回日期: 2024-11-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U1939210); 国家自然科学基金项目 (52408529)

作者简介: 刘巴黎 (1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事地震工程和结构抗震研究。E-mail: liubliem@163.com

运动。随着弹塑性阶段结构刚度的降低,结构瞬时位移和永久位移(残余位移)显著增大,甚至可能导致结构动力失稳^[1-3]。在工程结构静力设计阶段,构件内力放大系数法和位移放大系数法作为考虑 $P-\Delta$ 效应的简化方法被广泛应用。放大系数作为量化 $P-\Delta$ 效应的参数,可表示为 $\lambda = 1/(1-\theta)$,其中 θ 为稳定系数。研究人员关注的问题在于 $P-\Delta$ 效应的容许范围,包括忽略 $P-\Delta$ 效应时稳定系数的上限以及结构动力失稳时稳定系数的下限。

针对上述问题,ROSENBLUTH^[4]、BERNAL^[5]和 MACRAE 等^[6]对结构 $P-\Delta$ 效应进行了系统研究,并讨论了 $P-\Delta$ 效应放大系数与稳定系数、延性系数以及滞后特性的关系。GUPTA 等^[7]研究了具有双折线模型钢结构在强震作用下的 $P-\Delta$ 效应,结果表明钢结构动力响应对地震动较为敏感,且长持时地震动作用下钢结构的 $P-\Delta$ 效应更为明显。翟长海等^[2]基于四类场地 344 条地震动记录,研究了 $P-\Delta$ 效应对基于延性位移比谱的影响,给出了考虑 $P-\Delta$ 效应的基于延性位移比谱修正公式。魏斌等^[8]研究了考虑 $P-\Delta$ 效应的桥梁单墩体系地震反应和设计方法,通过回归分析给出了考虑 $P-\Delta$ 效应的桥梁单墩体系内力放大系数和位移放大系数预测公式。DE FRANCESCO 等^[9-11]基于 7 032 条地震动记录,研究了 $P-\Delta$ 效应对具有不同滞回模型的单自由度(single degree of freedom, SDOF)体系地震位移响应的影响,通过回归分析给出了考虑 $P-\Delta$ 效应的 SDOF 体系位移放大系数。

目前,考虑 $P-\Delta$ 效应的地震位移响应研究仅限于最大位移,而 $P-\Delta$ 效应对结构残余位移响应的影响研究尚未见于文献。近年来,残余位移逐渐被用于工程结构地震损伤评估^[12-18],FEMA P-58^[19]和 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》^[20]分别将残余位移作为结构可修复评估以及韧性评价的重要指标。

作为表征强震作用下结构损伤的重要参数,残余位移比(C_r)谱的提出主要经历了 3 种形式。第 1 种形式为基于强度 C_r 谱(残余位移比-屈服强度系数-周期, C_r-R-T)。RUIZ-GARCIA 等^[12]系统研究了地震特征参数(震级和断层距)、场地类别、屈服强度系数以及滞回模型对 SDOF 体系基于强度 C_r 谱的影响,并通过回归分析构建了 SDOF 体系基于强度 C_r 谱的预测方程。第 2 种形式为基于延性 C_r 谱(残余位移比-延性系数-周期, $C_r-\mu-T$)。HARIKRISHNAN 等^[14]系统研究了地震特征参数(震级和断层距)、场地类别以及地震动特性(持时)对 SDOF 体系基于延性 C_r 谱的影响,并对基于延性 C_r 谱进行了标定。

为了兼顾位移延性及累积滞回耗能对结构损伤的影响,LIU 等^[17]和 HU 等^[18]提出了结构 C_r 谱的第 3 种形式,基于损伤 C_r 谱(残余位移比-损伤指数-周期, C_r-DI-T),系统研究了场地类别、损伤模型及滞回模型对基于损伤的 C_r 谱的影响,并通过回归分析构建了地震动作用下 SDOF 体系基于损伤 C_r 谱的预测方程。PARK 等^[21-22]提出损伤指数可同时考虑累积滞回耗能以及结构位移延性的影响,揭示结构构件在地震作用下延性及累积损伤耦合作用的破坏机理,在结构损伤评估领域具有一定的先进性而被广泛采用。

针对上述问题,本文系统研究了 $P-\Delta$ 效应对基于损伤的结构残余位移延性需求(残余位移与屈服位移之比,表示为 μ_{res})的影响规律,详细探讨场地类别、弹性稳定系数 θ 、极限延性系数 μ_u 以及滞回模型对基于损伤残余位移延性需求的影响,对比分析基于延性和基于损伤残余位移延性需求的差异,通过回归分析构建结构基于损伤残余位移延性需求谱的预测方程,以期结构残余位移需求准确评估以及精细化结构抗震韧性评价提供参考。

1 基于损伤的残余位移延性系数 μ_{res} 谱

1.1 损伤模型

PARK 等^[21-22]损伤指数表达式为

$$DI = \frac{u_m - u_y}{u_u - u_y} + \beta \frac{E_h}{F_y u_u} = \frac{\mu - 1}{\mu_u - 1} + \beta \frac{E_h}{F_y \mu_u u_y} \quad (1)$$

式中: u_u 、 u_m 和 u_y 分别为极限位移、峰值位移和屈服位移; μ 和 μ_u 分别为位移延性系数和极限延性系数; F_y 为屈服强度; E_h 为滞回耗能; β 为耗能系数,反映循环荷载作用下结构响应的变化规律。

通过大量文献调研可以发现,研究人员通常将结构破坏状态划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、接近倒塌以及倒塌 6 种状态。结构破坏状态对应的损伤指数略有差别,本文按照 FEMA356^[23]的建议将 6 种结构破坏状态对应的 5 个损伤指数限值划分为 0.1、0.2、0.5、0.8、1.0,见表 1。

表 1 破坏状态及其对应的损伤指数

Table 1 Failure state and their corresponding damage indices

| 破坏状态 | 基本完好 | 轻微破坏 | 中等破坏 | 严重破坏 | 接近倒塌 | 倒塌 |
|------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| DS | (0,0.1] | (0.1,0.2] | (0.2,0.5] | (0.5,0.8] | (0.8,1.0] | (1.0,+∞) |

1.2 考虑 $P-\Delta$ 效应的 μ_{res} 谱模型

SDOF 体系考虑 $P-\Delta$ 效应的运动方程为

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + [f(x,t) - \theta \cdot k_0 \cdot x] = -m\ddot{x}_g(t) \tag{2}$$

式中: m 为质量; c 为阻尼系数; $\ddot{x}(t)$ 、 $\ddot{x}_g(t)$ 和 $\dot{x}(t)$ 分别为体系相对地面的加速度、地面运动的加速度和相对地面的速度; $f(x,t)$ 为体系恢复力; k_0 为体系未考虑 $P-\Delta$ 效应的初始刚度; $\theta = mg/k_0h$ 为弹性稳定系数^[4], 这里表征 $P-\Delta$ 效应的大小, θ 越大说明 $P-\Delta$ 效应影响越大; h 为体系的高度。

SDOF 体系滞回耗能 E_h ^[24] 的表达式为

$$E_h(t) = \int_0^t [f(x,t) - \theta \cdot k_0 \cdot x] dx - [f(x,t) - \theta \cdot k_0 \cdot x]^2 / 2k_p \tag{3}$$

式中, $k_p = k_0 - mg/h$ 为考虑 $P-\Delta$ 效应的刚度。对 SDOF 体系引入强度折减系数 R , 其表达式为

$$R = F_e / F_y = F(\mu = 1) / F(DI_i, \mu = \mu_u) \tag{4}$$

式中, DI_i 为给定的损伤指数, 下标 i 为给定损伤指数 DI 的序号; F_e 为地震作用下 SDOF 体系保持弹性所需的最小强度, 可以表示 SDOF 体系质量 m 和周期 T 对应的谱加速度值 S_a 的乘积。 u_y 可以表示为

$$u_y = \frac{F_y}{k_p} = (S_a / R) \cdot (T / 2\pi)^2 \tag{5}$$

将式(3)、式(4)和式(5)代入式(1), 得到 DI 的表达式为

$$DI_i = \frac{\mu - 1}{\mu_u - 1} + \beta \frac{E_h}{F_y \mu_u u_y} = \frac{\mu - 1}{\mu_u - 1} + \beta \frac{\int_0^t [f(x,t) - \theta \cdot k_0 \cdot x] dx - [f(x,t) - \theta \cdot k_0 \cdot x]^2 / 2k_p}{m \mu_u (S_a T / 2\pi R)^2} \tag{6}$$

基于上述推导可以求出 SDOF 体系的位移响应, 并通过 SDOF 体系非线性时程分析提取结构残余位移 u_r , 建立基于损伤的 μ_{res} 谱, 分析流程见图 1。值得注意的是, 为了能从时程响应曲线中提取有效的 u_r , 每条地震动记录后增加 10 s 零加速度时程。

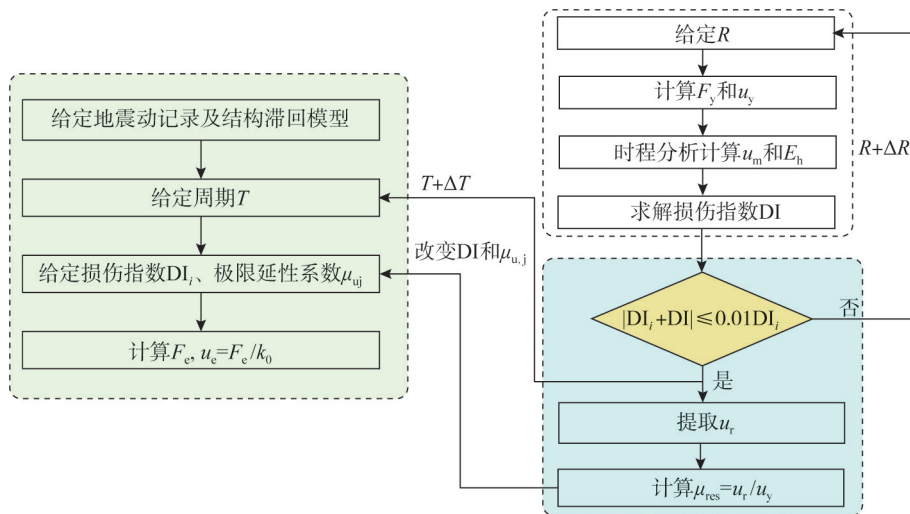


图 1 基于损伤 μ_{res} 谱计算流程

Fig. 1 Procedure for calculation of damage-based μ_{res}

2 地震动记录选取

首先, 基于 PEER NGA-West2 地震动数据库, 选取了自 1952 年来全世界范围内 19 次地震的 1 366 条地震动记录, 矩震级 M_w 大于 6.0, 断层距大于 10 km, 地震动峰值加速度 (peak ground acceleration, PGA) 大于

0.05 g 。按照国家地震减灾计划(national earthquake hazard reduction program, NEHRP)^[25]规范场地划分标准将场地分为三类,其中B类(地表以下30 m范围内的土层平均剪切波速 V_{s30} 为760~1525 m/s)、C类(V_{s30} 为360~760 m/s)以及D类(V_{s30} 为180~360 m/s)场地地震动的数量分别为48、586、732条。

其次,为了充分考虑地震动幅值和持时的影响,参考文献[17-18]中的地震动记录分类方法,将C类和D类场地地震动记录按照PGA分为(0.05, 0.15] g 、(0.15, 0.25] g 以及(0.25, 0.70] g 这3组,分别表示为 Δ_{PGA}^1 、 Δ_{PGA}^2 、 Δ_{PGA}^3 。然后再将按照PGA分组的每一小组地震动按照地震动持时(ground motion duration, GMD)细分为(5, 10] s、(10, 15] s、(15, 20] s这3组,分别表示为 Δ_{GMD}^1 、 Δ_{GMD}^2 、 Δ_{GMD}^3 。地震动持时采用5%~95%重要持时,为地震动加速度记录的能量累积达到5%和95%这2个阈值之间的时间段。由此可知,C类和D类场地地震动记录按照地震动幅值和持时分为9组。

然后,为了考虑地震动频谱的影响,从9组地震动记录中分别选取若干条记录组成地震动记录集,使其地震动反应谱与B类场地48条地震动记录的反应谱在整个周期段范围能较好匹配。

最后,筛选出C类和D类场地地震动记录的数量分别90条,即按照地震动幅值和持时分组的每一小组包含的地震动记录都为10条。选取的三类场地地震动记录共计228条。B类、C类以及D类场地地震动记录的平均加速度反应谱(S_a)、速度反应谱(S_v)、位移反应谱(S_d)以及标准化的加速度反应谱(S_a/PGA)分别见图2(a)、(b)、(c)、(d)。由图可知,B类场地地震动记录的平均加速度反应谱谱值小于C类以及D类场地地震动记录的平均加速度反应谱谱值,这是由于B类场地地震动记录的PGA与C类以及D类场地地震动记录的PGA之间存在重要差异;三类场地地震动记录标准化加速度反应谱谱值在整个周期段范围内差距很小,即三类场地地震动记录的加速度反应谱在整个周期段范围能较好地匹配。

值得说明的是,B类场地地震动记录按照地震动幅值和持时分组时, ($\Delta_{PGA}^1, \Delta_{GMD}^1$)、($\Delta_{PGA}^1, \Delta_{GMD}^2$)、($\Delta_{PGA}^1, \Delta_{GMD}^3$)、($\Delta_{PGA}^2, \Delta_{GMD}^1$)、($\Delta_{PGA}^2, \Delta_{GMD}^2$)以及($\Delta_{PGA}^2, \Delta_{GMD}^3$)包含的地震动记录数量分别为10、10、19、4、2、3条。从PGA角度分析,B类场地仅包含(0.05, 0.15] g 和(0.15, 0.25] g 这2个范围的地震动记录,且81%的记录属于(0.05, 0.15] g 范围。从地震动持时角度分析,B类场地地震动记录的分布更有规律,(5, 10] s、(10, 15] s以及(15, 20] s范围包含的地震动记录数量分别为14、12、22。

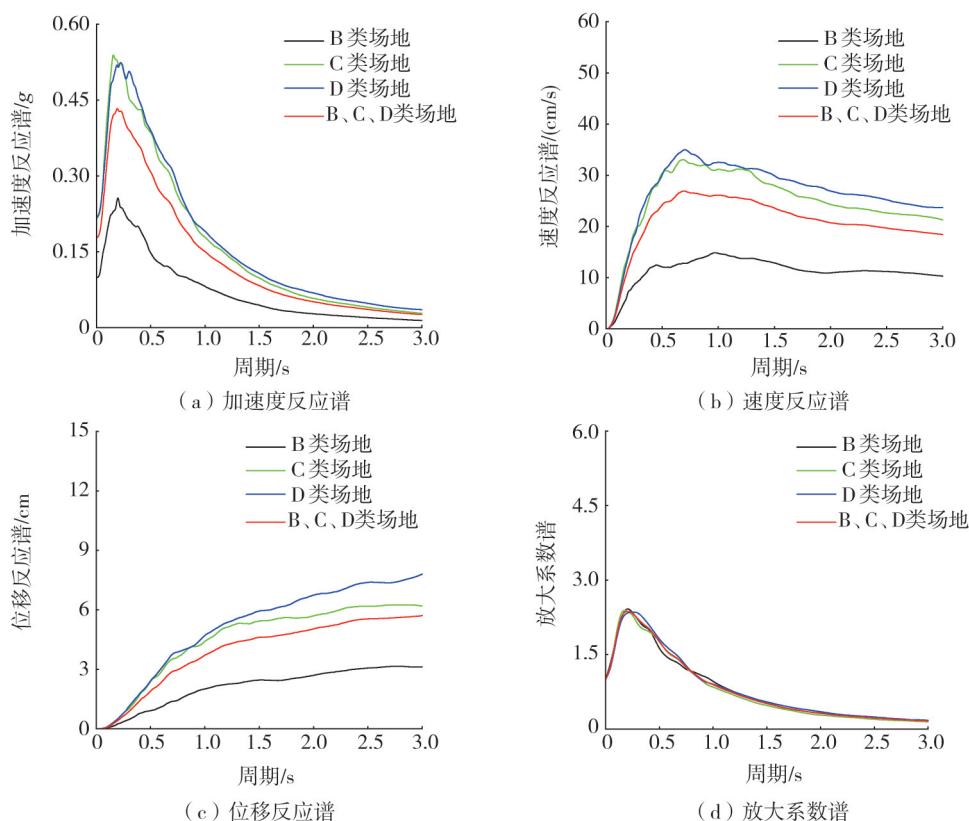


图2 三类场地地震动记录平均反应谱

Fig. 2 Average response spectra of ground motion records for soil types B, C and D

3 基于损伤的 μ_{res} 谱分析

3.1 分析变量

针对双折线(bilinear plastic, BP)模型、修正的 Clough(modified Clough, MC)模型以及完全损伤(peak oriented P-O)模型的 SDOF 体系进行非线性时程分析,按照 1.2 节给出的分析流程计算 u_r 并建立基于损伤的 μ_{res} 谱,三类滞回模型见图 3。分析变量考虑如下:①SDOF 体系周期 T 取为 0.1~3.0 s,间隔为 0.1 s;②弹性稳定系数 θ 取值为 0~0.1,间隔为 0.025;③损伤指数取值为 0.1、0.2、0.5、0.8、1.0;④极限延性系数 μ_u 取为 2、4、6,结构耗能系数 β 按照 COSENZA 等^[26] 基于大量构件试验结果取中位值 0.15;⑤屈服后刚度系数 α 取值为 0.05。

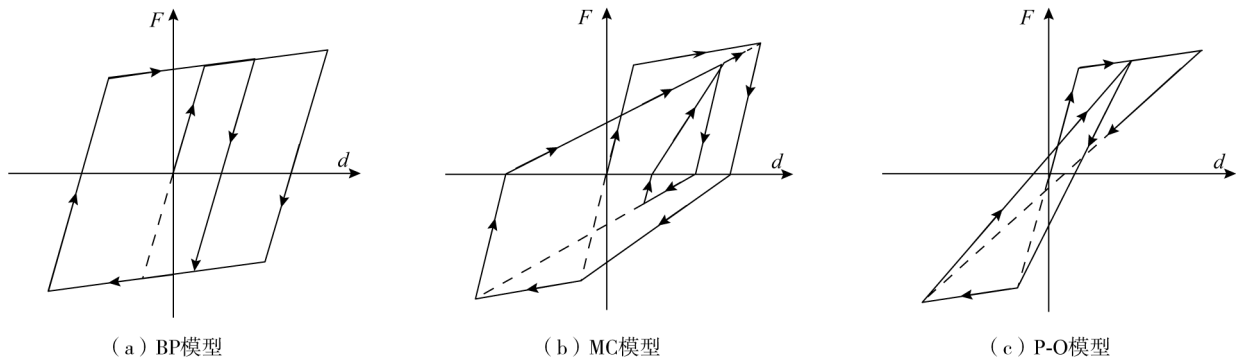


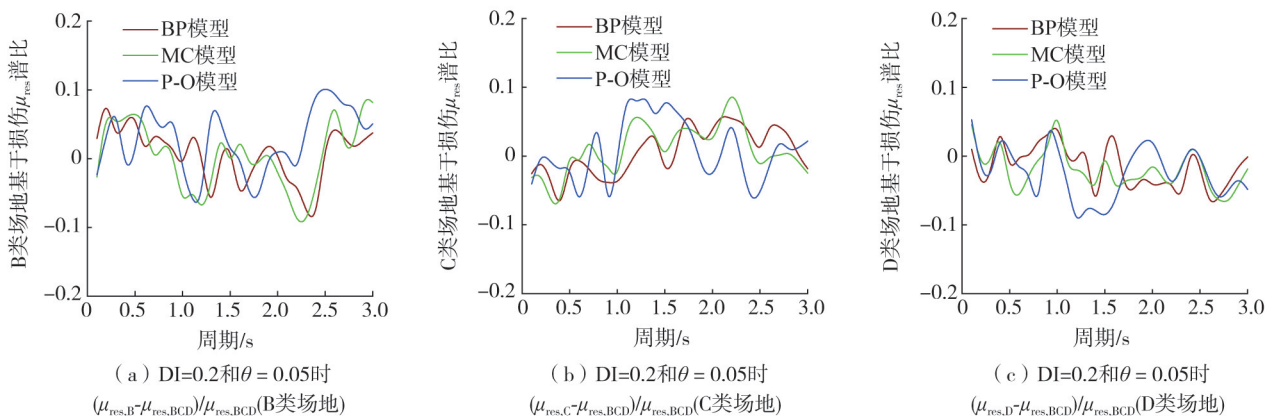
图 3 SDOF 体系滞回模型

Fig. 3 Hysteretic models of SDOF systems

3.2 场地影响

本文先分别计算 B、C 以及 D 三类场地地震动作用下的基于损伤 μ_{res} 平均谱,分别表示为 $\mu_{res,B}$ 、 $\mu_{res,C}$ 以及 $\mu_{res,D}$;同时计算不区分场地类别的 228 条地震动作用下的基于损伤 μ_{res} 平均谱,表示为 $\mu_{res,BCD}$ 。然后分别计算 B、C、D 三类场地地震动作用下的基于损伤 μ_{res} 平均谱与不区分场地类别的 228 条地震动作用下的基于损伤 μ_{res} 平均谱的差值。最后分别求取三类场地差值与 228 条地震动作用下基于损伤 μ_{res} 平均谱的比值,分别表示为 $(\mu_{res,B} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ 、 $(\mu_{res,C} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ 以及 $(\mu_{res,D} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ 。图 4(a)、(b)、(c) 分别给出了三类场地,DI=0.2 以及 $\theta=0.05$ 下基于损伤 μ_{res} 的谱比。图 4(d)、(e)、(f) 分别给出了三类场地,DI=0.8 以及 $\theta=0.05$ 下基于损伤 μ_{res} 的谱比。图 4(g)、(h)、(i) 分别给出了三类场地,BP 模型以及 DI=0.5 下基于损伤 μ_{res} 的谱比。

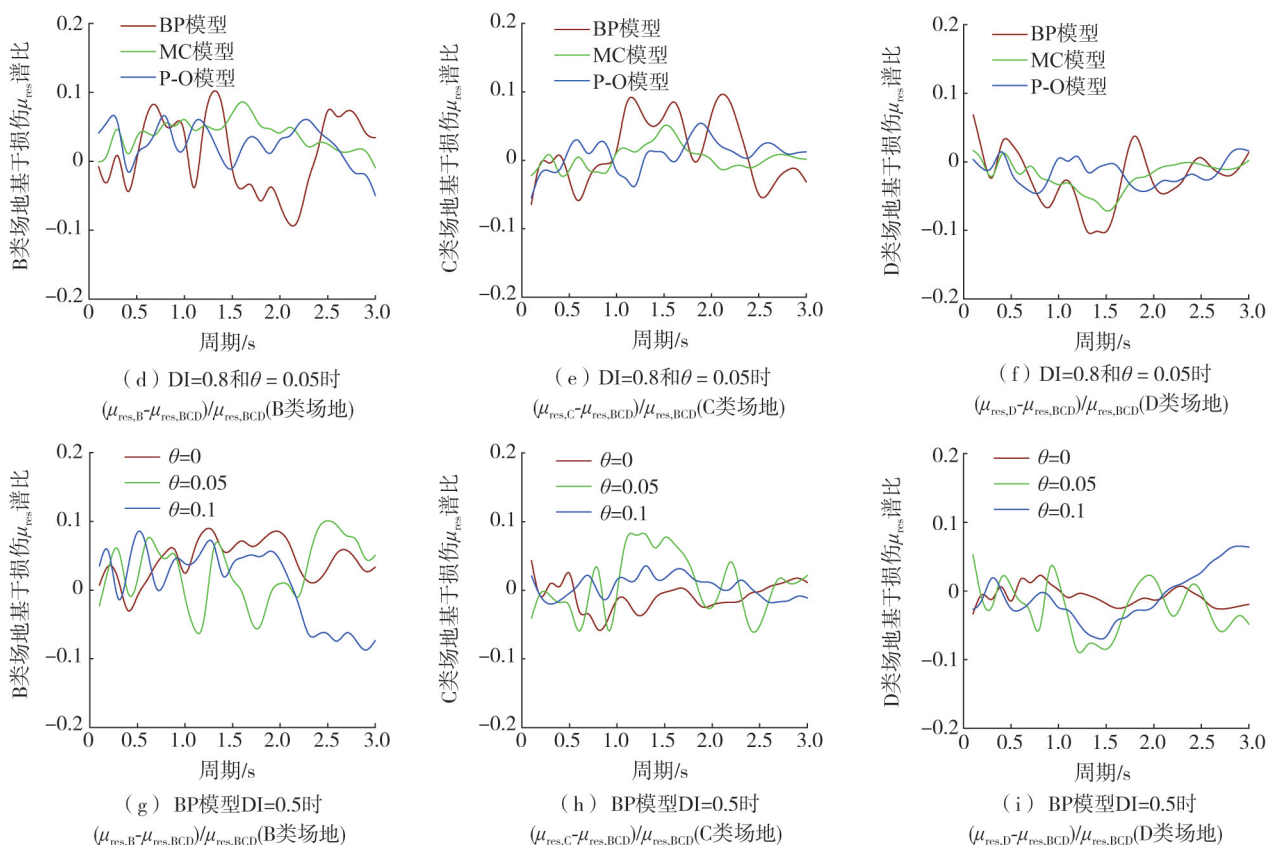
由图 4 可知,在整个周期段内,不同损伤指数 DI、不同弹性稳定系数 θ 、不同滞回模型对应的 B、C、D 三类场地基于损伤 μ_{res} 谱比 $(\mu_{res,B} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ 、 $(\mu_{res,C} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ 以及 $(\mu_{res,D} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ 都介于 -0.1~0.1 之间。说明场地对基于损伤 μ_{res} 谱值的影响不超过 10%,使用不区分场地类别地震动作用下的基于损伤 μ_{res} 谱分别代替 B、C 以及 D 三类场地地震动作用下的基于损伤 μ_{res} 谱评估结构残余位移延性需求时,误差不超过 10%。因此,本文进行后续分析时不再按照场地类别对地震动记录进行分类。



(a) DI=0.2和 $\theta=0.05$ 时 $(\mu_{res,B} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ (B类场地)

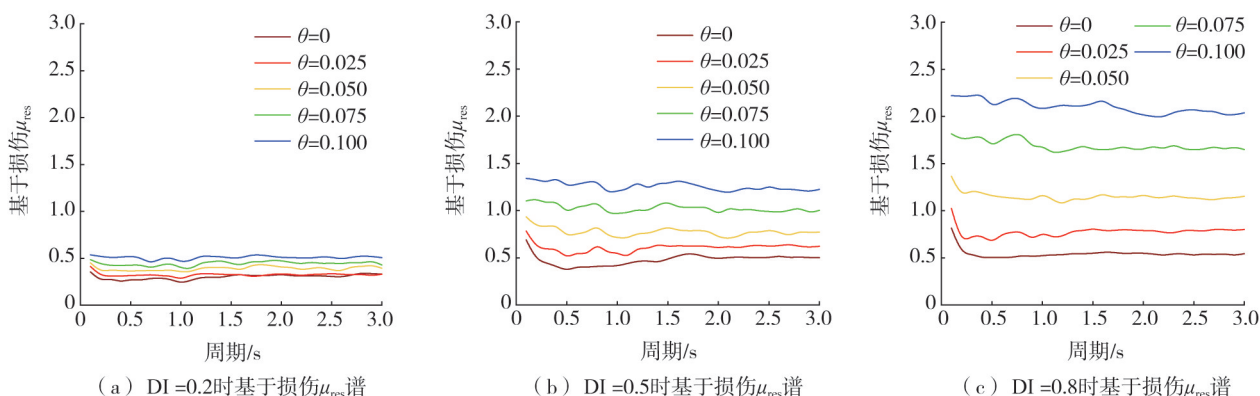
(b) DI=0.2和 $\theta=0.05$ 时 $(\mu_{res,C} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ (C类场地)

(c) DI=0.2和 $\theta=0.05$ 时 $(\mu_{res,D} - \mu_{res,BCD}) / \mu_{res,BCD}$ (D类场地)

图4 场地条件对基于损伤 μ_{res} 谱的影响Fig. 4 Influence of site conditions on the damage-based μ_{res} spectrum

3.3 弹性稳定系数 θ 影响

不同弹性稳定系数 θ 下的基于损伤 μ_{res} 均值谱见图5,考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱(μ_{res}) $_{\theta=i}$ 与不考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱(μ_{res}) $_{\theta=0}$ 的谱比见图6,基于损伤 μ_{res} 的变异系数(coeficients of variation, COV)谱见图7,其中COV为标准差与均值的比值,用来反映基于损伤 μ_{res} 的离散性。SDOF体系滞回模型为BP模型, μ_u 取值为4。由图5可知,在整个周期段内,基于损伤 μ_{res} 谱值随弹性稳定系数 θ 增大而增大,且损伤指数DI越大则基于损伤 μ_{res} 谱值随弹性稳定系数 θ 增大的幅度越大。在整个周期段内,基于损伤 μ_{res} 谱值随损伤指数DI增大而增大。由图6可知,考虑 $P-\Delta$ 效应与不考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱比随弹性稳定系数 θ 增大而增大,且随自振周期 T 增大而先增大后减小最后趋于稳定;在整个周期段内,考虑 $P-\Delta$ 效应与不考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱比随损伤指数DI增大而增大。由图7可知,在整个周期段内,基于损伤 μ_{res} 的COV值趋于不变,即基于损伤 μ_{res} 的COV值对自振周期 T 变化不敏感;基于损伤 μ_{res} 的COV值随损伤指数DI增大而略有增大;基于损伤 μ_{res} 的COV值随弹性稳定系数 θ 增大而减小。

图5 μ_{res} 随周期 T 的变化Fig. 5 Variation of μ_{res} with period T

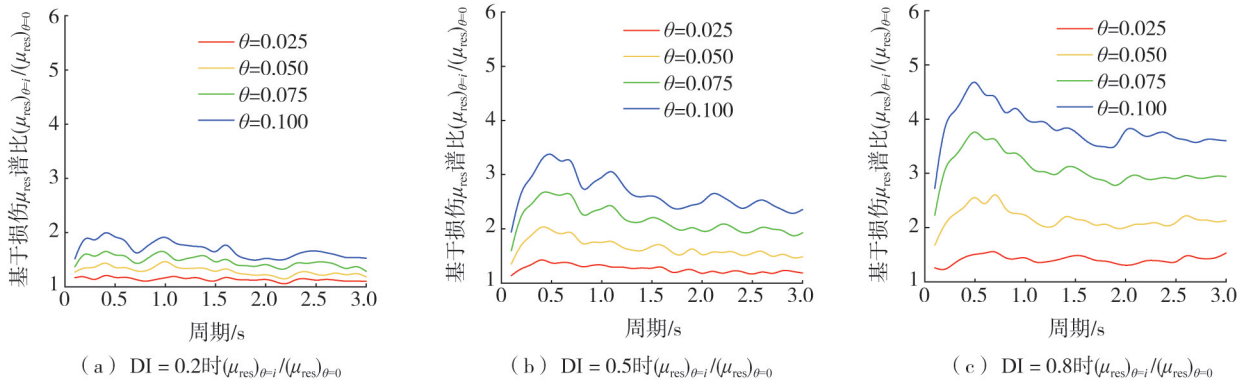


图 6 $(\mu_{res})_{\theta=i}/(\mu_{res})_{\theta=0}$ 随自振周期 T 的变化

Fig. 6 The variation of $(\mu_{res})_{\theta=i}/(\mu_{res})_{\theta=0}$ with period T

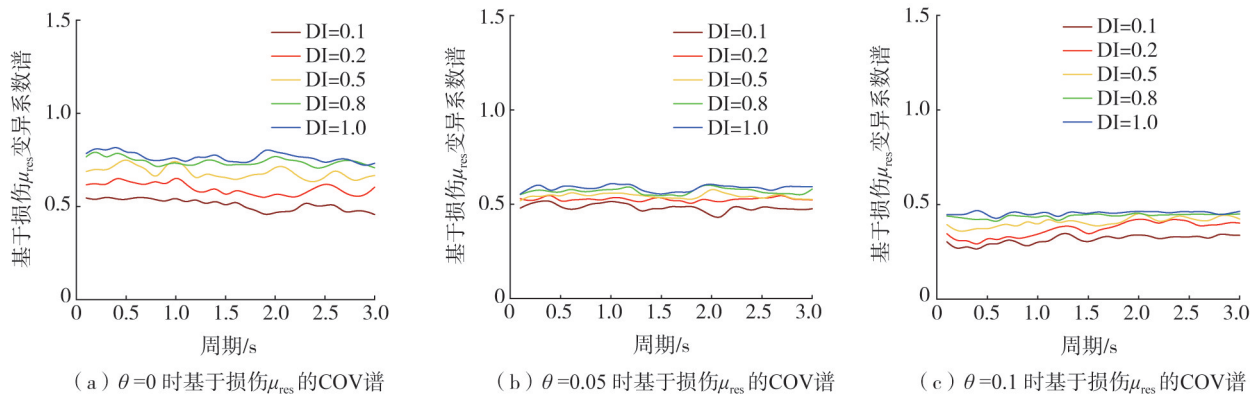
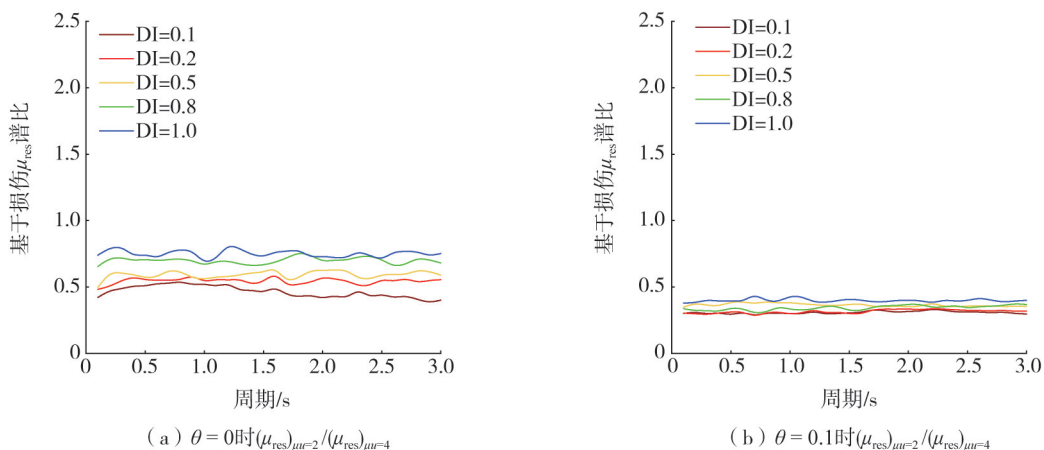


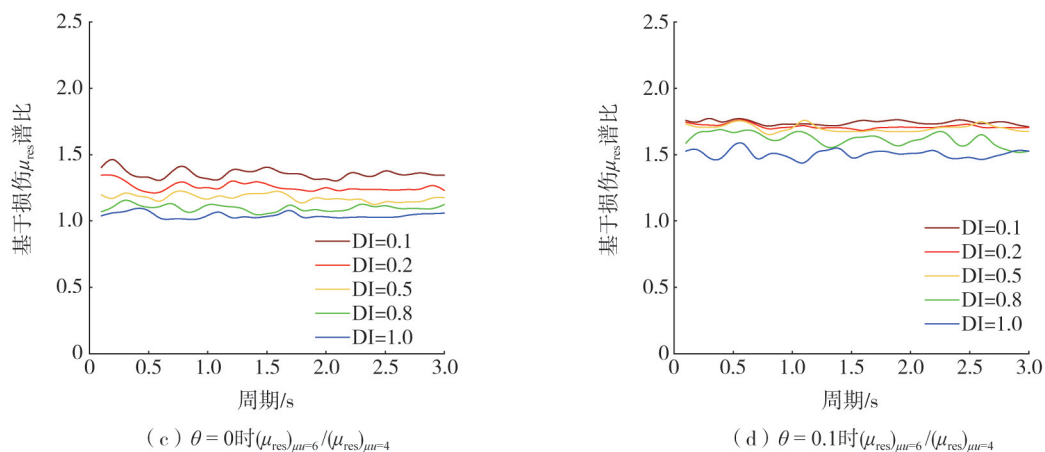
图 7 基于损伤 μ_{res} 的 COV 谱

Fig. 7 COV spectra of damage-based μ_{res}

3.4 极限延性系数 μ_u 影响

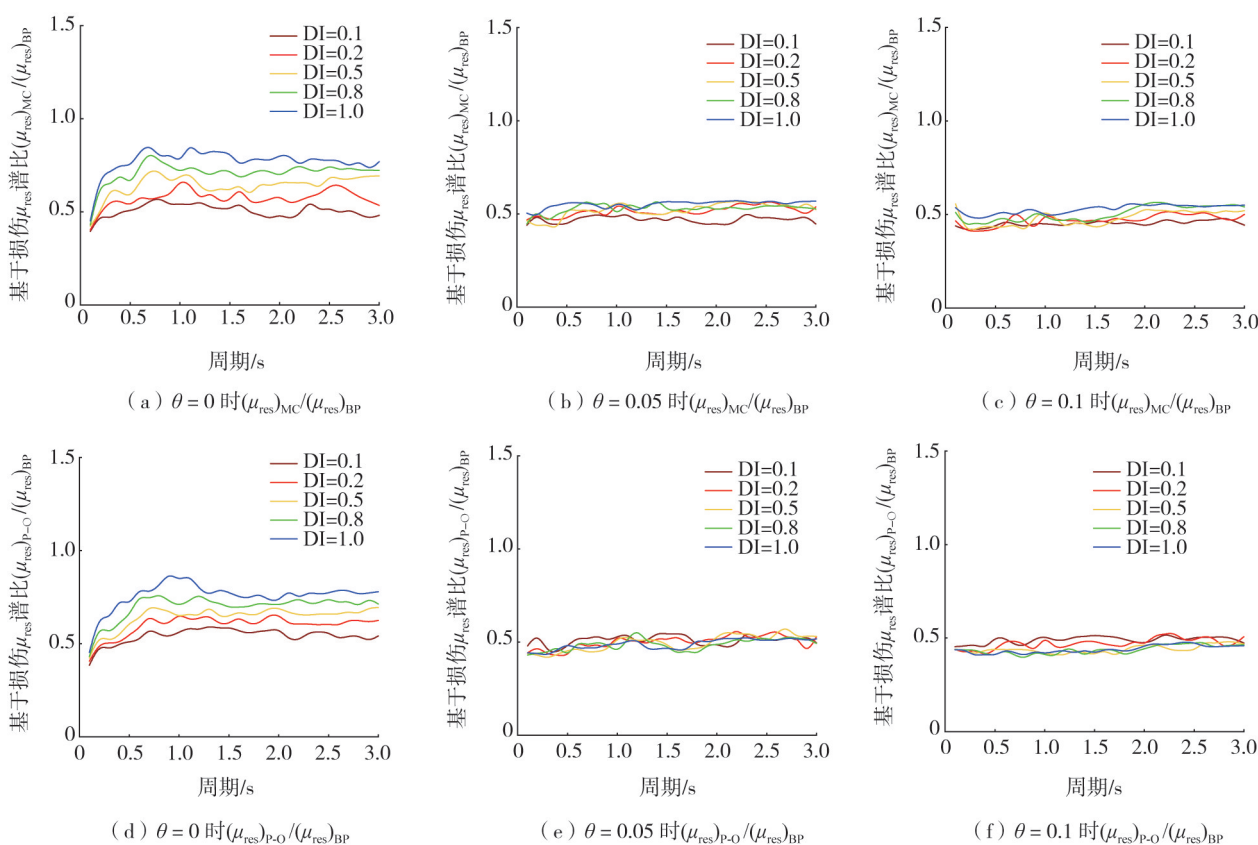
极限延性系数 μ_u 分别取 2 与 6 时基于损伤 μ_{res} 谱与 μ_u 取 4 时基于损伤 μ_{res} 谱之比,见图 8。其中,SDOF 体系滞回模型为 BP 模型,弹性稳定系数 θ 取值为 0 与 0.1。由图 8 可知,极限延性系数 μ_u 取 2 对应的基于损伤 μ_{res} 谱比值小于 1.0,且谱比值随损伤指数 DI 增大有增大的趋势;极限延性系数 μ_u 取 6 对应的基于损伤 μ_{res} 谱比值大于 1.0,且谱比值随损伤指数 DI 增大有减小的趋势;当弹性稳定系数 θ 取 0 时,极限延性系数 μ_u 为 2 对应的基于损伤 μ_{res} 谱比值小于 0.8,说明不考虑 $P-\Delta$ 效应时极限延性系数 μ_u 对基于损伤 μ_{res} 谱的影响超过 20%;当弹性稳定系数 θ 取 0.1 时,极限延性系数 μ_u 为 2 对应的基于损伤 μ_{res} 谱比值小于 0.5,极限延性系数 μ_u 为 6 对应的基于损伤 μ_{res} 谱比值大于 1.5,说明考虑 $P-\Delta$ 效应($\theta=0.1$)时极限延性系数 μ_u 对基于损伤 μ_{res} 谱的影响超过 50%。总体而言,在整个周期段内,基于损伤 μ_{res} 谱值随极限延性系数 μ_u 增大而增大,且考虑 $P-\Delta$ 效应时极限延性系数 μ_u 对基于损伤 μ_{res} 谱值的影响增大。



图8 极限延性系数 μ_u 对基于损伤 μ_{res} 的影响Fig. 8 Influence of ultimate ductility coefficient μ_u on damage-based μ_{res}

3.5 滞回模型影响

SDOF 体系 MC 模型对应的基于损伤 μ_{res} 谱与 BP 模型对应的基于损伤 μ_{res} 谱之比, 见图(a)、(b)、(c)。SDOF 体系 P-O 模型对应的基于损伤 μ_{res} 谱与 BP 模型对应的基于损伤 μ_{res} 谱之比, 见图9(d)、(e)和(f)。其中, μ_u 取值为 4, 弹性稳定系数 θ 取值为 0、0.05 与 0.10。由图 9 可知: 在整个周期段内且考虑 $P-\Delta$ 效应 (θ 为 0.05、0.10) 时, MC 模型 μ_{res} 谱比和 P-O 模型 μ_{res} 谱比均接近于 0.5, 自振周期 T 与损伤指数 DI 对 MC 模型 μ_{res} 谱比和 P-O 模型 μ_{res} 谱比的影响较小; 不考虑 $P-\Delta$ 效应 ($\theta=0$) 时, MC 模型 μ_{res} 谱比和 P-O 模型 μ_{res} 谱比均小于 0.8, 且谱比随 DI 增大而增大。这是因为 MC 模型和 P-O 模型在震动作用下进入大量非线性滞回循环, 在屈服后由于卸载刚度退化而出现复位特性, 故而产生比卸载刚度无退化的 BP 模型 SDOF 体系更小的 μ_{res} 需求。

图9 滞回模型对基于损伤 μ_{res} 的影响Fig. 9 Influence of hysteretic model on damage-based μ_{res}

4 回归分析

通过回归分析建立基于损伤 μ_{res} 均值谱预测公式。如前文所述, DI 、 T 以及 μ_u 对基于损伤 μ_{res} 均值谱影响显著, 通过回归分析建立基于损伤 μ_{res} 均值谱预测公式时必须考虑这些因素的影响。同时, 构造的预测公式必须满足式(7)和式(8)的边界条件。本文给出了 SDOF 体系 BP 模型的基于损伤 μ_{res} 均值谱预测公式, 其表达式为

$$\mu_{res}(T=\infty, DI>0)=f(DI) \tag{7}$$

$$\mu_{res}(T, DI=0)=0 \tag{8}$$

$$\mu_{res}=[50+(DI)^a/(50 \cdot T^b)] \cdot \{1-\exp[-c \cdot (DI)^d]\} \tag{9}$$

基于损伤 μ_{res} 均值谱的回归参数 a 、 b 、 c 和 d 可通过 Levenberg-Marquardt 算法^[27] 回归分析得到, 回归参数值见表 2。

表 2 基于损伤 μ_{res} 谱预测公式回归参数

Table 2 Regression parameters of the prediction formulas for damage-based μ_{res} spectrum

| 极限延性系数 μ_u | 回归参数 | | | | 拟合优度 R^2 |
|----------------|--------|-------|-------|-------|------------|
| | a | b | c | d | |
| 2 | 1.378 | 3.011 | 0.008 | 0.574 | 0.986 |
| 4 | 0.455 | 3.142 | 0.012 | 0.412 | 0.994 |
| 6 | -0.078 | 3.045 | 0.013 | 0.410 | 0.974 |

极限延性系数 μ_u 为 2、4、6 时, 基于损伤 μ_{res} 谱统计值和预测值对比见图 10(a)、(b)、(c)。由表 2 中的拟合优度及基于损伤 μ_{res} 谱统计值和预测值对比可知, 本文构建的预测公式能精确地预测结构基于损伤 μ_{res} 谱值。值得注意的是, 本文的研究对象为 BP 模型、MC 模型以及 P-O 模型 SDOF 体系。因此, SDOF 体系 BP 模型且 μ_u 取 6 时, 本文构建的预测公式适用于钢结构。SDOF 体系 MC 模型且 μ_u 取 4 时, 适用于钢筋混凝土结构。SDOF 体系 P-O 模型且 μ_u 取 2 时, 适用于预应力钢筋混凝土结构。

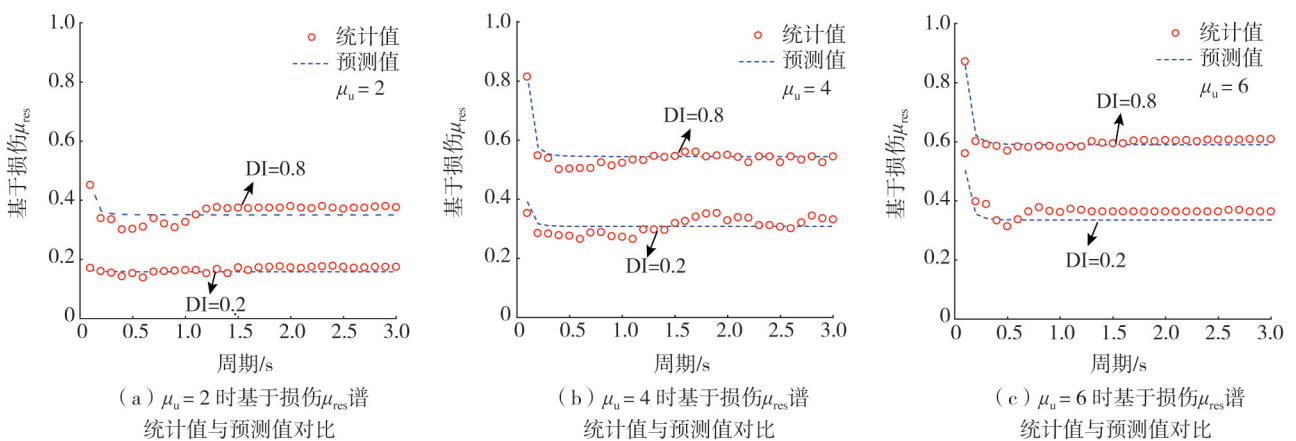


图 10 基于损伤 μ_{res} 谱统计值与预测值对比

Fig. 10 Comparison between statistical results and prediction results of damage-based μ_{res} spectrum

通过回归分析建立考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱 $(\mu_{res})_{\theta=i}$ 与不考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱 $(\mu_{res})_{\theta=0}$ 的谱比预测公式。如第 3.3 节所述, DI 、 T 以及 θ 对考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱 $(\mu_{res})_{\theta=i}$ 与不考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱 $(\mu_{res})_{\theta=0}$ 谱比影响显著, 通过回归分析建立谱比预测公式时必须考虑这些因素的影响。本文给出了 SDOF 体系 BP 模型 μ_u 取值为 4 的谱比预测公式, 其表达式为

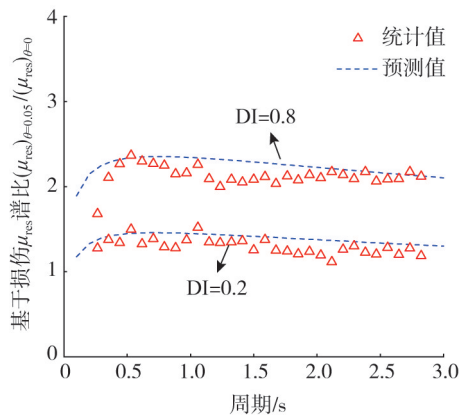
$$C_r = \frac{(1/a-500 \cdot T^b)}{1-50 \cdot \exp(T^c+d \cdot DI)} \tag{10}$$

基于损伤 μ_{res} 谱比的回归参数 a 、 b 、 c 和 d 可通过 Levenberg-Marquardt 算法^[27] 回归分析得到, 回归参数值见表 3。

表3 基于损伤 μ_{res} 谱比预测公式回归参数Table 3 Regression parameters of the prediction formulas for damage-based μ_{res} ratio

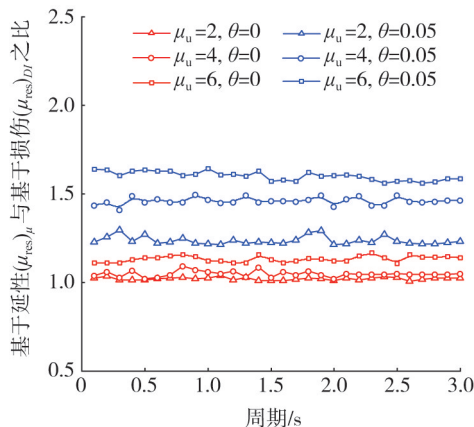
| 弹性稳定系数 θ | 回归参数 | | | | 拟合优度 R^2 |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|------------|
| | a | b | c | d | |
| 0.05 | 0.003 | -0.093 | -0.242 | -0.791 | 0.979 |
| 0.1 | 0.003 | -0.144 | -0.288 | -1.240 | 0.981 |

考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱 (μ_{res}) $_{\theta=i}$ 与不考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱 (μ_{res}) $_{\theta=0}$ 谱比统计值和预测值对比见图 11。由表 3 中的拟合优度及谱比统计值和预测值对比可知,本文构建的考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱 (μ_{res}) $_{\theta=i}$ 与不考虑 $P-\Delta$ 效应基于损伤 μ_{res} 谱 (μ_{res}) $_{\theta=0}$ 谱比预测公式能精确地预测结构考虑 $P-\Delta$ 效应的基于损伤 μ_{res} 谱值。

图 11 基于损伤 μ_{res} 谱比统计值与预测值对比Fig. 11 Comparison of statistical values and predicted values of $(\mu_{res})_{\theta=i} / (\mu_{res})_{\theta=0}$

5 基于延性与基于损伤 μ_{res} 谱对比分析

基于延性 μ_{res} 谱与基于损伤 μ_{res} 谱之比见图 12。其中,SDOF 体系滞回模型为 BP 模型,极限延性系数 μ_u 取值为 2、4、6,损伤指数 DI 取值为 1.0,弹性稳定系数 θ 取值为 0、0.05。由图可知,在整个周期段内,基于延性 μ_{res} 与基于损伤 μ_{res} 谱比值大于 1.0,即基于延性 μ_{res} 谱值大于基于损伤 μ_{res} 谱值。这说明与基于损伤理论相比,基于延性理论的结构 μ_{res} 谱估计趋于保守。

图 12 基于延性与基于损伤 μ_{res} 谱对比分析Fig. 12 Comparison between ductility-based μ_{res} spectra and damage-based μ_{res} spectra

其次,基于延性 μ_{res} 与基于损伤 μ_{res} 谱比与极限延性系数 μ_u 以及弹性稳定系数 θ 相关,与自振周期 T 无关;基于延性 μ_{res} 与基于损伤 μ_{res} 谱比随极限延性系数 μ_u 增大而增大;与不考虑 $P-\Delta$ 效应时的谱比相比,考虑

$P-\Delta$ 效应($\theta=0.05$)时基于延性 μ_{res} 与基于损伤 μ_{res} 谱比更大,且考虑 $P-\Delta$ 效应($\theta=0.05$)时极限延性系数 μ_u 对基于延性 μ_{res} 与基于损伤 μ_{res} 谱比的影响增大。

基于延性 μ_{res} 谱仅考虑位移延性对结构 μ_{res} 的影响,不能考虑位移延性和累积耗能对结构 μ_{res} 的耦合影响。值得一提的是,结构延性需求通常小于延性能力,故而基于延性的弹塑性反应谱对延性的考虑并不是基于极限状态。因此,上述2点为基于延性 μ_{res} 谱和基于损伤 μ_{res} 谱的最大区别之处。

6 结论

本文研究了结构考虑 $P-\Delta$ 效应的基于损伤 μ_{res} 谱,探讨了场地类别、弹性稳定系数 θ 、极限延性系数 μ_u 以及滞回模型对基于损伤 μ_{res} 谱的影响,得出如下主要结论:

1) 场地类别对基于损伤 μ_{res} 谱值的影响不超过10%,不区分地震动类别评估结构残余位移延性需求时,误差不超过10%。

2) 考虑 $P-\Delta$ 效应时,极限延性系数 μ_u 对基于损伤 μ_{res} 谱的影响超过50%;反之,极限延性系数 μ_u 对基于损伤 μ_{res} 谱的影响超过20%。考虑 $P-\Delta$ 效应时,具有刚度退化模型的结构基于损伤 μ_{res} 与刚度无退化模型的结构基于损伤 μ_{res} 谱比值接近0.5;反之,结构基于损伤 μ_{res} 谱比值小于0.8。

3) 基于延性 μ_{res} 谱与基于损伤 μ_{res} 谱比值大于1.0,说明与损伤理论相比,基于延性理论的结构 μ_{res} 谱值估计趋于保守。

4) 构建了基于损伤 μ_{res} 谱以及考虑 $P-\Delta$ 效应的基于损伤 μ_{res} 谱比的预测方程,结果可用于结构残余位移延性需求评估以及结构抗震韧性评价。

致谢:感谢美国太平洋地震工程研究中心(PEER)NGA计划项目提供的地震动数据。

参考文献:

- [1] 童根树,赵永峰. 动力 $P-\Delta$ 效应对地震力调整系数的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1): 120-125, 192.
TONG Genshu, ZHAO Yongfeng. Dynamic $P-\Delta$ effects on seismic force modification factors[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(1): 120-125, 192. (in Chinese)
- [2] 翟长海,孙亚民,谢礼立. 考虑 $P-\Delta$ 效应的等延性位移比谱[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1513-1516.
ZHAI Changhai, SUN Yamin, XIE Lili. Estimation of $P-\Delta$ effect on constant-ductility inelastic displacement ratio spectra[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1513-1516. (in Chinese)
- [3] 余波,洪汉平,杨绿峰. 双向地震激励和 $P-\Delta$ 效应对延性需求的影响[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 54-61.
YU Bo, HONG Hanping, YANG Lufeng. Influences of bidirectional seismic excitations and $P-\Delta$ effect on ductility demand[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 54-61. (in Chinese)
- [4] ROSENBLUETH E. Slenderness effects in buildings[J]. Journal of the Structural Division, 1965, 91(1): 229-252.
- [5] BERNAL D. Amplification factors for inelastic dynamic $P-\Delta$ effects in earthquake analysis[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1987, 15(5): 635-651.
- [6] MACRAE G A. $P-\Delta$ effects on single-degree-of-freedom structures in earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(3): 539-568.
- [7] GUPTA A, KRAWINKLER H. Dynamic $P-\Delta$ effects for flexible inelastic steel structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(1): 145-154.
- [8] 魏斌,李建中,蒋娜芳. 考虑 $P-\Delta$ 效应的桥梁地震反应分析与设计[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(3): 129-135.
WEI Bin, LI Jianzhong, JIANG Nafang. Seismic analysis and design of bridge piers considering $P-\Delta$ effects[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2010, 30(3): 129-135. (in Chinese)
- [9] DE FRANCESCO G, SULLIVAN T J. $P-\Delta$ effects on short-period systems subjected to earthquake excitation[J]. Engineering Structures, 2022, 254: 113642.
- [10] DE FRANCESCO G, SULLIVAN T J. Accounting for hysteretic characteristics in $P-\Delta$ analysis of structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2023, 52(15): 4919-4938.
- [11] DE FRANCESCO G, SULLIVAN T J. Improved estimation of $P-\Delta$ effects on the response of bilinear SDOF systems[J]. Earthquake Spectra, 2023, 39(2): 889-913.
- [12] RUIZ-GARCÍA J, MIRANDA E. Residual displacement ratios for assessment of existing structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(3): 315-336.
- [13] 黎璟,杨华平,钱永久,等. 近断层脉冲型地震动的残余位移系数谱研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 169-176.

- LI Jing, YANG Huaping, QIAN Yongjiu, et al. Residual displacement coefficient spectrum for structures under near-fault pulse-like ground motions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(10): 169-176. (in Chinese)
- [14] GIRIJA H M, GUPTA V K. Scaling of constant-ductility residual displacement spectrum[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2020, 49(3): 215-233.
- [15] 刘巴黎, 胡进军, 谢礼立. 双向地震激励下基于二维屈服面模型的残余位移谱研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(14): 40-46.
LIU Bali, HU Jinjun, XIE Lili. Residual displacement spectrum of a structural system based on a two-dimensional yield surface plasticity model subjected to bi-directional earthquake excitations[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(14): 40-46. (in Chinese)
- [16] 刘巴黎, 胡进军, 谢礼立. 考虑土-结构相互作用的结构残余位移比谱[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(16): 242-248.
LIU Bali, HU Jinjun, XIE Lili. Residual displacement ratios spectrum of structures considering soil-structure interaction[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(16): 242-248. (in Chinese)
- [17] LIU B L, HU J J, XIE L L. Estimation of constant-damage residual displacements in terms of maximum inelastic displacements for SDOF structures[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2022, 20(2): 1027-1055.
- [18] HU J J, LIU B L. Estimation of the damage-based residual displacement spectrum for simple structures[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2023, 27(2): 263-283.
- [19] FEMA P-58 Seismic performance assessment of buildings volume 1: Methodology[R]. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [20] GB/T 38591—2020 建筑抗震韧性评价标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
GB/T 38591—2020 Standard for seismic resilience assessment of buildings[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [21] PARK Y J, ANG A H. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(4): 722-739.
- [22] PARK Y J, ANG A H, WEN Y K. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(4): 740-757.
- [23] FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[R]. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [24] UANG C M, BERTERO V V. Evaluation of seismic energy in structures[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1990, 19(1): 77-90.
- [25] Federal Emergency Management Agency (FEMA). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures [R]. Washington, D.C.: Building Seismic Safety Council, 2009.
- [26] COSENZA E, MANFREDI G, RAMASCO R. The use of damage functionals in earthquake engineering: A comparison between different methods[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1993, 22(10): 855-868.
- [27] MILLIKEN G A. Nonlinear regression analysis and its applications[J]. *Technometrics*, 1990, 32(2): 219-220.