

• 研究论文 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800352

基于谱匹配的近远场地震动作用下RC框架结构易损性分析

韩建平^{1,2}, 魏世龙^{1,2}, 张鑫^{1,3}

(1.兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2.兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3.山东建筑大学 建筑结构鉴定加固与改造省重点实验室, 山东 济南 250101)

摘要:选择合适的地震动输入是进行结构非线性动力分析和增量动力分析的基础。首先选取实际近场和远场地震动记录各20条,并运用谱匹配方法对其进行目标设计谱匹配,得到谱匹配后的近场和远场地震动记录各20条。选择地震动最大峰值速度(*PGV*)和结构基本周期对应加速度反应谱 $S_a(T_1)$ 值为强度指标,输入4组地震动记录,对一5层钢筋混凝土框架结构,分别进行单一地震动强度水平的非线性动力分析和多重地震动强度水平的增量动力分析,提取工程需求参数如最大层间位移角和最大残余层间位移角,进而分析反映谱匹配效果的偏差指标和工程需求参数的离散性及其与地震动强度指标的相关性。最后,基于增量动力分析结果对结构进行了不同损伤状态下的易损性分析。分析结果表明:工程需求参数分析结果与*PGV*的相关性明显优于与 $S_a(T_1)$ 的相关性;输入谱匹配后的近场和远场地震动记录,工程需求参数分析结果的离散性明显降低且最大层间位移角无明显偏差;以*PGV*为强度指标,相同*PGV*时远场地震动引起的结构最大层间位移角较大,而以 $S_a(T_1)$ 为强度指标,相同 $S_a(T_1)$ 时则是近场地震动引起的结构最大层间位移角较大;结构倒塌前,近场地震动作用下各损伤状态对应的最大残余层间位移角较大,达到倒塌状态时,近场地震动作用下结构的最大残余层间位移角较小。

关键词:最大峰值速度;近场地震动;偏差;离散性;相关性;易损性

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)03-0149-09

Seismic Fragility Analysis of RC Frames Under Near-Field and Far-field Ground Motion Based on Spectral Matching

HAN Jianping^{1,2}, WEI Shilong^{1,2}, ZHANG Xin^{1,3}

(1.Key Lab. of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Eng. of Gansu Province, Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China; 2.Western Eng. Research Center of Disaster Mitigation in Civil Eng. of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China; 3.Shandong Provincial Key Lab. of Appraisal and Retrofitting in Building Structures, Shandong Jianzhu Univ., Jinan 250101, China)

Abstract: Choosing the appropriate ground motion as input is the basis of nonlinear dynamic analysis and incremental dynamic analysis of structures. Firstly, 20 suites of near-field ground motion records and 20 suites of far-field ground motion records were chosen and modified to match the targeted design spectrum. Then, taking peak ground velocity (*PGV*) and spectral acceleration corresponding to the fundamental period of the structure $S_a(T_1)$ as intensity measures, dynamic analysis with the single ground motion intensity level and incremental dynamic analysis (IDA) with multiple ground motion intensity levels were conducted on a 5-storey reinforced concrete frame under the aforementioned 4 sets of ground motion records. Engineering demand parameters (EDS_S) such as maximum inter-story drift ratios (θ_{max}) and maximum residual inter-story drift ratios ($RIDR_{max}$) were obtained. The bias indices to represent the spectral matching effect, the variation of EDP_S and the correlation between EDP_S and intensity measures were further analyzed. Finally, seismic fragility analyses corresponding to different damage states were conducted based on IDA results. The analytical results showed that the correlation of EDP_S with *PGV* is better than with $S_a(T_1)$. Under spectrum-matched near- and far-field ground motion records, the dispersion of EDP_S decreases obviously and there is no obvious biases in θ_{max} results. If taking *PGV* as intensity measure, far-field ground motion induces larger θ_{max} than near-field ground motion. On the contrary, if taking $S_a(T_1)$ as intensity measure, near-field ground motion induces larger θ_{max} than far-field ground motion. Prior to collapse of the structure, $RIDR_{max}$ values corresponding to different dam-

收稿日期:2018-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578273;51268036)教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R51)

作者简介:韩建平(1970—),男,教授,博士。研究方向:工程结构抗震、减震控制及损伤识别。E-mail: jphan@lut.edu.cn

网络出版时间:2018-05-05 17:36:00 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180505.1735.004.html>

age states under near-field ground motion are larger than the values under far-field ground motion. For collapse state, $RIDR_{\max}$ values under near-field ground motion are less than the values under far-field ground motion.

Key words: peak ground velocity; near-field ground motion; bias; dispersion; correlation; fragility

地震易损性分析是一种基于概率的结构抗震性能评估方法,它从概率意义上描述地震动强度与结构损伤状态之间的关联性,从而定量评估结构的抗震性能^[1]。目前,易损性分析理论被广泛应用于各类结构的抗震性能评估中^[2-5],特别是钢筋混凝土框架结构的地震动易损性研究更是得到国内外学者的广泛关注^[6-7]。

如何合理地考虑地震作用和结构中存在的强不确定性是近年来工程结构地震易损性研究的重点,而地震动输入的不确定性则是影响结构响应分析结果的主要因素^[8]。在非线性动力分析和增量动力分析中,结构地震响应分析结果的不确定性和地震动记录的选择与调整及用于地震动调整的强度指标(intensity measure, IM)有关。不同的地震动强度指标与结构最大响应的相关性差异很大,按照不同的强度指标选择和调整地震动输入也会使得所关心的工程需求参数(engineering demand parameters, EDP)分析结果的离散性很大^[9]。Lucó^[10]提出,地震动强度指标的选择既要考虑其充分性,也要考虑其有效性。Baker等^[11]的研究表明,多个 IM 组成的向量型 IM 比单一 IM 包含更多的地震动信息,能够更加充分地描述地面运动对结构的影响。另外一种选择和调整地震动记录的方法是基于谱匹配的方法,通过对地震动的谱形进行非线性修改,以期达到减小谱的变异性、改变谱的偏差,从而使其与目标谱匹配^[12]。与远场地震动相比,目前对近场地震动特性及其对结构的影响研究还不够充分^[13]。

基于此,作者首先选取实际近场和远场地震动记录各20条,运用谱匹配方法对其进行目标设计谱匹配,得到谱匹配后的近场和远场地震动记录各20条。选择地震动最大峰值速度(peak ground velocity, PGV)和结构基本周期对应加速度反应谱 $S_a(T_1)$ 值为强度指标,输入4组地震动记录,对一5层钢筋混凝土框架结构,分别进行单一地震动强度水平的非线性动力分析和多重地震动强度水平的增量动力分析,提取工程需求参数如最大层间位移角和最大残余层间位移角,进而分析谱匹配的效果、工程需求参数的离散性及其与地震动强度指标的相关性,最后基于增量动力分析结果进行了不同损伤状态下的易损性分析。

1 结构地震响应偏差的引入

引入偏差,即输入调整或匹配的新的一组地震

动获得的结构工程需求参数(EDP , engineering demand parameter)的几何平均值与输入选定的原始地震动获得的结构工程需求参数的几何平均值的比值,其可以有效地表示地震动选择与调整方法的合理性和可靠性^[12]。几何平均值表示为:

$$EDP_{geo} = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln EDP_i \right] \quad (1)$$

因此,偏差表示为:

$$bias = \frac{EDP_{geo}}{EDP_{geo,ref}} \quad (2)$$

式中, EDP_{geo} 表示输入调整或谱匹配后的一组地震动获得的结构工程需求参数的几何平均值; $EDP_{geo,ref}$ 表示输入选定的原始地震动的结构工程需求参数的几何平均值。

2 算例结构和地震动记录选择与调整

2.1 算例结构

如图1所示,选取一按现行规范设计的5层钢筋混凝土框架结构宿舍楼为研究对象,工程所在地抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度为 $0.2g$,场地类别为II类,设计地震分组为第3组,梁柱混凝土强度等级为C35,纵向受力钢筋为HRB400,箍筋为HPB300。

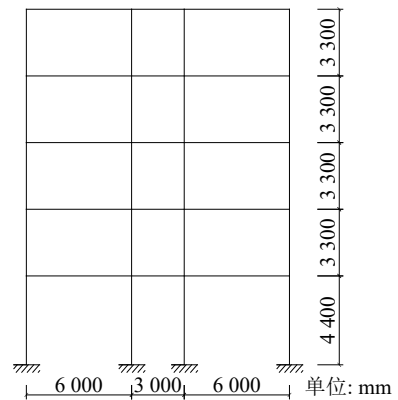


图1 算例结构

Fig. 1 The structure for case study

采用OpenSees有限元软件进行建模分析。建模时,梁柱单元均采用基于纤维截面的DispBeam-Column单元,考虑 $P-\Delta$ 效应。混凝土本构采用Concrete02,并考虑核心区混凝土的约束效应,分别对核心区混凝土和保护层混凝土的本构关系进行定义。钢筋本构采用可以考虑强度、刚度退化的Reinfor-

cingSteel。结构基本周期 $T_1 = 0.72$ s。

2.2 地震动记录选择与调整

综合考虑中国抗震设计规范的相关要求, 从PEER地震动数据库中选取了一组相当于II类场地的20条断层距在10 km以内, 震级 $M > 6.5$ 的实际近场

地震动记录以及一组20条震级 $M > 6.5$ 的实际远场地震动记录, 并以现行规范反应谱为目标谱, 对两组地震动记录进行周期区间(0~3 s)的加速度反应谱匹配。各组原始地震动记录和匹配后地震动记录的加速度反应谱如图2所示。

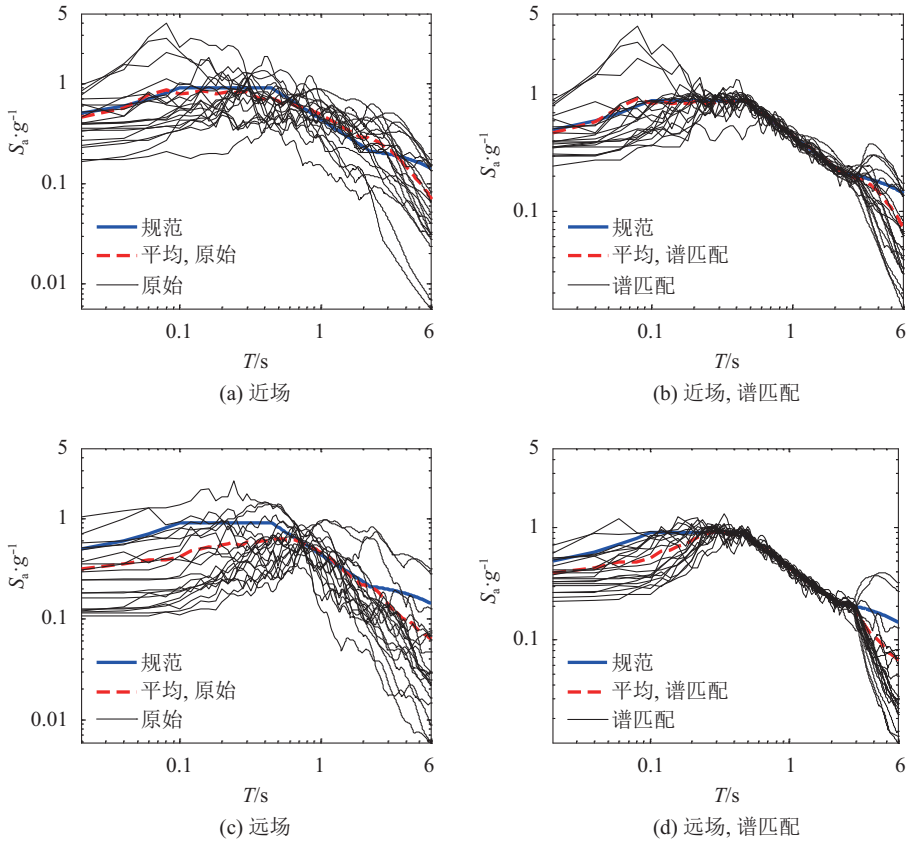


图2 原始和谱匹配后地震动记录的加速度反应谱

Fig. 2 Acceleration response spectra of original and spectrum-matched ground motion record

3 单一地震动强度下的结构地震响应分析

以原始及匹配后的近场、远场地震动记录分别作为输入, 对算例结构模型进行单一强度下的非线性动力分析, 提取最大层间位移角和最大残余层间位移角, 分析其离散性及偏差, 并分析其与PGV和 $S_a(T_1, 5\%)$ 的相关性。

3.1 结构地震响应结果的离散性及偏差

计算不同输入下结构最大层间位移角和最大残

余层间位移角等地震动响应分析结果的均值、离散系数和谱匹配后的偏差如表1所示。

表1结果表明, 与输入原始地震动记录的结构地震响应结果相比, 输入匹配后的近场地震动和远场地震动记录所得结构地震响应结果的离散性均有明显降低, 且最大层间位移角的离散性明显小于最大残余层间位移角的离散性。结构最大层间位移角的偏差明显优于最大残余层间位移角的偏差。

表1 结构地震响应分析结果的均值、离散系数及偏差

Tab. 1 Mean values, dispersion coefficients and biases of analyzed seismic response results of the structure

| 地震动组别 | 最大层间位移角 | | | 最大残余层间位移角 | | |
|---------|---------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | 平均值/% | 离散系数 | 偏差 | 平均值/% | 离散系数 | 偏差 |
| 近场 | 1.186 | 0.456 | — | 0.034 | 1.235 | — |
| 近场, 谱匹配 | 0.989 | 0.101 | 0.834 | 0.019 | 0.789 | 0.559 |
| 远场 | 1.084 | 0.649 | — | 0.035 | 2.171 | — |
| 远场, 谱匹配 | 0.952 | 0.096 | 0.878 | 0.016 | 0.875 | 0.457 |

3.2 相关性分析

输入原始近场、远场地震动下结构最大层间位移角和最大残余层间位移角与 PGV 和 $S_a(T_1, 5\%)$ 的相关性如图3和4所示。图3和4结果表明,无论输入近场

地震动还是远场地震动,结构最大层间位移角和最大残余层间位移角与 PGV 的相关性都明显优于与 $S_a(T_1, 5\%)$ 的相关性。这也说明对于中等周期结构, PGV 对结构非线性响应的影响比 $S_a(T_1, 5\%)$ 更加显著。

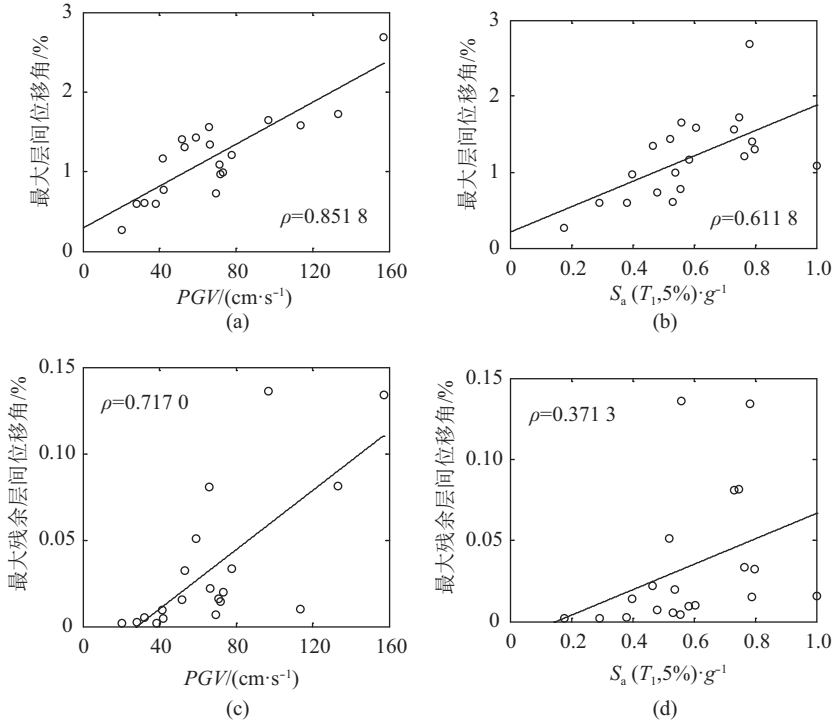


图 3 输入原始近场地震动,结构地震响应结果与 PGV 和 $S_a(T_1)$ 的相关性

Fig. 3 Correlation between seismic responses of the structure under original near-field ground motion and PGV , $S_a(T_1)$

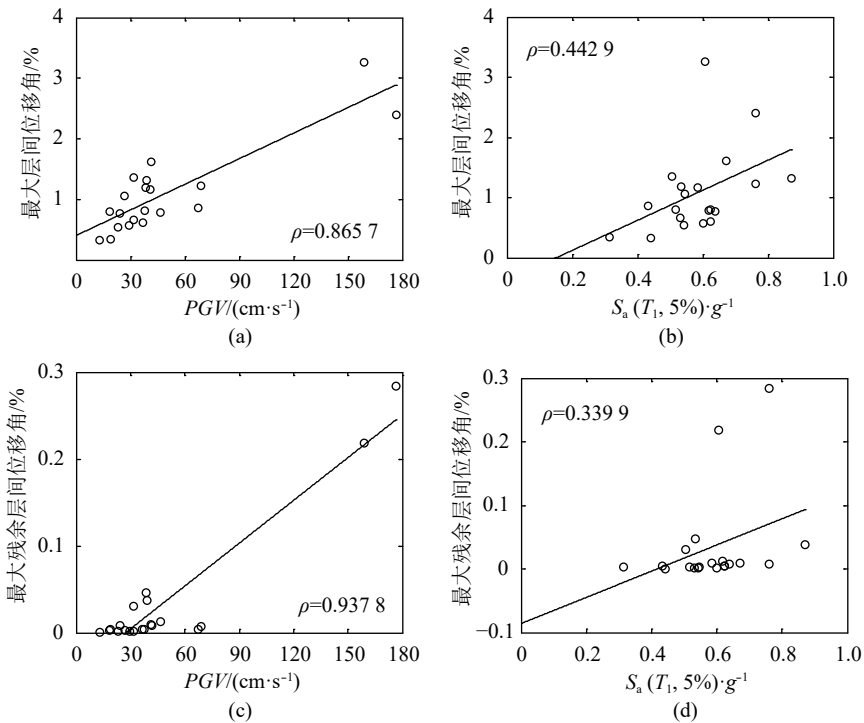


图 4 输入原始远场地震动,结构地震响应结果与 PGV 和 $S_a(T_1)$ 的相关性

Fig. 4 Correlation between seismic responses of the structure under original far-field ground motion and PGV , $S_a(T_1)$

输入谱匹配后的近场、远场地震动下结构最大层间位移角和最大残余层间位移角与PGV和 $S_a(T_1, 5\%)$ 的相关性如图5和6所示。图5和6结果表明, 输入谱匹配后的近场地震动和远场地震动, 结构最大层间位

移角和最大残余层间位移角与 $S_a(T_1, 5\%)$ 和PGV的相关性都较小, 这是由于进行谱匹配后, 单一强度指标对结构地震响应分析结果的影响趋于减小, 而其它强度指标对结构地震响应分析结果的影响则更

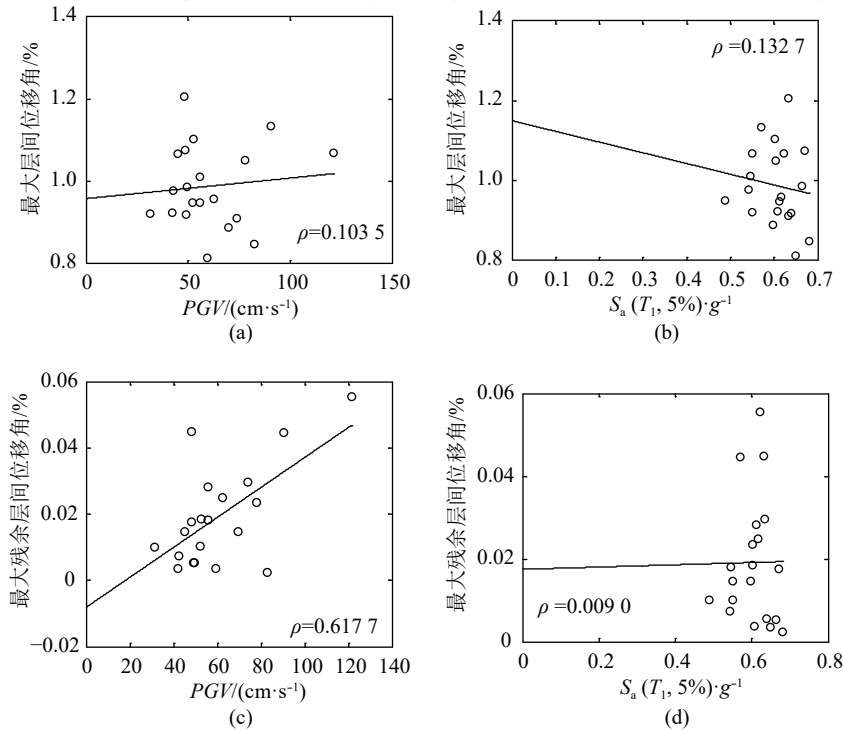


图5 输入谱匹配的近场地震动, 结构地震响应结果与PGV和 $S_a(T_1)$ 的相关性

Fig. 5 Correlation between seismic responses of the structure under spectrum-matched near-field ground motion and PGV, $S_a(T_1)$

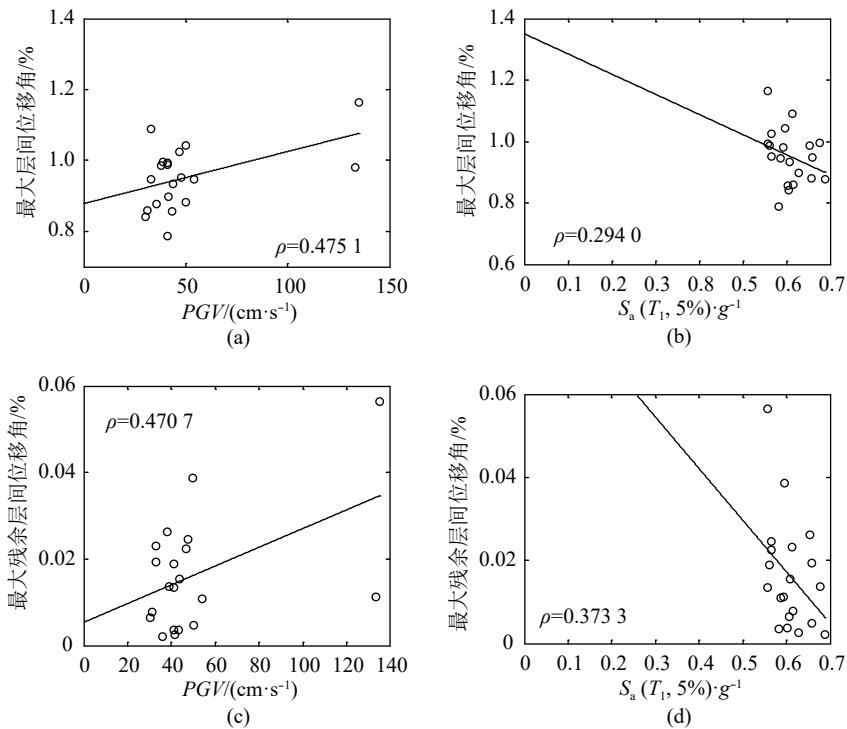


图6 输入谱匹配的远场地震动, 结构地震响应结果与PGV和 $S_a(T_1)$ 的相关性

Fig. 6 Correlation between seismic responses of the structure under spectrum-matched far-field ground motion and PGV, $S_a(T_1)$

加凸显,从而也使得图5(b)和图3(b)、图6(b)和图4(b)、图6(d)和图4(d)相比,拟合曲线表现出了不同的趋势。

4 IDA分析

以 $S_a(T_1, 5\%)$ 和 PGV 作为强度指标,调整选择的原始及匹配后的近场、远场地震动记录作为输入,对算例结构模型进行增量动力分析,提取每次分析得到的最大层间位移角和最大残余层间位移角,得到以最大层间位移角 θ_{\max} 为结构损伤指标(damage measure, DM)和分别以 $S_a(T_1, 5\%)$ 、 PGV 为地震动强度指标的IDA曲线。

基于IDA结果,分别计算4组地震动记录作用下的16%、50%、84%分位数的IDA曲线。限于篇幅,本文仅给出以 $\theta_{\max}-S_a(T_1, 5\%)$ 和 $\theta_{\max}-PGV$ 表示的50%分位数的IDA曲线,如图7所示。

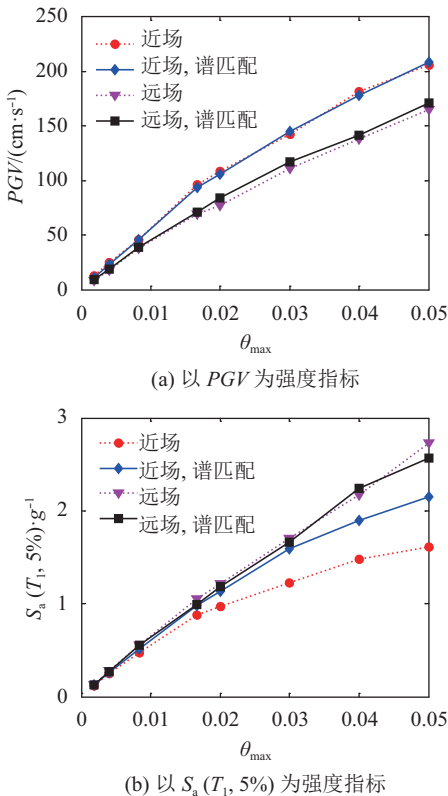


图 7 50%分位数IDA曲线

Fig. 7 IDA curves with 50% fractiles

图7结果表明:

1) 在 θ_{\max} 达到弹性限值1/550前,无论以 PGV 还是以 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为强度指标,4组地震动作用下的结构最大层间位移角基本一致。

2) 弹塑性阶段,以 PGV 作为强度指标,当 PGV 相同时,远场地震动引起的结构最大层间位移角较近场地震动引起的大;以 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为强度指标,当

$S_a(T_1, 5\%)$ 相同时,恰恰相反,近场地震动引起的结构最大层间位移角较远场地震动引起的大。

3) 对比近场和远场地震动记录谱匹配前后的50%分位数IDA曲线,以 $S_a(T_1, 5\%)$ 为强度指标,结构弹塑性变形较大时,近场地震动匹配前后引起的最大层间位移角有明显偏差外,其他情况都无明显偏差。

5 结构易损性分析

参考中国现行规范给出的4种损伤状态的最大层间位移角控制指标:基本完好(1/550,弹性限值)、轻微破坏(1/250)、中等破坏(1/120)和不严重破坏(1/60)^[14],以及结构倒塌状态最大层间位移角建议控制指标(1/20)^[15],利用IDA结果,采用正态分布模型进行参数估计,得到以最大层间位移角表示的五种损伤状态的易损性曲线。

表2给出了不同损伤状态50%超越概率相对应的 $S_a(T_1, 5\%)$ 和 PGV 及其统计特性。限于篇幅,图8仅给出中等破坏、不严重破坏和倒塌3种状态的易损性曲线。

表2和图8结果分析对比,表明:

1) 就近、远场地震动而言,以 PGV 为强度指标,引起相同损伤状态超越概率的近场地震动 PGV 明显高于远场地震动 PGV ;而以 $S_a(T_1, 5\%)$ 为强度指标,则恰恰相反,近场地震动的 $S_a(T_1, 5\%)$ 明显低于远场地震动的 $S_a(T_1, 5\%)$,这与前文基于50%分位数IDA曲线得出的结论是相同的,说明不同的地震动特征及采用的地震动强度指标对结构地震易损性分析结果有直接影响。

2) 随着结构损伤程度的增大,相应损伤状态50%超越概率对应的 PGV 离散性几乎都在逐渐减小,与此相反,50%超越概率对应的 $S_a(T_1, 5\%)$ 的离散性随着结构损伤程度的增大几乎都在增大。

3) 当结构处于弹性阶段或进入弹塑性程度较弱时,地震动未进行谱匹配,对应 PGV 的离散性要大于 $S_a(T_1, 5\%)$ 的离散性;而当结构损伤程度较大、结构进入弹塑性程度较强时,对应 PGV 的离散性要明显小于 $S_a(T_1, 5\%)$ 的离散性,这说明随着结构退化程度的增大,与 $S_a(T_1, 5\%)$ 相比, PGV 对结构非线性地震响应结果影响更加显著。

4) 地震动谱匹配前后相比,以 PGV 为强度指标,各损伤状态下50%超越概率对应的 PGV 的离散性无明显减小;而以 $S_a(T_1, 5\%)$ 为强度指标,匹配后各损伤状态下50%超越概率对应的 $S_a(T_1, 5\%)$ 的离散性明显小于未匹配时的离散性。

5) 无论近场还是远场地震动,地震动谱匹配前后,各损伤状态下50%超越概率对应的 $S_a(T_1, 5\%)$ 值

表2 不同类型地震动下五种损伤状态50%超越概率相应的 $S_a(T_1, 5\%)$ 和 PGV 统计特性

Tab. 2 Statistical values of $S_a(T_1, 5\%)$ and PGV corresponding to five different damage states with 50% exceedance probability under different types of ground motion

| 性能等级 | 统计参数 | $PGV/(cm \cdot s^{-1})$ | | | | $S_a(T_1, 5\%) \cdot g^{-1}$ | | | |
|-------|------|-------------------------|---------|---------|---------|------------------------------|---------|-------|---------|
| | | 近场 | 近场, 谱匹配 | 远场 | 远场, 谱匹配 | 近场 | 近场, 谱匹配 | 远场 | 远场, 谱匹配 |
| 基本完好 | 平均值 | 13.762 | 12.365 | 9.341 | 10.609 | 0.121 | 0.125 | 0.135 | 0.130 |
| | 离散系数 | 0.437 | 0.362 | 0.482 | 0.567 | 0.258 | 0.111 | 0.350 | 0.102 |
| | 偏差 | — | 0.898 | — | 1.136 | — | 1.033 | — | 0.963 |
| 轻微破坏 | 平均值 | 28.150 | 25.687 | 19.583 | 22.304 | 0.250 | 0.261 | 0.290 | 0.275 |
| | 离散系数 | 0.443 | 0.350 | 0.431 | 0.548 | 0.277 | 0.112 | 0.380 | 0.105 |
| | 偏差 | — | 0.913 | — | 1.139 | — | 1.044 | — | 0.948 |
| 中等破坏 | 平均值 | 53.023 | 51.488 | 39.416 | 43.632 | 0.479 | 0.521 | 0.594 | 0.544 |
| | 离散系数 | 0.376 | 0.356 | 0.409 | 0.530 | 0.262 | 0.132 | 0.439 | 0.113 |
| | 偏差 | — | 0.971 | — | 1.107 | — | 1.088 | — | 0.916 |
| 不严重破坏 | 平均值 | 95.827 | 95.546 | 71.876 | 80.215 | 0.888 | 0.973 | 1.108 | 1.002 |
| | 离散系数 | 0.315 | 0.331 | 0.371 | 0.526 | 0.337 | 0.126 | 0.453 | 0.135 |
| | 偏差 | — | 0.997 | — | 1.116 | — | 1.096 | — | 0.904 |
| 倒塌 | 平均值 | 207.714 | 213.755 | 178.016 | 193.002 | 2.029 | 2.216 | 3.000 | 2.535 |
| | 离散系数 | 0.219 | 0.280 | 0.240 | 0.371 | 0.421 | 0.177 | 0.555 | 0.204 |
| | 偏差 | — | 1.029 | — | 1.084 | — | 1.092 | — | 0.845 |

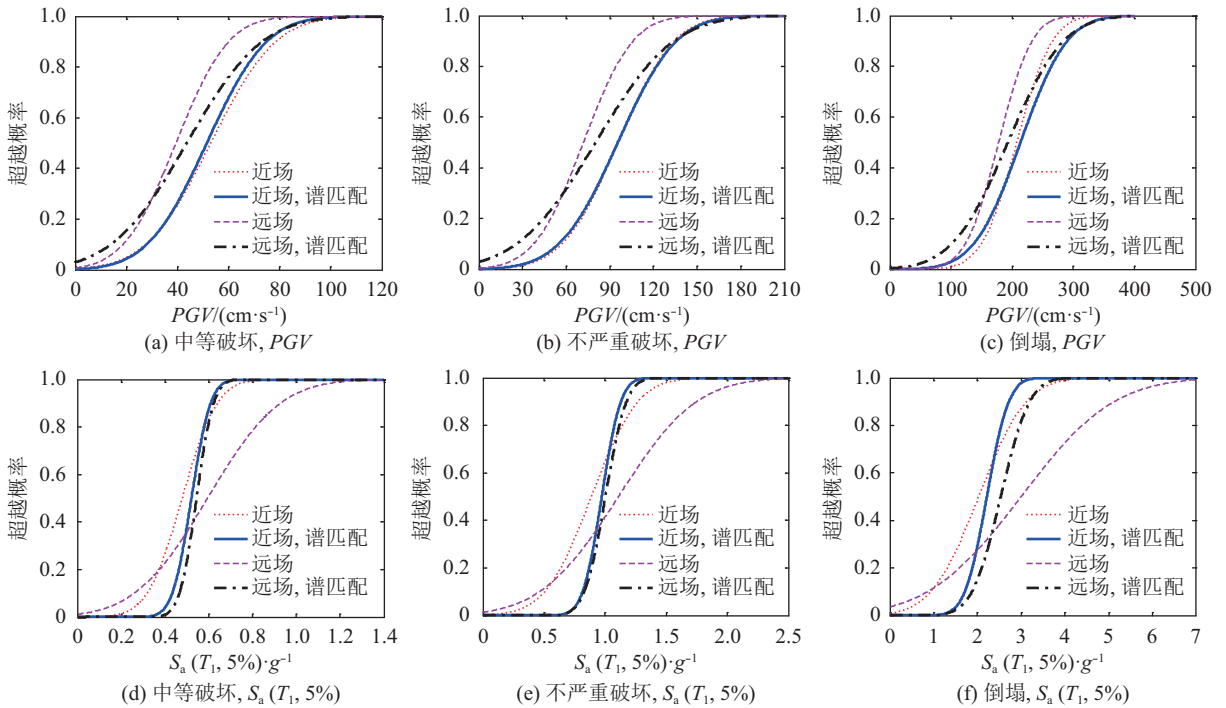


图8 基于最大层间位移角的不同损伤状态相应地震易损性曲线

Fig. 8 Seismic fragility curves of different damage states based on maximum inter-story drift ratios

和 PGV 无明显偏差, 说明当合理的选择地震动并进行谱匹配不会对结构的最大层间位移角造成较大偏差。

以5种损伤状态下结构的最大层间位移角为参

考控制指标, 通过IDA分析得到相应5种损伤状态, 不同地震动记录作用下结构的最大残余层间位移角, 并进行统计分析, 分析结果如表3所示。同样, 图9仅给出中等破坏、不严重破坏和倒塌3种状态下结构

表 3 不同地震动下相应5种损伤状态的最大残余层间位移角统计特性

Tab. 3 Statistical values of maximum residual inter-story drift ratios corresponding to five different damage states under different types of ground motion

| 性能等级 | 统计参数 | 近场 | 近场, 谱匹配 | 远场 | 远场, 谱匹配 |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|
| 基本完好 | 平均值 | 0.001 1 | 0.001 0 | 0.000 7 | 0.001 0 |
| | 离散系数 | 0.421 7 | 0.550 8 | 0.566 2 | 0.345 2 |
| | 偏差 | — | 0.909 1 | — | 1.428 6 |
| 轻微破坏 | 平均值 | 0.003 0 | 0.002 5 | 0.002 3 | 0.002 4 |
| | 离散系数 | 0.564 7 | 0.618 8 | 0.696 1 | 0.563 8 |
| | 偏差 | — | 0.833 3 | — | 1.043 5 |
| 中等破坏 | 平均值 | 0.013 0 | 0.011 0 | 0.008 5 | 0.008 9 |
| | 离散系数 | 0.660 1 | 0.674 2 | 0.688 4 | 0.633 4 |
| | 偏差 | — | 0.846 2 | — | 1.047 1 |
| 不严重破坏 | 平均值 | 0.086 5 | 0.102 5 | 0.081 2 | 0.087 9 |
| | 离散系数 | 0.583 3 | 0.509 0 | 0.637 2 | 0.654 5 |
| | 偏差 | — | 1.185 0 | — | 1.082 5 |
| 倒塌 | 平均值 | 1.073 8 | 1.135 6 | 1.145 1 | 1.187 0 |
| | 离散系数 | 0.421 5 | 0.331 7 | 0.340 5 | 0.408 0 |
| | 偏差 | — | 1.057 6 | — | 1.036 6 |

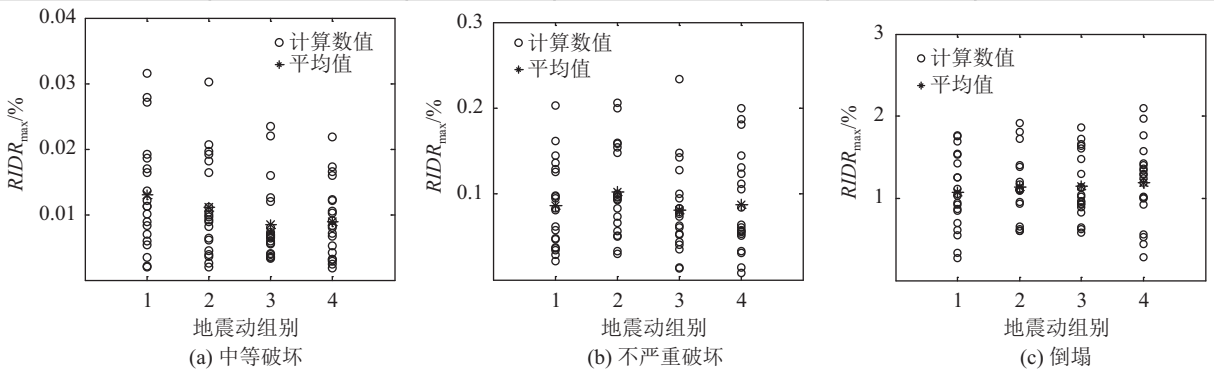


图 9 不同损伤状态相应的最大残余层间位移角的分布

Fig. 9 Maximum residual inter-story drift ratios corresponding to different damage states

的最大残余层间位移角分布,横轴中“1”代表原始近场地震动记录,“2”代表谱匹配后的近场地震动记录,“3”代表原始远场地震动记录,“4”代表谱匹配后远场地震动记录。

表3和图9结果分析对比,表明:

1)随着结构损伤程度的增大,最大残余层间位移角逐渐增大。当结构进入强非线性阶段后,最大残余层间位移角的离散性随结构损伤程度的增大而逐渐降低。

2)结构倒塌前,近场地震动作用下各损伤状态对应的最大残余层间位移角平均值较远场地震动作用下的平均值大;达到倒塌状态时,近场地震动作用下结构的最大残余层间位移角平均值小于远场地震动作用下的平均值。

3)无论是近场还是远场地震动,地震动反应谱匹配前后,结构各损伤状态对应的最大残余层间位移角无明显偏差,同时谱匹配后最大残余层间位移角的离散性无明显减小。

6 结 论

以实际近场、远场地震动记录及谱匹配后的地震动记录为输入,以PGV和 $S_a(T_1)$ 为强度指标,对一5层钢筋混凝土框架结构进行了单一地震动强度水准下的动力分析和多重地震动强度水平的增量动力分析,提取最大层间位移角和最大残余层间位移角作为工程需求参数,进而分析反映谱匹配效果的偏差指标和工程需求参数的离散性及其与地震动强度指标的相关性。最后,基于增量动力分析结果进行了

不同损伤状态下的易损性分析,得到以下结论:

1)实际近、远场地震动作用下,结构最大层间位移角和最大残余层间位移角与 PGV 的相关性明显优于与 $S_a(T_1)$ 的相关性;谱匹配后近、远场地震动作用下,结构最大层间位移角和最大残余层间位移角与 PGV 和 $S_a(T_1, 5\%)$ 的相关性都较小。

2)谱匹配后的近、远场地震动作用下,结构最大层间位移角和最大残余层间位移角分析结果的离散性明显降低且最大层间位移角无明显偏差。

3)选取不同的地震动强度指标,可能会得到不同的易损性分析结论。如以 PGV 为强度指标,相同 PGV 时远场地震动引起的结构最大层间位移角较近场地震动引起的大;而以 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为强度指标,相同 $S_a(T_1, 5\%)$ 时,则是近场地震动引起的结构最大层间位移角较远场地震动引起的大。

4)结构倒塌前,近场地震动作用下各损伤状态对应的最大残余层间位移角平均值较远场地震动作用下的平均值大;达到倒塌状态时,近场地震动作用下结构的最大残余层间位移角平均值小于远场地震动作用下的平均值。

参考文献:

- [1] Li Ning, Li Zhongxian, Li Yang. Seismic fragility surface analysis of reinforced concrete bridges subjected to near-fault ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(S1): 307–312. [李宁, 李忠献, 李杨. 近断层地震动作用下桥梁结构易损性曲面分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(S1): 307–312.]
- [2] He Yibin, Li Yan, Shen Pusheng. Performance-based seismic fragility analysis of tall hybrid structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 142–147. [何益斌, 李艳, 沈蒲生. 基于性能的高层混合结构地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 142–147.]
- [3] Rossetto T, Elnashai A. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(10): 1241–1263.
- [4] Schotanus M I J, Franchin P, Lupoi A P, et al. Seismic fragility analysis of 3D structures[J]. *Structural Safety*, 2004, 26(4): 421–441.
- [5] Karim K R, Yamazaki F. Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation[J]. *Earthquake engineering and Structural Dynamics*, 2001, 30(12): 1836–1856.

- [6] Lü Dagang, Jin Guoqing, Yu Xiaohui. Modified seismic fragility analysis of reinforced concrete frame structures in consideration of collapse probability[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(9): 26–62. [吕大刚, 金国庆, 于晓辉. 考虑倒塌概率修正的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(9): 26–62.]
- [7] Deierlein G G, Liel A B, Haselton C B, et al. ATC-63 methodology for evaluating seismic collapse safety of archetype buildings [C]// *Structures 2008: Crossing Borders*. Vancouver, BC, Canada: ASCE, 2008. DOI: 10.1061/41016(314)48
- [8] Katsanos E I, Sextos A G, Manolis G D. Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 30(4): 157–169.
- [9] Han Jianping, Chen Jiqiang, Yan Qing, et al. State of the art of ground motion intensity measures accounting for the influence of spectral shape[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(10): 9–17. [韩建平, 陈继强, 闫青, 等. 考虑谱形影响的地震动强度指标研究进展[J]. *工程力学*, 2015, 32(10): 9–17.]
- [10] Luco N. Probabilistic seismic demand analysis, SMRF connection fractures, and near-source effects [D]. Stanford: Stanford University, 2001.
- [11] Baker J W, Cornell C A. A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, 34(10): 1193–1217.
- [12] Seifried A E. Response spectrum compatibilization and its impact on structural response assessment [D]. Stanford: Stanford University, 2013.
- [13] Tothong P, Cornell C A. Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 37(7): 1013–1037.
- [14] GB50011-2010建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] Han Jianping, Huang Linjie, Sun Xiaoyun. Global collapse resistance capacity investigation of infilled RC frame considering in-plane and out-of-plane interaction of infill walls[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(9): 146–154. [韩建平, 黄林杰, 孙小云. 考虑填充墙平面内外相互作用评估RC框架-填充墙结构抗整体性倒塌能力[J]. *工程力学*, 2016, 33(9): 146–154.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Han Jianping, Wei Shilong, Zhang Xin. Seismic fragility analysis of RC frames under near-field and far-field ground motion based on spectral matching[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(3): 149–157. [韩建平, 魏世龙, 张鑫. 基于谱匹配的近远场地震动作用下RC框架结构易损性分析[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(3): 149–157.]