

张亮泉,客金保. 2022. 长周期地震动参数与隔震结构响应参数的相关性研究[J]. 地震研究, 45(1): 17–25, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0003.

Zhang L Q, Ke J B. 2022. Research on the correlation between ground motion intensity indexes and maximum response of the isolation system[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(1): 17–25, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0003.

长周期地震动参数与隔震结构响应参数的相关性研究*

张亮泉, 客金保

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 从 Chi-Chi 地震动数据中选取 20 条近场长周期地震记录和 20 条远场长周期地震记录, 再从汶川地震渭河地震动数据中选取 20 条远场长周期地震记录作为输入, 研究各个地震动记录相对应的地震动强度参数及其之间的相关性, 筛选出了适合于长周期地震动的地震动强度指标, 采用 Pearson 相关系数对筛选出的地震动强度指标与隔震体系的隔震层位移响应之间的相关性进行分析。结果表明: ①在近、远场长周期地震动作用下, 中长周期隔震结构的隔震层位移响应与频谱特征参数的相关性比较好, 在进行中长周期隔震结构的抗震性能研究时, PGD 、 Sd_{avg} 及 DSI 与隔震结构的相关性较好, 地震动强度指标在集集近场建议选取 PGD 和 Sd_{avg} , 集集远场建议选取 DSI 和 D/V , 渭河远场建议选取 Sd_{avg} 和 DSI ; ②在强相关范围内考虑相关性的高低, 近场和远场的长周期地震动强度指标建议分别选取 PGD 和 DSI 。

关键词: 隔震结构; 近场; 远场; 长周期地震动; 地震动强度指标

中图分类号: P315.923

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2022)01-0017-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0003

0 引言

伴随地震产生的地面震动对建筑结构的作用是以惯性力形式施加的。与静力荷载不一样的是, 地震会产生地面运动, 作用在结构上会产生大小及方向上的变化。地震所引起地震动会受到震源的远近、传播路径、场地条件等影响, 因此同一地震在不同的地点地震动一般不同, 地震动具有复杂性和不规则性。即使是峰值加速度相同的地震动, 也会对结构产生不同的作用效果。如何更准确地描述地震动, 一直是地震工程学中的难题。科研人员经过不断地研究分析, 提出用不同的参数来描述地震动的特性, 并先后总结出 40 多种地震动参数, 针对不同情况来更准确地描述地震动, 但每个地震动参数只能描述地震动的一个或者部分特征。通常地震动参数可分为 3 大类: 振幅特征、频谱特征及位移特征。陈波 (2013) 将 44 条

地震动按上述参数进行了分类, 并将其输入不同周期的弹塑性单自由度结构模型进行分析。通过体系的最大位移作为结构的地震响应, 计算不同参数之间的相关性, 总结出不同参数对中长周期结构的相关性。李宗超等 (2019) 分析研究了台湾花莲地震的地震工程参数的分布特征, 主要包括 PGA 、 PGV 、 PGD 、Arias 烈度、卓越周期等。

地震动强度指标是结构抗震设计与分析的重要参数, 选取合理的地震动强度指标对结构抗震性能的准确评估具有重要的作用。钟菊芳和陈功 (2020) 基于 KiK-net 台网强震记录, 探讨了震级、震中距、场地类别及测点高差等对沿深度方向相干函数的影响规律。结果表明: 水平分量的相干函数值随频率变化规律相同, 竖向与水平分量间的差异较大; 相干函数值随频率和测点高差的增加而减小; III 类场地较之 I、II 类场地, 所记录的相干函数值随频率增加而衰减的速度更快。韩建平等 (2011, 2010) 基于汶川地震记录, 采

* 收稿日期: 2021-04-29.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572014CB23) 和国家自然科学基金项目 (51678543) 联合资助.

第一作者简介: 张亮泉 (1974-), 副教授, 博士, 主要从事工程结构抗震、大跨空间结构、结构健康监测等研究.

E-mail: zhangliangquan2006@163.com.

用时程分析法研究了不同周期双线性 SDOF 体系对应不同延性系数的加速度、速度及位移响应,研究了不同地震动强度指标与这些响应最大值的相关性,结果表明速度谱强度和 Housner 强度与所研究 SDOF 体系的相关性较好。叶列平等 (2009) 基于弹塑性 SDOF 和 MD-OF 系统的代表性地震响应指标,分析了不同地震动强度指标与不同结构地震响应指标之间的相关性,指出以 PGV 为代表的第二类指标与中周期结构的相关性较好,以 PGD 为代表的第三类指标与长周期结构的相关性较好。李雪红等 (2014) 采用周期为 $0.5 \sim 6$ s 的弹性 SDOF 体系,研究了不同地震动强度指标与体系响应之间的相关性,结果表明,以 $S_a(T_1)$ 为代表的一类强度指标与不同周期结构的相关性都比较好,以 PGV 为代表的指标稳定性较好。刘亭亭等 (2020) 为解决某些地震动强度参数对某些结构有效性较好,而对其他结构有效性较差的问题,基于偏最小二乘回归提出一种地震动复合强度参数的构造方法。胡进军等 (2020) 基于 NGA 数据库中 5 266 条水平分量地震动记录,研究发现场地条件和断层距对绝大部分地震动参数相关性会产生明显影响,但一些参数的相关性几乎不受场地条件和断层距的影响。

综上可知,地震动强度指标与结构地震响应的相关性研究主要包括地震记录的选取、结构分析模型的建立以及相关性分析 3 部分,但现有研究主要针对普通地震记录和近断层地震记录的强度指标与结构地震响应的相关性,而关于远场长周期地震记录的研究则相对较少。因此,本文选取了 40 条远场和 20 条近场长周期地震记录作为输入,以隔震等效双自由度体系为研究对象,研究了 13 个对中长周期结构影响较大的地震动强度指标与周期 T 为 $1.5 \sim 5$ s 的隔震结构最大位移响应之间的相关性,进行了各地震动强度指标的敏感性分析,为选取适合于中长周期隔震结构的长周期抗震性能分析的地震动强度指标提供参考。

1 近、远场地震记录与地震动强度指标选取

根据常见原则,并结合陈波 (2013)、张亮泉和于建杰 (2019) 的研究,近场地震记录选取原则如下:①地震震级 $M > 6.5$ 。②一类场地,震中距小于 75 km, $T_{0.9} < 0.3$; 二类场地,震中距小于

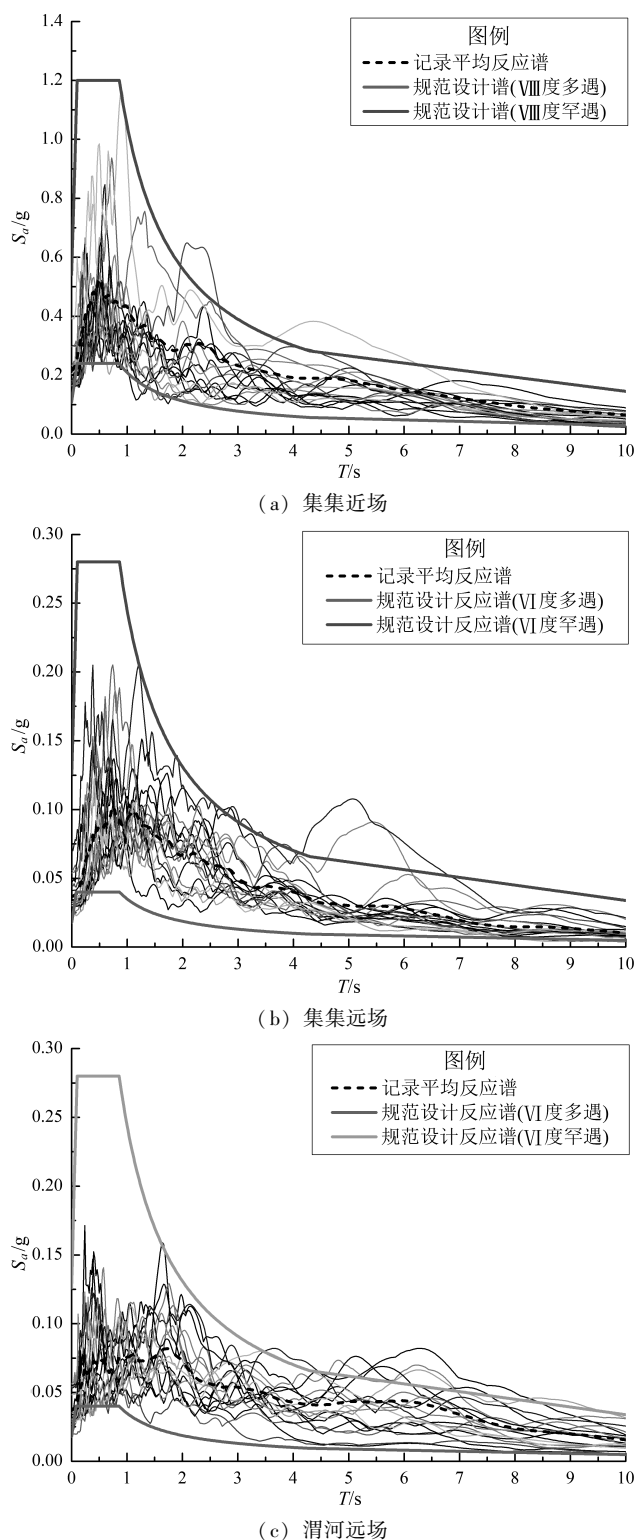


图 1 本文研究选取的长周期地震记录加速度反应谱
Fig. 1 Acceleration response spectra of long-period seismic records selected in this study

100 km, $T_{0.9} < 0.35$; 三类场地,震中距小于 50 km, $T_{0.9} < 0.4$ 。③ $PGA > 0.15$ g, $PGV > 15$ cm/s, 以排除不太可能对结构安全性造成影响的地震

动记录。远场地震记录选取原则如下：①地震震级 $M > 6.5$ 。②一类场地，震中距大于 75 km， $T_{0.9} > 0.3$ ；二类场地，震中距大于 100 km， $T_{0.9} > 0.35$ ；三类场地，震中距大于 50 km， $T_{0.9} > 0.4$ 。

根据以上原则，从 Lee 等（2001）研究的 Chi-Chi 地震动数据中选取近场和远场长周期地震动记录各 20 条，其中近场长周期地震动的 PGA 取值为 $0.110 \sim 0.510$ g，处于《建筑抗震设计规范》（2016 版）（GB 50011—2010）规定的 8 度多遇地

震与罕遇地震的时程分析所用地震加速度时程的最大取值范围之内。远场长周期地震动记录的 PGA 较小，取值基本在 $0.020 \sim 0.070$ g，处于《建筑抗震设计规范》（2016 版）（GB 50011—2010）规定的 6 度多遇地震与罕遇地震的时程分析所用地震加速度时程的最大取值范围之内。另外，从汶川地震渭河盆地地震动记录中选取 20 条远场长周期地震动记录，其基本信息见表 1，加速度反应谱如图 1 所示。

表 1 本文研究选用的长周期地震动基本信息

Tab. 1 Basic information of long-period ground motions selected in this study

| 编号 | 集集近场 | | | | 集集远场 | | | | 渭河远场 | | | |
|----|------------------|------|-------------|------------------------------------|------------------|------|--------------|------------------------------------|------------------|-------------|---------------|------------------------------------|
| | 台站-方向 | 场地类别 | 震中距/km | PGA/g $PGV/(cm \cdot s^{-1})$ | 台站-方向 | 场地类别 | 震中距/km | PGA/g $PGV/(cm \cdot s^{-1})$ | 台站-方向 | $T_{0.9}$ | 震中距/km | PGA/g $PGV/(cm \cdot s^{-1})$ |
| 1 | TCU052-EW | 一类场地 | 37.9 | 0.339 156.083 | KAU018-EW | 一类场地 | 112.4 | 0.035 6.699 | 061CAT-EW | 0.44 | 642.89 | 0.054 17.767 |
| 2 | TCU102-EW | 一类场地 | 43.8 | 0.297 87.303 | KAU087-NS | 二类场地 | 146.9 | 0.031 10.913 | 061DAL-EW | 0.44 | 744.45 | 0.031 11.786 |
| 3 | TCU048-NS | 一类场地 | 41.4 | 0.161 46.262 | KAU007-NS | 二类场地 | 141.8 | 0.024 9.075 | 061FEX-NS | 0.46 | 539.02 | 0.023 7.890 |
| 4 | TCU039-EW | 一类场地 | 70 | 0.197 54.134 | KAU017-EW | 二类场地 | 155.5 | 0.023 8.789 | 061GAL-EW | 0.50 | 661.70 | 0.054 17.244 |
| 5 | TCU128-NS | 一类场地 | 61.7 | 0.165 61.098 | KAU055-NS | 二类场地 | 150.1 | 0.029 8.604 | 061HAC-NS | 0.61 | 826.53 | 0.020 6.843 |
| 6 | TCU049-NS | 二类场地 | 37 | 0.215 59.012 | KAU010-EW | 三类场地 | 130.2 | 0.033 10.978 | 061XYT-EW | 0.32 | 620.88 | 0.038 16.358 |
| 7 | TCU068-EW | 二类场地 | 46.3 | 0.444 152.193 | KAU011-EW | 三类场地 | 133.8 | 0.056 11.598 | 061HUX-EW | 0.58 | 711.14 | 0.030 9.178 |
| 8 | TCU059-EW | 二类场地 | 51.2 | 0.159 52.557 | KAU089-NS | 三类场地 | 158.1 | 0.030 11.933 | 061HUY-EW | 0.49 | 741.86 | 0.032 7.939 |
| 9 | CHY025-NS | 二类场地 | 30.5 | 0.155 31.628 | KAU088-NS | 三类场地 | 143.5 | 0.029 7.987 | 061JIY-NS | 0.41 | 643.03 | 0.055 11.91 |
| 10 | TCU107-NS | 二类场地 | 35.4 | 0.160 47.280 | KAU086-EW | 三类场地 | 128.8 | 0.041 10.140 | 061LAT-EW | 0.44 | 656.59 | 0.030 13.273 |
| 11 | TCU120-NS | 二类场地 | 23.2 | 0.180 36.264 | CHY059-EW | 三类场地 | 103.3 | 0.047 13.710 | 061LIT-EW | 0.55 | 659.97 | 0.056 11.396 |
| 12 | TCU063-EW | 二类场地 | 33.2 | 0.182 44.174 | KAU044-EW | 三类场地 | 160.2 | 0.033 9.567 | 061LIT-NS | 0.61 | 659.97 | 0.034 9.262 |
| 13 | TCU051-NS | 二类场地 | 36.5 | 0.233 41.826 | KAU032-NS | 三类场地 | 149.8 | 0.031 7.659 | 061LID-NS | 0.43 | 694.72 | 0.035 13.726 |
| 14 | TCU029-NS | 二类场地 | 77.5 | 0.171 52.746 | CHY071-NS | 三类场地 | 109.4 | 0.054 18.466 | 061TAY-EW | 0.44 | 547.28 | 0.029 5.989 |
| 15 | TCU040-EW | 二类场地 | 67.1 | 0.162 55.507 | KAU015-NS | 三类场地 | 141.7 | 0.031 10.471 | 061WEN-EW | 0.53 | 692.16 | 0.035 25.798 |
| 16 | TCU070-NS | 二类场地 | 45.6 | 0.161 60.781 | CHY090-NS | 三类场地 | 88.6 | 0.070 23.763 | 061WEN-NS | 0.59 | 692.16 | 0.030 19.816 |
| 17 | TCU082-EW | 二类场地 | 34.2 | 0.205 56.171 | KAU075-EW | 三类场地 | 154.8 | 0.030 8.522 | 061XIA-EW | 0.49 | 631.15 | 0.053 16.851 |
| 18 | TCU106-EW | 二类场地 | 35.3 | 0.158 41.207 | KAU062-NS | 三类场地 | 146.7 | 0.032 8.022 | 061XIY-NS | 0.87 | 633.30 | 0.048 19.372 |
| 19 | TCU110-EW | 三类场地 | 26 | 0.180 56.969 | KAU045-EW | 三类场地 | 151.7 | 0.033 9.790 | 061YAL-EW | 0.66 | 680.40 | 0.027 9.613 |
| 20 | CHY101-NS | 三类场地 | 30.9 | 0.391 103.938 | CHY078-NS | 三类场地 | 108 | 0.044 12.897 | 061YAL-NS | 0.67 | 680.40 | 0.029 11.940 |

注：表中黑色加粗为 PGA 、 PGV 较大的 15 条地震动记录数据。

理想的地震动强度指标应能综合反映地震动幅值、持时、频谱对工程结构的影响，本文从幅值特征、频谱特征和组合参数 3 个方面描述地震动参数，其表达式见表 2。本文以表 2 中地震动参数为研究对象，对比分析所选取的地震动参数的相关性，给出适合于长周期地震动参数。

2 地震动参数之间相关性分析

本文通过 Pearson 相关性系数来比较 2 个变量间的相关性。相关系数一般用 ρ 表示， $|\rho|$ 越接近于 1 说明 2 个参数的相关性越高； $|\rho|$ 越接近于 0

表 2 地震动强度指标

Tab. 2 Earthquake motion intensity index

| 类型 | 指标 | 表达式 |
|--------|----------------------|---|
| 幅值特征参数 | PGD(峰值位移) | $PGD = \max u_g(t) $ |
| | DSI(地震动谱强度) | $DSI = \int_{2.5}^{4.0} Sd(T, \zeta = 0.05) dt$ |
| 频谱特征参数 | EPD(有效地震动峰值) | $EPD = \frac{Sd_{avg}(T_i, \zeta) \Big _{T=40}}{2.5} \Big _{T=2.5}$ |
| | Sd_{avg} (反应谱均值) | $Sd_{avg} = \frac{1}{M} \sum_{T_i}^{T_N} Sd(T_i, \zeta)$ |
| | Sd_{max} (反应谱峰值) | $Sd_{max} = \max[Sd(T_i, \zeta)]$ |
| | V/A(峰值速度/峰值加速度) | PGV/PGA |
| | D/V(峰值位移/峰值速度) | PGD/PGV |
| 组合参数 | CAV(累积绝对速度) | $CAV = \int_0^{t_f} \ddot{u}_g(t) dt$ |
| | A_{rms} (谱强度开根号处理) | $A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_D} \int_{t_5}^{t_{95}} \ddot{u}_g^2(t) dt}$ |
| | Ars (Arias 强度) | $Ars = \sqrt{\int_0^{t_f} \ddot{u}_g^2(t) dt}$ |
| | a_{RMS} (均方根强度指标) | $a_{RMS} = \frac{1}{t_f} \sqrt{\int_0^{t_f} \ddot{u}_g^2(t) dt}$ |
| | I_d (Riddell 指标) | $I_d = PGD \cdot t_D^{1/3}$ |
| | Pa (Housner 谱强度) | $Pa = \frac{1}{t_D} \int_{t_5}^{t_{95}} \ddot{u}_g^2(t) dt$ |

注：其中 $\ddot{u}_g(t)$ 、 $\dot{u}_g(t)$ 和 $u_g(t)$ 分别为地震动的加速度、速度和位移时程； t_D 为 90% 能量持时， t_f 为强震动总持时。

说明 2 个参数的相关性越低。当 $|\rho|$ 为 0.8 ~ 1.0 时，判定为极强相关；当 $|\rho|$ 为 0.6 ~ 0.8 时，判定为强相关；当 $|\rho|$ 为 0 ~ 0.6 时，判定为弱相关。计算公式如下：

$$\rho_{xy} = \frac{Cov[x, y]}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

将所选的近、远场长周期地震动记录根据表 2 给出的参数公式，利用 MATLAB 软件，逐一计算每条地震动的参数值，然后根据式 (1) 分别对所选用的远场地震动记录进行分析，得到 13 个地震动参数之间的相关性系数，如图 2 所示。

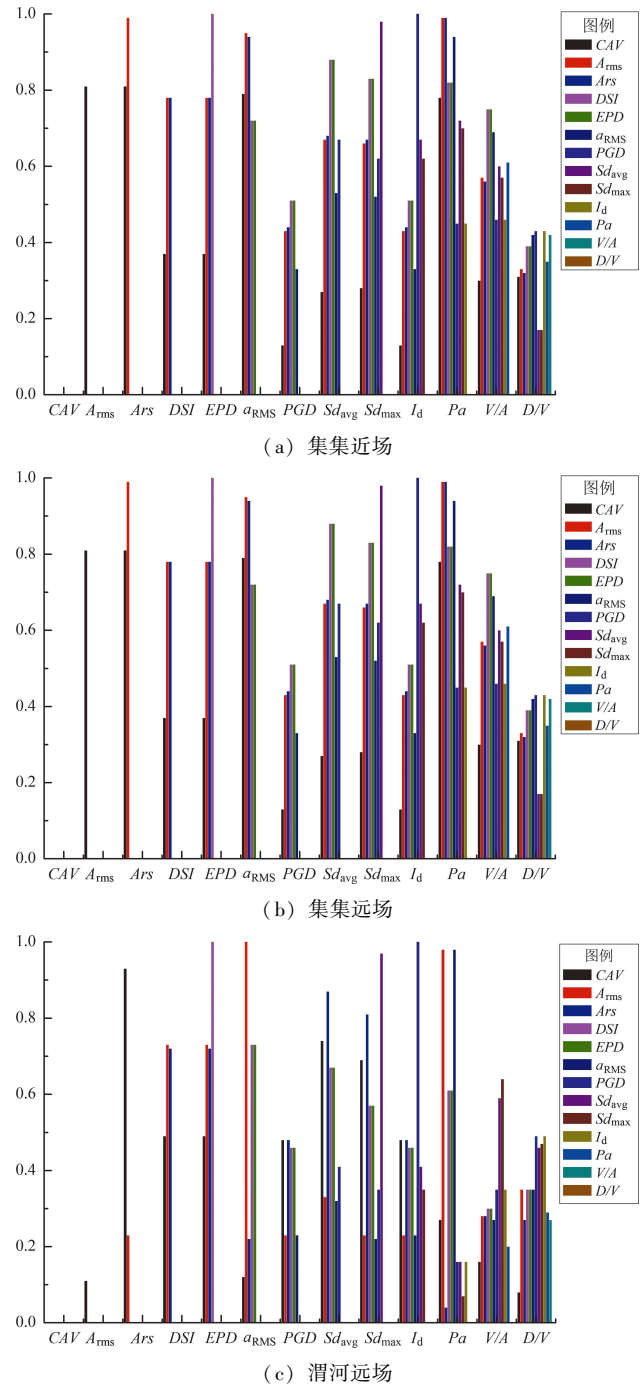


图 2 长周期地震动参数相关性分析

Fig. 2 Correlation coefficients of long-period seismic records

由图 2a 可知： A_{rms} 与 Ars 、 a_{RMS} 、 Pa ， Ars 与 a_{RMS} 、 Pa ， a_{RMS} 与 Pa ， Sd_{avg} 与 Sd_{max} ， CAV 与 A_{rms} 、 Ars ， DSI 与 Sd_{avg} 、 Sd_{max} 、 Pa ， EPD 与 Sd_{avg} 、 Sd_{max} ，对应参数之间的相关性系数都大于 0.8，属于极强相关。由图 2b 可知： CAV 与 A_{rms} 、 Ars 、 DSI 、 EPD 、 a_{RMS} 、 Sd_{avg} 、 Sd_{max} 、 Pa ， A_{rms} 与 Ars 、 DSI 、

EPD 、 a_{RMS} 、 Sd_{avg} 、 Sd_{max} 、 Pa 、 Ars 与 DSI 、 EPD 、 a_{RMS} 、 Sd_{avg} 、 Sd_{max} 、 Pa 、 DSI 与 Sd_{avg} 、 Pa 、 EPD 与 Sd_{avg} 、 Pa 、 a_{RMS} 与 Sd_{avg} 、 Pa 、 Sd_{avg} 与 Sd_{max} 、 Pa 、 Sd_{max} 与 Pa ，对应参数之间的相关系数都大于 0.8，属于极强相关。由图 2c 可知： CAV 与 Ars 、 A_{rms} 与 Pa 、 Ars 与 Sd_{avg} 、 Sd_{max} 、 a_{RMS} 与 Pa 、 Sd_{avg} 与 Sd_{max} ，对应参数之间的相关系数都大于 0.8，属于极强相关。

3 地震动参数与结构之间相关性分析

3.1 隔震结构等效双自由度体系模型建立

对于一个复杂结构可以通过单自由度体系进行简化，可以把结构整体简化成一个质量源和一个无质量杆的结构体系。通过对质量源施加外力作用，使得体系在平面内做简谐运动。常见的隔震结构都是基础隔震结构，地震中其上部结构的层间水平位移很小，结构体系的水平位移集中于基底隔震装置处，可以认为在地震作用下上部结构只作水平整体平动。如果忽略上部结构的摆动式扭转作用，则结构可简化为一个单质点隔震结构动力分析模型，并且隔震装置的刚度和阻尼也近似代表隔震结构体系的刚度和阻尼。对于规则的基础隔震结构房屋，我们可以把结构简单等效成两个自由度分析（王焕定等，2006），即隔震层以上结构看作一个质量源 M_1 ，隔震层为一个质量源 M_2 ，如图 3 所示。

铅芯橡胶支座是在天然橡胶支座的中心加入铅芯组成的，橡胶支座加入铅芯后剪切变形同步，这种组合后的支座是由橡胶支座恢复装置和铅芯耗能装置所组成的一体型的隔震装置。由于铅芯橡胶支座的水平力和水平变形的关系成滞回环，所以需要非线性恢复力特性进行模型化，最后根据最大位移反应调整屈服力和刚度进行修正双线性模型，如图 4 所示，图中 K_d 为屈服后刚度、 K_e 为等效刚度、 K_u 为卸载刚度、 Q_d 为屈服力。

本文把隔震结构的周期设定在 1.5 ~ 5.0 s，每隔 0.1 s 取一个周期，共 36 个周期；隔震层阻尼矩阵引用分区瑞利阻尼矩阵，等效阻尼比为 0.2，隔震结构阻尼比取隔震层的等效阻尼比，然后根据自振周期调整质点质量，通过改变双自由度体

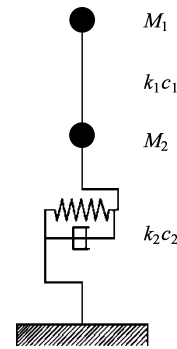


图 3 隔震结构等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the seismic isolation structure

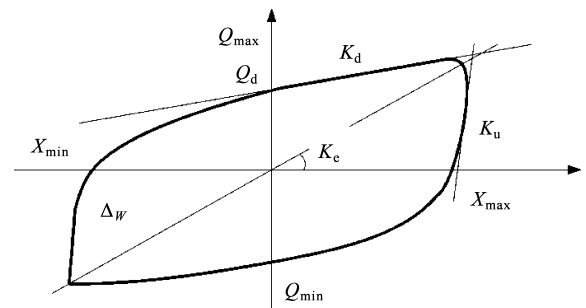


图 4 修正双线性模型

Fig. 4 Modified bilinear model

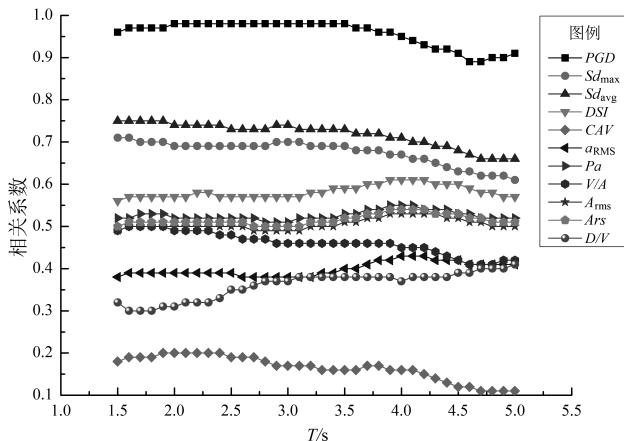
系的周期，逐个计算 1.5 ~ 5.0 s 的质量源，共 36 个双自由度体系。

3.2 不同结构周期下地震动参数与结构响应参数相关性分析

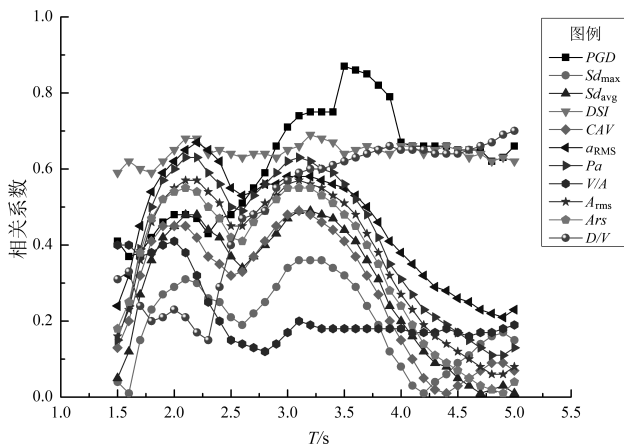
通过对地震动参数之间相关性进行分析，总结出参数之间相关性较高的参数，然后将相关性高的参数选择其一进行参数与结构响应相关性分析，以节省计算时间。本文使用 OpenSees 有限元分析软件，根据图 5 建立分析模型。将筛选的长周期水平向地震动（共 60 条）作为输入，调整双自由度模型的周期从 1.5 ~ 5.0 s 变化，变化步长为 0.1 s，共得到 36 个简化模型。利用公式 (1)，以隔震层最大位移作为结构响应指标，计算地震动参数随结构周期变化与结构的相关性。

图 5 为对中长周期结构影响较为重要的参数与体系响应之间的相关系数随周期的变化趋势。从 5a 可以看出， PGD 随周期变化比较平稳，且相关系数大于 0.8，表现为极强相关性， Sd_{avg} 与 Sd_{max} 随周期变化比较平稳，且相关系数为 0.6 ~ 0.8，表

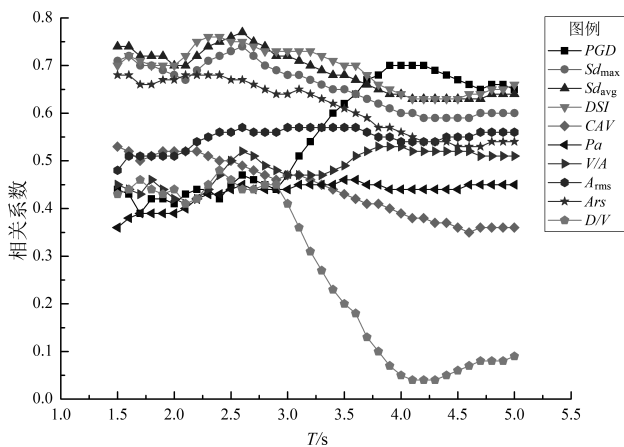
现为强相关性;从图 5b 可以看出, DSI 相关系数为 0.6~0.8, 表现为强相关性, PGD 与 D/V 在 $T > 3$ s 时表现为强相关, 但 PGD 随周期变化不稳定, D/V 随周期变化较稳定;从图 5c 可以看出,



(a) 集集近场



(b) 集集远场



(c) 渭河远场

图 5 不同地震动强度指标的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of different seismic intensity indexes

Sd_{avg} 、 Sd_{max} 、 DSI 随周期变化相对平稳, 且相关系数为 0.6~0.8, 表现为强相关, PGD 与 A_{rs} 各有半段曲线表现为强相关性, 分界点在 $T = 3.5$ s 处, 但这 2 个指标随周期变化不稳定。综合以上分析, 由于 Sd_{avg} 与 Sd_{max} 之间为极强相关且 Sd_{avg} 与结构相关性更高一些, 地震动强度指标在集集近场建议选取 PGD 和 Sd_{avg} , 集集远场建议选取 DSI 和 D/V , 渭河远场建议选取 Sd_{avg} 和 DSI 。

4 不同强度地震动水平作用下结构反应的不确定分析

地震动数据具有复杂性和不确定性, 即使用含有相同地震动峰值加速度的 2 条地震动输入结构, 进行结构动力响应分析, 产生的结果也天差地别。从集集近场、集集远场和渭河远场长周期地震动记录中各选取 PGA 、 PGV 较大的共 15 条地震动记录, 基本信息在表 1 中以加粗所示, 加速度反应谱如图 1 所示。

结构地震反应离散性是衡量地震动参数与结构反应密切程度的指标之一。如果一个地震动参数是有效的, 那么以它来调幅的地震动强度水平作用于结构上, 对结构的地震反应应该具有较小的离散性。采用地震动对应的参数值的均值 μ 和均值 μ 加减 2 倍的标准差 σ 作为 3 个强度调整系数, 对地震动进行调整, 即 $\mu + 2\sigma$ 、 μ 、 $\mu - 2\sigma$, 见表 3。

表 3 地震动参数对应的地震动强度值

Tab. 3 Ground motion intensity corresponding to ground motion parameters

| 地震动强度 | 集集近场 | | 集集远场 | | 渭河远场 | |
|-----------------|-------|------------|-------|-----------|-------|------------|
| | 选取指标 | | 选取指标 | | 选取指标 | |
| | PGD | Sd_{avg} | DSI | $(D/V)/s$ | DSI | Sd_{avg} |
| $\mu + 2\sigma$ | 1.57 | 2.02 | 2.93 | 4.62 | 2.99 | 5.68 |
| μ | 0.9 | 1.19 | 1.85 | 2.24 | 2.02 | 3.28 |
| $\mu - 2\sigma$ | 0.23 | 0.36 | 0.78 | 0.14 | 1.06 | 0.87 |

选择结构自振周期 T 为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 s 共 8 个周期的简化结构模型。根据 3 个强度系数, 将长周期地震动记录调整成 3 个强度水平, 依次输入到 8 个双自由度体系结构中计算隔震层的最大位移, 对其作用在结构上

产生的最大位移进行离散性分析。由于有限元分析出的数值较大，取位移值的对数值作为结构响应参数进行线性回归，来分析3种强度下的结构反应的离散性（图6）。从图6可以看出，经过参数

调整3个强度的地震动作用在结构上产生位移的对数值，随结构周期的增加的变化趋势平稳，结构响应的趋势线的离散性较小，说明选择的参数是有效的。

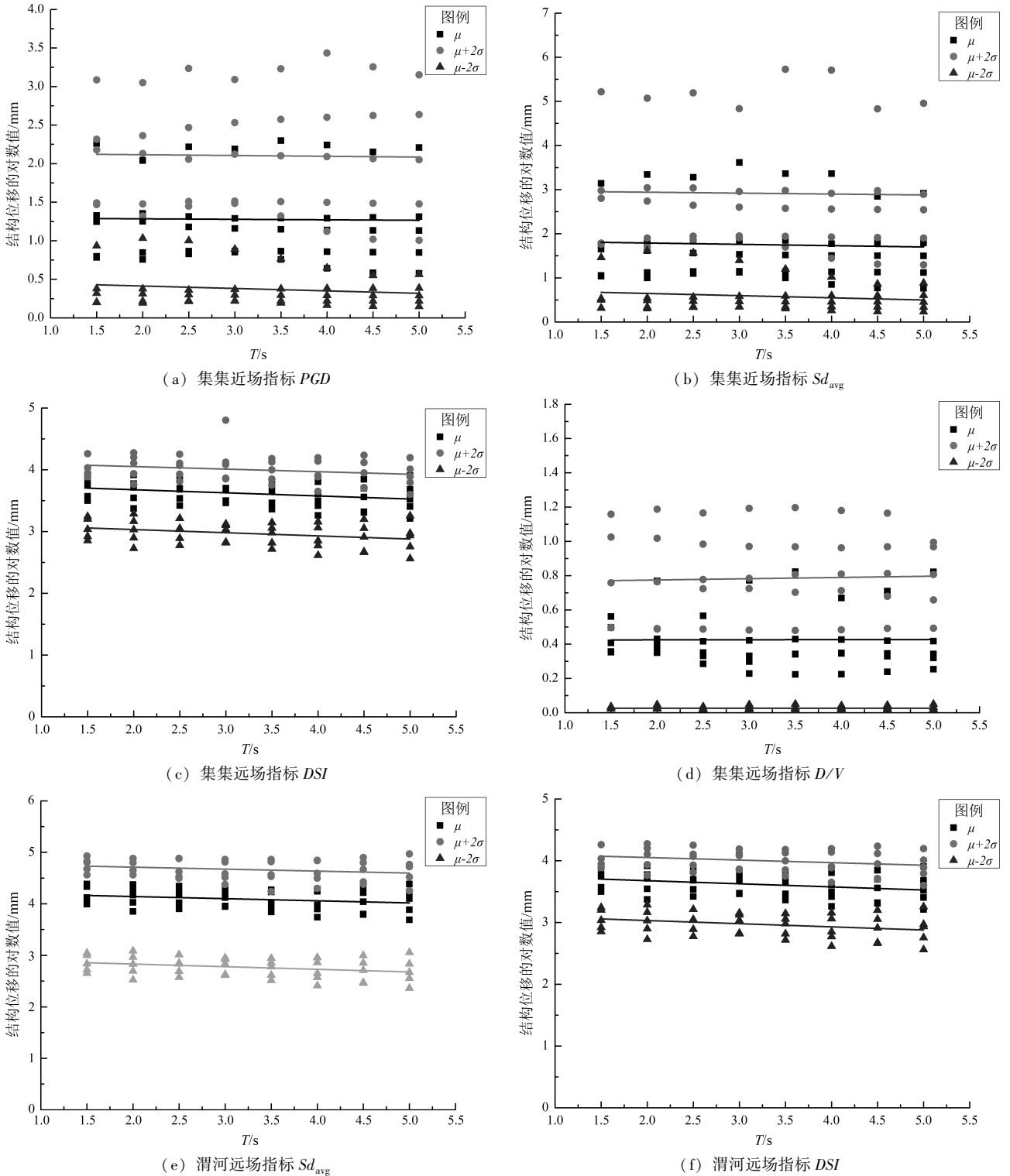


图6 3种强度下结构位移的离散性

Fig. 6 Dispersion of structural displacements subjected to three kinds of ground motions

5 结论

本文以集集近场、远场和渭河远场长周期地震动记录作为输入,以隔震结构的等效双自由度体系为研究对象,运用统计分析的方法,研究了对中长周期结构影响较大的 13 个地震动强度指标与体系最大位移响应之间的相关性,主要得到以下结论:

(1) 同一个地震动强度指标在结构各个周期段的敏感性是不同的。指标 PGD 、 Sd_{avg} 及 DSI 与隔震结构的相关性较好,集集近场地震动强度指标建议选取 PGD 和 Sd_{avg} ,集集远场地震动强度指标建议选取 DSI 和 D/V ,渭河远场地震动强度指标建议选取 Sd_{avg} 和 DSI 。

(2) 综合结论 (1),认为在强相关范围内考虑相关性的高低,近场地震动强度指标建议选取 PGD ,远场强度指标建议选取 DSI 。

(3) 集集远场地震动强度指标 D/V 与长周期结构 (大于 3 s) 响应敏感性强,该指标与结构地震响应的相关性表现出很强的周期依赖性;地震动频谱特征参数与中长周期结构响应具有较高的相关性。

参考文献:

陈波. 2013. 结构非线性动力分析中地震记录的选择与调整方法

[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.

韩建平,周伟,李慧. 2011. 基于汶川地震数据的地震动强度指标与中长周期 SDOF 体系最大响应相关性[J]. 工程力学,28(10): 185-196.

韩建平,周伟. 2010. 基于汶川地震记录的地震动强度指标与 SDOF 体系响应的相关性[J]. 土木工程学报,43(S1):10-15.

胡进军,赵泽锋,谢礼立. 2020. 考虑场地类别和断层距的地震动及结构响应参数相关性分析[J]. 地震工程与工程振动,40(2):13-22.

李雪红,李晔暄,吴迪,等. 2014. 地震动强度指标与结构地震响应的相关性研究[J]. 振动与冲击,33(23):184-189.

李宗超,陈学良,吴健,等. 2018. 台湾地区花莲地震 ($M_s 6.5$) 工程地震动参数特征分析[J]. 建筑结构,48(S2):308-313.

刘亭亭,于晓辉,吕大刚. 2020. 基于偏最小二乘回归的地震动复合强度参数构造与统计性分析[J]. 建筑结构学报,41(S1):406-416.

王焕定,付伟庆,刘文光,等. 2006. 规则隔震结构等效简化模型的研究[J]. 工程力学,23(8):13-22.

叶列平,马千里,缪志伟. 2009. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. 地震工程与工程振动,29(4):9-22.

张亮泉,于建杰. 2019. 近、远场长周期地震动界定及分类研究[J]. 自然灾害学报,28(2):29-36.

钟菊芳,陈功. 2020. 沿深度方向地震动相干函数影响因素分析[J]. 地震研究,43(4):720-731.

Lee W H K, Shin T C, Kuo K W, et al. 2001. CWB free-field strong-motion data from the 21 September Chi-Chi, Taiwan, Earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 91(5):1370-1376.

GB 50011—2010,建筑抗震设计规范(2016 版)[S].

Research on the Correlation between Ground Motion Intensity Indexes and Maximum Response of the Isolation System

ZHANG Liangquan, KE Jinbao

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract

Firstly, we select 60 records including 20 near-field, long-period seismic records and 20 far-field, long-period records of the processed Chi-Chi ground motion data, and 20 far-field, long-period records of the processed Wenchuan ground motion data as input ground motion. Then, we get the intensity-indexes suitable for the long-period ground motion by studying the intensity parameters corresponding to each seismic record. Then we use Pearson correlation-coefficient to analyze the correlation between the intensity-index and the maximum displacement response of the isolation system. The results show that when the isolated structures are subjected to the long-period ground motion in near- and far-field, the maximum displacement response of medium- and long-period isolated structures is well correlated with spectral characteristic parameters. When we study the aseismic performance of medium- and long-period isolated structures, we find that the indexes PGD , Sd_{avg} and DSI have a good correlation with the isolation structure. We recommend PGD and Sd_{avg} for the intensity indexes in near field, DSI and D/V for the intensity indexes in far field of Chi-Chi earthquake event. And we recommend Sd_{avg} and DSI for the intensity indexes in far field of Wenchuan earthquake event. Considering the degree of correlation of the intensity indexes with the isolated structures, we recommend PGD for the near-field, long-period intensity index, and DSI for the far-field, long-period seismic intensity index.

Keywords: isolated structure; near-field; far-field; long-period ground motions; seismic intensity index