



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

俯冲带板内地震竖向加速度谱阻尼修正系数模型研究

陈心锋 姜妍旭 刘名吉

A damping modification factor model for vertical acceleration spectrum from slab earthquakes in subduction zone

Chen Xinfeng, Jiang Yanxu, Liu Mingji

引用本文:

陈心锋, 姜妍旭, 刘名吉. 2022. 俯冲带板内地震竖向加速度谱阻尼修正系数模型研究. *地震学报*[J], 44(2): 339–355. DOI: 10.11939/jass.20200198

Chen X F, Jiang Y X, Liu M J. 2022. A damping modification factor model for vertical acceleration spectrum from slab earthquakes in subduction zone. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(2): 339–355. DOI: 10.11939/jass.20200198

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20200198>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅壳与上地幔地震的水平加速度谱阻尼修正系数模型

Damping correction factor for horizontal acceleration response spectrum of shallow crustal and upper-mantle earthquakes
地震学报. 2019, 41(6): 778–794 <https://doi.org/10.11939/jass.20190052>

南北地震带川滇甘陕地区竖向与水平向加速度反应谱比的统计分析

Statistic analyses on the vertical to horizontal acceleration response spectra ratios of Sichuan–Yunnan–Gansu–Shaanxi region in the North–South Seismic Belt
地震学报. 2019, 41(3): 391–398 <https://doi.org/10.11939/jass.20170188>

基于深度学习残差网络模型的地震和爆破识别

Earthquake and explosion identification based on Deep Learning residual network model
地震学报. 2019, 41(5): 646–657 <https://doi.org/10.11939/jass.20190030>

近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整

Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion
地震学报. 2020, 42(4): 471–481 <https://doi.org/10.11939/jass.20190155>

拟合加密控制点反应谱的地震动时程合成

Synthesis of ground motion history compatible with the response spectrum with densified controlling points
地震学报. 2017, 39(6): 910–920 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.009>

基于小波函数的地震动反应谱与峰值位移拟合方法

A matching method of ground-motion response spectrum and the peak displacement based on the wavelet function
地震学报. 2021, 43(3): 376–386 <https://doi.org/10.11939/jass.20200138>

陈心锋, 姜妍旭, 刘名吉. 2022. 俯冲带板内地震竖向加速度谱阻尼修正系数模型研究. 地震学报, 44(2): 339–355. doi: 10.11939/jass.20200198.
Chen X F, Jiang Y X, Liu M J. 2022. A damping modification factor model for vertical acceleration spectrum from slab earthquakes in subduction zone. *Acta Seismologica Sinica*, 44(2): 339–355. doi: 10.11939/jass.20200198.

俯冲带板内地震竖向加速度谱阻尼修正系数模型研究^{*}

陈心锋[†] 姜妍旭 刘名吉

(中国济南 250000 山东建筑大学土木工程学院)

摘要 基于日本 K-NET 和 KiK-net 台网的 4 695 条俯冲带板内地震记录, 采用最小二乘法对阻尼修正系数(DMF)的几何均值进行关于阻尼比和谱周期的回归拟合, 分场地类别建立了考虑阻尼比和谱周期的竖向加速度谱 DMF 模型. 为探究震源、路径和场地效应对该模型残差分布的影响, 采用随机效应模型将残差分离得到各类残差及相应的残差标准差, 在此基础上进行 DMF 模型残差分析. 研究表明, DMF 可以采用阻尼比对数值的三次多项式、周期对数值的四次多项式来模拟. 由于规范设计反应谱并非针对某一特定地震, 规范提出的 DMF 模型并不包含震源和路径参数, 但事件间和事件内残差关于矩震级、断层距离和断层深度的分布表明, 在给定地震事件下, 包含地震动参数的 DMF 模型将会改善模型的预测能力.

关键词 阻尼修正系数 竖向加速度反应谱 随机效应模型 俯冲带板内地震 残差分析
doi: 10.11939/jass.20200198 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

A damping modification factor model for vertical acceleration spectrum from slab earthquakes in subduction zone

Chen Xinfeng[†] Jiang Yanxu Liu Mingji

(School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250000, China)

Abstract: In this study, 4695 strong-motion records from subduction slab earthquakes in Japan obtained by the K-NET and KiK-net networks were used to develop a damping modification factor (DMF) model for the vertical acceleration spectrum. The DMF model considering the damping ratio and spectral period is established for four site classes, and the geometric mean values for DMF are used to perform regression fitting in respect to the damping ratio and spectral period by least squares method. To evaluate the influence of hypocenter, path, and site effects on the residual distribution of the model, the total model residuals and standard deviations were separated into between-event and within-event parts, and the within-event residuals were further divided into the between-site and within-site parts by using a random effects model. The results show that the effect of damping ratios on DMF can be modelled by the third-

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(51878396)资助.
收稿日期 2020-12-03 收到初稿, 2021-05-26 决定采用修改稿.
作者简介 陈心锋, 硕士研究生, 主要从事岩土地震工程方面的研究, e-mail: chenxf1996@126.com



order polynomial of the logarithm of the damping ratios, a fourth-order polynomial of the logarithm of spectral periods can be used to model the effect of spectral periods for the DMF. The effects of source and path parameters were not modelled in this study because of DMF model is used to scale a design spectrum not associated with a given scenario earthquake. The distribution of the between- and within-event residual distributions with respect to moment magnitude, fault depth and source distance suggests that including these terms would improve prediction capability of the model when a DMF is designed for scaling a 5% acceleration spectrum associated with a scenario event for a give magnitude and source distance.

Key words: damping modification factor; vertical acceleration response spectrum; random effect model; subduction slab earthquake; residual analysis

引言

随着震害调查及地震工程认识的深入, 多项研究表明实际工程中竖向地震作用对建筑物影响显著, 而且竖向地震动反应谱不能简单地根据竖向与水平向反应谱(V/H)的比值得出. Ambraseys 和 Douglas (2003) 以及 Bozorgnia 和 Campbell (2004) 通过对 V/H 反应谱比值的统计分析得出短周期的竖向地震动幅值超过了相应的水平向地震动, 这与抗震规范中通常规定的 V/H 比值为 2/3 的推荐值存在较大差异. 许多现行的抗震规范设计谱和地震动衰减关系的预测反应谱均基于 5% 阻尼比, 但结构的阻尼比并不全为 5%, 一些长悬臂桁架和大跨度空间桁架的阻尼比小于 5%, 具有附加阻尼装置结构的阻尼比大于 5% (Xiang, Huang, 2019). 通常设计高阻尼比结构的目的是减少结构变形和减小结构全加速度以保护结构内置设备, 对于质量为 m , 阻尼系数为 c , 刚度为 k 的单自由度结构, 在地震加速度时程为 $\ddot{x}_g$ 作用下的动态平衡方程表示为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g, \quad (1)$$

$$\ddot{x}_a = \ddot{x} + \ddot{x}_g, \quad (2)$$

式中, $\ddot{x}$ 为结构相对于地面的加速度, $\dot{x}$ 为结构相对地面的速度, x 为结构相对于地面的位移, $\ddot{x}_a$ 为结构的全加速度. 对于一个给定的结构, 通过增加阻尼比来减小全加速度 $\ddot{x}_a$ 意味着减小固定在结构内部所有非结构部分的加速度, 全加速度反应谱值则为在给定的结构周期下 $\ddot{x}_a$ 的最大值.

获得不同阻尼比下的反应谱可以通过建立不同阻尼比下的地震动衰减关系来实现, 但由于需要的参数过多难以应用于工程设计, 因此, 建立阻尼修正系数(damping modification factor, 缩写为 DMF)模型来得到不同阻尼比下的设计反应谱得到了广泛应用. DMF 模型为同一周期下任意阻尼比反应谱谱值与 5% 阻尼比反应谱谱值的比值, 其加速度反应谱的阻尼修正系数可表示为

$$B_a = \frac{S_a(T, \zeta)}{S_a(T, 5\%)}, \quad (3)$$

式中, B_a 表示加速度反应谱阻尼修正系数, ζ 为阻尼比, T 为谱周期, $S_a(T, \zeta)$ 和 $S_a(T, 5\%)$ 分别表示阻尼比为 ζ 和 5% 时的全加速度反应谱值. 竖向 DMF 模型与水平向 DMF 模型差异显著 (Rezaeian et al, 2014), 难以利用某一特定值或函数转化, 而且竖向与水平向模型的标准差差别较大, 因此需单独建立竖向 DMF 模型.

Newmark 和 Hall (1982) 根据少量的地震记录首次建立了 DMF 模型, 该模型仅把阻尼比作为参数; Lin 和 Chang (2003, 2004) 指出阻尼修正系数对谱周期的依赖性, 建立了考虑阻尼比和谱周期的 DMF 模型; 蒋建等 (2009) 分四类场地研究了场地条件对阻尼修正系数的影响, 通过非线性回归方法建立 DMF 模型, 研究表明场地条件对 DMF 的影响程度随着阻尼比的增大而逐渐增大; 郝安民等 (2012) 建立了考虑矩震级和场地类别的加速度反应谱 DMF 模型, 证实了矩震级和场地类别对 DMF 的影响是显著的; Li 和 Chen (2017) 采用一个衰减系数来代替矩震级、震中距离和场地条件对阻尼修正系数的影响, 建立了加速度谱的 DMF 模型; Xiang 和 Huang (2019) 利用 3 198 条竖向地震动记录, 证实了阻尼修正系数的概率特性呈正态分布, 并研究了矩震级、震中距离、震源深度、场地条件以及峰值加速度对阻尼修正系数的影响. 规范设计反应谱中并不包含有关地震特性的参数, 因此, 建立只考虑场地类别、阻尼比和谱周期的 DMF 模型是有必要的.

我国强震台网建设起步较晚, 而 DMF 模型的建立对强震记录有一定的质量要求, 本文拟基于 K-NET 和 KiK-net 台网记录的日本俯冲带地区的板内竖向地震数据, 根据场地周期划分场地类别, 将地震记录数据分成四类, 分别建立不同场地类型下的 DMF 模型, 用于调整地震震源和距离参数未知的设计反应谱来得到非 5% 阻尼比反应谱, 随后采用随机效应模型进行残差分析, 以探究震源、路径和场地效应对 DMF 模型残差及标准差分布的影响.

1 强震数据

根据 Zhao 等 (2015) 关于地震动类型的定义, 日本俯冲带地震按照震源所处的构造位置、断层机制以及俯冲板块边界几何形状可分为浅壳及上地幔地震、板间地震和板内地震. 在震级、震源距离和场地条件均相同的情况下, 俯冲带板内地震的短周期反应谱往往高于其它类别的地震. 俯冲带地质构造复杂, 为了提高地震动衰减模型的拟合度, 分地震类别建立地震动衰减关系模型是必须的 (Jiang, Zhao, 2017), 现给出俯冲带板内地震竖向加速度谱的阻尼修正系数模型, 俯冲带板内地震定义为: ① 震源深度在 50 km 以内, 且位于俯冲板界面深度 5 km 以下, 断层机制为正断层或走滑断层; ② 在俯冲板界面深度以下并且震源深度大于 50 km.

本文使用的日本强震记录均采用以下方式处理: ① 仅使用 $M_w \geq 4.9$ 的强震记录; ② 剔除波形不完整或者波形有明显错误的记录; ③ 对地震记录进行采集仪器的校正和基线校正; ④ 滤波: 对于短周期, 采样率为 50 Hz 和 100 Hz 的记录, 分别选择 24.5 Hz 和 33.3 Hz 作为低通滤波器的最大截止频率; 对于长周期, 由于加速度强震仪在长周期噪声较强, 所有地震记录的高通滤波截止频率都需要通过人工确定, 大震近场记录的截止频率最小可达 0.05 Hz, 小震远场记录最高可达 2.0 Hz.

为了更好地建立模型, 需要将处理获得的数据进行筛选, 筛选标准为: ① 剔除由于处理过程缺少竖向分量的地震记录; ② 为避免未触发台站等影响, 采用与震级关联的距离截断方法, 最大距离为 300 km; ③ 地震记录应拥有可达基岩深度的实测剪切波速和可靠的震源位置以及震源机制参数. 最终从日本 K-NET 和 KiK-NET 强震台网获取了 4 695 条俯冲带板内竖向地震记录.

根据目前已有的 DMF 模型 (Zhou, Zhao, 2020), 场地效应是重要的模型参数. 本文使用日本公路桥梁设计规范 (Japan Road Association, 1980) 根据表面冲积土和洪积土层厚度以及场

地周期提出的场地分类方法. 在早期的研究中, 日本的绝大多数场地没有任何场地信息. Zhao 等(2006a)使用改进的横向和竖向反应谱比值进行了场地分类, 利用该场地类别, Zhao 等(2006b)建立了一种地震动衰减关系并能够较好地模拟场地共振效应, 表明 Zhao 等(2006a)的近似场地分类方法可行. 随着日本 K-NET 和 KiK-net 的投入使用, 近十余年来, 上述两个台网记录到了大量地震且很多台站有了深达基岩的实测剪切波波速. Zhao 等(2016a, b, c), Zhao 等(2017)以及 Jiang 和 Zhao (2017)根据模型最大似然值判定, 排除无场地实测波速的地震记录后能够改善模型精度. 因此本文使用 Zhao 等(2016c)使用的强震数据, 并且场地都有实测的剪切波波速. 据此, 本文根据台站实测的场地剪切波速计算得到场地周期, 即

$$T_s=\frac{4h}{v_s},$$

(4)

式中, T_s 为场地周期, h 为基岩上覆土层的深度, v_s 为 h 范围内的垂直入射剪切波传播时间加权平均剪切波速.

本文模型通过与 Jiang 和 Zhao (2017)提出的 5% 阻尼比水平下俯冲板内地震的竖向地震动衰减关系相乘来检验非 5% 阻尼比反应谱曲线的拟合效果, 因此采用与 Jiang 和 Zhao (2017)一致的场地划分. 表 1 给出了每类场地所处的场地周期范围, 用 I, II, III 和 IV 表示四类场地, 分别表示日本公路桥梁设计规范(1980 版)中的场地类别描述(岩石、硬土、中硬土和软土), 并给出了各类场地的记录数量. 图 1 给出了地震记录关于矩震级和断层距离(当断层模型可用时, 为断层面至台站的最短距离, 否则取震源距离)以及矩震级和断层深度(当断层模型可用时, 为断层顶部至地面的竖直距离, 否则取震源深度)的分布图.

表 1 场地类别定义和各类场地记录数量

Table 1 Site class definition and number of the records in each site class

场地类别	土质类型	场地周期/s	记录条数
I	岩石	$T_s<0.2$	2 022
II	硬土	$0.2\leq T_s<0.4$	1 353
III	中硬土	$0.4\leq T_s<0.6$	442
IV	软土	$T_s\geq 0.6$	878

本次研究选取 4 695 条地震记录, 按照四种场地类别分别计算 1%—4%, 6%—10%, 15%, 20%, 25% 和 30% 阻尼比下 36 个谱周期点(0.01—5.0 s)的加速度谱的 DMF 几何均值.

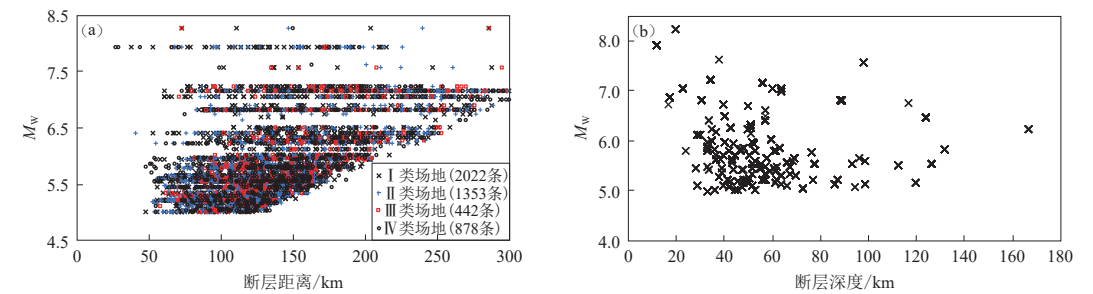


图 1 地震数据分布图

(a) 地震记录关于矩震级和断层距离的分布; (b) 地震事件关于矩震级和断层深度的分布

Fig. 1 The distribution of earthquake dataset

- (a) The distribution of earthquake records with respect to moment magnitude and source distance;
(b) The distribution of earthquakes with respect to moment magnitude and fault depth

图 2 给出了 1%、3%、15% 和 30% 阻尼比下阻尼修正系数几何均值随谱周期变化的关系曲线. 可以看出: ① 谱周期小于 0.03 s 时, 阻尼修正系数均值在不同阻尼比和不同场地类型下都近似为 1.0, 这是由于周期过短, 结构地震反应与地面震动相似所致; ② 阻尼修正系数在谱周期 0.03—0.16 s 时逐渐增大, 在谱周期大于 0.16 s 时逐渐减小; ③ 阻尼较大时, 阻尼修正系数变化趋势呈现与小阻尼相反的变化趋势. 值得注意的是, 在长周期, 随着谱周期的增大阻尼修正系数增加至 1.0 以上, 反映了阻尼力对绝对全加速度谱的影响, 在高阻尼比长周期的情况下, 由于忽略阻尼力, 导致抗震设计偏于保守; ④ 在谱周期 0.03—0.1 s 时, I 类场地的阻尼修正系数与其余场地类型差异明显; 在谱周期较长时, IV 类场地的阻尼修正系数与其余场地类型差异明显, 说明谱周期接近场地周期时的阻尼修正系数变化较大.

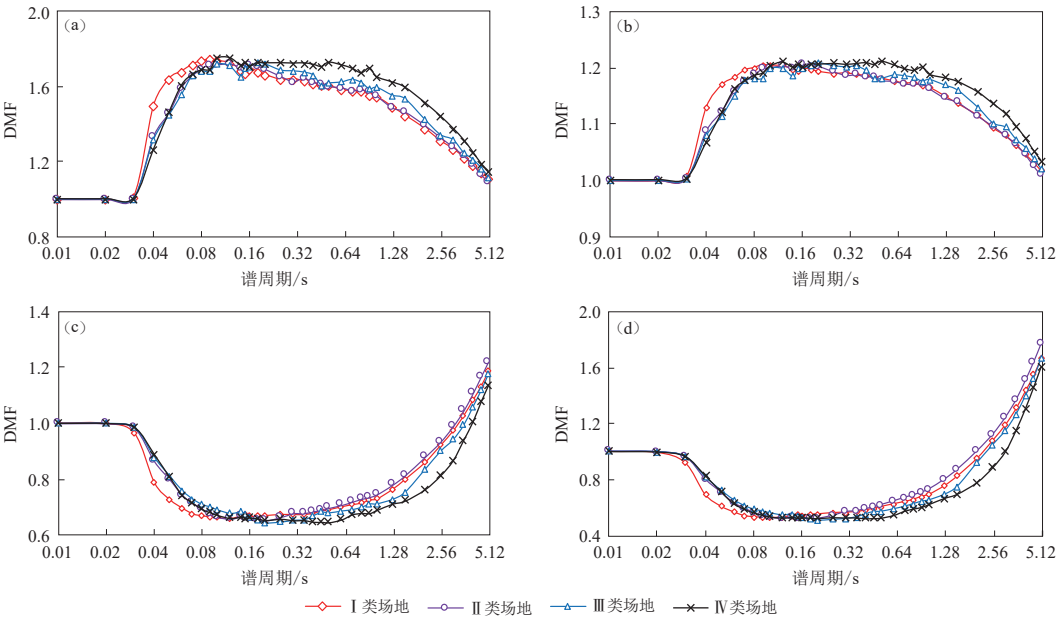


图 2 四类场地阻尼修正系数 DMF 的几何均值分布情况

Fig. 2 The geometric mean values of DMF for four site classes
(a) $\zeta=1\%$; (b) $\zeta=3\%$; (c) $\zeta=15\%$; (d) $\zeta=30\%$

不同场地的阻尼修正系数差异较大, 针对场地条件对阻尼修正系数的影响, 根据 Zhao 等(2019)建立一个考虑谱周期与场地周期的场地效应影响模型, 即

$$\ln S_a(T, \zeta, T_s) = b(T, \zeta) \ln T_s + c(T, \zeta), \quad (5)$$

式中, $b(T, \zeta)$ 和 $c(T, \zeta)$ 是与场地周期无关的模型参数, T 为谱周期, T_s 为场地周期.

给定场地周期下的阻尼修正系数可以根据式(6)计算得出, 即

$$\ln B_a(T, \zeta, T_s) = m \ln T_s + c(T, \zeta) - c(T, 5\%), \quad (6)$$

式中 m 为模型回归系数. 根据式(3), 可以推导出场地效应对 B_a 的影响, 即

$$\ln \frac{B_a(T, \zeta, T_{s2})}{B_a(T, \zeta, T_{s1})} = m \ln \frac{T_{s2}}{T_{s1}}, \quad (7)$$

式中 T_{s1} 和 T_{s2} 为两类不同场地的场地周期.

由式(7)可以得出 DMF 比值与场地周期比值在对数刻度下呈线性关系, 根据 Zhao 等 (2019) 的研究, m 值在高阻尼短周期下为正值, 由此可以解释图 2c 和 2d 中 I 类场地在短周期下 DMF 值较小的情况; m 值在高阻尼长周期下为负值, 可以解释图 2c 和 2d 中 IV 类场地在中长周期下 DMF 值较小的情况.

为了验证分场地类别建立模型的必要性, 采用统计量 Z 检验不同场地下阻尼比为 1%, 3%, 15% 和 30% 时阻尼修正系数的差异性, 当统计量 Z 处于拒绝域内时, 所检验的不同场地下阻尼修正系数差异显著. 统计量 Z 的计算公式为

$$Z = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{S_X^2}{n_X} + \frac{S_Y^2}{n_Y}}}, \tag{8}$$

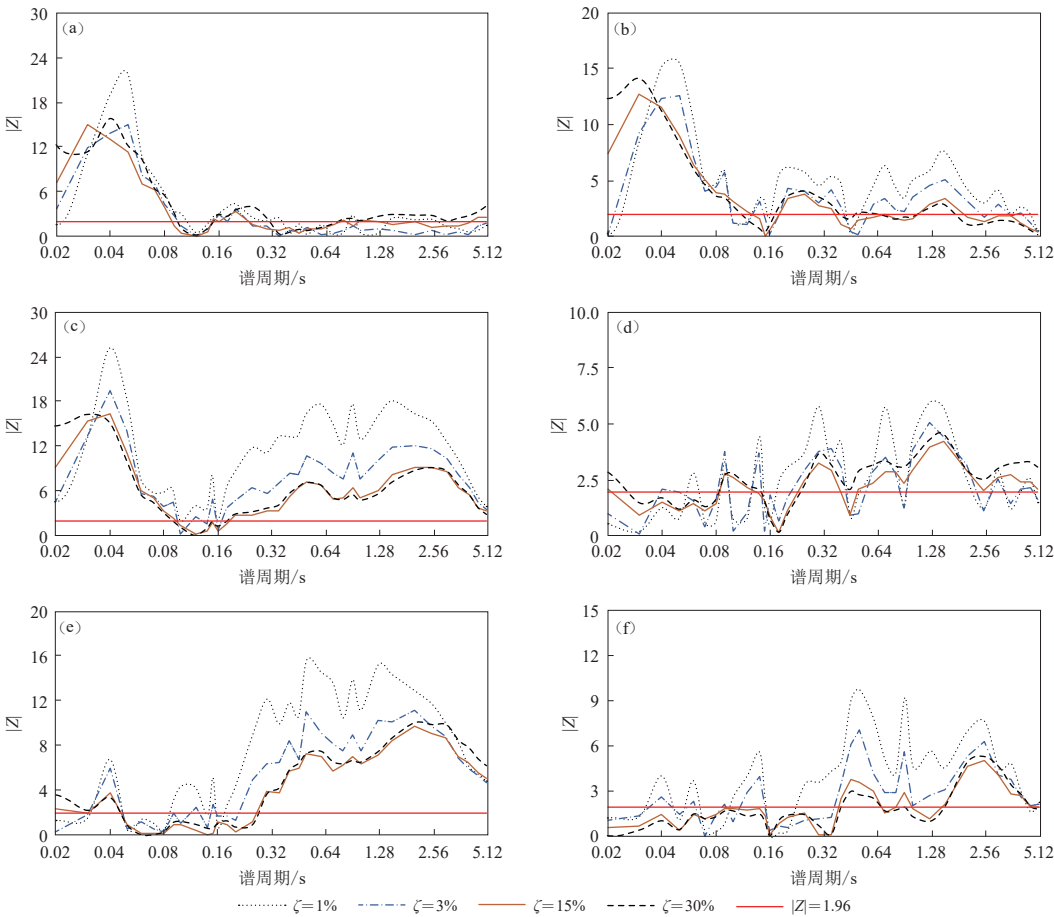


图 3 四类场地间显著性检验统计值 $|Z|$

(a) I 类场地与 II 类场地; (b) I 类场地与 III 类场地; (c) I 类场地与 IV 类场地; (d) II 类场地与 III 类场地;
(e) II 类场地与 IV 类场地; (f) III 类场地与 IV 类场地

Fig. 3 $|Z|$ values for the statistical tests between each pair of four site classes

(a) Site class I vs site class II; (b) Site class I vs site class III; (c) Site class I vs site class IV;
(d) Site class II vs site class III; (e) Site class II vs site class IV; (f) Site class III vs site class IV

式中, Z 为检验统计量, $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为同周期不同场地类别的阻尼修正系数样本均值, S_X^2 和 S_Y^2 表示同周期不同场地类别的阻尼修正系数样本方差, n_X 和 n_Y 表示两类场地各自的阻尼修正系数样本容量, 置信水平取为 5%, 拒绝域 $|Z| \geq 1.96$.

图 3 给出了阻尼比分别为 1%, 3%, 15% 和 30% 时四类场地差异性检验统计值 $|Z|$ 的分布图. 由于不同场地类别在谱周期为 0.01 s 时的 B_a 相近, 图 3 未给出谱周期为 0.01 s 时的 $|Z|$ 值. 由图 3a~3c 中 I 类场地与其余场地的对比可以看出: 谱周期在 I 类场地的场地周期附近时, $|Z|$ 值达到最大; 在长周期 $|Z|$ 值较小, 尤其是 I 类场地与 II 类场地的对比, 谱周期大于 0.32 s 时, $|Z|$ 值基本小于 1.96; 在谱周期大于 0.04 s 时, 阻尼比为 1% 的 $|Z|$ 值一般大于 30% 阻尼比下的 $|Z|$ 值, 其原因是阻尼比为 30% 下不同场地类型的 DMF 均值差异小于 1% 阻尼比下不同场地类型的 DMF 均值; 同一谱周期下, I 类场地与 IV 类场地的 $|Z|$ 值基本大于 I 类场地与 II 类场地的 $|Z|$ 值及 I 类场地与 III 类场地的 $|Z|$ 值, II 类场地与 IV 类场地的 $|Z|$ 值基本大于 II 类场地与 III 类场地的 $|Z|$ 值, 这种情况可以用式 (7) 来解释, 场地周期差异较大时, 阻尼修正系数差异也就越大. 从这些结果可以看出, 在多数周期上, 四种场地类别下 DMF 均值统计显著不同, 因此有必要分场地类别来建立 DMF 模型.

2 加速度谱阻尼修正系数模型的建立

分四种场地类别对阻尼修正系数几何均值进行回归分析, 并结合俯冲带板内地震特性, 考虑阻尼比和谱周期对阻尼修正系数的影响, 给出俯冲带板内地震竖向加速度谱阻尼修正系数模型的表达式为

$$\ln \bar{B}_a(T, \zeta) = \sum_{i=1}^N c_i(T) \beta^i, \quad (9)$$

式中, $\bar{B}_a(T, \zeta)$ 表示加速度谱阻尼修正系数的拟合值, $c_i(T)$ 表示与场地类别和谱周期有关的模型系数, N 表示阻尼比阶数, $\beta = \ln(\zeta/0.05)$. 作为一个工程设计参数, 模型计算值应在谱周期上相对平滑, 即在一个小谱周期范围内无深陷和峰值. 作为经验模型, 所有的数据和模型参数是随机参数的一次抽样, 因而每个模型参数在一个合适的范围内 (例如参数均值 $\pm$ 参数标准差) 可以选取不同数值, 模型的统计最佳参数不会发生统计上不可接受的变化, 这个特性为平滑处理提供了统计学依据. 一般无法一步就能达到模型计算值在谱周期上的平滑, 本文采取的方法是将各个模型参数依次进行拟合与平滑. 根据阻尼修正系数随 β 的变化, 本文采用 $\ln(\zeta/0.05)$ 的三次多项式来拟合模型, 阻尼修正系数几何均值按谱周期分为 36 组, 根据最小二乘法对方程的系数 $c_i(T)$ 进行回归, 在所有谱周期内平滑方程系数. 为使得模型有良好的拟合效果并且关于谱周期的分布足够平滑, 模型系数需再进行关于周期多项函数的回归拟合, 选定的回归拟合为 $\ln T$ 的四次多项式, 并将模型与 Jiang 和 Zhao (2017) 提出的 5% 阻尼比水平下俯冲带板内地震的竖向地震动衰减关系相乘来检验非 5% 阻尼比反应谱曲线的拟合效果. 如果拟合效果不显著或曲线不平滑, 可适当调整系数的分布和平滑的先后顺序, 进一步处理模型系数. 回归得到的系数值 $c_i(T)$ 在表 2 中列出, 鉴于谱周期为 0.01 s 和 0.02 s 时回归结果接近于 0, 因此表中未给出这两个谱周期的模型系数, 其它阻尼比下的系数值可以通过表中系数插值得到.

表 2 四类场地地下阻尼修正系数模型的系数值

Table 2 Coefficients of DMF model for four site classes

T/s	Ⅰ类场地			Ⅱ类场地			Ⅲ类场地			Ⅳ类场地		
	c ₁	c ₂	c ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₁	c ₂	c ₃
0.03	-0.020 0	-0.011 3	-0.015 0	-0.020 0	-0.005 4	-0.008 0	-0.008 3	-0.004 8	-0.008 0	-0.007 1	-0.004 7	-0.010 0
0.04	-0.234 3	0.012 9	0.001 0	-0.152 1	0.016 7	-0.005 0	-0.138 9	0.018 3	-0.004 0	-0.120 8	0.013 3	-0.004 0
0.05	-0.294 9	0.005 7	0.000 1	-0.235 9	0.012 9	0.001 4	-0.213 8	0.012 3	-0.001 1	-0.220 4	0.013 0	0.002 4
0.06	-0.322 8	0.001 8	0.002 6	-0.283 5	0.006 7	0.003 1	-0.262 1	0.009 1	0.001 9	-0.273 8	0.008 2	0.005 0
0.07	-0.340 8	-0.001 1	0.004 4	-0.314 7	0.002 1	0.004 4	-0.294 4	0.006 1	0.003 8	-0.308 7	0.004 7	0.006 6
0.08	-0.352 8	-0.003 2	0.005 9	-0.335 7	-0.001 4	0.005 4	-0.317 1	0.003 4	0.005 1	-0.332 4	0.002 0	0.007 7
0.09	-0.361 1	-0.004 9	0.007 1	-0.350 3	-0.004 0	0.006 2	-0.333 4	0.001 0	0.006 1	-0.349 1	-0.000 1	0.008 5
0.10	-0.366 8	-0.006 3	0.008 1	-0.360 5	-0.006 1	0.007 0	-0.345 4	-0.001 0	0.006 8	-0.361 1	-0.001 8	0.009 1
0.12	-0.373 5	-0.008 2	0.009 7	-0.372 8	-0.008 9	0.008 2	-0.361 2	-0.004 4	0.007 9	-0.376 3	-0.004 3	0.009 9
0.14	-0.376 5	-0.009 4	0.011 0	-0.378 8	-0.010 6	0.009 3	-0.370 3	-0.007 0	0.008 7	-0.384 6	-0.006 1	0.010 5
0.15	-0.377 1	-0.009 8	0.011 5	-0.380 3	-0.011 2	0.009 9	-0.373 4	-0.008 1	0.009 0	-0.387 3	-0.006 7	0.010 8
0.16	-0.377 4	-0.010 1	0.012 1	-0.381 2	-0.011 6	0.010 4	-0.375 7	-0.009 0	0.009 3	-0.389 3	-0.007 3	0.011 0
0.18	-0.377 1	-0.010 5	0.013 0	-0.381 6	-0.012 0	0.011 3	-0.378 8	-0.010 5	0.009 9	-0.391 8	-0.008 2	0.011 4
0.20	-0.376 2	-0.010 7	0.013 9	-0.380 8	-0.012 1	0.012 2	-0.380 4	-0.011 6	0.010 5	-0.393 1	-0.008 8	0.011 8
0.25	-0.372 3	-0.010 4	0.015 7	-0.376 3	-0.011 3	0.014 2	-0.381 1	-0.013 1	0.011 8	-0.393 4	-0.009 6	0.012 9
0.30	-0.367 6	-0.009 5	0.017 2	-0.370 3	-0.009 7	0.016 0	-0.379 3	-0.013 5	0.013 1	-0.392 2	-0.009 7	0.013 9
0.35	-0.362 7	-0.008 3	0.018 6	-0.364 2	-0.007 7	0.017 6	-0.376 6	-0.013 1	0.014 4	-0.390 6	-0.009 5	0.014 9
0.40	-0.357 9	-0.006 9	0.019 8	-0.358 2	-0.005 5	0.019 2	-0.373 5	-0.012 2	0.015 6	-0.388 9	-0.008 9	0.016 0
0.45	-0.353 2	-0.005 4	0.020 8	-0.352 5	-0.003 1	0.020 5	-0.370 1	-0.011 0	0.016 8	-0.387 3	-0.008 2	0.017 0
0.50	-0.348 6	-0.003 8	0.021 8	-0.347 1	-0.000 8	0.021 8	-0.366 7	-0.009 5	0.018 0	-0.385 7	-0.007 3	0.018 0
0.60	-0.339 8	-0.000 5	0.023 6	-0.337 0	0.003 9	0.024 1	-0.359 9	-0.006 2	0.020 2	-0.382 5	-0.005 4	0.020 0
0.70	-0.331 3	0.002 9	0.025 0	-0.327 7	0.008 4	0.026 0	-0.353 1	-0.002 6	0.022 2	-0.379 3	-0.003 1	0.021 8
0.80	-0.323 0	0.006 2	0.026 3	-0.319 0	0.012 8	0.027 7	-0.346 2	0.001 1	0.024 1	-0.375 9	-0.000 8	0.023 5
0.90	-0.314 9	0.009 4	0.027 5	-0.310 6	0.016 9	0.029 2	-0.339 2	0.004 8	0.025 8	-0.372 2	0.001 6	0.025 1
1.00	-0.306 8	0.012 6	0.028 5	-0.302 4	0.020 9	0.030 5	-0.332 2	0.008 5	0.027 3	-0.368 1	0.004 1	0.026 6
1.25	-0.286 8	0.020 2	0.030 6	-0.282 5	0.030 0	0.033 1	-0.314 2	0.017 4	0.030 5	-0.356 2	0.010 4	0.029 8
1.50	-0.266 7	0.027 4	0.032 1	-0.262 7	0.038 1	0.034 9	-0.295 4	0.025 6	0.033 1	-0.342 1	0.016 7	0.032 4
2.00	-0.226 4	0.040 4	0.034 2	-0.222 5	0.052 1	0.037 2	-0.256 0	0.040 4	0.036 5	-0.307 9	0.029 0	0.036 2
2.50	-0.185 6	0.052 2	0.035 3	-0.181 3	0.063 7	0.038 1	-0.214 6	0.053 0	0.038 4	-0.267 9	0.040 9	0.038 7
3.00	-0.144 7	0.062 9	0.035 8	-0.139 1	0.073 8	0.038 1	-0.171 9	0.064 0	0.039 1	-0.223 6	0.052 3	0.040 3
3.50	-0.103 8	0.072 8	0.035 9	-0.096 2	0.082 6	0.037 6	-0.128 3	0.073 7	0.039 1	-0.176 3	0.063 2	0.041 1
4.00	-0.063 1	0.082 0	0.035 6	-0.052 9	0.090 4	0.036 6	-0.084 1	0.082 2	0.038 4	-0.126 9	0.073 8	0.041 3
4.50	-0.022 6	0.090 6	0.035 1	-0.009 2	0.097 4	0.035 2	-0.039 6	0.089 8	0.037 3	-0.075 9	0.084 0	0.041 1
5.00	0.017 7	0.098 7	0.034 4	0.034 6	0.103 8	0.033 6	0.005 0	0.096 7	0.035 8	-0.023 8	0.093 9	0.040 6

图 4 给出了Ⅰ—Ⅳ类场地阻尼修正系数模型曲线与原始数据几何均值散点的对比. 由图 4a 和 4b 可见: 较高阻尼比的模型值与数据值在谱周期 0.03 s 时存在偏差, 原因是为了得到更加平滑的反应谱曲线, 适当调整了较高阻尼的模型系数, 在其它阻尼比谱周期下, 模型曲线与数据值都有着良好的拟合效果; 高阻尼比的 DMF 模型在长周期时超过 1.0, 这可以用来解释长周期结构附加过大的阻尼比, 虽可以降低结构的位移反应, 但不能有效地降低地震作用, 甚至会增大地震作用对长周期结构的影响.

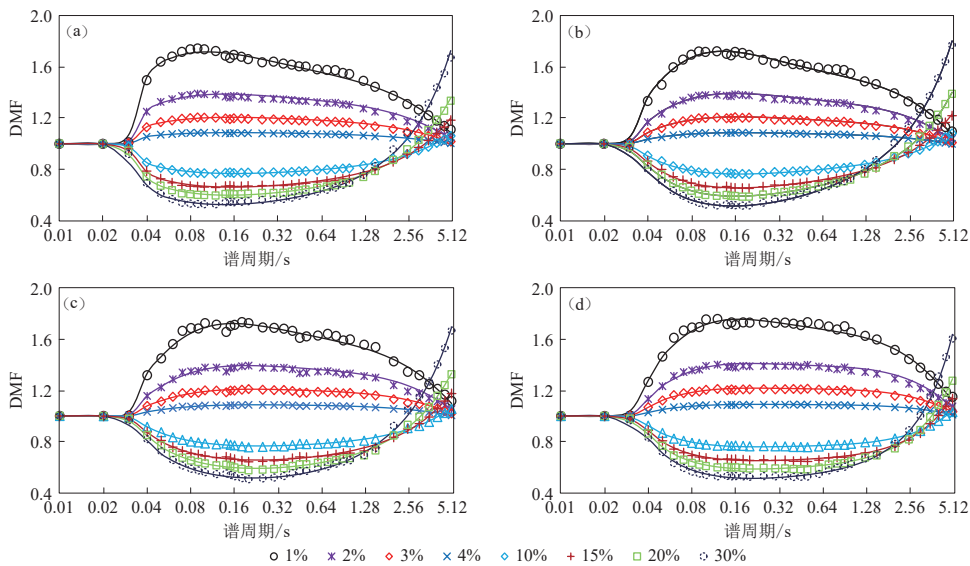


图 4 四类场地不同阻尼比的阻尼修正系数 DMF 模型拟合曲线与数据几何均值的对比

(a) I 类场地; (b) II 类场地; (c) III 类场地; (d) IV 类场地

Fig. 4 DMF model comparisons with the geometrical mean of the vertical components for eight damping ratios of four site classes

(a) Site class I ; (b) Site class II ; (c) Site class III ; (d) Site class IV

3 残差分析

为了进一步评估模型的拟合效果,对模型进行残差分析,残差定义为

$$\xi_{i,j}^T = \ln B_{a(i,j)}(T, \zeta) - \ln \bar{B}_a(T, \zeta), \quad (10)$$

式中: $\xi_{i,j}^T$ 表示第 i 个地震事件的第 j 条记录的记录总残差, ξ^T 的均值为 0, 标准差为 σ_T , $B_{a(i,j)}(T, \zeta)$ 表示第 i 个地震事件的第 j 条记录的阻尼修正系数, $\bar{B}_a(T, \zeta)$ 为模型拟合值.

为探究震源、路径和场地效应对模型产生的误差影响,根据 Brillinger 和 Preisler (1984) 采用随机效应模型对地震动衰减关系进行回归分析的方法,结合 Abrahamson 和 Youngs (1992) 提出的改进的随机效应模型,将总残差分离为事件内残差和事件间残差,即

$$\xi_{i,j}^T = \eta_i + \xi_{i,j}, \quad (11)$$

式中: η_i 表示均值为 0, 标准差为 τ 的事件间残差; $\xi_{i,j}$ 表示均值为 0, 标准差为 σ 的事件内残差,其中总标准差 $\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$.

为进一步分析路径效应、场地效应对残差分布的影响,将事件内残差分解为场地间残差和场地内残差,即

$$\xi = \gamma_{m,n}^s + \eta_m^s, \quad (12)$$

式中: $\gamma_{m,n}^s$ 为第 m 个场地内的第 n 个记录场地内残差, η_m^s 为第 m 个场地的场地间残差. 场地内残差均值为 0, 标准差为 σ_s ; 场地间残差均值为 0, 标准差为 τ_s , 其中事件内标准差 $\sigma = \sqrt{\sigma_s^2 + \tau_s^2}$. 总残差标准差、事件内残差标准差和事件间残差标准差计算结果分别列于表 3, 4 和 5.

表 3 阻尼修正系数模型的总残差标准差 σ_T

Table 3 Total standard deviations σ_T of DMF model

T/s	σ_T												
	$\zeta=1\%$	$\zeta=2\%$	$\zeta=3\%$	$\zeta=4\%$	$\zeta=6\%$	$\zeta=7\%$	$\zeta=8\%$	$\zeta=9\%$	$\zeta=10\%$	$\zeta=15\%$	$\zeta=20\%$	$\zeta=25\%$	$\zeta=30\%$
0.03	0.056 0	0.014 7	0.011 6	0.005 7	0.000 0	0.005 4	0.010 4	0.015 2	0.019 8	0.024 3	0.046 0	0.066 5	0.086 4
0.04	0.242 6	0.146 3	0.084 4	0.039 9	0.030 8	0.055 7	0.079 9	0.094 8	0.110 7	0.167 6	0.204 1	0.229 5	0.248 6
0.05	0.238 6	0.148 7	0.087 9	0.042 5	0.033 0	0.060 1	0.082 9	0.102 7	0.120 2	0.184 1	0.225 5	0.255 4	0.277 7
0.06	0.225 0	0.144 4	0.092 9	0.042 7	0.035 8	0.061 4	0.090 2	0.105 6	0.123 7	0.190 9	0.235 1	0.267 0	0.290 8
0.07	0.215 5	0.139 6	0.090 0	0.041 5	0.034 6	0.059 8	0.088 0	0.103 0	0.120 7	0.187 6	0.232 0	0.263 6	0.287 1
0.08	0.206 3	0.141 4	0.085 5	0.039 8	0.033 2	0.057 5	0.084 0	0.099 0	0.115 9	0.178 7	0.220 1	0.250 3	0.273 1
0.09	0.200 4	0.136 4	0.082 7	0.038 5	0.030 8	0.056 2	0.082 3	0.096 2	0.112 7	0.174 6	0.215 7	0.245 1	0.266 9
0.10	0.192 7	0.132 4	0.080 7	0.037 3	0.029 5	0.053 7	0.078 7	0.097 7	0.107 8	0.165 9	0.205 1	0.233 3	0.254 2
0.12	0.188 5	0.122 9	0.077 8	0.034 5	0.030 5	0.055 6	0.076 6	0.094 8	0.105 7	0.160 9	0.197 3	0.223 8	0.243 6
0.14	0.189 9	0.123 0	0.077 2	0.035 7	0.029 7	0.053 7	0.073 4	0.090 3	0.104 6	0.157 0	0.184 4	0.208 3	0.227 0
0.15	0.188 8	0.122 1	0.076 8	0.033 1	0.029 4	0.053 4	0.069 3	0.090 8	0.105 9	0.159 4	0.194 3	0.208 6	0.227 8
0.16	0.190 8	0.122 6	0.077 6	0.033 9	0.030 1	0.054 4	0.074 8	0.092 2	0.107 1	0.161 3	0.196 2	0.210 3	0.230 1
0.18	0.191 8	0.123 9	0.074 0	0.035 2	0.029 0	0.052 6	0.072 0	0.088 5	0.102 9	0.155 7	0.190 8	0.207 5	0.228 1
0.20	0.191 2	0.123 5	0.076 8	0.035 7	0.029 7	0.053 9	0.070 9	0.090 9	0.105 6	0.159 2	0.194 6	0.212 3	0.233 3
0.25	0.191 7	0.124 3	0.077 0	0.035 5	0.029 5	0.053 3	0.069 8	0.085 9	0.104 5	0.150 0	0.184 4	0.211 7	0.235 5
0.30	0.195 6	0.125 8	0.075 4	0.035 9	0.029 8	0.053 5	0.073 1	0.089 7	0.104 2	0.152 3	0.189 1	0.219 4	0.246 6
0.35	0.191 2	0.129 8	0.077 5	0.034 0	0.029 5	0.053 4	0.070 0	0.090 9	0.106 4	0.163 8	0.195 2	0.227 4	0.256 7
0.40	0.195 0	0.131 8	0.078 4	0.033 9	0.030 1	0.051 6	0.070 9	0.093 2	0.108 9	0.159 6	0.201 9	0.238 1	0.270 9
0.45	0.198 7	0.128 2	0.077 9	0.035 8	0.029 8	0.054 4	0.072 8	0.089 9	0.108 6	0.163 8	0.208 5	0.247 5	0.283 4
0.50	0.200 2	0.127 6	0.079 8	0.036 7	0.030 7	0.056 0	0.077 1	0.095 4	0.111 5	0.168 6	0.216 1	0.257 7	0.296 3
0.60	0.199 6	0.128 4	0.077 5	0.037 7	0.030 1	0.054 9	0.076 1	0.097 8	0.111 4	0.177 9	0.231 7	0.278 7	0.321 8
0.70	0.204 6	0.131 8	0.083 3	0.036 7	0.032 3	0.056 4	0.081 9	0.097 9	0.115 5	0.187 3	0.246 8	0.299 6	0.347 5
0.80	0.208 8	0.133 9	0.084 6	0.037 0	0.033 2	0.058 0	0.084 9	0.100 9	0.119 3	0.196 4	0.260 3	0.316 3	0.367 4
0.90	0.207 7	0.132 6	0.085 0	0.036 9	0.033 4	0.057 8	0.086 0	0.102 1	0.121 3	0.202 3	0.270 0	0.329 0	0.382 3
1.00	0.211 5	0.134 7	0.086 1	0.039 8	0.031 8	0.058 9	0.083 2	0.104 9	0.125 0	0.210 3	0.281 6	0.343 5	0.398 6
1.25	0.212 4	0.139 3	0.084 3	0.041 0	0.033 8	0.063 0	0.088 8	0.112 6	0.134 9	0.230 7	0.309 6	0.377 6	0.436 5
1.50	0.216 5	0.143 5	0.087 8	0.041 0	0.036 1	0.067 9	0.096 3	0.122 6	0.147 1	0.252 2	0.340 2	0.413 0	0.475 9
2.00	0.226 1	0.153 8	0.095 2	0.045 1	0.040 4	0.076 7	0.109 0	0.139 1	0.167 8	0.290 5	0.389 2	0.470 3	0.536 1
2.50	0.231 1	0.160 7	0.100 6	0.048 0	0.043 9	0.083 5	0.119 7	0.153 3	0.185 1	0.321 3	0.426 2	0.510 2	0.576 5
3.00	0.237 0	0.166 7	0.105 6	0.050 8	0.046 7	0.089 1	0.128 2	0.164 5	0.198 3	0.341 7	0.450 8	0.533 9	0.598 3
3.50	0.245 7	0.175 6	0.112 1	0.054 3	0.050 2	0.096 0	0.137 5	0.176 2	0.212 8	0.363 0	0.473 3	0.556 3	0.619 1
4.00	0.248 4	0.179 3	0.115 3	0.055 5	0.051 5	0.098 9	0.142 6	0.183 2	0.220 5	0.372 7	0.481 9	0.561 4	0.621 2
4.50	0.258 3	0.187 3	0.120 4	0.058 4	0.054 0	0.103 5	0.149 1	0.191 1	0.229 9	0.385 1	0.495 0	0.573 2	0.630 5
5.00	0.264 9	0.194 2	0.126 4	0.061 3	0.056 7	0.108 0	0.154 9	0.197 5	0.237 1	0.391 7	0.498 4	0.573 2	0.627 1

图 5a-d 分别给出了总残差标准差、事件间标准差和事件内标准差关于谱周期变化的分布图, 由该图可见: 在谱周期 0.01—0.03 s 内, 事件内标准差和事件间标准差数值较小且相差不显著; 在大多数谱周期下低阻尼的事件内标准差大于事件间标准差(图 5a, b), 表明同一地震记录存在的离散性较大, 由此认为震源效应引起的误差在低阻尼的大多数谱周期情况下小于其它因素; 在高阻尼长周期的情况下, 事件内标准差小于事件间标准差(图 5c, d), 可以认为震源效应在高阻尼长周期引起的误差大于其它因素。

图 6 给出了阻尼比为 25% 情况下的场地内标准差和场地间标准差随谱周期的分布图。由图 6 可知: 在谱周期小于 0.06 s 时, I 类场地的场地内标准差和场地间标准差均大于其余场

表 4 阻尼修正系数模型的事件内残差标准差 σ
Table 4 Within-event standard deviation σ of DMF model

T/s	σ												
	$\zeta=1\%$	$\zeta=2\%$	$\zeta=3\%$	$\zeta=4\%$	$\zeta=6\%$	$\zeta=7\%$	$\zeta=8\%$	$\zeta=9\%$	$\zeta=10\%$	$\zeta=15\%$	$\zeta=20\%$	$\zeta=25\%$	$\zeta=30\%$
0.03	0.017 8	0.013 8	0.009 7	0.005 1	0.000 0	0.004 9	0.009 4	0.013 7	0.017 6	0.021 3	0.037 9	0.051 1	0.061 9
0.04	0.221 0	0.134 7	0.078 6	0.035 3	0.028 8	0.051 8	0.071 2	0.088 0	0.102 6	0.154 9	0.188 3	0.211 5	0.228 8
0.05	0.222 3	0.140 0	0.083 1	0.037 9	0.031 0	0.056 3	0.077 6	0.096 1	0.112 2	0.171 2	0.209 1	0.236 1	0.256 0
0.06	0.213 5	0.137 8	0.083 2	0.038 4	0.032 3	0.058 5	0.080 8	0.100 1	0.117 0	0.178 8	0.218 8	0.247 1	0.268 1
0.07	0.206 4	0.134 0	0.081 1	0.037 4	0.031 2	0.057 0	0.078 6	0.097 3	0.113 7	0.174 8	0.214 5	0.242 4	0.263 1
0.08	0.199 1	0.129 5	0.078 4	0.036 4	0.030 4	0.055 0	0.075 8	0.093 8	0.109 3	0.165 9	0.202 6	0.229 2	0.249 4
0.09	0.195 3	0.126 8	0.076 6	0.035 5	0.029 9	0.054 4	0.074 8	0.092 4	0.107 6	0.163 7	0.200 8	0.227 1	0.246 8
0.10	0.186 1	0.121 2	0.073 6	0.034 1	0.028 5	0.051 8	0.071 4	0.088 4	0.103 1	0.157 0	0.193 1	0.218 9	0.238 2
0.12	0.183 3	0.119 8	0.072 4	0.033 5	0.028 2	0.051 3	0.070 7	0.087 4	0.101 8	0.154 2	0.188 5	0.213 6	0.232 3
0.14	0.182 7	0.119 0	0.071 6	0.033 2	0.027 6	0.050 0	0.068 7	0.084 6	0.098 2	0.147 6	0.179 5	0.202 2	0.219 6
0.15	0.181 4	0.117 5	0.070 3	0.032 2	0.027 0	0.049 1	0.067 5	0.083 2	0.097 0	0.146 6	0.178 9	0.202 1	0.220 1
0.16	0.184 5	0.118 7	0.071 9	0.033 2	0.027 6	0.050 0	0.068 8	0.084 8	0.098 5	0.148 4	0.180 6	0.204 1	0.222 8
0.18	0.185 3	0.120 0	0.072 3	0.033 1	0.027 3	0.049 4	0.067 5	0.082 7	0.096 1	0.144 7	0.177 1	0.201 1	0.220 6
0.20	0.184 5	0.119 5	0.071 5	0.033 2	0.027 8	-0.050 5	0.069 2	0.085 1	0.098 8	0.148 5	0.181 4	0.206 0	0.225 5
0.25	0.184 0	0.118 8	0.071 4	0.032 9	0.027 3	0.049 3	0.067 8	0.083 4	0.096 9	0.144 5	0.176 5	0.201 1	0.221 7
0.30	0.188 1	0.120 8	0.072 9	0.033 5	0.027 9	-0.050 2	0.068 8	0.084 7	0.098 3	0.147 6	0.181 7	0.208 7	0.231 9
0.35	0.185 6	0.119 7	0.072 1	0.033 3	0.027 7	0.050 1	0.068 7	0.085 0	0.099 2	0.151 9	0.188 5	0.217 7	0.242 9
0.40	0.188 7	0.120 7	0.072 3	0.033 2	0.027 9	-0.050 6	0.069 5	0.085 8	0.100 1	0.154 8	0.194 0	0.226 4	0.254 2
0.45	0.192 2	0.123 6	0.073 6	0.033 7	0.028 3	0.051 4	0.070 8	0.087 3	0.101 8	0.156 9	0.197 7	0.231 8	0.261 7
0.50	0.193 4	0.123 4	0.074 5	0.034 3	0.028 6	0.052 2	0.071 9	0.088 8	0.103 6	0.160 3	0.202 0	0.237 1	0.268 4
0.60	0.191 4	0.122 7	0.074 2	0.034 3	0.029 0	0.052 8	0.072 9	0.090 4	0.105 9	0.165 7	0.211 6	0.250 0	0.283 3
0.70	0.195 4	0.125 9	0.075 5	0.035 1	0.029 5	0.053 8	0.074 5	0.092 4	0.108 5	0.171 5	0.220 6	0.262 2	0.297 4
0.80	0.199 8	0.128 1	0.076 8	0.035 5	0.030 1	0.054 7	0.075 6	0.093 8	0.110 2	0.176 3	0.228 3	0.271 8	0.308 7
0.90	0.198 2	0.127 1	0.076 4	0.035 4	0.029 9	0.054 9	0.076 5	0.095 7	0.113 0	0.182 0	0.236 1	0.280 8	0.318 7
1.00	0.199 6	0.127 0	0.075 8	0.035 0	0.029 7	0.054 8	0.076 8	0.096 2	0.113 9	0.185 8	0.242 1	0.287 9	0.326 1
1.25	0.201 3	0.130 1	0.078 4	0.036 5	0.031 3	0.058 0	0.081 2	0.102 1	0.121 5	0.199 9	0.259 8	0.307 2	0.346 0
1.50	0.201 9	0.131 7	0.080 0	0.037 2	0.032 4	0.060 1	0.084 6	0.106 5	0.126 4	0.208 1	0.271 4	0.321 3	0.361 7
2.00	0.196 5	0.130 1	0.080 4	0.038 1	0.033 7	0.063 1	0.088 9	0.112 2	0.133 5	0.219 6	0.284 9	0.336 0	0.376 7
2.50	0.195 7	0.132 5	0.082 4	0.039 2	0.035 0	0.065 4	0.092 5	0.117 2	0.139 9	0.232 2	0.299 5	0.351 3	0.390 6
3.00	0.190 2	0.130 3	0.082 1	0.039 5	0.035 4	0.066 6	0.094 4	0.119 6	0.142 4	0.234 6	0.302 1	0.352 0	0.390 3
3.50	0.194 9	0.135 9	0.086 0	0.041 2	0.036 9	0.069 5	0.098 4	0.124 7	0.148 3	0.243 0	0.309 7	0.358 2	0.395 1
4.00	0.187 0	0.132 2	0.084 8	0.040 8	0.037 0	0.069 8	0.099 2	0.125 7	0.149 5	0.242 6	0.307 1	0.353 0	0.387 1
4.50	0.185 7	0.132 6	0.085 0	0.041 1	0.037 0	0.069 5	0.098 5	0.124 5	0.147 9	0.239 3	0.301 5	0.345 3	0.378 0
5.00	0.189 1	0.135 9	0.087 4	0.042 1	0.037 9	0.070 5	0.099 4	0.125 2	0.148 3	0.237 2	0.296 4	0.337 8	0.368 3

地, 表明 I 类场地在短周期的离散性较大, 受路径和场地效应影响较大; 在谱周期小于 0.10 s 时, 场地内标准差小于场地间标准差, 表明短周期范围内场地效应引起的误差大于路径效应引起的误差; 在谱周期大于 0.10 s 时, 场地内残差大于场地间残差, 表明中长周期范围内场地效应引起的误差小于路径效应引起的误差. 理论上场地内残差主要来自于路径效应, 导致场地内标准差与场地类别基本无关, 而各类场地的场地间标准差则与场地类别在中长周期有一定的关系.

为了更加直观地分析模型残差, 采用最小二乘法对标准差进行拟合, 拟合公式为

表 5 阻尼修正系数模型的事件间残差标准差 τ

Table 5 Between-event standard deviation τ of DMF model

T/s	τ												
	$\zeta=1\%$	$\zeta=2\%$	$\zeta=3\%$	$\zeta=4\%$	$\zeta=6\%$	$\zeta=7\%$	$\zeta=8\%$	$\zeta=9\%$	$\zeta=10\%$	$\zeta=15\%$	$\zeta=20\%$	$\zeta=25\%$	$\zeta=30\%$
0.03	0.053 1	0.004 9	0.006 3	0.002 5	0.000 0	0.002 2	0.004 4	0.006 7	0.009 1	0.011 7	0.026 1	0.042 6	0.060 3
0.04	0.100 1	0.056 9	0.030 9	0.018 6	0.011 0	0.020 5	0.036 2	0.035 3	0.041 5	0.064 0	0.078 6	0.089 1	0.097 1
0.05	0.086 7	0.050 1	0.028 4	0.019 4	0.011 3	0.020 9	0.029 1	0.036 4	0.043 0	0.067 7	0.084 4	0.097 4	0.107 6
0.06	0.071 0	0.043 3	0.041 4	0.018 6	0.015 4	0.018 6	0.040 0	0.033 5	0.040 1	0.066 9	0.086 2	0.101 2	0.112 7
0.07	0.062 1	0.039 3	0.039 0	0.017 8	0.014 8	0.018 0	0.039 7	0.033 9	0.040 6	0.068 0	0.088 3	0.103 5	0.114 9
0.08	0.053 8	0.056 8	0.034 0	0.016 0	0.013 3	0.016 7	0.036 1	0.031 7	0.038 3	0.066 3	0.086 0	0.100 5	0.111 4
0.09	0.044 7	0.050 5	0.031 2	0.014 9	0.007 4	0.014 3	0.034 3	0.027 0	0.033 7	0.060 6	0.078 9	0.092 2	0.101 7
0.10	0.050 1	0.053 4	0.033 1	0.015 1	0.007 5	0.014 1	0.033 2	0.041 7	0.031 6	0.053 6	0.069 1	0.080 8	0.088 8
0.12	0.044 0	0.027 6	0.028 5	0.008 1	0.011 6	0.021 3	0.029 4	0.036 7	0.028 2	0.046 1	0.058 3	0.066 9	0.073 3
0.14	0.051 8	0.031 1	0.028 7	0.013 0	0.010 9	0.019 5	0.025 9	0.031 5	0.035 8	0.053 5	0.042 1	0.050 2	0.057 5
0.15	0.052 3	0.033 3	0.031 0	0.007 9	0.011 7	0.021 1	0.015 7	0.036 4	0.042 6	0.062 5	0.075 9	0.051 7	0.058 7
0.16	0.048 6	0.030 5	0.029 1	0.006 8	0.012 0	0.021 4	0.029 4	0.036 3	0.042 1	0.063 2	0.076 7	0.050 6	0.057 5
0.18	0.049 5	0.030 7	0.028 5	0.011 9	0.010 0	0.018 2	0.025 3	0.031 5	0.036 8	0.057 4	0.071 0	0.051 0	0.057 7
0.20	0.050 0	0.031 0	0.027 9	0.013 0	0.010 4	0.019 0	0.015 3	0.032 0	0.037 2	0.057 2	0.070 4	0.051 6	0.059 5
0.25	0.053 6	0.036 4	0.028 7	0.013 5	0.011 2	0.020 1	0.016 7	0.020 7	0.039 0	0.040 4	0.053 6	0.066 1	0.079 4
0.30	0.053 8	0.035 3	0.028 6	0.013 0	0.010 4	0.018 4	0.024 5	0.029 5	0.034 4	0.037 6	0.052 4	0.067 6	0.084 0
0.35	0.045 9	0.050 1	0.028 5	0.006 8	0.010 1	0.018 3	0.013 4	0.032 4	0.038 4	0.061 4	0.050 7	0.065 6	0.083 0
0.40	0.049 3	0.053 1	0.030 3	0.007 2	0.011 3	0.010 0	0.014 1	0.036 3	0.042 8	0.038 6	0.055 7	0.073 7	0.093 7
0.45	0.050 5	0.034 2	0.025 4	0.012 2	0.009 4	0.017 8	0.017 0	0.021 6	0.037 8	0.047 1	0.066 3	0.086 9	0.108 7
0.50	0.051 6	0.032 5	0.028 5	0.013 2	0.011 0	0.020 1	0.027 7	0.034 7	0.041 1	0.052 3	0.076 9	0.101 0	0.125 5
0.60	0.056 4	0.037 7	0.031 9	0.015 4	0.008 0	0.015 2	0.021 7	0.037 2	0.034 7	0.064 8	0.094 3	0.123 3	0.152 8
0.70	0.060 5	0.039 1	0.035 2	0.010 8	0.013 2	0.016 8	0.034 0	0.032 2	0.039 6	0.075 3	0.110 6	0.144 9	0.179 7
0.80	0.060 8	0.038 9	0.035 5	0.010 7	0.014 1	0.019 2	0.038 6	0.037 0	0.045 7	0.086 3	0.125 1	0.161 9	0.199 3
0.90	0.062 2	0.037 9	0.037 3	0.010 3	0.014 8	0.018 2	0.039 3	0.035 4	0.044 1	0.088 4	0.131 0	0.171 5	0.211 1
1.00	0.069 7	0.044 8	0.040 7	0.019 0	0.011 3	0.021 6	0.031 9	0.041 8	0.051 7	0.098 6	0.143 8	0.187 3	0.229 1
1.25	0.067 6	0.049 9	0.038 5	0.018 6	0.012 8	0.024 5	0.036 0	0.047 5	0.058 7	0.115 0	0.168 3	0.219 5	0.266 2
1.50	0.078 1	0.057 1	0.044 7	0.017 1	0.016 0	0.031 5	0.046 0	0.060 7	0.075 3	0.142 6	0.205 2	0.259 5	0.309 3
2.00	0.111 8	0.082 0	0.050 9	0.024 2	0.022 3	0.043 5	0.063 1	0.082 2	0.101 6	0.190 2	0.265 2	0.329 1	0.381 4
2.50	0.123 0	0.091 0	0.057 7	0.027 8	0.026 5	0.051 9	0.076 0	0.098 9	0.121 2	0.222 1	0.303 3	0.370 0	0.423 9
3.00	0.141 4	0.103 9	0.066 4	0.032 0	0.030 4	0.059 1	0.086 8	0.112 9	0.138 0	0.248 5	0.334 6	0.401 4	0.453 5
3.50	0.149 6	0.111 2	0.071 8	0.035 3	0.034 1	0.066 2	0.096 0	0.124 5	0.152 6	0.269 6	0.357 9	0.425 6	0.476 6
4.00	0.163 6	0.121 1	0.078 2	0.037 7	0.035 9	0.070 1	0.102 4	0.133 3	0.162 0	0.282 9	0.371 4	0.436 5	0.485 8
4.50	0.179 5	0.132 3	0.085 3	0.041 4	0.039 3	0.076 7	0.111 9	0.145 0	0.176 0	0.301 7	0.392 6	0.457 5	0.504 5
5.00	0.185 6	0.138 7	0.091 3	0.044 6	0.042 2	0.081 9	0.118 8	0.152 8	0.185 0	0.311 7	0.400 7	0.463 1	0.507 5

$$\sigma_{s\zeta,k} = \begin{cases} \alpha_{1k}\ln\zeta + \lambda_{1k} & \zeta < 0.05, \\ \mu_{1k}\ln\zeta + \lambda_{1k} & \zeta > 0.05, \end{cases} \tag{13a}$$

$$\tau_{s\zeta,k} = \begin{cases} \alpha_{2k}\ln\zeta + \lambda_{2k} & \zeta < 0.05, \\ \mu_{2k}\ln\zeta + \lambda_{2k} & \zeta > 0.05, \end{cases} \tag{13b}$$

$$\tau_{\zeta} = \begin{cases} \alpha_{3k}\ln\zeta + \lambda_3 & \zeta < 0.05, \\ \mu_{3k}\ln\zeta + \lambda_3 & \zeta > 0.05, \end{cases} \tag{13c}$$

$$\sigma_{T\zeta,k} = \sqrt{\sigma_{s\zeta,k}^2 + \tau_{s\zeta,k}^2 + \tau_{\zeta}^2}, \tag{13d}$$

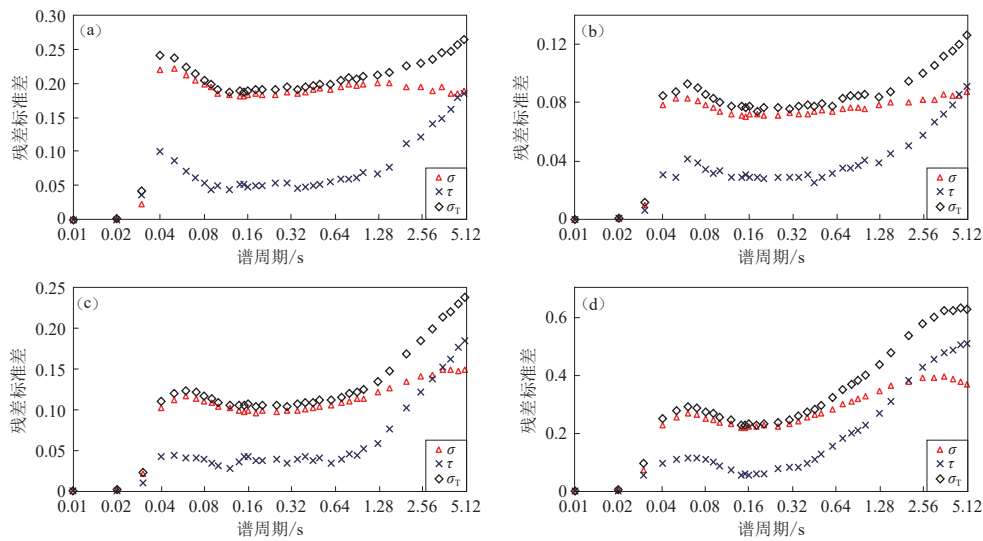


图 5 阻尼修正系数 DMF 模型的残差标准差关于谱周期的分布图

Fig. 5 The distribution of standard deviations of DMF models

(a) $\zeta=1\%$; (b) $\zeta=3\%$; (c) $\zeta=10\%$; (d) $\zeta=30\%$

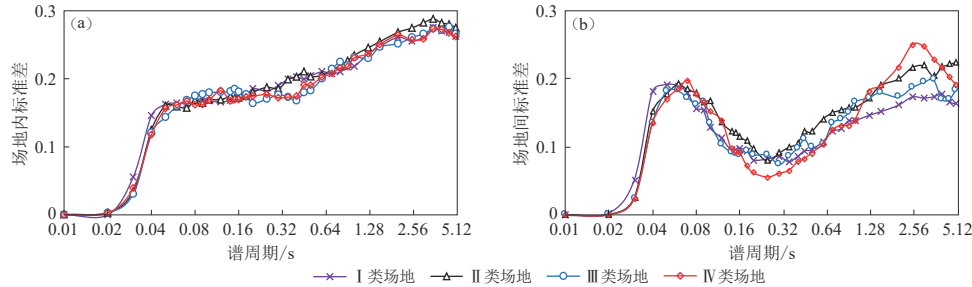


图 6 阻尼比为 25% 时四类场地的场地内标准差(a)和场地间标准差(b)分布图

Fig. 6 Distribution of within-site (a) and between-site (b) standard deviation for

four site classes for a damping ratio of 25%

式中, α , μ , λ 为模型回归系数, k 为场地类别。

图 7 给出了四类场地 DMF 模型标准差关于对数坐标系下的阻尼比变化图, 由该图可见, 以阻尼比 5% 为界, 标准差随阻尼比的变化呈现不同的趋势。然而在推导模型系数时, 式(13)并不满足 DMF 模型的边界条件, 即不满足在阻尼比等于 5% 时, 标准差等于零, 这是因为在阻尼比接近 5% 时, 标准差很小, 不会影响残差模型的准确性, 而如果强制满足边界条件, 会使得标准差显著增大。

图 8 给出了阻尼比为 25%, 谱周期分别为 0.10 s 和 3.0 s 时的事件间残差关于矩震级和断层深度的分布图。由图可见, 残差图的趋势线斜率不为零, 矩震级和断层深度对事件间残差分布有一定影响, 表明未考虑矩震级和断层深度的模型拟合度欠佳。由图 8a 和 8c 可见, 短周期与长周期下的事件间残差拟合线斜率正负不一致, 表明模型可能在不同周期对矩震级的评估不一致。由图 8b 和 8d 可见, 短周期与长周期下的事件间残差拟合线斜率正负不一致, 表明模型可能在不同周期对断层深度的评估不一致, 存在低估或高估的情况。

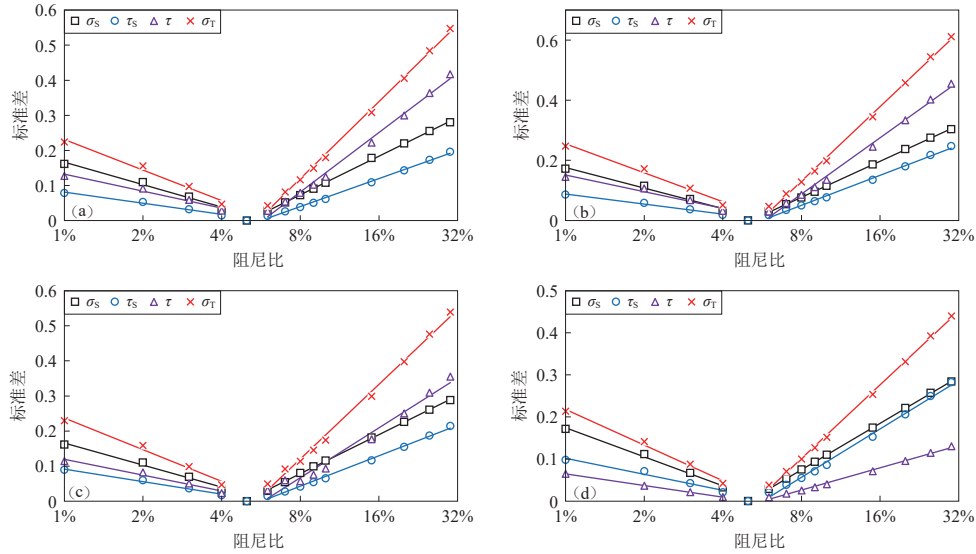


图 7 $T=2.5$ s 时阻尼修正系数 DMF 模型标准差关于对数坐标系下阻尼比的变化图

(a) I 类场地; (b) II 类场地; (c) III 类场地; (d) IV 类场地

Fig. 7 Variations of standard deviation of DMF model with damping ratio at logarithmic scale by $T=2.5$ s

(a) Site class I ; (b) Site class II ; (c) Site class III ; (d) Site class IV

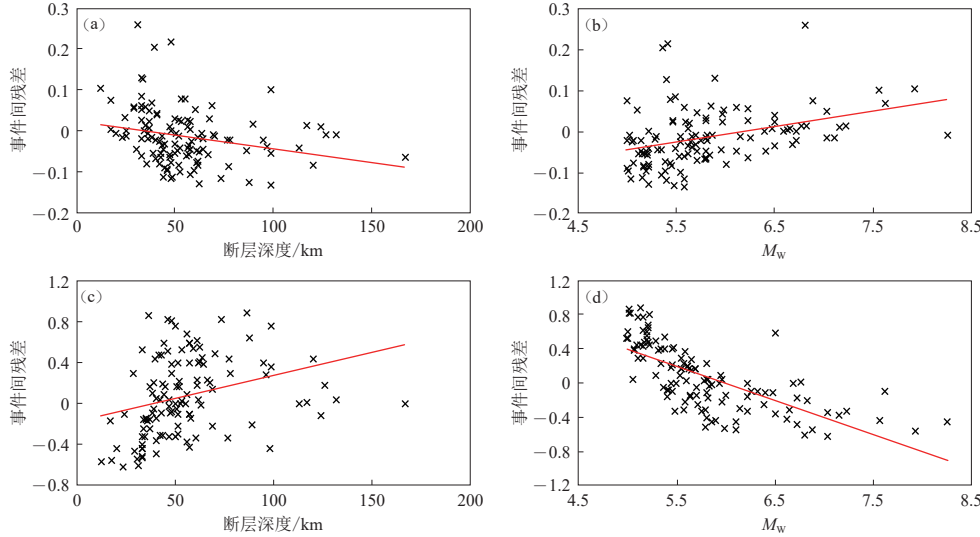


图 8 阻尼比为 25% 时阻尼修正系数 DMF 模型事件间残差分布图

(a) $T=0.1$ s 时残差关于断层深度的分布图; (b) $T=0.1$ s 时残差关于矩震级的分布图;

(c) $T=3.0$ s 时残差关于断层深度的分布图; (d) $T=3.0$ s 时残差关于矩震级的分布图

Fig. 8 The distributions of between-event residuals of DMF model for a damping ratio of 25%

(a) The distribution of residuals with respect to fault depth at $T=0.1$ s; (b) The distribution of residuals with respect to moment magnitude at $T=0.1$ s; (c) The distribution of residuals with respect to fault depth at $T=3.0$ s;

(d) The distribution of residuals with respect to moment magnitude at $T=3.0$ s

图 9 给出了阻尼比为 25%，谱周期分别为 0.10 s 和 3.0 s 时的事件内残差关于断层距离和矩震级分布图。由图 9a 和 9b 可见，趋势线几乎水平，表明矩震级对事件内残差分布的影响很小。由图 9c 和 9d 可见，短周期与长周期下的事件内残差拟合线斜率正负不一致，表明模型在不同周期可能对断层距离的评估不一致，存在低估或高估的情况。综上可见，本文提出的 DMF 模型可用于调整不考虑地震震源和距离参数的设计反应谱，模型残差分布与地震动参数存在相关性，其中矩震级和断层深度对事件内残差分布有影响，事件内残差分布与断层距离显著相关，因此对于地震震源和距离参数可知的设计反应谱，DMF 模型应考虑矩震级、断层距离和断层深度等因素的影响。

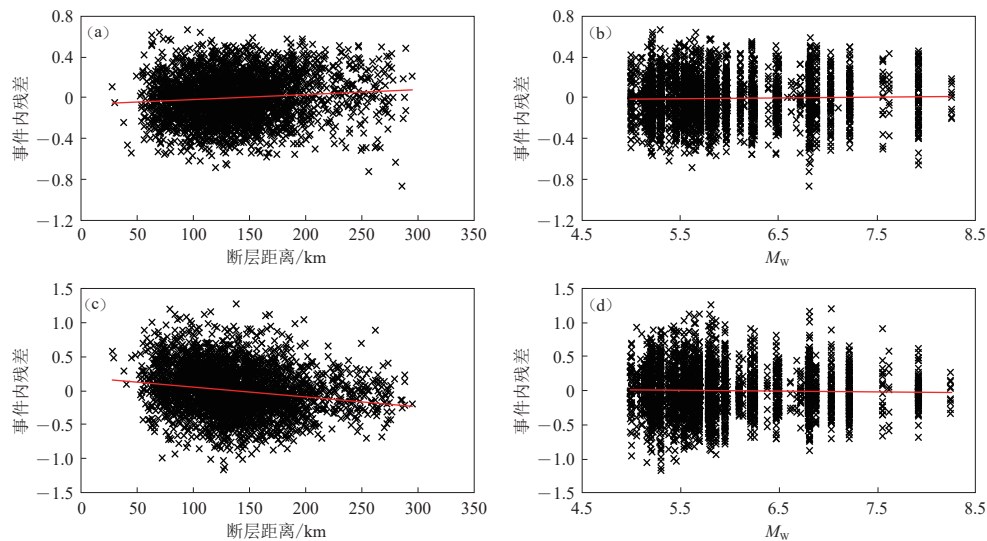


图 9 阻尼比为 25% 时 DMF 模型事件内残差分布图

(a) $T=0.1$ s 时残差关于断层距离的分布图; (b) $T=0.1$ s 时残差关于矩震级的分布图; (c) $T=3.0$ s 时残差关于断层距离的分布图; (d) $T=3.0$ s 时残差关于矩震级的分布图

Fig. 9 The distributions of within-event residuals of DMF model for a damping ratio of 25%

(a) The distribution of residuals with respect to fault distance at $T=0.1$ s; (b) The distribution of residuals with respect to moment magnitude at $T=0.1$ s; (c) The distribution of residuals with respect to fault distance at $T=3.0$ s; (d) The distribution of residuals with respect to moment magnitude at $T=3.0$ s

4 讨论与结论

近些年来收集到的地震记录表明，在震源距离较小时竖向地震动的中高频往往大于水平向反应谱，同时，竖向地震动对大部分结构的影响也不可忽视，特别是对大跨桥梁和开间较大的建筑结构，这两个原因表明研究竖向反应谱阻尼修正系数理论和实践上有着几乎相同的必要。

本文利用日本 K-NET 和 KiK-net 强震台网获取的 4 695 条板内竖向地震记录，考虑阻尼比、谱周期和场地类别的影响，提出了适用于俯冲带板内地震的竖向加速度反应谱 DMF 模型，所得结论如下：

1) 本文提出的 DMF 模型适用于调整地震震源和距离参数未知的设计反应谱来得到非

5% 阻尼比反应谱。

2) 阻尼比对 DMF 的影响可以通过 $\ln(\zeta/0.05)$ 的三次多项式来模拟, 周期对 DMF 的影响可以通过周期对数值的四次多项式来模拟, 并利用 Z 检验得出场地类别对 DMF 的影响不可忽略, 分场地类别建立 DMF 模型是必要的。

3) 残差关于矩震级、断层距离和断层深度分布图的趋势线斜率不为零, 在绝大多数周期下, 震源效应对残差分布的影响要小于场地效应及路径效应, 但在高阻尼长周期下, 震源效应对残差分布的影响较显著, 表明在应用于已知震源和路径系数时, 阻尼修正系数还需要考虑其它相关因素的影响, 这将是本文模型改进的重点内容。

4) 我国台湾属于俯冲带地区, 不属于极端的“弱”耦合带或“强”耦合带, 本文模型可以为我国台湾地区竖向 DMF 模型的建立提供参考。

参 考 文 献

- 郝安民, 周德源, 李亚明, 张晖. 2012. 考虑震级影响的规范阻尼修正系数评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), **40**(5): 657–661.
- Hao A M, Zhou D Y, Li Y M, Zhang H. 2012. Evaluation of damping modification factors in codes with a consideration of effect of earthquake magnitude[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, **40**(5): 657–661 (in Chinese).
- 蒋建, 吕西林, 周颖, 蒋欢军. 2009. 考虑场地类别的阻尼比修正系数研究[J]. 地震工程与工程振动, **29**(1): 153–161.
- Jiang J, Lü X L, Zhou Y, Jiang H J. 2009. Research on modification factors of damping ratios considering site conditions[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **29**(1): 153–161 (in Chinese).
- Abrahamson N A, Youngs R R. 1992. A stable algorithm for regression analyses using the random effects model[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **82**(1): 505–510.
- Ambraseys N N, Douglas J. 2003. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **23**(1): 1–18.
- Bozorgnia Y, Campbell K W. 2004. The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra[J]. *J Earthq Eng*, **8**(2): 175–207.
- Brillinger D R, Preisler H K. 1984. An exploratory analysis of the Joyner-Boore attenuation data[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **74**(4): 1441–1450.
- Japan Road Association. 1980. *Specifications for Highway Bridges. Part V, Seismic Design*[S]. Tokyo: Maruzen Company Limited: 24–25.
- Jiang F, Zhao J X. 2017. A ground-motion prediction equation for vertical spectra of the strong-motion records from the subduction slab events in Japan using site class as the site term[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **107**(5): 2328–2341.
- Li H, Chen F. 2017. Damping modification factors for acceleration response spectra[J]. *Geodesy Geodyn*, **8**(5): 361–370.
- Lin Y Y, Chang K C. 2003. Study on damping reduction factor for buildings under earthquake ground motions[J]. *J Struct Eng*, **129**(2): 206–214.
- Lin Y Y, Chang K C. 2004. Effects of site classes on damping reduction factors[J]. *J Struct Eng*, **130**(11): 1667–1675.
- Newmark N M, Hall W J. 1982. *Earthquake Spectra and Design*[M]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Institute: 1–103.
- Rezaeian S, Bozorgnia Y, Idriss I M, Abrahamson N, Campbell K, Silva W. 2014. Damping scaling factors for vertical elastic response spectra for shallow crustal earthquakes in active tectonic regions[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 1335–1358.
- Xiang Y, Huang Q L. 2019. Damping modification factor for the vertical seismic response spectrum: A study based on Japanese earthquake records[J]. *Eng Struct*, **179**: 493–511.
- Zhao J X, Irikura K, Zhang J, Fukushima Y, Somerville P G, Asano A, Ohno Y, Oouchi T, Takahashi T, Ogawa H. 2006a. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **96**(3): 914–925.

- Zhao J X, Zhang J, Asano A, Ohno Y, Oouchi T, Takahashi T, Ogawa H, Irikura K, Thio H K, Somerville P G, Fukushima Y, Fukushima Y. 2006b. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **96**(3): 898–913.
- Zhao J X, Zhou S L, Gao P J, Long T, Zhang Y B, Thio H K, Lu M, Rhoades D A. 2015. An earthquake classification scheme adapted for Japan determined by the goodness of fit for ground-motion prediction equations[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **105**(5): 2750–2763.
- Zhao J X, Zhou S L, Zhou J, Zhao C, Zhang H, Zhang Y B, Gao P J, Lan X W, Rhoades D, Fukushima Y, Somerville P G, Irikura K. 2016a. Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **106**(4): 1552–1569.
- Zhao J X, Liang X, Jiang F, Xing H, Zhu M, Hou R B, Zhang Y B, Lan X W, Rhoades D A, Irikura K, Fukushima Y, Somerville P G. 2016b. Ground-motion prediction equations for subduction interface earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **106**(4): 1518–1534.
- Zhao J X, Jiang F, Shi P, Xing H, Huang H F, Hou R B, Zhang Y B, Yu P C, Lan X W, Rhoades D A, Somerville P G, Irikura K, Fukushima Y. 2016c. Ground-motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **106**(4): 1535–1551.
- Zhao J X, Jiang F, Ma Y, Zhou J, Cheng Y, Chang Z W. 2017. Ground-motion prediction equations for the vertical component from shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site classes as the site term[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **107**(5): 2310–2327.
- Zhao J X, Yang Q S, Su K W, Liang J G, Zhou J, Zhang H, Yang X G. 2019. Effects of earthquake source, path, and site conditions on damping modification factor for the response spectrum of the horizontal component from subduction earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **109**(6): 2594–2613.
- Zhou J, Zhao J X. 2020. A damping modification factor prediction model for horizontal displacement spectrum from subduction interface earthquakes in Japan accounting for site conditions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **110**(3): 1231–1246.