

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211224001

深厚沉积层对地震动持时影响的初步分析*

赵茗^{1,2}, 张齐^{1,2}, 彭刚^{1,2}, 谢礼立^{3,4}

(1. 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002.; 3. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江哈尔滨 150080; 4. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090)

摘要: 基于 NGA-West2 和 NIED 数据库, 以地震动 70% 重要持时和 90% 重要持时为研究对象。利用获取的 9 361 组强震记录, 采用随机效应回归和残差分析的方法, 对典型持时预测模型进行改进, 并探究了深厚沉积层对地震动重要持时的影响规律。结果表明: (1) 场地沉积层厚度对地震动持时有显著影响, 随着沉积层厚度的增大, 地震动持时呈现出对数线性增长的趋势; (2) 地震动持时的沉积层厚度效应与地震动强度具有相关性。重要持时随 $Z_{2.5}$ 的对数线性变化系数随地震动强度的增大而减小; (3) 地震动持时分别随着震级和断层距的增大而增大, 随着 V_{S30} 的增大而减小; (4) 在强震、远场以及软弱场地条件下, 深厚沉积层对地震动持时的放大作用越显著。在高层结构的抗震设计时, 考虑深厚沉积层场地对地震动持时的影响是有必要的。

关键词: 深厚沉积层; 预测模型; 残差分析; 强地震动; 重要持时

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0692-09

Preliminary Analysis of the Influence of Deep Sediment Layer on Ground Motion Duration

ZHAO Ming^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2}, PENG Gang^{1,2}, XIE Lili^{3,4}

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, Yichang 443002, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. Institute of Engineer Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

4. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Based on NGA-West2 and NIED databases, the study object was 70% and 90% significant duration of ground motion. Using the obtained 9 361 sets of strong seismic records, the classical duration prediction model is improved by random effect regression and residual analysis, and the influence of the deep sediment layer on the significant duration of ground motion is explored. The results show that: (1) The thickness of the sediment layer has a significant effect on the duration of ground motion. With the increase of sediment layer thickness, the duration shows a logarithmic linear increase trend. (2) The effect of sediment thickness during ground motion is correlated with ground motion intensity. The significant duration decreases with the increase of the logarithmic linear variation coefficient of $Z_{2.5}$. (3) The duration increases with the increase of magnitude and fault distance, and decreases with

* 收稿日期: 2021-12-24; 修回日期: 2022-12-15

基金项目: 湖北省教育厅研究计划优秀中青年人才项目(Q20191210)资助

作者简介: 赵茗(1997—), 女, 硕士研究生。主要从事结构工程研究工作。E-mail: 871557562@qq.com

通讯作者: 张齐(1988—), 男, 讲师, 博士。主要从事地震工程研究。E-mail: zhangqi_1988@hotmail.com

the increase of V_{s30} ; (4) Under the conditions of a strong earthquake, far-field ground motion and weak site, the amplification effect of the deep sediment layer on the seismic duration is more significant. When designing the seismic resistance of high-rise buildings, it is necessary to consider the influence of deep sediment layers on the duration of ground motion.

Keywords: deep sediment layer; prediction model; residual analysis; strong ground motion; significant duration

0 引言

振幅、频谱和持时是描述地震动特性的三大要素^[1]。由于地震动持时对结构的弹性阶段影响较小,其主要影响体现于结构进入非线性阶段之后。目前很多工程抗震分析只考虑振幅和频谱的影响,而忽略了地震动持续时间的影响。随着经济的发展,超高层建筑越来越多,且中国很多大城市位于深厚沉积层之上。当结构进入非线性阶段时,地震动持时对结构响应和损伤有着显著的影响^[2-4]。M. Raghunandan^[5]对具有不同结构特性的非线性多自由度模型进行了增量动力分析,研究了钢筋混凝土结构倒塌情况受地震动持续时间的影响,结果表明地震动持续时间越长,建筑物倒塌的风险越高。孙小云等^[6-7]从地震动持续时间特性及持续时间对RC框架结构非线性地震响应、易损性以及抗倒塌能力评估的影响等方面展开研究,发现较长持时地震动使结构在各损伤极限状态的超越概率和倒塌概率明显增加。陶磊等^[8]基于汶川地震时的西安远场记录,在有较多长周期和超长地震动持时的远场地震中,超高层建筑受远场地震的动力响应大于EI Centro记录,且易与远场长周期部分发生共振。因此,地震动持时的重要性逐渐被工程、社会所认识。

随着地震动持时数据的丰富和研究的深入,考虑不同因素对地震动持时的影响逐步发展。赵艳等^[9]通过美国强震记录,研究了不同场地条件对地震动70%重要持时的影响,震级越大持时越长,且当震级一定时,不同场地随震中距的变化趋势差别越大。白玉柱等^[10]基于芦山强震记录,回归地震动持时的空间变化曲线,发现芦山地震持时大于预测平均值,地震动持续时间和震源持时无上盘效应,原因可能与隐伏发震构造有关。徐培彬等^[11]以中国的强震动记录为基础,利用随机效应回归方法建立适用于中国地震动重要持时的预测方程,表明震级和距离越大,地震动持时越大;软土地震

动持时整体上大于硬土地震。李新乐等^[12]基于近断层强震观测记录,采用统计分析的方法进行研究,结果表明震级对地震动持时的影响大于断层距的影响。

部分学者在分析地震动幅值和频谱特性时考虑了场地覆盖土层厚度的影响^[13-15],但深厚沉积层场地对地震动持时的影响研究较少。鉴于前文所述地震动持时特性对结构非线性行为和倒塌具有显著影响,尤其对于超高层建筑和高耸结构,而我国大量城市超高层建筑和高耸结构都位于深厚沉积层地区。因此,探索深厚沉积层场地对地震动持时的影响具有重要的工程意义。本文基于强震观测资料,通过残差分析的方法,初步探讨了深厚沉积层场地对两个常用地震动重要持时(D_{5-75} , D_{5-95})的影响。

1 数据集建立

本文选取纬度为 $35^{\circ}\sim 38^{\circ}$,经度为 $138^{\circ}\sim 141^{\circ}$ 区间范围内地区的台站记录进行分析,台站分布、震源分布及该地区的沉积层厚度分布如图1所示。所用数据来自美国太平洋地震工程中心PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)和日本防灾科学技术研究所NIED(Nation Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)。选取该区域内震级范围 $M 5.0\sim 7.5$,距离 $0\sim 200$ km,震源深度 $0\sim 30$ km,地震记录数大于5条的浅层地震记录构成的强震数据集,最终数据集共由206次地震的9 361条地震记录组成,限于篇幅未列出地震列表。绘制震级与断层距的分布图,如图2。本文台站的 V_{s30} (场地地表以下30 m范围内的平均剪切波速)与 $Z_{2.5}$ (剪切波速达到2 500 m/s时的深度)信息均来自NGA-West2数据库,其余信息来自于NIED数据库。并绘制沉积层厚度参数 $Z_{2.5}$ 的频率直方图,分别取 $0\sim 2 000$ m以及 $2 000\sim 5 000$ m范

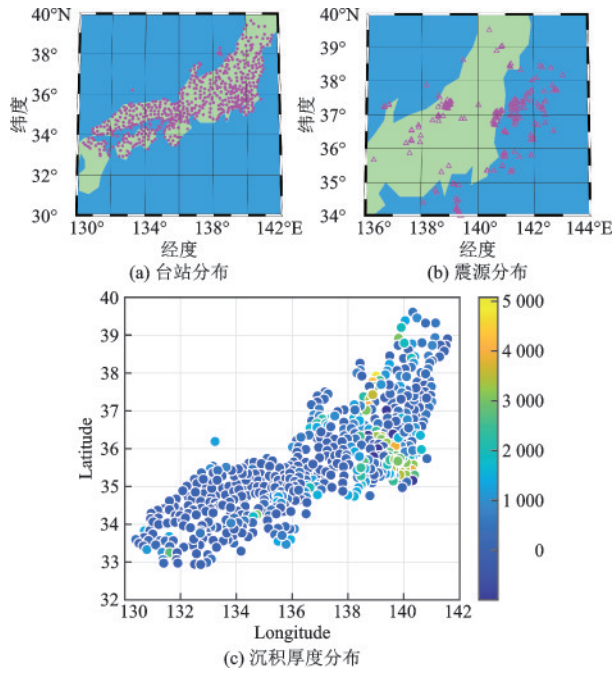


图1 研究区域的台站分布与沉积厚度分布

Fig.1 The distribution of stations and sedimentary thickness in the study area

围内的峰值点对应的 $Z_{2.5}$ (401.4 m 和 2 977 m) 作为两个沉积层厚度的代表值,如图3所示。

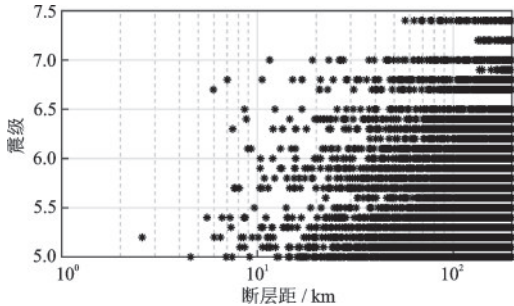


图2 本文所选数据集震级与断层距的分布

Fig.2 Distribution of magnitude and fault distance of the data set selected in this paper

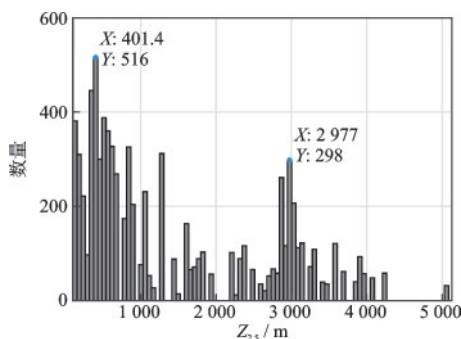


图3 沉积层厚度参数 $Z_{2.5}$ 的频率直方图

Fig.3 Frequency histogram of the thickness parameter $Z_{2.5}$ of sedimentary layer

2 地震动持时的回归模型

地震动持时主要包括括号持时、一致持时和重要持时。其中,重要持时是基于地震动能量积累过程定义的,由场地加速度平方的积分表示^[16]。本文研究对象为 90% 重要持时 (D_{5-95}) 和 70% 重要持时 (D_{5-75})^[17]。

为研究深厚沉积层场地对地震动持时的影响,建立更符合实际情况的地震动持时预测模型。首先,基于地震动持时的典型模型,采用随机效应回归方法得到典型模型的事件间残差与事件内部残差,并对回归结果进行可靠性检验;再采用残差分析方法,探究地震动持时随沉积层厚度的变化规律。同时讨论沉积层厚度对地震动持时的影响是否与地震动水平相关,对地震动持时的典型模型进行改进,得到地震动持时的改进模型。

2.1 典型模型建立

以 NGA-West2 震级 M 分布在 5.0~7.5 区间内、断层距为 0~200 km 的 9 361 组可用记录为分析对象,结合孙晓丹等^[18]与 J. J. Bommer 等^[19]学者提出的持时预测模型,建立地震动持时的典型模型,如:

$$\ln T_a = a_1 + a_2 M + a_3 D_{\text{clst}} + a_4 \ln V_{s30} + \eta_i + \epsilon_{ij} \quad (1)$$
 式中, M 为震级; D_{clst} 为场地到破坏面的最短距离,称为断层距; V_{s30} 为场地地表以下 30 m 范围内的平均剪切波速; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为回归系数; η_i 为事件间残差,表示第 i 个地震记录间的平均误差; ϵ_{ij} 为事件内部残差,表示第 i 次地震 j 个台站记录的误差; η_i 和 ϵ_{ij} 服从均值为 0 的正态分布。

为检验上述模型回归结果的可靠性,图4中给出了 D_{5-75} 和 D_{5-95} 预测模型事件间残差随震级、事件内部残差分别随断层距以及 V_{s30} 的分布情况。观察图4可得,70% 重要持时和 90% 重要持时的事件间残差随震级以及事件内部残差随断层距和 V_{s30} 的分布无明显偏态,残差对各变量的分布在各区间均符合 0 均值正态分布假设,表明上述回归结果可靠性较好。

2.2 改进模型建立

目前大多数地震动持时模型中未考虑沉积层厚度的影响。为了探讨沉积层厚度对地震动持时

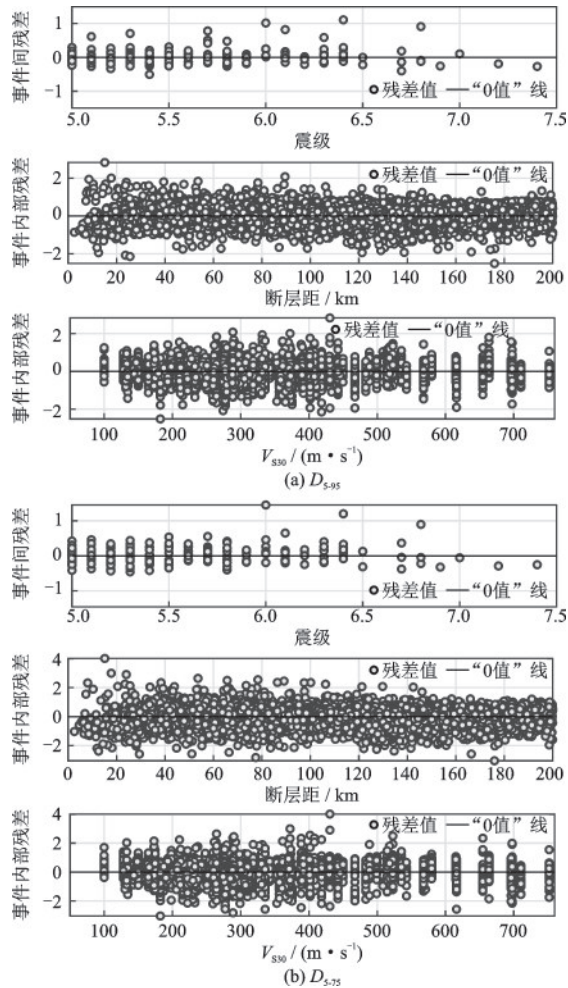


图4 重要持时残差分布

Fig.4 Residual distribution of significant duration

的影响。图5给出了上述典型模型(公式1)对 D_{5-95} 和 D_{5-75} 得到的事件内部残差随 $Z_{2.5}$ 的分布。从图5可以发现,总体上模型对 D_{5-95} 和 D_{5-75} 的事件内部残差随 $Z_{2.5}$ 的增大而增大,表明随着 $Z_{2.5}$ 的增大,地震动持时增加。

为了更加直观地反映变化趋势,图5中给出了分别采用 $Z_{2.5}$ 的对数函数和线性函数对残差的拟合曲线(考虑到工程应用要求的简单性和方便性,本文并未讨论其他更加复杂的函数形式)。采用 $Z_{2.5}$ 的线性函数对模型事件内部残差进行拟合时,对 D_{5-95} 和 D_{5-75} 残差的拟合优度 R^2 分别为0.748和0.640,而采用 $Z_{2.5}$ 的对数函数对模型事件内部残差进行拟合时, D_{5-95} 和 D_{5-75} 残差的拟合优度 R^2 分别为0.910和0.854。对比表明,对于 D_{5-95} 和 D_{5-75} ,采用 $Z_{2.5}$ 的对数函数对模型事件内部残差进行拟合具有更好的拟合优度。相对于线性函数,对数函数形式更加符合事件内部残差随 $Z_{2.5}$ 的变化关系。综上所述

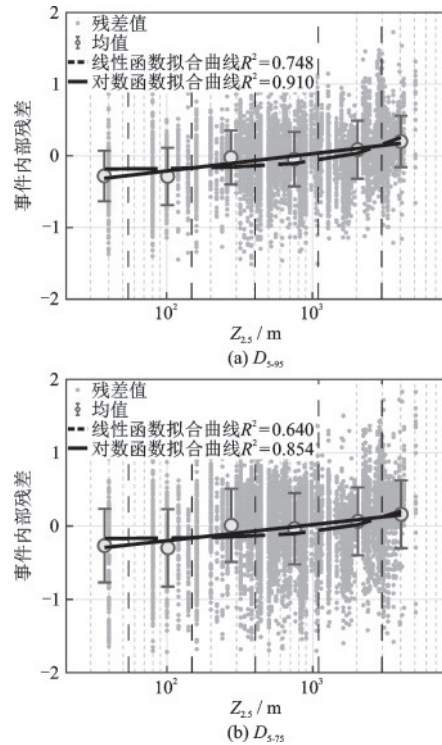


图5 事件内部残差与 $Z_{2.5}$ 的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of $Z_{2.5}$ and internal residuals of events

本文认为 D_{5-95} 和 D_{5-75} 均与 $Z_{2.5}$ 整体上呈对数线性增长的关系。

进一步分析,考虑到 $Z_{2.5}$ 本质上与 V_{S30} 类似,同样是一个场地参数, $Z_{2.5}$ 对地震动的影响可以视为场地效应的一部分^[20-21]。鉴于在典型模型中考虑了 V_{S30} 对持时的影响,有必要讨论 $Z_{2.5}$ 对持时特性影响是否具有独立性。图6中给出了 $Z_{2.5}$ 与 V_{S30} 的分布,图中并未表现出 $Z_{2.5}$ 与 V_{S30} 之间存在显著的相关性。利用Pearson检验对本文数据集中 $Z_{2.5}$ 与 V_{S30} 之间的相关性进行分析,分析结果见表1。检验结果两者之间相关性比较弱(相关系数为-0.293,绝对值小于0.4),且显著性参数远小于0.05。因此,可以认为 $Z_{2.5}$ 与 V_{S30} 两者为相互独立的场地变量。

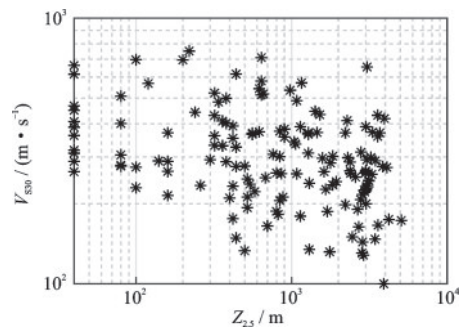


图6 V_{S30} 与 $Z_{2.5}$ 的分布

Fig.6 Distribution of V_{S30} and $Z_{2.5}$

表1 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient

Pearson 检验		$Z_{2.5}$
V_{S30}	Pearson 相关系数	-0.293
	显著参数	3.03×10^{-150}
	样本数量	9 361

理论上,场地效应主要与地震动水平以及土层本身特性两个方面有关。为研究地震动水平对持时预测模型中 $Z_{2.5}$ 项的影响,本文采用峰值加速度 PGA 作为地震动水平表征参数。根据 PGA 大小,将本文所用记录分为 $0.05g \sim 0.1g$, $0.1g \sim 0.5g$, $0.5g \sim 1g$, $1g \sim 1.5g$ 四个区间,分别给出各个区间内典型模型(公式1)预测结果事件内残差随 $Z_{2.5}$ 的变化趋势,见图7和图8。图中给出了残差与 $\ln(Z_{2.5})$ 的拟合曲线。比较不同 PGA 水平下,残差对 $\ln(Z_{2.5})$ 的拟合系数 k (见表2),发现随着 PGA 增加,拟合系数 k 减小,当 PGA 增大到一定程度时,拟合系数 k 变为负值。这表明 $Z_{2.5}$ 对持时的影响与地震动水平是相关的。 $\ln(Z_{2.5})$ 对地震动持时的影响系数与地震动水平成负相关关系,即随着地震动水平的增大, $\ln(Z_{2.5})$ 对地震动持时的影响系数逐渐减小。

综合以上分析:本文对于沉积层厚度对地震动持时的影响得出以下两点认识:

(1) $Z_{2.5}$ 对地震动重要持时存在显著影响,且 D_{5-95} 和 D_{5-75} 与 $Z_{2.5}$ 之间存在对数线性关系。

(2) $Z_{2.5}$ 对地震动持时的影响与地震动水平是相关的, $\ln(Z_{2.5})$ 对持时 $\ln(T_d)$ 的影响系数与地震动水平呈负相关。

根据上述两个认识,对典型模型(公式1)进行改进得到如下改进模型:

$$\ln T_d = c_1 + c_2 M + c_3 D_{\text{cst}} + c_4 \ln V_{S30} + (c_5 + c_6 * PGA_r) \ln Z_{2.5} + \eta_i + \epsilon_{ij} \quad (2)$$

式中, PGA_r 为地震动峰值加速度参考值,可根据已有地震动衰减关系模型计算得到,单位为 g ; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ 为回归系数。

针对上述改进模型,进行一下两点说明:(1)在上述改进模型中,采用已有地震动衰减关系计算得到的 PGA_r 作为地震动强度参数,而非直接用地震动记录的实际 PGA ,这主要是考虑到,本文模型作为持时预测模型,在获得记录之前 PGA 实际上也是未知的。(2)在上述模型中,采用简单的线性函数 $c_5 + c_6 \times PGA_r$ 描述地震动强度对持时的沉积层厚度效应的影响,而非更复杂的函数形式。这主要是考虑到工程应用的简便。同时,在缺少深入的理论依据或数值模拟结果作为支撑的条件下,盲目采用过于复杂的函数形式,也可能导致模型系数难以约束从而得到错误的结果。

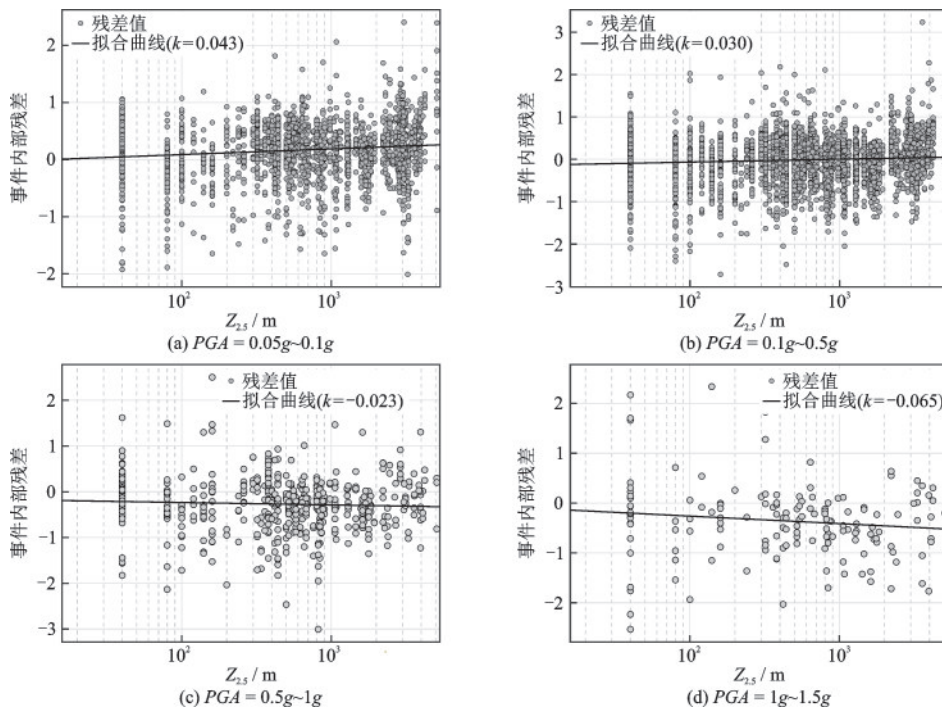


图7 70%重要持时下事件内部残差与 $Z_{2.5}$ 的拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of inter-event residuals with $Z_{2.5}$ for D_{5-75}

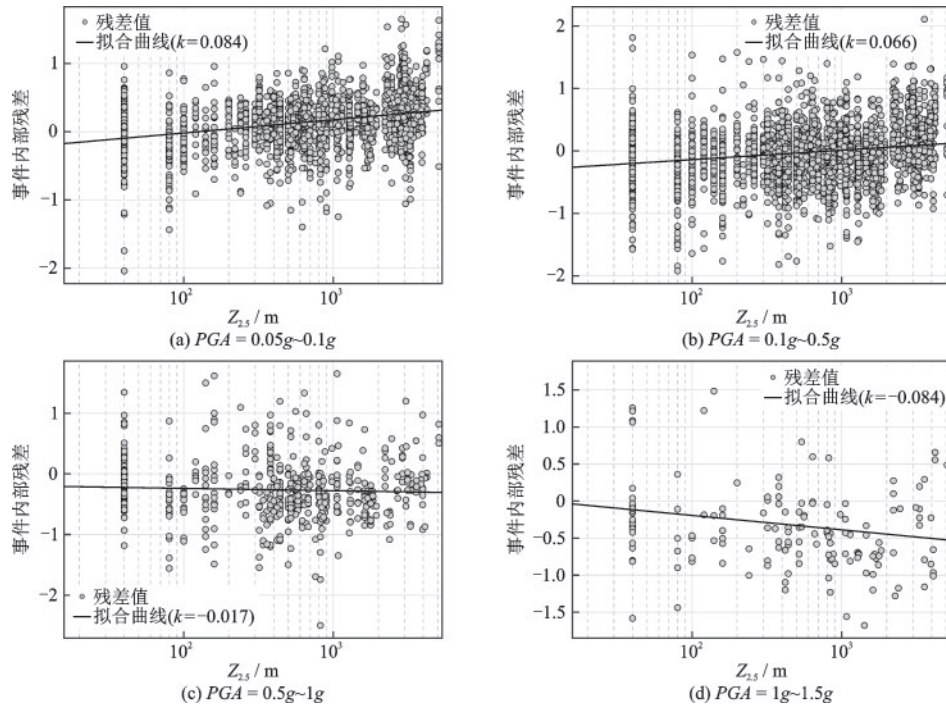


图8 90%重要持时下事件内部残差与 $Z_{2.5}$ 的拟合图

Fig.8 Fitting curve of inter-event residuals with $Z_{2.5}$ for D_{5-95}

表2 不同地震动水平下事件内部残差对 $\ln(Z_{2.5})$ 的拟合系数
Table 2 Fitting coefficients of inter-event residuals with $\ln(Z_{2.5})$ under different PGAs

PGA	0.05g~0.1g	0.1g~0.5g	0.5g~1g	1g~1.5g
D_{5-95}	0.084	0.066	-0.017	-0.084
D_{5-75}	0.043	0.030	-0.023	-0.065

3 结果与分析

3.1 残差分析

利用所建立的数据集中选取的206次地震9361条记录,采用随机效应回归方法对地震动持时改进模型进行回归,得到改进模型的回归系数,见表3。

为验证本文采用随机效应回归方法得到的地震动持时改进模型的适用性,绘制90%重要持时的

表3 地震动持时改进模型的回归系数

Table 3 The regression coefficient of the improved model of ground motion duration

持时	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	σ	τ
D_{5-95}	1.82	0.53	0.002	-0.29	0.11	-0.04	0.42	0.24
D_{5-75}	1.13	0.38	0.004	-0.30	0.09	-0.06	0.53	0.27

事件间残差随震级以及事件内部残差随断层距、 V_{S30} 和 $Z_{2.5}$ 的分布情况,如图9。结果表明,事件间残差随震级以及事件内部残差随断层距、 V_{S30} 和 $Z_{2.5}$ 的分布几乎均在0附近,且离散程度较小,可以认为回归结果较为理想,且本文所建立的地震动持时回归模型整体上满足适用性。

3.2 不同条件下沉积层厚度对持时的影响规律

为探究不同条件下沉积厚度对地震动持时的影响规律及进一步检验本文改进模型的可靠性。图10分别给出了本文改进模型与H. Bruno和C. Fabrice^[22]、J. J. Bommer等^[19]、孙晓丹等^[18]模型在不同震级、断层距以及场地条件下地震动重要持时的对比。

由图10(a)可知,地震动重要持时随着震级的增大而增大。在震级5.0~5.5时,本文改进模型与Bommer模型相差较小,且略大于孙晓丹模型和Bruno模型。随着震级增大,本文改进模型的预测值较其他三个模型偏高,且实际观测值大部分分布在本文模型预测值 $\pm\sigma$ 范围内。 $Z_{2.5}=2977$ m的重要持时大于 $Z_{2.5}=401.4$ m的重要持时,且在大震级处,差异也略大。由图10(b)可知,在断层距10 km范围内,本文改进模型的预测值大于其他三个模型的预测值。地震动重要持时随着断层距的增大而

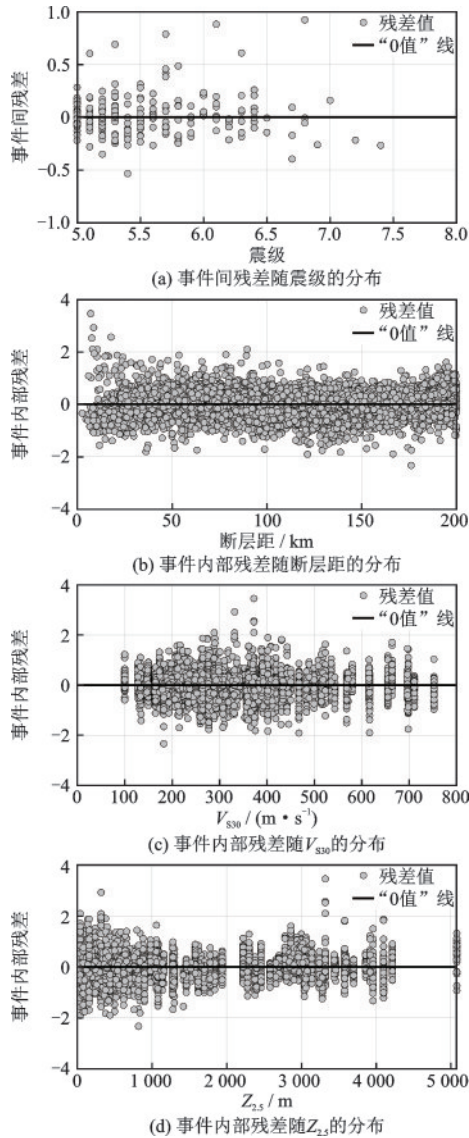


图9 地震动重要持时残差随震级、断层距、 V_{S30} 、 $Z_{2.5}$ 的分布图

Fig.9 Distribution of significant ground motion duration residuals with magnitude, fault distance, V_{S30} and $Z_{2.5}$

增大,当断层距在100~200 km范围时,本文改进模型与Bommer模型相近,略大于孙晓丹模型和Bruno模型,并与实际观测值拟合较好。对比本文改进模型中 $Z_{2.5}=2\ 977\text{ m}$ 和 $Z_{2.5}=401.4\text{ m}$ 预测结果发现,远场处的二者的差异较近场略大。由图10(c)可知,地震动重要持时随着 V_{S30} 的增大而减小。本文改进模型与Bommer模型的预测值相近,均经过实际观测数据点的中心,且大部分数据分布在模型标准差范围内,表明拟合效果较好。孙晓丹模型和Bruno模型随 V_{S30} 的变化趋势并不显著,这是因为Bruno模型中未考虑 V_{S30} 项,以场地分类的方式考虑其影响;孙晓丹模型可能是由于对 V_{S30} 不敏感而引

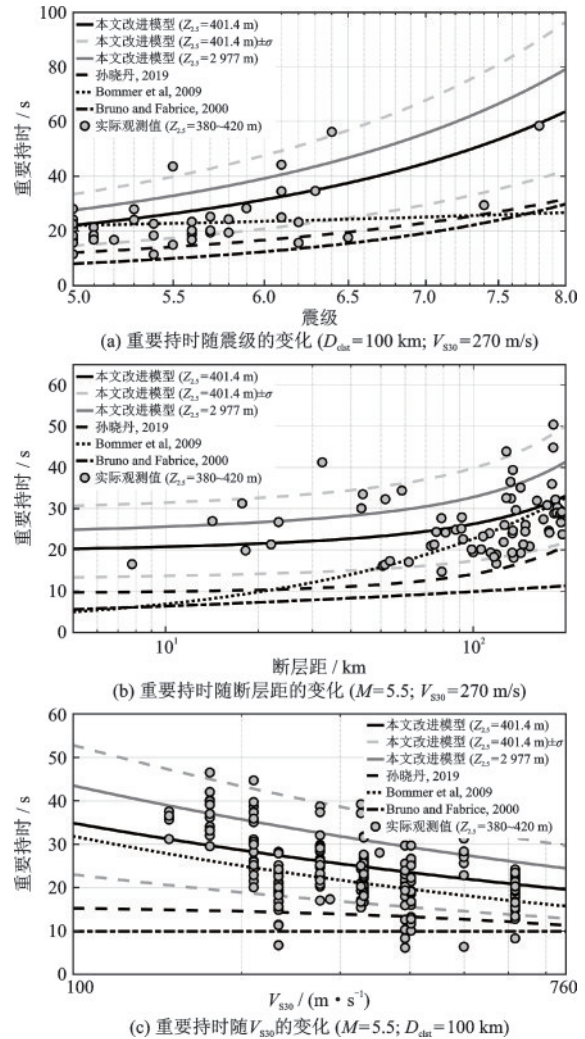


图10 不同条件下重要持时的变化曲线^[18,19,22]

Fig.10 Significant duration curve under different site conditions^[18,19,22]

注:模型中 PGA_t 可采用美国NGA模型BA08(Boore & Atkinson 2008)在 M, D_{cst}, V_{S30} 条件下计算得到的 PGA 预测值

起变化趋势不明显。对比 $Z_{2.5}=2\ 977\text{ m}$ 和 $Z_{2.5}=401.4\text{ m}$ 结果发现,在软弱场地,地震动重要持时受沉积层厚度的影响略大。

综上所述,重要持时随着震级和断层距的增加而增大,随着 V_{S30} 的增加而减小,表明在强震软弱场地的地震动持时更大。随着震级和断层距增大, $Z_{2.5}=2\ 977\text{ m}$ 比 $Z_{2.5}=401.4\text{ m}$ 的重要持时增加更快;而随着 V_{S30} 增大, $Z_{2.5}=2\ 977\text{ m}$ 比 $Z_{2.5}=401.4\text{ m}$ 的重要持时增加更缓。表明深厚沉积层对重要持时的影响在强震、远场和软弱场地时更大。因此,软弱场地、远场等深厚沉积层地区,应重视地震动持时对建筑结构的影响,在抗震设防时考虑沉积厚度对地震动持时的影响。

4 结 论

基于强震观测数据,探讨了沉积层厚度对地震动重要持时的影响,并对典型持时预测模型进行了改进,初步给出了一个考虑震级、距离、局部场地条件、沉积层厚度影响的地震动持时预测模型。通过分析和研究,主要得出以下认识和结论:

(1)沉积层厚度对地震动持时有显著影响。重要持时 D_{5-95} , D_{5-75} 随着沉积层厚度的增大而增大,且呈对数线性变化趋势。

(2)地震动持时的沉积层厚度效应与地震动强度具有相关性。重要持时随 $Z_{2.5}$ 的对数线性变化系数随地震动强度的增大而减小。

(3)随着震级和断层距增大,深厚沉积层对地震动持时的放大作用更加显著,随着 V_{S30} 的增大,深厚沉积层对地震动持时的放大作用减小。因此,在强震、远场以及软弱场地上,深厚沉积层对地震动持时的放大效应更加显著。

(4)对于持时敏感型的高耸结构或超高层建筑,沉积层厚度对地震动持时的影响应得到充分的重视。

参考文献:

[1] 胡聿贤.地震工程学(第二版)[M].北京:地震出版,2006:91-104.
Hu Y X. Earthquake Engineering (2nd Ed)[M]. Beijing: Seismology Press, 2006: 91-104. (in Chinese)

[2] Van de Lindt J W, Goh G. Effect of earthquake duration on structural reliability[J]. Engineering Structures, 2004, 26(11): 1585-1597.

[3] Zhang S, Wang G, Pang B, et al. The effects of strong motion duration on the dynamic response and accumulated damage of concrete gravity dams[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 45: 112-124.

[4] Bejejo A, Barbosa A R, Bento R. Influence of ground motion duration on damage index-based fragility assessment of a plan-asymmetric non-ductile reinforced concrete building[J]. Engineering Structures, 2017, 151: 682-703.

[5] Raghunandan M, Liel A B. Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse [J]. Structural Safety, 2013, 41: 119-133.

[6] 韩建平,孙小云,周颖.基于规范谱拟合的人工地震动持时对RC框架结构抗倒塌能力影响[J].建筑结构学报,2016,37(7):121-126.
Han J P, Sun X Y, Zhou Y. Influence of man-made vibration hold time on collapse resistance of RC frame structure based on code spectrum fit [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(7): 121-126. (in Chinese)

[7] 孙小云,韩建平,党育,等.地震动持时对考虑梁柱节点区不同破坏模式RC框架的地震易损性影响[J].工程力学,2018,35(5):193-203.
Sun X Y, Han J P, Dang Y, et al. Influence of ground motion holding time on seismic vulnerability of RC frame considering different failure modes in beam-column joint area [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 193-203. (in Chinese)

[8] 陶磊,张俊发.远场大震对深厚覆盖土层地上超高层建筑的影响分析[J].西安理工大学学报,2014,30(1):79-84.
Tao L, Zhang J F. Influence analysis of far-field large earthquakes on super-tall buildings on deep overlying soil foundations[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(1): 79-84. (in Chinese)

[9] 赵艳,郭明珠,季杨,等.场地条件对地震动持时的影响[J].震灾防御技术,2007,2(4):417-424.
Zhao Y, Guo M Z, Ji Y, et al. Effect of site conditions on ground motion duration[J]. Earthquake Disaster Prevention Technology, 2007, 2(4): 417-424. (in Chinese)

[10] 白玉柱,徐锡伟.由强震动数据分析芦山地震地面运动持时及周期特征[J].地震地质,2017,39(1):92-103.
Bai Y Z, Xu X W. Analysis of temporal and periodic characteristics of ground motion in Lushan earthquake based on strong motion data[J]. Seismology and Geology, 2017, 39(1): 92-103. (in Chinese)

[11] 徐培彬,温瑞智.基于我国强震动数据的地震动持时预测方程[J].地震学报,2018,40(6):809-819.
Xu P B, Wen R Z. Prediction equation of ground motion duration based on strong motion data in China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(6): 809-819. (in Chinese)

[12] 李新乐,窦慧娟,朱晞,等.近断层强震地面运动幅值与持时特性研究[J].地震工程与工程振动,2009,29(2):1-6.
Li X L, Dou H J, Zhu X, et al. Study on the amplitude and time-holding characteristics of ground motion during strong earthquakes near faults[J]. Earthquake Engi-

- neering and Engineering Vibration, 2009, 29(2): 1-6. (in Chinese)
- [13] Kempton J J, Stewart J P. Prediction equations for significant duration of earthquake ground motions considering site and near-source effects[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(4): 985-1013.
- [14] 杨伟林. 厚软场地的地震动特征及设计反应谱研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(4): 406-411.
Yang W L. Study on ground motion characteristics and design response spectrum of thick and soft ground[J]. Journal of disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(4): 406-411. (in Chinese)
- [15] 刘薛宁, 陈国兴, 任炜, 等. 深厚第四纪沉积土非线性性能对地表地震动特性的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(4): 498-508.
Liu X N, Chen G X, Ren W, et al. Influence of nonlinear behavior of quaternary deep sediment layers on the characteristics of surface ground motion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 498-508. (in Chinese)
- [16] Trifunac M D, Brady A G. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975. 65(3): 581-626.
- [17] Bora S S, Scherbaum F, Kuehn N, et al. Fourier spectral- and duration models for the generation of response spectra adjustable to different source-, propagation-, and conditionssite[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(1): 467-493.
- [18] 孙晓丹, 李宇盎. 基于 NGA 强震数据的地震动显著持时研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 70-79.
Sun X D, Li Y A. On significant duration of records from NGA strong ground motion database[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1): 70-79. (in Chinese)
- [19] Bommer J J, Stafford P J, Alarcon J E. Empirical Equations for the Prediction of the Significant, Bracketed, and uniform duration of earthquake ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(6): 3217-3233.
- [20] 张齐, 胡进军, 谢礼立, 等. 地震动衰减关系区域性差异初步探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(4): 150-157.
Zhang Q, Hu J J, Xie L L, et al. Preliminary study on regional differences of seismic attenuation relationship[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(4): 150-157. (in Chinese)
- [21] Zhao J X, Xu H. A comparison of VS30 and site period as site-effect parameters in response spectral ground-motion prediction equations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(1): 1-18.
- [22] Bruno H, Fabrice C. Empirical determination of ground shaking duration due to an earthquake using strong motion accelerograms for engineering applications[C]//In Proceedings: the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing: [s.l.], 2000: 2254.

(本文编辑: 苏泽云)