

汶川地震近断层地震动峰值加速度衰减关系研究

李平^{1,2}, 徐建元^{1,3}, 鞠雅倩^{1,2}, 陈钰鑫^{1,2}, 欧阳刚垒^{1,4}, 宣雨童^{1,2},
沙明卓⁵

(1. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室,
河北 三河 065201; 3. 江苏省规划设计集团有限公司市政规划与工程设计院, 江苏 南京 210019;
4. 核工业井巷建设集团有限公司, 浙江 湖州 313001; 5. 沈阳市给排水勘察设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 本文选取 2008 年汶川 8.0 级特大地震断层距 41 km 内 13 个土层台站的强震记录, 结合以随机有限断层法模拟得到的 29 个计算点的强震记录, 采用三种近断层地震动衰减模型和第五代地震动参数区划图衰减模型进行了非线性最小二乘法拟合, 得到了汶川地震近断层地震动峰值加速度衰减关系, 并通过 ± 1 倍标准差和相关性系数进行可靠性分析。结果表明, 采用不同衰减模型得到的衰减关系有一定的差异: 邵广彪模型得到的峰值加速度偏低; 王国权模型因没有考虑震级项, 其预测结果针对其他震级的地震会产生较大偏差; 第五代地震动参数区划图衰减模型得到的峰值加速度偏低。

关键词: 汶川地震; 近断层地震动; 随机有限断层法; 衰减关系; 标准差

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)11-1875-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.11.008

引言

中国学者对近断层地震动衰减规律的研究因缺乏近断层强震记录, 以及受限于近断层地震动的复杂性而不够深入。随着近些年破坏性地震的频发, 中国学者获取了大量近断层强震记录, 关于近断层地震动的研究也取得了一些实质性的突破, 得到了一系列研究成果^[1-3]。文献[4-5]以中国台湾集集地震发震断层 55 km 范围内的 130 个台站记录为数据库, 分析了地震动峰值加速度、速度、位移和持时的特征, 提出了适用于集集地震的近场地震动衰减关系; 邵广彪等^[6]基于全球范围内 6.0~7.6 级且震源深度小于 20 km 的地震, 通过对强震记录峰值加速度进行统计分析, 提出了近断层地震动的衰减模型; KOKETSU 等^[7]利用汶川地震发震断层 150 km 内 54 个台站的加速度记录, 拟合回归得到了汶川地震近断层地震动的衰减关系。

除了依靠现有强震记录进行回归分析确定地震动衰减关系之外, 随机有限断层法在建立地震动衰减关系中也得到广泛应用。傅磊等^[8]建立了龙门山地区与高程相关的 κ_0 模型, 模拟得到了汶川地震动

PGA(峰值加速度)分布; GHASEMI 等^[9]基于随机有限断层法, 模拟了汶川地震近断层 150 km 内 54 个台站的 PGA, 并对模拟结果和经验衰减模型进行了对比分析, 验证了模拟结果的准确性; 喻烟^[10]利用随机有限断层法, 模拟出了汶川地震主震地震动场, 但并未得到北川老县城的地表地震动。关于汶川地震衰减关系的成果中, 并未给出明确的近断层区域划分和适用于汶川地震近断层地震动参数衰减关系的衰减模型。因此, 基于已有研究成果, 本文利用李明等^[11]对近断层区域的划分范围, 确定了汶川地震近断层区域在断层距 41 km 内, 并选取了 13 个土层台站的强震记录, 结合以随机有限断层法模拟得到的 29 个模拟计算点的强震记录, 采用王国权衰减模型^[4]、邵广彪衰减模型^[6]、本文模型和第五代地震动参数区划图衰减模型^[12-13]进行非线性最小二乘法拟合, 得到了汶川地震近断层地震动峰值加速度衰减关系, 并通过 ± 1 倍的标准差及相关性系数对拟合曲线的离散程度进行可靠性分析。

1 近断层区域划分及台站选取

2008 年 5 月 12 日, 四川省汶川县发生 8.0 级特

收稿日期: 2023-03-20; 修订日期: 2023-06-06

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究计划项目(ZD2022166); 中国地震局地震科技星火计划资助项目(XH204401); 防灾科技学院研究生创新基金资助项目(ZY20220323)。

大地震,震中位于阿坝藏族羌族自治州汶川县映秀镇,震源深度为14 km。根据地质研究表明:控制本次地震的是北川—映秀断裂带,地表破裂长度约240 km,以逆断层破裂为主并伴有右旋走滑分量^[14-15]。此次地震共计触发四川省强震台站141个,参考李明等^[11,16]在2010年给出的近断层地震动区域的划分标准,根据USGS场地分类标准、断层类型和矩震级三个指标,确定汶川地震近断层区域为断层距41 km内,选取了近断层41 km内的13个土层台站和2个基岩台站(选取两个基岩台站作为后文的

随机有限断层法模拟地震动的参照台站)。本文台站信息来自中国地震局工程力学研究所强震动观测与工程振动研究中心,使用的强震记录数据均已进行基线校正和滤波。本文计算衰减关系采用断层距作为距离项,具体计算方法是以汶川地震地表破裂带作为发震断层在地表的投影位置,根据多个地表破裂带现场调查点的经纬度坐标和台站的经纬度坐标计算地表破裂带现场调查点和台站位置两点之间的距离,取其中的最小值为断层距。台站分布如图1所示,台站信息如表1所示。

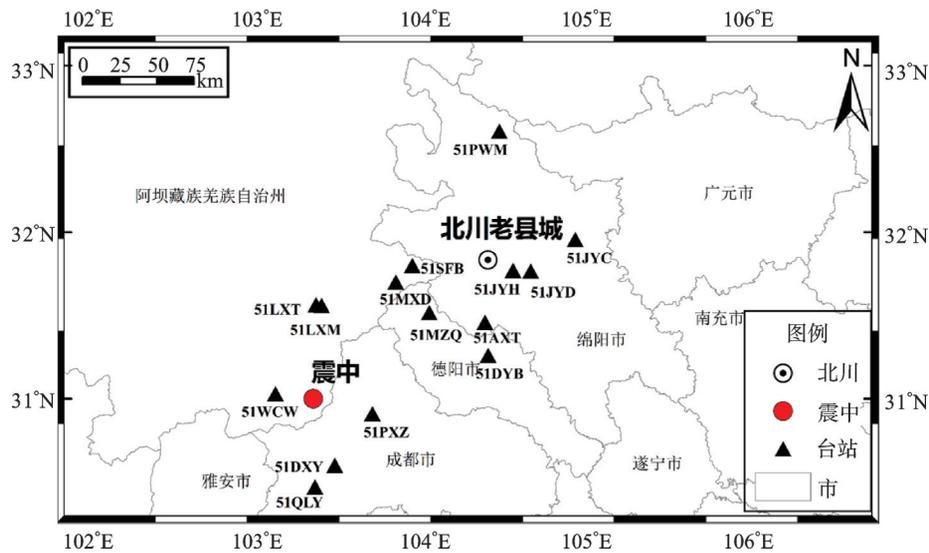


图1 汶川地震近断层区域台站分布图

Fig. 1 Distribution map of stations near faults in the Wenchuan earthquake

表1 汶川地震近断层41 km内的台站信息表

Tab. 1 Information of stations within 41 km of the Wenchuan earthquake near faults

序号	台站代码	台站名称	断层距/km	场地条件
1	51MZX	绵竹清平	3.1	土层
2	51SFB	什邡八角	7.8	土层
3	51WCW	汶川卧龙	6.0	土层
4	51JYH	江油含增	18.8	土层
5	51LXT	理县桃平	23.0	土层
6	51LXM	理县木卡	26.0	土层
7	51JYD	江油地震台	26.4	土层
8	51PXM	平武木座	27.7	土层
9	51AXT	安县塔水	28.1	土层
10	51JYC	江油重华	30.5	土层
11	51DXY	大邑银屏	31.2	土层
12	51QLY	邛崃油榨	31.2	土层
13	51DYM	德阳白马	37.0	土层
14	51PXZ	郫县走石山	21.0	基岩
15	51MXD	茂县地办	24.0	基岩

2 汶川地震随机有限断层模拟

本文以2008年汶川特大地震为例,基于文献

[17-18]反演得到的单断层位错模型,确定了沿走向280 km和沿倾向40 km的矩形计算区域,计算点共计9060个,如图2所示。参考文献[8-10]的研究成果,确定了模拟汶川特大地震地震动场的参数,如表2所示,表中 R 为断层距。

由于随机有限断层模拟的是水平向基岩地震动,为了和13个土层台站(II类场地)的PGA进行对比分析^[20],利用《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[21]中的场地地震动峰值加速度调整系数,采用线性内插法调整得到台站地表的PGA模拟计算结果,如表3所示。表3中除51SFB,51JYH,51JYD台站误差稍大,其余台站的强震记录数据和模拟误差平均在20%左右,误差较大的三个台站可能是由于土层台站位于山地地区,地形地貌对地震动影响显著。

为了验证利用随机有限断层法模拟汶川地震主震地震动场的准确性,本文利用《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)^[22]中的地震烈度对应的地震动峰值(地震动峰值为所对应的仪器测定的地震烈度中值),将汶川地震IX, X, XI烈度等值线转换为

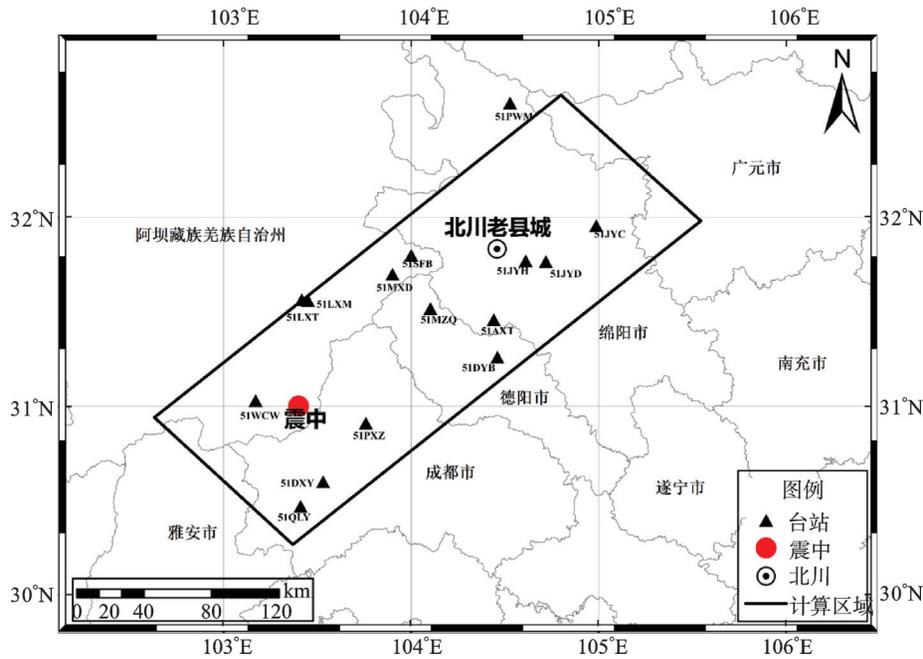


图 2 随机有限断层法计算区域图

Fig. 2 The calculation regional maps of stochastic finite fault method

表 2 随机有限断层法模拟汶川地震动场的参数

Tab.2 Parameters used for simulating the Wenchuan ground motion site by stochastic finite fault method

参数	数值	出处
矩震级 M_w	7.9	文献[8]
断层走向/[倾角/(°)]	229/33	文献[18]
沿走向×倾向的 断层尺寸/ km^2	280×40	文献[8]
子断层尺寸/ km^2	5×5	文献[8]
子断层个数(走向×倾向)	56×8	计算取值
地壳剪切波速/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	3.4	文献[10]
破裂传播速度/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	3.4×0.8	文献[10]
地壳平均密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.7	文献[10]
应力降/MPa	120	文献[19]
Kappa	0.03	文献[10]
品质因子	$Q(f)=303f^{0.39}$	文献[10]
窗函数	Saragoni-Hart	文献[8]
几何扩散方程	$1/R, R \leq 70 \text{ km}$ $1/R^0, 70 \text{ km} < R < 130 \text{ km}$ $1/R^{0.5}, R \geq 130 \text{ km}$	文献[8]

地震动峰值等值线,并与模拟的地震动场等值线进行对比分析,结果如图 3 所示。模拟得到的汶川地震近场加速度等值线和烈度等值线基本吻合,其中Ⅱ和Ⅲ烈度区的等值线和峰值加速度分区吻合度较高。

汶川地震中近断层 41 km 内有 13 个土层台站和 2 个基岩台站。由于台站仅分布在 4~6 km, 18~25 km, 30~36 km, 强震记录数据少且分布不均,所

以仅用强震记录数据拟合近断层地震动衰减关系不够精确。本文通过汶川地震随机有限断层法在断层距 41 km 范围内增加了 29 个模拟计算点(依据实测台站的位置,模拟计算点的 PGA 值和断层距确定补充计算点的位置,使其均匀分布在近断层 41 km 内,便于后文衰减关系的拟合),汶川地震随机有限断层法计算区域和模拟计算点如图 4 所示。模拟补充基岩处的计算点通过《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[21]中的场地地震动峰值加速度调整系数进行调整,采用线性内插法调整得到模拟地表 PGA 的计算结果如表 4 所示。

综上所述,以随机有限断层法模拟近断层地震动是可靠的,所得数据可用于后文中的汶川地震近断层衰减关系拟合。

3 近断层地震动衰减关系模型

目前常用的近断层地震动衰减关系模型有邵广彪衰减模型^[6]、王国权衰减模型^[4],本文衰减模型以及第五代地震动参数区划图青藏区短轴衰减模型,具体阐述如下:

邵广彪衰减模型^[6]形式为:

$$\lg Y = c_0 + c_1 M + c_2 R + c_3 H \pm \epsilon \quad (1)$$

式中 Y 为地震动峰值 PGA; R 为断层距; M 为矩震级; H 为震源深度; $c_0 \sim c_3$ 为待求的参数; ϵ 为随机误差。

由于本文所研究的是汶川地震主震,式(1)中的变量矩震级、震源深度都是常数,所以经过修改后的

表 3 地震动强震记录与模拟值对比

Tab. 3 Comparison of strong earthquake records and simulated values of ground motion

台站代码	台站名称	场地条件	水平向均值/gal	模拟结果/gal	误差/%
51MZQ	绵竹清平	土层	730.46	788.222	7.91
51SFB	什邡八角	土层	595.89	368.916	-38.09
51WCW	汶川卧龙	土层	819.59	883.267	7.77
51JYH	江油含增	土层	442.97	294.407	-33.54
51LXT	理县桃平	土层	341.05	265.451	-22.17
51LXM	理县木卡	土层	302.92	283.073	-6.55
51JYD	江油地震台	土层	485.71	270.909	-44.22
51PWM	平武木座	土层	230.63	210.129	-8.89
51AXT	安县塔水	土层	250.22	194.272	-22.36
51JYC	江油重华	土层	287.76	219.339	-23.78
51DXY	大邑银屏	土层	112.01	131.692	17.57
51QLY	邛崃油榨	土层	146.62	131.692	-10.18
51DYB	德阳白马	土层	109.25	124.787	14.22

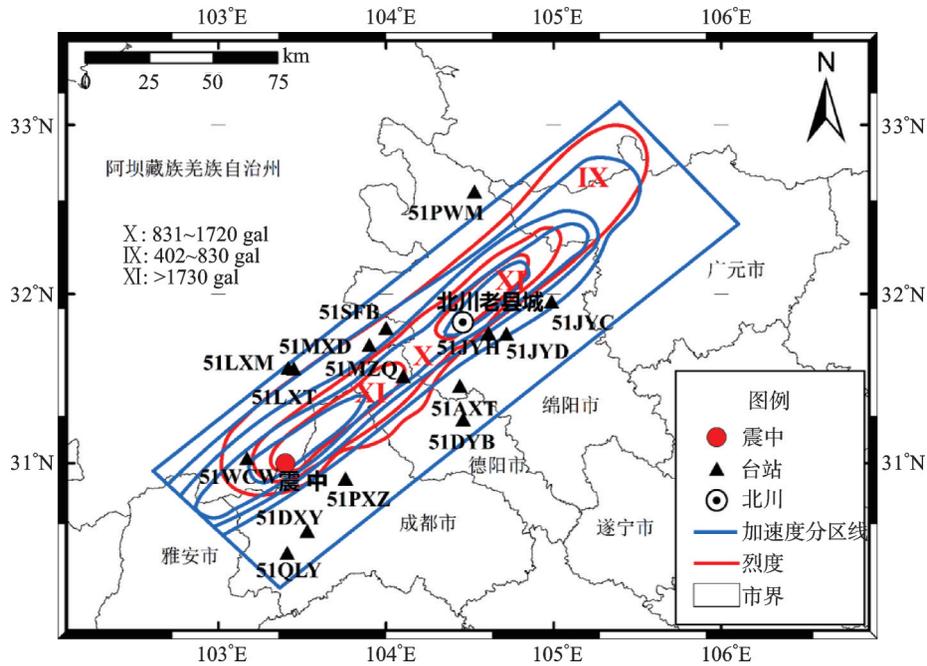


图 3 汶川地震模拟地震动场与烈度图的对比图

Fig. 3 Comparison of simulated ground motion field and intensity map of the Wenchuan earthquake

衰减模型为:

$$\lg Y = c_0 + c_1 R \pm \sigma \quad (2)$$

式中 σ 为拟合值的标准差。

王国权等^[4]基于 1999 年中国台湾集集(Chi-Chi)地震提出的衰减模型为:

$$\lg Y = c_0 + c_1 \lg(R + c_2) \pm \sigma \quad (3)$$

文献[9]提出的 PGA 衰减模型为:

$$\lg Y = a_1 + a_2 R - \lg(R + a_3 10^{0.42M}) \quad (4)$$

式中 $a_0 \sim a_3$ 为待求的参数。

依据已有强震记录提出的近断层地震动 PGA 衰减模型为(本文所使用的衰减模型):

$$\lg Y = c_0 + c_1 R - \lg(R + 10^{0.12M}) \quad (5)$$

第五代地震动参数区划图青藏区短轴衰减模

型^[20]为:

$$\lg Y = 2.457 + 0.388M -$$

$$1.854 \lg(R + 0.612e^{0.457M}) \pm 0.236 \quad (6)$$

采用以上三种衰减模型和第五代地震动参数区划图衰减模型,对实测台站的水平向记录、竖向记录、实测台站记录和模拟记录进行非线性最小二乘法拟合(最小二乘法应用到曲线拟合时,当自变量和因变量同时存在均值为零,方差相同的随机误差时,此方法能给出在统计意义上最好的参数拟合结果),回归结果、拟合优度 R^2 和标准差 σ 如表 5 所示。第五代地震动参数区划图青藏区短轴衰减模型参数已确定。

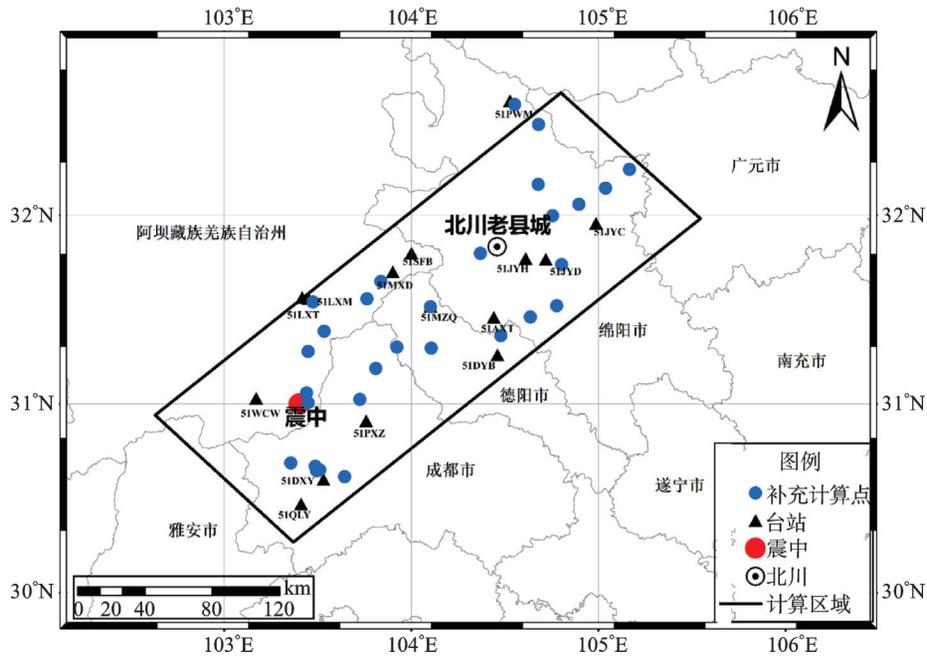


图 4 随机有限断层法补充计算点分布图

Fig. 4 Supplement calculation points distribution map of stochastic finite fault method

表 4 随机有限断层法补充计算点信息表

Tab. 4 Supplement calculation points information of stochastic finite fault method

No.	R/km	PGA/gal	No.	R/km	PGA/gal	No.	R/km	PGA/gal	No.	R/km	PGA/gal	No.	R/km	PGA/gal
1	0.87	1042.31	7	6.14	650.20	13	14.01	395.20	19	24.09	194.82	25	38.00	118.05
2	1.02	988.89	8	7.74	544.19	14	16.02	358.96	20	25.53	561.00	26	38.49	104.22
3	2.01	863.02	9	8.01	613.47	15	18.73	268.24	21	32.00	178.43	27	40.01	101.88
4	3.10	831.64	10	10.02	510.00	16	19.55	219.57	22	34.01	146.70	28	40.17	96.99
5	4.54	879.88	11	10.18	561.45	17	20.01	556.96	23	36.94	111.44	29	41.01	80.00
6	5.72	654.54	12	12.00	427.29	18	22.00	514.40	24	37.96	117.26			

表 5 本文所用衰减模型相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients of attenuation models used in this paper

衰减模型	工况类型	模型参数				
		c_0	c_1	c_2	R^2	σ
邵广彪模型 ^[6]	实测水平	2.945	-0.018	-	0.763	0.202
	实测竖向	2.965	-0.023	-	0.752	0.256
	实测+模拟	2.984	-0.021	-	0.776	0.245
王国权模型 ^[4]	实测水平	32.940	-11.898	334.598	0.749	0.164
	实测竖向	34.515	-12.133	409.529	0.648	0.138
	实测+模拟	4.908	-1.515	17.118	0.780	0.215
本文模型	实测水平	3.988	6.2728×10^{-4}	-	0.744	0.186
	实测竖向	4.003	-0.004	-	0.708	0.234
	实测+模拟	4.015	-0.002	-	0.781	0.210

4 回归结果分析

4.1 本文衰减关系与其他衰减关系对比

本文基于以上三种衰减模型和第五代地震动参数区划图衰减模型,分别对实测强震记录和模拟强

震记录进行非线性最小二乘法拟合(水平向峰值加速度衰减关系拟合使用 13 个土层台站的峰值加速度和随机有限断层模拟得到的 29 个补充记录,竖向地震动峰值加速度进行衰减关系拟合时,仅使用 13 个土层台站的峰值加速度进行回归拟合),如图 5(a),(b)所示,邵广彪^[6]和王国权模型^[4]的结果对地震动峰值加速度估计过低,而本文模型和第五代地

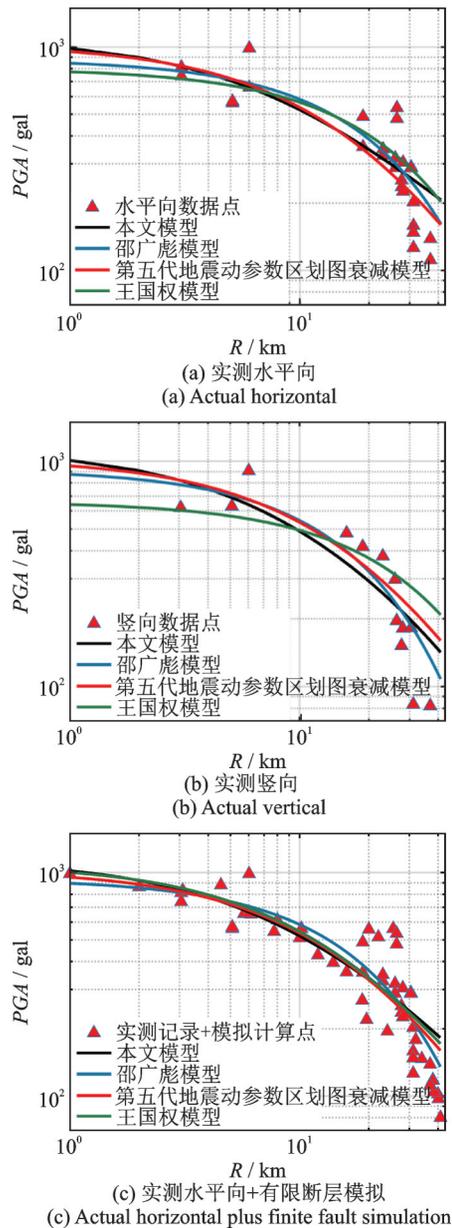


图5 衰减关系曲线结果对比图

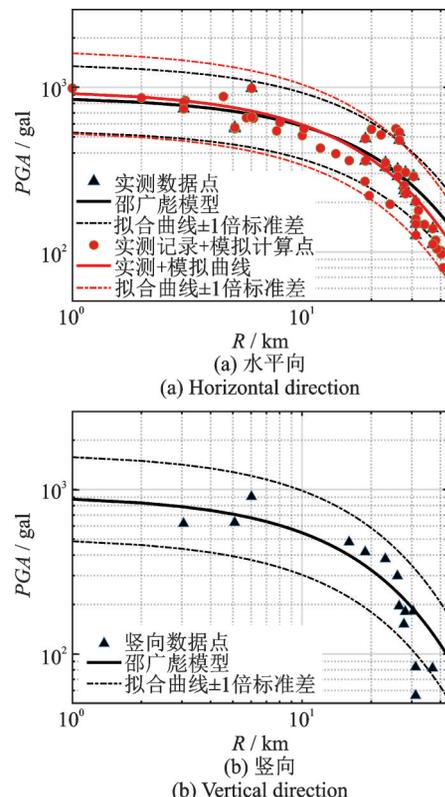
Fig. 5 Comparison of the results of the decay relationship curves

震动参数区划图衰减模型地震动峰值加速度较为接近。如图5(c)所示,使用随机有限断层法对模拟计算点强震记录和实测强震记录进行拟合,除了邵广彪模型^[6]对峰值估计过低之外其他三种模型峰值均达到了 $1.0g$ 左右,所以随着随机有限断层法模拟计算点的补充,近断层区域内衰减规律较为明显,而第五代地震动参数区划图衰减模型和本文模型较为接近,但预测峰值加速度偏低。根据整个汶川地震的宏观现象以及台站记录到的强震记录来看,距离震中最近的卧龙台PGA高达 957.7 gal ,而远离震中的北川震害情况非常严重,与震中相比甚至更加显著。所以北川老县城的地表地震动估计值要大于卧龙台所记录到的结果,至少要达到 $1.0g$ 以上。故根据北川老县城的实际震害以及地表地震动估计,本文模

型的结果更为合理。

4.2 标准差分析

本文将实测强震记录和模拟强震记录分别用邵广彪衰减模型^[6]、王国权衰减模型^[4]和本文模型进行预测值和观测值的对比分析,结果如图6~8所示,图中实线为拟合曲线,虚线为估计值的 ± 1 倍标准差值。由图6可知,邵广彪模型^[6]的观测值大部分均处在 ± 1 倍标准差内,只有极少数大于预测值范围,增加随机有限断层模拟点强震记录之后拟合结果有明显提高但是整体趋势变化不大^[23-24]。由图7可知,王国权衰减模型^[4]拟合曲线与其他三种模型拟合曲线相比整体趋势过低,尤其是竖向观测值不符合实测记录以及震害特征,增加了模拟计算点强震记录之后整体趋势变化较大,对峰值的估计增大了 $0.2g$ 左右,但是由于王国权衰减模型^[4]没有考虑震级项,故而预测结果对于其他震级的地震会产生较大偏差。由图8可知,本文结果对PGA的估计值较为合理,符合北川老县城的震害特征,整体衰减趋势较快,观测值大部分处在 ± 1 倍标准差内,增加了模拟计算点强震记录之后,整体趋势相似性较高,且拟合优度接近 0.8 ,标准差也在 0.2 左右,不仅说明本文模型可以很好地估计汶川地震近断层区域内的PGA,同时也反映了北川老县城地表地震动的经验估计。

图6 邵广彪模型^[6]PGA预测曲线与观测值的对比Fig. 6 Estimated PGA decay curves of SHAO Guangbiao model^[6] compared with the observed values

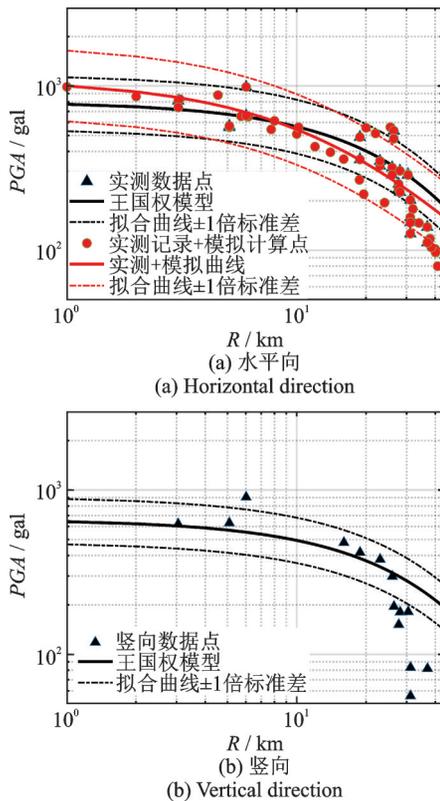


图 7 王国权模型^[4]PGA 预测曲线与观测值的对比
 Fig. 7 Estimated PGA decay curves of WANG Guoquan model^[4] compared with the observed values

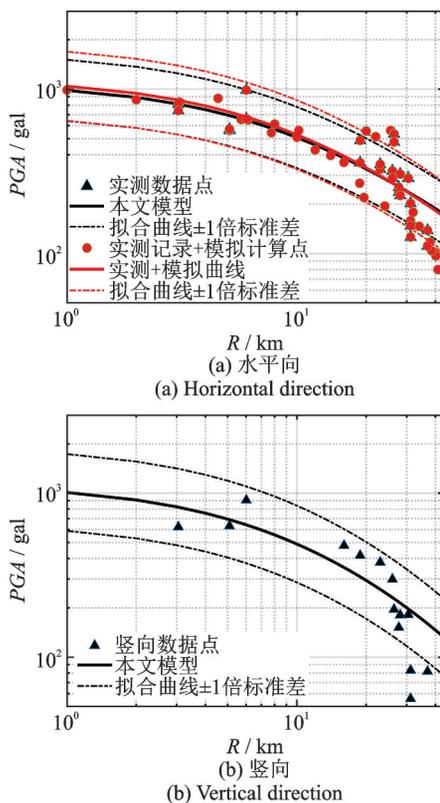


图 8 本文模型 PGA 预测曲线与观测值的对比
 Fig. 8 Estimated PGA decay curves of proposed model compared with the observed values

所以本文模型的估计值整体上较为合理,符合汶川地震近断层 PGA 特征。

5 结论与展望

本文选取了汶川地震近断层内 13 个土层台站的强震记录,结合以随机有限断层法模拟得到的 29 个模拟计算点的强震记录,使用邵广彪模型^[6]、王国权模型^[4]、本文模型以及第五代地震动参数区划图衰减模型^[11-12],对水平和竖向峰值加速度进行非线性最小二乘法拟合,利用相关性系数和±1 倍标准差进行了可靠性分析,得出以下结论:

(1) 本文衰减模型对实测台站水平向记录、竖向记录的拟合回归结果较为合理,绝大多数峰值加速度观测值分布在本文衰减模型±1 倍标准差以内。断层距 1 km 范围内峰值加速度达到了 1.0g,符合北川老县城的实际震害情况,基本达到了预测值范围。

(2) 在实测台站强震记录和模拟强震记录中,邵广彪模型的估值过低不符合实际震害特征,王国权模型因没有考虑震级项导致预测结果对于其他震级的地震会产生较大偏差,而本文模型和第五代地震动参数区划图衰减模型的结果较为合理,但是第五代地震动参数区划图衰减模型对于本文模型来说峰值较低,所以本文模型较适用于汶川特大地震近断层区域的峰值加速度预测。

本文并未讨论模拟地震动计算点参与到衰减关系拟合中可能存在的误差,本文模型适用性较为单一,仅适用于汶川地震近断层 41 km 内的衰减关系拟合。对随机有限断层法补充计算点位置的确定并未做深入研究,可能会造成一些误差。断层上下盘的震害程度不同,本文因数据点数量有限并未在衰减关系中考虑上下盘效应的影响。未来工作可以从以上问题入手,进行更加深入的讨论和研究。

参考文献:

[1] COUSINS W J, ZHAO J X, PERRIN N D. A model for the attenuation of peak ground acceleration in New Zealand earthquakes based on seismograph and accelerometer data[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1999, 32(4):193-220.
 [2] 江辉, 慎丹, 倪永军, 等. 近断层地震地面运动峰值衰减规律研究[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(4): 83-87.
 JIANG Hui, SHEN Dan, NI Yongjun, et al. Research on peak attenuation relationship of near-fault earthquake ground motion[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(4):83-87.
 [3] 赵金鑫. 汶川地震近断层效应研究[D]. 哈尔滨: 中国

- 地震局工程力学研究所, 2013.
- ZHAO Jinxin. Study on near-fault effects of Wenchuan earthquake[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013.
- [4] WANG G Q, ZHOU X Y, ZHANG P Z, et al. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 20(1):73-96.
- [5] SHABESTARI K T, YAMAZAKI F. Attenuation relationships of the ground motion parameters considering directivity effects in the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake[C]//Proceedings of Seventh US National Conference on Earthquake Engineering. Boston, Massachusetts, 2002: 21-25.
- [6] 邵广彪, 冯启民. 近断层地震动加速度峰值衰减规律的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(3):30-37.
- SHAO Guangbiao, FENG Qimin. Research on attenuation of near-fault peak strong ground motion acceleration [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(3):30-37.
- [7] KOKETSU K, YOKOTA Y, GHASEMI H, et al. Source process and ground motions of the 2008 Wenchuan earthquake [C]//Proceedings of International Conference on Earthquake Engineering—The First Anniversary of Wenchuan Earthquake. 2009: 11-12.
- [8] 傅磊, 李小军. 龙门山地区的 Kappa (κ_0) 模型及汶川 Ms8.0 地震的强地震动模拟[J]. 地球物理学报, 2017, 60(8):2935-2947.
- FU Lei, LI Xiaojun. The Kappa (κ_0) Model of the Longmenshan region and its application to simulation of strong ground-motion by the Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(8):2935-2947.
- [9] GHASEMI H, FUKUSHIMA Y, KOKETSU K, et al. Ground-motion simulation for the 2008 Wenchuan, China, earthquake using the stochastic finite-fault method[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5B): 2476-2490.
- [10] 喻烟. 汶川地震区地震动估计经验模型[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
- YU Yan. Empirical estimate model for ground motion of Wenchuan earthquake zone[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012.
- [11] 李明, 谢礼立, 翟长海, 等. 近断层地震动区域的划分[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5):20-25.
- LI Ming, XIE Lili, ZHAI Changhai, et al. Scope division of near-fault ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(5):20-25.
- [12] 俞言祥. 新一代地震区划图地震动参数衰减关系的建立与特点分析[J]. 城市与减灾, 2016(3):34-38.
- YU Yanxiang. Establishment and characterization of ground motion parameter attenuation relationships in new generation seismic zoning maps[J]. City and Disaster Reduction, 2016(3):34-38.
- [13] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(1):24-33.
- YU Yanxiang, LI Shanyou, XIAO Liang. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(1):24-33.
- [14] 袁一凡, 田启文. 工程地震学[M]. 北京: 地震出版社, 2012.
- [15] 李小军, 于爱勤, 甘朋霞, 等. 汶川 8.0 级地震北川县城城区灾害调查与分析[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(4): 352-362.
- LI Xiaojun, YU Aiqin, GAN Pengxia, et al. Survey and analysis of the disaster and engineering damage of Beichuan County seat in Ms8.0 Wenchuan earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(4):352-362.
- [16] 李明. 近断层地震动对结构抗震设计的影响研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
- LI Ming. Study of the effect of near-fault ground motion on structural seismic design[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010.
- [17] BJERRUM L W, SΦRENSEN M B, ATAKAN K. Strong ground-motion simulation of the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, using various slip models [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5B): 2396-2424.
- [18] JI C. Preliminary result of the May 12, 2008 Mw7.97 Sichuan earthquake[DB/OL]. https://ji.faculty.geol.ucsb.edu/big_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html, 2008.
- [19] 钟菊芳, 袁峰. 震源参数对合成时程持时的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 733-747.
- ZHONG J F, YUAN F. Influence of source parameters on the duration of simulated ground motion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 39(5): 733-747.
- [20] 于海英, 王栋, 杨永强, 等. 汶川 8.0 级地震强震动加速度记录的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 1-13.
- YU Haiying, WANG Dong, YANG Yongqiang, et al. The preliminary analysis of strong ground motion records from the Ms8.0 Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1):1-13.

- [21] 中国地震局. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
China Earthquake Administration. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [22] 中国地震局. 中国地震烈度表: GB/T 17742—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
China Earthquake Administration. The Chinese seismic intensity scale: GB/T 17742—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [23] 张斌, 俞言祥, 李小军, 等. 西南地区水平向峰值速度、峰值位移衰减关系研究[J]. 地球物理学报, 2021, 64(8): 2733-2748.
ZHANG Bin, YU Yanxiang, LI Xiaojun, et al. Ground motion attenuation relationship of horizontal component of PGV and PGD in Southwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(8): 2733-2748.
- [24] 张斌, 李小军, 俞言祥, 等. 鲁甸地震强震动记录与地震动衰减模型的对比研究[J]. 地球物理学报, 2020, 63(8): 2999-3014.
ZHANG Bin, LI Xiaojun, YU Yanxiang, et al. Comparison of strong ground motion records from Ludian, China, earthquake with ground-motion attenuation models [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(8): 2999-3014.

Attenuation relationship of peak ground acceleration near the fault of the Wenchuan earthquake

LI Ping^{1,2}, XU Jian-yuan^{1,3}, JU Ya-qian^{1,2}, CHEN Yu-xin^{1,2}, OUYANG Gang-lei^{1,4},
XUAN Yu-tong^{1,2}, SHA Ming-zhuo⁵

(1.College of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;

2.Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment of Hebei Province, Sanhe 065201, China;

3.Municipal Planning and Engineering Design Institute, Jiangsu Provincial Planning and Design Group Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 4.Nuclear Industry Shaft Construction Group Co., Ltd., Huzhou 313001, China;

5. Shenyang Water Supply & Drainage Prospecting Design Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110023, China)

Abstract: In this paper, the strong earthquake records of 13 soil stations within 41 km from the fault of the 2008 Wenchuan 8.0 magnitude earthquake are selected. These records are combined with the strong earthquake records of 29 calculation points obtained by using the stochastic finite fault method simulation. Moreover, nonlinear least squares fitting is performed by using three near-fault ground motion attenuation models and the fifth-generation ground motion parameter zoning map attenuation model to obtain the peak ground motion acceleration of the Wenchuan earthquake near-fault. The attenuation relationships are obtained and analyzed by considering ± 1 times standard deviation and correlation coefficients for reliability. The results show that there are some differences in the attenuation relations obtained by different attenuation models. The peak acceleration obtained by the Shao Guang-biao model is low. The prediction results of Wang Guoquan model has a large deviation for other magnitude earthquakes because the magnitude term is not considered. Besides, the peak acceleration of the fifth-generation ground motion parameter zoning map attenuation model is low.

Key words: Wenchuan earthquake; near-fault seismic ground motion; stochastic finite tomography; attenuation relationship; standard deviation

作者简介: 李 平(1981—),男,博士,教授。E-mail: chinaliping1981@126.com。