

徐建元, 蒋素, 李平, 等. 汶川地震北川老县城地震动研究[J]. 华南地震, 2026, 46(4): 55–63. [XU Jianyuan, JIANG Su, LI Ping, et al. Study on Ground Motion in the Old Beichuan County Town During the Wenchuan Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2026, 46(4): 55–63]

汶川地震北川老县城地震动研究

徐建元¹, 蒋素², 李平³, 田宇⁴, 韦梓春¹, 戚天广⁵

(1. 江苏省规划设计集团有限公司市政规划与工程设计院, 南京 210019; 2. 扬子江药业集团南京海陵药业有限公司, 南京 210049; 3. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 4. 黑龙江省地震局, 哈尔滨 150090; 5. 徐州市公安局贾汪公安分局茌茌山派出所, 江苏 徐州 221000)

摘要: 研究采用随机有限断层法模拟汶川地震主震基岩地震动场, 依据北川老县城岩土勘察报告, 构建典型土层地震反应分析模型, 并运用土层地震反应分析程序计算其地表地震动, 通过加速度反应谱标定的方法对比当时北川老县城的抗震设防标准。研究结果表明: 模拟地震动场的能量分布与烈度图具有较好的一致性, 茂县地办和郫县走石山两个基岩台站的模拟记录与实测记录吻合较好; 北川老县城基岩地震动大致在 900~950 gal 之间, 其地表地震动范围在 1000~1500 gal 之间; 将规范得到的标定谱与北川老县城抗震设防水准进行对比分析, 验证了地震动的基本合理性。研究结论可为北川老县城地区的震害研究和抗震设防提供参考依据。

关键词: 汶川地震; 北川老县城; 随机有限断层法; 土层地震反应分析

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2026)04-0055-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2026.04.25

Study on Ground Motion in the Old Beichuan County Town During the Wenchuan Earthquake

XU Jianyuan¹, JIANG Su², LI Ping³, TIAN Yu⁴, WEI Zichun¹, QI Tianguang⁵

(1. Municipal Planning and Engineering Design Institute, Jiangsu Provincial Planning and Design Group Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 2. Nanjing Hailing Pharmaceutical Co., Ltd., Yangzijiang Pharmaceutical Group Co., Ltd., Nanjing 210049, China; 3. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China; 4. Heilongjiang Earthquake Agency, Harbin 150090, China; 5. Zhuyushan Police Station, Xuzhou Municipal Public Security Bureau, Jiawang Subbureau, Xuzhou 221000, China)

Abstract: In this paper, the random finite fault method was used to simulate the bedrock ground motion field of the main shock of Wenchuan earthquake. Based on the geotechnical investigation report of Old Beichuan County Town, the seismic response analysis model of typical soil layer was constructed, and the surface ground motion was calculated by using the soil seismic response analysis program. The seismic fortification standard of Old Beichuan County Town was compared by the method of acceleration response spectrum calibration. The results show that the energy distribution of the simulated ground motion field has good consistency with the intensity map, and the simulated records of the two bedrock stations in Maoxian County and Zoushi Mountain in Pixian County match well with the measured records. The bedrock ground motion of Old Beichuan County Town is roughly in the range of

收稿日期: 2025-09-02

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究计划项目(ZD2022166); 地震科技星火计划项目(XH20084)联合资助。

作者简介: 徐建元(1997-), 男, 助理工程师, 主要从事防灾减灾、韧性城市等工作。

E-mail: 18846916327@163.com

900–950 gal, and its surface ground motion range is in the range of 1000–1500 gal. The calibration spectrum obtained by the standard is compared with the seismic fortification level of Old Beichuan County Town, verifying the basic rationality of the ground motion simulation. The research conclusions can provide reference for seismic hazard research and seismic fortification in Old Beichuan County Town.

Keywords: Wenchuan earthquake; Old Beichuan County Town; Finite fault method; Seismic response analysis of soils

0 引言

2008年,汶川爆发的8.0级特大地震,堪称新中国成立后破坏性、波及范围与救灾难度均达到空前的一场地震灾害。在众多受灾地区中,距离震中130 km的北川老县城(后文统一简称为北川县)受灾程度尤为惨烈。北川县坐落于侵蚀构造中山的东南侧,处于龙门山前山与后山的交界地带。因独特的地理位置,使其在这场地震中承受了巨大冲击,成为汶川地震里灾情最为严重的县市之一,地震烈度高达XI度,此地成灾类型丰富多样,灾害种类一应俱全,俨然是研究地震灾害致灾机理的天然试验场。然而,不幸的是,北川县境内的强震台站在地震中遭受严重破坏,致使该县缺失汶川地震的强震记录。这一情况无疑为后续相关研究与工作的推进造成了阻碍,尤其是针对地震动特性的相关研究无法开展^[1]。

随着技术手段和方法的不断创新,众多学者对北川县地震动展开了大量研究,取得了一些实质性的进展。2009年王国新等^[2]利用随机有限断层法合成加速度时程并绘制加速度等值线图,分析得出,汶川地震加速度最大值出现在北川、茂县一带。2010年Bjerrum等^[3]使用不同有限断层模型模拟汶川地震地震动场,结果表明,模拟北川地区地面峰值加速度超过1.0 g。2017年傅磊等^[4]使用不同高频衰减参数模拟汶川地震地震动场,得出结论,北川县一带地面峰值加速度在0.8 g以上。2024年李平等^[5]利用随机有限断层法模拟补充近断层区域内的计算点的强震记录,确定了汶川地震近断层地震动的衰减关系,其结论为北川县地震动的确定提供了有力依据。但多年的研究成果均未对北川县地面峰值加速度给出明确结论。因此在总结前人研究成果之基础上,本文首先利用随机有限断层法(EXSIM_Beta程序)模拟汶川地震主震基岩地震动场,与其烈度区进行对比,并通过对比茂县地办和郫县走石山两个基岩台站的加速度时程曲线和反应谱,确定模拟结果的准确性。其次,根据北川县的

岩土勘察报告并考虑区域地层特征后,构建了15个土层地震反应分析模型,运用一维等效线性化程序(LSSRLI-1)计算15个钻孔位置的地表地震动,从而得到北川县地表地震动峰值加速度,最后针对计算结果进行规准化处理,将规准得到的标定谱与北川县抗震设防水准作对比,侧面验证了地震动模拟的合理性。

1 北川老县城震害情况

北川县,地处侵蚀构造中山的东南边缘,恰好位于龙门山前山与后山的交界地带。特殊的地理位置,使它在这汶川地震中首当其冲成为破坏最严重的地方之一。在汶川地震的破坏之下,北川县成为房屋建筑与基础设施受损最为严重、人员伤亡最为惨痛的县之一。这里灾害频发,成灾机制复杂多样,灾害种类一应俱全,主要震害类型包括滑坡、崩塌、断层以及由地震振动作用引发的建筑破坏^[6]。

基于震害调查资料并整合前人研究成果进行系统分析,北川县震害特征可归纳为三大类型:①断层错动效应引发的地表破裂;②振动破坏效应导致的建筑物损毁;③地震次生地质灾害。如图1所示,研究团队通过震害调查绘制了北川县宏观震害类型分区简图及震害指数等值线图,其中明确界定了滑坡、崩塌、断层错动和振动作用四大成灾类型的空间分布范围及其对应的震害指数分区。分析结果显示,北川县震后呈现出显著的危害类型多样性特征,且四类成灾机制存在明显的空间耦合现象。重点聚焦于建筑物震害指标的调查与分析。依据《中华人民共和国国家标准 GB/T 18208.3—2000》中明确的房屋建筑破坏等级划分标准及震害指数评估体系,研究团队对县域内112个重点研究点位展开实地勘察,涵盖120栋典型建筑物样本^[6]。调查过程中,研究人员逐栋采集了建筑物的震害指数数据。通过对样本数据的统计分析,最终形成图1所示的平均震害指数空间分布图。该图谱清晰揭示北川县地震破坏的严重程度:在调查样本中,震害指

数>0.9的损毁建筑占比超过50%,表明半数以上建筑物已发生整体性坍塌^[7]。

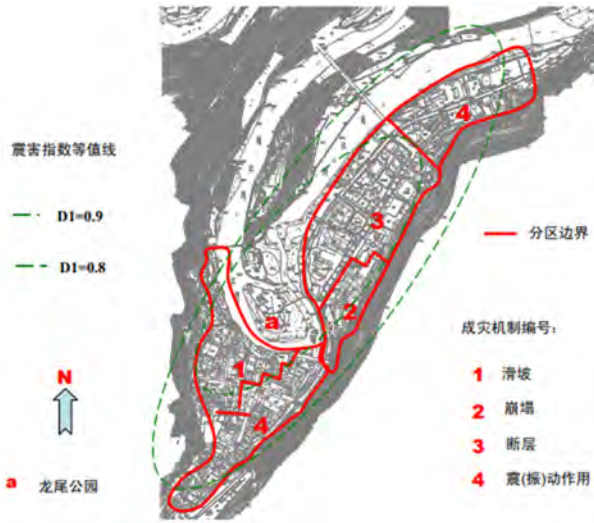


图1 震后北川震害指数与震害类型分区图^[8]

Fig.1 Seismic hazard index and seismic hazard type zoning map of Beichuan after earthquake^[8]

2 汶川地震主震地震场模拟

2.1 随机有限断层模拟方法

随机有限断层法的核心思路与基本方法,是将地震断层面看作是由众多子断层组合而成的集合,每个子断层都被当作一个点源来处理。在地震发生时,破裂过程从特定的破裂起始点启动,随后以特定的破裂速度(一般取值为剪切波速的0.8倍),像辐射一样向四周传播。当这种破裂传播至每个子源(也就是子断层)的中心位置时,该子源就会被触发激活,进而开始释放能量^[7]。而在观测点所记录到的整个断层引发的加速度时程 $a(t)$,则是在充分考虑了各个子断层之间合理的时间延滞情况后,通过叠加各个子断层释放能量所产生的效应而获得的^[9-11]。

$$a(t) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_w} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}) \quad (1)$$

式(1)中: N_L , N_w 分别为沿着断层走向和倾向划分的子断层数; Δt_{ij} 为地震波从破裂起始点传播至第 ij 个子源至观测点的传播时间延迟之和; $a_{ij}(t)$ 为第 ij 个子源在观测点由剪切波引起的地震动。

根据 Motazedian 和 Atkinson 的动力学拐角频率来描述震源谱的模型,将第 ij 个子源的震源加速度谱定义为:

$$a_{ij}(f) = CM_0 H_{ij} (2\pi f)^2 / [1 + (f/f_0)] \quad (2)$$

式(2)中: M_0 为地震矩; C 为比例系数; H_{ij} 为标度因子; f 为频率, f_0 为拐角频率,定义为:

$$f_0 = 4.9 \times 10^6 \beta \left(\frac{\Delta \sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (3)$$

式(3)中: $\Delta \sigma$ 为应力降; β 为剪切波速。

本文所使用的随机有限断层模拟软件为2009年 Motazedian 和 Atkinson 编写的 EXSIM_Beta (Extend Stochastic Finite-Fault Simulation Method)。

2.2 震源参数的确定

本文运用随机有限断层法对汶川地震主震的基岩地震动场展开模拟^[12]。因震源参数对模拟结果的影响巨大,如应力降控制了反应谱的短周期部分、几何扩散系数对近场反应谱短周期部分和长周期部分的影响均较为明显等^[13]。本文使用不同震源参数对汶川地震主震基岩地震动场进行了多次模拟,并与实测记录进行了详细的对比,得出了一组较合理的震源参数。研究依据美国加利福尼亚大学(UCSB)提供的震源机制解^[14],来明确震源模型与程序模拟所需参数。其中,震中精确位置为北纬 31.1024° 、东经 103.3166° ,走向为 229.0° ,倾角为 33° ,震源深度是14 km。在断层模型的选取上,确定其长度为280 km,宽度为40 km。参考动力学拐角频率的有限断层模型,将该断层细致划分为尺寸为 $5.0 \text{ km} \times 5.0 \text{ km}$ 的子断层,共计448个。由于本文聚焦于模拟基岩处的地震动情况,地壳放大系数参考了 Boore 和 Atkinson 的取值^[14-15];高频衰减参数 κ 值,则采用我国西南部地区浅硬土层场地系数0.03。此外,震源在子断层上的位置,是通过震源与子断层上边缘起始点之间的经纬度进行精确计算得出。具体而言,从子断层上边缘起始点算起,震源处于沿断层长度方向的第45个、宽度方向的第4个子断层上。各项具体参数取值详见表1。

2.3 模拟基岩地震动场

本研究在模拟基岩地震动场时未考虑场地土层效应,仅针对基岩台站的地震动记录进行模拟。研究区域内的郫县走石山(51PXZ)和茂县地办(51MXD)两个基岩台站记录信息详见表2^[18]。采用随机有限断层法对基岩台站的加速度时程曲线、加速度反应谱及傅里叶振幅谱进行模拟,结果如图2~7所示,显示模拟结果与实测记录具有相对较好的一致性。

表 1 随机有限断层法模拟汶川地震动场所用参数(基岩)

Table 1 Parameters (bedrock) used for simulating the dynamic field of the Wenchuan earthquake using the random finite fault method

参数名称	参考值	出处
矩震级 M_w	7.9	Ji 和 Hayes ^[11]
应力降/Bars	120	钟菊芳 ^[16]
断层走向,倾角	229°,33°	Ji 和 Hayes
断层尺寸(长×宽)/(km×km)	280×40	傅磊 ^[3]
子断层尺寸(长×宽)/(km×km)	5×5	计算得出
震源在子断层的位置(长度 <i>i</i> ,宽度 <i>j</i>)	45,4	计算得出
窗函数	Saragoni-Hart	喻烟 ^[17]
品质因子	$303 \times f^{0.39}$	喻烟
高频衰减系数 kappa 值	0.03	喻烟
路径持时	0.0, $R < 10$ km +0.16 <i>R</i> , $10 \leq R < 70$ km -0.03 <i>R</i> , $70 \leq R < 140$ km +0.04 <i>R</i> , $R \geq 140$ km	喻烟
阻尼比	0.05	程序内置
剪切波速/(km·s ⁻¹)	3.4	喻烟
破裂速度/(km·s ⁻¹)	0.8×3.4	喻烟
地壳密度/(g·cm ⁻³)	2.7	喻烟
脉冲比例(%)	50	喻烟
地壳放大系数	频率/(Hz)	放大系数
	0.5	1.0
	1.0	1.13
	2.0	1.22
	5.0	1.36
	10.0	1.41

图 2~6 表明,模拟获得的加速度时程曲线与加速度反应谱在整体趋势上与实测记录的两个水平分量高度一致。具体而言:①加速度时程曲线的主要能量分布区域与实测记录基本吻合;②反应谱在短周期段($T < 1$ s)与实测记录匹配度较高,但在 $T > 1$ s 区间模拟结果呈现明显抬升趋势。模拟地震动时程的峰值加速度为 297.6 gal,与实测值的相对误差仅为 2.1%,表明峰值参数的拟合效果较为理想。但需指出的是,茂县地办(51MXD)模拟地震动的持

时较实测记录显著缩短。初步分析表明,该差异可能与地形效应相关——研究区域的地形起伏及地质结构变化可能影响地震波的传播路径与衰减特性,从而导致持时参数的模拟偏差。汶川地震是多节断层逐次破裂,茂县地办(51MXD)由于地处陡峭的峡谷地形和破碎的岩体中,该台站记录到的波形会受到强烈的局部场地效应影响。本文所使用的模拟软件难以模拟出加速度时程曲线多峰值的特点,因此,对反应谱模拟结果同样具备一定的影响。

表 2 汶川地震基岩台站地震动基本信息

Table 2 Basic information on ground motion of bedrock stations during Wenchuan earthquake

序号	名称	编号	纬度/(°)	经度/(°)	断层距/km	PGA/(gal)		
						EW	NS	UD
1	郫县走石山	51PXZ	30.9	103.8	21	120.5	142.2	99.1
2	茂县地办	51MXD	31.7	103.9	24	306.6	302.2	266.6

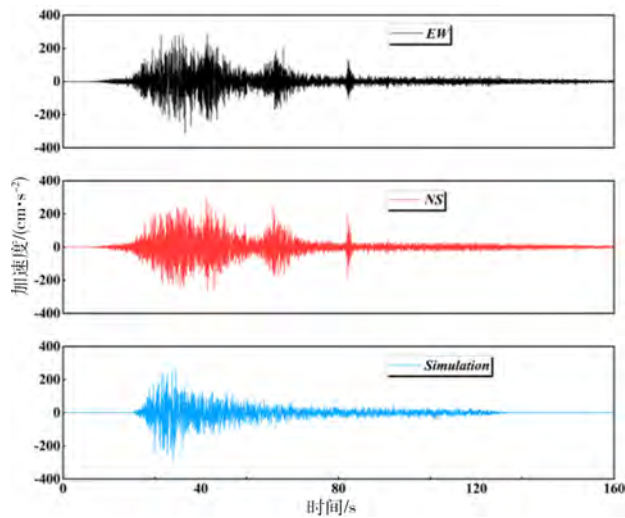


图2 51MXD模拟和实测记录加速度时程曲线对比图
Fig.2 Comparison of acceleration time history curves between 51MXD simulation and measured records

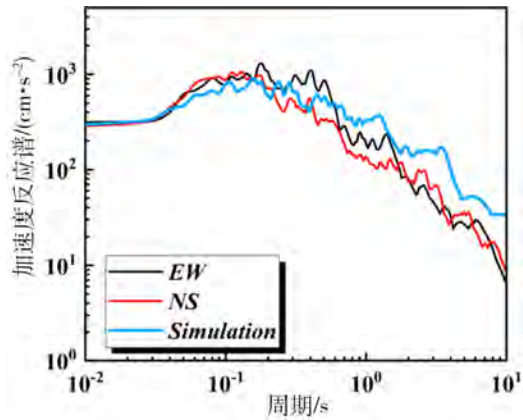


图3 51MXD模拟和实测记录加速度反应谱对比图
Fig.3 Comparison of acceleration response spectra between 51MXD simulation and measured records

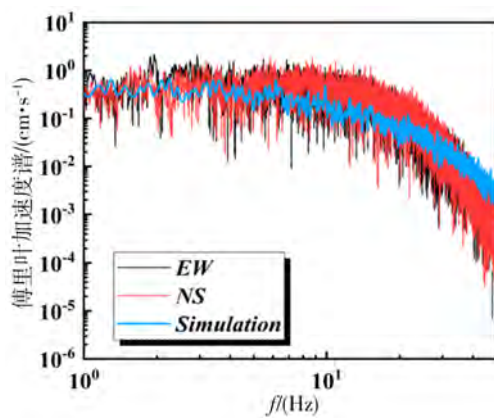


图4 51MXD模拟和实测记录傅里叶谱对比图
Fig.4 Comparison of Fourier spectra between 51MXD simulation and measured records

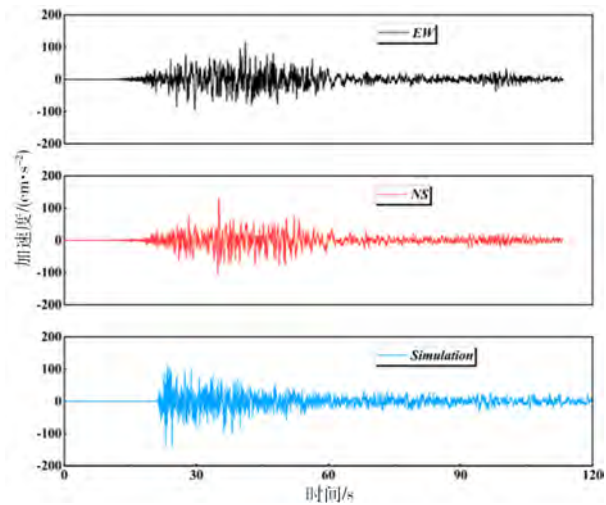


图5 51PXZ模拟和实测记录加速度时程曲线对比图
Fig.5 Comparison of acceleration time history curves between 51PXZ simulation and measured records

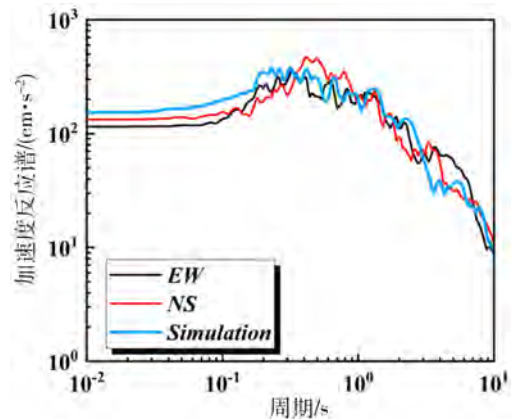


图6 51PXZ模拟和实测记录加速度反应谱对比图
Fig.6 Comparison of acceleration response spectra between 51PXZ simulation and measured records

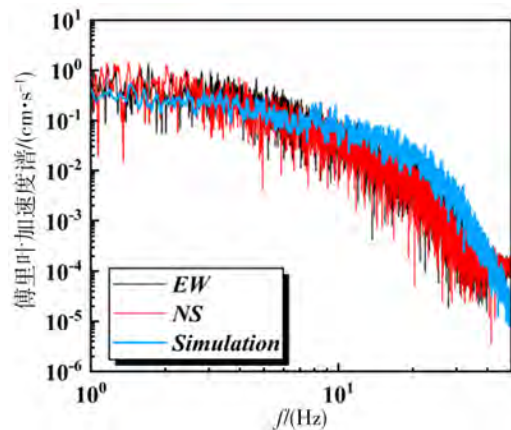


图7 51PXZ模拟和实测记录傅里叶谱对比图
Fig.7 Comparison of Fourier spectra between 51PXZ simulation and measured records

如图4、7所示，通过对比模拟记录的加速度反应谱与实测记录的两个水平分量，结果表明二者整体趋势具有良好一致性，在短周期和长周期范围内均与实测记录呈现较高吻合度。进一步分析模拟获得的地震动峰值加速度(PGA)参数显示：东西(EW)方向PGA为120.5 gal，南北(NS)方向PGA为142.2 gal，而综合加速度记录的PGA达到152.3 gal。与实测数据相比，各方向PGA误差均控制在20%以内，验证了数值模拟的可靠性。

为直观揭示地震动峰值变化规律，本研究采用加速度等值线图进行可视化表征。本小节重点探讨地震动峰值加速度的空间分布特征，通过构建以经度为横轴、纬度为纵轴的地震动场分布图，系统呈现汶川地震的PGA空间分异规律。模拟结果表明，地震动场存在两个显著的高值集中区：主高值区位于震中汶川，次高值区分布于北川区域。该空间分布模式与汶川地震烈度图的烈度分区具有显著的空间耦合特征。值得注意的是，模拟区域内最大PGA值达到950 gal，这一极端值集中出现在断裂带关键部位。上述分析结果系统揭示了汶川地震动力场的空间异质性特征及其与地质构造的内在关联。

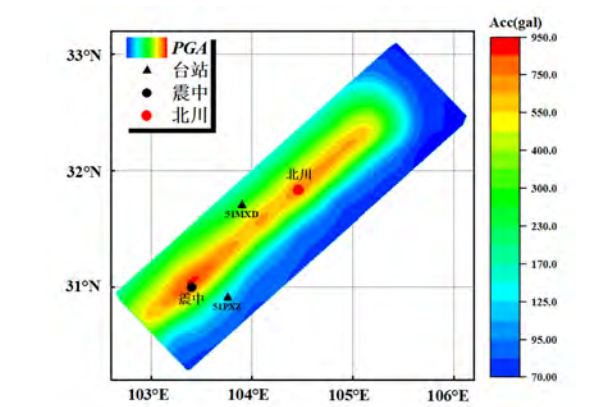


图8 汶川地震研究区域内地震动加速度峰值场(基岩)
Fig.8 Peak ground acceleration field (bedrock) in the study area of Wenchuan earthquake

3 北川老县城设计反应谱标定

本文从北川县20余份岩土工程勘察报告中，参考北川县的地层信息及土层结构，构建了15个钻孔模型，其中，华兴商贸中心综合楼和北川客运站地勘孔两个钻孔来自张建毅等^[18]在2013年发表的文章中。钻孔名称和大致位置，如表3和图9所示。

表3 北川县建筑名称及场地位置
Table 3 Building names and site locations in Beichuan County

序号	建筑名称	场地大致位置
1	北川县国税局	安县花街盐业站对面
2	北川县苦竹坝电厂综合楼	北川县城区胜利路转弯处
3	北川县农业局综合楼	湔江河Ⅱ级阶地后缘
4	北川县农业银行治城营业所综合楼	湔江河治城城区Ⅱ级阶地上
5	北川县曲山镇卫生院业务用房	北川县曲山镇
6	北川县人民法院综合楼	北川县禹龙干道东侧原硅铁厂内
7	北川县卫生进修校综合楼	北川县卫生局内
8	北川县新华书店综合楼	北川县东风路房管所与糖酒公司之间
9	北川县信用合作联社综合楼、住宅楼	茅坝新区湔江河Ⅱ级阶地中部
10	北川县烟草公司综合楼	迴龙河茅坝二级阶地
11	北川县邮电局邮政生产用房	茅坝新开发区内
12	北川县禹龙公寓	禹龙大道东侧
13	北川县中学	北川县曲山镇南任家坪
14	华兴商贸中心综合楼	/
15	北川县客运站	/

本章节通过随机有限断层法模拟北川县城区的地震动场,模拟点位的选取根据15个地勘钻孔的位置确定,如图9所示,在1号区域和2号区域分别模拟一条基岩输入地震动。使用1号区域和2号区域模拟的基岩输入地震动计算其地表地震动。



图9 模拟基岩地震动计算区域
Fig.9 Calculation area for simulating bedrock ground motion

本文采用工程实际中广泛使用的一维等效线性化程序 LSSRLI-1,对15个土层模型进行土层地

震反应分析计算,计算得到15个钻孔位置处的地表地震动峰值加速度和峰值加速度放大系数,PGA放大系数在1.1~1.6之间,如表4所示。

4 地表地震动验证

为验证汶川地震中北川县地表地震动的合理性,本研究采用差分进化算法对15个土层地震反应分析模型计算所得地表地震动加速度反应谱进行参数标定。通过该标定过程确定北川县地震动特征参数,并与北川县当时的抗震设防标准进行对比分析,进而评估其地震动参数的合理性。

差分进化算法^[20-21]是一种基于随机搜索的全局优化计算方法。该方法通过引入交叉算子、变异算子及群体迭代机制,可实现多参数系统的分段优化拟合,在解决复杂全局优化问题方面具有显著优势。建筑抗震设计领域中的反应谱标定本质上属于多参数优化问题,经大量工程案例验证,差分进化算法在特征参数优化方面表现出良好的适用性,可有效获取最优反应谱特征参数。

表4 地表处计算结果
Table 4 Calculation results at the surface

模拟基岩输入地震动/gal	地勘孔名称	地表PGA/gal	PGA放大系数
1号区域 PGA=970	北川县中学	1260	1.299
	北川县烟草公司	1534	1.581
	北川县曲山镇卫生院	1041	1.045
	北川县禹龙公寓	1133	1.168
	北川县联社	1213	1.251
	北川县国税局	1166	1.202
	北川县农业银行	1185	1.222
	北川县邮电局	1112	1.146
2号区域 PGA=915	北川县卫生进修院	1044	1.141
	华兴商贸中心综合楼	1416	1.547
	北川县人民法院	1179	1.289
	北川县客运站	1436	1.569
	北川县苦竹坝电厂	1483	1.621
	北川县新华书店	1013	1.107
	北川县农业局综合楼	1059	1.157

汶川地震前,北川县抗震设防烈度按7度执行。根据当时实施的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[22],规范中设计反应谱采用地震影响系数曲线表征。依据该规范,确定小震(50年超越

概率63%)、中震(50年超越概率10%)和大震(50年超越概率2%)对应的水平地震影响系数分别为0.08、0.23和0.50。将15组计算获得的地表地震影响系数谱与北川县不同概率水准(50年超越概率

63%、10%、2%)的抗震设防标准谱进行对比分析^[23],具体对比结果如图10所示。

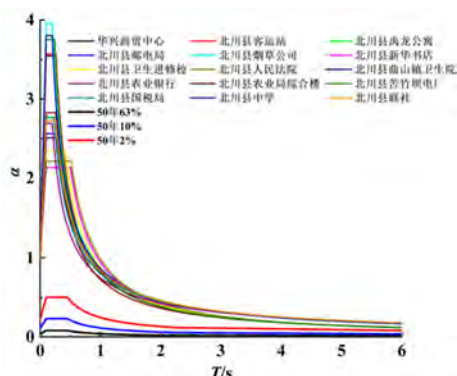


图10 标定反应谱与抗震设防水平对比图

Fig.10 Comparison between calibrated response spectrum and seismic fortification level

在汶川地震中,北川县地表地震动峰值加速度达到了极高的程度。实际发生的地震作用,显著超出了北川县抗震设计时所设定的设防标准^[24]。根据相关勘察报告,大部分建(构)筑物的设防烈度设定为7度,设计基本地震动加速度为0.1 g,如图10所示,此次地震实际产生的作用远远高于预先预计可能遭遇的地震作用水平。按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)的规定,此次地震的强度甚至超过了“大震”(50年超越概率2%)的水准。基于这样的实际情况与规范标准的对比,可以证明此前所确定的北川县地震动峰值加速度是相对合理的。

5 结论与展望

本文借助随机有限断层法对汶川地震主震的基岩地震场展开模拟,并将模拟结果与郫县走石山及茂县地办台站的实测加速度时程、反应谱进行对比分析。同时,运用土层地震反应分析方法确定北川县地表地震动,并通过反应谱标定手段验证其合理性,最终得出以下结论:

(1)模拟结果与实测数据吻合良好:模拟获得的烈度区分布与汶川地震实际烈度分布具有较高一致性,能量集中区域主要分布于震中汶川及北川县。针对51PXZ和51MXD基岩台站的加速度时程曲线与加速度反应谱模拟结果,其与实测数据相比具有较高的吻合度。

(2)北川县地表地震动强度特征:通过15个经验土层地震反应分析模型,采用一维等效线性化

程序(LSSRLI-1)计算表明,北川县地表地震动峰值加速度(PGA)分布在1000~1500 gal区间范围。

(3)地震动参数的合理性验证:基于反应谱标定方法对15个地表加速度反应谱进行参数优化,所获得的地震动参数显著超越北川县既有抗震设计标准中考虑的地震作用水平,验证了本文确定地震动参数的工程合理性。

本研究仍存在以下局限性:其一,近断层区域基岩台站样本数量匮乏,可能影响模拟结果的可靠性;其二:随机有限断层模拟中的关键参数的选取会对结果造成较大影响,需要考虑其不确定性,对其进行敏感性分析,且给出的北川县地震动估计应当结合不同震源参数进行多次模拟,给出一个地震动估计区间,此种表达形式较为合理;其三,北川县土层地震反应分析中,所采用的土层结构模型来源于岩土工程勘察报告,土体动力参数则基于其他学者对四川地区砂卵石土动力特性的研究成果,这种间接数据获取方式可能引入系统误差。后续研究建议:首先,在北川老县城区域实施钻探取样,建立实测数据支撑的土层地震反应分析模型;其次,通过实验室测试获取精确的土体动力参数;最后,综合考量地形效应和近断层地震动特征等复杂因素,建立更完善的地震动预测模型,为工程抗震设计提供更可靠的数据支撑。

参考文献

- [1] 徐建元.汶川特大地震北川老县城地表地震动初探[D].三河:防灾科技学院,2023.
- [2] 王国新,史家平.随机有限断层法在汶川强地震动模拟中的应用[J].自然科学进展,2009,19(06):664-669.
- [3] Bjerrum L W. Strong ground-motion simulation of the 12 May 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, using various slip models [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5):2396-2424.
- [4] 傅磊,李小军.龙门山地区的kappa(k0)模型及汶川 M_s 8.0地震的强地震动模拟[J].地球物理学报,2017,60(08):2935-2947.
- [5] 李平,徐建元,鞠雅倩,等.汶川地震近断层地震动峰值加速度衰减关系研究[J].振动工程学报,2024,37(11):1875-1883.
- [6] 卢滔,薄景山,李巨文,等.汶川大地震汉源县城建筑物震害调查[J].地震工程与工程振动,2009,29(06):88-95.
- [7] 兰景岩,王延伟,刘娟,等.基于随机有限断层方法的唐山地震强地面运动模拟[J].地震研究,2019,42(04):503-509+649.

- [8] 张建毅,蒋锋,郭晓云,等. 北川县城地震震害科考调查的几点反思[J]. 防灾科技学院学报, 2009, 11(01): 48-51.
- [9] Boore D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(6): 1865-1894.
- [10] Boore D M. Simulation of ground motion using the stochastic method[J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160(3-4): 635-675.
- [11] Chen J. Preliminary result of the May 12, 2008 M_w 7.97 Sichuan earthquake[DB/OL]. [2025-05-30]. https://ji.faculty.geol.ucsb.edu/big_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html, 2008.
- [12] 贾晓辉,曹秀玲,王晓山. 考虑地形效应的随机有限断层法地震动模拟研究[J]. 地震研究, 2024, 47(04): 619-626.
- [13] 高阳,潘华,汪素云. 随机有限断层法模拟中强地震近场强震动的参数影响研究[J]. 地震学报, 2014, 36(04): 698-710+3.
- [14] Boore D M. Determining generic velocity and density models for crustal amplification calculations, with an update of the Boore and Joyner (1997) Generic Site Amplification for Graphic Site Amplification[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(1): 313-317.
- [15] Motazedian D, Atkinson G M. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(03): 995-1010.
- [16] 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(05): 733-747.
- [17] 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.
- [18] 陶夏新,刘海明,王立媛,等. 汶川大地震中两个基岩强震观测台站的地震动合成[J]. 土木工程学报, 2013, 46(S1): 123-126.
- [19] 张建毅,薄景山,林玮,等. 北川县城土层特性对地震动的影响[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(01): 130-139.
- [20] Neri F, Tirronen V. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis[J]. Artificial Intelligence Review, 2010, 33(1-2): 61-106..
- [21] Storn R, Price K. Differential evolution—A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [22] 中华人民共和国建设部. 中华人民共和国国家标准: 建筑抗震设计规范: GB 50011—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [23] 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(01): 1-13.
- [24] 李小军,于爱勤,甘朋霞,等. 汶川 8.0 级地震北川县城灾区调查与分析[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(04): 352-362.