

汶川县水磨镇地震动场模拟

张 皓¹, 江华伟¹, 李宏男^{1,2}, 孙 威¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘 要 目的 笔者以四川省汶川县水磨镇作为区域研究对象进行村镇区域地震动场模拟,为村镇区域的防震减灾提供理论依据。方法 采用随机有限断层法与概率法得到地震动加速度反应谱;并基于弹性波动理论方法,通过该区域各点的地震动平动分量推演得到地震动扭转分量,建立基于地震动扭转分量的地震动场模型。结果 通过地震危险性分析得到了该地区 50 年超越概率 63% 的地震烈度为 6.3 度, $PGA = 60 \text{ cm/s}^2$;超越概率 10% 的地震烈度为 8.0 度, $PGA = 205 \text{ cm/s}^2$;超越概率 2% 的地震烈度为 9.1 度, $PGA = 361 \text{ cm/s}^2$;超越概率 0.5% 的地震烈度为 9.7 度, $PGA = 593 \text{ cm/s}^2$ 。结论 通过对比基于地震动平动分量和扭转分量的地震动场模型可以看出,地震动扭转分量的影响不容忽视,在预测村镇区域地震风险及村镇建筑抗震设计及分析时应考虑地震动平动分量和扭转分量的综合影响。

关键词 村镇区域;平动分量;扭转分量;随机有限断层法;地震动场

中图分类号 TU42;P315.3⁺1

文献标志码 A

Simulation of Earthquake Dynamic Field in Shuimo Town, Wenchuan County

ZHANG Hao¹, JIANG Huawei¹, LI Hongnan^{1,2}, SUN Wei¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

Abstract: The author takes Shuimo town of Wenchuan County, Sichuan province as the regional research object to simulate the earthquake field in villages and towns in order to provide theoretical basis for earthquake prevention and disaster reduction in villages and towns. The random finite fault method and probability method are used to obtain the acceleration response spectrum of ground motion. Based on the elastic wave theory, the torsion component of ground motion was deduced from the translational component of ground motion at each point in the region, and the ground motion field model was established based on the torsion component of ground motion. Based on the seismic risk analysis, the seismic intensity of 6.3 degree, $PGA = 60 \text{ cm/s}^2$, with a

收稿日期:2020-03-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1100402);国家自然科学基金重点项目(51738007)

作者简介:张皓(1983—),男,教授,博士,主要从事工程结构防灾减灾等方面研究。

exceedance probability of 63% in 50 years was obtained. The earthquake intensity with exceedance probability of 10% was 8.0 degree, $PGA = 205 \text{ cm/s}^2$. The seismic intensity of 2% exceedance probability is 9.1 degree, $PGA = 361 \text{ cm/s}^2$. The intensity of the earthquake with a probability exceeding 0.5% was 9.7 degrees, $PGA = 593 \text{ cm/s}^2$. By comparing the ground motion field models based on translational component and torsional component, it can be seen that the influence of torsional component of ground motion cannot be ignored, and the comprehensive influence of translational component and torsional component of ground motion should be considered in the prediction of earthquake risk in villages and towns and the seismic design and analysis of village buildings.

Key words: rural area; translational component; torsional component; random finite fault method; earthquake ground motion field

据不完全统计,在全球大陆的大地震中,约有 25% ~ 30% 发生在中国^[1]。2008 年我国四川省汶川县发生 8.0 级强烈地震,震中烈度高达 11 度,波及范围广,地震导致汶川县下属各级村镇区域的震害极其严重。我国地震动参数区划图主要是按城市区域进行分区划分,未考虑城市区域与村镇地区的环境差异,无法精确反映村镇区域的特点。因此有必要针对村镇区域开展地震动场模型的研究,为村镇区域的防震减灾提供理论依据。

目前,国内外学者针对地震动场模拟开展了大量的研究工作。I. A. Beresnev 等^[2]将有限断层模型随机点源法相结合当中提出了随机有限断层法模拟地震动场。H. Mittal 等^[3]采用随机有限断层法模拟了印度北阿坎德邦和尼泊尔边界处发生的 5.4 级地震。ZHOU Hong 等^[4]对随机有限断层法进行修正,进而模拟了 2013 年芦山 7.0 级地震的地震动场。王国新等^[5]回顾总结了国内外关于地震动模拟的相关方法,采用随机有限断层法合成汶川各网格点的地震加速度时程,并绘制了加速度等值线图,分析了地震动的分布特点。大量震害调查结果表明,地震动扭转分量也会导致建筑物发生严重破坏^[6]。李钢等^[7]在对汶川地震村镇建筑结构震害调查研究中发现,村镇建筑破坏形式具有多样性,有些破坏模式可明显看出是地震动扭转分量造成。L. Knopoff 等^[8]根据地震发生时的震源

机制展开研究,结果显示,地震发生时,断层发生破裂的不平衡扭矩能够产生一种扭转波,进而导致场地发生扭转变形。王君杰等^[9]分别从定量和定性两个方面展开了对薄壁圆柱回转壳结构在地震动扭转分量作用下的地震反应分析的研究,结果发现,针对结构反应贡献大小,扭转分量主要和结构高度、结构高度比、回转半径以及壳的刚度有关。

在地震动场模拟及结构抗震分析中仅考虑平动分量可能会低估地震的破坏力。笔者以汶川县水磨镇(东经 103.427°,北纬 30.937°)作为区域研究对象,基于该区域地震原始数据通过概率法开展地震危险性分析,采用随机有限断层法模拟合成该区域各网格点的地震动平动分量,基于地震动平动分量建立地震动场。在此基础上基于弹性波动理论方法得到与该区域内各网格点地震动平动分量相对应的地震动扭转分量,建立基于地震动扭转分量的地震动场。

1 地震危险性分析

1.1 地震带划分

以汶川县水磨镇为中心,半径约 150 km 的地理区域,即东经 101.5° ~ 105.5°,北纬 29.5° ~ 32.5°。根据四川及邻区地震区划图^[10],对水磨镇地区影响最大的地震带主要有甘南川北地震带、四川盆地地震带和川滇块体地震带。

1.2 地震重现关系

地震重现关系又称为震级-频度关系,通常由 $G-R$ 关系式来表述:

$$\lg N = a - bM. \tag{1}$$

式中: M 为震级; N 为震级大于 M 的地震总数; a 、 b 为统计常数。

通过统计分析川滇块体地震带、甘南川北地震带和四川盆地所发生历史地震的次数和震级之间关系,即可得到各地震带的震级-频度关系如下^[11]:

$$\lg N = 3.700 - 0.6889M. \tag{2}$$

$$\lg N = 3.665 - 0.733M. \tag{3}$$

$$\lg N = 4.155 - 0.888M. \tag{4}$$

$$\log_{10} A_{\text{长轴}} = -0.3349 + 1.3807M - 0.0665M^2 - 2.1920 \log_{10}(R + 2.5292 \exp(0.3334M)). \tag{5}$$

$$\log_{10} A_{\text{短轴}} = -1.5206 + 1.4539M - 0.0715M^2 - 1.8499 \log_{10}(R + 2.5292 \exp(0.3334M)). \tag{6}$$

1.5 地震危险性分析结果

在地震带划分后可以看出,各个地震带上的地震活动在时间和空间上均呈现非均匀分布的特征,地震活动发生的时间过程在进行概率性地震危险性分析时可近似表达为分段泊松分布;各地震带的震级上限和下限可分别表示为 m_{uz} 和 m_0 , t 年内出现震级为 m_{uz} 和 m_0 之间地震的年平均发生率可用 v_0 表示,因此在该地震带 t 年内发生 k 次地震的概率为

$$P(k) = \frac{(v_0 \cdot t)^k}{k!} e^{-v_0 t}. \tag{7}$$

震级概率密度函数为

$$f(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz} - m_0)]}. \tag{8}$$

式中: $\beta = b \ln 10$, b 为地震重现关系中的

$$P_n(A \geq a) = 1 - \exp\left(-\frac{2v}{\beta}\right) \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_m} \iiint P(A \geq a | Ef_m(m_j) SH(\frac{1}{2}\beta\Delta m) f(\theta) f_i, m_j / S_j d_x d_y d\theta). \tag{10}$$

式中: $P(A \geq a | E)$ 表示第 i 个潜在震源区发生特定事件时场地处地震动值超过 a 的概率; $f(\theta)$ 为等震线长轴方向的分布函数。

综合 N_s 个地震带对场点的影响得:

1.3 潜在震源区地震空间分布函数

将以上三个地震带的地震活动参数中年平均发生率分配给各潜在震源区,将各潜在震源区按震级进行分档,再将各地震带的地震年平均发生率按不同权重分配给各潜在震源区,结合文中实际情况,采用文献[10]中在水磨镇研究区范围内的各潜在震源区地震空间分布函数。

1.4 基岩加速度峰值衰减关系

采用西南地区、美国西部地区地震烈度衰减关系和美国西部地震动衰减关系得到西南地区长轴和短轴基岩水平峰值加速度衰减关系^[11]如下:

$$b \text{ 值。}$$

把震级 m 分成 N_m 档; m_j 表示的震级档范围为 $(m_j \pm \frac{1}{2}\Delta m)$ 档,则发生 m_j 档地震的概率为

$$P(m_j) = \frac{2}{\beta} f_m(m_j) SH(\frac{1}{2}\beta\Delta m). \tag{9}$$

式中: Δm 为震级分档步长。

将各地震带划分潜在震源区,则各个震级档的地震发生在各地震带的各潜在震源区在空间上呈非均匀分布,用 f_{j,m_j} 作为各潜在震源区的空间分布函数来表示这种地震空间分布不均匀性。潜在震源区的个数用 N_s 来表示。地震带上的地震对场地影响的地震动参数为 A ,则 A 超过已知值 a 的概率为

$$P(A \geq a) = 1 - \prod_n^N (1 - P_n(A \geq a)). \tag{11}$$

基于以上方法得到水磨镇地区地震危险性分析结果见表1。

表1 水磨镇地区地震危险性分析结果

Table 1 Results of hazard analysis in Shuimo town area

| 50年超越 概率/% | 重现期/a | 地震烈度 | 峰值加速 度/(cm·s ⁻²) |
|---------------|--------|------|---------------------------------|
| 63 | 50 | 6.3 | 60 |
| 10 | 475 | 8.0 | 205 |
| 2 | 2 500 | 9.1 | 361 |
| 0.5 | 10 000 | 9.7 | 593 |

水磨镇地区 50 年超越概率分别为 63%、10%、2%、0.5% 的加速度反应谱曲线如图 1 所示。该地区 50 年超越概率 63% 的地震烈度为 6.3 度, $PGA = 60\text{ cm/s}^2$; 超越概率 10% 的地震烈度为 8.0 度, $PGA = 205\text{ cm/s}^2$; 超越概率 2% 的地震烈度为 9.1 度, $PGA = 361\text{ cm/s}^2$; 超越概率 0.5% 的地震烈度为 9.7 度, $PGA = 593\text{ cm/s}^2$ 。

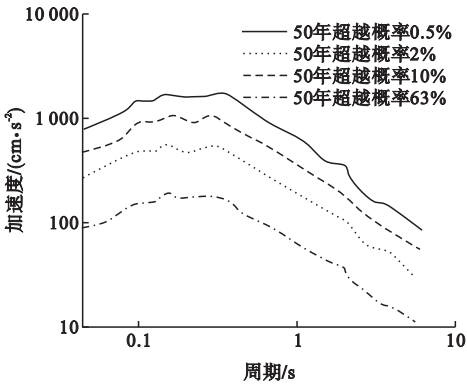


图1 50年不同超越概率加速度反应谱曲线

Fig. 1 50-year acceleration response spectra of different transience probabilities

2 基于平动分量的水磨镇地区地震动场模拟

笔者采用随机有限断层法进行地震动场的模拟,随机有限断层法是将整个发震断层按照固定的规则分解成一定数量的子断层,由于划分后子断层尺寸较小,每一个子断层在计算中都可以视为一个点源模型^[5]。通过对水磨镇区域划分网格,并针对各网格点采用上述有限断层法进行水磨镇地震动场模拟。

2.1 随机有限断层法震源参数确定

破裂面积和地震矩之间的关系为

$$\log M_0 = 1.5 \log S + \log \Delta \sigma + \log C. \quad (12)$$

式中: M_0 为地震矩; S 为断层破裂面积; $\Delta \sigma$ 为应力降; C 为常数,可按式取值:

$$\begin{cases} C = \frac{16}{7\pi^{3/2}}, & \text{圆盘破裂;} \\ C = \frac{3\pi}{16}, & \text{逆冲断层;} \\ C = \frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{L} \right)^{1/2}, & \text{走滑断层;} \\ C = \frac{\pi(\lambda + 2\mu)}{4(\lambda + \mu)} \left(\frac{W}{L} \right)^{1/2}, & \text{倾滑断层.} \end{cases} \quad (13)$$

式中: L 为断层长度; W 为断层宽度; λ 为拉梅常数; μ 为剪切模量。

地震矩和矩阵级之间的关系为

$$\log M_0 = 1.5 M_w + 16.1. \quad (14)$$

式中: M_w 为矩阵级。

应力降为

$$\Delta \sigma = C' u \frac{\bar{D}}{L}. \quad (15)$$

式中: \bar{D} 为断层上的平均滑动; C' 为无因次因子; λ 为拉梅常数; μ 为剪切模量,取值为 3.1×10^{11} 。

$\Delta \sigma$ 可按经验取值或者对实测地震数据的反演得到。文中取 $\Delta \sigma = 4.0 \times 10^6\text{ Pa}$ 。

$$\begin{cases} C' = \frac{7\pi}{16}, L = r, & \text{圆盘破裂;} \\ C' = \frac{16}{3\pi}, L = W, & \text{逆冲断层;} \\ C' = \frac{2}{\pi}, L = W, & \text{走滑断层;} \\ C' = \frac{4(\lambda + \mu)}{\pi(\lambda + 2\mu)}, L = W; & \text{倾滑断层.} \end{cases} \quad (16)$$

圆盘断层的半径长度可以表示为

$$\log L = 0.5 M_w + 5.4 + \frac{2}{3} \log C + \log C' - \frac{1}{3} \log \Delta \sigma. \quad (17)$$

模拟地震动采用随机有限断层法时,其

中的应力降参数的取值没有具体的规定,可以不通过计算而直接采用经验值或者对地震的反演得到的应力降参数。当震级大于 5.5 时,取平均值为 4.0×10^6 Pa。

对于长方形断层长度 L :

$$\log L = 0.5 M_w + 5.3 - \frac{4}{3} \log C - \log C' - \frac{1}{3} \log \Delta \sigma. \tag{18}$$

断层平均滑动 \bar{D} 与矩阵级的关系为

$$\log \bar{D} = 0.5 M_w + 5.4 + \frac{2}{3} (\log C - \log \Delta \sigma) - 11.5. \tag{19}$$

断层长度和震级 M 的关系为

$$\log L = -1.5 + 0.5 M. \tag{20}$$

断层面积与震级的关系为

$$\log S = -3.49 + 0.91 M. \tag{21}$$

子源断层长度 ΔL 和子震震级 M_z 之间的关系:

$$\log (\Delta L) = 0.4 M_z - 2. \tag{22}$$

在震级和破裂长度已知的情况下,与选定的子震震级相对应的子源平均破裂长度可以用式(23)决定:

$$\log (\Delta L) = \log L - 0.5 (M - M_z). \tag{23}$$

对发震断层进行划分后,先确定子源地震矩,之后可以确定子震的个数:

$$M_e = \Delta \sigma \times A \times \Delta L. \tag{24}$$

式中: A 为子源的面积。

子震的数量可以由式(25)表示:

$$N_e = \frac{M_0}{M_z}. \tag{25}$$

综合考虑各子源产生的地震动到达目标

场地的时间滞后效应,将每个子源产生的地震动加速度时程进行叠加,就可以得到断层破裂在目标场地引起的地震动加速度时程 $a(t)$:

$$a(t) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_w} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}). \tag{26}$$

式中: N_L 和 N_w 表示长度和宽度方向上的子断层数, $N_L \times N_w = N$ 即子源的总数; Δt_{ij} 为可考虑断层破裂传播到第 ij 个子源引起的时滞效应和从第 ij 个子源至目标场地距离所引起时滞效应; $a_{ij}(t)$ 为第 ij 个子源引起的观测点的地震动。

高频衰减因子 (k_0) 是采用有限断层法地震动模拟时考虑地形、地质条件影响的重要参数,对地震动峰值加速度影响较大,傅磊等^[12]在采用该方法模拟两个不同台站的地震动时发现, k_0 的取值仅相差 1.4% 的情况下导致两个台站的 PGA 值相差近两倍。因此,笔者按式(27)考虑水磨镇地区各网格点的高频影响因子 k_0 与高程之间的影响关系:

$$\ln k_0 = -0.786 - 0.379 \times \ln h. \tag{27}$$

式中: k_0 为目标场地各网格点处高频衰减系数; h 为目标场地内网格点的高程。

2.2 基于地震动平动分量地震动场模拟

汶川地震发生后,很多学者对汶川地震发生的震源和断层模型进行反演,得到了该次地震的相关断层和震源参数^[13-14]。笔者根据汶川地震实测数据,结合文献[5]中推演分析得到的震源参数结合有限断层法用于水磨镇地区地震动场模拟,相关震源参数取值见表 2。

表 2 汶川地震震源、传播路径和场地效应参数取值

| Table 2 Source, propagation path and site effect parameters of Wenchuan earthquake | | | | | | | | |
|--|--|--|--|---------------|-------------|----------------------|--|------------------------|
| 矩震级 M_w | 断层走向/ ($^{\circ}$) | 倾角/ ($^{\circ}$) | 震中位置 | 震源深度/ km | 断层埋深/ km | 断层埋深/ km | 破裂速度/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) | 大断层长 \times 宽/ km |
| 7.9 | 222 | 38 | 31.0 $^{\circ}$ N, 103.4 $^{\circ}$ E | 14 | 14 | 3 | 0.8 \times 剪切波速 | 308 \times 40 |
| 应力降/ MPa | 剪切波速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) | 地壳密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | Q_{\min} | 窗函数 | 阻尼比 | 滞弹性衰减 | 小断层长 \times 宽/km | |
| 9.5 | 3.5 | 2.8 | 150 | Saragoni-Hart | 0.05 | $360 \times f^{0.7}$ | 3.5 \times 2.0 | |

图2和图3分别给出了模拟得到的水磨镇地区加速度反应谱和基于地震动平动分量的地震动场模型。由图2可以看出,模拟得到的水磨镇地区地震动加速度反应谱与基于历史地震数据危险性分析所得到的反应谱基本吻合,由于地震危险性分析时所选台站所处范围较广,有个别台站处于水磨镇区域范围以外的相近区域,导致地震危险性分析得到的加速度反应谱偏于保守,可能会低估水磨镇地区的地震风险。由图3可以看出,水磨镇地区西北角区域 *PGA* 值较大,自西北角向东南角呈递减趋势,东南角区域 *PGA* 值较小。

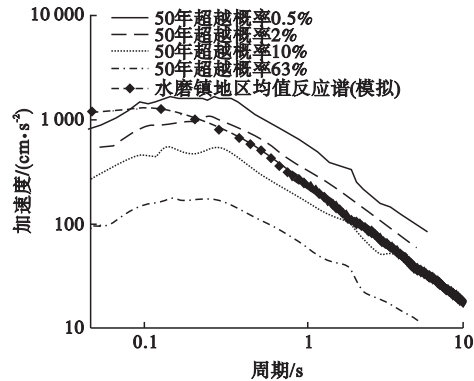


图2 加速度反应谱曲线

有简单三个方向的平动分量,在平动分量的基础上还存在三个方向的扭转分量,包括两个绕水平轴的摇摆分量和一个绕竖轴的扭转分量。目前,关于地震动场模型的研究一般仅考虑地震动平动分量的影响,考虑地震动扭转分量的研究尚不多见。基于此,笔者在考虑地震动平动分量的基础上,进一步模拟得到基于地震动扭转分量的地震动场模型。

3.1 地震动扭转分量

3.1.1 Rayleigh 波

在弹性介质中选择一立方体体积元,在坐标平面内投影(见图4)。在外力的作用下同时发生平动和转动,按图示几何关系即可得到立方体体积元形变前后对角线之间的夹角,即所产生的角位移:

$$\phi_{gz} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Pi}{2} - \alpha - \beta \right] + \alpha - \frac{\Pi}{4} = \frac{1}{2} (\alpha - \beta). \tag{28}$$

由于体积元的变形极其微小,转角的正切值可以近似等于转角,即:

$$\phi_{gz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right). \tag{29}$$

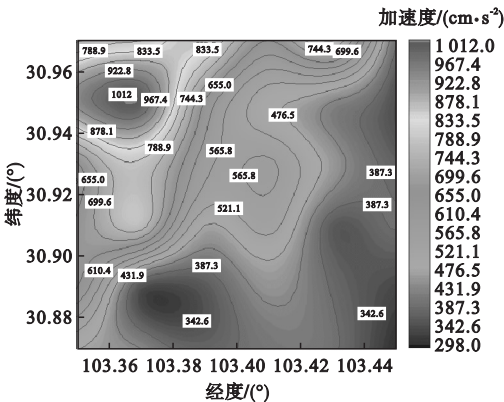


图3 基于地震动平动分量地震动场

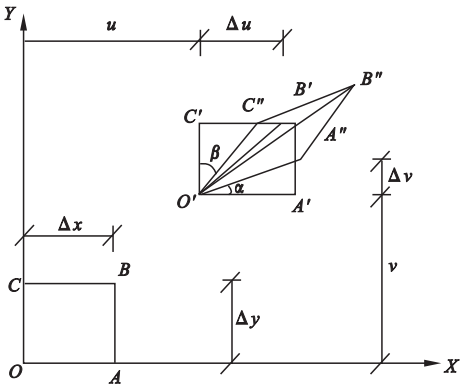


图4 体积元形变原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of volume element deformation principle

同理,另外两个坐标平面内角位移:

$$\phi_{gy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right). \tag{30}$$

$$\phi_{gx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right). \tag{31}$$

设势函数:

3 基于地震动扭转分量的水磨镇地区地震动场模拟

已有研究表明^[15-16],地震动并不是仅具

$$\phi(x,z,t) = A \exp(-\sqrt{a^2 - k^2}) \cdot \exp i(ax - \omega t). \tag{32}$$

$$\psi(x,z,t) = B \exp(-\sqrt{a^2 - k'^2}) \cdot \exp i(ax - \omega t). \tag{33}$$

式中: $k = \frac{\omega}{\alpha}$, $k' = \frac{\omega}{\beta}$, $a = \frac{\omega}{v_R}$; V_R 为 R 波的相速度; α 和 β 为纵波和剪切波波速; A 和 E 为振幅。

X 向位移和 Z 向位移 W 可分别表示为

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z}. \tag{34}$$

$$w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x}. \tag{35}$$

利用自由表面剪应力为零的边界条件可以得到 Rayleigh 波绕 Y 轴的地震动扭转分量:

$$\phi_{gy} = i \frac{w_1}{v_R} w_1. \tag{36}$$

式中: $i = \sqrt{-1}$, w_1 为竖向加速度平动分量。

3.1.2 Love 波

设第一土层和第二土层中波函数为

$$v_1(x,z,t) = [A \cos(pz) + B \sin(pz)] \times \exp i(ax - \omega t). \tag{37}$$

$$v_2(x,z,t) = C e^{-bz} \exp i(ax - \omega t). \tag{38}$$

式中: $p = \sqrt{k_1^2 - a^2}$, $b = \sqrt{a^2 - k_2^2}$, $k_1^2 = \frac{\omega^2}{V_{S1}^2}$,

$k_2^2 = \frac{\omega^2}{V_{S2}^2}$, A, B, C 为常数。

Love 波只会产生竖向位移, 即 $u = w = 0$, 所以扭转分量为

$$\varphi_{gz} = \frac{1}{2} \frac{i\omega}{V_L} v. \tag{39}$$

式中: v 为 y 方向位移; V_L 为 L 波相速度。

若想要获得平面内以及出平面的地震动分量需要对获得的地震动平动记录进行分解, 分解过程如下所示:

$$u = Tu'. \tag{40}$$

式中: u 为分解得到的三个地震动水平分量和三个地震动扭转分量; u' 为由地震台站实际得到的地震动三个水平分量地震动记录, 坐标变换矩阵如下所示:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\lambda & \sin\lambda & 0 \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{41}$$

3.2 基于地震动扭转分量的地震动场模拟

基于以上方法得到水磨镇区域各网点的地震动扭转分量, 进而得到基于地震动扭转分量的水磨镇地震动场(见图 5)。可以看出, 水磨镇区域地震动扭转分量峰值分布与地震动平动分量的峰值分布不尽相同, 较大的地震动扭转分量有可能出现在地震动平动分量较小的网格点上, 因此地震动扭转分量的影响也不容忽视。

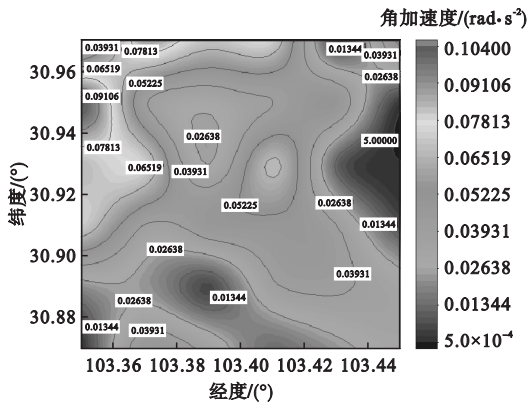


图5 基于地震动扭转分量的地震动场
Fig.5 Ground motion field based on ground motion torsion component

4 结 论

(1) 通过地震危险性分析得到了该地区 50 年超越概率 63% 的地震烈度为 6.3 度, $PGA = 60 \text{ cm/s}^2$; 超越概率 10% 的地震烈度为 8.0 度, $PGA = 205 \text{ cm/s}^2$; 超越概率 2% 的地震烈度为 9.1 度, $PGA = 361 \text{ cm/s}^2$; 笔者特别考虑了巨震的影响, 得到了 50 年超越概率 0.5% 的地震烈度为 9.7 度, $PGA = 593 \text{ cm/s}^2$ 。

(2) 通过模拟得到的水磨镇地区地震动场模型可以看出, 地震动加速度峰值普遍较大、衰减较快, 且自西向东, 加速度峰值逐步递减, 主要是由于山区地形地质条件造成的。

(3)通过建立基于地震动扭转分量的地震动场可以看出,在整个区域内扭转分量的大小分布情况与平动分量不一致,在某些平动分量较小的区域扭转分量可能会较大。因此,需关注地震动平动分量和扭转分量对村镇建筑的综合影响。

参考文献

- [1] 李亚楠. 工程用地震动模拟随机性方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
(LI Ya'nan. Study on randomness method of engineering land vibration simulation [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2016.)
- [2] BERESNEV I A,ATIKINSON G M. FINSIM-a Fortran program for simulation stochastic acceleration time histories from finite faults [J]. Seismological research letters. 1998, 69 (1):27-32.
- [3] MITTAL H,KUMAR A. Stochastic finite-fault modeling of Mw5. 4 earthquake along Uttarakhand Nepal border [J]. Natural hazards,2015,75(2):1145-1166.
- [4] ZHOU Hong,CHANG Ying. Stochastic finite-fault method controlled by the fault rupture process and its application to the Ms 7. 0 Lushan earthquake [J]. Soil dynamics and earthquake engineering,2019,7:105782.
- [5] 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(6):664-669.
(WANG Guoxin,SHI Jiaping. Application of stochastic finite fault method in Wenchuan strong earthquake simulation [J]. Progress in natural science,2009,19(6):664-669.)
- [6] 李宏男,孙立晔. 地震面波产生的地震动转动分量研究[J]. 地震工程与工程振动,2001 (1):15-23.
(LI Hongnan,SUN Liye. Research on the rotational components of ground motions produced by seismic surface waves [J]. Earthquake engineering and engineering vibration,2001(1):15-23.)
- [7] 李钢,刘晓宇,李宏男. 汶川地震村镇建筑结构震害调查与分析[J]. 大连理工大学学报, 2009,49(5):724-730.
(LI Gang,LIU Xiaoyu,LI Hongnan. Investigation and analysis of seismic damages of villages and towns in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Dalian university of technology, 2009, 49 (5):724-730.)
- [8] KNOPOFF L, YUN-TAI C. Single-couple component of far-field radiation from dynamical fractures [J]. Bulletin of the seismological society of America, 2009, 99 (2B):1091-1102
- [9] 王君杰. 地震动扭转分量对薄壁柱壳结构的影响[J]. 地震学报,1995(2):217-222.
(WANG Junjie. Effect of ground motion torsion component on the structure of thin pilot shells [J]. Journal of earthquake, 1995 (2): 217-222.)
- [10] 雷建成. 梯级电站系统的地震危险性评价方法[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2011.
(LEI Jiancheng. Earthquake risk assessment method for cascade power station system [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration,2011.)
- [11] 雷建成,高孟潭,俞言祥. 四川及邻区地震动衰减关系[J]. 地震学报,2007(5):500-511.
(LEI Jiancheng,GAO Mengtan,YU Yanxiang. The attenuation relationship of ground motion in Sichuan and neighboring areas [J]. Acta seismologica sinica,2007(5):500-511.)
- [12] 傅磊,李小军. 龙门山地区的 kappa(k₀)模型及汶川 M_s8. 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(k₀) model in Longmenshan area and the simulation of strong ground motion of Wenchuan M_s8. 0 earthquake [J]. Journal of geophysics, 2017, 60(8):2935-2947.)
- [13] 袁峰. 汶川地震动持时特性分析[D]. 南昌:南昌航空大学,2017.
(YUAN Feng. Analysis of the duration characteristics of Wenchuan ground motion [D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University,2017.)
- [14] 张翠然,陈厚群,李敏. 采用随机有限断层法生成最大可信地震[J]. 水利学报,2011,42 (6):721-728.
(ZHANG Cuiran,CHEN Houqun,LI Min. Using stochastic finite fault method to generate the largest credible earthquake [J]. Journal of hydraulic engineering,2011,42(6):721-728.
- [15] 郭明珠,孙海龙. 天然地震波的频率特性与场地相关性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(6):1013-1021.
(GUO Mingzhu,SUN Hailong. Frequency characteristics and correlation analysis of natural seismic waves belonging to different sites [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37 (6): 1013-1021.)
- [16] 邹威,许强,刘汉香. 强震作用下状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究[J]. 地震工程与工程震动,2011,31(4):143-149.
(ZOU Wei,XU Qiang,LIU Hanxiang. Large-scale shaking table model test study on failure of layered rockg slope under strong ground motion [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2011, 31 (4): 143-149.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)