Application of the Empirical Hybrid Rupture Fault Model in the June 1, 2022 Lushan Earthquake

Xingzhe Li[1], Xueliang Chen[2,*], Kelin Chen[3]

[1] College of Civil Engineering, Guilin University of Technology，Guilin 541004，China

[2] Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

[3] College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology，Beijing 100124，China

[*]Corresponding author. Email: chenxueliang007@126.com

ABSTRACT

This study applies empirical magnitude-source parameter relationships to the Mw 5.9 Lushan earthquake on June 1, 2022. By employing a hybrid source model combining a deterministic asperity model and the stochastic K^2 model, 30 sets of source rupture models were generated using a truncated normal distribution method to randomly sample global and local source parameters consistent with empirical constraints. Acceleration response spectra for these 30 source models were simulated at 20 stations via the stochastic finite-fault method. The source model exhibiting the smallest residual between its response spectra and the average response spectrum was selected as the optimal source characterization for the Lushan earthquake.

Keywords: *Source parameters, asperity model, k-squared model, finite faults.*

经验混合破裂断层模型在 2022 年 6 月 1 日芦山地震中的应用

李兴哲[1]，陈学良[2,*]，陈科霖[3]

[1] 桂林理工大学 土木工程学院，广西 桂林 541004

[2] 中国地震局地球物理研究所，北京 100081

[3] 北京工业大学 城市建设学部，北京 100124

[*] 通讯作者. 电子邮箱：chenxueliang007@126.com

摘要

本文通过使用震级—震源参数的经验公式，应用于 2022 年 6 月 1 号的 Mw5.9 的芦山地震。采用确定性的凹凸体模型和随机性的 K^2 模型相结合的混合震源模型，通过使用截断正态分布方法随机生成符合经验公式的全局震源参数和局部震源参数，生成了 30 组震源破裂模型。并使用随机有限断层法生成了这 30 组震源模型的 20 个台站的加速度反应谱，挑选出这 30 组震源模型的反应谱于平均反应谱残差最小的震源模型作为芦山地震的震源模型。

关键词： *震源参数，凹凸体模型，K^2 模型，有限断层.*

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_28

1. 引言

强地震动研究是认识地震和工程应用主要方向，是目前关注的重点方向，如何认识地震的产生和更好的构建地震模型，对于抗震设防有着指导作用。地震震源参数的定量化表征是理解地震物理机制和评估灾害风险的核心科学问题。作为描述断层破裂过程的时空特征量，震源参数在观测层面表现出显著的不确定性特征，这种不确定性源于地球介质的高度非均匀性，也受限于当前观测手段对深部孕震过程的探测能力。因此，震源参数存在着明显的随机性，并且这种随机性是与未来地震及其影响的不可预测性所关联的一种内在不确定性，针对于这种不确定性会随着观测数据的积累以及认识的发展而逐渐降低。震源破裂模型解释了地震能量的展布，并且是地震模拟的关键参数，如何在震后快速的构建起地震破裂模型对于震后救灾，减少人员经济损失以及为之后的灾后重建提供了方向。但是，地震的发生充满了不确定性，因此，学界有使用统计方法来解释地震特征。许多学者[1-3]通过对于地震震源参数与矩震级的关系分析，得到了震级—震源参数的经验关系式。这对于快速震源模型构建有着重要意义。本文使用前人统计得到的经验公式结合截断正态分布生成凹凸体模型和 K^2 模型组合的混合震源模型，得到芦山地震的震源模型。

2. 混合震源模型

混合震源模型是结合了确定性震源模型和随机性震源模型生成的具有这两种震源模型特点的震源模型。确定性震源模型也是凹凸体震源模型，目前，一些学者使用低于 1 Hz 地震波反演得到的震源破裂模型，证实了凹凸体的存在，但是无法较好的体现断层的异质性。随机震源模型是使用空间随机场模型，来体现地震滑移的随机性，帮助认识地震破裂过程，但是该模型缺乏真实参数的支撑，而混合震源模型则结合了二者的优点，成为目前学界较为认可的一种方法。

凹凸体模型可以通过全局震源参数和局部震源参数构建，而 K^2 模型[4]则需要将断层模型转换到波数域进行随机相位操作，可以通过式（1）实现这个过程。通过两种模型的结合，从而即有了波形反演确定的高滑移特征，同时也展现出地震断层的异质性特点。

$$D(k_x,k_z)=\frac{\Delta\bar{u}LW}{\sqrt{1+((\frac{k_xL}{K})^2+(\frac{k_zW}{K})^2)^2}}e^{i\Phi(k_x,k_z)} \tag{1}$$

其中，其中，Δu 表示平均滑移，ϕ 表示随机相位，K 是一个无量纲常数，控制拐角波数。对于随机相位谱 ϕ，只有一个限制，就是波数仅在 $k^2=k_x^2+k_z^2\leq(1/L)^2+(1/W)^2$ 范围外随机，这样做的原因是为了保留高滑移特性的同时，增加背景区域的随机性分布。

3. 震源参数

震源参数可以分为两类，一类是全局震源参数，主要是断层的空间方位，断层尺寸、断层面的平均滑动以及平均破裂速度。一类是局部震源参数，包括凹凸体尺寸及位置、凹凸体平均滑移、空间拐角波数以及破裂起始点等。本文列举了王海云[3]中统计得到的全局震源（包括断层长宽、断层面积、断层平均滑移，延走向和延倾向的拐角波数、震源位于断层面的位置）参数的经验公式、均值以及标准差（表 1），局部震源（凹凸体面积、凹凸体长宽、凹凸体平均滑移、凹凸体中心点位于断层位置）参数的经验公式及标准差（表 2），结合截断正态分布式（2）生成了 30 组震源模型参数包括全局震源参数和局部震源参数，因为本次芦山地震的矩震级为 5.9，因此本文只考虑一个凹凸体的情况。

$$\psi(\bar{\mu},\bar{\sigma},a,b;x)=\begin{cases}0 & x\leq a\\ \dfrac{\varphi(\bar{\mu},\bar{\sigma}^2;x)}{\phi(\bar{\mu},\bar{\sigma}^2;b)-\phi(\bar{\mu},\bar{\sigma}^2;a)} & a<x<b\\ 0 & b\leq x\end{cases} \tag{2}$$

其中，$\varphi(\mu,\sigma^2;x)$表示的是标准正态分布的概率密度函数，$\phi(\mu,\sigma,a,b;x)$表示的是标准正态分布的概率分布函数，μ 和 σ 表示的是标准正态分布的均值和标准差，a 和 b 表示的是截断正态分布随机变量的上下界，本文上下界的取值规则是根据王海云[3]中提到的截距范围，和 3σ原则。

随机得到断层面和凹凸体的平均滑移后，通过式（3）来计算非凹凸体区域的平均滑移。

$$\bar{D}_o=\frac{(\bar{D}\cdot S-\bar{D}_{asp}\cdot S_{asp})}{(S-S_{asp})} \tag{3}$$

本文根据 30 组震源模型生成的断层滑移图，因为篇幅原因，仅展示其中 12 组滑移模型，如图 1 所示。

表 1 全局震源参数经验关系式、标准差以及芦山地震对应的均值

全局震源参数	经验关系式	均值μ	标准差σ
S（断层面积）	$\lg S = M_W - 4.0$	79.43	0.29
L（断层长度）	$L = S / W$	-	-
W（断层宽度）	$\lg W = 0.5M_W - 2.1$	7.08	0.16
D（断层平均滑移）	$\lg \overline{D} = 0.5M_W - 1.45$	31.62	0.29
K_{cx}（延走向拐角波数）	$\lg k_{cx} = 1.90 - 0.5M_W$	0.089	0.18
K_{cy}（延倾向拐角波数）	$\lg k_{cy} = 2.07 - 0.5M_W$	0.132	0.16
X_{hyp} (延走向震源位置)	$\lg X_{hyp} = \lg L - 0.37$	-	0.24
Y_{hyp} (延倾向震源位置)	$\lg Y_{hyp} = \lg W - 0.09$	-	0.17

表 2 局部震源参数经验关系式、标准差

局部震源参数	经验关系式	标准差σ
凹凸体面积 S_{asp}	$\lg S_{asp} = \lg S - 0.68$	0.04
凹凸体长度 L_{asp}	$\lg L_{asp} = \lg L - 0.44$	0.15
凹凸体宽度 W_{asp}	$W_{asp} = S_{asp} / L_{asp}$	-
凹凸体中心延走向坐标 X_{asp}	$\lg X_{asp} = \lg L - 0.51$	0.18
凹凸体中心延走向坐标 Y_{asp}	$\lg Y_{asp} = \lg W - 0.3$	0.19
凹凸体上的平均滑动D_{asp}	$\lg \overline{D}_{asp} = \lg \overline{D} + 0.34$	0.07

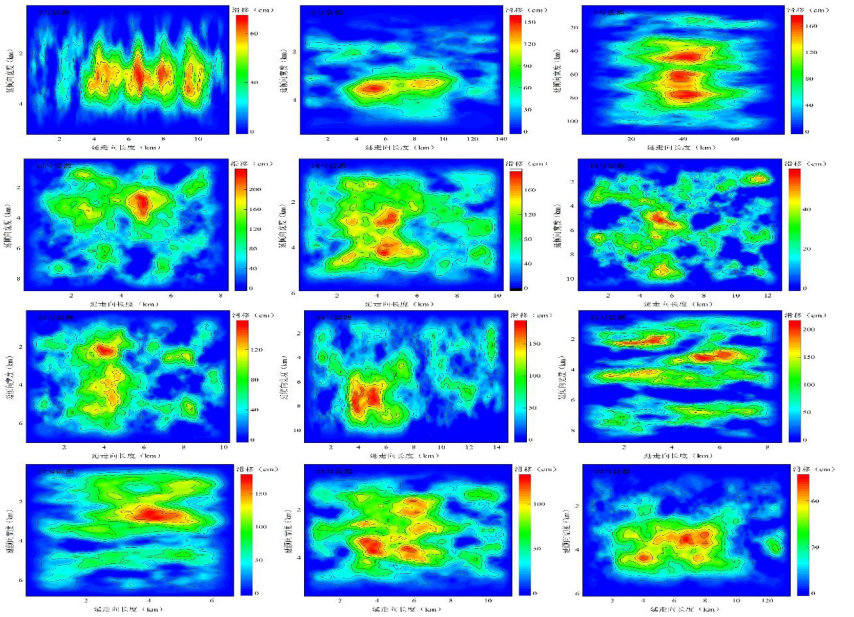

图 1 根据震源参数生成的断层破裂模型

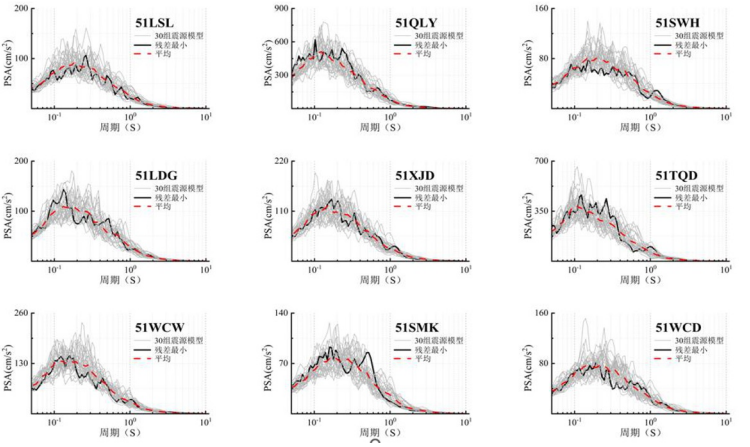

图 2 30 组震源模型、残差最小以及平均的观测点反应谱图

表 3 随机有限断层法模拟参数

参数	参数值
断层走向、倾角、滑移角	21、47、80
Kappa	0.04
品质因子	$274.6f^{0.423}$
应力降	50
几何传播模型	$1/R$ R≤70km
	$1/R^{0}$ 70km<R<130km
	$1/R^{0.5}$ R≤130km
持时模型	0 R<10km
	0.16（R-10） 10≤R<70km
	9.6 - 0.03（R-70） 70≤R<130km
	7.8+0.04（R-130） R>130km
场地放大函数	ENA

4、地震动模拟及最佳模型

本文采用动力学拐角频率的随机有限断层法[5]对得到的震源模型进行地震动模拟，选择芦山地震的 20 个观测点进行计算。本文选择的模拟参数如表 3 所示，其中断层的走向、倾角和滑移角按照波形反演结果来设置，品质因子按照川滇地区品质因子反演[6]取 $274.6f^{0.423}$，kappa 按照 boore[7]取 0.04，持时模型按照 Atkinson and Boore[8]的建议采用三段式。几何传播模型按照 Dang[9]的建议设置。按照 Atkinson[10]设置场地参数。应力降按照孙晓丹[11]设置。

根据本文计算得到的 20 个观测点的 30 组震源模型阻尼 5%的加速度反应谱与对应的平均反应谱的残差选择出本文得到的最优震源模型，其中残差的计算使用公式（4）所示。

$$R_i = \sum_{k=1}^{P_S}\sum_{l=1}^{P_T}(S_{ik}(T_l) - \overline{S}_k(T_l))^2 \quad (4)$$

其中，R_i 为第 i 个震源模型的残差，$S_{ik}(T_l)$ 为第 i 个震源模型第 k 个观测点的第 l 个周期对应的反应谱振幅，$S_k(T_l)$ 为 30 组震源模型的第 k 个观测点对应的平均反应谱的第 l 个周期的反应谱振幅。

5、结论

本文根据全球地震参数统计得到的全局震源参数和局部震源参数的经验公式，结合截断正态分布和残差评价得到了能够体现出此次 Mw5.9 的芦山地震的平均地震动模型，并使用随机有限断层法进行地震动模拟，该模型的构建能够解释地震断层的能量展布，并且表现断层的异质性，为认识断层有帮

助。

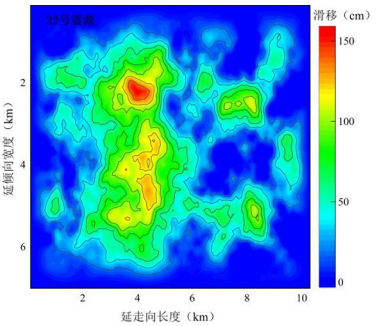

图 3 本文得到的残差最小震源模型

致谢

中国地震局工程力学研究所“国家强震动台网中心”为本研究提供强震动数据。本研究得到了国家重点研发计划项目（2023YFC3007305，2019YFC1509403）；国家自然科学基金（51978633，51678537）的资助。

参考文献

[1] F. O. Strasser, M. C. Arango, J. J. Bommer, Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-zone Earthquakes with Moment Magnitude, Seismological Research Letters ,2010, vol. 81, no. 6, PP.941–950. DOI: https://doi.org/10.1785/gssrl.81.6.941

[2] Behzad Hassani, Gail M. Atkinson, Referenced Empirical Ground-Motion Model for Eastern North America, Seismological Research Letters, 2015, vol. 86, PP. 477–491. DOI: https://doi.org/10.1785/0220140156

[3] WANG Hai-yun, Finite fault source model for predicting near-field strong ground motion. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin,2004.

[4] Gallovič, F., Brokešová, J., On strong ground motion synthesis with k^{-2} slip distributions,Journal of Seismology,2004, vol. 8, PP. 211–224. DOI :https://doi.org/10.1023/B:JOSE.0000021438.79877.58.

[5] Dariush Motazedian, Gail M. Atkinson,Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency, Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, vol. 95, no. 3, PP. 995–1010. DOI: https://doi.org/10.1785/0120030207

[6] HUA Wei, CHEN Zhang-Li, ZHENG Si-Hua, A study on segmentation characteristics of aftershock source parameters of Wenchuan M8.0 earthquake in 2008, Chinese Journal of Geophysics, 2009, vol. 52, no. 2, PP. 365-371..

[7] Boore, D., Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, Pure appl. Geophys,2003, vol. 160, PP. 635–676.. DOI :https://doi.org/10.1007/PL00012553.

[8] Gail M. Atkinson, David M. Boore, Ground-motion relations for eastern North America, Bulletin of the Seismological Society of America, 1995, vol. 85, no. 1, PP. 17–30. DOI: https://doi.org/10.1785/BSSA0850010017

[9] Dang, P., Cui, J. & Liu, Q, Site amplification and rupture velocity in EXSIM and updated EXSIM during the 2017 M_w6.6 Jiuzhaigou, China earthquake,Nat Hazards,2023, vol. 116, PP. 1105–1123. DOI :https://doi.org/10.1007/s11069-022-05713-0

[10] Gail M. Atkinson,The high-frequency shape of the source spectrum for earthquakes in eastern and western Canada, Bulletin of the Seismological Society of America ,1996, vol. 86, PP. 106–112. DOI: https://doi.org/10.1785/BSSA08601A0106.

[11] SUN Xiaodan, WANG Gang, LIU Chengqing, Finite fault models of the Lushan Earthquake made by using hybrid slip model, Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, vol. 33, no. 4, PP. 15-20. DOI: 10.11810/1000-1301.20130402.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.