

近场强地震动断层不均匀位错预测模型

郑山锁, 徐强, 李磊, 杨威, 孙龙飞

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要: 断层破裂面不均匀位错空间分布会强烈影响近场强地震动强度及频谱特性。为描述断层破裂面位错不均匀性, 设断层子源划分与地震矩无关, 采用分形法划分子源, 避免子源相互重叠或覆盖; 设应力降不为常数修正自相似模型, 获得子源断层位错与整体断层位错关系, 改进已有凹凸体模型。以美国北岭地震为例, 预测断层破裂面位错不均匀性, 对比震后反演情况, 验证预测模型的有效性。

关键词: 近场强地震动; 有限断层震源模型; 不均匀位错; 凹凸体; 分形法

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.14.030

Prediction model of the inhomogeneous distribution of fault in the area of near-field strong ground motion

ZHENG Shan-suo, XU Qiang, LI Lei, YANG Wei, SUN Long-fei

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Arc & Tch, Xi'an 710055, China)

Abstract: The space distribution of inhomogeneous dislocation on the fault fracture surface has strong influence on the strength and spatial variation of the near-field strong ground motion. The parameters of a finite faults source model were divided into global source parameters and local source parameters. The global source parameters describe the macro feature of the fault, and the local source parameters describe the inhomogeneous distribution of dislocation on the fault fracture surface. In order to describe the inhomogeneous distribution of the fault, the fault subevents division was assumed to be with no relation to the seismic moments and the fractal method was used to delimit the subevents to avoid overlapping or covering. The stress drop was assumed to be not constant to modify the self-similar model and the relation between subevents and fault was achieved to improve the existing asperity model. Taking the Northridge earthquake as an example, the inhomogeneous distribution of the fault was predicted to verify the validity of the prediction model.

Key words: near-field strong ground motion; finite faults source model; inhomogeneous dislocation; asperity model; fractal method

强地震动预测或模拟中主要考虑震源、路径及场地三因素影响, 已有强地震分布显示, 近场地震动受震源影响最显著^[1]。远场地震台网观测数据反演结果表明, 地震断层破裂面的位错不均匀, 高频地震波的产生直接受断层面位错较大区域控制^[2]。地震发生前目前尚无法精确预测破裂面位错的不均匀分布^[3]。

1 有限断层震源模型

描述断层破裂面位错不均匀分布模型主要有确定

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAJ08B03); 长江学者和创新团队发展计划; 国家自然科学基金(50978218, 51108376); 高等学校博士学科点专项科研基金(20106120110003); 陕西省科研项目(2012K12-03-01, 2010JK633, 2011KTCQ03-05)

收稿日期: 2013-04-09 修改稿收到日期: 2013-07-26

第一作者 郑山锁 男, 教授, 博士生导师, 1960年生

性凹凸体模型^[4-5]、随机性复合震源模型^[6-7]及 k 平方模型^[8-9]。

1.1 凹凸体模型

研究震源模型可知, 凹凸体模型认为断层局部不均匀应力降是造成断层位错不均匀原因^[4], 该模型物理解释明确, 且凹凸体参数确与断层参数相关, 但其仍存缺陷: ① 断层面凹凸体数量与矩震级无良好相关性; ② 将所有凹凸体简化为一个凹凸体与实际存在较大差异, 且不能真实反映凹凸体在断层面的分布情况; ③ 凹凸体模型仅考虑子源平均位错大于整个断层破裂面平均位错的局部区域, 未考虑整个断层破裂面小于平均位错的绝大多数区域。

1.2 复合震源模型

复合震源模型为有限断层震源模型^[7], 其主要思想为设小震、大震破裂机制相同, 用小震合成大震。

地震矩 $M = \mu \bar{S} \bar{D}$, 据自相似理论:

$$\frac{L_L}{L_S} = \frac{W_L}{W_S} = \frac{\bar{D}_L}{\bar{D}_S} = \left(\frac{M_L}{M_S} \right)^{\frac{1}{3}} = K \quad (1)$$

式中: M 为地震矩; S, L, W 分别为断层面积、长度及宽度; \bar{D} 为平均位错; 下标 L, S 表示大、小震。

将断层破裂面上所有子源地震矩叠加:

$$\sum_{i=1}^{N_1} M_{Si} = \sum_{i=1}^{N_1} \mu S_{Si} \bar{D}_{Si} = \sum_{i=1}^{N_1} \mu \frac{S_0 \bar{D}_0}{K_i^3} \quad (2)$$

式中: μ 为剪切刚度; 下标 0 表示主断层尺寸。

若设子源断层面积之和等于主断层面积, 将整个地震断层破裂面的地震矩按子源面积与断层面积关系分配至每个子源:

$$M_0 = \sum_{i=1}^{N_2} M_{Si} = \sum_{i=1}^{N_2} \frac{M_0}{K_i^2} = \sum_{i=1}^{N_2} \mu \frac{S_0 \bar{D}_0}{K_i^2} \quad (3)$$

$K_i \neq 1$ 时, 有:

$$\sum_{i=1}^N \mu \frac{S_0 \bar{D}_0}{K_i^3} < M_0 \quad (4)$$

以上分析可知, 采用自相似原理时, 为满足地震矩相等, 子源面积叠加结果远大于主断层面积, 无法避免子源面积间重叠或覆盖, 但此现象无法获得合理的物理解释。

据应力降定义:

$$\Delta \sigma = C_1 \mu \frac{\bar{D}}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

满足自相似原理式(1)时, 断层应力降为常数, 即子源应力降等于断层平均应力降。此与局部不均匀应力降造成断层上位错不均匀原因明显相悖。

1.3 研究方法

以上两种震源模型各有不同优缺点。本文为研究更合理预测断层破裂面不均匀位错方法, 以凹凸体模型为基础, 使模型有明确物理解释, 利用复合震源模型思想引入随机性, 提出①假设子源大小与断层面大小满足自相似条件, 子源面积和等于主断层面积, 而子源划分与主断层地震矩无关; ②基于局部不均匀应力降是造成断层位错不均匀原因, 设子源间应力降满足关系:

$$\frac{\Delta \sigma_L}{\Delta \sigma_S} = \alpha \quad (6)$$

式中: α 为调整系数。

2 修正子源划分

将断层破裂面以分形方式划分为大小不等子源, 每个子源在断层破裂面随机分布。子源个数 N 与半径 R 关系式(对圆盘断层)^[10]为

$$\frac{dN}{d(\ln R)} = p R^{-D} \quad (7)$$

式中: D 为分形维数; N 为给定 R 时子源个数; p 为比例因子。

设子断层面积(圆形) $A_s = \pi R_s^2$, R_s 为子断层半径。断层总面积微元可表示为

$$dA(R) = dN(R) \pi R^2 \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)得

$$dA(R) = \pi p R^{-D+1} dR \quad (9)$$

由假设①, 总面积可表示为

$$A_0 = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \pi p R^{-D+1} dR \quad (10)$$

设总半径 R_0 , 则总面积为 $A_0 = \pi R_0^2$, 代入式(10)得

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{R_0^2} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} R^{-D+1} dR \quad (11)$$

取 $D=2$, 积分得

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{R_0^2} [\ln R]_{R_{\min}}^{R_{\max}} \quad (12)$$

式(7)改写为

$$\frac{dN}{dR} = p R^{-D-1} \quad (13)$$

若用离散化方式, 设将地震断层破裂面划分为 M 种大小不同子源, 每种子源用 R_i ($i=1, 2, \dots, M$) 表示, 子源尺寸个数 N_i 为 $(R_i, R_i + \Delta R_i)$ 范围内子源个数, 即

$$N_i = n(R_i) \Delta R_i \quad (14)$$

对所有 R_i , 在 (R_{\min}, R_{\max}) 范围内个数为

$$N_i = p \frac{R_{\min}^2}{R_i^3} \Delta R_i \quad (15)$$

通常将地震破裂断层面简化为矩形或正方形截面。设用正方形截面, 主断层破裂面面积可用其子源面积与子源个数乘积求和获得:

$$R_{\min}^2 = \sum_{i=1}^M N_i R_i^2 \quad (16)$$

将式(15)代入(16), 得

$$p = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{\Delta R_i}{R_i}} \quad (17)$$

将地震断层破裂面划分为 6 种不同子源, 即 $M=6$, 地震破裂断层面视为正四边形, 子源划分见图 1。

3 小震合成大震

设子源大小与断层面大小及子源间平均位错均满足自相似条件, 而子源平均位错与断层平均位错不完全满足自相似条件与假设②, 即

$$\frac{L_L}{L_S} = \frac{W_L}{W_S} = K \quad (18)$$

$$\frac{\bar{D}_L}{\bar{D}_S} = \alpha K \quad (19)$$

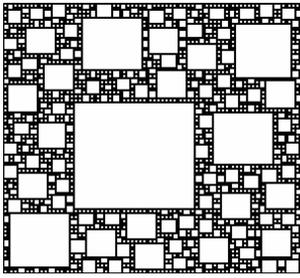


图 1 改进的子源分布

Fig. 1 Improved distribution of subevent

式中： α 为调整系数。

由地震矩守恒即子源在断层破裂面地震矩叠加须等于整个断层地震矩可知：

$$M_0 = \sum_{i=1}^N M_{Si} = \sum_{i=1}^N \mu S_{Si} \bar{D}_{Si} = \sum_{i=1}^N \mu \frac{S_0 \bar{D}_0}{\alpha K_i^3} \quad (20)$$

求解得：

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \frac{1}{K_i^3} \quad (21)$$

将式(21)代入式(19)得：

$$\frac{\bar{D}_L}{\bar{D}_S} = K \sum_{i=1}^N \frac{1}{K_i^3} \quad (22)$$

由式(22)可求得子源平均位错,且平均位错较大子源可代替凹凸体描述断层位错较大局部区域,平均位错较小子源描述断层平均位错较小区域。可见,本文方法确定的子源仅需破裂一次,避免同一子源多次触发的非物理现象。此外,本文采用分形方法划分子源,避免凹凸体模型中将所有凹凸体视为一个凹凸体的缺陷,更符合实际。

4 算例

本文由 Wald 等利用地震记录资料联合反演结果中提取有关断层的全局震源参数(断层破裂面面积、长度、宽度及平均位错)与局部震源参数(凹凸体数量、面积及平均位错),Northridge 地震反演断层参数见表 1。由 Wells 等数据库与 PEER-NGA 数据库中选 163 个地震数据,回归获得断层参数与矩震级间经验关系与半经验关系见图 2,用于 Northridge 地震所得数据见表 2。

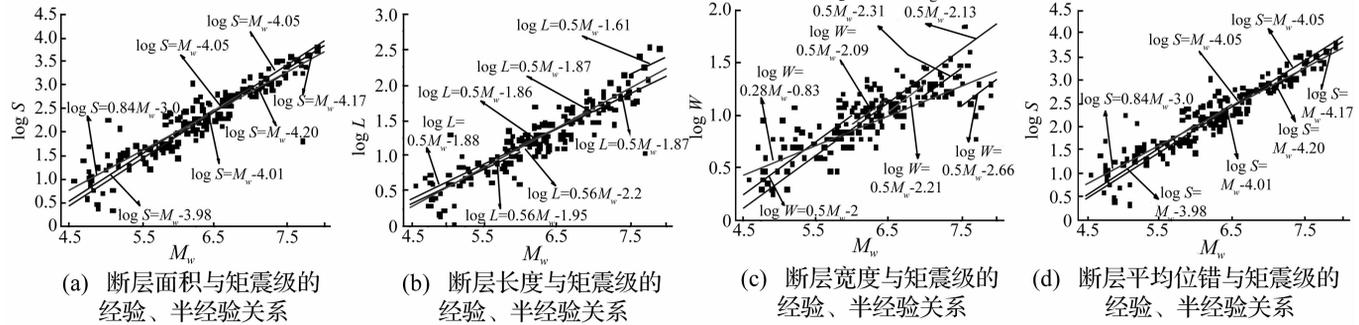


图 2 断层参数与矩震级的经验、半经验关系

Fig. 2 Fault parameters with empirical and semi-empirical relations moment magnitude

表 1 Northridge 地震全局与局部震源参数

Tab. 1 Global source parameters and local source parameters of the Northridge earthquake

参数	参数值
断层面积/km ²	432.00
断层长度/km	18.00
断层宽度/km	24.00
断层面平均位错/cm	101.85
断层面最大位错/cm	320.00
凹凸体数	2
所有凹凸体面积/km ²	68.00
凹凸体面积	
最大凹凸体面积/km ²	60.00
其它凹凸体面积/km ²	8.00
平均	
最大凹凸体平均位错/cm	201.59
其它凹凸体平均位错/cm	177.92

表 2 本文预测的地震震源的断层参数

Tab. 2 The prediction of seismic source fault parameters

参数类型	参数值
断层面积/km ²	450
断层长度/km	30
断层宽度/km	15
断层面上的平均位错/cm	90

对比表 1、表 2 中全局参数,本文预测的断层面积 450.00 km²接近反演断层面积 432.00 km²;断层面平均位错 90 cm 接近反演断层平均位错 101.85 cm;而断层长度、宽度等却有较大差别,反演断层宽度 24 km 大于断层长度 18 km。由本文方法所得断层面长、宽度分别为 30 km,15 km。采用本文方法将断层面划分为 6 种大小不同子源,获得子源平均位错。采用分形法划

断层破裂面,取整个断层长度为最小子源长度的80倍,则每种子源数目及大小等见表3。

表3 Northridge地震预测局部震源参数
Tab. 3 Local source parameters of the predicting for Northridge earthquake

子源类型	1	2	3	4	5	6
子源数目	1	4	16	68	271	1 156
子源长度(30/80)/km	32	16	8	4	2	1
子源宽度(15/80)/km	32	16	8	4	2	1
子源平均位错(90/(80α))/cm	32	16	8	4	2	1

为使地震矩守恒,即子源在断层破裂面的地震矩叠加必须等于整个断层的地震矩,将以上数据代入式(21)得:

$$\alpha = 1 \times \left(\frac{32}{80}\right)^3 + 4 \times \left(\frac{16}{80}\right)^3 + 16 \times \left(\frac{8}{80}\right)^3 + 68 \times \left(\frac{4}{80}\right)^3 + 271 \times \left(\frac{2}{80}\right)^3 + 1156 \times \left(\frac{1}{80}\right)^3 = \frac{1}{8}$$

由 $\alpha = 1/8$ 知,断层面最大位错量与整个断层面平均位错值之比为

$$\frac{\bar{D}_{max}}{\bar{D}_0} = 8 \times \frac{1}{80} \times 32 = 3.2$$

断层面第二大位错量与整个断层面平均位错值之比为

$$\frac{\bar{D}_{sec}}{\bar{D}_0} = 8 \times \frac{1}{80} \times 16 = 1.6$$

其余子源位错量均小于整个断层面平均位错值。断层面最大位错子源面积与整个断层面面积之比为

$$\frac{S_{max}}{S_0} = \left(\frac{32}{80}\right)^2 = 16\%$$

断层面位错第二大子源面积与整个断层面面积之比为

$$\frac{S_{sec}}{S_0} = 4 \times \left(\frac{16}{80}\right)^2 = 16\%$$

断层面位错大于整个断层面平均位错值的子源面积与整个断层面面积之比为

$$\frac{S_1}{S_0} = \left(\frac{32}{80}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{16}{80}\right)^2 = 32\%$$

断层面位错大于整个断层面平均位错值的子源平均位错与整个断层面平均位错之比为

$$\frac{\bar{D}_1}{\bar{D}_0} = \frac{\bar{D}_{max} S_{max} + \bar{D}_{sec} S_{sec}}{S_{max} + S_{sec}} = \frac{3.2 \times \left(\frac{32}{80}\right)^2 + 4 \times 1.6 \times \left(\frac{16}{80}\right)^2}{\left(\frac{32}{80}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{16}{80}\right)^2} = 2.4$$

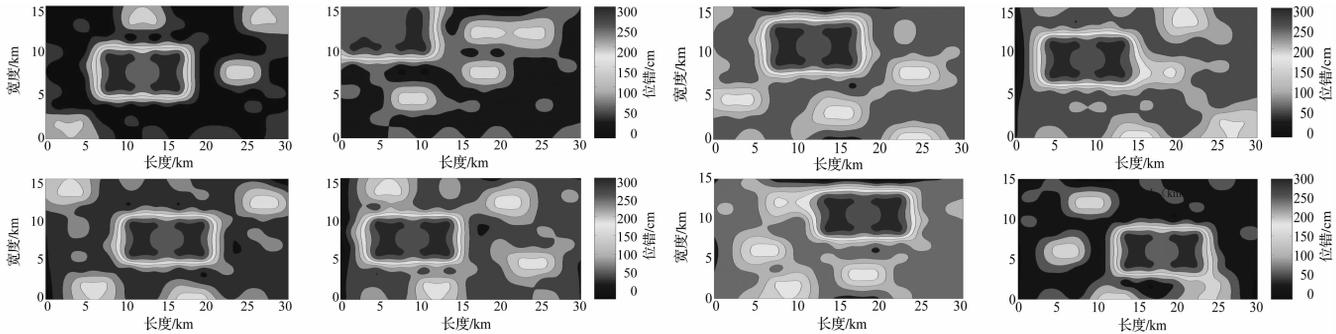


图3 Northridge地震震源不均匀位错预测模型

Fig. 3 Predicting model for the source inhomogeneous distribution of the Northridge earthquake

用本文方法预测 Northridge 地震,所得震源8个位错模型见图3。对比用本文方法预测断层局部震源参数与用反演方法所得局部震源参数知,前者最大位错对应子源面积72 km²与最大凹凸体面积60 km²接近。凹凸定义为位错大于平均位错约1.5倍以上区域,若将本文所得第二大位错为平均位错1.6倍对应的子源视为其它凹凸体,则本文所得其它凹凸体面积72 km²远大于反演的其它凹凸体面积8 km²。由地震记录结果看出,用本文方法所得断层面最大位错为288 cm接近反演最大位错320 cm。

Somerville等将凹凸体模型中的凹凸体分为最大凹

凸体和其它凹凸体,确定的所有凹凸体的面积与断层面积之比为0.22,这与本文的0.32相差较大。文献[4]中最大凹凸体为断层面积的0.16倍,与本文所得结果0.16一致。文献[4]中所有凹凸体平均滑动与断层破裂面平均滑动之比为2.01,本文为2.4。文献[5]确定的最大凹凸体位错与平均位错之比为2.46,与本文最大位错为平均位错3.2倍相差较大。因此本文据自相似原理采用分形法子源划分获得断层面位错大小与统计所得结果认为一致。由此可见,地震断层破裂面凹凸体大小亦具有分形特点,而以本文分形方法划分子源后,可使整个断层破裂面的位错分布均具有分

形特点,不仅考虑局部位错大于整个地震破裂面的平均位错区域。

5 结 论

本文研究近场强地震断层面位错不均匀分布预测方法,据已有研究成果提出两个假设,并应用于 Northridge 地震,结论如下:

(1) 所提断层面不均匀位错预测模型不仅能描述子源平均位错大于断层平均位错的局部区域,亦能描述子源平均位错小于断层平均位错的大部分区域,更符合实际。

(2) 所提模型不仅可避免同一子源多次触发的非物理现象,且能表达局部不均匀应力降为造成断层位错不均匀原因,物理解释明确。

(3) 用本文方法预测的 Northridge 地震,所得断层全局及局部震源参数与反演记录数据对比表明,本文模型适用性强、准确性好。

(4) 本文模型能较好反映断层面位错的不均匀特征。是否适用于预测场地地震动尚需进一步验证。

参 考 文 献

- [1] Boore D M. Comparisons of ground motions from the 1999 chi-chi earthquake with empirical predictions largely based on data from California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91: 1212 - 1217.
- [2] Miyake H, Iwata T, Irikura K. Source characterization for broadband ground motion simulation: kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(6): 2531

- 2545.

- [3] Hartzell S H, Heaton T H. Inversion of strong ground motion and teleseismic wave form data for the fault rupture history of the 1879 imperial valley, California, earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73: 1553 - 1583.
- [4] Somerville P, Irikura K, Graves R, et al. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion [J]. Seismological Research Letters, 1999, 70(1): 59 - 80.
- [5] 王海云. 近场强地震动预测的有限断层震源模型 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2004.
- [6] 刘博研, 史保平, 张健. 复合地震源模拟强地面运动 - 以 1679 年三河 - 平谷 MS8.0 地震为例 [J]. 地震学报, 2007, 29(3): 302 - 313.
- LIU Bo-yan, SHI Bao-ping, ZHANG Jian. Strong motion simulation by the composite source modeling: A case study of 1679 M8.0 Sanhe-Pinggu earthquake [J]. Journal of Earthquake, 2007, 29(3): 302 - 313.
- [7] Tumarkin A G, Archuleta R J, Madariaga R. Scaling relations for composite earthquake models [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 1279 - 1283.
- [8] Andrews D J. A stochastic fault model, I. Static case [J]. Geophysical Research Letters, 1980, 85(7): 3867 - 3877.
- [9] Herrero A, Bernard P. A kinematic self-similar rupture process for earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 1216 - 1228.
- [10] Frarel A. High-frequency spectral falloff of earthquakes, fractal dimension of complex rupture, b value, and the scaling strength on fault [J]. Geophysical Research Letters, 1991, 96: 6291 - 6302.