

王海云, 谢礼立. 近断层强地震动场预测. 地球物理学报, 2009, 52(3): 703~711

Wang H Y, Xie L L. Prediction of near-fault strong ground motion field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 703~711

## 近断层强地震动场预测

王海云<sup>1</sup>, 谢礼立<sup>1,2</sup>

1 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

2 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090

**摘 要** 以 1997 年 4 月 11 日新疆伽师地震( $M_w$  6.1)为例, 详细介绍了近断层强地震动场的预测方法. 首先, 用有限断层震源建模方法建立了该次地震的震源模型; 然后, 基于动力学拐角频率的地震动随机模拟方法, 模拟了该次地震仅有主震加速度记录、且位于巨厚土层上的三个台站的加速度时程, 并用实际地震记录进行了验证. 在此基础上, 基于预测的近断层 77 个节点的加速度时程的峰值绘制了该次地震的加速度场. 结果表明, 上述方法模拟的加速度时程在 0.5 Hz 以上的高频段是可行的、实用的; 预测的近断层加速度场具有非常明显的上盘效应. 地表最大加速度的范围与断层面上最大凹凸体位置相对应, 说明与断层面上凹凸体相对应的地面上的建(构)筑物将会遭到较为严重的震害.

**关键词** 近断层, 地震动场, 有限断层震源模型, 路径效应, 场地效应, 伽师地震

文章编号 0001-5733(2009)03-0703-09

中图分类号 P315

收稿日期 2008-01-29, 2008-10-27 收修定稿

## Prediction of near-fault strong ground motion field

WANG Hai-Yun<sup>1</sup>, XIE Li-Li<sup>1,2</sup>

1 *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

2 *School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China*

**Abstract** Taking 1997 Jiashi earthquake ( $M_w$  6.1), Xinjiang, China as an example, a method for predicting near-fault strong ground motion field was introduced in detail. Firstly, the earthquake source model of the earthquake was established based on the finite fault source modeling method. Secondly, acceleration time histories of the three stations above huge thick sediment strata with main-shock records during the earthquake were simulated based on the stochastic method of ground motions with the dynamic corner frequency; and the results were validated by comparison of response and Fourier spectra between simulated and recorded acceleration time histories. Finally, the acceleration field of the earthquake was drawn based on PGA of the predicted acceleration time histories of 77 near-fault nodes. The results show that simulated acceleration time histories are feasible and practical when frequency is more than 0.5 Hz, and the acceleration field shows very obvious hanging wall effects. The maximum PGA area on ground surface corresponds to the maximum asperity area, and this means that buildings and other engineering structures on ground surface corresponding to the maximum asperity area on the earthquake fault may suffer severe damage.

**基金项目** 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90715038), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB714201), 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2007B13)资助.

**作者简介** 王海云, 男, 1964 生, 工学博士, 副研究员, 主要从事运动学震源模型以及近断层强地震动模拟及预测研究.

E-mail: haiyun@iem.ac.cn

**Keywords** Near fault, Ground motion field, Finite fault source model, Path effect, Site effect, Jiashi earthquake

## 1 引言

地震动是建(构)筑物破坏的主要动力,一次地震中,90%以上建(构)筑物的破坏是由地震动造成的.如果能在一次地震之前预测出近断层的地震动场,就可以制定相应的抗震设防措施,尽可能避免人员伤亡或减轻未来地震的损害;如果能在一次地震之后在最短的时间内预测出近断层的地震动场,即可据其评定震害程度,制定震后救援、恢复的相关措施,尽可能减轻次生灾害损失,缩短震后恢复时间,保证社会安定.

地震动是由3个物理过程(地震破裂过程,波在地壳介质中的传播过程,场地反应)组成的一种复杂系统的产物,但在长周期和短周期具有根本不同的特征.长周期地震动是确定性的,可以用不含任何随机成分的理论地震学模型合理地模拟或预测地震动的长周期波形和频谱.而短周期(或高频)地震动表现为强烈的随机行为,用理论地震学模型很难模拟地震动的高频波形.这是由于在地震破裂过程和地壳介质中存在着小尺度的不均匀性,震源辐射和波的传播使得短周期地震动随机性极强.

地震学家已经提出了确定性或随机性的理论和方法对观测到的地震动进行解释,并用这些理论和方法建模研究上述3个物理过程的影响.不同的研究人员往往采用不同的震源、波传播、场地反应模型,从而形成了不同的模拟方法,但总体上可以分成3类:确定性方法,随机方法和混合方法.

确定性方法基于 Aki 和 Richard<sup>[1]</sup> 的表示定理,将地震动表达为震源时间函数和格林函数的卷积,用于长周期地震动的模拟.常用的方法有:三维有限差分方法,离散波数法和有限元方法.随机方法基于高斯带限白噪声的随机振动理论方法<sup>[2,3]</sup>,或者基于小震的经验格林函数方法<sup>[4,5]</sup>,用于短周期(高频)地震动的模拟.经验格林函数方法将目标震区记录的、适当大小的、与主震震源机制相同的、信噪比高的小震记录作为经验格林函数模拟地震动<sup>[5]</sup>.该方法的优点是在地震动模拟中不需要计算波传播路径效应和场地效应,因为小震记录中已经包含了这些信息;不足之处是适合于地震动模拟的小震记录不易获取,尤其是在地震记录稀疏或缺乏

地震记录的地区.混合方法利用上述两种方法各自的优点,将地震动分成长周期和短周期两部分分别进行模拟,长周期地震动用确定性方法模拟,短周期(高频)地震动用随机方法模拟,模拟结果分别经低、高通滤波器滤波之后,在时域中叠加,得到宽频带的地震动<sup>[6~8]</sup>.

对于远源和小震,一般使用 Boore 的随机点源模型模拟地震动<sup>[2,3]</sup>;对于近源或近断层,地震动的空间分布十分强烈地受到发震断层方位(位置、产状、埋深等)、断层破裂面上滑动分布不均匀性和破裂过程的影响,需要使用有限断层震源模型<sup>[9,10]</sup>来考虑震源破裂过程对近源或近断层地震动的影响.

目前的研究中,往往通过比较模拟和记录地震动的反应谱或傅氏谱是否拟合作为评判模拟结果是否有效的标准.对于确定性方法,长周期段地震动的反应谱和波形均能很好地拟合;对于随机方法,反应谱一般在短周期(高频)能够很好地拟合,但是地震动波形很难拟合<sup>[11]</sup>.

本文以1997年4月11日新疆伽师地震( $M_w$ 6.1)为例,首先,基于有限断层震源建模方法建立了该次地震的震源模型;然后,基于动力学拐角频率的地震动随机模拟方法模拟了该次地震仅有主震加速度记录的三个台站的加速度时程,并用观测的地震加速度记录进行验证;在此基础上,预测了该次地震产生的加速度场.

## 2 方法

### 2.1 有限断层震源建模

根据 Irikura<sup>[12]</sup>,将震源模型参数分为两类:全局震源参数和局部震源参数.前者表征震源区的宏观特征,例如地震断层的位置、产状、断层类型、破裂尺度(长度、宽度、面积)、断层面上的平均滑动和平均破裂速度等;后者表示断层面上的不均匀性或粗糙度,主要用滑动分布来表征.这两类参数的估计方法如下:

全局震源参数:(1)根据地震地质和地震活动性调查以及地球物理勘探等资料确定活断层的空间方位和滑动类型;(2)根据活断层地震危险性评价的结果,获得活断层设定地震的矩震级,根据地震断层破裂尺度及断层面上平均滑动与矩震级之间的地震定

标律估计相应的参数值<sup>[13,14]</sup>.

局部震源参数:(1)凹凸体(asperity)模型,根据凹凸体参数与矩震级或相应断层参数之间的经验关系式确定凹凸体模型参数—凹凸体的位置、大小及其之上的平均滑动量<sup>[14,15]</sup>; (2) $k$ 平方滑动模型,根据空间拐角波数与矩震级之间的经验关系式确定相应的空间拐角波数值<sup>[14]</sup>.当波数大于空间拐角波数时,断层面上滑动分布的空间波数谱以 $k^{-2}$ 衰减.用 $k$ 平方滑动模型生成随机滑动分布;(3)凹凸体模型与 $k$ 平方滑动模型叠加在一起生成断层面上的混合滑动分布<sup>[14,16]</sup>.

## 2.2 近断层地震动随机模拟

近断层强地震动模拟中,有限断层震源模型的断层面被分成 $N$ 个大小相等的矩形子断层,每个子断层即为一个点源,亦称子源.破裂过程以一定的破裂速度(一般取0.8倍的剪切波速)从破裂起始点开始呈辐射状向外传播,传播到每个子源的中心时该子源即被触发.每个子源引起的地震动由Boore<sup>[2,3]</sup>的点源模型计算.所有子源在观测点引起的地震动在时域中以适当的延迟时间叠加,可获得观测点的地震动时程 $a(t)$ .

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

其中, $N_L$ 和 $N_W$ 分别是沿着断层走向和下倾方向的子断层数, $N_L \times N_W = N$ 为子源总数, $\Delta t_{ij}$ 包括破裂传播到第 $ij$ 个子源引起的时间滞后和从第 $ij$ 个子源至场点间由于传播距离的不同引起的时间滞后. $a_{ij}(t)$ 是第 $ij$ 个子源引起的观测点地震动.

每个子源的地震矩由下式计算:

$$M_{0ij} = M_0 \frac{\bar{D}_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \bar{D}_{ij}}, \quad (2)$$

其中, $M_0$ 是地震矩,单位是 $10^{-5} \text{ N} \cdot \text{cm}$  ( $1 \text{ dyne} = 10^{-5} \text{ N}$ ), $\bar{D}_{ij}$ 是第 $ij$ 个子断层上的平均滑动,单位是 $\text{cm}$ .

合成地震动时,震源谱中的拐角频率如果使用Brune<sup>[17]</sup>的静力学拐角频率,对于子断层的大小有严格的要求.而且,为了保证地震矩的守恒,每个子源需要触发多次.

Beresnev和Atkinson<sup>[18]</sup>确定的子断层大小为

$$\log \Delta L = -2.0 + 0.4 M_w. \quad (3)$$

如果改变子断层的大小,往往导致断层辐射的总辐射能不守恒.而且合成大震地震动时要求子震的震级在5.0到6.5的范围之内,限制了小震地震动的模拟.

为了避免对每个子源的多次触发以及对子断层及震级大小的限制,保证地震矩和辐射能的守恒,Motazedian和Atkinson<sup>[10]</sup>提出动力学拐角频率的概念:

$$f_{oij}(t) = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta \sigma / M_{\text{ave}})^{1/3} \cdot N_R(t)^{-1/3}, \quad (4)$$

式中, $f_{oij}(t)$ 是第 $ij$ 个子断层的动力学拐角频率, $t$ 是第 $ij$ 个子源被触发的时刻, $N_R(t)$ 是在时刻 $t$ 已破裂子断层的累积数, $\beta$ 是震源附近的剪切波速度,单位为 $\text{km/s}$ , $\Delta \sigma$ 是应力降,单位为 $10^5 \text{ Pa}$ , $M_{\text{ave}} = M_0 / N$ 是子断层的平均地震矩.

第 $ij$ 个子断层的加速度谱 $A_{ij}(f)$ 是

$$A_{ij}(f) = \frac{CM_{0ij} H_{ij} (2\pi f)^2}{1 + (f/f_{oij})^2}, \quad (5)$$

其中

$$H_{ij} = \left[ N \frac{\sum \left\{ \frac{f^2}{1 + (f/f_c)^2} \right\}^2}{\sum \left\{ \frac{f^2}{1 + (f/f_{oij})^2} \right\}^2} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

$M_{0ij}$ 是第 $ij$ 个子断层的地震矩, $f$ 是频率, $f_c$ 是静力学拐角频率.

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta \sigma / M_0)^{1/3}. \quad (7)$$

## 3 实例

据中国地震台网地震目录,1997年1月21日至4月15日新疆伽师县相继发生了6次 $M_s 6.0$ 级以上的地震.主震为1997年4月11日发生的 $M_s 6.5$ 级地震,震源深度是16 $\text{km}$ .

伽师震区位于帕米尔东北侧、天山南麓、塔里木盆地的西北边缘,在地质构造单元的划分上,该区处在天山褶皱带、帕米尔构造弧与塔里木块体3个构造单元的交接部位.伽师震区属柯坪山前洪积平原,地表由南向北以砾石、砂砾、砂粒、粉粒、粘土、沙漠分布.震中区地表至地下12~13 $\text{km}$ 为沉积层.其中,地表至地下7 $\text{km}$ 为新生代地层,之下到13 $\text{km}$ 为古生代地层.再往下依次为结晶岩、花岗岩和玄武岩,大约地下46~56 $\text{km}$ 处为莫霍面.震区地表未见断层出露,主破裂发生在沉积层底部与莫霍界面之间<sup>[19]</sup>.

### 3.1 有限断层震源模型

#### 3.1.1 全局震源参数

对于主震( $M_s 6.5$ )的震源机制,国内研究人员有不同的认识.一些研究人员认为是走滑断层<sup>[19,20]</sup>;也有的研究人员认为是正断层<sup>[21]</sup>;而赵翠萍<sup>[22,23]</sup>认为是正断层兼具左旋走滑性质.根据哈佛大学矩张

量解,无论那个节面都是以正断层性质为主兼具左旋走滑性质. 根据余震分布图和地震烈度等震线图<sup>[19]</sup>综合分析研究,本文认为哈佛大学矩张量解的节面 I (走向 240°, 倾角 37°, 滑动角 -45°) 作为该次地震的震源机制是合理的.

赵翠萍<sup>[22]</sup>对 1997~2003 年 1345 次地震采用波形互相关技术进行了双差定位,结果表明震源深度分布在 12~32 km 的中上地壳范围内. 本文以震区沉积层下界 (12 km) 作为地震断层上界埋深,震源深度取哈佛大学确定的 15 km. 矩震级取哈佛大学确定的  $M_w 6.1$ .

根据  $4.57 < M_w \leq 6.5$  时倾滑断层宏观震源参数的半经验关系式<sup>[13,14]</sup>

$$\text{破裂面积: } \log S = M_w - 4.0, \quad (8)$$

$$\text{破裂长度: } \log L = 0.5M_w - 1.95, \quad (9)$$

$$\text{破裂宽度: } W = S/L, \quad (10)$$

$$\text{平均滑动: } \log \bar{D} = 0.5M_w - 1.45, \quad (11)$$

求得  $M_w 6.1$  级地震的宏观震源参数,并将破裂长度和宽度取整数得:

$$S = 130 \text{ km}^2, \quad L = 13 \text{ km}, \quad (12)$$

$$W = 10 \text{ km}, \quad \bar{D} = 39.81 \text{ cm}.$$

### 3.1.2 局部震源参数

根据混合滑动模型 (凹凸体模型 +  $k$  平方滑动模型) 方法建立了该次地震发震断层的滑动分布模型 30 个,为了减少篇幅,文中只给出了其中的 12 个 (图 1). 在图中,最大凹凸体和第二凹凸体的面积是确定的,最大凹凸体位置基本保持不变,而第二凹凸体的位置是随机的,但对其有一些约束条件:只能在最大凹凸体之外;不能在断层边界之外. 每张图中第二凹凸体的位置都有所变化. 凹凸体反映了低空间波数的特点. 反映高空间波数的随机部分由  $k$  平方模型控制,表达了较大的随机变化. 确定的滑动分布模型参数见表 1.

### 3.2 路径传递函数及路径持时

在随机方法中,路径传递函数主要涉及到几何衰减和品质因子的确定. 震区内莫霍面以上地层的厚度为 46~56 km,平均 50 km<sup>[19]</sup>. 根据 Atkinson 和 Boore<sup>[24]</sup>,莫霍面以上 50 km 厚地层的几何衰减模型为

$$Z(R) = \begin{cases} \frac{1}{R}, & R < 70 \text{ km} \\ \frac{1}{70}, & 70 \text{ km} \leq R < 130 \text{ km} \\ \frac{1}{70} \sqrt{\frac{130}{R}}, & 130 \text{ km} \leq R. \end{cases} \quad (13)$$

表 1 预测的 1997 年 4 月 11 日伽师地震 ( $M_w 6.1$ ) 的滑动分布参数表

Table 1 Parameters of slip distribution on the fault plane of Jiashi earthquake ( $M_w 6.1$ ) on 11, Apr., 1997 predicted

滑动分布参数		参数值
凹凸体数		2
凹凸体面积	所有凹凸体的面积/ $\text{km}^2$	26.94
	最大凹凸体的面积/ $\text{km}^2$	18.64
	第二凹凸体的面积/ $\text{km}^2$	8.30
凹凸体以及除凹凸体之外断层面上 (背景) 的平均滑动	最大凹凸体上的平均滑动/cm	87.10
	第二凹凸体上的平均滑动/cm	75.86
	背景之上的平均滑动/cm	28.85
最大凹凸体的位置	中心沿走向的位置/km	4.54
	中心沿倾向的位置/km	5.10
空间拐角波数	沿走向的空间拐角波数/ $\text{km}^{-1}$	$7.69 \times 10^{-2}$
	沿倾向的空间拐角波数/ $\text{km}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-1}$
破裂起始点位置	沿走向的位置/km	5.55
	沿倾向的位置/km	8.13

姜慧<sup>[25]</sup>根据余震资料反演得到的震区品质因子与频率的关系式为

$$Q(f) = 278f^{0.346}. \quad (14)$$

路径持时采用 Atkinson 和 Boore<sup>[24]</sup>对于北美东部提出的经验关系式

$$T(R) = \begin{cases} 0, & R < 10 \text{ km} \\ 0.16(R-1), & 10 \text{ km} \leq R < 70 \text{ km} \\ 9.6 - 0.03(R-70), & 70 \text{ km} \leq R < 130 \text{ km} \\ 7.8 + 0.04(R-130), & 130 \text{ km} \leq R. \end{cases} \quad (15)$$

### 3.3 场地传递函数

场地反应一般包括放大和衰减两部分.

震区沉积有巨厚的新生代沉积物. 姜慧<sup>[25]</sup>将该区分成 A、B、C 三个小区 (见文献<sup>[25]</sup>中图 5.1). A 区位于喀什拗陷和麦盖提斜坡之间,新生代沉积物厚度最厚在 4000 m 左右; B 区处于麦盖提斜坡,琼库儿恰克一色力不亚背斜弧形隆起带上,新生代沉积物厚度在 2000 m 左右; C 区处于巴楚断隆块体上,第四纪沉积物厚度超过 200 m.

巨厚的新生代沉积物无疑会对震区的地震动时程产生非常大的影响. 姜慧<sup>[25]</sup>根据钻孔的波速资料 (A 区 6 个 30 m 深的钻孔, B 区 20 个大于 30 m 深的钻孔, C 区 11 个大于 30 m 深的钻孔), 用 1/4 波长近似法估计厚层覆盖土层场地的放大作用. 结果

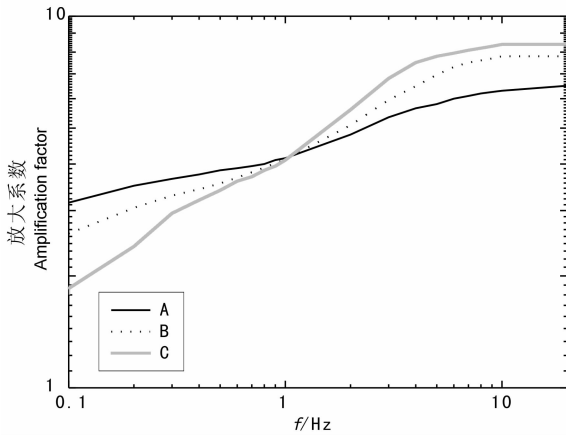


图2 厚土层的平均放大效应(据姜慧<sup>[25]</sup>修改)

Fig. 2 The average amplification effects of thick soil layers in the A, B and C area (Modified from Jiang Hui, 2005<sup>[25]</sup>).

表明,厚层覆盖土层的放大作用非常显著(图2),在1.3 Hz, A区、B区和C区的平均场地放大效应接近,为4倍左右;在小于1 Hz低频段,平均放大效应为:A区>B区>C区,可见在低频段,覆盖土层越厚,放大效应相对越大;在大于2 Hz的高频段,3个区平均放大效应的顺序恰好相反,即C区>B区>A区,说明场地的中、高频放大效应与地表地层剪切波速的大小有关(各区地表地层的平均剪切波速为:A区140 m/s, B区84.4 m/s, C区73.6 m/s),地表地层的平均剪切波速越小,场地的中、高频放大效应越大。

姜慧<sup>[25]</sup>根据余震记录,用Anderson和Hough<sup>[26]</sup>的方法确定了场地的衰减系数( $\kappa_0$ )。该值主要反映场地的高频吸收特性。 $\kappa_0$ 值越大,场地的高频衰减越快,反之,场地的高频衰减越慢。求取的各区的 $\kappa_0$ 值为:A区, $\kappa_0=0.048$ ;B区, $\kappa_0=0.035$ ;C区, $\kappa_0=0.030$ 。

Boore和Joyner<sup>[27]</sup>将岩石场地分成两类:一般岩石场地和非常坚硬的岩石场地。他们把一般岩石场地定义为地表剪切波速大约是0.6 km/s的场地,而把非常坚硬岩石场地定义为地表剪切波速大于2.7 km/s的场地。根据姜慧<sup>[25]</sup>,震区硬基岩平均剪切波速和密度分别为3.4 km/s和2.8 g/cm<sup>3</sup>。所以,本文地震动模拟中的地壳放大模型使用非常坚硬岩石场地模型。

### 3.4 震区3个台站的地震动模拟

1997年4月11日新疆伽师地震( $M_w 6.1$ )仅获得伽师、西克尔和巴楚3个流动强震台站的主震加速度记录,3个台站的震中距分别为:伽师23 km,西克尔42 km,巴楚140.3 km。三个台站的位置分布见图3。伽师台站尽管距离断层最近,但并不在断

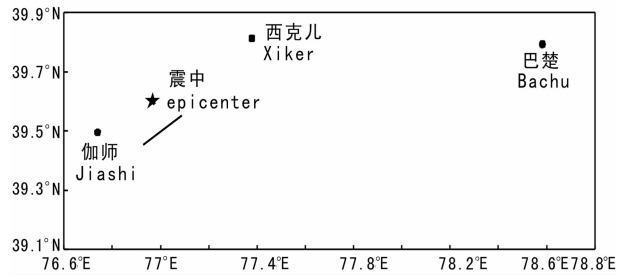


图3 模拟地震动的3个台站的位置分布图

图中粗黑线表示发震断层位置。

Fig. 3 The geographic location map of three stations for simulating ground motion  
Thick heavy line is location of the fault.

层破裂面之上,而是位于发震断层的右下端。西克尔台站位于发震断层左端较远的地方,巴楚则在发震断层左前端相对很远的地方。

图3中发震断层位置的确定方法为:首先根据赵翠萍<sup>[22]</sup>对伽师强震群地震的精确定位给出此次地震发震断层的大致位置,然后调整断层位置,直至三个台站模拟和记录的加速度时程的反应谱均能很好地拟合,此时的断层位置即为图中发震断层的位置。

本文根据上述分析得到的地震动输入参数归纳为表2。并用基于有限断层震源模型、使用动力学拐角频率的随机方法模拟了上述三个台站的地震动。

表2 伽师地震动模拟输入基本参数表

Table 2 The input parameters of simulating ground motion of 1997 Jiashi earthquake ( $M_w 6.1$ )

参数名称	参数值
断层方位	走向240°, 倾角37°
断层沿走向和下倾方向的尺度/km	13×10
断层上界埋藏深度/km	12.0
矩震级 $M_w$	6.1
子断层大小/km	1×1
应力降/ $10^5$ Pa	80
滑动分布	混合滑动模型生成的30个滑动分布(图1)
几何衰减	式(13)
品质因子	式(14)
路径延时	式(15)
地壳放大模型	Boore和Joyner <sup>[27]</sup> 的坚硬岩石场地模型
场地厚土层放大模型	图3
窗函数	Saragoni-Hart窗 <sup>[28]</sup>
kappa参数	A区0.048; B区0.035; C区0.030
地壳剪切波速/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	3.5
破裂速度/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.8×地壳剪切波速
地壳密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.8

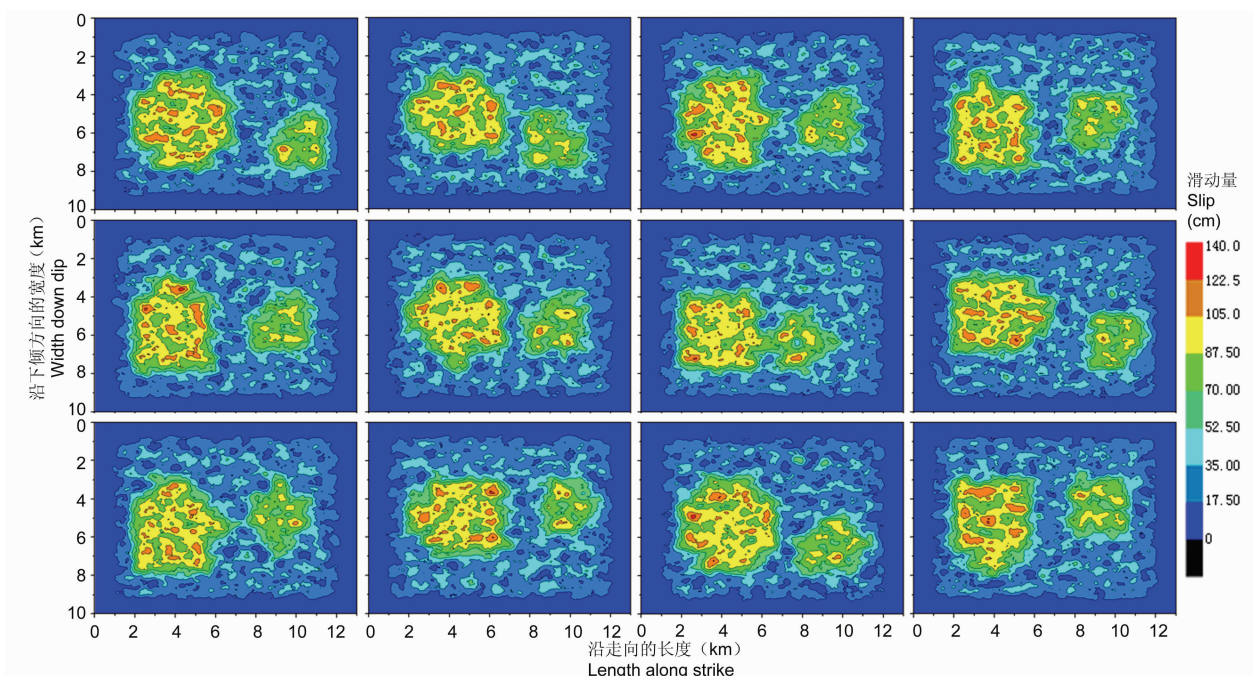


图 1 用混合滑动模型建立的 1997 年 4 月 11 日新疆伽师地震 ( $M_w 6.1$ ) 的 30 个滑动分布中的 12 个  
 Fig. 1 12 of 30 slip distributions of Jiashi earthquake ( $M_w 6.1$ ), Xingjiang on 11, Apr., 1997 generated by hybrid slip model

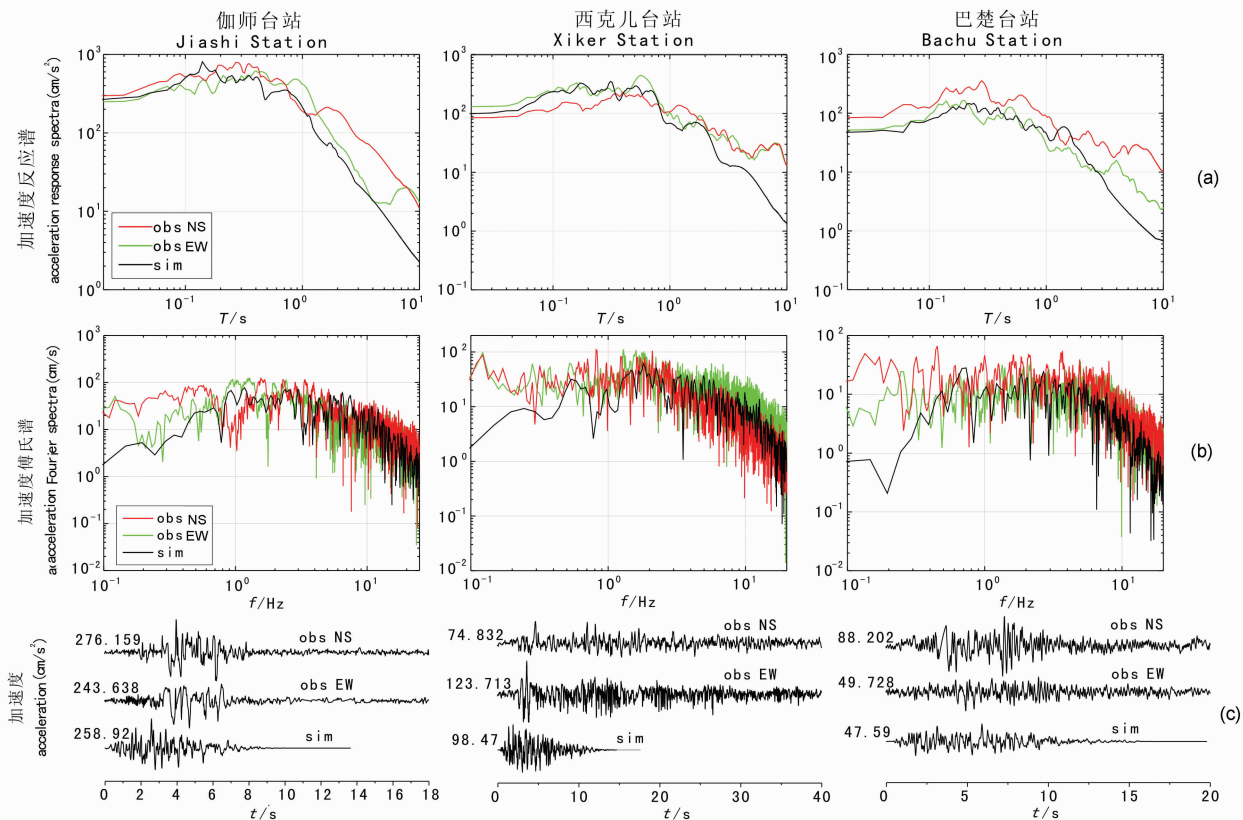


图 4 1997 年伽师地震 ( $M_w 6.1$ ) 3 个台站模拟与记录加速度时程 (c) 及其反应谱 (a)、傅氏谱 (b) 的比较  
 Fig. 4 Comparisons between simulated and recorded acceleration time histories (c) and their response spectra (a) and Fourier spectra (b) for three stations in 1997 Jiashi earthquake ( $M_w 6.1$ )

对 3 个台站模拟的加速度时程及频谱见图 4. 在 3 个台站中,模拟与记录的加速度反应谱、傅氏谱在大于 0.5 Hz 以上的频段拟合程度都是非常高的(图 4(a, b)). 除西克尔台站模拟的加速度持时较短、波形相似程度相对较低之外,其他两个台站的波形的相似程度均较高(图 4c). 西克尔台站记录的地震动持时远远大于模拟的地震动持时,可能与盆地边缘波对地震动持时的放大有关,因为西克尔台站的震中距大约是巴楚台站震中距的 0.3 倍,记录的地震动持时前者却是后者的 2 倍.

### 3.5 近断层地震动场预测

在震源区选择了 77 个节点(经向 11 个,纬向 7 个)(图 5),用上述方法和表 2 的输入参数预测了 77 个节点的加速度时程,取每个节点加速度时程的峰值,绘制了近断层的加速度场(图 6). 断层上盘的加速度值显著地大于断层距相同的下盘,具有非常明显的上盘效应. 断层面之上的最大加速度范围与最大凹凸体位置相对应,这说明与断层面上凹凸体相

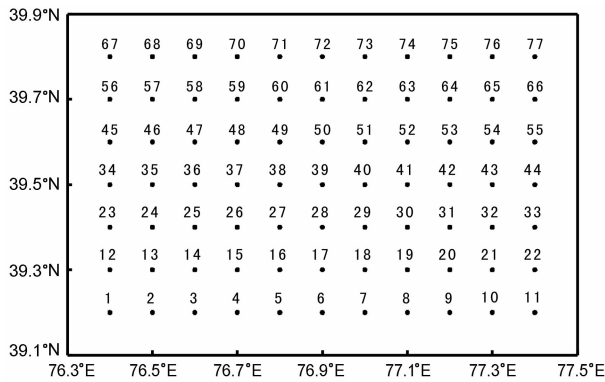


图 5 用于近断层加速度场预测的节点位置及其编号

Fig. 5 The numbers and geographic locations of nodes for predicting near-fault acceleration field

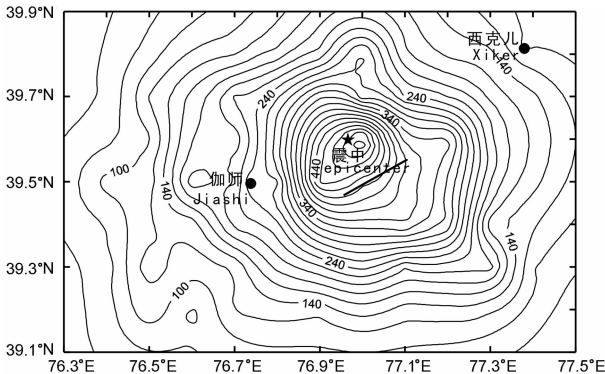


图 6 预测的 1997 年伽师地震( $M_w 6.1$ )

近断层加速度场

Fig. 6 The predicted near-fault acceleration field of 1997 Jiashi earthquake ( $M_w 6.1$ )

对应的地面上的建(构)筑物将会遭受到较为严重的震害.

## 4 结 论

迄今为止,地震动模拟或预测仍是一门相对较新的科学,需要随着强震观测中不断发现的新现象、新问题的认知而逐渐完善. 地震动模拟或预测的结果取决于震源、路径、场地三个物理过程良好的建模,减少建模中的不确定性,建立能够更真实地表达震源破裂过程、波传播过程以及场地反应的模型,将进一步提高地震动模拟或预测的精度.

本文在建立有限断层震源的基础上,首先模拟取得主震记录台站的地震动,然后用记录的地震动验证,最后预测近断层若干场地的地震动,取其峰值得到近断层地震动场的技术思路,不但保证了预测结果的可行性和实用性,同时储存了大量近断层的加速度时程,对于近断层建(构)筑物的非线性动力分析提供了基础. 为研究区的抗震设防提供了可靠的依据.

上述研究的主要结论如下:

(1)1997 年 4 月 11 日伽师地震( $M_w 6.1$ )以正断层为主兼具左旋走滑性质,走向  $240^\circ$ ,倾角  $37^\circ$ ,滑动角  $-45^\circ$ ,震源深度 15 km;断层上界埋深为 12 km;根据经验关系式确定的地震断层的宏观震源参数为:破裂面积  $130 \text{ km}^2$ ,破裂长度 13 km,破裂宽度 10 km,断层面的平均滑动 39.81 cm.

(2)对震区仅有主震加速度记录的三个流动强震台站的加速度时程模拟结果表明:①基于动力学拐角频率的随机方法模拟的加速度时程在 0.5 Hz 以上频段是可行的;②基于上述有限断层震源建模方法建立的震源模型、以及本文采用的其他研究人员建立的波传播模型和场地反应模型都是有效的.

(3)预测的近断层加速度场具有非常明显的上盘效应. 地表最大加速度范围与断层面上最大凹凸体位置相对应,这说明与断层面上凹凸体相对应的地面上的建(构)筑物将会遭受到更为严重的震害.

(4)西克尔台站记录的地震动持时远远大于模拟的地震动持时,可能与盆地边缘波对地震动持时的放大有关.

在未来的研究中,一方面要加强盆地边缘波对地震动幅值和持时的放大作用的研究,以应用于地震动模拟或预测;另一方面,需要开展地震动混合方法的研究,产生宽频带的地震动.

致谢 感谢同行专家对本文的匿名评审和提出的有益问题。

## 参考文献(References)

- [1] Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology: Theory and Methods. New York: W H Freeman & Co Ltd., 1980
- [2] Boore D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1983, **73**: 1865~1884
- [3] Boore D M. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure Appl. Geophys.*, 2003, **160**: 635~676
- [4] Hartzell S. Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophys. Res. Lett.*, 1978, **5**: 1~4
- [5] Irikura K. Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes. *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, 1983, **33**: 63~104
- [6] Kamae K, Irikura K, Pitarka A. A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1998, **88**(2): 357~367
- [7] Hartzell S, Harmsen S, Frankel A, et al. Calculation of broadband time histories of ground motion: comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 Northridge earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1999, **89**(6): 1484~1504
- [8] Pitarka A, Somerville P, Fukushima Y, et al. Simulation of near-fault strong-ground motion using hybrid Green's functions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2000, **90**: 566~586
- [9] Beresnev I, Atkinson G. FINSIM: a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. *Seism. Res. Lett.*, 1998, **69**: 27~32
- [10] Motazedian D, Atkinson G M. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2005, **95**(3): 995~1010
- [11] Somerville P G. Emerging art: earthquake ground motion. In: Dakolas P, et al. eds. Proceedings-Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE Speciality Conf. Special Pub. 75, Seattle, WA, 1998, 1~38
- [12] Irikura K. Prediction of strong ground motions from future earthquakes caused by active faults-Case of the Osaka Basin. 12th World Conference on Earthquake Engineering (12WCEE), CDROM, No. 2687. Auckland, New Zealand during 30 January~4 February 2000
- [13] Wang H Y, Tao X X. Relationships between moment magnitude and fault parameters: theoretical and semi-empirical relationships. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, **2**(2): 201~211
- [14] 王海云. 近场强地震动预测的有限断层震源模型[博士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2004  
Wang H Y. Finite fault source model for predicting near field strong ground motion [Ph. D. thesis](in Chinese). Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2004
- [15] 王海云,陶夏新. 近场强地震动预测中浅源地震的 Asperity 模型特征. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(11): 1533~1539  
Wang H Y, Tao X X. Characterizing a shallow earthquake asperity model for predicting near field strong ground motion. *Journal of Harbin Institute of Technology* (in Chinese), 2005, **37**(11): 1533~1539
- [16] Wang H Y, Tao X X. Hybrid slip model for predicting near-field strong ground motion. 2004 ANCER Annual Meeting: Networking of Young Earthquake Engineering Researchers and Professionals. CDROM, July 28 ~ 30, 2004, The Sheraton Princess Kaiulani, Honolulu, Hawaii
- [17] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1970, **75**: 4997~5009
- [18] Beresnev I, Atkinson G. Subevent structure of large earthquakes—a ground motion perspective. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **28**: 53~56
- [19] 朱令人,苏乃秦,杨马陵. 1997 年新疆伽师强震群及三次成功的临震预报. 中国地震, 1998, **14**(2): 101~115  
Zhu L R, Su N Q, Yang M L. Activity of the 1997 Jiashi strong swarm in Xinjiang and three successful impending predictions for it. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1998, **14**(2): 101~115
- [20] 杨欣,高国英. 1997 年伽师强震群序列特征和震源机制的初步研究. 地震学报, 1998, **20**(6): 573~579  
Yang X, Gao G Y. A preliminary study on the sequence characteristics and focal mechanism solution of the Jiashi strong earthquake swarm. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1998, **20**(6): 573~579
- [21] 单新建,何玉梅,朱燕等. 新疆伽师强震群的震源破裂特征. 地震地质, 2002, **24**(1): 59~68  
Shan X J, He Y M, Zhu Y, et al. Characteristics of focal rupture of the Jiashi strong earthquake swarm. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2002, **24**(1): 59~68
- [22] 赵翠萍. 1997~2003 年新疆伽师震源区特征的地震学方法研究[博士学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2006  
Zhao C P. Seismological studies on the characteristics of Jiashi source region from 1997~2003 [Ph. D. thesis](in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2006
- [23] 赵翠萍,陈章立,郑斯华等. 伽师震源区中等强度地震矩张量反演及其应力场特征. 地球物理学报, 2008, **51**(3): 782~792  
Zhao C P, Chen Z L, Zheng S H, et al. Moment inversion of moderate earthquakes and the locally perturbed stress field in the Jiashi source region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(3): 782~792
- [24] Atkinson G M, Boore D M. Evaluation of models for earthquake source spectra in Eastern North America. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1998, **88**: 917~934
- [25] 姜慧. 地震动随机模拟方法中的场地效应研究[博士学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005



- Jiang H. Study on site effects of stochastic simulation of earthquake ground motions [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2005
- [26] Anderson J G, Hough S. A model for the shape of the fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1984, **74**(5): 1969~1993
- [27] Boore D M, Joyner W B. Site amplifications for generic rock sites. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1997, **87**(2): 327~341
- [28] Saragoni G R, Hart G C. Simulation of artificial earthquakes. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 1974, **2**: 249~267

(本文编辑 胡素芳)