

文章编号: 0253-3782(2004)02-0183-10

断层附近地面地震动空间分布^{*}

刘启方 袁一凡 金 星

(中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所)

摘要 运用震源位错模型, 分析矩形垂直断层及倾斜断层走向滑动和倾向滑动的近场地震动场, 以地表地震动的傅立叶振幅谱比为参量考察断层附近地震动空间分布的特点。结果表明, 断层附近的地震动强度主要受近旁子断层的控制, 高强度的地震动分布在紧靠断层两侧有限的带状区域内, 长周期分量受断层破裂传播方向性的影响。走向滑动的方向性影响主要表现在垂直于断层走向的分量, 倾向滑动则表现在平行于断层走向的分量, 且深震在地面上引起的地震动强度分布比浅震要平缓, 影响范围宽。倾斜断层产生的地震动有明显的上盘效应, 空间分布不对称, 与观测结果相符。最后给出了断层附近近场地震动强度分布拟合函数的表达式, 并与美国的 1997 统一建筑规范规定的近场因子作了比较。

关键词 近场强地面运动 断层的位错模型 方向性 近场修正因子

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A

引言

断层附近的强地震动造成了结构和(或)地面的严重破坏, 促使人们研究近场地震动的特点。近年来获得了许多有价值的断层附近的强震记录, 并提出了断层的动力学和运动学模型, 发展了许多震源附近地震动的理论分析和数值模拟方法(Somerville, 1998)。我们可以从已经获得的强震记录分析中得到近场强地震动的一些特点:

1) 近场地震动“峰值饱和”现象, 即断层近旁峰值加速度是有限的。这是因为岩石强度和断层尺度都是有限的。

2) 破裂传播方向性对近场地震动空间分布有影响。当破裂由断层的一端开始, 然后向另一端传播后, 由于破裂源向前传播的多普勒效应, 在破裂传播前方的地震动峰值大、频率高、持续时间短, 传播后方的地震动则反之。方向性影响主要体现在地震动的长周期分量, 一般根据实际记录粗略估计分界值为 0.5 s(Somerville, 1998)。这个值是否合适尚需进一步研究。

3) 在断层近旁的地震动速度和位移会形成明显的脉冲, 这种脉冲主要发育在垂直于断层走向的分量上。这个现象可以用传播位错源或等效双力偶源的理论地震图解释。

4) 断层附近地面地震动的空间分布有一定规律性。图 1 是台湾岛集集大地震地面峰值加速度的等值线分布图^①, 这是倾滑型断层的地面地震动分布图, 等值线在断层附近密集, 说明衰减快。发震的车笼埔断层是倾斜的逆冲断层, 东面(上盘)的地震动比西面(下

* 国家自然科学基金资助项目(59895410)和科技部社会公益性研究专项资金项目(2001DIB20098)共同资助。

2002-11-06 收到初稿, 2003-10-10 收到修改稿, 2003-11-01 决定采用。

① 台湾地震工程研究中心, 1999. 921 集集大地震最大加速度等值线图, 建筑物震害调查初步报告。

盘)大, 等值线分布宽, 说明上盘的强烈地震动分布广。由图看出, 东西向(与断层走向垂直)的加速度比南北向(与断层走向平行)要大; 从南北向和垂直向的分布图上, 看到在断层的两端地震动有明显的相对高峰值。这些特点将在下文中与计算进行对比。

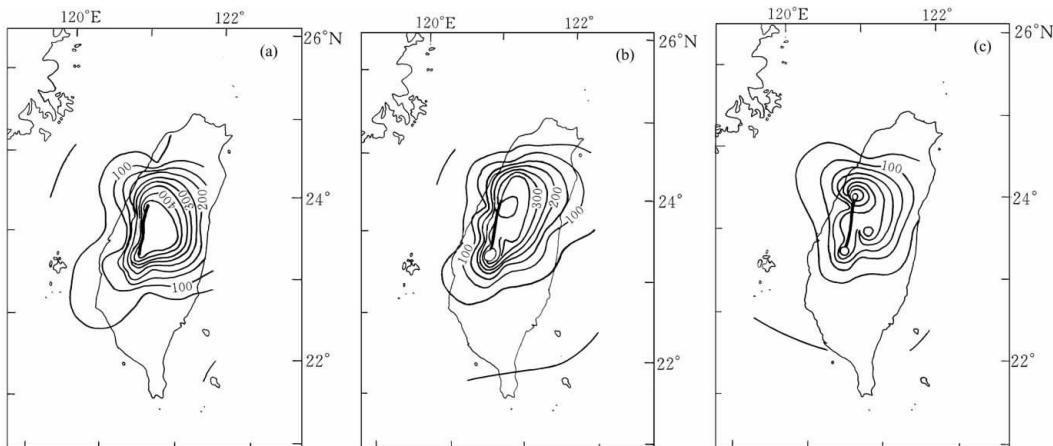


图 1 台湾岛集集大地震峰值加速度等值线图

(a) 东西向; (b) 南北向; (c) 垂直向

合理的震源模型和理论地震图计算方法, 应当既能反映上述观测结果又能再现实际的地震动过程, 此时需要考虑更符合实际的断层非均匀破裂模型和复杂的地下构造模型。在这方面也取得了一定的进展(Somerville, 1998)。就断层附近地面地震动的空间分布而言, 如果考察近场地震动的平均强度, 或许简单的震源模型和介质模型就可以模拟地震动平均强度空间分布的主要特征, 从而简化分析手段, 进行更多的数值模拟。本研究基于这个思路, 考察运用震源的运动学模型, 如位错模型来计算分析近场地震动, 研究断层附近地震动空间分布的一般(或平均)规律, 采用简单的均匀半空间和成层半空间介质模型, 并注意频率高于 1 Hz 的高频地震动特征。

随着对近场地震动特征的认识和研究发展, 有必要在预测强地震动或在确定设计地震动中加进近场特征影响。这方面的工作还很不充分, 比较常用的方法是统计分析实际近场记录特点, 找出规律。例如, Somerville(1998)经过对强震记录的分析, 提出了考虑方向性影响反应谱的经验估计方法, 并定量地用参数 $(S/L)\cos\theta$ 决定修正因子, S 为观测点震中距在断层走向上的投影, L 为断层长度, θ 为方位角。当 $(S/L)\cos\theta$ 为 1 时, 周期 5 s 的反应谱值为平均值的 2.6 倍, $(S/L)\cos\theta$ 为 0 时则减低到 0.5 倍, 对持续时间也作类似的经验处理。1997 年统一建筑规范(1997 Uniform Building Code, 以下简称 UBC 1997)(International Conference of Building Officials, 1997)提出用近场修正因子修正断层近场地震动强度。本研究利用震源位错模型, 计算了走滑断层和倾滑断层的地面地震动的空间分布, 并与 1999 年台湾集集地震观测记录的分布进行比较, 确认计算结果的合理性。在此基础上总结地震动振幅谱的空间分布规律, 用简单的公式近似表达, 并与 UBC 1997 规定的近场修正因子进行比较。可以用本文方法进一步研究修正近场地震动输入的方法和数值。

1 断层附近地震动模拟方法

利用运动学震源模型研究近场地震动的关键, 是如何获得点源的格林函数。对于同样

一个问题, 有多种不同的计算格林函数方法, 其结果是相同的。本研究采用有限差分法计算格林函数(袁一凡, 廖振鹏, 1984)。在图 2 的坐标系中, 设 x_1 轴为断层走向方向, x_3 轴垂直于地面, 断层的倾角为 θ , $D(t) = D_0 F(t)$, D_0 为最终位错, $F(t)$ 为震源时间函数, 位错矢量与 x_1 轴的夹角为 ψ 。在均匀弹性半空间中, 将位错源产生的地震动场用柱坐标重新表示, 可得到如下表达式:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = & -\mathbf{u}^I(r, \varphi, z)\sin\psi\cos 2\theta + \mathbf{u}^I\left(r, \varphi - \frac{\pi}{2}, z\right)\cos\psi\cos\theta + \mathbf{u}^{II}(r, \varphi, z)\cos\psi\sin\theta + \\ & \mathbf{u}^{III}(r, \varphi, z)\sin\psi\sin 2\theta + \mathbf{u}^{IV}(r, \varphi, z)\sin\psi\sin\theta \end{aligned} \quad (1)$$

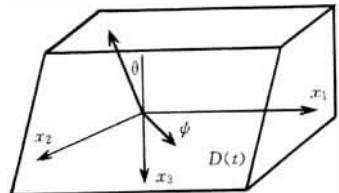


图 2 震源坐标系

式中, \mathbf{u} 为点位错源引起的空间任意一点的位移、速度或加速度, 视震源时间函数量纲而定, 本研究计算得到的是加速度。其上标 I, II, III, IV 表示 4 种基本类型的点源: 点源 I 为垂直断层的走向滑动, 点源 II 为垂直断层的倾向滑动, 这是两种最基本的断层运动; 点源 III 和 IV 与水平断层在垂直方向上的张裂, 以及垂直断层在水平方向上的张裂有关。这种位错在实际中很难发生, 是用于合成任意倾角断层运动时引入的。由于均匀成层弹性半空间介质仍具有轴对称性, 所以可以简单地将此方法推广到均匀弹性成层半空间, 即在均匀弹性成层半空间中, 位错点源引起的地震动场仍用式(1)表示。

为了得到点源地震动场的基本解, 我们用数值脉冲函数作为震源时间函数。这样作的好处是既可以得到时间域的 Green 函数, 也能很方便地得到频域传递函数, 便于我们讨论不同频率地震动的空间分布。采用数值脉冲函数必须根据计算频段选择脉冲宽度, 这里考虑有效计算频段为 0~10 Hz, 相应地取脉冲宽度为 0.2 s。利用袁一凡和廖振鹏(1984)给出的柱坐标下的有限差分法, 分别求解均匀半空间和均匀成层半空间内的 4 种基本类型的点位错源产生的地震动场, 最后利用式(1)叠加得到任意点位错源产生的地震动场。

得到了地震动场的基本解后, 只要假定断层的大小、形状、破裂方式, 就可利用点源的基本解合成任意破裂方式产生的地震动场。图 3 为本研究计算模型。设有埋伏深度为 H 的矩形断层, 并考虑单侧破裂、双侧破裂和中心破裂 3 种形式: 单侧破裂假定破裂开始于断层左端, 然后按照一定速度扫过断层面; 双侧破裂是由断层中心线向两边传播; 中心破裂假定破裂由断层的中心开始, 然后以同心圆形式向外扩展, 破裂速度假定为小于 S 波速度的常数。合成地震动的方法是将断层面划分为许多子断层, 每个子断层视为一个点源,

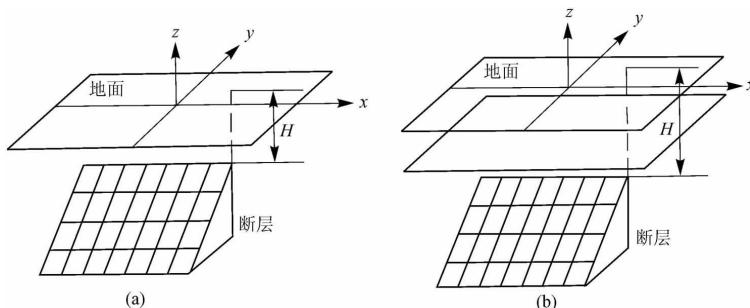


图 3 断层附近近场地震动计算模型示意图

(a) 均匀半空间; (b) 均匀成层半空间

然后按照破裂传播到达的延时分别叠加各子源的解。显然，点源的个数和每个点源的强度影响最后解的绝对数值。为了研究地震动的空间分布特征，我们暂不考虑绝对值大小，只比较空间分布的相对比例差异。为此，计算地表各点加速度的傅里叶振幅谱与震源时间函数的傅里叶振幅比，用它来描述地震动的空间分布特征。为了考察不同子源个数对地震动振幅谱比的影响，我们作了计算对比。例如，假设断层长 20 km、宽 10 km，分别取子源尺寸为 125 m×125 m、250 m×250 m 以及 1 000 m×2 000 m，计算以断层在地面的投影为中心的长 40 km、宽 20 km 范围内的地表地震动。结果表明，地表地震动强度的空间分布规律是相似的，本研究给出的结果可以反映断层附近地震动平均强度空间分布的一般规律。

将柱坐标下得到的解再还原为直角坐标系，求得平行于和垂直于断层走向的水平分量(x 方向和 y 方向)，垂直于地面的竖向分量(z 方向)。采用上述方法，我们分别研究了半空间和成层半空间中垂直断层及倾斜断层的走向滑动和倾向滑动引起的断层附近地震动的基本特征。

2 计算结果与分析

算例之一取断层最上方的深度为 500 m，反映近地面震源影响，向下依次隔 1 km 有一排 20 个点源，介质为泊松体，半空间基岩内 S 波速度为 3 000 m/s。为简化计算，对于成层半空间，我们取基岩上覆盖一层土的情况。土层内 S 波速度为 1 000 m/s，土层厚度为 300 m，破裂由左向右传播，速度为 2 500 m/s。计算倾斜断层时，取断层的倾角为 60°。图 4 为半空间和单覆盖土层半空间垂直断层倾向滑动，在地面以断层投影为中心 40 km×20 km 范围内，地震动的典型频率分量的(0.2, 0.5, 8 Hz)傅里叶振幅谱与震源时间函数傅里叶振幅比的空间分布。图 5 为走向滑动的结果。双侧破裂可看成两个相反方向单侧破裂的叠加，地震动分布规律与之类似。破裂起始点位于断层一端的中心破裂的分布规律类似单侧破裂，由断层中心开始的中心破裂的分规律与双侧破裂类似。限于篇幅，就不再列出结果。

由计算结果得到地表地震动振幅谱的空间分布有如下特点：

1) 断层附近强地震动的集中性。无论是半空间和成层半空间的计算结果都表明，强地震动集中在沿断层在地表的投影区域相对比较窄的范围内。这说明近场地震动的衰减是比较快的。半空间垂直断层的地震动分布(图 4a 及图 5a)比较简单。对成层弹性半空间，由于土层的放大作用，地震动幅值增大。由于地震波在土层中的多次反射，地震动分布较乱(图 4b 及图 5b)，但强地震动仍集中在比较窄范围内。倾斜断层产生的强地震动的集中区域要偏离断层面在地表投影的中心线(图 6)，偏离的大小与断层的倾角等因素有关。其原因是随着震源深度的增加，近场地震动的幅值下降很快。对于倾斜断层而言，对地表地震动起控制作用的是距离地面近的子源，而这些子源在地面的投影要偏离断层面在地表投影的中心线。因此从断层迹线起算震中距，在相等的距离上，上盘地表的地震动要大，这就是所谓上盘效应。由图 6 给出的半空间倾斜断层倾向滑动的振幅谱比等值线图，可以看到明显的偏离。Aagaard 等(1999)计算的倾斜断层走向滑动也有类似结果。

断层附近强地震动的集中性意味着断层附近的极震区范围有限，避开适当距离，地震动就小得多。但要注意，对倾斜断层，避让距离要考虑断层的倾角、滑动方向等多种因素。

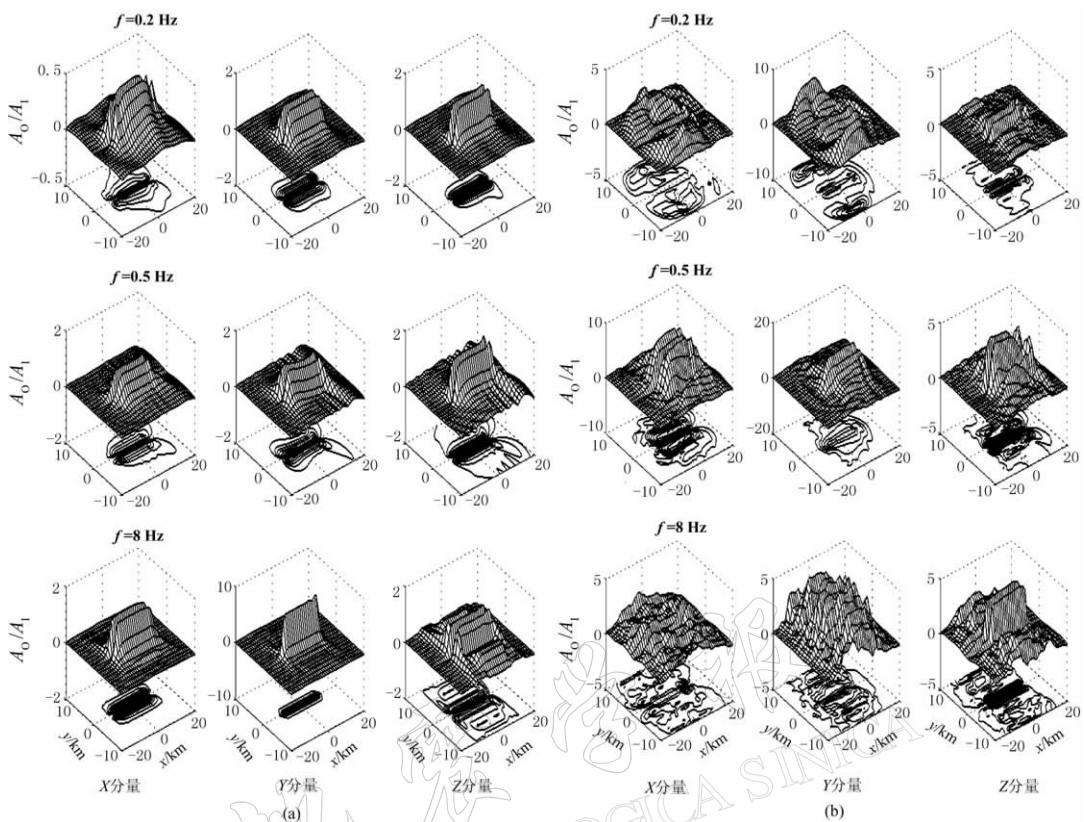


图 4 半空间(a)和单覆盖土层半空间(b)垂直断层倾向滑动在地面以断层投影为中心

40 km×20 km 范围内, 地震动的典型频率分量(0.2, 0.5 和 8 Hz)

傅里叶振幅谱(A_o)与震源时间函数傅里叶振幅谱(A_i)比的空间分布

以断层的中心在地面的投影为中心, 断层两边的避让距离应不同。Inoue 和 Miyatake (1998)用震源的动力破裂模型, 计算了近场地表速度和加速度。虽然他们给出的是峰值速度和峰值加速度的分布, 但空间分布的规律与本研究是一致的。由于不同方法得到相类似的结果, 可以预料即使对更复杂的断层破裂方式, 这个规律将还会存在, 因为基本的点源解是相同的。

2) 方向性影响是近场地震动特点。由图 5 的半空间 Y 分量(与断层走向垂直)的结果看到, 在长周期分量有方向性影响, 在破裂前方的地震动振幅大、等值线宽, 而高频分量则看不出来。图 4 所示的半空间倾向滑动仅在长周期 X 分量看得出来, 其它分量和频率表现不明显, 成层半空间的方向性也不明显。

3) 在一些周期分量上, 振幅谱比在断层端点处有相对的峰值(图 4, 5, 6)。对比图 1 台湾岛集集大地震峰值加速度南北分量和垂直分量等值线图, 也有类似现象。这说明断层端点处地震动有相对的峰值, 是近场地震动的一个有意思的特点。同时也说明, 简单的震源模型可以反映近场地震动的基本特征。试算中发现, 如果假定断层端部的位错为零, 则局部极值不明显, 甚至消失。这暗示着集集地震断层的端部附近可能仍然有一定大小的位错。

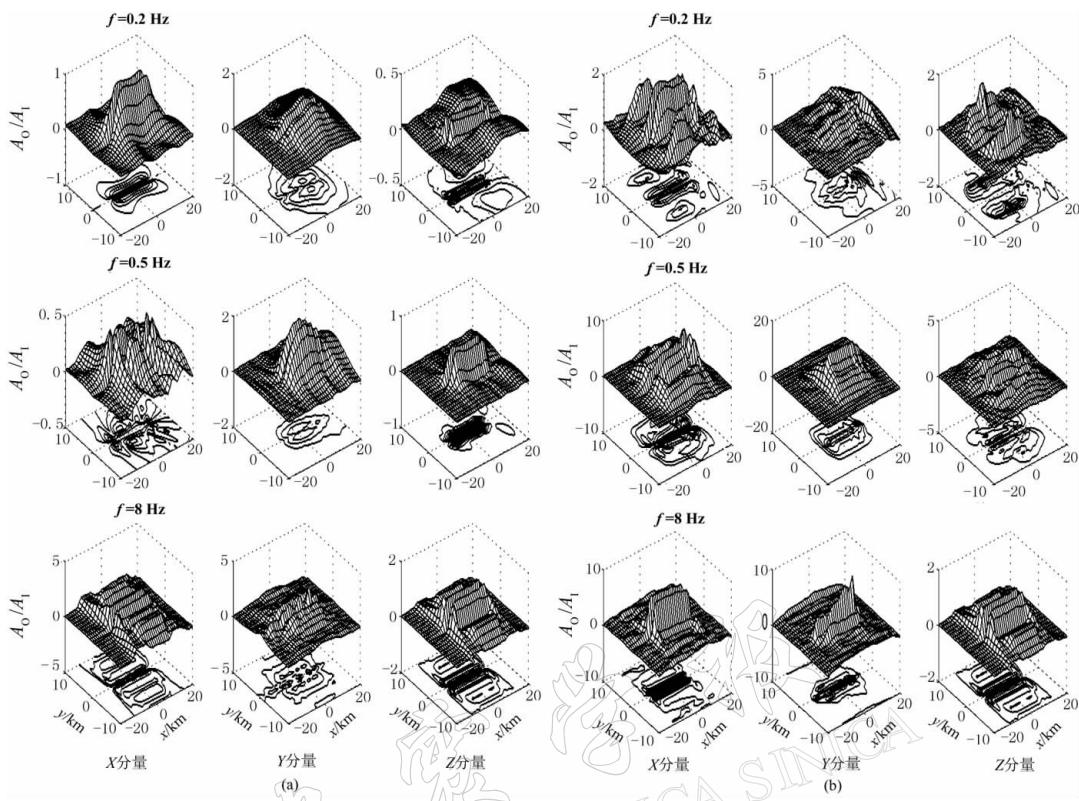


图 5 半空间(a)和单覆盖土层半空间(b)垂直断层走向滑动在地面以断层投影为中心
40 km×20 km 范围内, 地震动的典型频率分量(0.2, 0.5 和 8 Hz)
傅里叶振幅谱(A_0)与震源时间函数傅里叶振幅(A_1)谱比的空间分布

4) 通过比较深源和浅源的地震动场分布(图未列), 可以发现深源(例如 5 km 以下)的近场地震动振幅谱分布比浅源变化平缓、影响范围广, 同时地震动的强度随震源深度增大而迅速降低.

5) 计算中很容易发现, 控制地表地震动的主要子源是紧靠观测点的子源. 近场地震动的特点之一是几何衰减快. 我们分别用最接近地表的前 1, 3, 5 排子源叠加的结果, 前 5 排叠加结果与前 3 排结果看不出差别(图未列出). 这个结果表明, 在研究断层附近的近场地震动时, 不必烦琐计算所有子源贡献, 最主要的是靠近地表的子源, 这对估计近场地震动的绝对值很重要.

6) 由图 4, 5, 6 均可看出, 近场地震动, 特别是在断层边沿的地震动, 与震中方位角有很大的关系, 不同的震中距与方位角的地震动差别很大.

3 设计地震动近场修正因子

根据算例的计算结果(文中只列出了典型算例), 本研究建议用简单的关系式估计近场地震动的振幅谱比分布. 作为初步研究, 仅限于垂直断层. 在地面上以断层中点的投影为原点建立坐标系, x 轴为断层走向方向, y 轴为垂直断层方向, L 为断层长度, f 为频率, 则振幅谱比分布可表示为

$$\begin{cases} F_A(x, y, f) = \exp\left[\frac{-y^2}{w(x, f)^2}\right] & (-L/2 < x < L/2) \\ F_A(x, y, f) = \exp\left[\frac{-y^2}{w(x, f)^2}\right] \times \exp\left[\frac{-(x \pm L/2)^2}{d(f)^2}\right] & (|x| \geq L/2) \end{cases} \quad (2)$$

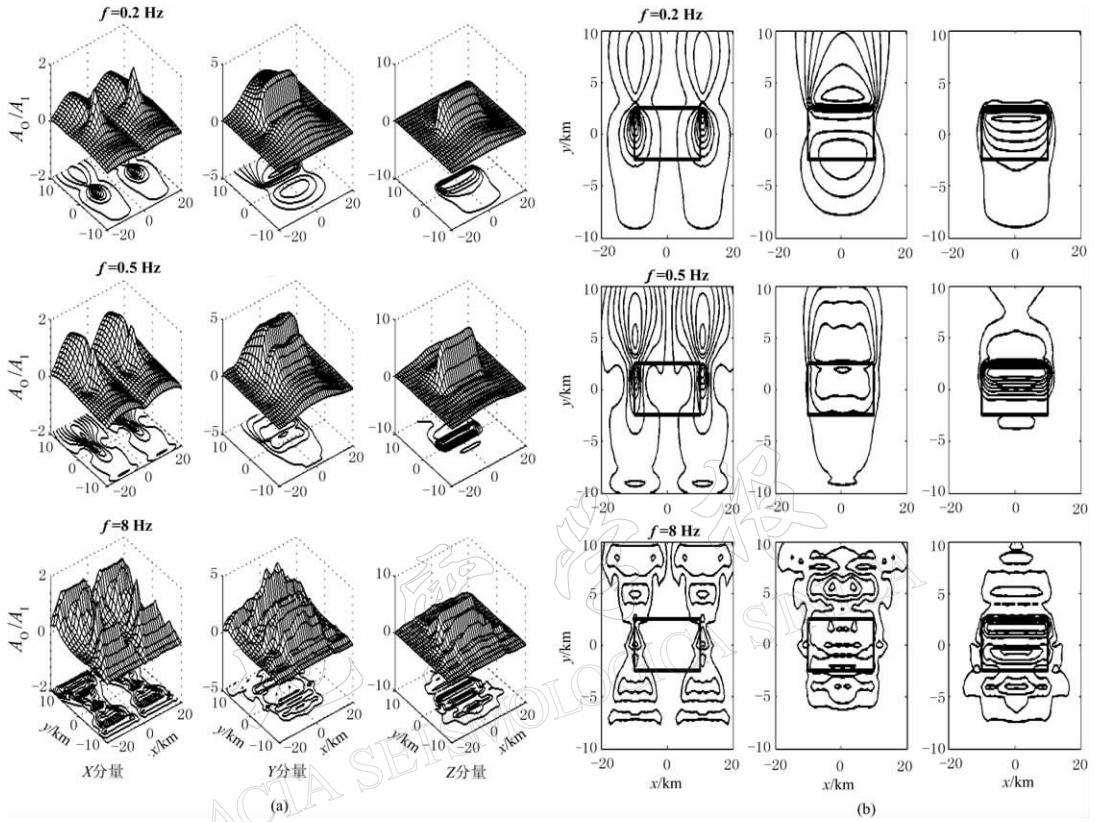


图 6 半空间倾斜断层走向滑动在地面以断层投影为中心 $40 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 范围内, 地震动的典型频率分量(0.2, 0.5 和 8 Hz)傅里叶振幅谱(A_O)与震源时间函数傅里叶振幅谱(A_I)比的空间分布

(a) 傅里叶振幅谱比分布; (b) 振幅谱比等值线, 图中的长方形为断层在地表的投影

式中, F_A 是振幅谱比函数, 参数 $w(x, f)$ 和 $d(f)$ 是控制强地震动在 y 方向和 x 方向的分布区域; L 的大小与震级有关, 不同 L 的计算结果表明地表地震动的空间分布规律相似。采用最小二乘方法拟合, 拟合时将两个水平分量的振幅谱合成, 并适当归并。严格来说, 参数 w 和 d 与破裂方式、震源深度、地震动频率和分量都有关系。经过比较, 发现走向滑动和倾向滑动时, 参数 $w(x, f)$ 和 $d(f)$ 的差别不大, 影响比较大的因素是震源深度, 当断层顶面深度超过 5 km 时, 水平与垂直分量的 $w(x, f)$ 和 $d(f)$ 分布差别不大; 而当震源深度小于 5 km 时, 高频和低频分量对应的 $w(x, f)$ 和 $d(f)$ 差别比较明显。由于很难事先判断断层是否为单侧破裂, 所以暂不考虑其方向性影响。表 1 给出了拟合后的参数。

UBC 1997 将断层分为 3 类, 如表 2 所示。对距离断层迹线 $10 \sim 15 \text{ km}$ 范围内的工程场地, 规定了近场因子 N_a 和 N_V , 分别修正设计地震动的两个关键因子 C_a 和 C_V , 如表 3, 4 所示(International Conference of Building Officials, 1997)。

表 1 近场地震动振幅空间分布参数 w 和 d 拟合结果

拟合参数	震源深度 $\geq 5 \text{ km}$		震源深度 $< 1 \text{ km}$	
	水平分量	垂直分量	低频 ($\leq 1 \text{ Hz}$)	高频 ($> 1 \text{ Hz}$)
w	12	6.0	3.0	1.5
d	8.0	4.0	1.0	1.0

表 2 震源类型分类(UBC 1997)

震源类型	震源描述	震源参数	
		最大矩震级	滑动率
A	能发生大震，且地震活动性高	$M \geq 7.0$	$\geq 5 \text{ mm/a}$
B	除 A 和 C 类以外的断层		
C	不能发生大震，且地震活动性较低	$M < 6.5$	$\leq 2 \text{ mm/a}$

表 3 设计地震动近场因子 N_a (UBC 1997)

震源类型	场地离已知断层的最短距离		
	$\leq 2 \text{ km}$	5 km	10 km
A	1.5	1.2	1.0
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

表 4 设计地震动近场因子 N_v (UBC 1997)

震源类型	场地离已知断层的最短距离			
	$\leq 2 \text{ km}$	5 km	10 km	15 km
A	2.0	1.6	1.2	1.0
B	1.6	1.2	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

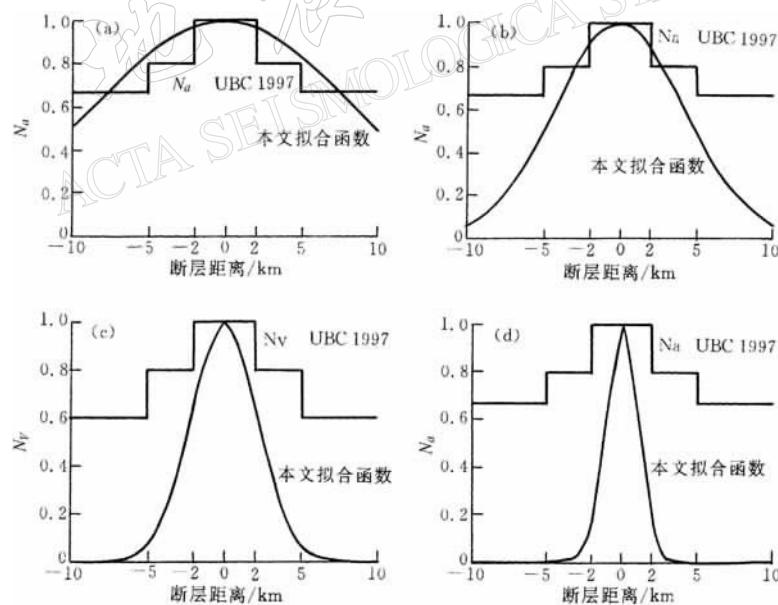


图 7 本研究拟合函数与 UBC 1997 近场修正因子的比较

(a) 震源深度 5 km , 水平分量; (b) 震源深度 5 km , 垂直分量; (c) 震源深度 500 km , $f < 1 \text{ Hz}$; (d) 震源深度 500 m , $f > 1 \text{ Hz}$

UBC 1997 给出的修正因子用于确定地震动设计谱或结构基底剪力等, 与本研究的地震动振幅谱比大小分布有一定可比性, 因为都要反映在靠近断层的近场地震动增大, 以及

增大的区域有限这两个事实。图 7 为 Y 剖面(垂直断层走向方向)上两者的比较, 都按断层中心(迹线处)的值归一化, 图 5a, b 为震源深度 5 km 水平分量和垂直分量的结果, 图 5c, d 为震源深度 500 m 低频和高频分量的结果。将拟合函数的高频($f > 1 \text{ Hz}$)地震动与 UBC 1997 的 A 类地震 N_a 近场因子比较, 将低频($f < 1 \text{ Hz}$)地震动与 UBC 1997 的 A 类地震 N_V 近场因子比较。可见, 对于震源深度在 5 km 以下的地震(这是大多数情形), 本研究结果与 UBC 1997 规定基本一致; 但是对于浅震, 本研究结果表明地震动衰减要快, 而且高频分量衰减更快。这提示对于极浅的地震, 可能还要个别研究。由于确定未来震源深度和位置是很困难的, 对于重要的结构, 可以用确定性模型作比较详细的研究, 包括对可能比较浅的震源影响的估计, 以预防最不利的影响。

4 结语

- 1) 本研究利用位错震源模型, 计算了均匀半空间和成层半空间中垂直断层和倾斜断层引起的地震动, 得到了与近场观测结果一致的地表地震动空间分布。说明可以用比较简单模型模拟近场地地震动的强度空间分布特征。
- 2) 通过模拟计算, 总结了近场地地震动强度分布的一般规律, 得出了近场地地震动分布的集中性、近场地地震动的方向性以及断层的上盘效应等近场地地震动的基本特征。
- 3) 采用最小二乘拟合, 给出了估计垂直断层近场地地震动的振幅谱比空间相对分布的拟合函数表达式, 并与 UBC 1997 规定的近场因子作了比较, 两者基本一致; 但对于靠近地面的浅源和高频分量则衰减更快。

参 考 文 献

- 袁一凡, 廖振鹏. 1984. 弹性半空间位错内源的数值解[J]. 地震学报, **6**(3): 324~339
- Aagaard B T, Hall J F, Heaton T H. 1999. Characterization of near-source ground motions with earthquake simulations [J]. *Earthquake Spectra*, **17**(2): 177~207
- Inoue T, Miyatake T. 1998. 3D Simulation of near-field strong ground motion based on dynamic modeling[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **88**(6): 1 445~1 456
- International Conference of Building Officials. 1997. 1997 *Uniform Building Code*[M]. Whittier, California: International Conference of Building Officials
- Somerville P. 1998. Emerging art: Earthquake ground motion[A]. In: Dakoulas P, Yegian M, Holtz D eds. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*[C]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineering, 1~38

SPATIAL DISTRIBUTION OF NEAR-FAULT GROUND MOTION

Liu Qifang Yuan Yifan Jin Xing

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: Near-fault strong ground motions of strike-slip and dip-slip of vertical and inclined rectangular fault in half space and layered half-space is analyzed by dislocation source model. The Fourier spectra ratio of ground motion is adopted to study the characteristics of near-fault ground motion. For both slip models, near-fault strong ground motion with high amplitude is located in a narrow belt area along the projection of the fault on the ground and mainly controlled by the sub-faults nearby. Directivity of strike-slip fault is more dominant in long period for components perpendicular to the fault, and more dominant in long period for components parallel to the fault for dip-slip fault. The deeper the location of the source is, the more slowly the amplitude of ground motion attenuates. There is obvious hanging wall effect in ground motion of inclined fault, and the spatial distribution of ground motion is asymmetric which coincides with observational data. Finally, a fitting function of spatial distribution for near-fault ground motion is proposed and compared with near source factors of Uniform Building Code 1997 of USA.

Key words: near-fault strong ground motion; fault dislocation model; directivity; near source factor