

场地地震动局部地形效应研究进展

郭明珠 赵芳 赵凤仙

(北京工业大学, 北京 100124)

摘要 本文对地震动地形效应的影响因素及其规律进行了阐述和分析。主要对局部地形几何形状, 入射波的入射角度、频率, 震源相对位置及震源深度等因素对地形效应影响的国内外研究现状进行了综述。同时, 介绍了地震数值模拟在地震动地形效应研究中的应用, 并对进一步研究提出了一些建议。

关键词: 地形效应 局部地形几何形状 震源特性 地震数值模拟

前言

在许多实际地震中, 已经观测到工程场地地表地形对地震动产生的影响, 即地形效应。地形效应本质上就是研究工程场地中复杂地形对地震波传播特性的影响。复杂的地形地貌无疑会对地震动特性, 即持时、振幅和频率造成很大影响, 导致坐落在其上的结构物遭受重大破坏。

地形效应大体可分为两类: 一类是山峰、山脊、陡坡等凸起地形对地震地面运动起放大作用; 另一类是基岩面变化剧烈的沉积谷底, 其中某些地点, 除土层对地震动有放大作用外, 横向介质不均匀产生的次生波还会将其放大, 使结构破坏加重。在实际地震中已经观测到局部地形地貌会加重震害: 1970年云南通海地震中, 孤立突出的地形(小山包、山梁和地势高出地面30m以上的台地)其震害都明显加重, 地震烈度都较周围平地偏高0.5—1.0度, 表明地震作用下突出地形对地震动有放大作用(周正华等, 2003); 对建筑物的震害调查发现, 场地中复杂地形对震害分布具有重要的影响; 1976年唐山大地震时, 天津古河道及新近沉积土内外两侧建筑物震害比较严重, 说明了河谷场地对地震波的放大作用(首培杰等, 2009); 1985年Central Chile地震导致了大量的结构破坏, 尤其是对海岸城市的建筑结构破坏大, 位于山脊顶部的诸多建筑破坏严重, 有的几乎不可修复, 表明地震作用下特殊的山脊会对震害有明显的加重; 1989年Loma Prieta地震中, Robinwood山脊顶遭受很大的破坏, 而邻近的悬崖看上去却没有影响, 表明地形放大效应受地震波传播方向及波的入射角的影响; 1994年Northridge地震, 在Tarzana山顶部位记录到加速度值达到1.82g, 使得此处建筑物遭受到了极其严重的破坏(Davis等, 1973); 2008年汶川地震中, 位于三面临空的山脊平台的青川县木鱼镇中学, 在大地震的主震中孤立凸出的场地因强烈的震动波的放大效应, 导致学校建筑物遭受毁灭性破坏(李渝生等, 2009)。以上这些震害实例表明, 场地的局部地形地貌对地震动分布有很大

[收稿日期] 2013-02-26

[作者简介] 郭明珠, 男, 生于1963年。教授。主要从事工程地震和强震观测方面的研究。E-mail: gmz@bjut.edu.cn

的影响：狭长、高耸的山脊、条状山梁和孤立山丘对震害有明显的放大作用，局部地形中突兀的高度和陡度，震害程度存在很大的不同。山梁、山包的岩土介质类型及风化程度对震害分布也有着很大影响：岩质山包震害明显轻于土质山包；坡积物或滑坡体的覆盖厚度、密实程度及边坡陡峭程度对震害分布影响明显，山坡越陡峭边坡失稳的可能性越大，从而产生滑坡等严重次生灾害，造成的震害也越明显；山间河谷阶地震害分布的差异性和特殊性与凹陷地形本身的特性，如山间河谷两岸的陡峭程度、山体岩土介质稳定程度及其上覆盖沉积物特征等密切相关。

复杂地形地震动响应研究涉及以下几个方面：①复杂地形地震动响应的基本特征和产生的物理机制，以及这些基本特征与局部地形地质条件、入射波特性、震源参数之间的关系；②在抗震设计规范中合理地考虑复杂地形效应对地震动的影响因素；③合理地预测地形效应地震动响应的影响场时、空分布情况，为工程结构的抗震设计提供可靠的地震动输入；④通过强震台网地形台阵的实际地震观测记录，反演复杂地形对地震波传播的影响过程，从而加深对地震波在复杂地形中传播过程的认识，使得反演和预测地震动建立在更为合理的物理基础上。

目前，研究地形效应的方法主要有：强地震动地形效应观测、解析分析和数值模拟三种方法。其中，地形效应观测台站是研究场地局部地形效应对地震动影响的主要手段之一，如果说局部地形震害现象为我们提供了地震动局部地形效应的直观认识，那么观测记录则提供了对地震动进行定量分析的条件，通过将地震动记录分析与震害现象相结合，可以更好地研究地震动的山体地形效应。在“十五”国家重大项目——中国数字地震观测网络项目中，建设了大量的台阵，如：自贡西山公园地形观测台阵、官厅湖人工爆破地形监测台阵，以及汶川地震中窦圉山、武都盆地和三锅山体的流动观测台阵数据，为地震动地形效应的研究提供了数据基础。杨宇等（2011）、王海云等（2010）、唐晖等（2012）和王伟等（2011）通过对西山自贡公园、窦圉山和三锅山体的流动观测台阵数据分析，并结合解析分析和数值模拟的研究方法，对山体地形地震动影响作了系统研究，定性和定量的总结了山体地形地震动响应相关规律。以下是作者从局部地形几何形状，入射波的入射角度、频率，震源相对位置及震源深度等几个方面，对地形效应影响的因素及其规律进行的阐述和分析。

1 局部地形几何形状对地形效应的影响

通常认为，山顶、山脊会放大地震动，而沟谷会对地震动起降低作用。但在震害观测中发现地形放大效应遵循的规律相对复杂，因为真实地形起伏多变，地形对地震动放大效应也呈现非常复杂的模式。一般将典型地形分为“凸”、“凹”两种，通常用局部张角度来描述地形“凸”、“凹”程度。朱元清等（1991）采用有限元方法模拟复杂地质结构中的地震波传播，在SH波入射情况下，山脊及峡谷的倾角越大放大倍数越高，倾角为 40° 时，山顶处放大倍数是平面地表的2倍，山腰处为0.7倍，山脚处为0.8倍，峡谷边缘为1.4倍，谷底为0.7倍；而同样的条件下以P波入射，当倾角从 40° 减小到 20° 时，山顶处的放大倍数从25%减小到5%；Bouckovalas等（2005）对均一粘弹性土层状坡地地形效应的二维数值模拟研究发现，当采用SV波垂直入射，边坡高度/波长大于0.16，地表仰角大于 17° 时，边坡地形对水平和竖向地震动影响均显著，与水平场地相比放大系数分别为1.20—1.50和0.10—1.10；周红等（2010）采用谱元法建立二维SH波传播模型的研究表明，山体顶部地震动明显增大，且随着山体陡度增

加,放大倍数明显变大,地震动放大现象受局部的地表张角控制,只有小于 180° 的地表张角放大作用明显,而山谷谷底地表张角大于 180° ,对地震动强度起减弱作用;李英民等(2010)采用有限元数值分析法,对黏弹性岩质坡地地形竖向地震动反应谱特性研究表明,在白噪声输入下,坡角不变时,谱比最大值随着坡度的增加而逐渐增大;坡高不变时,谱比最大值随着坡角的增加而增大;梁建文等(2001;2002)对圆弧形凹陷地形表面覆盖层对入射平面P、SV的影响研究表明,凹陷地形的陡度、入射波角度和波长三者密切相关,决定了凹陷地形场地的动力特性;张季(2009)采用Wolf理论研究了层状弹性半空间中凸起地形对出平面地震波的放大作用,凸起地形高宽比对地面运动影响很大,随着高宽比的降低,地面各点位移幅值都有显著的降低,波动现象明显减弱。

2 地震波入射角度及频率对地形效应的影响

Boore(1973)从1971年San Fernando地震时Pacoima大坝的观测记录分析发现,地形对高频地震动的放大作用高达50%,而对低频地震动影响不大;同时,Davis等(1973)和Bard等(1985)对地震地面运动中的不规则地形的物理特性效应进行了理论研究,发现小山对与之频率相近的地震波有放大作用。此后,Celebi(1987)对复杂地形效应的理论进行了系统研究,得到的主要定性结论是:①地形放大发生在入射波长与地形坡宽近似相等时的坡顶处;②入射P波的地形放大效应低于入射S波的地形放大效应;③对P-SV波的地形放大效应比SH波的稍强;④地形放大效应随入射波的入射角度的增大而减小,但随三维山脊方位角的放大效应还不是很清楚;⑤地形放大效应随坡度比的增大而增大(坡度比是指坡高与坡宽的比值);⑥体波及面波的散射依赖于入射波的类型:对入射的波主要为水平传播的SH波,对入射的P波主要为Rayleigh波,对入射的SV波则为Rayleigh波及P波的混合;⑦当有相邻的山脊存在时,地形放大效应会有所增大。总体上来说,Celebi(1987)的研究发现,理论计算所得到的地形放大值要低于实际地震中观测到的地形放大值,这是由于除了地形效应外,场地自身的效应也起到一定的作用,很难将两种效应分开,这也是只考虑地形效应的理论分析结果比实际观测值小的原因。刘晶波(1996)用有限元结合修正的透射人工边界研究局部不规则地形对地面运动的影响,研究表明突出地形对Rayleigh波影响明显大于P波和SV波,且山顶影响比山脚影响较大。SV波山顶地面运动峰值放大低于1.3,而山顶与山脚地面运动的峰值比约为1.7。P波山顶地面运动峰值放大小于1.3,山顶与山脚地面运动峰值比一般低于1.5。Rayleigh波传播时,山顶与山脚地面运动的比值可以高达25。Nguyen等(2007)采用直接边界法研究复杂地形对SV波传播特性的影响,在低频输入下,山脊顶部、斜坡顶部和峡谷边缘对地震波放大作用显著,随着输入的激励频率增高,峡谷底部和山脊的山脚部位放大效应变大,但山脊顶部均放大,不受激励频率影响。荣棉水等(2007)利用显示有限元有限差分方法进行了实际地震动输入下的粘弹性场地地形的数值计算,研究表明:①入射角度的增大使坡地顶部的宽频放大的趋势减小,基本上是入射角度越大,宽频放大效应越小。当以 0° 入射时,放大频段为0—17Hz, 15° 入射放大频段为0—13Hz,大于 45° 入射就会使坡顶基本丧失放大效应;②对山脚下的点来说,入射角度越大,地形影响谱比值减小越明显;③平台顶部点的最大地形影响谱比一般出现在垂直入射的情况下,最大谱比不超过1.6;④对于坡地上的点,入射角度的增大压低了窄频带内放大的谱比;⑤入射角度的增大使各观测点地形影响谱比值减小,这不仅是平台顶部点所特有的规律,而且是所有观

测点的共性。当以 60° 入射时,各观测点谱比曲线十分相似。输入地震波的入射角是影响山谷放大效应的重要因素。垂直入射时,地表地震动绝对放大系数最大,随着入射角度的增加,地表地震动绝对放大系数逐步减小。 SV 波入射角度较小时,其竖向振动分量较小,所以引起的竖直响应也较小。但随着入射角度的增加,其引起的竖直响应有所增加。地震波垂直入射时引起的地表绝对放大系数均为最大,随着入射角度的增加,地表绝对放大系数逐步减小。

3 震源特性对地形效应的影响

地形效应不仅与地形本身的特征有关,也与震源的特性密切相关,因此应进一步考虑震源所处位置、震源频率对地形效应的影响。研究表明,当震源深度的加大,山体顶点上地表地震动最大值随着深度的增大,该比值变大。而当震源深度不变,震源位置横向的变化即震源到山体中心横向距离,在山体中心之下,放大比最大值大于1,而距离山体中心越远,比值越小,在山体之外放大比都小于1。这说明山体地形以外的震源不会引起地震动的增强,只有山体之下的震源或近垂直入射到山体上的地震波才会在山体地形上引起放大的地震动。而随着震源频率的变大对地震动的放大作用增强,当频率增加到一定程度,放大比值趋向饱和,放大比值稳定在4.58(周红等,2010)。

Lee等(2009)通过谱元法算法模拟三维地震波传播过程,分析了不同震源深度对地形效应的影响,分别取2km、15km和40km震源深度进行分析,15km和40km的PGA和PGV振幅基本相同,相较于山体形态和相邻地形,震源深度对地面运动的影响不显著。而当发生震源深度2km的浅源地震时,盆地内PGV的振幅反而有所降低,这主要是因为首先到达的地震波仅有部分转化为面波,当面波传入山脉群中,由于不规则地形而发生散射,从而降低了盆地内部地面运动,这表明复杂地形对地震波的散射作用是改变地震动强度的主要因素。Ma等(2007)研究了发震断层附近区域地表地形效应,通过模拟San Gabriel断层Mojave段的 M_w 7.5级地震发震过程,发现位于San Andreas断层北部和the Los Angeles盆地南部的the San Gabriel Mountains山脉对地震波的传播起了阻碍的作用:山脉地形对地表面波的散射作用使得盆地边缘的激励作用和盆地共振作用降低,特别是山脉对0.5Hz频率的速度振幅降低了50%,从而降低了洛杉矶市区的地表震动,山体对洛杉矶市起到了天然屏障的保护作用。

4 地震数值模拟在地形效应研究中的应用

地震动地形效应的计算应从求解地震动波场入手,由于地震波场计算的复杂性,仅能获得少数较规则地形的解析解,因此地震波场地计算多采取数值计算方法,主要包括有限差分法、有限元法、伪谱法和谱元法。

有限差分法是一种离散方法。其基本原理就是在解偏微分方程时用有限差分算子代替微分,将微分方程化为相关的线性代数方程,通过求解代数方程,得到偏微分方程的数值解。有限差分方法是最早被用于地震波传播数值模拟研究中的,能够成功的应用到非对称结构模型中,有效的实现了对横向不均匀性介质地球模型的地震波传播数值模拟。该方法算法简单,计算速度快,占用内存小,但只适应于相对简单的地质模型,对起伏地表自由边界的处理有困难。Tessmer等(1992;1994)将起伏地形模型通过坐标变换方法映射到新的水平地表的坐标下,在新的坐标系下进行波动方程的模拟,具体实施方法是在空间导数上,波场垂直方向

用Chebyshev变换计算,水平波场用Fourier变换处理,只在时间处理上用有限差分法。在国内,李小军等(1995)提出了适用于任何地形情况、且具有较高计算精度和技术稳定性的显式有限元有限差分法,很好的模拟了二维粘弹性场地地形对地震动的影响。荣棉水等(2009)用此方法很好的模拟了粘弹性浅圆弧形山谷地形对地震动的响应。

有限元法作为一种离散化的数值解法,它是基于网格插值和变分原理,较适合几何条件和物理条件复杂的问题。有限元法适宜于模拟任意地质构造,可以在任意三角形逼近地层界面,保证复杂地层形态模拟的逼真性。杨柏坡(1991)采用显示有限元法分析了二维不规则地形对地震波的放大作用;同时,刘晶波(1996)将有限元法和修正的透射人工边界相结合,分析了二维不规则地形对地震地面运动的影响,给出了P波、SV波垂直入射和Rayleigh波传播时地面运动的数值解;黄自萍等(2004)利用有限元和有限差分法结合的区域分裂法进行起伏地表地震波场模拟;王伟(2011)采用显示有限元法,分析了陡坎和山梁等典型地形的地震动响应。但有限元法也存在缺点:低阶有限元法对高频和短波长信号的模拟效果不好,需要提高网格分辨率来弥补,计算量大。采用高阶有限元法也会因Runge现象产生虚假波等偏差。

伪谱法用于解偏微分方程,是空间逼近微分的一种方法,利用快速傅里叶变换对波动方程进行空间求导,将波动方程在频率域或时间-波数域中求解,计算速度快,精度高。Takenaka等(2001)提出了不连续网格傅立叶伪谱多域法,并对弹性波进行了数值模拟;赵志新等(2003)改进了算法,提出了错格实数傅立叶伪谱法,并对非均匀介质地震波进行了数值模拟;魏星等(2010)还用伪谱法和有限差分混合的方法来模拟地震波场。但是伪谱法也有其缺点:基于全域计算的伪谱法,空间中某一点的值发生变化,就会改变频率域的所有值,因此在介质横向速度变化大的情况下就不能很好的模拟;伪谱法存在吉布斯效应,影响成像效果。

谱元法最初是Patera(1984)在流体力学计算中提出的,它融合了有限元方法和伪谱法的思想,兼具了有限元可以模拟任何复杂介质模型和伪谱法的精度。Maday等(1989)将Legendre正交多项式为基的Lagrange插值,采用Gauss-Lobatto-Legendre积分,这样形成对角的质量矩阵,在时间域采用显式的时间差分算法,减少对内存的需求,提高了计算效率;Dimitri等(2002)把Legendre谱元法应用于地震波模拟,使用Foutran90语言开发了谱元算法的地震波三维传播模拟SPECFEM3D软件包,主要用于模拟地震波的传播及震源的反演,其具有高度的开放性,用户可修改代码建立特定的计算模型和更新算法;Lee等(2009)采用谱元法模拟真实盆地及其附近的复杂地形区域的地震发震过程,分析了山脉和盆地地形对地表地震动的影响;同时,周红等(2010)采用谱元法建立二维SH波传播模型,研究不同地形、不同入射波条件下的地形效应地震动特性;徐慧等(2012)采用谱元法研究了汶川震区地震动三维地形效应,并将Microwulf高性能并行计算集群引入地震数值应用,解决了采用谱元法进行大区域模拟时计算机性能的制约问题。虽然Komatitsch等(1998)用谱元法模拟了起伏地表的二、三维地震波的传播规律,总结了正弦波规律起伏海底反射、透射规律,但这种方法在理论上还有待进一步完善。

5 结语

本文对地震动地形效应的影响因素及其规律进行阐述和分析。主要对局部地形几何形状,入射波的入射角度、频率,震源相对位置及震源深度等因素对地形效应影响的国内外研

究现状进行了综述。同时,介绍了目前常用的地震数值模拟方法:有限差分法、有限元法、伪谱法和谱元法的优势和不足。

目前,由于地震波数值模拟理论和计算机性能的限制,地形效应数值模拟多采取建立地形二维等效化模型进行计算,并未建立三维真实地形场地模型,模拟结果往往与实际有所偏差,因为真实地形起伏多变且相邻地形复杂,地形对地震动的放大效应也呈现非常复杂的模式。作者建议在研究时应进一步从以下几个方面进行考虑:

(1) 在研究地形效应中,应同时考虑场地地层结构的场地效应,如沉积型盆地的地形效应。地形地貌和场地地层结构对地震波的耦合作用,是准确研究场地效应的关键,单一考虑地形效应,会导致分析结果与实际场地情况偏差。

(2) 在数值模拟中,场地建模的可靠性和准确性直接影响数值模拟结果。因此,建议引入遥感地形数据,建立真实地形场地模型,同时,结合地震地质、钻孔、波速试验、地脉动等多方面的地层资料,实现对地层结构的精确建模。

(3) 由于地震发震是动态过程,应通过反演地震发生过程,从时间域分析地形对地震波传播的影响;同时,通过三维地震波传播模拟,获得三维空间的地震波场描述,从而实现地形地震动影响场的时、空分布模式的刻画。

参考文献

- 黄自萍,张铭,吴文青,董良国,2004.弹性波传播数值模拟的区域分裂法.地球物理学报,47(6):1094—1100.
- 刘晶波,1996.局部不规则地形对地震地面运动的影响.地震学报,18(2):239—245.
- 梁建文,严林隽, Lee Vincent W., 2001. 圆弧形凹陷地形表面覆盖层对入射平面 SV 波的影响. 地震学报, 24(6): 622—636.
- 梁建文,严林隽, Lee Vincent W., 2002. 圆弧形凹陷地形表面覆盖层对入射平面 P 波的影响. 固体力学学报, 23(4): 397—411.
- 李渝生,黄润秋,2009.5.12汶川大地震损毁城镇的震害效应与重建选址问题.岩石力学与工程学报,28(7):1370—1376.
- 李小军,廖振鹏,关慧敏,1995.粘弹性场地地形对地震动影响分析的显式有限元-有限差分方法.地震学报,17(3):362—369.
- 李英民,王丽萍,赵耀,2010.岩质坡地建筑设计水平地震动放大系数的确定.地震工程与工程振动,30(4):159—165.
- 荣棉水,李小军,2007.局部地形对出平面运动谱特性的影响分析.中国地震,23(2):147—156
- 荣棉水,李小军,吕悦军,尤红兵,2009.粘弹性浅圆弧形山谷地形对地震动谱特性的影响.地震研究,32(1):40—45.
- 首培然,刘曾武,朱镜清,2009.地震波在工程中的应用.北京:地震出版社.
- 唐晖,李小军,李亚琦,2012.自贡西山公园山脊地形场地效应分析.振动与冲击,31(8):74—79.
- 王海云,谢礼立,2010.自贡市西山公园地形对地震动的影响.地球物理学报,53(7):1631—1638.
- 王伟,2011.地震动的山体地形效应.哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 魏星,王彦宾,陈晓非,2010.模拟地震波场的伪谱和高阶有限差分混合方法.地震学报,32(4):392—400.
- 徐慧,刘新荣,胡元鑫,2012.基于谱元法与 Microwulf 系统的汶川地震波场模拟.地下空间与工程学报,8

- (2): 415—422.
- 杨宇, 李小军, 贺秋梅, 2011. 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟. 震灾防御技术, **6** (4): 436—447.
- 杨柏坡, 陈庆彬, 袁一凡, 1991. 地震小区划中复杂场地影响的修正方法. 地震工程与工程振动, **11** (4): 19—17.
- 张季, 2009. 弹性层状场地上凸起地形的出平面地震响应分析. 天津: 天津大学.
- 周红, 高孟潭, 俞言祥, 2010. SH 波地形效应特征的研究. 地球物理学进展, **25** (3): 775—782.
- 周正华, 张艳梅, 孙平善, 杨柏坡, 2003. 断层对震害影响的研究. 自然灾害学报, **2** (4): 20—24.
- 赵志新, 徐纪人, 堀内茂木, 2003. 错格实数傅立叶变换微分算子及其在非均匀介质波动传播研究中的应用. 地球物理学报, **46** (2): 234—240.
- 朱元清, 胡天跃, 郭自强, 1991. 地震波在粘弹介质中的传播及地形效应. 地震学报, **13** (4): 442—449.
- Bard P., Tucker B.E., 1985. Underground and ridge site effects: a comparison of observation and theory. BSSA, **75** (4): 905—922.
- Boore D.M., 1973. The effect of simple topography on seismic waves: implications for accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California. BSSA, **63** (5): 1603—1609.
- Bouckovalas G.D., Papadimitriou A.G., 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **25** (7-10): 547—558.
- Celebi M., 1987. Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake. BSSA, **77** (4): 1147—1167.
- Davis L.L., West L.R., 1973. Observed effects of topography on ground motion. BSSA, **63** (1): 283—298.
- Dimitri Komatitsch, Jeroen Tromp, 2002. Spectral-element simulation of global seismic wave propagation —I. Validation, **149**(2):390—412.
- Komatitsch D., Vilotte J., 1998. The spectral element method: An efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. Bulletin of the Seismological Society America, **88**(2):368—392.
- Lee S., Komatitsch D., Huang B., 2009. Effects of topography on seismic-wave propagation: an example from northern Taiwan. BSSA, **99** (1): 314—325.
- Ma S., Archuleta R.J., Page M.T., 2007. Effects of large-scale surface topography on ground motions, as demonstrated by a study of the San Gabriel Mountains, Los Angeles, California. BSSA, **97** (6): 2066—2079.
- Maday Y., Patera A.T., 1989. Spectral Element Method for the Incompressible Navier-stokes Equation. York: ASME, 71—143.
- Nguyen K.V., Gatmiri B., 2007. Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **27** (2): 183—188.
- Paera A.T., 1984. A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion. Journal of Computational Acoustics, **2** (4): 371—422.
- Tessmer E., Kosloff D., 1994. 3D elastic modeling with surface topography by Chebychev spectral method. Geophysics, **59** (3): 464—473.
- Tessmer E., Kessler D., Kosloff D., 1992. Multi-domain Chebyshev-Fourier method for the solution of the equations of motion of dynamic elasticity. Journal of Computational Physics, **100** (2): 355—362.
- Takenaka H., Yanbin Wang, 2001. A multidomain approach of the Fourier pseudo spectral method using

discontinuous grid for elastic wave modeling. *Earth Planets Space*, **53** (3): 149—158.

A Review of the Effect of Small-Scale Surface Topography on Ground Motions

Guo Mingzhu, Zhao Fang and Zhao Fengxian

(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A brief review of experimental and theoretical results about the effect of topography on ground motions, which include local terrain geometry, incident angle and frequency of incident wave and focal location and depth, is given in this paper. Meanwhile, we introduce the situation and application of the seismic numerical simulation of topographic effect on ground motion, and some suggestions are proposed for the further study.

Key words: Topographic effect; Local terrain geometry; Focal mechanism; Seismic simulation