

张家明、徐则民、田林等, 2012, 局部地形下入射波散射效应对地震动影响解析研究进展, 中国地震, 28 (3), 231 ~ 244.

· 研究综述 ·

局部地形下入射波散射效应对地震动影响解析研究进展

张家明 徐则民 田林 裴银鸽

昆明理工大学建筑工程学院土木工程系, 昆明市呈贡大学城 650500

摘要 局部地形条件对地震动放大有显著影响, 解析法和数值法均可研究该问题, 而解析法可以分析问题的物理本质和检验数值法的精度。将局部地形分为无盖层凹陷地形、有盖层凹陷地形(沉积谷地)、凸起地形和复合地形; 分别综述了国内外关于各种局部地形对地震动影响的解析研究成果。从以下 4 个方面分析和讨论当前研究成果: ①研究方法; ②计算介质模型; ③各局部地形研究水平的不均衡; ④研究存在不足之处。提出了未来发展方向: 未来该领域应加强研究局部地形对 Rayleigh 波地震动响应规律, 开展局部地形对多种波耦合入射下的地震动响应规律的研究, 运用非线性波动理论研究局部地形对地震动的影响和开展三维非线性地震动数值模拟研究。

关键词: 局部地形 地震动 解析解 研究方法 计算模型 非线性波动理论

[文章编号] 1001-4683 (2012) 03-0231-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

20 世纪中期以来, 随着全球人口的不断增加, 人类活动的空间范围逐渐由平原向丘陵、山区扩展(张倬元等, 1994)。近几十年来, 地下结构在城市建设、交通运输、国防工程、水利工程等各个领域都得到了越来越广泛的应用(钱七虎, 1999)。可见, 人类工程活动场所向着局部更复杂地形区拓展是当前社会经济活动发展的一种趋势。场地条件对地震动放大有着显著的影响, 局部场地条件的放大效应致使最近一些地震事件(1967 年 Caracas、1985 年 Mexico city、1989 年 Loma Prieta、1994 年 Northridge、1995 年 Kobe 和 1999 年台湾集集地震)的破坏性非常严重(Chang et al, 2005)。地震监测数据也说明局部地形对地震动有重要影响(Louis et al, 1988)。因此, 局部场地效应是影响结构抗震设计的重要因素(Chang et al, 2005)。

[收稿日期] 2011-10-01

[项目类别] 国家自然科学基金-云南联合资金重点项目(U1033601)、国家自然科学基金面上项目(40272119)共同资助

[作者简介] 张家明, 男, 1984 年生, 博士研究生, 从事复杂地质环境场地地震动数值模拟研究。

E-mail: zjm_engeo@163.com, zjm081010@163.com

徐则民(通讯作者), 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程和工程地质研究。

E-mail: abc5100@188.com

研究入射波在局部地形或场地的散射效应所引起的地面运动规律,即合理地评价局部地形对地面运动的影响,是工程地震学中颇为引人注目的重要研究课题之一。该问题的研究主要借助于数值法和解析法。原则上讲,数值法可用于各种复杂的场地,但解析法可以定量或定性地分析问题的本质和物理机制,有着数值法无可替代的作用,而且解析法还可以用来检验数值法的精度和收敛性。本文根据局部地形对入射波散射效应引起地震动响应的解析解研究成果,将局部地形分为无盖层凹陷、有盖层凹陷(沉积谷地)、凸起和复合等4类,分析和讨论了其研究成果、当前研究水平和存在不足之处及未来的发展方向等。

1 凹陷地形

凹陷地形是实际工程中常见到的重要场地之一。其中无盖层凹陷地形,即山谷(Canyon),是桥梁动力响应计算经常遇到的局部地形,并常将山谷简化为半圆凹陷地形。有盖层凹陷地形,即沉积谷地(Alluvial Valley),是在我国经济较发达的华北平原、长江三角洲以及珠江三角洲等地区尤为常见的局部地形。研究沉积谷地因对入射波散射效应引起的地震动响应,对该地区土-结构相互作用波动问题研究具有重要意义。

1.1 无盖层凹陷地形

研究无盖层凹陷地形对弹性波的散射问题,对于确定长大桥梁、大坝的地震动输入和研究凹陷地形中地基、结构抗震设计具有重要意义。

关于无盖层凹陷地形对平面SH波散射问题的解析解,Trifunac(1972)最早应用波函数Fourier-Bessel展开法研究半圆凹陷地形;Wong等(1974a)使用波函数的Mathieu级数展开法研究半椭圆凹陷地形;Liu等(1991)采用复变函数和保角映射法分析任意形状凹陷地形;Yuan等(1994)采用波函数展开法给出圆弧凹陷地形散射的精确级数解;刘殿魁等(1996)利用曲线坐标法研究凹陷地形散射的边值问题。他们主要分析了入射频率和入射角度对地面运动的影响。杨彩红(2009a)利用波函数展开法和Graf加法公式,求解不同深宽比圆弧凹陷地形二维散射问题。以上这些研究都是假设半空间为均匀、各向同性、线弹性的。刘殿魁等(1990)还采用复变函数法研究了各向异性半空间中凹陷地形散射问题。以上研究表明:随着入射频率增大,散射波之间的干涉效应增强,地表位移幅值曲线出现越来越多的波峰点和波谷点;平面SH波斜入射或水平入射时,凹陷地形对入射波有屏蔽效应,在凹陷的迎波面(与震源同侧),地表位移空间变化剧烈且幅值较高,而在凹陷的背波面(与震源异侧),地表位移空间变化相对平缓,凹陷地形的屏蔽效应随着入射频率增加而加剧。

关于无盖层凹陷地形对平面P波散射问题的解析解, Lee(1984)利用波函数的Fourier-Bessel展开法求解半球形凹陷地形三维散射问题;Gao等(1990)和杨彩红(2009b)利用波函数展开法求解圆弧凹陷地形二维散射问题;李伟华(2007)利用波函数展开法,在频域内给出了圆弧形充水(模拟成无粘性、可压缩性流体)河谷散射解析解。这些研究都假设半空间为均匀、各向同性和完全弹性介质。将半空间假设为两相饱和和多孔介质。李伟华等(2003a)和董俊等(2005a)基于Biot饱和多孔介质动力学理论,利用波函数的Fourier-Bessel展开法分别研究二维圆弧凹陷地形、三维半球形凹陷地形散射效应;巴振宁等(2010a)给出平面P波在饱和半空间中凹陷地形周围散射的解析解。综合以上研究成果可得出以下定性结论:入射频率增大,地表位移空间分布复杂程度增大,尤其是在凹陷边界处垂直入射时,

水平位移普遍较低,凹陷地形区基本为零,而竖直方向位移较大。倾斜入射时,与 SH 波一样存在凹陷地形屏蔽效应,水平入射时屏蔽效应最强。饱和介质三维凹陷地形放大效应与二维基本一致,但强于单相三维介质。边界渗透条件对地表位移的影响随孔隙率增加而变得显著,随泊松比减小而增大。孔隙率对地面运动的影响随着入射频率的升高而增大。随着泊松比的增大,水平位移幅值逐渐减小,竖向位移幅值则逐渐增大,泊松比的影响随着入射频率的升高而增大。

关于无盖层凹陷地形对平面 SV 波散射问题的解析解, Lee (1989) 和钟慧等 (2010) 采用波函数 Fourier-Bessel 展开法研究二维凹陷地形的散射问题,他们的研究假定了半空间为均匀、各向同性和完全弹性。假设半空间为两相饱和多孔介质, Li 等 (2005a)、董俊等 (2005b) 和 Liang 等 (2006) 基于 Biot 饱和多孔介质动力学理论,利用波函数的 Fourier-Bessel 展开法分别研究二维浅圆弧峡谷、三维半球形凹陷地形和二维圆弧形凹陷地形散射问题。综合目前既有研究成果,可以得出以下定性结论:随着入射角度(趋势水平入射)和入射频率增大,位移幅值和空间分布复杂度增大;泊松比增大使地表位移幅值增大;固体骨架硬度增大导致地表位移幅值减小。

关于无盖层凹陷地形对平面 Rayleigh 波散射问题的解析解, Todorovska 等 (1996) 和梁建文等 (2005) 采用波函数展开法研究了浅圆凹陷地形散射频域解析解,但后者研究的入射频率高达 5.0。综合以上研究成果得出如下结论:随着入射频率升高,凹陷地形表面位移幅值逐渐减小。凹陷地形表面位移幅值整体较小,且随凹陷地形深度增加而减小。由于凹陷地形的屏障作用,在入射波近端,地表位移分布变得复杂。地表位移峰值出现在左角点附近,在入射波远端,地表位移分布相对简单。

1.2 有盖层凹陷地形

有盖层凹陷地形,即是指沉积谷地(盆地)。大量强震观测数据和震害调查资料表明,沉积谷地(盆地)显著地影响着地震地面运动的特征,其地震波散射问题的研究一直是地球物理学、地震学与工程地震学等学科领域重要的研究课题之一。

关于沉积谷地对 SH 波散射问题的解析解, Trifunac (1971) 最早利用波函数的 Fourier-Bessel 级数展开法研究了半圆形沉积谷地; Wong 等 (1974b) 利用波函数的 Mathieu 级数展开法研究半椭圆形谷地; Todorovska 等 (1991) 给出浅圆弧形谷地散射的近似解析解; Yuan 等 (1995) 提出沉积谷地散射的闭合 (Closed-form) 形式的级数解,避免了大圆弧假定的引用; Manogian 等 (1999) 和张郁山 (2010a) 分别采用加权参数法 (Weighted residual method) 和波函数展开法研究沉积盆地散射效应; 袁晓铭等 (2002) 通过圆弧状沉积盆地与同样参数的软土均匀覆盖层对比,研究沉积盆地二维散射问题; 梁建文等 (2000) 采用 Fourier-Bessel 级数展开法在频域内给出圆弧形层状(两层)沉积河谷场地散射解析解。杨彩红等 (2006) 利用波函数展开法给出含有多个沉积层凹陷地形二维散射解答。以上这些研究都是假定半空间为弹性、均匀和各向同性的。除梁建文等 (2000) 的研究以外,其他计算模型都假定沉积层为弹性、均匀和各向同性。综合以上研究结果可以得出以下定性结论:对于沉积层为单一弹性介质时, SH 波垂直入射,地面位移相对于中心呈对称分布; SH 波斜入射时,大部分频段内迎波面位移幅值高于背波面;随着入射频率增大,地表位移增大且空间分布变得复杂;对于沉积层为层状弹性介质,低频($\eta = 0.5$, η 为入射频率)入射时整体呈现消弱放大现象,

而高频($\eta = 2.0$)入射时有消弱和增强放大现象;软弱夹层在波垂直入射时具有很强的屏蔽作用,尤其是在高频入射时;沉积层不同的排列次序将导致层状凹陷地形卓越频率显著改变,某层排列次序有可能致使地面运动放大;沉积层刚度、厚度以及凹陷地形的深宽比等均影响多层凹陷地形的卓越频率。

关于沉积谷地对P波散射问题的解析解,研究对象有单一圆弧形沉积谷地(梁建文等,2010a)、层状(2层)(梁建文等,2001b、2002)和多层圆弧沉积层谷地(张郁山,2008)、饱和土沉积层圆弧形沉积河谷地(李伟华等,2003b;Li et al,2005b)和三维圆弧形沉积谷地(梁建文等,2010a),研究方法都是波函数展开法,都假定半空间为均匀、各向同性、完全弹性介质。综合以上研究成果可以得出以下定性结论:随着入射频率增大,沉积河谷位移和空间分布复杂程度增大。入射角度增大(趋于水平入射),竖直方向位移减小,水平方向位移增大。在较高频率下,较浅河谷对入射波放大作用增大。边界透水情况、饱和度和孔隙率对饱和土圆弧沉积河谷对P波放大作用有显著影响。孔隙率减小,地表位移幅值总体增大。当低频($\eta = 0.5$)入射时,层状沉积表现出一种放大作用;中频($\eta = 1.0$)入射时,层状沉积在斜入射时水平位移幅值较大,单一沉积在垂直入射时最大;在高频($\eta = 2.0$)入射时,正常沉积表现出较大的放大作用,而非正常沉积表现很大的屏蔽作用,单一沉积处于两者之间。沉积层中刚度较低的软弱夹层可能有较大的放大作用,非正常顺序沉积不一定表现出屏蔽作用。多层沉积河谷在高频波入射下,散射波表现出显著的干涉和能量聚集现象。三维沉积谷地地表位移分布比二维复杂,且随入射频率增高而变得更复杂。

关于沉积谷地对SV波散射问题的解析解,研究对象也有单一圆弧形沉积谷地(梁建文等,2003a)、层状(2层)(梁建文等,2003b)和多层圆弧沉积层谷地(张郁山,2009)、饱和土(Biot动力学理论模拟)沉积层圆弧形沉积河谷地(李伟华等,2004)和三维圆弧形沉积谷地(梁建文等,2009b)等,研究方法都是波函数展开法,也都假定半空间为均匀、各向同性、完全弹性介质。综合以上研究可以得出以下定性结论:随着入射波频率增大,各种地质模型表面位移幅值和空间分布复杂度增大,尤其是多层圆弧沉积谷地。对于单一圆弧形沉积谷地,当波斜入射和水平入射时,入射波同侧河谷位移分布比异侧复杂;斜入射时,与入射波同侧位置点的水平和竖向位移均小于异侧;当接近水平入射时,两侧竖向位移相当。对于高频入射波,软弱夹层可能对入射波有很强的放大作用,使得位移峰值出现在沉积交界附近;多数情况下层状沉积情况比单一沉积位移幅值大,层状沉积表现出放大作用,且随着入射频率增大而越显著;入射角度对三维沉积模型地表位移的影响比二维复杂。

关于沉积谷地对Rayleigh波散射问题的解析解,研究对象有浅圆和半圆形沉积谷地(梁建文等,2006a)、饱和土圆弧形沉积谷地(王磊等,2007)、半球形沉积谷地(韩铮等,2007)、饱和土半球形沉积谷地(赵成刚等,2007a)、层状(2层)饱和沉积谷地(赵成刚等,2007b)、三维圆弧沉积谷地(梁建文等,2009a)和多层圆弧形沉积谷地(张郁山,2010b)等,且都假定半空间为均匀、各向同性和完全弹性。综合以上研究成果可得出以下一些定性结论:随着入射波频率增大,各种地质模型表面位移幅值和空间分布复杂度增大;沉积谷地对入射波有较强的放大作用,使地表位移幅值空间分布变得复杂;孔隙比增加,介质变软,沉积谷地运动越复杂,位移放大系数越大;软弱夹层的存在使地表位移幅值增大,而刚度变小、厚度增加会致使位移幅值更大;把沉积谷地模拟成两相饱和和多孔介质的情况下的位移放大效应比单相介质

显著;层状沉积层对 Rayleigh 波的散射作用是不可忽视的;入射角度对三维沉积谷地地表位移的影响比二维情况复杂;Rayleigh 入射到沉积谷场地中,其位移散射放大系数要大于 P 波与 SV 波的放大系数,并且波型变得更加复杂。

2 凸起地形

随着人类的工程活动规模和范围不断扩大,凸起山包地形区已成为人类工程活动的重要场地,提高凸起地形对地震动影响的研究水平对地基础、结构抗震、抗爆等研究等具有重要意义。

关于凸起地形对平面 SH 波散射效应的解析解研究,Yuan 等(1992)采用波函数展开法分别研究了半圆形凸起地形和圆弧凸起地形(Yuan et al,1996;袁晓铭等,1996)。崔志刚等(1998)和胡静(2002)采用契合的方法分别研究了圆弧凸起地形和半圆形凸起地形。曹欣荣等(2001)采用复变函数和保角映射方法研究圆弧凸起地形和半椭圆凸起地形的散射效应。Lee 等(2006)利用波函数展开法和辅助函数功能给出半圆形凸起地形对 SH 波散射的高精度闭合解。其他凸起地形有柔性基础上楔形体(Todorovska et al,2001),半圆凸起地形中有半圆同心管道的地形(Lee et al,2004)及三角形凸起地形(Hayir et al,2001;Qin et al,2005),但 Hayir 等(2001)当时的算法存在错误,而 Qin 等(2005)给出了正确的解析解,但他们都是采用的波函数展开法。以上这些研究都是假定半空间为均匀、各向同性和完全弹性介质,且凸起地形介质与半空间一致。李雨润等(2005a)利用分区思想和辅助函数方法,利用波函数展开技术,给出水平地表圆弧非匀质隆起出平面动力响应的闭合级数解答,并根据闭合解讨论凸起地形运动特征(李雨润等,2005b)。综合以上研究成果可以得出以下定性结论:入射波频率增大,地表位移幅值变化加剧。随着半圆形、圆弧形凸起地形高宽比增加,位移幅值增大,波动现象显著增强。而对半椭圆凸起地形,在低频($\eta = 0.5$)入射下,则表现出相反的现象。SH 波垂直入射且 $\eta \leq 1.0$,山顶处出现最大水平位移。软弱隆起地表位移较均匀隆起情况有显著放大,而硬质隆起则减弱地表运动,但最大反应出现的位置和频段主要受入射角度控制。当波垂直入射时,地表位移放大出现在隆起顶部,频段随隆起区变弱明显向低频移动。当波掠入射时,地表最大位移出现在隆起后表面,呈现在较高频段内。

对凸起地形对平面 P 波散射效应的解析解研究,Liang 等(2005)采用波函数展开法研究了半圆凸起地形。分析认为,凸起地形最大竖直位移出现在 P 波垂直入射的情况下,斜入射时半空间出现最大水平位移。

梁建文等(2006b)采用波函数展开法研究了半圆凸起地形对 SV 波的散射效应。其研究表明,随着入射频率升高($\eta = 0 \sim 3$),最大地表位移和位移空间复杂度逐渐增大;低频入射时,地表水平位移最大值位于半空间,高频入射时,位移峰值出现在凸起地形表面;地表竖向位移峰值出现在斜入射情况下,出现位置受入射频率控制。

3 复合地形

在我国,随着城市化水平的快速发展,城市人口、城市规模和生态环境面临着巨大的压力,而地下空间的开发和利用正是缓解各种压力的直接而有效的途径。在 21 世纪,地下结构、地下空间工程建设将得到更大程度的发展。但种种事实表明,地下结构在强震作用下可

能会出现严重的震害以及次生灾害,因此对地下结构的抗震问题应给予高度重视(刘晶波等,2007)。研究复合地形对地震动的影响将有利促进地下结构抗震研究。

根据既有研究成果,将复合地形的组合模式分为以下几种:多个(两个)无盖层凹陷地形组合(刘殿魁等,1993;许贻燕等,1992)、多个(两个)凸起地形组合(杜永军等,2009a、2009b)、无盖层凹陷地形与凸起地形组合(吕晓棠等,2006;刘殿魁等,2007a、2007b;韩峰等,2011;杨在林等,2010、2011;Nazaret et al,2003)、凸起地形与隐蔽地形(即浅埋圆孔、圆形弹性夹杂等)组合(梁建文等,2004;刘殿魁等,2006a、2006b、2007b;刘刚等,2006、2007a、2007b;杜永军等,2005;高相斌等,2005;吕晓棠等,2009)、无盖层凹陷地形与隐蔽地形组合(Lee et al,1995、1999;Wang et al,2002)及带圆孔凸起地形与隐蔽地形组合(李彤等,2003;李敏等,2005、2008a、2008b)以及沉积谷地与隐蔽地形组合(王慧文等,2006)等。以上研究都是针对 SH 波散射和地震动问题,研究方法主要采用复变函数和移动坐标的方法,波函数展开法也有被采用。

综合上述研究成果,可以得出如下一些定性结论:两个凹陷地形的中心距离大于凹陷地形半径的 300~400 倍时即可消除它们之间的相互作用;在低频状态下,凹陷地形对凸起地形表面位移幅值影响较大,且随着凸起地形半径与凹陷半径之比增大而增大;随着入射波频率增大,复合地形地表位移由静力学特征逐渐显示振荡的动力学特征;当 SH 波垂直入射时,在低频段,浅埋圆孔对位移有放大作用,在高频时有明显减震作用,且减震作用随浅埋圆孔半圆与半圆凸起地形半径之比增大而越显著,水平入射时,孔洞具有放大作用;浅埋圆孔间距与凸起半径比值大于 50(垂直入射时)或 150(水平入射时)后,圆孔之间的影响基本消失;在高频垂直入射时,弹性夹杂越软对凸起地形位移放大作用越明显,在低频垂直或水平入射时,弹性夹杂越软对位移放大效应越强烈;随着弹性夹杂的埋深增加,凸起地形顶点位移呈周期性变化。

4 问题分析和讨论

截止目前,国内外地震学家,尤其是我国地震学家对局部地形对入射波散射效应和地震动影响研究取得了丰富成果。但受数学手段、复杂介质波动问题复杂性的限制,与当前面临的实际地震波动问题相比,该领域的研究与实际情况还存在一定差距。

4.1 研究方法

各种局部地形计算模型边界条件存在差异,用于构建数学模型的数学方法受到不同程度地局限,因此,应采用不同研究方法研究不同局部地形。无盖层凹陷地形研究方法主要有波函数的 Fourier-Bessel 展开法、波函数的 Mathieu 级数展开法、复变函数和保角映射法、曲线坐标法、波函数展开法与 Graf 加法公式等。沉积谷地的研究方法有波函数的 Fourier-Bessel 展开法、波函数的 Mathieu 级数展开法、加权参数法、波函数展开法和 Graf 加法公式等。凸起地形研究方法主要是采用“分区、契合”的思路,采用波函数展开法、复变函数和保角映射法等。复合地形研究方法主要采用“先分区、再契合”的思路,再利用复变函数和移动坐标的方法,将问题转化为求解一组无穷代数方程组的系数问题,并采用 Fourier 变换截断有限项对其求解,波函数展开法亦有被采用。

对于无盖层凹陷地形、沉积谷地和凸起地形,为在求解散射波场之前方便地引入地表零

应力边界条件,会用一个半径非常大的圆弧近似模拟水平地表(张郁山,2008),即大圆弧假设(Large circle assumption),既有研究成果绝大部分是在该假设基础上得出的。引入该假设会产生两个影响计算精度的因素:一是由于特殊函数和求解技术的限制,模拟半空间地表的大圆弧半径不能取得足够大,这给计算带来一定的误差,得出的结果都是近似解析解(Yuan et al,1994);二是利用大半径圆弧近似模拟水平地表,将散射波函数展开成 Fourier-Bessel 级数的形式,引入边界条件后,散射波函数中的待定系数需通过求解线性方程组确定(Yuan et al,1994;Lee,1984;Todorovska et al,1991)。在求解各个待定系数时,需要将无限维的线性方程组转化为有限维的线性方程组来计算,即截取 Fourier-Bessel 级数中的有限项来进行计算,这就涉及到一个计算精度与计算项数的选取问题。若计算项数增大,贝塞尔的函数值急剧下降,而计算机本身又存在着精度问题,从而会导致方程组的系数矩阵奇异使计算溢出,因此入射波最大频率要限制在一个较低的范围之内(梁建文等,2000)。为了尽可能提高解析解精度,研究者做了很多的努力。Yuan 等(1995)首先构造满足地表零应力边界条件的散射波级数表达式,然后利用外域型 Graf 加法公式将 SH 波散射问题简化为一无穷维数方程组的求解问题,避免大圆弧假设的引入,但这种改进避免不了线性方程组的求解。杨彩红(2009b)和钟慧等(2010)依然采用大半径圆弧近似模拟水平地表,但在确定散射波待定系数时,利用柱函数的渐进性质,避免了对线性方程组的求解及高频波入射下相应的数值计算问题,拓宽了频域范围内的解析解。杨彩红(2009a)和张郁山(2010a)沿用 Yuan 等(1995)的求解思路,通过选择不同的求解坐标系,同时避免了大圆弧假设的引用和线性方程组的求解,散射波函数的待定系数具有明确的解析表达式,扩展了频带范围。

Rayleigh 波随深度而衰减,须借助 Fourier 级数展开来引用边界条件,但受求解技术的限制,Fourier 级数展开点非常少,如 Todorovska 等(1996)展开的 Fourier 级数有 8 个点。梁建文等(2005)基于 Todorovska 等(1996)和梁建文等(2004)的研究方法,取大圆弧半径为地表凹陷圆弧半径的 105 倍,展开的 Fourier 级数点数为 40 个,拓宽了解析解的适用频段($\eta = 0 \sim 5.0$),为讨论 Rayleigh 波时域地震响应的计算分析进一步奠定基础。

4.2 计算介质模型

计算介质模型的演进显然会受到求解技术水平的制约。到目前为止,无盖层凹陷地形的计算介质模型主要有:单相(均匀、各向同性、完全弹性)单一凹陷二维、各向异性单一凹陷二维、两相单一凹陷二维和三维模型等。沉积谷地的计算介质模型主要有:单相单一沉积二维和三维、单相多层沉积二维、两相多层沉积二维、两相单一沉积二维和三维模型等。凸起地形的计算介质模型除有非均质隆起模型外,其他均为单相凸起二维模型。沉积谷地和凸起地形计算介质模型的半空间都假设为均匀、各向同性、完全弹性体。复合地形的计算介质模型除假设为各向异性介质(刘殿魁等,1993)外,其他均假设为均匀、各向同性、完全弹性介质,且都是二维模型。

从以上分析来看,随着计算模型的形状逐渐复杂,计算介质模型则逐渐简单。在漫长的地质作用过程中,实际地质模式是非常复杂的。就当前波动理论研究水平来看,研究局部地形对入射波的散射效应和地震动问题时对地质模型要求不能过于苛刻,但明了当前计算介质模型研究的不足对以后的发展是有意义的。目前大多数解析解都是针对均匀弹性体中的弹性波而言,实际上,地震波从震源通过各种传播途径到达地面,地壳上部的连续固体骨架

中包含着相互连通的孔隙和槽路,当其中充满液体时,可被视为两相饱和介质,与均匀介质相比,两相饱和多孔介质的波动问题要复杂得多(董俊等,2005a)。Biot(1956)首次系统提出饱和多孔隙流体(即双相介质)的弹性波传播理论——Biot饱和多孔介质动力学理论,该理论被用于模拟局部地形的饱和介质。Biot介质及其波动方程参数多且复杂,目前远未认识清楚(牛滨华等,2004)。而且Biot理论对介质有很多假设(姚姚,2006),如流体的流动属于Poiseuille类型,并满足广义达西定律,这个假设决定Biot理论仅能适用于低频波入射情况,很难解释弹性波高频散和强衰减以及黏弹性行为。研究局部地形孔隙介质对地震动的影响始终是需要重点关注并致力于解决的问题,或许我们应该借助量子力学多次散射理论研究散射效应的做法来研究该领域的问题。

饱和和沉积介质一般是层状的,而目前用Biot理论模拟的饱和介质都是单一的,而对饱和层状沉积的研究尚未见报道。模型维度主要集中在二维,既有研究表明,分析局部地形对地震动影响时,应考虑三维效应,否则可能低估地形对地震动的影响(赵成刚等,1993;刘洪兵等,1999)。

4.3 各局部地形的研究水平并不均衡

从局部地形方面来看,无盖层凹陷是研究最早也是研究最丰富的,其次是沉积谷地。凸起地形和复合地形研究相比较薄弱。凸起地形是复合地形研究的瓶颈,且少有学者分析复合地形对入射波散射解析解的精度,仅梁建文等(2004,2010b)做了这方面的工作。对于复合地形,当分析过程中出现公共边界与圆孔边界相切或重叠现象时,目前的解析解尚都不能计算。凸起地形对入射波的散射效应较其他地形复杂,严格的理论分析也很困难。采用经典的波函数展开法求解凸起地形问题,由于物理上的原因,必须采用“先分区、再契合”的思想。这样就会涉及到混合边值问题的求解,给出此问题的级数解就变得更困难,这就限制了凸起地形对入射波散射和地震动的研究。

从入射波的种类来看,研究最充分的是SH波,其次是P波和SV波,Rayleigh波研究最少。所有局部地形都有针对SH波影响的研究,且复合地形仅讨论了对SH波的作用。迄今为止,凸起地形或复合地形对Rayleigh波的散射效应和地震动问题的研究尚未见报道。究其原因,SH波是一种标量波,在遇到边界或阻碍时不会像P波或SV波一样产生波型转化,而P波和SV波是矢量波,在界面上会出现波型转化导致边界条件耦合,使问题求解变得更加复杂。

4.4 研究存在的不足之处

(1)所研究的入射频率普遍较低,限制了入射波时域地震响应计算分析。目前大多数研究的入射波无量纲频率 η 在0~2之间,随着近来求解技术的发展,研究的频域范围逐渐扩展。但仅少数研究频段范围在 $\eta=0\sim 3$ 、 $\eta=0\sim 5$ 、 $\eta=0\sim 10$ 、 $\eta=0\sim 20$ 、 $\eta=0\sim 30$ 和 $\eta=0\sim 50$ 之间。目前所有的研究都是在频域内讨论,但研究非线性影响,时间域分析又是必要的,同时也是更复杂的。

(2)研究采用大圆弧假设,多数解析解都是近似真实解。对于无盖层凹陷地形,既有大圆弧半径最小值为 $R=10^2b$ (b 为凹陷地形半径),最大值为 $R=10^7b$ (杨彩红,2009b);对于沉积谷地,多数大圆弧半径 $R=10^2b$ (b 为谷地圆弧边界半径),最大值为 $R=10^5b$ (梁建文等,2006a);研究凸起地形的地震动响应时,大圆弧半径通常取 $R=10^6b$ (b 为凸起地形半

径) (Liang et al, 2005; 梁建文等, 2006b)。虽然大圆弧半径取得越大, 越接近于真实解, 但最近几年波动问题求解技术已经得到发展, 对于理论研究应尽量消除误差, 此外, 研究真实解有可能发现新的波动行为, 使研究内容更丰富。

(3) 忽略时间因子和阻尼项。大多数研究都忽略势函数的时间因子 $\exp(-i\omega t)$, 仅考虑稳态情况。在模拟半空间时, 多数略去阻尼项的影响。而数值计算表明 (梁建文等, 2007), 由于阻尼的作用, 无论是层状半空间还是均匀半空间, 随着入射频率的逐渐升高, 沉积附近地表位移幅值整体均逐渐减小, 且将逐渐衰减至零。这与无阻尼均匀半空间中沉积谷地有着本质区别。

(4) 该领域的研究成果对工程抗震设计和研究指导较少。地震工程师要积极参与该领域的研究, 充分利用地震学家既有的研究成果指导工程抗震设计和研究。

综上所述, 尽管目前解析解研究存在以上不足, 但解析法研究在理论层面上有以下诸多优势: 一是解析法是从问题的物理本质角度来剖析和解决问题的, 比数值法更有物理意义、概念更清晰; 二是解析法的结果可以作为一种特定情况下的精确解来校验数值法在此时的正确性和适用性; 三是波动方程的解析解表达式往往可以推广到任意边界的情况。

5 未来发展方向

未来局部地形对入射波的响应研究, 除要解决上面提出的研究不足之处外, 当前非线性波动理论的发展还要求用非线性波动理论来研究这一重要课题。

5.1 加强局部地形对 Rayleigh 波地震动影响研究

面波是一种简单、快捷、低成本的探测浅层横波波速的方法。其传播方向与地球表面平行, 地表起伏对面波的波形、频率特征以及传播能量等产生非常重要的影响 (周红等, 2007), 且面波 (Rayleigh 波和 Love 波) 是引起地表破坏的主要因素。目前关于局部地形对 Rayleigh 波的散射效应和地震动研究相对较少, 应加强这方面的研究。

5.2 开展局部地形对多种波耦合入射时的地震动响应规律研究

到目前为止, 所有的研究都是分开讨论某一种局部地形对某一种入射波 (SH、P、SV、Rayleigh 波) 的散射效应引起地震动的规律, 且同一局部地形对不同入射波的地震动响应机理不同。例如, 多层沉积凹陷地形中的软弱夹层在 SH 波入射时既有放大作用, 也有消弱作用, 而对 P 波仅具放大作用; 沉积谷地中的软弱夹层对 SH、P、SV 波既有放大作用也有屏蔽作用, 对 Rayleigh 波仅有放大作用。

实际地震过程中, 某一局部地形是同时受到多种地震波影响的, 而且入射角度、入射频率和入射方向等因素对各种入射波的影响在定性或定量上都存在不同, 不能用叠加原理来分析。因此, 根据既有解析解研究成果, 如何评定和分析实际地震时局部地形对地震动的影响还是一个难题。从这个问题来看, 开展局部地形对多种波耦合入射的地震动响应规律的研究是必须的, 对场地地震安全性评价和场地地震动输入研究是有意义的, 但这也是非常复杂的研究课题。

5.3 运用非线性波动理论研究局部地形对地震动的影响

非线性波动理论是非线性科学的一个分支, 它在大气动力学、离子体物理学、流体力学、晶格力学、非线性光学、工程力学等领域得到了广泛的应用。固体弹性介质中非线性波传播

的研究开始于 20 世纪 50 年代,这之后又取得一定的进展。建立并发展可处理高度复杂的地球固体介质中地震波传播问题的地震波散射及全波理论,是地震学研究领域中的前沿之一(贾豫葛等,2005),固体介质非线性波动理论是研究这一课题的首选理论,这些研究将有力推动了局部地形对地震动影响研究。虽然固体介质中非线性波动理论的应用存在很多问题(刘财等,2000),但仍可期待非线性波动理论在局部地形地震动研究中的良好前景。

5.4 开展三维非线性地震动数值模拟研究

数值法可以解决各种复杂场地地震动响应问题,拥有解析法不可比拟的优势,复杂的工程和理论问题的研究成果绝大多数是依靠数值方法实现的。局部地形对地震动影响数值模拟研究方法主要有有限差分法、有限元法、边界元法、有限元和边界元耦合法以及离散波数法等,既有研究维度主要集中于二维和 2.5 维散射问题(梁建文等,2009c;巴振宁等,2010b;Chen et al,2011),而实际情况是三维散射问题(巴振宁等,2010b)。地震地质数值模拟研究中,各种非线性问题突出,只有采用非线性数值算法才能解决(胡勳乾等,2010;梁建文等,2009c)。随着计算机技术的迅猛发展和计算方法层出不穷的涌现,未来局部地形对地震动影响数值模拟研究应该向三维非线性地震动研究方向努力,以弥补解析法研究存在的不足。

6 结论

局部地形对入射波散射效应引起地震动的解析解研究已取得丰硕成果,但对各种局部地形和各种入射波的研究水平不均衡,主要集中在无盖层凹陷地形、沉积谷地和 SH 波;此外,现有研究成果对工程抗震设计和研究指导较少,地震工程师要积极参与该领域的研究。受数学求解技术和复杂地质介质波动问题复杂性限制,大多数研究方法都引入大圆弧假设,代入边界条件后,散射波函数中的待定系数需通过求解线性方程组来确定。线性方程组的求解限制了解析解的适用频段只能在一个较低的范围,且得出的解析解是近似解析解。外域型 Graf 加法公式引用和选择不同的求解极坐标可以同时避免大圆弧假设的引入和线性方程组求解遇到的数值计算问题,拓展了解析解适用频段,为时域地震动响应分析提供基础。计算介质模型的仿真度受求解技术的限制,其发展与数学技术发展同步。为简化求解问题,通常忽略势函数的时间因子和模拟半空间的阻尼项。未来该领域要加强研究局部地形对 Rayleigh 波地震动响应规律,开展局部地形对各种入射波耦合作用的地震动响应规律、运用非线性波动理论研究局部地形对地震动的影响和开展三维非线性地震动数值模拟研究等。

参考文献

- 巴振宁、梁建文、Lee V W, 2010a, 平面 P 波在饱和半空间中凹陷地形周围的散射规律, 天津大学学报, **43** (6), 523 ~ 529。
巴振宁、梁建文, 2010b, 层状半空间中凹陷地形对斜入射平面 P 波的 2.5 维散射, 自然灾害学报, **19** (3), 52 ~ 61。
曹欣荣、宋天舒、刘殿魁, 2001, 任意形状凸起地形对平面 SH 波的散射, 应用数学和力学, **22** (9), 976 ~ 982。
崔志刚、邹永超、刘殿魁, 1998, SH 波对圆弧形凸起地形的散射, 地震工程与工程振动, **18** (4), 8 ~ 14。
董俊、赵成刚, 2005a, 三维半球形凹陷饱和土场地对平面 P 波散射问题的解析解, 地球物理学报, **48** (3), 680 ~ 688。
董俊、赵成刚, 2005b, 半球形凹陷饱和土半空间对入射平面 SV 波三维问题的解析解, 地球物理学报, **48** (6), 1412 ~ 1421。
杜永军、赵启成、刘殿魁等, 2005, 半圆形凸起地形对 SH 波的散射与地震动有多个浅埋圆孔情形, 自然灾害学报, **14** (3), 155 ~ 161。

- 杜永军、刘殿魁、赵启承等,2009a, SH 波入射时等腰三角形与半圆形凸起地形的地震动,世界地震工程,25(3),167~174。
- 杜永军、刘殿魁、郭凤等,2009b, 双等腰三角形凸起地形在 SH 波入射时的地表位移函数,地震工程与工程振动,29(3),1~8。
- 高相斌、刘殿魁、罗铁峰,2005, SH 波对浅埋圆孔附近多个半圆形凸起地形的散射哈尔滨工程大学学报,26(4),487~492。
- 韩峰、王光政、康朝阳,2011, SH 波对等腰三角形与半圆形凹陷相连地形的散射,应用数学和力学,32(3),293~311。
- 韩铮、赵成刚,2007, 半球形沉积谷地对入射平面 Rayleigh 波的三维散射解析解,岩土力学,28(12),2607~2613。
- 胡静,2002, 用契合方法求平面 SH 波对半圆凸起地形的散射,中国民航学院学报,20(4),16~19。
- 胡劭乾、邓志辉、陆远忠,2010, 有限元数值模拟方法在华北地区地震地质研究中的应用进展,地震地质,32(1),162~173。
- 贾豫葛、李小凡、张美根等,2005, 地震波散射研究的若干重要进展,地球物理学进展,20(4),939~944。
- 李敏、刘殿魁,2005, SH 波入射时含圆形孔洞的半圆形凸起地形与其附近的圆形孔洞的相互作用,哈尔滨工程大学学报,26(5),608~613。
- 李敏、刘殿魁、周瑞芳,2008a, 含孔半圆形凸起地形及多个孔洞对 SH 波的散射,哈尔滨工程大学学报,29(1),78~84。
- 李敏、冯云亭、贲伟,2008b, SH 波在多个浅埋圆孔附近的多个含孔半圆形凸起地形处的散射,地震工程与工程振动,28(4),6~13。
- 李彤、王国庆、刘殿魁,2003, SH 波在含圆形孔洞的半圆形凸起处的散射,地震工程与工程振动,23(5),26~31。
- 李伟华、赵成刚,2003a, 圆弧凹陷地形和土场地对平面 P 波散射问题的解析解,地球物理学报,46(4),539~546。
- 李伟华、赵成刚,2003b, 饱和土沉积谷地对平面 P 波的散射,岩土工程学报,25(3),346~351。
- 李伟华、赵成刚,2004, 饱和土沉积谷地场地对平面 SV 波的散射问题的解析解,地球物理学报,47(5),911~919。
- 李伟华,2007, 圆弧形有水河谷地对平面 P 波的散射,华南地震,27(1),51~59。
- 李雨润、袁晓铭、孙锐,2005a, 半空间异质隆起的出平面动力响应:闭合级数解答地震工程与工程振动,25(3),1~5。
- 李雨润、袁晓铭、孙锐,2005b, 半空间异质隆起的出平面动力响应:地表运动,地震工程与工程振动,25(5),17~23。
- 梁建文、张郁山、顾晓鲁等,2000, 圆弧形层状沉积河谷场地在平面 SH 波入射下动力响应分析,岩土工程学报,22(4),396~401。
- 梁建文、严林隽、李军伟等,2001a, 圆弧形沉积河谷场地在平面 P 波入射下的响应,岩土力学,22(2),138~143。
- 梁建文、严林隽、LEE V W,2001b, 圆弧形层状沉积谷地对入射平面 P 波的散射解析解,地震学报,23(2),167~184。
- 梁建文、严林隽、LEE V W,2002, 圆弧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。
- 梁建文、严林隽、秦东等,2003a, 圆弧形沉积河谷场地在平面 SV 波入射下的动力响应,土木工程学报,36(12),74~82。
- 梁建文、严林隽、LEE V W,2003b, 圆弧形层状沉积谷地对入射平面 SV 波散射解析解,固体力学学报,24(2),235~243。
- 梁建文、罗昊、LEE V W,2004, 浅埋圆弧形凸起地形中隧洞对入射平面 SH 波的影响,地震学报,26(5),495~508。
- 梁建文、李方杰、顾晓春,2005, Rayleigh 波在浅圆凹陷地形附近的散射:高频解答,地震工程与工程振动,25(5),24~29。
- 梁建文、张秋红、李方杰,2006a, 浅圆沉积谷地对瑞利波的散射-高频解,地震学报,28(2),176~182。
- 梁建文、张彦帅、LEE V W,2006b, 平面 SV 波入射下半圆凸起地形地表运动解析解,地震学报,28(3),238~249。
- 梁建文、巴振宁,2007, 弹性层状半空间中沉积谷地对入射平面 SH 波的放大作用,地震工程与工程振动,27(3),1~9。
- 梁建文、魏新磊、LEE V W,2009a, 圆弧形沉积谷地对 Rayleigh 波三维散射解析解,天津大学学报,42(1),24~34。
- 梁建文、魏新磊、LEE V W,2009b, 圆弧形沉积谷地对平面 SV 波三维散射解析解,岩土工程学报,31(9),1345~1353。
- 梁建文、张炳政、巴振宁,2009c, 基岩上均匀场地中透镜体对地震动的非线性放大作用,地震工程与工程振动,29(6),13~24。
- 梁建文、魏新磊、LEE V W,2010a, 圆弧形沉积谷地对平面 P 波的三维散射解析,解岩土力学,32(2),461~470。
- 梁建文、刘中宪,2010b, 平面 SV 波在饱和半空间中沉积谷地周围的散射,地震工程与工程振动,30(3),12~21。
- 刘财、冯暄、何敏等,2000, 非线性波动理论在地震勘探中的应用综述,地球物理学进展,15(4),68~78。
- 刘殿魁、韩峰,1990, SH 波对各向异性凹陷地形的散射,地震工程与工程振动,10(2),11~25。
- 刘殿魁、许贻燕,1993, 各向异性介质中 SH 波与多个半圆形凹陷地形的相互作用,力学学报,25(1),93~102。

- 刘殿魁、刘宏伟,1996,曲线坐标在弹性波散射研究中的应用-SH波对不等深宽凹陷地形的散射,地震工程与工程振动,16(2),14~24。
- 刘殿魁、吕晓棠,2006a,浅埋圆柱形弹性夹杂附近的半圆形凸起对SH波的散射,哈尔滨工程大学学报,27(2),189~194。
- 刘殿魁、王国庆,2006b,浅埋圆形孔洞附近的半圆形凸起对SH波的散射,力学学报,38(2),209~218。
- 刘殿魁、吕晓棠,2007a,半圆形凸起与凹陷地形对SH波的散射,哈尔滨工程大学学报,28(4),392~397。
- 刘殿魁、王宁、李世颖等,2007b,浅埋圆形孔洞附近的弧形凸起对SH波的散射,哈尔滨工程大学学报,28(6),636~641。
- 刘刚、刘殿魁、杜永军等,2006,浅埋圆柱形弹性夹杂附近等腰三角形凸起地形引起的SH波的散射,地震工程与工程振动,26(4),1~8。
- 刘刚、刘殿魁,2007a,SH波入射时浅埋圆孔附近等腰三角形凸起地形的地震动,固体力学学报,28(1),60~66。
- 刘刚、刘殿魁,2007b,SH波对浅埋圆形弹性夹杂附近任意三角形凸起地形的散射,应用力学学报,24(3),272~279。
- 刘洪兵、朱晞,1999,地震中地形放大效应的观测和研究进展,世界地震工程,15(3),20~25。
- 刘晶波、刘详庆、杜修力,2007,地下结构抗震理论分析与试验研究的发展展望,地震工程与工程振动,27(6),38~45。
- 吕晓棠、刘殿魁,2006,SH波入射时半圆形凸起与凹陷地形的地震动,地震工程与工程振动,26(5),14~20。
- 吕晓棠、杨在林、刘殿魁,2009,SH波对浅埋圆柱形弹性夹杂附近多个半圆形凸起的散射,世界地震工程,25(2),114~119。
- 牛滨华、孙春岩,2004,地震波理论研究进展——介质模型与地震波传播,地球物理学进展,19(2),255~263。
- 钱七虎,1999,岩土工程的第四次浪潮,地下空间,19(4),267~272。
- 王慧文、孙晓娟、刘殿魁,2006,浅埋圆形夹杂附近半圆形沉积层对SH波的散射与地表位移,黑龙江工程学院学报(自然科学版),20(2),1~5。
- 王磊、赵成刚,2007,饱和土沉积谷地场地对平面Rayleigh波的散射,岩土工程学报,29(2),204~211。
- 许贻燕、韩峰,1992,平面SH波在相邻多个半圆形凹陷地形上的散射,地震工程与工程振动,12(2),12~18。
- 杨彩红、梁建文、张郁山,2006,多层沉积凹陷地形对平面SH波散射问题的解析解,岩土力学,27(12),2191~2196。
- 杨彩红,2009a,圆弧状凹陷地形在平面SH波入射下的动力响应:高频解答,震灾防御技术,4(2),158~166。
- 杨彩红,2009b,圆弧状凹陷地形对平面P波的散射:高频解答,中国地震,25(3),234~245。
- 杨在林、许华南,2010,SH波对三角形凸起与半圆形凹陷地形的地震动,世界地震工程,26(增刊),172~176。
- 杨在林、许华南、陈志刚,2011,等腰三角形凸起与半圆凹陷地形对SH波的散射,哈尔滨工业大学学报,43(增刊),6~11。
- 姚姚,2006,地震波场与地震勘探,北京:地质出版社。
- 袁晓铭、廖振鹏,1996,任意圆弧凸起地形对平面SH波的散射,地震工程与工程振动,16(2),1~13。
- 袁晓铭、李润雨、孙锐,2002,圆弧状沉积盆地与软土单覆盖层出平面地表运动对比,地震工程与工程振动,22(4),16~21。
- 张郁山,2008,圆弧状多层沉积谷地在平面P波入射下稳态响应的解析解,地球物理学报,51(3),869~880。
- 张郁山,2009,圆弧状多层沉积谷地在平面SV波入射下的动力响应,地球物理学报,52(6),1547~1555。
- 张郁山,2010a,圆弧状沉积谷地在平面SH波入射下的动力响应,岩土工程学报,32(1),1~6。
- 张郁山,2010b,圆弧状多层沉积谷地在Rayleigh波入射下动力响应的解析解,地球物理学报,53(9),2129~2143。
- 张俾元、王士天、王兰生,1994,工程地质分析原理,北京:地质出版社。
- 赵成刚、杜修力、李小军,1993,用三维半解析解边界元的子结构法分析凸起山包对地震波的散射,中国地震,9(2),154~162。
- 赵成刚、韩铮,2007a,半球形饱和土层沉积谷地对入射平面Rayleigh波的三维散射问题的解析解,地球物理学报,50(3),905~914。
- 赵成刚、王磊、高福平,2007b,圆弧形沉积场地对平面瑞利波散射的解析分析,力学学报,38(3),365~373。
- 钟慧、张郁山,2010,圆弧状凹陷地形对平面SV波散射问题的宽频带解析解,中国地震,26(2),142~155。
- 周红、陈晓飞,2007,凹陷地形对Rayleigh面波传播影响的研究,地球物理学报,50(4),1182~1189。
- Biot M A, 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous, part II: Higher-frequency range, J Acoust Soc Am, 28(2), 179~194。
- Chang G S, Dong S K, Choong K C, 2005, Geologic site conditions and site coefficient for estimating earthquake ground motions in

- the inland areas of Korea, *Engineering Geology*, **81**, 446 ~ 469.
- Chen J T, Lee J W, Wu C F et al, 2011, SH-wave diffraction by a semi-circular hill revisited: A null-field boundary integral equation method using degenerate kernels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**, 729 ~ 736.
- Gao H, Lee V W, 1990, Scattering and diffraction P waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **9** (3), 141 ~ 150.
- Hayir A, Todorovska M I, Trifunac M D, 2001, Antiplane response of a disk with flexible soil-structure interface to incident SH waves, *Soil Dynamics and Engineering*, (21), 603 ~ 613.
- Lee V W, 1984, Three-dimensional diffraction of plane P, SV and SH waves by a hemispherical alluvial valley, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **3** (3), 133 ~ 144.
- Lee V W, 1989, Diffraction of SV waves by circular canyons of various depths, *Journal of Engineering Mechanics*, **115** (9), 2035 ~ 2056.
- Lee V W, Manoogian M E, 1995, Surface motion above an arbitrary shape underground cavity for incident SH waves, *European Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **8** (1), 3 ~ 11.
- Lee V W, Chen S, Hsu I, 1999, Antiplane diffraction from canyon above subsurface unlined tunnel, *Journal of Engineering Mechanics*, **125** (2), 668 ~ 674.
- Lee V W, Liang J W, 2004, Diffraction of anti-plane SH waves by a semi-circular cylindrical hill with an inside concentric semi-circular tunnel, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **3** (2), 29 ~ 262.
- Lee V W, ASCE S M, ASCE M, 2006, Antiplane SH waves diffraction by a semicircular cylindrical hill revisited: an improved analytic wave series solution, *Journal of Engineering Mechanics*, **132** (10), 1106 ~ 1114.
- Li W H, Zhao C G, 2005a, Diffraction of SV waves by circular canyons of various depths, *Soil Dynamics and Earthquakes Engineering*, (25), 981 ~ 995.
- Li W H, Zhao C G, Shi P X, 2005b, Scattering of plane P waves by circular-arc alluvial valleys with saturated soil deposits, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (25), 997 ~ 1014.
- Liang J W, Zhang Y S, Vincent W L, 2005, Scattering of plane P waves by a semi-cylindrical hill: analytical solution, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **14** (1), 27 ~ 36.
- Liang J W, Ba Z N, Lee V W, 2006, Diffraction of plane SV waves by a shallow circular-arc canyon in a saturated poroelastic half-space, *Soil Dynamics and Earthquakes Engineering*, (26), 582 ~ 610.
- Liu D K, Han F, 1991, Scattering of plane SH-wave by cylindrical canyon of arbitrary shape, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **10** (5), 249 ~ 255.
- Louis G, Pierre Y B, Beatrice J, 1988, The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results, *BSSA*, **78** (1), 42 ~ 63.
- Manoogian M E, Lee V W, 1999, Antiplane deformations near arbitrarily shaped alluvial valleys, *ISET Journal of Earthquake Technology*, **36** (2), 107 ~ 120.
- Nazaret D, Lee V W, Liang J W, 2003, Anti-plane deformations around arbitrary-shaped canyons on a wedge-shape half space: moment method solutions, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **2** (2), 281 ~ 287.
- Qin F Q, Liu D K, 2005, Antiplane response of isosceles triangular hill to incident SH waves, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **4** (1), 1 ~ 10.
- Todorovska M I, Lee V W, 1991, Surface motion of shallow circular alluvial valleys for incident plane SH waves-analytical solution, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **10** (4), 192 ~ 200.
- Todorovska M I, Lee V W, 1996, A note on scattering of Rayleigh waves by shallow circular canyons: analytical approach, *Bulletin of Indian Society of Earthquake Technology*, **28** (2), 1 ~ 16.
- Todorovska M I, Hayir A, Trifunac M D, 2001, Antiplane response of a dike on flexible embedded foundation to incident SH-Waves, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (21), 593 ~ 601.
- Trifunac M D, 1972, Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **1** (3), 267 ~ 281.

- Trifunac M D, 1971, Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **61** (6), 1755 ~ 1770.
- Wang G Q, Liu D K, 2002, Scattering of SH wave by multiple circular cavities in half space, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **1** (1), 36 ~ 44.
- Wong H L, Trifunac M D, 1974a, Scattering of plane SH waves by a semi-elliptical canyon, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, (3), 157 ~ 169.
- Wong H L, Trifunac M D, 1974b, Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65** (5), 1389 ~ 1408.
- Yuan X M, Men F L, 1992, Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical hill, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21** (12), 1091 ~ 1098.
- Yuan X M, Liao Z P, 1994, Scattering of plane SH wave by cylindrical canyon of circular-arc cross-section, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **13** (6), 407 ~ 412.
- Yuan X M, Liao Z P, 1995, Scattering of plane SH waves by a cylindrical alluvial valley of circular-arc cross-section, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, (24), 1303 ~ 1313.
- Yuan X M, Liao Z P, Trifunac M D, 1996, Surface motion of a cylindrical hill of circular-arc cross-section for incident plane SH waves, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (15), 189 ~ 199.

A review of analytical solution of scattering effect of incident wave by local topography on ground motion

Zhang Jiaming Xu Zemin Tian Lin Pei Yin'ge

Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan, Kunming 650500, China

Abstract Local topography conditions may have significant effects on the amplification of ground motion. It may be studied both by analytical and numerical methods. Nevertheless, analytical methods are essential for exploring the physical nature of particular problems, and for checking the accuracy of numerical methods when exact solutions can be found. Local topography is divided into canyons without alluvial layers, canyons with alluvial layers (alluvial valley), hill, and composite topography. The researches on the influence of local topography on ground motion are reviewed respectively. Four aspects of research achievements are analyzed and discussed as follows: (1) research methods; (2) computer medium model; (3) research level disequilibrium among different local topography; (4) research deficiency. Finally, some ideas and prospects are proposed for later research in this field: seismic response of local topography under the incidence of Raleigh waves is worth further studying; simultaneously seismic response of local topography under the coupling incidence of various waves should be carried out; ground motion of local topography should be studied by nonlinear wave theory and three dimensional nonlinear ground motion numerical simulation should be carried out.

Key words: Local topography Ground motion Analytic solution Research methods
Computational model Nonlinear wave theory