

郝明辉、张郁山,2015,相邻地形对地震动特性的影响分析,中国地震,31(4),656~667。

相邻地形对地震动特性的影响分析

郝明辉 张郁山

中国地震灾害防御中心,北京市朝阳区民族园路 9 号 100029

摘要 基于采用透射人工边界的显式动力有限元方法,研究了相邻凸起地形对地震动反应谱特性的影响,分析了相邻凸起之间距离的变化对地形效应的影响。研究表明:①与单一凸起地形对地震动的放大效应相比,相邻地形的存在对地震动反应谱比曲线的形状影响不大,但对谱比的值具有较大影响,而且其影响程度的大小与地表观测点的位置有关;②相邻凸起地形的存在对凸起平台段中点地震动高频成分的放大效应影响较大,随着相邻凸起之间距离的增加,该影响逐渐减弱,多个相邻凸起构成的组合地形对地震动的放大效应逐渐接近单一凸起地形。

关键词: 相邻地形 地形效应 地震动反应谱 透射边界

[文章编号] 1001-4683(2015)04-0656-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

大量震害调查、强震观测以及理论研究表明(Borcherdt, 1970; Andrews, 1986; Assimaki et al, 2013; 王海云等, 2010), 局部地形会对地震波的传播产生影响, 这使得地震动空间分布特征呈现显著的差异, 从而影响着局地地震害的程度及其分布。已有的研究工作主要集中在单一凸起或凹陷地形对地震动特性的影响等方面, Yuan 等(1992)、袁晓铭等(1996)采用波函数展开法给出了半圆形凸起地形及任意圆弧型凸起地形对平面 SH 波散射的解析解, 并利用解析解研究了凸起地形对地震动的放大效应; 梁建文等(2003)给出了圆弧形层状凹陷地形对平面 SH 波散射的解析解, 并将圆弧形单一凹陷地形解析解推广到层状凹陷地形; 此外, 很多学者采用有限差分法(Fuyuki et al, 1980)、边界元法(Ge et al, 2008)、局部离散波数边界积分法(Zhou et al, 2006、2008)、有限元法(荣棉水等, 2007; 李英民等, 2010)等数值计算方法研究单一凸起或凹陷地形对地震动特性的影响, 定性和定量地总结了地形放大效应的相关规律。然而, 相邻地形对地震动频谱特性, 尤其是对反应谱特性的影响效应研究一直较薄弱。事实上, 天然地形受到相邻地质地貌结构的影响, 相邻地形之间的动力相互作用会影响地形对地震动的放大效应。随着我国经济建设的快速发展, 大跨度桥梁、管道、输电塔(线)等大型线型工程大量涌现, 多地貌单元复合场地的地震反应分析越来越受到重视。我国《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国建设部, 2010)也明确规定: 对复杂地形或地形变化明显

[收稿日期] 2015-08-19; [修定日期] 2015-10-13

[项目类别] 地震行业专项(201408002)、地震行业专项项目(201408020)、地震星火计划项目(XH14061Y)共同资助

[作者简介] 郝明辉, 女, 1983 年生, 助理研究员, 博士, 主要从事结构抗震研究。E-mail: minghuimail@126.com

的建筑场地,应估计不利地段对设计地震动参数的放大作用。而复合地形因具有更加符合实际情况的特点以及实际工程的需要,使得众多学者越来越重视对其的研究。研究复合地形对地震动的放大效应,对于揭示该类地形波动效应的物理机制以及更合理地确定位于该类地形上工程结构的抗震设防要求具有重要的理论和实际意义。

关于复合地形对地震动特性影响的研究通常采用 2 种方法:解析法和数值法。解析法尽管适于揭示波动问题的物理本质,但在研究局部相邻地形对地震波散射问题的适用性方面较为受限,目前仅限应用于圆弧形、椭圆形凹陷或规则凸起地形对 SH 波的散射情况。刘殿魁等(1998)、吕晓棠等(2006)、杜永军等(2009)、韩峰等(2011)根据“分区”、“契合”的思想,利用复变函数法和移动坐标的方法,研究了 SH 波作用下多个半圆形凸起地形、半圆形凸起与凹陷地形、双等腰三角形凸起地形、等腰三角形与半圆形凹陷相连地形等的动力响应问题;房莹光(1995)给出了相邻多个浅圆弧凹陷地形对平面 SH 波散射的级数解。对于非均匀、非弹性和边界条件较复杂的情况,由于受地震波的散射折射和波型转换的影响,问题变得非常复杂,因而解析法的应用受到极大的限制。而数值法在计算机仿真技术及数值分析算法日新月异的今天,能够满足各种实际工程中复杂地形的地震动力响应分析,并能在定量上给出结果,故已成为主流分析方法。刘晶波(1996)运用有限元法结合修正的透射人工边界,研究了相邻凸起地形中 P 波、SV 波和瑞雷波传播对地面运动的影响;荣棉水等(2007)研究了 2 个相邻凸起台地地形对入射 P 波傅氏谱特性的影响,研究结果表明,由于相邻凸起地形的存在,山顶地面运动增大更明显,山顶观测点的谱比进一步增大;金丹丹等(2014)利用 ABAQUS 软件研究由河漫滩、阶地、波状起伏的丘陵地带、残丘等组成的典型复合地形场地对 SH 波的影响,结果表明,相邻地形对特定频段地震动的放大效应与聚集效应比较明显,局部地形变化将引起地震动持时差异,且持时与输入地震动的特性相关。

本文在研究单一凸起地形对地震动反应谱特性影响的基础上(郝明辉等,2014),利用基于透射人工边界的显式动力有限元计算程序,通过在北京工业云计算平台开展大规模数值计算工作,进一步研究了由 2 个及 3 个相邻凸起构成的复合地形对地震动反应谱特性的影响,并分析了相邻凸起之间距离的变化对计算结果的影响。

1 计算模型及输入地震动

单一凸起地形、具有 2 个凸起和具有 3 个凸起的复合地形的计算模型如图 1 所示。假设所有凸起平台宽度均为 50m,高度均为 50m,坡角均为 45° ,相邻凸起之间的距离为 50m。计算区域的宽和高取凸起坡高的 5 倍,以满足计算精度的要求并降低人工边界数值误差的影响。介质假定为均质、各向同性、线弹性介质,其 P 波波速 $v_p = 2000\text{m/s}$,S 波波速 $v_s = 1400\text{m/s}$,阻尼比 $\zeta = 0$ 。入射地震波为垂直入射的 SV 波。基于郝明辉等(2014)的研究结果,采用人工合成的地震动时程作为模型的输入,其中一个样本的加速度、速度和位移波形如图 2(a)所示,其反应谱与目标反应谱之间的比较如图 2(b)所示。人工地震动的合成方法参见文献(张郁山等,2014)。

2 计算方法

2.1 集中质量显式有限元的内点计算方法

集中质量显式有限元的实质是从当前时刻的节点运动方程推求下一时刻节点的运动,

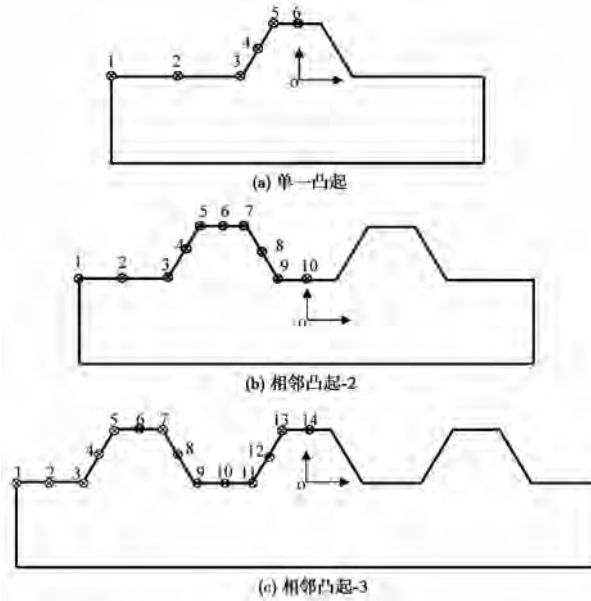


图1 单一凸起与相邻凸起地形模型
图中序号为地表观测点号

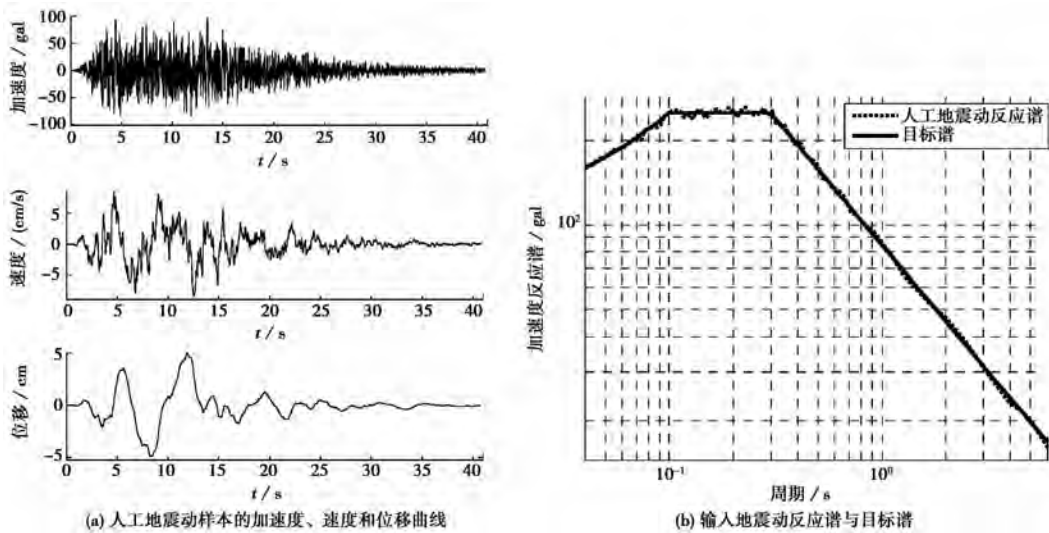


图2 输入地震动时程及反应谱

它不需要进行刚度、质量、阻尼阵的集成,其右端项的形成只需在单元一级水平上根据每个单元对有效荷载向量的贡献累加而成,这样整个计算基本上在单元一级水平上进行,因此仅需要很小的高速存贮区,计算效率较高。尤其当一系列单元的刚度阵、质量阵、阻尼阵相同时,就不需要重复计算,效率更高。

对于内点,由动力平衡条件可建立运动方程

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\}_t + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\}_t + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\}_t = \{\mathbf{R}\}_t \quad (1)$$

其中, $[\mathbf{M}]$ 、 $[\mathbf{C}]$ 、 $[\mathbf{K}]$ 分别为集中质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, $\{\ddot{\mathbf{u}}\}_t$ 、 $\{\dot{\mathbf{u}}\}_t$ 、 $\{\mathbf{u}\}_t$ 及 $\{\mathbf{R}\}_t$ 分别为 t 时刻内节点处的运动加速度、速度、位移以及节点载荷(刘晶波等, 2005)。

对于式(1), 参考李小军等(1993)采用中心差分法和 Newmark 常平均加速度方法相结合的显式差分格式, 最终得到局部节点系内节点 1 的位移显式递推公式

$$u_1^{p+1} = u_1^p + \frac{\Delta t^2}{2M_1} R_1^p + \left(\Delta t - \frac{\Delta t^2}{2} \alpha \right) \dot{u}_1^p - \frac{\Delta t^2}{2M_1} \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{i=1}^{N_n} K_{1i}^e \left[\beta (\dot{u}_i^e)^p + (u_i^e)^p \right] \quad (2)$$

其中, N_e 表示与节点 1 相关的单元总数; N_n 表示单元内的节点总数; α 、 β 为瑞雷阻尼系数; K_{1i}^e 表示与节点 i 相关的单元刚度矩阵; M_1 表示节点 1 的质量; R_1^p 表示 p 时刻节点 1 处的荷载; u_1^p 、 \dot{u}_1^p 表示 $p\Delta t$ 时刻节点 1 的位移和速度, u_1^{p+1} 表示 $(p+1)\Delta t$ 时刻节点 1 的位移。

2.2 人工透射边界

通过直接在边界上模拟波动从有限模型的内部穿过人工边界向外透射的过程, 推导离散的局部人工边界条件式为

$$u_0^{p+1} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_j^{p+1-j} \quad (3)$$

式中, u_0^{p+1} 为人工边界节点在 $(p+1)\Delta t$ 时刻的位移; N 为透射阶数; u_j^{p+1-j} 为计算点 $x = -jc_a \Delta t$ 在 $(p+1-j)\Delta t$ 时刻的位移; C_j^N 为二项式系数

$$C_j^N = \frac{N!}{(N-j)! j!} \quad (4)$$

本文采用上述基于透射人工边界的显式有限元计算方法, 编制了并行化的计算程序, 并移植到北京工业云计算平台上运行。有限单元采用四边形等参元的形式, 人工边界采用二阶透射边界处理方法, 相应的内点和边界点的显式数值积分公式如式(2)。采用 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的有限元网格对计算区域进行离散, 根据输入地震动的卓越频谱成分(图 2)和地形介质的力学参数, 该网格能够满足高频地震动计算精度的要求。

针对输入的每组地震动样本, 求解凸起地形的动力反应, 即可得到所有空间点地震反应的时间过程, 将该时间过程的反应谱除以自由场反应谱即可得到不同空间点的谱比曲线, 用以描述凸起地形对地震动的放大效应, 即

$$r_i(T, \hat{x}) = \frac{S_{a,i}(T, \hat{x})}{S_{a,f}(T, \hat{x})} \quad (5)$$

其中, $S_{a,i}(T, \hat{x})$ 为第 i 个地震动样本引起的空间点 $\hat{x} = (x, y)$ 处地震动的反应谱, $S_{a,f}(T, \hat{x})$ 为空间点 \hat{x} 处不受地形影响的自由场地震动(即弹性半空间表面的地震动)的反应谱, $r_i(T, \hat{x})$ 为相应的谱比。将所有地震动样本(本文选取 3 组地震动样本)的计算结果进行平均即可得到不同空间点处的平均谱比

$$r(T, \hat{x}) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 r_i(T, \hat{x}) \quad (6)$$

2.3 方法验证

为了验证本文计算方法的正确性及计算结果的精度, 计算了如下规则地形具有解析解的算例。

从二维半无限空间中截取 $6\text{m} \times 50\text{m}$ 的有限范围,顶端自由,单元网格尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 。材料弹性模量 $E = 2.4 \times 10^7 \text{Pa}$,泊松比 $\nu = 0.2$,质量密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。在底部垂直向上入射 x 方向单位脉冲剪切位移波和 y 方向的单位脉冲压缩位移波

$$u(t) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (7)$$

其中, $f = 4$, $0 \leq t \leq 0.25$, 其波形如图 3 所示。

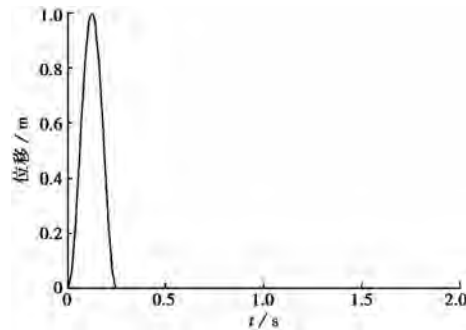


图 3 入射位移波

图 4 给出了基于透射边界显式有限元方法计算得到的模型底部、中部、顶部的水平向和垂直向位移时程曲线与理论解的比较。入射波由底部向上传播在自由地表发生反射,自由地表处的位移幅值为输入波幅值的 2 倍。本文的计算结果与理论解吻合得很好,证明了本文计算方法的正确性和有效性。

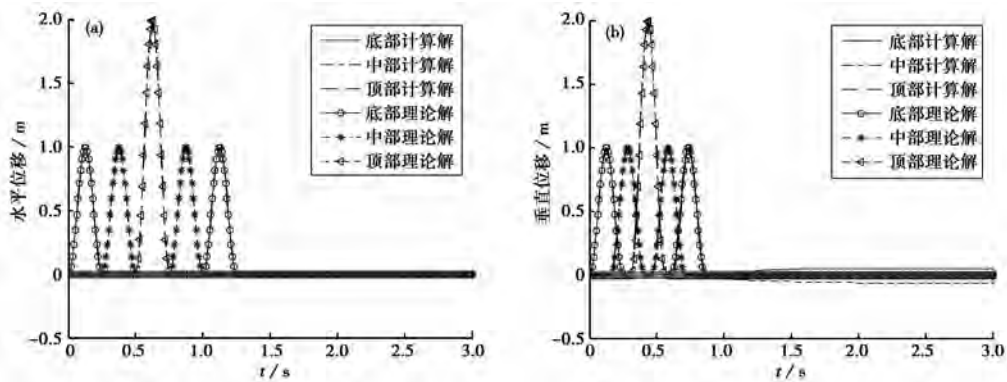


图 4 透射边界计算结果与理论解比较

3 相邻地形对地震动反应谱特性的影响

首先,以 2 个相邻凸起地形模型为例分析相邻地形对地震动反应谱特性的影响效应。由于模型的对称性,仅考虑图 1(b) 所示 10 号点左侧地表点的谱比。不同空间点的谱比曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,相邻地形地表各观测点谱比曲线的形状与单一凸起地形(郝明辉等,2014)基本相同;平台段地表点(点 5、6、7)的谱比值显著高于其他部位的地表

点,平台段中点(点 6)及顶点(点 5、7)的谱比值相差不大,最大值达到了 1.94;对于斜坡段(点 3、4、5),在大部分周期点处,顶点(点 5)的谱比值大于其它斜坡点,在周期小于 0.5s 的频段,脚点(点 3)的谱比值均小于 1,对输入地震动起到削弱的作用;对于坡底段(点 1、2、3),在大部分周期点处,地表不同观测点的谱比值基本在脚点(点 3)与计算边界点(人工边界点,即点 1)对应的谱比值之间变化。

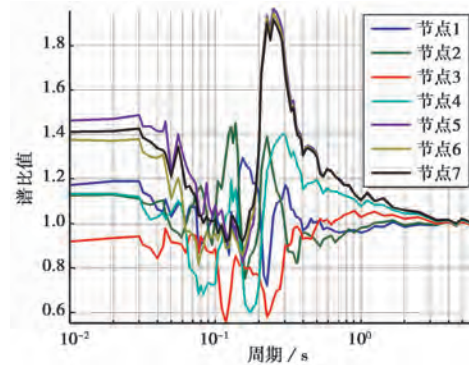


图 5 地表点谱比曲线

不同反应谱控制周期点 ($T=0.1s$, $T=1.0s$) 及峰值加速度 PGA 对应的谱比在地表的变化如图 6 所示。由图 6 可以看出,频率越高(如 $T=0.1s$ 对应的谱比和 PGA 对应的放大倍数),地形对地震动的放大倍数的空间变化越剧烈;而长周期地震波波长较长,对尺度相对较小的局部相邻地形不是十分敏感,放大倍数的空间变化相对平缓。

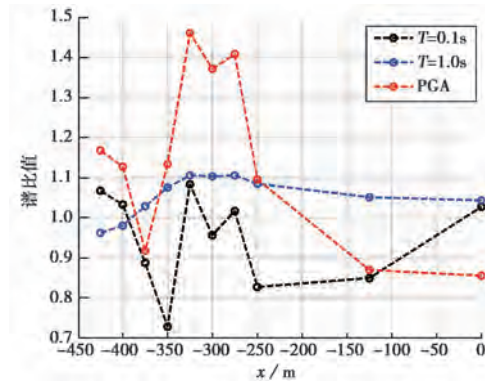


图 6 不同周期点谱比的空间变化

下面在地震动输入一致条件下,分析单一凸起地形、2 个凸起相邻地形及 3 个凸起相邻地形等对地震动反应谱特性的影响。图 7(a) 给出了 3 种地形模型中同一凸起平台中点(图 1 中观测点 6)的谱比曲线。由于相邻地形的影响,卓越周期(本文将其定义为谱比最大值对应的周期)向高频段移动。谱比最大值由单一凸起地形的 1.57 增加至 2 个相邻地形的 1.94,为单一凸起的 1.2 倍。当具有 3 个相邻凸起时,谱比最大值高达 2.31,达到单一凸起的 1.5 倍。可以看出,相比单一凸起地形,相邻地形的存在对地震动谱比曲线的形状影响较小,但是,其对谱比的具体值却产生了显著的影响。工程实例中,在评估局部地形对地震动的放

大效应时,应考虑邻近地形对评估结果的这种影响效应,否则会低估地形对地震动的放大效应。

此外,由于相邻地形的影响,地震动放大效应在特定频段较为明显,而且随着凸起个数的增加,放大效应对应的周期段变窄且其中心略向高频处偏移。随着凸起个数的增多,高频段(0.01~0.30s)的放大倍数增大,低频段(1.0~6.0s)相差不大,而中间频段(0.3~1.0s)在不同周期点处,放大倍数与凸起个数之间的关系没有明显的规律。图7(b)给出了3个相邻凸起地形模型中间凸起平台段中点(图1(c)中观测点14)、单一凸起地形模型平台段中点(图1(a)中观测点6)及2个相邻凸起地形模型左侧平台段中点(图1(b)中观测点6)的谱比曲线。可以看出,对于含有3个凸起的相邻地形,由于左右相邻凸起台地的影响,地震波能量聚焦效应更为显著,从而导致地震动的放大效应更为明显,中间凸起平台段中点(图1(c)中观测点14)的谱比值高达2.77,是单一凸起地形平台段中点谱比最大值的1.8倍,同时也高于3个凸起地形中图1(c)所示观测点6对应的谱比值(图7(a))。

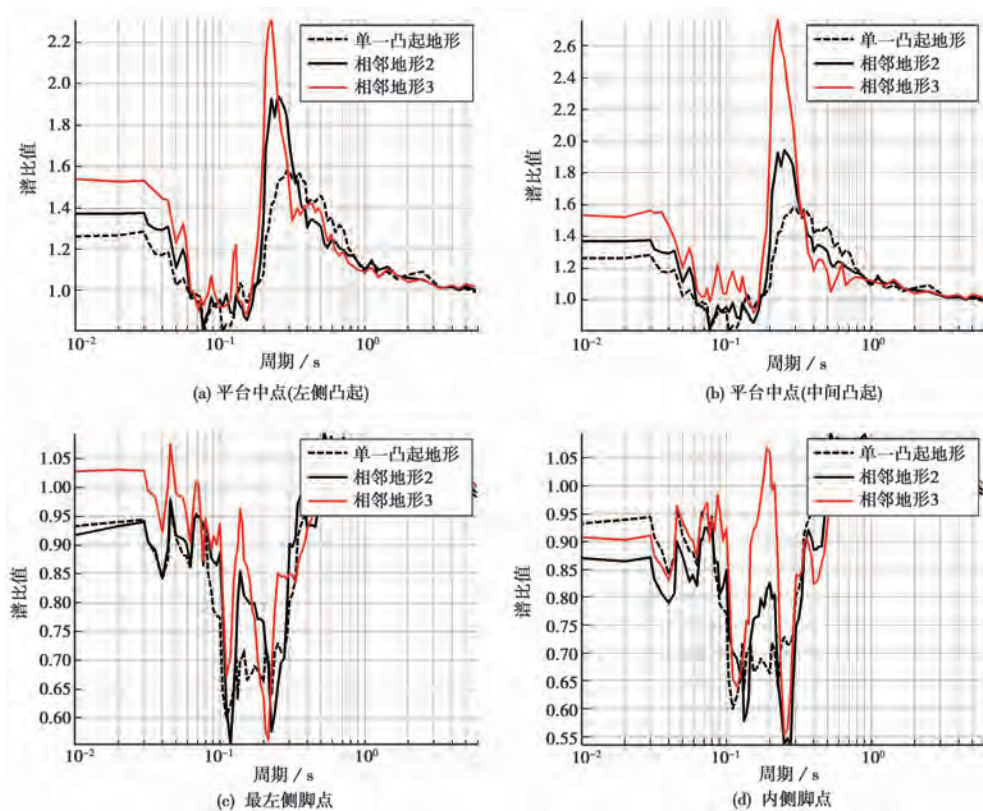


图7 地表关键节点谱比曲线

图7(c)是3种地形模型中同一脚点(图1中观测点3)的谱比曲线,图7(d)是3种地形模型中内侧脚点(考虑到模型的对称性,对于图1(a)所示单一凸起地形模型即为观测点3;图1(b)所示2个相邻凸起地形模型的观测点9;图1(c)所示3个相邻凸起地形模型的观测点9)的谱比曲线。由图7(c)、7(d)可以看出,对于小于0.5s的周期点,脚点对地震动大致

起到削弱作用(谱比值小于 1.0),而对大于 0.5s 的周期点,脚点处地震动反应谱与自由场地震动相差不大,这说明针对工程实例所考虑的地形尺度而言,由于长周期地震波波长较长,故局部地形对其影响较小。另外,随着凸起个数的增多,尤其是增加到 3 个凸起时,脚点处地震动的高频(0.01~0.30s)反应谱谱值增大。由图 7 可知,对模型中同一观测点(如观测点 3、6)而言,谱比曲线的形状基本相同,即凸起个数的变化对地震动反应谱放大(或缩小)频段的范围几乎没有影响。

将凸起平台的宽度、高度以及相邻凸起的间距保持不变,变化凸起的坡角(相邻凸起坡角保持相等),可以得到不同空间点对应的地形谱比值与坡角之间的关系。不同反应谱控制周期点($T=0.1\text{s}$, $T=1.0\text{s}$)对应的平台中点谱比值随坡角变化曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,对于 $T=0.1\text{s}$ 的高频成分,3 种计算模型中平台中点谱比值随坡角变化表现出一致的规律性:当坡角小于 20° 时,随着坡角的增大,谱比值增大,而当坡角大于 20° 时,随着坡角的增大,谱比值减小,而且坡角大于 40° 时,谱比值基本小于 1。另外,针对相同坡角,谱比值受凸起个数的影响不是十分明显,含 3 个凸起相邻地形模型中间凸起平台段中点(即观测点 14)的谱比值在 20° 坡角时最大,为 1.4。对于 $T=1.0\text{s}$ 的长周期成分,3 种地形模型中平台段中点谱比值对坡度变化均不是十分敏感。另外,当坡角小于 35° 时,针对相同坡角,谱比值随凸起个数增多呈减小趋势,但幅值变化幅度仍然不大。

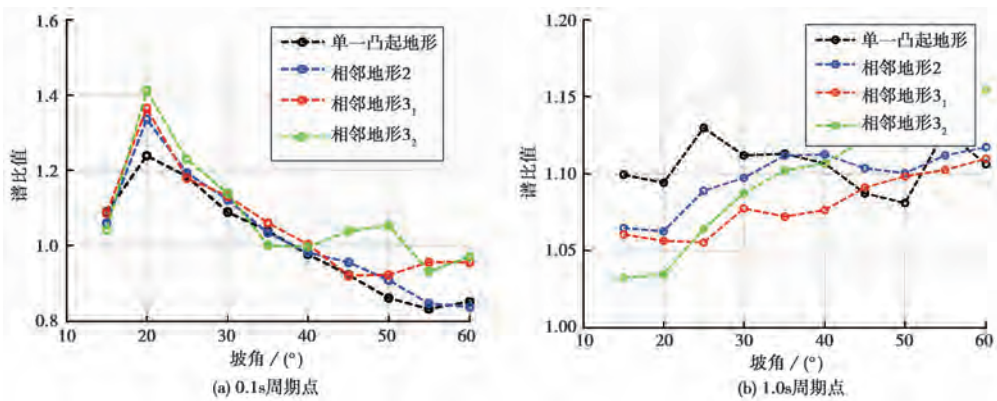


图 8 不同周期点谱比随坡度变化曲线

单一凸起地形、相邻地形 2、相邻地形 3_1 分别表示图 1 所示单一凸起、2 个凸起和 3 个凸起地形地表点 6 的结果; 相邻地形 3_2 表示 3 个凸起地表点 14 的结果

地震动峰值放大倍数随坡角的变化如图 9 所示。由图 9 可以看出,对于 3 种计算模型,在坡高和平台宽度不变的情况下,峰值加速度和峰值速度随坡角的增加基本呈增大趋势,与峰值速度相比,峰值加速度对坡角的变化更敏感,如“相邻地形 3_1 ”平台段中点(观测点 6)峰值加速度的放大倍数由 1.23 增大到 1.60,而峰值速度的则由 1.1 增大到 1.2。另外,峰值加速度和峰值速度的放大倍数随凸起个数增多呈增大趋势。峰值位移对坡角变化不是十分敏感,放大倍数基本在 1.0 附近,而且峰值位移随凸起个数变化的规律也不是十分明显。这主要是因为地震动峰值位置主要受长周期地震波成分的控制,而长周期地震波波波长较长,对上述算例所对应的地形尺度不敏感,这导致地形几何参数的变化及相邻地形的动力相互作用

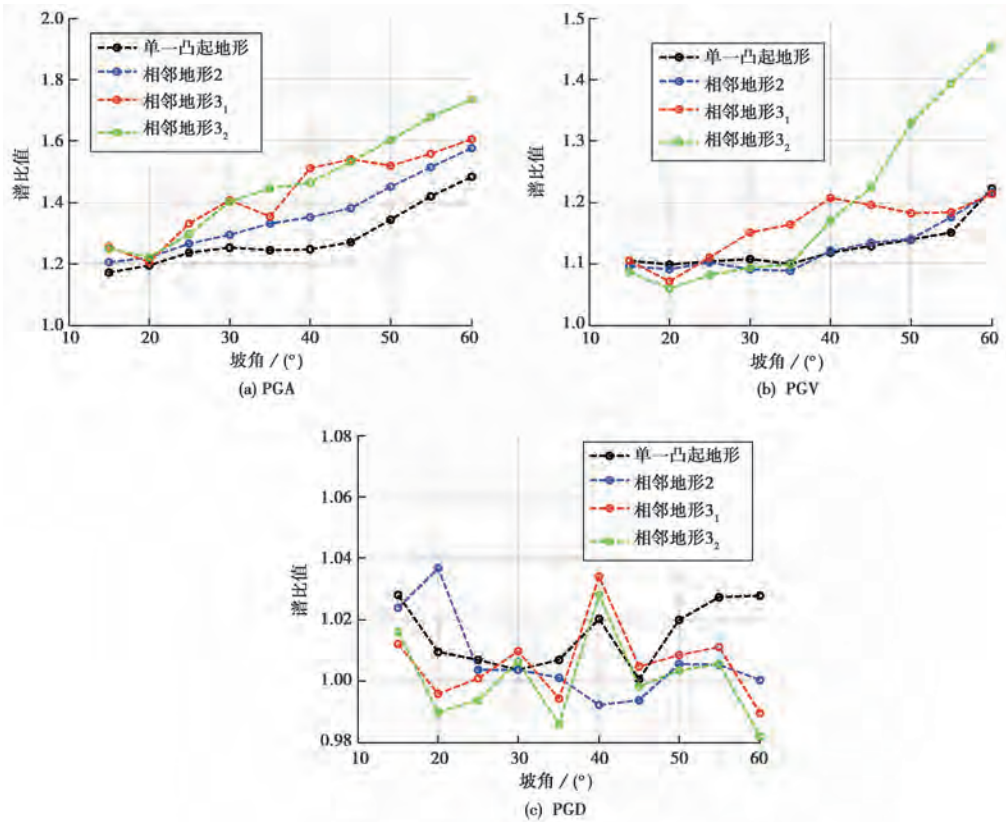


图9 地震动峰值放大倍数随坡度变化曲线

效应对地震动峰值位移影响不大,其对应的放大倍数也在1.0附近作微小变化。

4 相邻凸起间距对计算结果影响的分析

以2个凸起相邻地形模型(图1(b))为例,分析相邻地形之间的距离对计算结果的影响,将相邻凸起的间距分别取为50、100、400、800、2000m,输入地震动仍采用上述人工地震动时程。图10给出了不同间距模型中不同观测点谱比曲线。由图10可以看出,对于平台段中点(图1(b)中观测点6),当2个凸起之间的距离小于800m时,各周期点处谱比值基本大于单一凸起地形,说明相邻地形的放大效应大于单一凸起模型,而且当间距为100m时,谱比值最大达到1.99。当间距达到2000m时,相邻地形的放大效应基本与单一凸起地形接近,说明相邻地形的放大效应只在一定的凸起间距范围内起作用,但地形放大倍数与间距之间并未呈现出明显的单调递减的趋势。另外,相邻凸起间距变化,基本不改变谱比曲线形状,即不改变放大缩小的频段。对于左侧脚点(图1(b)中观测点3)而言,凸起间距对谱比曲线的影响规律类似于平台中点;对于相邻2个凸起之间坡底段中点(图1(b)中观测点10)而言,相邻凸起间距的变化导致了谱比曲线发生了显著改变,并且当间距高达2000m时,其谱比曲线与单一凸起相比仍有一定差异。

图11给出了平台中点(观测点6)、左侧脚点(观测点3)及凸起间坡底段中点(观测点

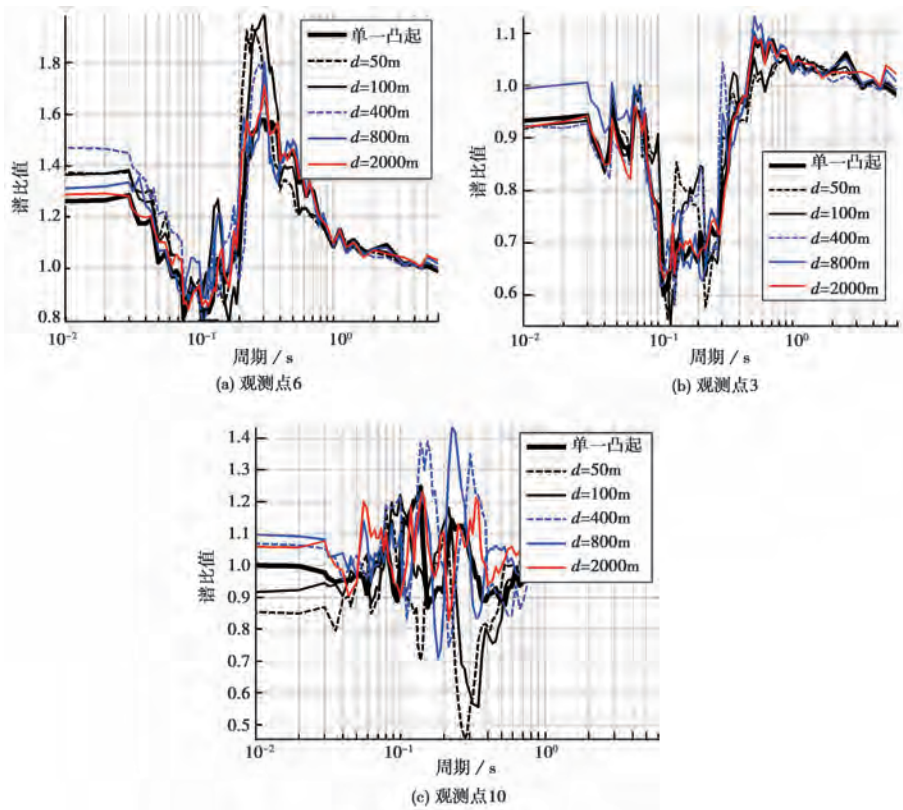


图 10 地表不同观测点谱比曲线

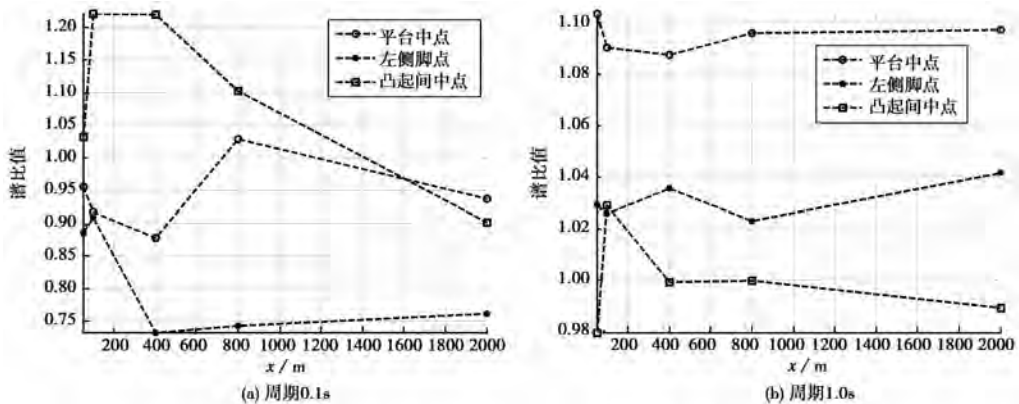


图 11 不同周期处谱比随凸起间宽度的变化

10)不同控制周期点 ($T=0.1s, T=1.0s$) 反应谱的放大倍数与相邻凸起间距之间的关系。从图 11(a)可以看出,对于 0.1s 地震动反应谱,其谱比最大值出现在凸起间宽度为 100m 时凸起平台段中点处,最大值为 1.22;相邻凸起间宽度在小于 800m 的情况下,左侧脚点及凸起间平台段中点的谱比都呈先增大后减小的趋势,而平台段中点的谱比呈先减小后增大的趋势。这是由于相邻地形的存在,地震波在传播过程中发生了复杂的反射与折射,对局部不规则地

形、不同观测点的影响产生差异;当相邻凸起间宽度大于 800m 时,各观测点谱比随凸起间宽度的变化不是十分敏感,说明宽度对高频波的影响仅在一定的宽度范围内较为显著。从图 11(b)所示的周期为 1.0s 时地震动反应谱的谱比与凸起间距之间的变化趋势可以看出,左侧脚点和平台段中点谱比随间距变化不大,而凸起间平台段中点的谱比在间距小于 400m 时呈先增大后减小的趋势,当间距大于 400m 时,对谱比随间距的变化影响不大。比较图 11(a)、11(b)可知,在间距相同的情况下,对平台中点及左侧脚点,相邻地形对低频地震动的放大倍数大于对高频地震动的放大倍数;而对凸起间平台段中点,相邻地形对高频地震动的放大倍数大于对低频地震动的放大倍数。

5 讨论与结论

基于显式动力有限元计算方法和透射人工边界处理方法,编制了求解局部不规则地形对地震波散射问题的并行有限元计算程序,以此为基础,通过在北京工业云计算中心开展大规模的数值模拟工作,探讨了相邻地形的存在对局部地形对地震动参数放大效应的影响。结果表明,与单一凸起地形相比,相邻地形的存在对地震动反应谱谱比曲线的形状影响不大,但是,其对地震动反应谱的放大倍数具有显著的影响,含多个相邻凸起的组合地形对地震动反应谱的放大倍数显著高于单一凸起地形。相邻凸起对地震动地形放大倍数的这种增大效应与地表观测点的位置以及地震动反应谱的周期相关,而且受凸起的坡度与相邻凸起间距的影响。随着相邻凸起之间距离的增加,这种增大效应逐渐减弱,组合凸起对地震动的放大效应逐渐接近单一凸起。

上述结果表明,由于相邻凸起之间存在着动力相互作用效应,这种效应会对地形对地震动参数的地形放大倍数产生不可忽视的影响(就本文所涉及的算例而言,在工程感兴趣的频率范围内,组合凸起对地震动的放大倍数可达到单一凸起放大倍数的 1.8 倍)。因此,在评估局部地形对地震动的影响效应时,或者在建立地形放大效应的经验预测模型时,应考虑这种相邻地形的动力相互作用效应对分析结果的影响。

参考文献

- 杜永军、刘殿魁、郭凤等,2009,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。
- 房营光,1995,相邻多个浅圆弧凹陷地形对平面 SH 波散射的级数解,应用数学和力学,16(7),615~624。
- 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,3(6),293~311。
- 郝明辉、张郁山,2014,凸起地形对地震动特性的影响分析,地震学报,36(5),883~894。
- 金丹丹、陈国兴、董非著,2014,多地貌单元复合场地非线性地震效应特征二维分析,岩土力学,35(6),1818~1824。
- 李小军、廖振鹏、关慧敏,1993,粘弹性场地地形对地震动影响分析的有限元-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),11~17。
- 梁建文、张郁山、顾晓鲁等,2003,圆弧形层状凹陷地形对平面 SH 波的散射,振动工程学报,16(2),158~165。
- 刘殿魁、曹新荣、崔志刚,1998,多个半圆形凸起地形对平面 SH 波散射,固体力学学报,19(4),178~185。
- 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。
- 刘晶波、杜修力,2005,结构动力学,北京:机械工业出版社。
- 吕晓棠、刘殿魁,2006,SH 波入射时半圆形凸起及凹陷地形的地震动,地震工程与工程振动,26(5),14~20。
- 荣楠水、李小军,2007,局部地形对入射 P 波谱特性的影响分析,西北地震学报,29(4),297~302。

- 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。
- 袁晓铭、廖振鹏, 1996, 任意圆弧形凸起地形对平面 SH 波的散射, 地震工程与工程振动, **16**(2), 1~13。
- 张郁山、赵凤新, 2014, 基于小波函数的地震动反应谱拟合方法, 土木工程学报, **42**(1), 70~81。
- 中华人民共和国建设部, 2010, 建筑抗震设计规范 GB50011-2010, 21, 北京: 中国建筑工业出版社。
- Andrews D J, 1986, Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, in Earthquake Source Mechanics, ed Das S et al, 259~268, Washington, DC: American Geophysical Union.
- Assimaki D, Jeong S, 2013, Ground-motion observations at Hotel Montana during the *M*7.0 2010 Haiti earthquake: Topography or soil amplification, Bull Seism Soc Am, **103**(5), 2577~2590.
- Borcherdt R D, 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull Seism Soc Am, **60**, 29~61.
- Fuyuki M, Matsumoto Y, 1980, Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at trench, Bull Seism Soc Am, **70**, 2051~2069.
- Ge Z X, Chen X F, 2008, An efficient approach for simulating wave propagation with the boundary element method in multi layered media with irregular interfaces, Bull Seism Soc Am, **98**(6), 3007~3016.
- Yuan X M, Men F L, 1992, Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical Hill, Earthq Eng Struct Dyn, **21**, 1091~1098.
- Zhou H, Chen X F, 2006, An new approach to simulate scattering of SH waves by an irregular topography, Geophys J Int, **164**(2), 44~459.
- Zhou H, Chen X F, 2008, The localized boundary integral equation-discrete wave number method for simulating P-SV wave scattering by an irregular topography, Bull Seism Soc Am, **98**(1), 265~279.

Analysis of the adjacent terrain effect on the properties of ground motion

Hao Minghui Zhang Yushan

China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China

Abstract The explicit finite element analysis method combined with the artificial transmitting boundary theory is performed to evaluate the adjacent terrain effects on ground motion, and the influence of the distance between adjacent terrains on the topographical amplification effects is studied. The results show that: (1) Compared with the case of a single hill, the presence of adjacent hills has little effect on the shape of spectral ratio curve, but has significant effect on the value of spectral ratio, which is dependent on the locations of observation points. (2) The presence of adjacent hills has a greater effect on high-frequency ground motion, and with the increase of the distance between adjacent hills, such effect weakens gradually, and the effect of the composite topography combined with multiple hills on ground motion gradually approaches that of single hill.

Key words: Adjacent terrain Terrain effect The response spectrum of ground motion
Transmitting boundary