

DOI: 10.11779/CJGE201703009

基岩地形对地震动影响研究

李孝波, 薄景山, 王欣, 万卫

(防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 在理论分析基础上, 采用谱元法研究了基岩地形变化对地震动的影响。结果表明: ①基岩面上地震动强度大小与基岩面的产状、地震波入射方向等因素相关。地震波入射方向越接近基岩面切线方向, 基岩面上地震动强度越小; 越接近基岩面法线方向, 则越大。②基岩凸起地形的存在, 导致与凸起区相对应地表处的地震动强度减弱, 形成地震动强度相对减弱区; 基岩凹陷地形的存在, 导致与凹陷区域相对应地表处的地震动强度增强, 形成地震动强度相对增强区。③基岩地形陡度不同, 地震动强度相对变化区不同。基岩凸起地形作用下, 地震动强度相对减弱区是基岩凸起区的 1.13~1.69 倍, 具有随陡度增大而逐渐增大的趋势; 基岩凹陷地形作用下, 地震动强度相对增强区是基岩凹陷区的 0.5~1 倍, 具有随陡度增大而逐渐减小的趋势。④覆盖层厚度不同, 地震动强度相对变化区也不同。基岩凸起地形作用下, 地震动强度相对减弱区与基岩凸起区的比值具有随覆盖层厚度增大而逐渐增大的趋势; 基岩凹陷地形作用下, 地震动强度相对增强区与基岩凹陷区的比值具有随覆盖层厚度增大而逐渐减小的趋势。

关键词: 基岩地形; 地震动; 谱元法; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)03-0460-09

作者简介: 李孝波(1985-), 男, 博士, 主要从事强地震动数值模拟、场地地震反应分析等方面的研究。E-mail: xiaobolliem@sina.cn。

Effect of bedrock terrain on seismic ground motion

LI Xiao-bo, BO Jing-shan, WANG Xin, WAN Wei

(Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: Based on theoretical analysis, the spectral element method is used to study the effect of bedrock terrain on ground motion. The achievements are as follows: (1) The intensity of bedrock ground motion is related to bedrock occurrence, incident orientation of seismic wave and other factors. The incident orientation of seismic waves is closer to the tangent direction of bedrock surface, and the intensity is smaller. On the contrary, the incident orientation is closer to the normal direction of bedrock surface, and the intensity is stronger. (2) The presence of bedrock with convex terrain leads to weakening of the surface intensity of ground motion, and thus to the formation of the relative weakening zone of ground motion intensity. While, the presence of bedrock with concave terrain leads to strengthening of the surface intensity of ground motion, and thus to the formation of the relative enhancement zone of ground motion intensity. (3) Under different bedrock topographic dips, there are different relative variation zones of ground motion intensity. Under the action of the bedrock with convex terrain, the relative weakening zone of ground motion intensity is 1.13~1.69 times larger than the bedrock convex area, which increases gradually with the increase of bedrock topographic dip. Whereas, under the action of the bedrock with concave terrain, the relative enhancement zone of ground motion intensity is 0.5~1 times smaller than the bedrock concave area, which decreases gradually with the increase of bedrock topographic dip. (4) Under different cover layer thicknesses, there are different relative variation zones of ground motion intensity. Under the action of the bedrock with convex terrain, the ratio of the relative weakening zone ground motion intensity to the bedrock convex area increases gradually with the increase of cover layer thickness. However, under the action of the bedrock with concave terrain, the ratio of the relative enhancement zone of ground motion intensity to the bedrock concave area decreases gradually with the increase of cover layer thickness.

Key words: bedrock terrain; seismic ground motion; spectral element method; numerical simulation

0 引言

震害调查结果表明, 地表地形条件对建(构)筑

基金项目: 中国地震局教师科研基金项目(20150106); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(ZY20160101)

收稿日期: 2015-11-25

物震害程度影响明显,特别是在地形起伏变化较大的山区或丘陵地带,常易出现破坏程度显著不同的震害现象^[1]。1970年通海地震后,国内学者开始系统研究地表地形条件对震害程度的影响,结果表明:①不规则地形对地震动强度和震害程度的影响较大,一般可使PGA值增大30%~50%;②孤立突出山包或山梁顶部、陡坎上房屋的震害程度一般较平地上同类房屋的要重;③盆地地形的聚焦效应和边缘效应,不仅能显著增大地震动持时,还会明显放大地震动长周期分量,从而导致盆地内高层建筑、大跨桥梁等较长自振周期结构物的震害加重^[2-9]。

除地表地形条件外,基岩地形条件对震害的影响也备受关注。一般而言,基岩地形是指松散覆盖土层下基岩面高低起伏的状态,这种起伏往往由一般断裂、同生断裂、侵蚀面或剥蚀面等组成^[10]。已有研究表明,地震动反应分析过程中,除输入地震动特征对其有直接影响以外,基岩地形的影响也不容忽视^[11-13]。基岩介质动力特性与松散覆盖土层相差悬殊,基岩地形的变化很容易导致局部场地条件的改变,从而致使同一地震动作用下建(构)筑物震害程度的差异。

早在1970年,Dezfulian等就利用有限单元法研究过基岩凹陷地形对地震动的影响,认为倾斜基岩及其附近区域对应处的地震动深受基岩面形态的影响,影响程度与土层特性、土层厚度、基岩倾斜度以及输入地震动的特征有关,总的趋势是基岩倾斜度越小,峰值放大系数越大,地面震害越重^[14-15]。郝宪生等^[16]、彭一民等^[17]采用扩展SAP5程序研究了北京城区基岩凹陷地形对地震动的影响,认为基岩地形的起伏使地震波在传播过程中产生汇聚差异,在对地表地震动产生显著影响的同时,还与震害异常区空间分布相关性良好。郝宪生等^[10]同样采用扩展SAP5程序研究过徐州市埋藏基岩斜坡地形对地震动的影响,认为斜坡地形的存在,致使地震波偏向斜坡倾斜方向传播,不仅增加地表地震动的复杂度,还产生了不可忽视的竖向运动。Takannori等^[18]采用二维有限差分法,研究了SH波作用下玉田地区的地震动反应特征,认为基岩地形的变化对地表地震动强度和持时都具有一定影响。王余庆等^[19]采用三维FLUSH程序研究了马鞍山市雨山山脚附近埋藏倾斜基岩对水平地表地震动的影响,得出随着基岩埋藏深度的减小,地面峰值加速度逐渐增大、加速度反应谱形状由宽变窄的变化规律,反映了土层卓越周期由长变短的特点。Hao等^[20]利用1987~1988年中日合作研究的人工地震波资料,通过分析波形、频谱特征等,认为玉田低烈度异常区的出现与基岩凸起地形有关,且异常区的面积较基岩凸起区域大。楼梦麟等^[12]采用二维有限单元法,研究了基

岩面倾斜状况对地表地震动的影响,验证了基岩面起伏对地表地震动具有一定影响的观点,并认为当基岩面倾角不大于2°时,可以忽略这种影响。Laurenzano等^[21]采用二维谱元法,模拟了意大利Marche地区Treia市的地震动反应,并根据各点PGA值、阿里亚斯(Arias)强度和豪斯纳(Housner)谱强度的变化关系,探讨了Treia市不同地区地震动强度与基岩地形的相关性,结果表明地表地震动的强弱变化与基岩地形起伏有关,如基岩凹陷地形(向斜)具有汇聚、增强直达地震波前的作用,基岩凸起地形(背斜)则具有发散、削弱的作用。

此外,彭一民等^[17]、孙进忠等^[22]、万志清等^[11,23]还利用超声地震模型试验研究了北京地区基岩凹陷地形对地表地震动的影响,研究结果较好地解释了唐山地震中北京地区的震害异常现象,揭示了基岩凹陷地形对地表地震动影响的物理实质。

以上研究成果表明:①基岩地形的存在改变了地震波的射线路径,致使其在地表的汇聚或发散,从而形成地震动强度增强区或减弱区,并表现出不可忽视的竖向运动;②除地震动强度以外,地震动持时、频谱等地震动参数也受基岩地形的影响;③一定埋藏深度范围内,基岩地形对地震动的影响较浅层土的不均匀性更为显著,且与震害异常区空间分布的相关性良好。

然而,这些结论的得出大多基于定性分析,缺乏定量分析,理论价值不足。本文在已有研究成果基础上,首先通过对简单基岩地形模型的理论分析,探讨了基岩面产状、地震波入射方向对基岩面地震动强度的影响规律。然后,根据对基岩地形模型的谱元法分析,从地震动时程、地震动强度两方面,总结了基岩地形作用下地震动的变化特征。最后,通过改变基岩地形陡度和覆盖层厚度,定量研究了地震动强度变化区的范围和规律,从而对基岩地形作用下地震动的变化规律做出更加科学、合理地解释。

1 方 法

谱元法(spectral element method, SEM)属于广义有限元法,为一种建立在波动方程变分或弱形式理论基础,求解偏微分方程的数值计算方法^[24]。该法最早由Patera^[25]在求解Navier-Stokes方程数值解时提出。它将有限元法和伪谱法相结合,不仅具有有限元法处理复杂结构的几何灵活性,还具有伪谱法高精度和快速收敛的特性。谱元法的基本思想是首先将计算区域划分成有限个子域(单元),每个子域由若干不均匀分布配置点(节点)组成;然后,通过伪谱法技术

将每个子域的近似解表示成截断的正交多项式展开式, 形成谱单元; 最后, 采用 Galerkin 方法求解得到全局近似解, 从而完成区域内地震波传播过程的数值模拟^[26-33]。

李孝波等^[34]对谱元法理论进行了详细的介绍和总结, 本文不再赘述, 仅列出保证模拟精度和稳定性的条件。为保证模拟过程的合理、准确, 提高模拟结果精度, 要求在每个波长内至少包含 5 个 GLL 积分点^[32, 35], 即需模型单元尺寸、拉格朗日多项式阶数和传播介质最短波长之间满足如下关系^[36]:

$$d \leq \frac{n}{5} \lambda_{\min} \quad (1)$$

式中 d 为模型单元尺寸; n 为拉格朗日多项式的阶数, $4 \leq n \leq 8$; λ_{\min} 为传播介质最短波长。若选 Ricker 子波为震源时间函数, 则 $\lambda_{\min} = V_s / 2.5 f_p$, 其中 V_s 为介质中 S 波波速, f_p 为 Ricker 子波的峰值频率。

此外, 为保证计算过程的稳定。当采用 Newmark 积分方法时, 时间步长 Δt 的取值必须满足 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件^[36-37], 即

$$\Delta t \leq C [\Delta x / V_p]_{\min} \quad (2)$$

式中 Δx 为相邻两个 GLL 积分点间的距离; V_p 为介质中 P 波波速; C 为 CFL 条件数, 其值因多项式阶数的不同而不同, 且具有随 V_p / V_s 值增大而逐渐减小的趋势^[38]。

2 理论分析

同地表地形一样, 基岩地形形态也是千变万化。从几何形态上来看, 主要分为 3 种: 凸起地形、凹陷地形和水平地形 (图 1)。其中, 凸起地形和凹陷地形可认为由一系列不同倾向的倾斜基岩面组合而成, 水平地形则为倾斜基岩面的一种特例。因此, 可将凸起地形 (图 2 中虚线) 简化为 3 个产状不同的基岩面 (图 2 中实线) R_1 , R_2 和 R_3 , 其中 R_1 , R_2 为倾向相反、倾角相同的倾斜基岩面, R_3 为水平基岩面, R_1 , R_2 与水平面的夹角为 α , β , $0 < \alpha, \beta < 180^\circ$, 且满足 $\beta = 180^\circ - \alpha$ 。

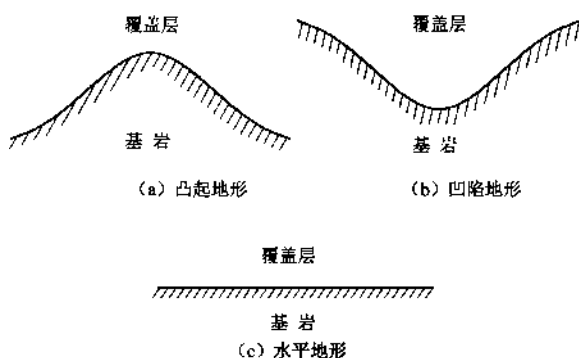


图 1 基岩地形的基本形态

Fig. 1 Basic forms of bedrock terrain

为研究基岩地形对地震动的影响, 探讨一定地震输入作用下, 基岩面地震动强度与基岩面倾向、倾角之间的变化关系。假定图 2 中地震波入射方向与水平面夹角为 i ($0 \leq i \leq 180^\circ$), 地震波入射强度为 I_0 , R_1 , R_2 , R_3 面接收波强度分别为 I_1 , I_2 , I_3 , 则易得

$$I_1 = I_0 \sin(i - \alpha) \quad (3)$$

$$I_2 = I_0 \sin(i - \beta) \quad (4)$$

$$I_3 = I_0 \sin i \quad (5)$$

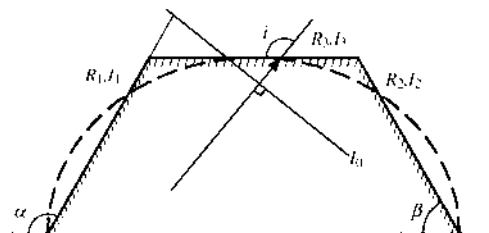


图 2 理论分析模型

Fig. 2 Theoretical analysis model

可以看出, 在输入地震波强度一定的情况下, I_1 , I_2 , I_3 值的大小取决于 i , α 和 β 三者之间的变化关系。例如, 在式 (5) 中, $i \rightarrow 0$ 时, $I_3 \rightarrow 0$, $i \rightarrow 90^\circ$ 时, $I_3 \rightarrow 1$, 表明随着地震波入射方向与基岩面切线方向夹角的逐渐增大, 基岩面上地震动强度逐渐越大。此外, 根据式 (3)、(5) 有, $i < 90^\circ + \alpha/2$ 时, $I_1 < I_3$; $i = 90^\circ + \alpha/2$ 时, $I_1 = I_3$; $i > 90^\circ + \alpha/2$ 时, $I_1 > I_3$ 。同理, 根据式 (4)、(5) 有, $i < 90^\circ + \beta/2$ 时, $I_2 < I_3$; $i = 90^\circ + \beta/2$ 时, $I_2 = I_3$; $i > 90^\circ + \beta/2$ 时, $I_2 > I_3$ 。这都表明基岩面上不同部位地震动的大小, 随地震波入射方向与基岩面倾角间关系的不同而不同。

值得注意的是, 相对于基岩凸起地形, 基岩凹陷地形只是改变了倾斜基岩面的倾向。因此, 所得结论同样适用于基岩凹陷地形。总的来说, 基岩面上地震动强度的大小与基岩面产状、地震波入射方向等因素相关。

3 数值分析

理论分析虽能较好反映研究问题的本质特征, 但其对模型尺寸、边界条件以及计算参数选取的要求较高, 在数学计算上存在一定的限制, 常只能用于简单、规则物理模型的定量分析。数值分析是理论分析的补充, 它适应性强、应用范围广, 在模型准确、参数合理的基础上能得到较为可靠的计算结果。因此, 接下来将通过基岩地形模型的谱元法计算, 总结分析基岩地形条件下地震动的变化特征与规律。

3.1 计算模型

为便于对比分析, 分别建立如图 3, 4 的计算模型, 其中基岩面的形状由标准椭圆方程 $x^2/a^2 + z^2/b^2 = 1$ 决定, 其它相关参数如图所示。若取椭圆长半轴

$w=400\text{ m}$, 短半轴 (最大凸起高度或凹陷深度) $d=200\text{ m}$, 则基岩地形的陡度 $d/w=0.5$ 。此外, 在每个模型的表面均设置有 49 个横向间隔为 50 m 的计算点, 计算点的具体位置如图中黑色小三角形所示, 其中基岩凹凸界面对应于点 17 与点 33 之间的范围。

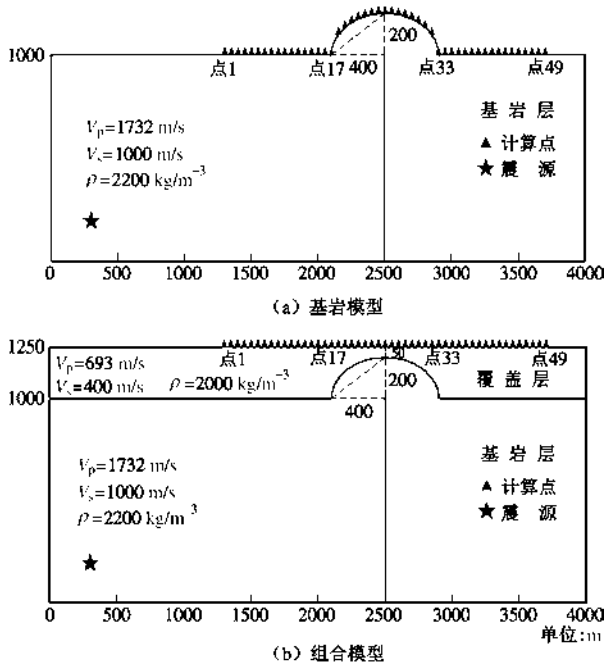


图 3 基岩凸起地形模型

Fig. 3 Bedrock convex terrain model

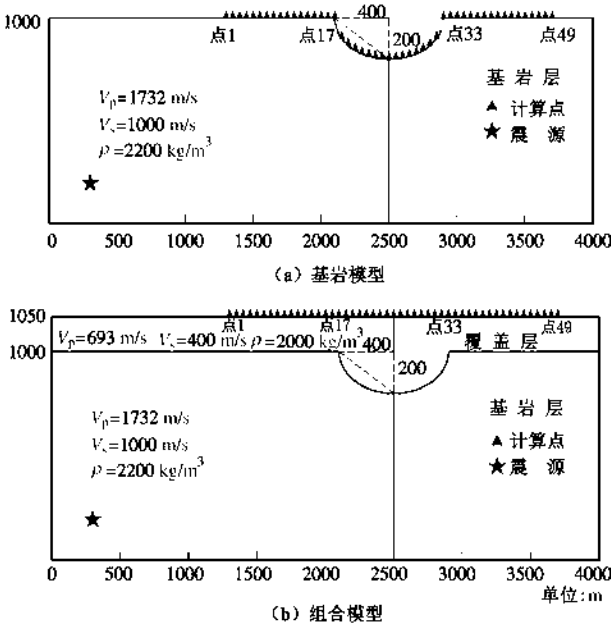


图 4 基岩凹陷地形模型

Fig. 4 Bedrock concave terrain model

采用二维谱元法进行模拟, 震源均设定为位于模型 $(300\text{ m}, 300\text{ m})$ 处 (图中五角星标记处) 的双力偶点源。震源子波选用 Ricker 子波, 峰值频率 $f_p=6\text{ Hz}$, 截止频率 $f_c=15\text{ Hz}$ 。输入 P-SV 型地震波, 各计算点同时记录水平和垂直方向上的地震动加

速度值, 各点震源距随着点号的增大而逐渐增大。

模型单元尺寸与时间步长的选取按式 (1)、(2) 进行。其中, 图 3 中基岩模型与组合模型的单元数分别为 8400 个和 11130 个; 图 4 中分别为 6300 个和 9030 个。每个模型采用相同的边界条件, 即上边界为自由边界, 左、右和下边界均为完美匹配层吸收边界。计算时间步长 0.0003 s , 计算总时长 15 s 。

3.2 地震动时程

基岩凸起地形模型中各计算点加速度时程如图 5 所示。可以看出, 在基岩模型中, 水平向加速度值在点 17 与点 25 之间明显偏小, 而垂直向上的值除在点 17 附近有一定突变外, 其余各点的变化都较为平缓; 组合模型中, 各点的波形不仅持续时间较长, 还包含有较为丰富的面波成份。此外, 组合模型中水平、垂直两方向上的加速度时程值, 在与基岩凸起地形对应区域的值都明显偏小, 且偏小的范围较基岩凸起区大。

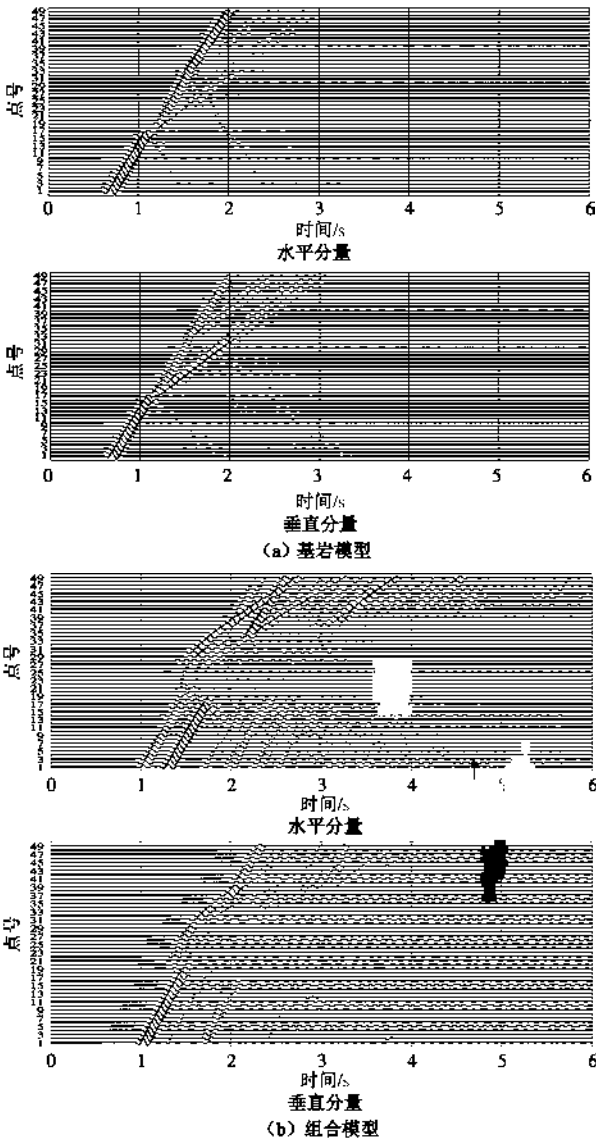


图 5 基岩凸起地形模型的加速度时程图

Fig. 5 Acceleration versus time curve of bedrock convex terrain model

基岩凹陷地形模型中各计算点的加速度时程如图 6 所示。可以看出,除部分点的加速度值有明显增大以外,其余各点的值都遵循随震源距增大而逐渐减小的变化规律。其中,基岩模型中水平、垂直分量的值在点 17 附近都有一定的增大;组合模型中,水平分量的值在点 18 与点 31 之间明显增大,垂直分量的值则在点 21 与点 31 之间明显增大,增大区域的范围较基岩凹陷区域小。此外,组合模型波形的持续时间较基岩模型长,且同样包含较为丰富的面波成份。

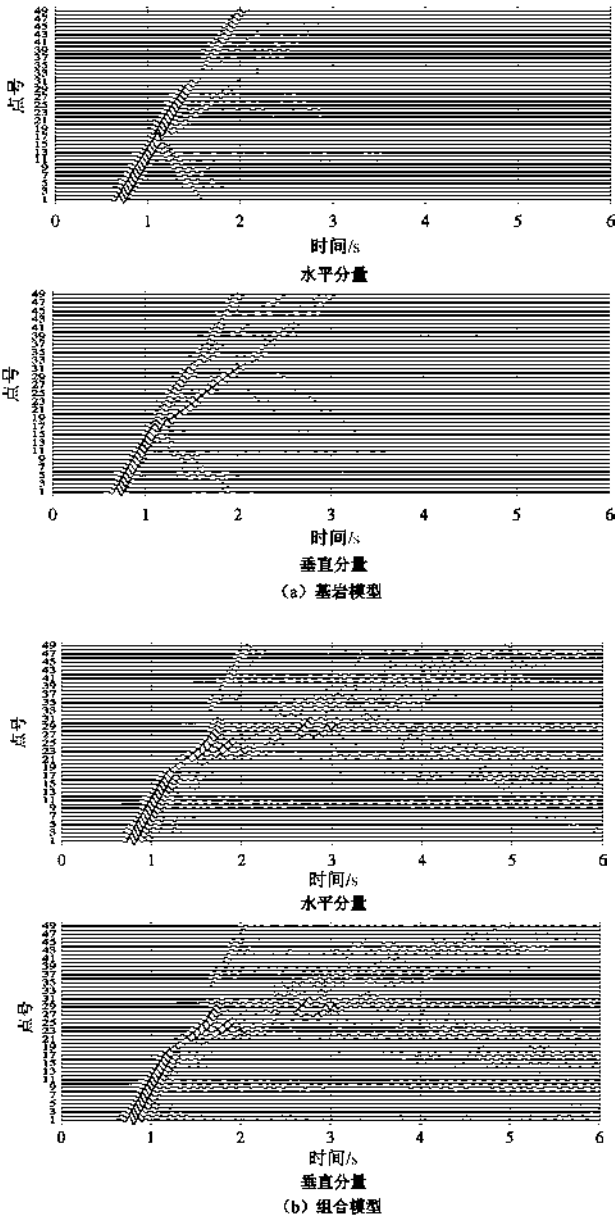


图 6 基岩凹陷地形模型的加速度时程图

Fig. 6 Acceleration versus time curve of bedrock concave terrain model

综上所述,可以得出:①基岩凸起或凹陷地形的存在,都对基岩面和地表面上地震动强度产生一定影响,但影响程度各异;②基岩凸起地形的存在,常会

导致基岩面和地表面上对应区域的地震动强度降低,降低的范围较凸起区大,而基岩凹陷地形的存在,则常会导致地震动强度增大,增大的范围较凹陷区小;③基岩面上覆盖层的存在,不仅增加了地震动持续时间,还包含了丰富的面波成份。

3.3 地震动强度

表征地震动强度的指标众多,本文选用地震动峰值加速度。地震动峰值加速度又称 PGA,常用于表征地震作用的强弱程度,为进行抗震设防分区的重要指标之一。

基岩凸起地形模型中各点 PGA 值的变化关系如图 7 所示。对于基岩模型,两个方向的 PGA 值在基岩面起伏处(点 17、点 33 附近区域)都有一定变化,但水平方向的变化幅度尤为明显,且具有先减后增的变化趋势。对于组合模型,由于覆盖土层的存在,两个方向 PGA 值的变化趋势基本相同,且在点 17 与点 38 之间都出现了变化平缓、范围大于基岩地形凸起区域的地震动强度相对减弱区。减弱区内的地震动强度为其邻近区域的 0.7~0.77 倍。

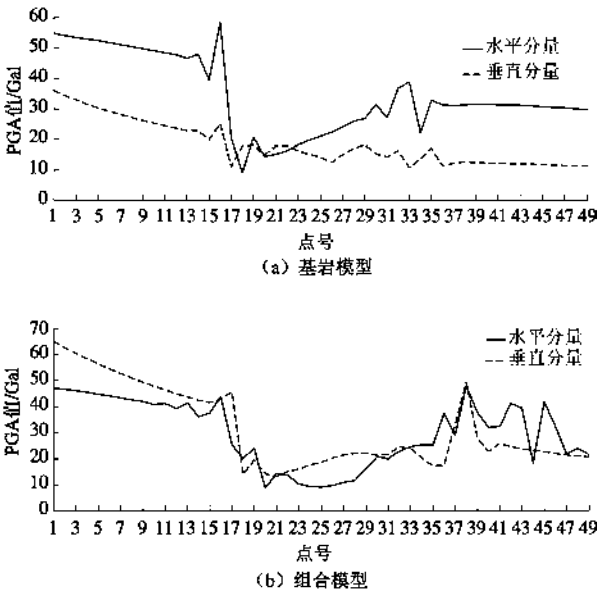


图 7 基岩凸起地形模型 PGA 变化图

Fig. 7 Variation of PGA values of bedrock convex terrain model

基岩凹陷地形模型中各点 PGA 值的变化关系如图 8 所示。对于基岩模型,两个方向的 PGA 值在基岩面起伏处也都有一定变化,但水平方向的变化幅度尤为明显,且具有先增后减的变化趋势。对于组合模型,由于覆盖土层的存在,两个方向 PGA 值的变化趋势也基本相同,且都形成了一定范围的地震动强度相对增强区。增强区内的地震动强度为其邻近区域的 1.45~2.63 倍。

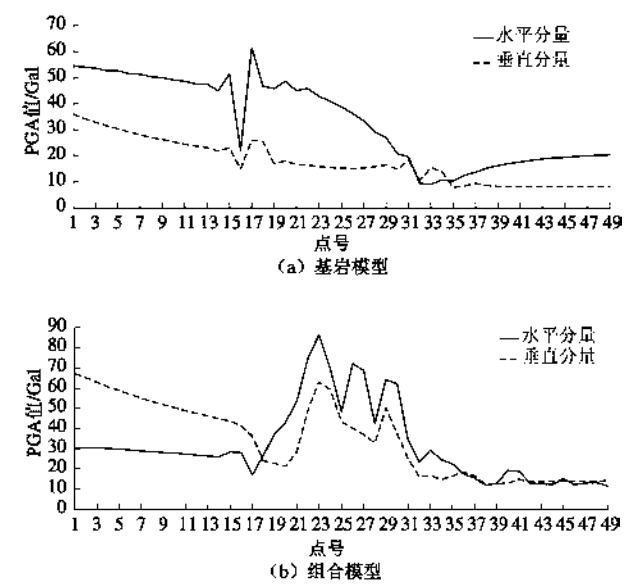


图 8 基岩凹陷地形模型的 PGA 值变化图

Fig. 8 Variation of PGA values of bedrock concave terrain model

通过以上分析可以得出,同一震源发出的地震波,在不同基岩地形作用下,基岩面和地表面上输出波的形态和强度各不相同。其中:

(1) 基岩面上地震动强度的分布受基岩地形和地震波入射方向的控制。与理论分析结果一致,地震波入射方向越接近基岩面切线方向,基岩面上地震动强度越小;越接近基岩面法线方向,基岩面上地震动强度越大。

(2) 与垂直分量相比,基岩面上地震动水平分量强度和变化幅度受基岩地形起伏变化的影响较大。

(3) 于覆盖土层的存在,改变了地震波的射线路径,使其在传播过程中发生多次折射、反射和透射,造成地震波在地表的汇聚或发散,形成地震动强度相对增强区或减弱区,区内地震动强度在两个方向上的变化趋势基本一致。

(4) 震动强度相对减弱区与基岩凸起地形相对应,增强区与基岩凹陷地形相对应;减弱区的范围较凸起区大,增强区的范围较凹陷区小。

3.4 影响范围分析

前述地震动强度减弱(增强)区与基岩凸起(凹陷)区大小关系的比较,主要基于陡度 $d/w=0.5$ 时的情况。接下来将通过改变陡度的大小,探讨多种基岩地形作用下地震动强度范围的变化规律。以图 3, 4 为基础,保持椭圆地形宽度不变,改变最大凸起高度或凹陷深度,分别建立陡度 $d/w=0.2, 0.8, 1.0$ 和 1.5 的基岩凸起或凹陷地形模型。

表 1, 2 中分别列出了不同陡度作用下,基岩凸起、凹陷地形模型中地震动强度相对减弱、增强区的范围。表中,基岩凸起、凹陷区的范围均为 $2w$, PGA 最小

值或最大值的位置与凸起或凹陷的顶点位置相关,规定其位于顶点右侧区域时为正,位于顶点左侧区域时为负。

表 1 基岩凸起地形模型中不同陡度下地震动强度相对减弱区的范围

Table 1 Ranges of relative weakening zone of ground motion intensity under different bedrock topographic dips for bedrock convex terrain model						
序号	陡度	基岩凸起区范围	相对减弱区范围		PGA 最小值位置	
			水平	垂直	水平	垂直
1	0.2	$2w$	$2.25w$	$2.25w$	$-0.875w$	$-0.875w$
2	0.5	$2w$	$2.75w$	$2.625w$	$-0.625w$	$-0.5w$
3	0.8	$2w$	$2.875w$	$2.875w$	$-0.125w$	$-0.5w$
4	1	$2w$	$3.25w$	$3w$	$-0.375w$	$-0.5w$
5	1.5	$2w$	$3.25w$	$3.375w$	$-0.375w$	$-0.375w$

表 2 基岩凹陷地形模型中不同陡度下地震动强度相对增强区的范围

Table 2 Ranges of relative enhancement zone of ground motion intensity under different bedrock topographic dips for bedrock concave terrain model						
序号	陡度	基岩凹陷区范围	相对增强区范围		PGA 最大值位置	
			水平	垂直	水平	垂直
1	0.2	$2w$	$2w$	$1.875w$	$-0.625w$	$-0.625w$
2	0.5	$2w$	$1.875w$	$1.75w$	$-0.25w$	$-0.25w$
3	0.8	$2w$	$1.75w$	$1.625w$	$0.25w$	$0.25w$
4	1	$2w$	$1.25w$	$1.5w$	$0.625w$	$0.5w$
5	1.5	$2w$	w	$1.125w$	w	$0.875w$

同理,从表 2 中可以看出,不同陡度的基岩凹陷地形模型,两个方向上地震动强度增强区的范围都小于基岩凹陷区。两者的比值在 $0.5\sim 1$ 之间,且具有随陡度增大而逐渐减小的趋势。此外,不同陡度下,相对增强区内 PGA 最大值的位置,都在凹陷区内取得,其相对凹陷区顶点的位置随着陡度的不同而不同。

地震动强度相对减弱(增强)区范围除受基岩地形陡度影响以外,覆盖层厚度变化的影响也不容忽视。表 3, 4 中分别给出了不同覆盖土层厚度下,地震动强度相对减弱、增强区的范围。表中,覆盖层厚度在基岩凸起地形模型中为凸起区顶部与覆盖层表面的距离,在基岩凹陷地形模型中则为水平基岩面与覆盖层表面的距离。

从表 3 中可以看出,相对减弱区的范围,在两个方向上都具有随覆盖土层厚度增大而逐渐增大的趋势,与凸起区范围的比值在 $1.31\sim 1.63$ 之间,减弱区内 PGA 最小值都在基岩凸起区的左侧区域出现。同理,在表 4 中可以看出,相对增强区的范围,在两个

方向都具有随覆盖土层厚度增大而逐渐减小的趋势，与凹陷区的比值在 0.5~1 之间，增强区内 PGA 最大值出现的位置也随覆盖层厚度的改变而变化，但总体具有由凹陷区左侧区域向右侧区域移动的特征。

表 3 基岩凸起地形模型中不同覆盖层厚度下地震动强度相对减弱区的范围

Table 3 Ranges of relative weakening zone of ground motion intensity under different cover layer thicknesses for bedrock convex terrain model						
序 号	覆盖层 厚度/m	基岩凸起 区范围	相对减弱区范围		PGA 最小值位置	
			水平	垂直	水平	垂直
1	30	2w	2.75w	2.625w	-0.375w	-0.875w
2	50	2w	2.75w	2.625w	-0.625w	-0.5w
3	100	2w	2.875w	2.75w	-0.5w	-0.5w
4	150	2w	3w	2.875w	-0.125w	-0.25w
5	200	2w	3.125w	3w	-0.5w	-0.375w
6	300	2w	3.25w	3.125w	0	-0.25w

表 4 基岩凹陷地形模型中不同覆盖层厚度下地震动强度相对增强区的范围

Table 4 Ranges of relative enhancement zone of ground motion intensity under different cover layer thicknesses for bedrock concave terrain model						
序 号	覆盖层 厚度/m	基岩凹陷 区范围	相对增强区范围		PGA 最大值位置	
			水平	垂直	水平	垂直
1	30	2w	2w	1.875w	-0.375w	-0.25w
2	50	2w	1.875w	1.75w	-0.25w	-0.25w
3	100	2w	1.75w	1.625w	-0.125w	0
4	150	2w	1.625w	1.5w	0	0
5	200	2w	1.5w	1.375w	0.25w	0.25w
6	300	2w	1.25w	w	0.5w	0.5w

4 讨论与结论

本文在理论分析基础上，重点研究了基岩地形凹凸变化对基岩面和地表面地震动强度、分布范围的影响。主要结论如下：

(1) 理论分析表明，基岩面上地震动强度的大小与基岩面产状、地震波入射方向等因素相关。地震波入射方向越接近基岩面切线方向，基岩面上地震动强度越小；越接近基岩面法线方向，基岩面上地震动强度越大。

(2) 在基岩地形和覆盖土层的共同作用下，地震波的传播方向发生了改变，在传播过程中出现多次折射、反射和透射的同时，也造成地震波在地表的汇聚或发散，形成地震动强度相对增强区或减弱区。其中，地震动强度相对减弱区与基岩凸起地形相对应，增强区与基岩凹陷地形相对应；减弱区内的地震动强度为其邻近区域的 0.7~0.77 倍，增强区内的地震动强度

为其邻近区域的 1.45~2.63 倍。

(3) 基岩地形陡度不同，地震动强度相对变化区的范围不同。基岩凸起地形作用下，地震动强度相对减弱区较基岩凸起区大，两者的比值在 1.13~1.69 之间，且具有随陡度增大而逐渐增大的趋势；基岩凹陷地形作用下，地震动强度相对增强区较基岩凹陷区小，两者的比值在 0.5~1 之间，且具有随陡度增大而逐渐减小的趋势。

(4) 覆盖层厚度不同，地震动强度相对变化区的范围也不同。基岩凸起地形作用下，地震动强度相对减弱区为基岩凸起区的 1.31~1.63 倍，具有随覆盖层厚度增大而逐渐增大的趋势；基岩凹陷地形作用下，地震动强度相对增强区为基岩凹陷区的 0.5~1 倍，具有随覆盖层厚度增大而逐渐减小的趋势。

总的来说，基岩地形变化对地震动的影响是客观存在的。因此，在场地震反应分析中，基岩地形的影响是不能忽视的，特别是在对震害异常现象形成机理的研究中尤其需要注意。从某种程度上说，本文的地震动强度相对减弱（增强）区与地震低（高）烈度异常区是相对应的。基岩地形的变化，不仅能影响异常区内地震波的传播规律和地震动强度大小，还对异常区的空间分布范围等有一定影响。例如，唐山地震中玉田低烈度异常现象的出现，除与该区良好的土层动力学特性有关以外，基岩地形特别是玉田北部基岩槽形洼地的存在也是导致异常现象出现的主要原因。

需要注意的是，本文的分析模型虽然较为简单，但所得结论中的一些基本规律，也适用于复杂基岩地形对地表地震动的影响问题。当前，场地地震反应分析中常以基岩地震动直接作为输入地震动，并忽略基岩地形对地震动的影响，这与本文的结论显然是不相符的。因此，建议在场地的地震动反应分析中，考虑基岩地形变化对地震动的影响，在更好地体现出震源特性、地震波传播路径特征等对地震动贡献的同时，也使地震小区划、场地地震动预测等工作更加具有现实意义。

参考文献：

[1] 王钟琪, 谢君斐, 石兆吉. 地震工程地质导论[M]. 北京: 地震出版社, 1983. (WANG Zhong-qi, XIE Jun-fei, SHI Zhao-ji. Introduction of earthquake engineering geology[M]. Beijing: Seismological Press, 1983. (in Chinese))

[2] BOORE D M. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves[J]. Bull Seism Soc Am, 1972, 62(1): 275 - 284.

[3] GELIL, BARD P Y, JULLIN B. The effect of topography on

- earthquake ground motion: a review and new results[J]. Bull Seism Soc Am, 1988, **78**: 42 - 63.
- [4] GRAVES R W, PITARKA A, SOMERVILLE P G. Ground-motion amplification in the Santa Monica area: Effects of shallow basin-edge structure[J]. Bull Seism Soc Am, 1998, **88**(5): 1224 - 1242.
- [5] KAWASE H. The cause of the damage belt in Kobe: the basin-edge effect, constructive interference of the direct S wave with the basin induced diffracted/Rayleigh waves[J]. Seismological Research Letters, 1996, **67**(5): 25 - 34.
- [6] PITARKA A, IRIKURA K, IWATA T, et al. Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake[J]. Bull Seism Soc Am, 1998, **88**(2): 428 - 440.
- [7] SOMERVILLE P G. Emerging art: earthquake ground motion[C]// DAKOULAS P, YEGIAN M, HOLTZ D, eds. Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III. Reston, Virginia, 1998: 1 - 38.
- [8] 王海云, 谢礼立. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, 2010, **53**(7): 1631 - 1638. (WANG Hai-yun, XIE Li-li. Effects of topography on ground motion in the Xishan park, Zigong city[J]. Chinese J Geophys, 2010, **53**(7): 1631 - 1638. (in Chinese))
- [9] 王海云. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用[J]. 地球物理学报, 2011, **54**(1): 137 - 150. (WANG Hai-yun. Amplification effects of soil sites on ground motion in the Weihe basin[J]. Chinese J Geophys, 2011, **54**(1): 137 - 150. (in Chinese))
- [10] 郝宪生, 彭一民, 王志良. 徐州市埋藏基岩斜坡对地震动的影响[J]. 地震地质, 1985b, **7**(3): 63 - 72. (HAO Xian-sheng, PENG Yi-min, WANG Zhi-liang. Effects of the underlying bedrock slope on seismic ground motion in the Xuzhou area[J]. Seismology and Geology, 1985b, **7**(3): 63 - 72. (in Chinese))
- [11] 万志清, 彭一民, 孙进忠. 埋藏基岩地形对地震波动影响的模拟研究[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 1993, **18**(1): 60 - 66. (WAN Zhi-qing, PENG Yi-min, SUN Jin-zhong. Modelling study of effects of underlying-bedrock topography on earthquake wave motion[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 1993, **18**(1): 60 - 66. (in Chinese))
- [12] 楼梦麟, 李遇春, 李南生, 等. 深覆盖土层地震反应分析中的若干问题[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2006, **34**(4): 427 - 432. (LOU Meng-lin, LI Yu-chun, LI Nan-sheng, et al. Some problems in seismic response analysis of soil layer with deep deposit[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, **34**(4): 427 - 432. (in Chinese))
- [13] 周红, 陈晓非. 凹陷地形对 Rayleigh 面波传播影响的研究[J]. 地球物理学报, 2007, **50**(4): 1182 - 1189. (ZHOU Hong, CHEN Xiao-fei. A study on the effect of depressed topography on Rayleigh surface wave[J]. Chinese J Geophys, 2007, **50**(4): 1182 - 1189. (in Chinese))
- [14] DEZFULIAN H, SEED H B. Seismic response of soil deposits underlain by sloping rock boundaries[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, **96**(6): 1893 - 1916.
- [15] DEZFULIAN H, SEED H B. Response of non-uniform soil deposits to travelling seismic waves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1971, **97**(SM1): 27 - 46.
- [16] 郝宪生, 彭一民, 王志良. 北京市区埋藏基岩凹陷地形对地震动的影响[J]. 地震学报, 1985a, **7**(3): 326 - 336. (HAO Xian-sheng, PENG Yi-min, WANG Zhi-liang. Effects of the depression in the topography of bedrock underlying Beijing on earthquake ground motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 1985a, **7**(3): 326 - 336. (in Chinese))
- [17] 彭一民, 孙进忠, 郝宪生. 北京凹陷地震反应的数学物理模拟[J]. 地质学报, 1987(4): 308 - 320. (PENG Yi-min, SUN Jin-zhong, HAO Xian-sheng. Mathematical and physical modelling of seismic response in the Beijing depression[J]. Acta Geologica Sinica, 1987(4): 308 - 320. (in Chinese))
- [18] TAKANNORI S, KAZUOH S, HIROAKI Y. Effects of topography on earthquake ground motions in Yutian area: forward modeling with 2-D finite difference method[C]// Fundamental Research on Microzonation Methodology. The Ministry of Education, Science and Culture, Japan and the State Seismological Bureau, China. University of Tokyo, Tokyo, 1990: 123 - 129.
- [19] 王余庆, 焦亦凡, 高艳平, 等. 埋藏倾斜基岩对水平地面地震反应的影响[C]// 第三届全国岩石动力学学术会议. 桂林, 1992. (WANG Yu-qing, JIAO Yi-fan, GAO Yan-ping, et al. The effects of underlying inclined bedrock on the seismic response of the upper ground[C]// The third National Conference on Rock Dynamics. Guilin, 1992. (in Chinese))
- [20] HAO X S, KAZUOH S, TAKANNORI S. Low damage anomaly of the 1976 Tangshan earthquake: an analysis based on the explosion ground motions[J]. Bull Seism Soc Am,

- 1994, **84**(4): 1018 - 1027.
- [21] LAURENZANO G, PRIOLO E, TONDI E. 2D numerical simulation of seismic ground motion: examples from the Marche region, Italy[J]. *Journal of Seismology*, 2008, **12**: 395 - 412.
- [22] 孙进忠, 彭一民, 赵鸿儒. 北京凹陷地震地面运动超声模拟[J]. *地震学报*, 1988, **10**(1): 98 - 108. (SUN Jin-zhong, PENG Yi-min, ZHAO Hong-ru. Supersonic modelling of earthquake ground motion in the Beijing depression[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1988, **10**(1): 98 - 108. (in Chinese))
- [23] 万志清. 城市地质中埋藏基岩对地震地面运动的影响: 北京凹陷超声地震模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1990. (WAN Zhi-qing. The effects of underlying bedrock appearing in urban geologic environment on seismic ground motion: ultrasonic seismic modelling of Beijing depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1990. (in Chinese))
- [24] 严珍珍, 张怀, 杨长春, 等. 汶川大地震地震波传播的谱元法数值模拟研究[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2009, **39**(4): 393 - 402. (YAN Zhen-zhen, ZHANG Huai, YANG Chang-chun, et al. The numerical simulation of seismic wave propagation by the spectral element method in Wenchuan great earthquake[J]. *Science China Earth Sciences*, 2009, **39**(4): 393 - 402. (in Chinese))
- [25] PATERA A T. A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion[J]. *Journal of Computational Physics*, 1984, **54**: 468 - 488.
- [26] 王童奎, 李瑞华, 李小凡, 等. 谱元法数值模拟地震波传播[J]. *防灾减灾工程学报*, 2007, **27**(4): 470 - 477. (WANG Tong-kui, LI Rui-hua, LI Xiao-fan, et al. Numerical spectral-element modeling of seismic wave propagation[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, **27**(4): 470 - 477. (in Chinese))
- [27] 王秀明, SERIANI G, 林伟军. 利用谱元法计算弹性波场的若干理论问题[J]. *中国科学(G辑): 物理学 力学 天文学*, 2007, **37**(1): 41 - 59. (WANG Xiu-ming, SERIANI G, LIN Wei-jun. Some theoretical problems of calculating elastic wave field by using the spectral element method[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2007, **37**(1): 41 - 59. (in Chinese))
- [28] 彭海阔. 基于谱元法的导波传播机理及结构损伤识别研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010. (PENG Hai-kuo. Research on spectral element method-based characteristics of guided wave propagation and damage identification in structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (in Chinese))
- [29] PRIOLO E, SERIANI G. A numerical investigation of Chebyshev spectral element method for acoustic wave propagation[C]// *Proceedings of the 13th IMACS Conference on Comparative Applied Mathematics*. Dublin, 1991: 551 - 556.
- [30] TESSMER E, KOSLOFF D. 3-D elastic modeling with surface topography by a Chebyshev spectral method[J]. *Geophysics*, 1994, **59**: 464 - 473.
- [31] MADAY Y, PATERA A T. Spectral element methods for the incompressible Navier-Stokes equations[M]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1989.
- [32] KOMATITSCH D, VILOTTE J P. The spectral-element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1998, **88**(2): 368 - 392.
- [33] KOMATITSCH D, LIU Q Y, TROMP J, et al. Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method[J]. *Bull Seism Soc Am*, 2004, **94**(1): 187 - 206.
- [34] 李孝波, 薄景山, 齐文浩, 等. 地震动模拟中的谱元法[J]. *地球物理学进展*, 2014, **29**(5): 2029 - 2039. (LI Xiao-bo, BO Jin-shan, QI Wen-hao, et al. Spectral element method in seismic ground motion simulation[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, **29**(5): 2029 - 2039. (in Chinese))
- [35] FACCIOLI E, MAGGIO F, PAOLUCCI P, et al. 2D and 3D elastic wave propagation by a pseudo-spectral domain decomposition method[J]. *Journal of Seismology*, 1997, **1**: 237 - 251.
- [36] CUPILLARD P, DELAVALD E, BURGOS G, et al. RegSEM: a versatile code based on the spectral element method to compute seismic wave propagation at the regional scale[J]. *Geophys J Int*, 2012, **188**: 1203 - 1220.
- [37] CHALJUB E, KOMATITSCH D, VILOTTE J P, et al. Spectral-element analysis in seismology[J]. *Advances in Geophysics*, 2007, **48**(7): 365 - 419.
- [38] BASABE J, SEN M. Stability of the high-order finite elements for acoustic or elastic wave propagation with high-order time stepping[J]. *Geophys J Int*, 2010, **181**: 577 - 590.