

# 基于数字高程模型的山谷地形效应分析\*

赵凤仙<sup>1,2</sup>, 郭明珠<sup>1</sup>, 胡海芹<sup>1,3</sup>, 郭云峰<sup>4</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 山东圣翰财贸职业学院, 山东 济南 250316;  
3. 华夏幸福基业股份有限公司, 北京 100125; 4. 北京城安建设工程检测有限公司, 北京 100124)

**摘要:** 采用 DEM 数据建立基于数字高程模型的三维有限元山谷地形模型, 研究了输入不同地震波情况下, 山谷地形不同监测点处的动力响应特性。数值模拟结果表明, 地形效应对地震动的振幅影响很大, 随高程增加振幅幅值不断增大; 山谷地形的顶部加速度峰值大于底部峰值, 地形的放大效应在顶部比底部明显; 同时, 存在地震波的行波效应, 表现为山谷顶部相对于山谷底部的滞后性; 山谷地形对高频段 ( $>10$  Hz) 的地震波存在滤波作用, 对地震波低频段 ( $2\sim5$  Hz) 的能量起到放大作用; 山谷地形跨度大小对场地地形效应的数值模拟结果表明, 当跨度减小时, 峰值加速度放大作用趋于明显, 即由地表引起的地形效应, 随着跨度的增大逐渐趋于平缓。

**关键词:** 地形效应; 有限元分析; 数值模拟; 数字高程模型

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)04-0598-07

## 0 前言

近年来, 我国地震频发, 其中震害较为严重的地区多为山区或者地形复杂的地带, 比如发生在四川省的汶川地震和芦山地震, 都引发了十分严重的灾害。强地震发生时, 局部地形会加重灾害的发生, 引起山体滑坡、塌陷、泥石流等次生地质灾害, 如汶川地震, 在很多山区形成了堰塞湖。《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 规定选择建筑场地时, 应注意避开不利地段 (软弱土、液化土、条状突出的山嘴、高耸孤立的山丘、陡坡、陡坎、河岸和边坡的边缘, 平面分布上成因、岩性、状态明显不均匀的土层); 当无法避开时应采取有效的措施。不同的地形对地震动的放大效应不同, 通过地震动力时程分析, 可以了解山谷地形条件对地震动的放大效应规律, 为该场地抗震设防设计提供地震动参数。

局部地形效应一般指相对较浅的近地表岩石或土壤对几乎垂直传播的体波的影响 (李翔等, 2012)。地震动的场地地形效应研究方法主要有 3 种: 地形台站观测、解析解和数值模拟。随着计算机的发展, 数值模拟得到广泛的应用。廖振鹏

(2008) 从行波角度研究小尺度三维地形效应, 结果表明输入水平地震作用时山顶的地震动比自由场地要放大 1~4 倍, 凹陷地形边缘也具有放大效应, 而底部地震动较小。车伟和罗奇峰 (2008) 利用显式有限元结合透射人工边界, 研究了典型山谷地形桥址对地震波传播的影响, 提出山谷的放大作用和山间跨度密切相关。丁海平等 (2013) 通过数值模拟, 研究不同坡角、不同 SV 波垂直入射时陡坎地形的影响, 结果表明场地表面垂直方向放大系数随着坡角的增大而增大。

以上研究采用的都是对拟定的地形模型进行分析, 本文利用地球科学数据共享中心提供的 DEM 数据 (姚丽等, 2002), 建立基于真实地形的三维有限元模型, 输入地震波对山谷地形进行数值模拟, 其结果较拟定模型更符合实际情况, 更具参考价值。

## 1 研究区地质背景

青川县处于四川盆地北部的边缘地带, 在四川、甘肃、陕西的交界处, 县城乔庄镇位于龙门山造山带和秦岭造山带的交汇部位, 零散地分布在乔庄河山谷复杂、地形南北向狭长地带。县城

\* 收稿日期: 2015-06-05.

北部属摩天岭构造带的中高山区，南部属于龙门山，总体上这个区域属于中高山深切山谷地形地貌。在乔庄镇及周围地区，有 3 条断裂束，都属于青川—平武断裂的分支。

东山斜坡在县城乔庄河的左岸，山体东西长 350 m，较为单薄，山脊较窄，最单薄的地方只有 2~3 m。坡脚底部高程为 778 m，附近其他相邻山峰高程大于 1 000 m，地形高差约 300 m，坡度一般为 35°~60°，局部区域有陡崖地貌特征。狮子梁山谷斜坡位于乔庄河右岸、青川县县城的西岸，整个斜坡长度为 1 450 m，南北向宽 400 m，山脚下高程约 850 m，最高点高程大于 1 000 m，高差大概 150 m，斜坡总体坡度为 30°~50°，出露地层主要有古生界志留系茂县群黄坪组下段，粉砂质千枚岩夹变质砂岩板岩，元古界震旦系水晶组白云质灰岩等。本区在汶川地震中遭受严重灾害，尤其是东山—狮子梁斜坡遭受劈裂，使处在山谷中的青川县居民的安全遭受威胁。局部场地地形主要包括山峰、山脊等凸起地形、山谷和沉积谷底等凹陷地形。

## 2 模型的建立及地震波输入

在 DEM 数据包中截取研究区数据。由于 DEM 数据是数字高程数据（廖振鹏，2008），只能在地质软件中显示其三维地形。目前没有专门的地质软件将地质模型直接进行有限元分析（吕悦军等，2008）。

赵芳（2013）采用 FWTools-2.0.6 软件包从地形遥感数据包中提取矢量数据，利用 convert\_lonlat2utm.pl 脚本进行批量转化，获得可被有限元软件识别的数据格式，由点扫描成线，由线生成面，再将面压印在三维实体上，从而建立有限元模型。这种方法步骤繁琐，对计算机要求较高，需要在 linux 终端中进行，在一般条件下较难实现。本文通过对数据提取、编辑，并利用 ANSYS 软件中的 APDL 语言进行编程，成功将 DEM 数据转化成有限元模型（车伟，罗奇峰，2008）。使用命令流自动建立模型，并且这种方法对计算机要求不高，普通计算机操作系统就能实现，为进行地震波数值模拟的工作者提供了一种行之有效的方法。具体技术路线流程如图 1 所示。

本文选取 25 m 精度的 DEM 数据。模型底部采

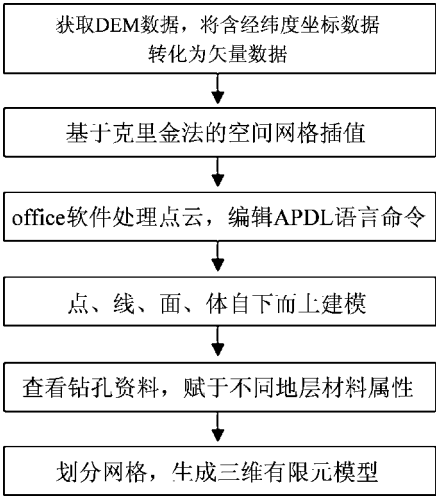


图 1 三维真实地形模拟建立流程图

Fig. 1 Flow diagram of the simulation establishment of the 3D realistic topography

用固定约束，四周施加粘弹性人工边界（赵芳，2013）。研究表明，在模型中输入地震波进行数值模拟时，要精确描述模型中波的传播，网格的尺寸应该小于输入波形最高频率对应的波长的 1/8~1/10。即

$$\Delta l \leq \left( \frac{1}{8} \sim \frac{1}{10} \right) \lambda. \tag{1}$$

式中， $\lambda$  是最高频率对应的波长，本文输入地震动属于汶川地震和芦山地震，两次地震的主频为 2~4 Hz。地震波传播最小值取 3 km/s，最高主频取为 4 Hz，根据公式，计算网格尺寸应小于 75 m。

数值模拟中，本构模型采用弹塑性模型，破坏准则采用适合岩土材料的 D-P 准则（赵密，2004）。区域内以彭灌杂岩体为主，上覆土层较浅，不考虑第四纪沉积物。由于缺少详尽的钻孔资料，因此建立沿深度各向同性的均匀地层场地模型，各地层岩性见表 1。

地层岩性	密度 $\rho$ /kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\mu$	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\psi/(^\circ)$	膨胀角 $\varphi/(^\circ)$
彭灌杂岩体	2 700	28.15	0.21	50.04	55	45
细砂岩	2 630	29.91	0.17	15.35	50	30
泥质灰岩	2 500	52.81	0.28	21.31	49	45
闪长岩	2 850	78.36	0.24	23.39	55	36

地震波分别选取汶川地震主震（卧龙台站）和芦山地震（宝兴台站）水平向地震记录。汶川地震台站记录数据时间步长为 0.01 s，水平单向最大峰值加速度为 957.59 gal，时刻在 13.46 s。芦山地震台站记录数据时间步长为 0.005 s，水平单向最大峰值加速度为 613.2 gal，时刻在 26.335 s。由于三维模型尺寸较大，进行地震时程分析占用较大的计算资源，并且计算时间较长，因此选取地震数据的强震部分作为有效地震动输入，采用 ANSYS 对模型进行动力时程分析（龚曙光，谢桂兰，2004）。

3 计算结果及分析

选取本区东山—狮子梁斜坡山谷地形剖面，左侧按照高程设置编号为 A、B、C 的 3 个监测点，右侧山坡设置 1~6 个监测点（图 2）进行地震动力时程分析。

取东山—狮子梁边坡坡面，在东山边坡侧高

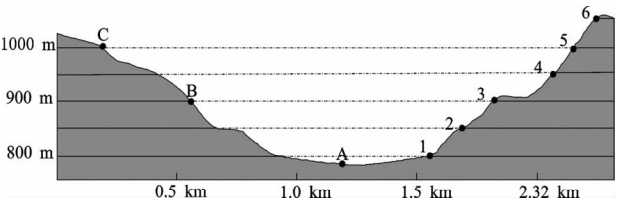


图 2 东山—狮子梁地形剖面图  
Fig. 2 Topographical profile graph of Dongshan-Shiziliang

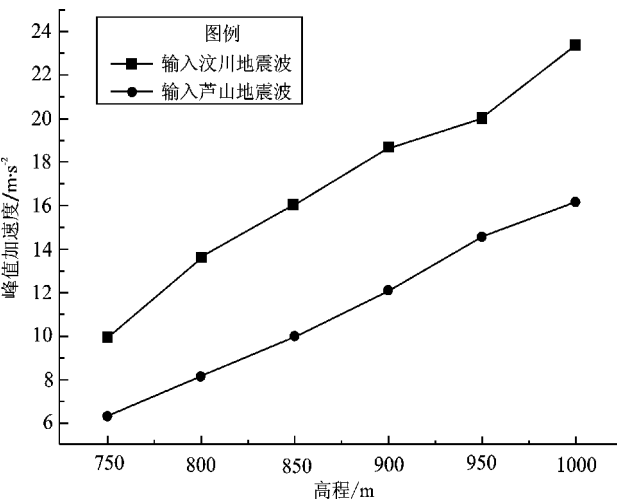


图 3 各监测点水平方向峰值加速度  
Fig. 3 Horizontal peak acceleration diagram of each monitoring point

程 800 m、900 m、1 000 m 处各取一点作为监测点，A、B、C 点分别为山谷底部、坡腰和顶部，取强震动时程部分进行分析。

3.1 不同地震波输入监测点峰值加速度分析

取右侧各个监测点的峰值加速度绘制加速度幅值（图 3）和不同监测点加速度放大系数对比（图 4），进行定量分析。发现幅值与地面高程表现出剪切特性，PGA 在竖直方向随高程增加而增大，到坡顶时达到最大。这可能是由于在山谷底部，地层对地震波的反射和折射作用，降低了地震能量，因而对地表的影响降低。

根据表 2 可以看出，输入地震动后监测点 PGA 放大系数范围 1~2.5 倍左右，最大放大系数比 PGD 偏小，说明山谷场地地形效应 PGD 大于 PGA。

3.2 不同地震波输入下监测点峰值位移分析

图 5 为输入地震动得到的计算模型的位移云图。如图所示，模型各个节点的位移随着高程的增加逐渐增大。

表 2 各个监测点峰值加速度放大系数

Tab. 2 Peak acceleration amplification factor of each monitoring point

输入地震波	监测点 1	监测点 2	监测点 3	监测点 4	监测点 5	监测点 6
汶川	1.043 6	1.427	1.677	1.952	2.096	2.446
芦山	1.037 0	1.339	1.631	1.975	2.381	2.645

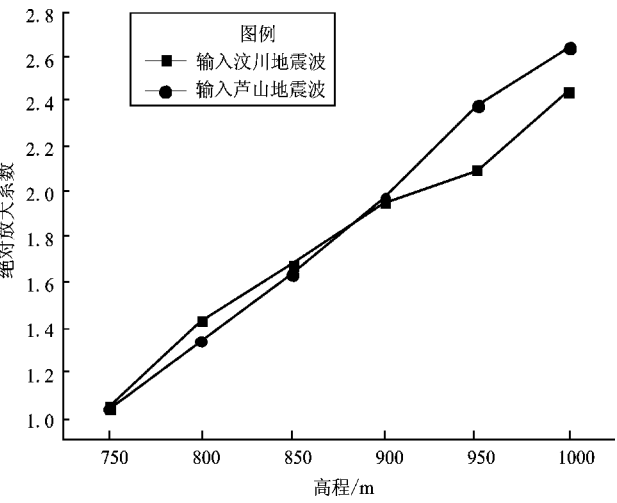


图 4 各监测点加速度放大系数对比  
Fig. 4 Comparison of amplification coefficient of each monitoring points

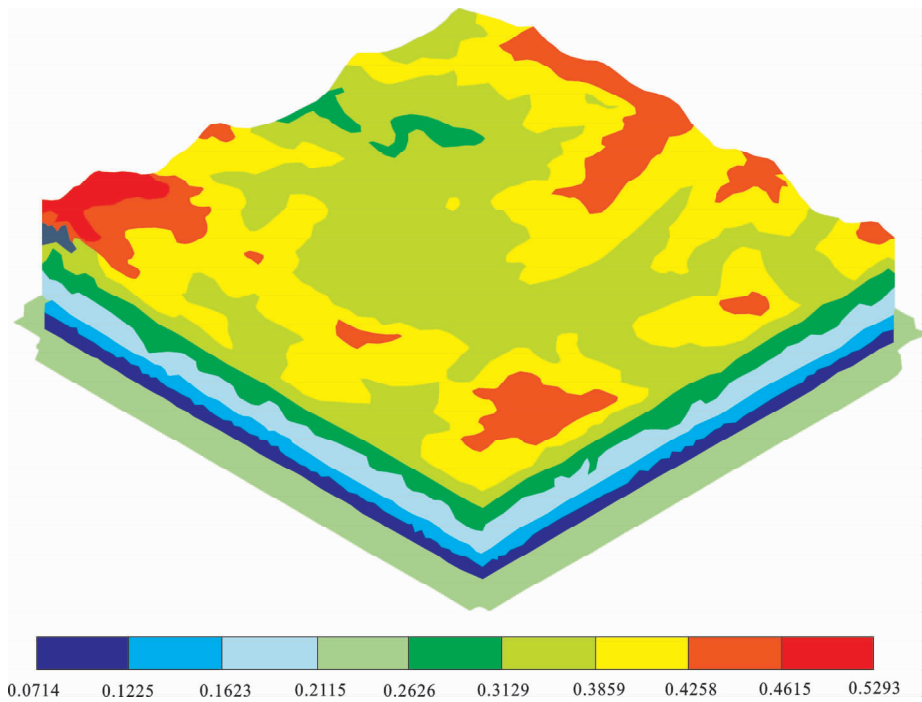


图 5 输入地震波计算的模型位移云图（单位：m）

Fig. 5 The displacement cloud of model computed by the inputting seismic wave (the unit is m)

从图 6a 可以看出，A 监测点水平方向 PGD 为 0.151 m，B 监测点为 0.312 m，C 监测点为 0.496 m。说明坡顶的位移对于河谷底部位移具有明显的放大效应，A 监测点和 C 监测点高程相差 200 m，C 点 PGD 是 A 点的 3.5 倍左右。由图 7a 可知，A 监测点水平方向 PGD 为 0.075 m，B 监测点为 0.124 m，C 监测点为 0.211 m，C 点 PGD 是 A 点的 3 倍左右。因此，地震动强度越大，地形效应越明显。

从图 6b 和图 7b 可以看出，3 个监测点的竖向

位移呈现随着高程的增加，峰值位移也增大的规律，并且各个监测点竖向 PGD 大概是水平 PGD 的 2/3，这也与抗震设计规范中竖向地震动是水平地震动的 2/3 相一致。

由图 6 可以看出，A、B、C 3 个监测点的时程曲线都相对延迟，这是由于地震波自底向上传播的时间效应不能忽略，因此表现为山谷顶部相对于山谷底部的滞后性，但是如图 7 可以看到延迟性并不明显。

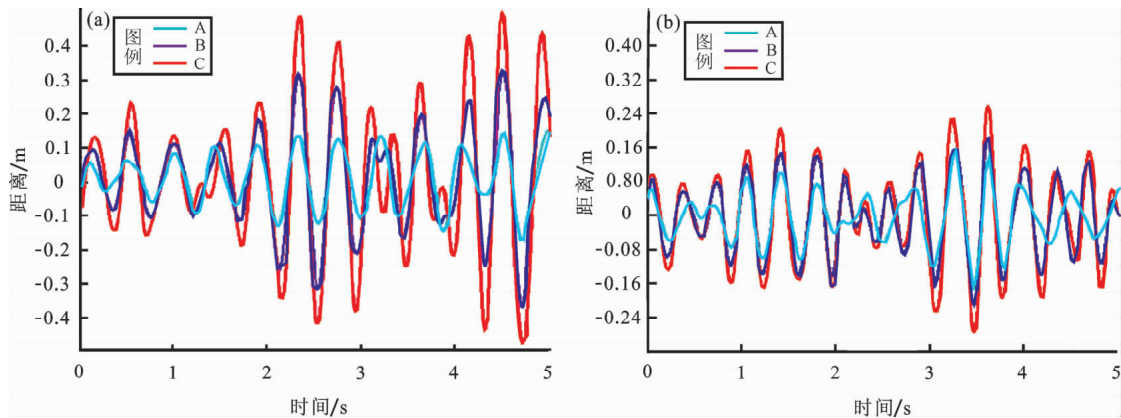


图 6 输入汶川地震波监测点水平 (a) 和竖向 (b) 方向位移时程曲线图

Fig. 6 Time history curves of the horizontal (a) and vertical (b) displacement of monitoring points after inputting Wenchuan seismic wave

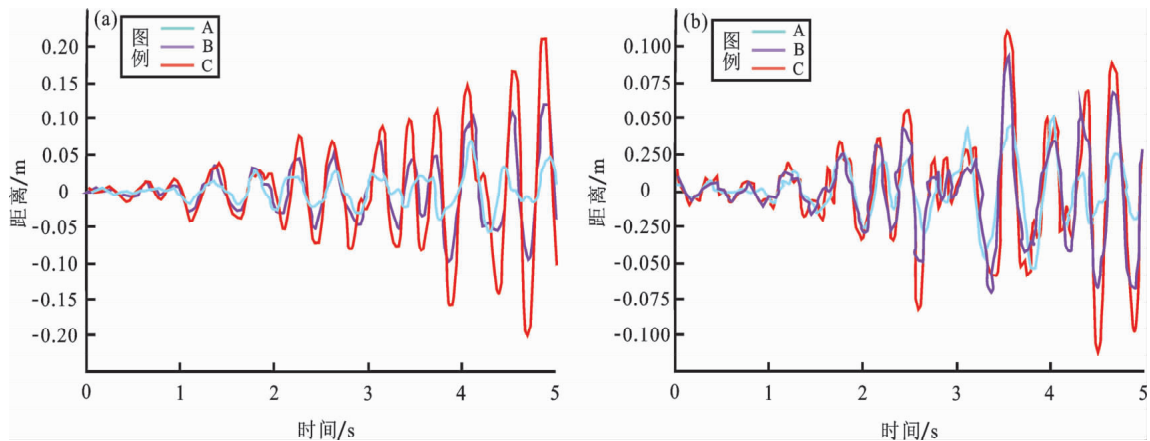


图7 输入芦山地震波监测点水平 (a) 和竖向 (b) 方向位移时程曲线

Fig. 7 Time history curves of the horizontal (a) and vertical (b) displacement of monitoring points after inputting Lushan seismic wave

### 3.3 不同地震波输入下监测点频谱特性分析

根据四川省有关地勘资料, 包括沉积层厚度和场地剪切波速等信息, 得到场地固有频率在 5.0 ~ 7.0 Hz 左右。汶川地震和芦山地震的频率范围相当, 输出地震动各个监测点频率范围变化不大, 都主要集中在 2 ~ 6 Hz 范围内。输出地震动频率值变化不大, 但傅氏谱值随着高程的增加, 变化很大。如图 8a 可看出, 输入汶川地震波, 得到 A、B、C 3 个监测点傅氏谱振幅幅值依次为 0.95、1.49、2.36。如图 10b 可看出输入芦山地震波, 得到 A、B、C 3 个监测点傅氏谱振幅幅值依次为 0.50、1.15、2.41。对比三个监测点傅氏谱峰值, 可知幅值放大倍数为 2 ~ 6 倍。因此, 受山谷地形

的影响, 地震动的频谱幅值发生较大变化。即山谷地形对高频段 (> 10) 的地震波存在滤波作用, 对地震波低频段 (2 ~ 5 Hz) 的能量起到放大作用。这是因为土体自身材料阻尼的存在, 能够吸收地震波一部分能量, 即对高频段的地震波存在滤波作用; 同时对地震波低频段的能量起到放大作用。3 个不同高程监测点振幅随高程增加幅值不断增大。

### 3.4 不同剖面监测点峰值加速度分析

取研究区两个不同跨度的剖面 (图 9), 进行分析。沿剖面, 每 50 m 高程取一个监测点, 共取 11 个点。绘制山间跨度为 2.69 km、3.30 km 时各个监测点的水平加速度放大系数对比图 (图 10)。

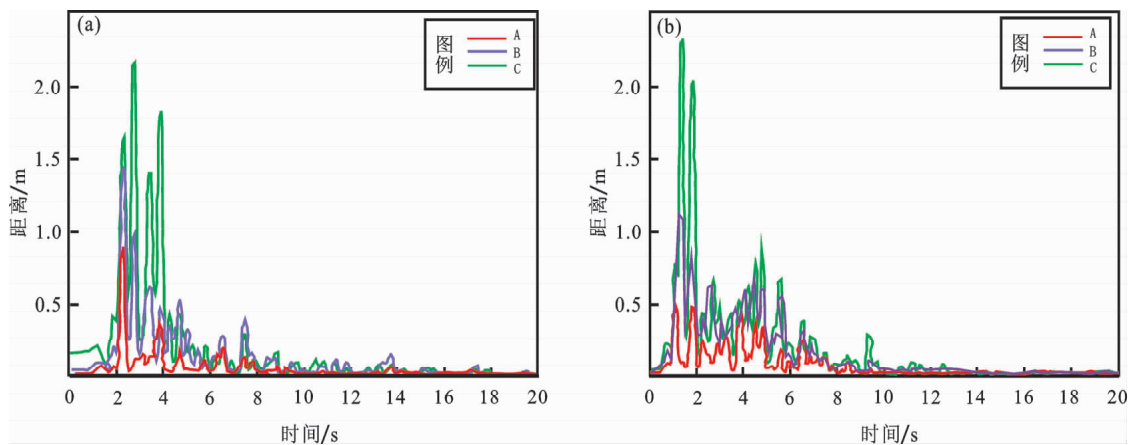


图8 输入汶川 (a) 和芦山 (b) 地震波后 3 个监测点傅氏谱图

Fig. 8 Fourier spectrums of three monitoring points after inputting Wenchuan (a) and Lushan (b) earthquake waves

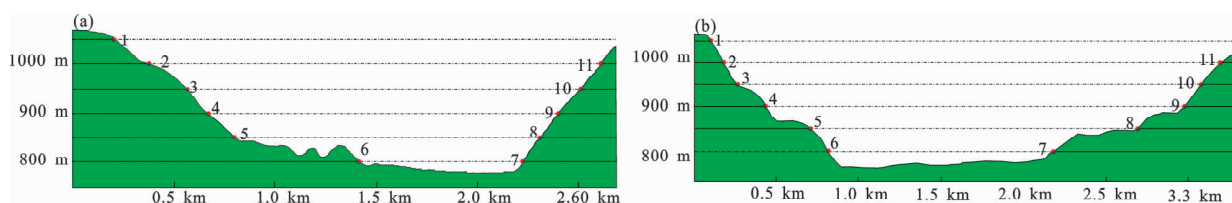


图9 剖面1 (a) 和剖面2 (b) 的示意图

Fig. 9 Sketch map of profile 1 (a) and profile 2 (b)

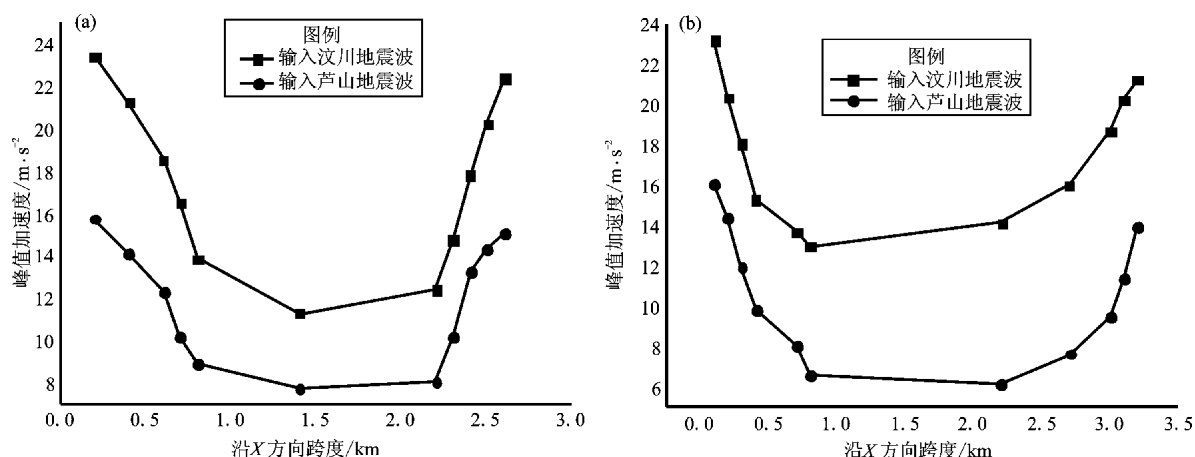


图10 剖面1 (a) 和剖面2 (b) 峰值加速度对比图

Fig. 10 Comparison of peak acceleration of profile 1 (a) and profile 2 (b)

分析山间跨度对地震动参数的影响,剖面2跨度比剖面1跨度大,并且剖面1左侧较缓,右侧坡度较大;而剖面2正好相反,左侧坡度较陡,右侧较缓。对比图10a和b可以发现,当跨度大时,峰值加速度的放大值比跨度较小的剖面的值小,即由地表引起的地形效应,跨度越大,地形效应越趋于平缓。这是由于随着跨度的增加,地震波能量耗散,并且在山谷之间的相互干涉中,地震波也会有所减弱。

## 4 结论

本文利用DEM数据,在有限元软件中建立四川地区东山—狮子梁山谷地形的三维有限元模型,输入此区域遭受的两次破坏性地震的地震动时程进行数值模拟,分析山谷地形具有代表性监测点的地震动力特性,初步得到如下结论:

(1) 山谷地形的顶部加速度峰值大于底部峰值,地形的放大效应在顶部比底部明显。同时,存在地震波的行波效应,表现为山谷顶部地震动相对于山谷底部的滞后性。

(2) 山谷地形对高频段的地震波存在滤波作用,同时对地震波低频段起到放大作用。地形效应对地震

动的振幅影响很大,随高程增加振幅幅值不断增大。

(3) 山谷地形跨度大小对场地地形效应的数值模拟结果表明,当跨度减小时,峰值加速度放大作用趋于明显。即由地表引起的地形效应,随着跨度的增大逐渐趋于平缓。

## 参考文献:

- 车伟,罗奇峰. 2008. 复杂地形条件下地震波的传播研究[J]. 岩土工程学报, 30(9): 1333-1337.
- 丁海平,朱容初,宋贞霞. 2013. 陡坎地形对地面运动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 33(5): 28-32.
- 龚曙光,谢桂兰. 2004. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 北京:机械工业出版社.
- 李翔,王金安,张少杰. 2012. 复杂地质体三维数值建模方法研究[J]. 西安科技大学学报, 32(6): 676-681.
- 廖振鹏. 2008. 工程波动导论第二版[M]. 北京:科学出版社.
- 吕悦军,彭艳菊,兰景岩等. 2008. 场地条件对地震动参数影响的关键问题[J]. 震灾防御技术, 3(2): 126-135.
- 姚丽,陈杰,窦丽华. 2002. 一种基于DEM数据的可视化数字地形绘制[J]. 北京理工大学学报, 22(3): 339-342.
- 赵芳. 2013. 基于谱元法的地震动地形效应研究[D]. 北京:北京工业大学.
- 赵密. 2004. 粘弹性人工边界及其与透射人工边界的比较研究[D]. 北京:北京工业大学.
- GB50011—2010. 建筑抗震设计规范[S].

## Research on Terrain Effect of Valley Based on Digital Elevation Model

ZHAO Fengxian<sup>1,2</sup>, GUO Mingzhu<sup>1</sup>, HU Haiqin<sup>1,3</sup>, GUO Yunfeng<sup>4</sup>

(1. *Beijing University of Technology, 100124, Beijing, China*)

(2. *Shandong Shenghan Finance and Trade Career Academy, Jinnan 250316, Shandong, China*)

(3. *Huaxia Happiness Base Industry, LTD, 100125, Beijing, China*)

(4. *Beijing Construction Engineer Detection Co. LTD, 100124, Beijing China*)

### Abstract

The remote sensing data is used to establish the 3D finite element valley terrain model based on digital elevation model. When inputting different seismic waves, the dynamic response characteristic of different monitoring point of valley terrain is studied. The numerical simulation results show that the topographic effect has the great influence on the amplitude of ground motion, and the amplitude increase with the increasing of elevation. The acceleration peak at the top of valley is greater than at the bottom of the valley, the topographic amplification effect on the top is obvious than that at the bottom. Meanwhile, there exist the traveling wave effect of earthquake wave, it performs that the ground motion on the top of valley presents hysteretic nature relative to that at the bottom of the valley. The valley topography has the filtering effect on high-frequency ( $> 10$  Hz) of seismic wave, and the amplification effect on energy of low-frequency of seismic wave ( $2 \sim 5$  Hz). The numerical simulation results about the different span of valley terrain on the site terrain effect show that, when the span reduces, the amplification effect of peak acceleration becomes more obvious. The terrain effect caused by the surface tends to be gentle with the increase of the span.

**Key words:** topography effect; finite element analyze; numerical simulation; digital elevation model