

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202001011

SV波垂直入射盆山耦合场地对地面运动的影响*

高 严¹, 于彦彦²

(1. 河海大学结构工程研究所, 江苏 南京 210098;
2. 苏州科技大学江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011)

摘要: 基于多次透射边界和有限元数值模拟方法, 研究了SV波垂直入射下, 山体高度、盆地深度、以及山体与盆地剪切波速变化对盆山耦合场地位移峰值放大系数、位移频谱及谱比的影响。结果表明:(1) 盆地与山体均对地震波有放大作用, 从坡底到坡顶位移放大效用逐渐增大, 从盆地外边缘到盆地中心位移放大效应逐渐增大, 但盆地内放大系数分布特征受盆地深宽比的强烈影响。(2) 山体测点位移峰值放大系数AF随山体高度增大而增大; 山体的存在减弱了盆地的地表地震动放大效应, 导致盆地远离山体一侧的放大更强烈, 反之亦然。(3) 随盆地波速的减小或山体波速的增大, 盆地AF最大值增大, 且最大AF出现的位置向远离山体一侧偏移, 而山体各测点的AF值受此影响较小。(4) 山顶处谱比峰值主要受山高、盆地深度及盆地波速影响, 但最大放大频率及分布特征基本不变; 山体波速对山顶处谱比分布影响显著。盆地中点处谱比受各参数影响均较显著, 但规律较复杂。盆山复合场地的地震动分析中需考虑二者的耦合效应对地震动的影响。

关键词: 盆山耦合场地; 数值模拟; SV波垂直入射; 位移峰值放大系数; 谱比
中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0100-11

Effects of Coupled Basin-Mountain Terrain on Seismic Ground Motion under Vertical Incident SV Waves

GAO Yan¹, YU Yanyan²

(1. Research Institute of Structure Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Structure Engineering of Jiangsu Province, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The seismic ground motion of coupled basin-mountain terrain under vertical SV waves was studied using the numerical simulation method and the transmission boundary theory, and the effects caused by mountain height, basin depth, and basin-mountain shear wave velocity were also discussed. The results show that: (1) Both the basin and the mountain have amplification effect on seismic wave, the peak amplification coefficient of displacement increases gradually from the bottom to the top of the slope, and the peak amplification coefficient of displacement increases gradually from the outer edge of the basin to the center, however, the distribution characteristics of amplification coeffi-

* 收稿日期:2020-01-08;修回日期:2020-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51808371)、江苏省高校自然科学研究面上项目(18KJB560017)、江苏省结构工程重点实验室开放研究课题(ZD1703)资助

作者简介:高严(1996—),男,硕士研究生。主要从事地震工程、结构抗震方面的研究。E-mail: gy18js@163.com

通讯作者:于彦彦(1986—),男,讲师。主要从事地震工程方面的研究。E-mail: yushunjian1986@126.com

cient for the basin are strongly affected by the aspect ratio of the basin. (2) The amplification factor AF of peak displacement increases with the increase of mountain height; The amplification effect on the seismic ground motion of the basin is reduced due to the existence of the mountain, which results in a stronger amplification effect on the side of the basin away from the mountain. (3) With the decrease of wave velocity for the basin or the increase of wave velocity for the mountain, the maximum value of AF for the basin increase and the location of the maximum AF shifts away from the mountain, however, the AF value of each surface point for the mountain is less affected. (4) The peak value of spectral ratio at mountain top is mainly affected by the height of the mountain, the depth and the wave velocity of the basin, but the maximum amplification frequency and distribution characteristics of spectral ratio are basically the same; The distribution of spectral ratio at the center of the mountain top is significantly affected by the shear wave velocity of the mountain; The spectral ratio at the center of the basin is significantly affected by each parameter, but the regularity is complex. The influence on the ground motion of the coupling effect should be considered in the ground motion analysis of basin-mountain composite site.

Keywords: basin-mountain coupling terrain; numerical simulation; vertical incidence of SV wave; spectral ratio

引言

震害研究表明:局部不规则地形中地震波传播复杂,地震动空间分布有明显差异,局部不规则地形对地面运动的影响显著。山体、盆地作为典型的局部地形,其对地震动的显著影响已被多次震害调查所证实,然而对于常见的盆山耦合地形,由于盆山的相互作用,地震波的整体反应规律较为复杂,更有某些区域出现能量集中的现象。如2008年我国汶川地震中,有很多位于山间盆地和峡谷当中的城镇遭受了巨大的震害损失,这些区域被标记为烈度异常区域^[1]。

通过对圆弧形峡谷^[2-3]、盆地^[4-5]、山包^[6]、河谷^[7]地震作用的研究,发现山顶或山脊对地震波有明显的放大作用,且沿山高度方向地震波的放大作用逐渐提高;盆地、河谷对地震波略有放大,但不是很明显。上述研究主要针对单独山包、盆地、河谷场地的影响机理,在实际中,山间盆地、山前盆地以及盆山交错地形十分常见,有关这些场地地震效应的研究却相对较少。文献[8]研究了等腰三角形凸起与半圆凹陷相连地形对SH波的散射,发现多场地相互作用对SH波散射有着显著的影响。文献[9]对Verchiano盆地进行了实验观测和地震动H/V谱分析,研究表明附近山体对盆地上测点的地震动特性具有重要影响。文献[10]研究了弹性半空间中半

圆形凸起与凹陷相连地形对SH波的散射问题,讨论了凸起地形顶点和凹陷地形最低点处位移幅值的反应谱。文献[11]表明:SV波垂直入射盆山耦合地形,山体对沉积盆地位移谱峰值有较大的放大作用。文献[12]基于单层位势理论,对SH波入射盆山耦合地形予以定量分析。

对于规则地形的研究多采用解析法^[13-17],对于山丘以及盆山耦合地形的研究多采用有限元和有限差分等数值模拟方法^[18-21],并且在地震动空间分布中关于幅值和相位的研究较多,关于频谱的研究较少。了解盆山耦合场地的地震动空间分布特性,可以为盆山中建筑的设计与分析提供依据。我国《公路桥梁抗震设计细则》^[22]为考虑地震动空间变化性,建议对局部场地或复杂地形、地貌的影响做专门性研究。本文利用有限元结合透射人工边界进行数值模拟的方法,研究了SV波垂直入射下,山体高度、盆地深度、山体与盆地剪切波速的变化对X方向地震动峰值放大系数的影响,并对山顶中心与盆地中心的位移频谱进行了讨论。

1 盆山耦合场地的计算方法和基本模型

1.1 计算方法

在利用有限元进行结构-地基系分析时,必须设置合理的人工边界条件,以模拟无限域对计算区域

的影响。地震波垂直输入时,均匀半空间自由场可以根据波动传播规律在时域内计算^[23],而成层半空间自由场可采用理论方法在频域内计算,但需经过多次正、逆傅里叶变换才可得到,耗时和存储空间较大。文献[24]提出了一种弹性水平成层半空间中垂直入射时,自由波场时域计算的一维化有限元方法。在此基础上,文献[25]提出了一种基于人工边界处应力与速度关系的阻抗边界条件,提高了入射时自由波场时域计算的精度。

盆山耦合系统,人工边界条件内的运动方程为:

$$\begin{bmatrix} [S_{ii}] & [S_{ib}] \\ [S_{bi}] & [S_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_i\} \\ \{u_b\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{p_i\} \\ \{p_b\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, $[S]$ 为刚度; $\{u\}$ 为节点位移; $\{p\}$ 为荷载;下标*i*表示内节点(包括自由表面节点),*b*表示边界节点。

人工边界节点采用透射公式计算^[26],即边界节点在*p*+1时刻的外行波位移为:

$$u_{s,0}^{p+1} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_{d,j}^{p+1-j} \quad (2)$$

$$C_j^N = \frac{N!}{(N-j)!j!}, N=1,2,\dots \quad (3)$$

式中, $u_{s,0}$ 为边界点的散射位移; $u_{d,j}^{p+1-j}$ 为计算点在(*p*+1-*j*)时刻的外行波场位移,需由同时刻相邻有限元节点的外行波场位移插值得到;*N*为透射阶数;*j*为与边界节点相邻的内节点。

对于散射问题,由于透射公式只能模拟外行波,因此在建立边界节点的运动方程时须将外行波从总波场中分离出来,即:

$$u_0^{p+1} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_j^{p+1-j} - \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_{r,j}^{p+1-j} + u_{r,0}^{p+1} \quad (4)$$

式中, u_j 为全波场位移,也就是式(1)中的 u_b ; u_r 为参考波场位移;在本文的研究中,公式(1)右边为0,对底边界,散射场位移=全波场位移-输入场位移,对于侧边界,散射场位移=全波场位移-自由场位移。

1.2 均匀弹性半空间算例

假定一均匀,各向同性弹性半空间模型(图1),底边界中点*A*及自由边界中点*B*各设置一个测点。 $L \times$

$H = 1000 \text{ m} \times 240 \text{ m}$,质量密度 $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$,剪切波速 $V = 1000 \text{ m/s}$,泊松比 $\mu = 0.25$,采用正方形网格划分,网格尺寸为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,模型底边界和两个侧边界设置人工透射边界,SV波垂直入射,入射波幅值为1 m,时间步长0.001 s,入射波位移时程及频谱如图2所示。

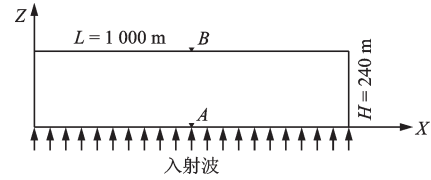


图1 均匀弹性半空间模型

Fig.1 Uniform and elastic calculation model of half-space

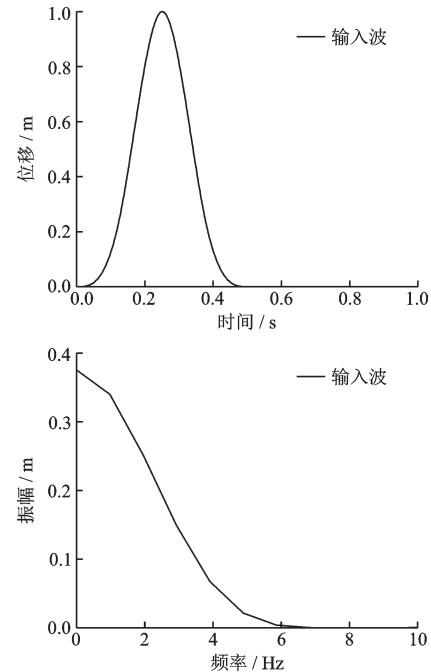


图2 入射波位移时程及频谱

Fig.2 Displacement time history and spectrum of incident wave

图3给出了SV波垂直入射下,人工透射边界中,底边界中点*A*和自由边界中点*B*的位移时程曲线,根据文献[26]的理论,自由边界的位移峰值为2,是入射波位移峰值的两倍,自由边界波形与入射波形一致;底边界位移峰值与入射波位移峰值相同,且有入射波和地表反射波两个相同的波形。模拟结果与理论结果完全一致,说明采用有限元法与透射边界相结合的计算盆山耦合场地的数值模拟方法可行,同时也说明了地震波输入方法的正确性。

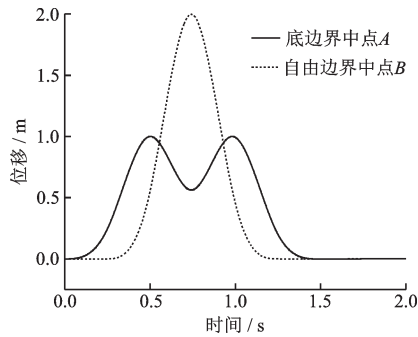


图3 各测点位移时程

Fig.3 Displacement time history of each observed point

1.3 盆山耦合场地基本模型

假定一各向同性弹性半空间盆山耦合场地基本模型,模型尺寸及测点位置如图4所示。盆地覆盖层质量密度 $\rho_{sp} = 1700 \text{ kg/m}^3$, 剪切波速 $V_{sp} = 300 \text{ m/s}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 盆地宽度 200 m , 深度 80 m ; 山体质量密度 $\rho_{ss} = 2000 \text{ kg/m}^3$, 剪切波速 $V_{ss} = 1000 \text{ m/s}$, 泊松比 $\mu = 0.25$, 山体底部最大宽度 200 m , 高度 200 m 。测点1~4、5~6、12~18各点位的间距分别为 50 m , 测点4~5、18~20各点位的间距分别为 100 m , 测点6和12为坡底测点, 测点9为坡顶测点且位于坡顶中点, 测点7和11为坡面中点, 测点8和10为四分之三坡面点。采用平面四边形网格进行单元划分, 基岩和山体的最大网格尺寸为 10 m , 盆地的最大单元网格尺寸为 5 m 。根据波动有限元模拟中最短波长内需包含6~10个网格的要求^[26]以及盆山介质参数, 本文能模拟的最高频率约为 6 Hz 。

考虑SV波从底边垂直入射, 入射波位移时程和频谱如图2所示。可以看出, 其最高频率约为 6 Hz , 本文的网格划分能够满足精度要求。

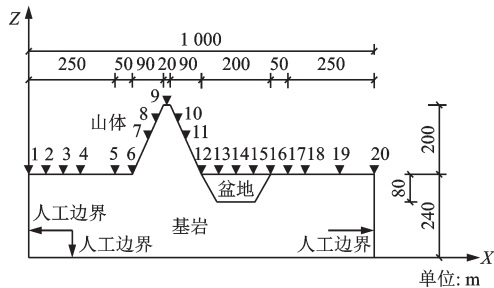


图4 盆山耦合场地基本模型及测点布置

Fig.4 Basic model of the basin-mountain site and layout of observed points

2 计算结果

基于地震动峰值放大系数和谱比分析来研究盆山耦合场地对地面运动的影响, 其中地震动峰值放大系数定义为观测点地震动峰值与不考虑盆地和山体时的均匀半空间地表地震动峰值的比值; 位移谱比定义为观测点频谱与输入波频谱的比值。

2.1 山体高度对地表地震动的影响

2.1.1 地表位移放大效应

图5给出了SV波从底边垂直输入, 在基本模型的基础上, 盆地深度 80 m 保持不变, 山体高度为 170 m 、 200 m 、 230 m 的盆山耦合场地, 以及只考虑盆地而忽略山体地形时, 各观测点的X方向地震动峰值放大系数。

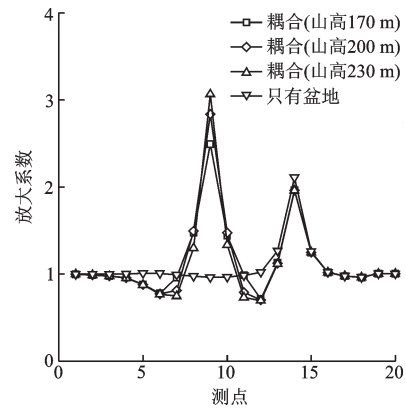


图5 X方向地震动峰值放大系数

Fig.5 Amplification factors of peak ground motions in the X direction for surface points

从图5中可以看出, SV波垂直入射下, 随着山体高度从 170 m 增大到 230 m , 山体的峰值放大系数最大值出现在山顶中心, 最大值逐渐增大; 盆地的峰值放大系数最大值出现在盆地中心, 最大值基本不变。从坡底到坡面中心, 峰值放大系数增长缓慢; 从坡面中心到山顶中点, 峰值放大系数迅速增大。从盆地外围到盆地中心, 峰值放大系数逐渐增大。相比仅考虑盆地的模型, 盆山耦合场地在山脚至坡面中点(测点4~7、11~12)以及盆地靠近山体一侧(测点12~14)峰值放大系数略有降低, 即山体的存在降低靠近山体一侧盆地地表地震动响应; 只有盆地时盆地中心峰值放大系数为 2.11 , 盆山耦合场地盆地中心峰值放大系数为 1.96 , 山体的存在使

盆地的峰值放大系数最大值降低 7.11%。远离盆山的测点无放大效应,即山体高度的变化只对盆山附近有影响。此外,受山体地形影响,盆地两侧的放大作用表现出明显不对称,远离盆山交界一侧(测点 15~16)的放大系数均大于距盆地中心同等距离的测点(测点 12、13),但 AF 值基本不受山体高度的影响。

2.1.2 地震动频谱

图 6 给出了盆地深度 80 m 保持不变,山体高度为 170、200、230 m 的盆山耦合场地,以及只有盆地时地表关键点(山顶中点以及盆地中心)的频谱,其中只有盆地的模型中,山顶中心测点取山顶中心在自由表面的投影点。以下频谱或谱比中第一个极大值的点称为主峰,对应的频率称为主频;第二个极大值及其对应频率称为次峰和次主频。

从图中可以看到,随着山体高度的增大,山顶中心的主频均为 1 Hz,峰值逐渐增大;次主频向低频一侧靠近,主峰与次主峰的峰值变化很小,主频段均为 0~1.5 Hz,次主频段发生变化;盆地中心主频的位置有向低频移动的趋势,次主频均为 2.5 Hz,主峰峰值总体减小,次峰峰值先增大后减小,主频段均为 0~2.0 Hz;山顶中心主、次峰峰值相差较大,盆地中心主、次峰峰值相差较小。

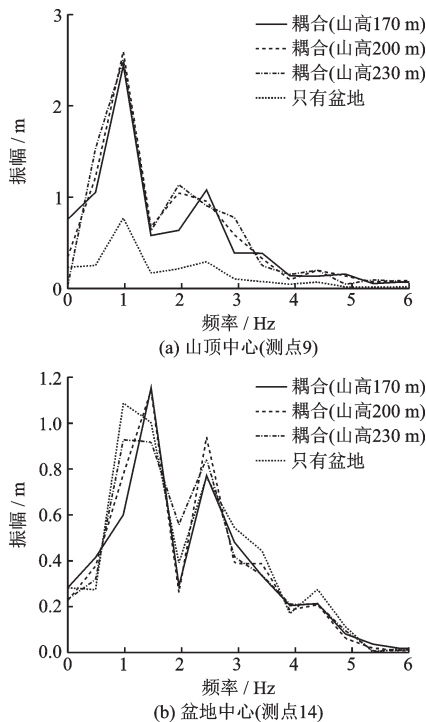


图 6 地表关键点频谱曲线

Fig.6 Frequency spectrum curves of key surface points

2.1.3 谱比分析

图 7 给出山体高度变化时,地表关键点 X 方向位移谱比曲线。从山顶和盆地中心两个关键点响应时程的频谱(图 6)中可见,其主要频带分布于 0~4 Hz(其余参数变化时具有类似的分布),因此本文的谱比分析限定在该频带内进行。

从图中可以看到,SV 波垂直入射下,随着山体高度从 170 m 增大到 230 m,山顶中心处位移谱比在 1.5 Hz 以上总体变大,位移谱比最大值出现在 1 Hz 处;盆地中心处谱比值在 1.5 Hz 以下随山体高度增大而减小,且放大频带变宽(向低频偏移)。盆地中心处谱比最大值出现于 2.5 Hz 附近,相比不考虑山体地形(3.4 Hz)向低频偏移。由于山体的影响,盆山耦合场地山顶处位移谱比值显著增大,但谱比主峰的位置不变,次峰的位置变化明显。随山高的增加,放大高频段(> 1.5 Hz)的范围变宽;盆地中心处谱比峰值受山高影响明显。

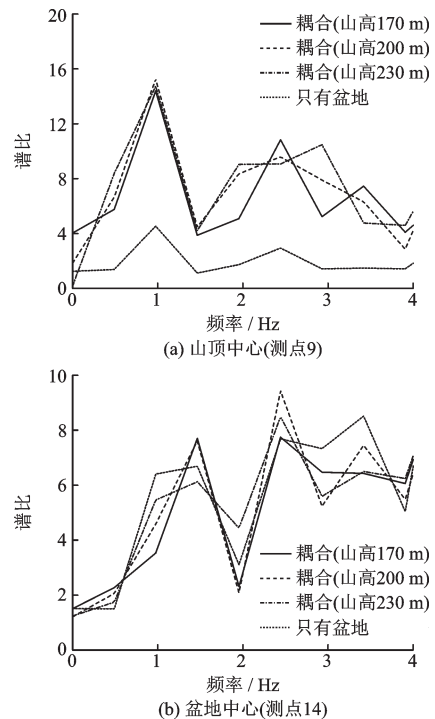


图 7 地表关键点位移谱比曲线

Fig.7 Displacement spectral ratio curves of key surface points

2.2 盆地深度对地表地震动的影响

2.2.1 地表位移放大效应

图 8 给出了 SV 波从底边垂直输入,在基本模型的基础上,山体高度 200 m 保持不变,盆地深度为

60、80、100 m 的盆山耦合场地,以及只有山体时,各观测点的 X 方向地震动峰值放大系数 AF 。

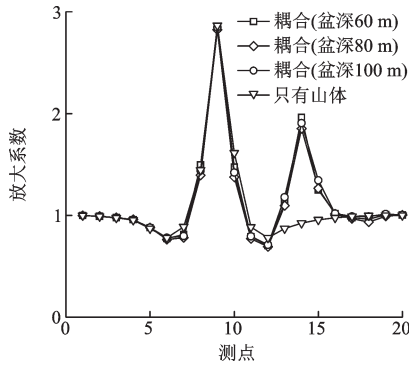


图8 X方向地震动峰值放大系数

Fig.8 Peak amplification coefficients in the X direction of surface points

从图8中可以看到,SV波垂直入射下,随着盆地深度从60 m增大至100 m,山体的 AF 最大值始终位于山顶中心,其值基本在2.84左右。盆地内 AF 最大值始终位于盆地中心,可能主要与盆地宽度较小有关,其值随盆地深度增大先是显著降低(60 m到80 m, AF 从1.96降至1.85),之后又有所提高。从坡底到坡面中心,峰值放大系数增长缓慢,从坡面中心到山顶中点,峰值放大系数迅速增大。从盆地外围到盆地中心,峰值放大系数逐渐增大。相比只有山体,盆山耦合场地中山脚至山顶的峰值放大系数均有不同程度降低,其中坡面中心7号点的 AF 从1.6降至1.4左右,山顶中心处从2.87降至2.84。远离盆山的测点无放大效应,即盆地深度的变化只对盆山附近有影响。

2.2.2 地震动频谱

图9给出了山体高度200 m保持不变,盆地深度为60、80、100 m的盆山耦合场地,以及只有山体时地表关键点(山顶中点以及盆地中心)的频谱曲线。

从图9中可以看出,随着盆地深度从60 m增大到100 m,山顶中心的主频均为1 Hz,次主频均为2 Hz,山顶中心主峰峰值逐渐减小,次主峰峰值逐渐增大,主频段均为0~1.5 Hz;相比只有山体的情况,盆山耦合场地在山顶中心处主峰峰值降低,次主峰峰值提高,表明盆地的存在降低了山顶中心处频谱主峰的峰值。随着盆地深度的增大,盆地中心测点主频与次主频的位置均发生偏移。

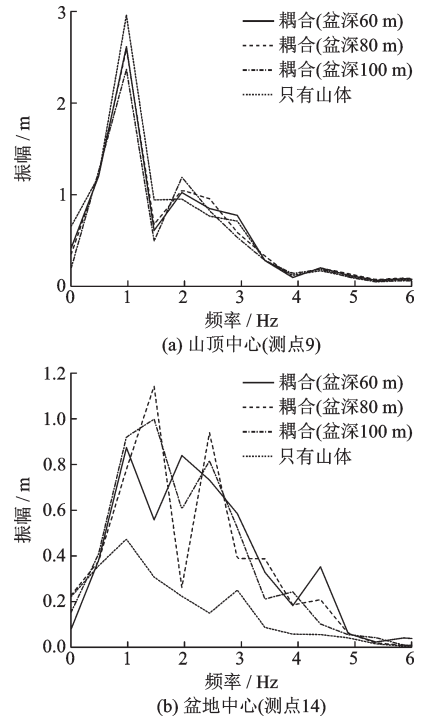


图9 地表关键点频谱曲线

Fig.9 Frequency spectrum curve of key surface points

相比只有山体的情况,盆山耦合场地在盆地中心处对0.5 Hz以上的地震动均有显著的放大作用;山顶频谱主峰峰值与次峰峰值相差较大,盆地中心频谱主峰峰值与次峰峰值相差较小。

2.2.3 谱比分析

图10给出盆地深度变化时,地表关键点在0~4 Hz范围内的X方向位移谱比曲线。

从图中可以看到,SV波垂直入射下,随着盆地深度从60 m增大到100 m,山顶中心的谱比峰值出现在1 Hz附近,且谱比峰值随盆地深度增大逐渐降低;相比只有山体,盆山耦合场地山顶中心处最大谱比值降低明显,且次峰逐渐向低频偏移。随着盆地深度的增大,盆地中心谱比峰值的位置变化明显;相较只有山体的地形,盆地中心处位移谱比总体升高。

2.3 山体波速对地表地震动的影响

2.3.1 地表位移放大效应

图11给出了SV波从底边垂直输入,在基本模型的基础上,盆地的剪切波速300 m/s保持不变,山体剪切波速为1 000、1 200、1 500 m/s的各观测点X方向地震动峰值放大系数。

从图11中可以看到,随着山体剪切波速的增大,山体的 AF 最大值出现在山顶中心,且最大值基

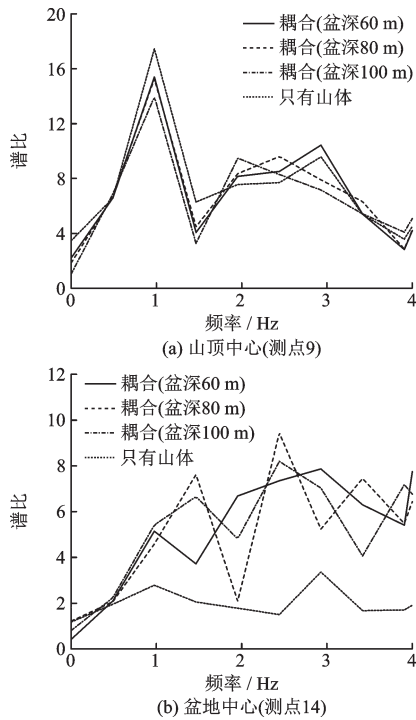


图 10 地表关键点位移谱比曲线

Fig.10 Displacement spectral ratio curves of key surface points

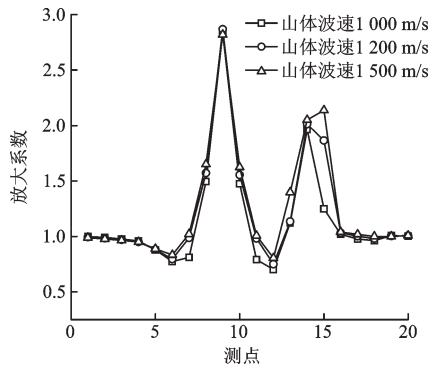


图 11 X方向地震动峰值放大系数

Fig.11 Peak amplification coefficients in the X direction of surface points

本不变,坡底至四分之三坡面点AF略有增大。盆地区域峰值放大系数逐渐增大,且远离山体一侧盆地峰值放大系数增大较多,表明由于盆山相干作用,使得山体剪切波速变大时,盆山交界处附近的放大作用不如远离山体一侧盆地放大效应增长明显。随着山体剪切波速的增大,盆地的峰值放大系数最大值由盆地中心向远离山体一侧偏移。远离盆山的测点无放大效应,即山体剪切波速的变化只对盆山附近有影响。

2.3.2 地震动频谱

图 12 给出了在基本模型的基础上,盆地的剪切

波速 300 m/s 保持不变,山体剪切波速为 1 000、1 200、1 500 m/s 时地表关键点(山顶中点以及盆地中心)的频谱曲线。

从图中可以看到,随着山体剪切波速的增大,山顶中心处主峰峰值基本不变,次主峰峰值逐渐减小,山顶中心主频均为 1 Hz,次主频向高频靠近,主频段变宽,次主频段变窄。盆地中心主频均为 1.5 Hz,次主频发生偏移,且向高频靠近;主峰峰值逐渐增大,次峰峰值逐渐减小。山顶中心处频谱主峰与次峰的值对不同山体波速模型均相差较大,盆地中心主峰与次峰的值在 1 000 m/s 时相差较小,随山体波速的增大差别较大。

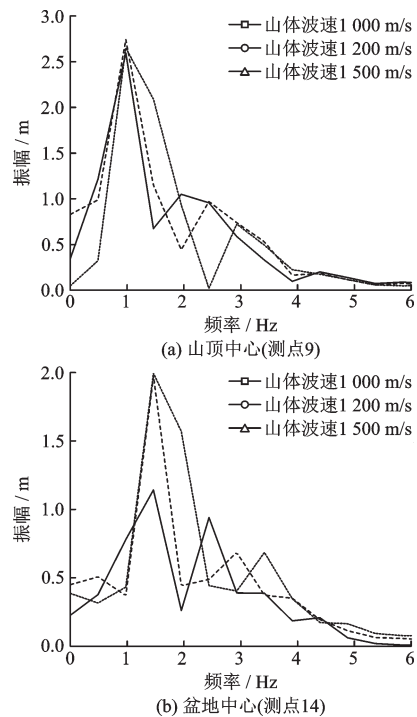


图 12 地表关键点频谱曲线

Fig.12 Frequency spectrum curve of key surface points

2.3.3 谱比分析

图 13 给出山体剪切波速变化时,地表关键点 X 方向位移谱比曲线。

从图中可以看到,SV 波垂直入射下,随着山体剪切波速的增大,山顶中心处谱比最大值出现在 1 Hz,但谱比显著增大的频带变宽,并逐渐向更高频靠近;盆地中心处的位移谱比峰值向高频偏移,且逐渐增大,同时位移谱比主峰的频带变宽。而次主频从山体波速 1 500 m/s 的 3.5 Hz 逐渐向 1 000 m/s 的 2.5 Hz 的低频方向偏移。

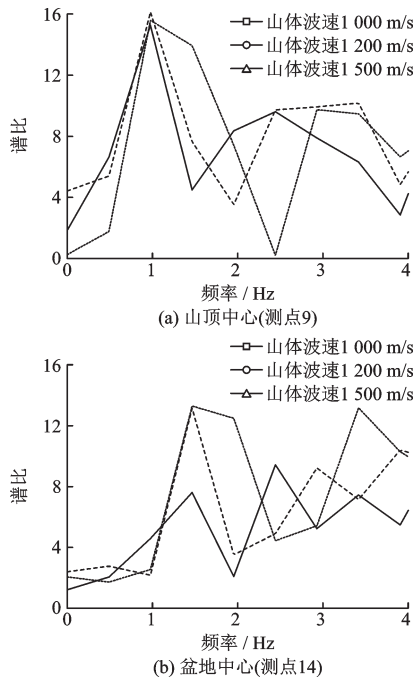


图 13 地表关键点位移谱比曲线

Fig.13 Displacement spectral ratio curves of key surface points

2.4 盆地波速对地表地震动的影响

2.4.1 地表位移放大效应

图 14 给出了 SV 波从底边垂直输入,盆山耦合场地基本模型中,山体剪切波速 1 000 m/s 保持不变,盆地剪切波速为 200、300、400 m/s 的各观测点 X 方向地震动峰值放大系数。

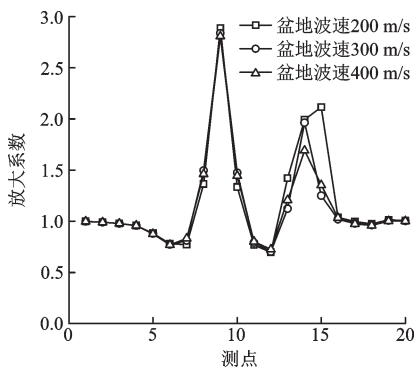


图 14 X 方向地震动峰值放大系数

Fig.14 Peak amplification coefficients in the X direction of surface points

从图 14 中可以看到,随盆地剪切波速的变化,山体各测点的 AF 值受到一定影响,但影响较小;随着盆地剪切波速的减小即盆地土体变软,盆地区域的峰值放大系数逐渐增大,且盆地的 AF 最大值向

远离山体一侧的方向偏移。由于盆山的相互作用,靠近山体一侧的盆地峰值放大系数变化相对另一侧较小,即山体的存在使得靠近山体一侧盆地的地表地震动受到抑制,这在前面的结果中都有反映。远离盆山的测点无放大效应,即盆地剪切波速的变化只对盆山附近有影响。

2.4.2 地震动频谱

图 15 给出了在基本模型的基础上,山体的剪切波速 1 000 m/s 保持不变,盆地剪切波速为 200、300、400 m/s 时地表关键点(山顶中点以及盆地中心)的频谱曲线。

从图 15 中可以看到,随着盆地剪切波速的增大,山顶中心的主频均为 1 Hz,主频段为 0~1.5 Hz;次主频均为 2 Hz。主峰峰值逐渐增大,次峰的振幅在 2~3 Hz 有较大变化。盆地中心主频与次主频均发生改变,且主频有向更高频率移动的趋势,表现为主峰峰值逐渐减小,盆地波速 400 m/s 时主、次峰位置对调。

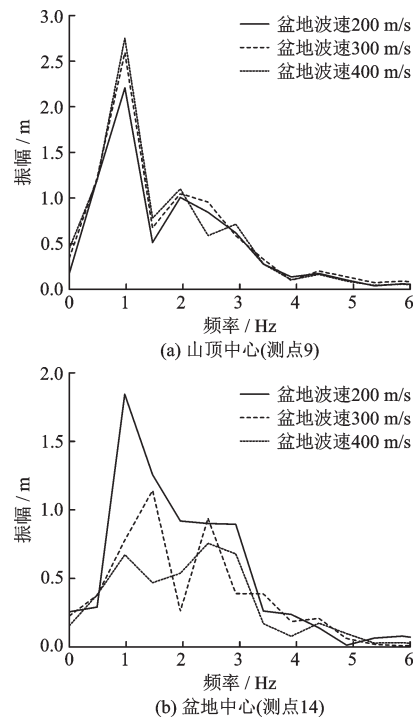


图 15 地表关键点频谱曲线

Fig.15 Frequency spectrum curve of key surface points

2.4.3 谱比分析

图 16 给出盆地剪切波速变化时,地表关键点的 X 方向位移谱比曲线。

从图中可以看到,SV 波垂直入射下,随着盆地剪切波速的增大,山顶中心主频均为 1 Hz,谱比峰

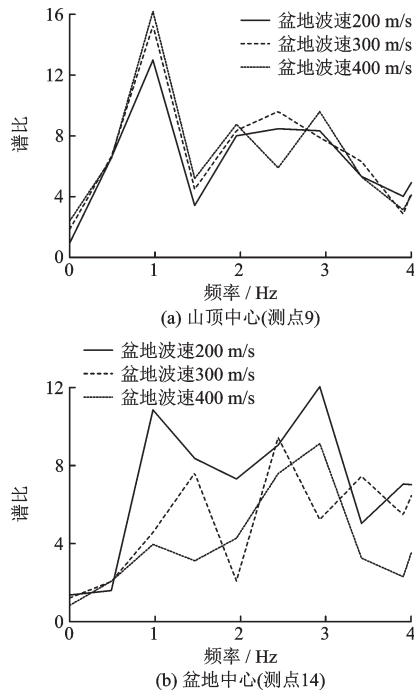


图 16 X方向地震动峰值放大系数

Fig.16 Peak amplification coefficients in the X direction of surface points

值逐渐增大;盆地中心位移谱比峰值整体上显著减小,这与时域中的峰值放大系数逐渐减小对应,且盆地波速 400 m/s 时的主、次峰值谱比的位置相比其余两个模型发生明显偏移,主峰频率变高,次峰频率变低。

2.5 盆地深宽比的影响及模拟结果合理性的讨论

本文上述结果是基于特定盆山耦合场地模型所得到的,本节通过对比盆地宽度变化时(对应于盆地的深宽比发生变化)的结果差异,以及和既有研究结果的对比,对以上结果的一般性和合理性进行初步讨论。图 17 给出了 SV 波从底边垂直输入,在盆山耦合场地基本模型的基础上,保持其它参数不变,仅改变盆地宽度为 200、500、800 m 的各观测点 X 方向地震动峰值放大系数。

可以看出,盆地宽度增大时,山体各测点的放大系数有不同程度的减小,尤其是对于坡面测点,但总体而言其对山体地表地震动影响相对较小。但盆地内放大系数分布特征差异非常显著:盆地宽度较小时,从盆地外边缘到盆地中心位移放大效应逐渐增大,盆地中心的放大系数最大,原因可能是此时盆地深宽比较大,导致更多的地震波能量向盆地中心聚焦。随着盆地宽度的增大,盆地内地震动

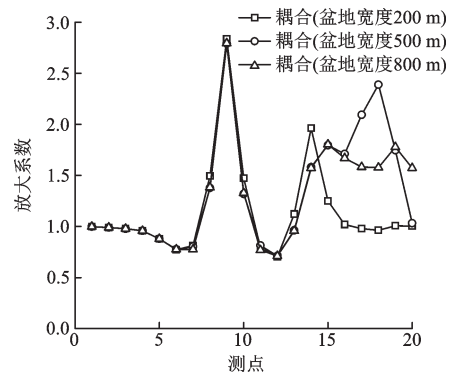


图 17 X方向地震动峰值放大系数

Fig.17 Peak amplification coefficients in the X direction of surface points

最大值出现在盆地边缘,而盆地中心处的放大系数并非最大,即此时盆地边缘效应逐渐控制盆地放大的总体特征,这与梁建文等^[27]基于解析方法所得的 SV 波入射下圆弧形盆地地表响应随盆地深宽比的变化结果类似。

梁轩等^[28]对 SV 波入射下梯形山体地形效应的模拟结果显示,当山体高宽比($\frac{H}{L/2}$)为 1 时,山顶测点的响应相比自由场地可放大 2.25 倍左右。同时,

既有研究表明山顶放大系数具有随高宽比的增大而增大的趋势^[29]。本文模型的高宽比为 2,即山体更加陡峭,模拟得到的只有山体时山顶处放大系数为 2.8,大于梁轩等的结果,但与山体地形的影响规律一致。文献[27]对圆弧形沉积河谷在 SV 波垂直入射下的放大效应的研究表明,当盆地最大深度与盆地半宽的比值为 0.5、入射波长与盆地宽度的比值为 0.5、盆地内外剪切波阻抗比为 0.44 的情况下,盆地中心处最大位移峰值相比基岩自由地表场地的结果可放大 1.7 倍左右。本文的模拟结果显示,仅有盆地时,盆地中心处最大放大系数为 2.11(图 5)。考虑本文的盆地形状(梯形)、更大的山体高宽比及盆地内外更大的阻抗比(本文模型的阻抗比为 0.255),本文模拟的场地放大系数合理,能够再现盆山耦合场地的地震动放大特征。

3 结论

以 SV 波垂直入射为例,计算分析了盆山耦合场地对地表地震动的影响,通过对测点 X 方向位移放大效应以及频谱特性分析,得到如下结论:

- (1) 盆地与山体均对地震波有放大作用;从坡

底到坡顶位移放大效用逐渐增大,从盆地外边缘到盆地中心位移放大效应逐渐增大。

(2) 山体高度的增大主要对山体的峰值放大系数有影响, AF 最大值随之增大;盆地深度的增大主要对盆地的峰值放大系数有影响,但 AF 最大值与之无一致规律。山体的存在抑制了盆地靠近山体一侧的地表地震动放大效应;盆地的存在降低了盆山耦合场地中山体各测点的峰值放大系数,其中坡面降低程度大于山顶。

(3) 盆地剪切波速的减小与山体剪切波速的增大均使盆地内位移峰值放大系数逐渐增大,且最大值向远离山体一侧偏移。盆地和山体波速的变化对山体各测点的 AF 值影响较小,而主要影响盆地的放大,且远离山体一侧的盆地峰值放大系数变化最显著。

(4) 山顶测点主频的频率基本不受各参数影响,但幅值和分布有一定变化;各参数对盆地中心点主频或频谱分布均有影响。山体高度、盆地深度、盆地波速等主要影响山顶测点的谱比峰值,对其分布影响不大;山体波速对山顶测点的谱比峰值和谱比曲线的分布均有显著影响。各参数对盆地地震动的谱比影响均较显著,且影响规律较复杂。

需要说明的是,本文结论是基于特定模型得到,而盆地和山体特征参数(如尺寸、波速等)均对模拟结果有明显影响,因此有必要开展对这些参数的影响研究,进而得到更为一般性的结论。

参考文献:

- [1] 地震工程与工程振动编辑委员会. 汶川8.0级地震工程震害概览[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(增): 22-26.
Editorial Board of Earthquake Engineering and Engineering Vibration. The overview of earthquake engineering damage of Wenchuan 8.0[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(Sup): 22-26. (in Chinese)
- [2] Trifunac M D. Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1973, 1(3): 267-281.
- [3] Wong H L, Trifunac M D. Scattering of plane SH-waves by a semi-elliptical canyon[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1974, 3(2): 157-169.
- [4] Trifunac M D. Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 61(6): 1755-1770.
- [5] Wong H L, Trifunac M D. Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1974, 64(5): 1389-1408.
- [6] 袁晓铭. 波函数展开方法在求解弹性波散射问题中的应用研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1994.
Yuan X M. Application research of wave function expansion method in scattering of elastic wave [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1994. (in Chinese)
- [7] Todorovska M, Lee V W. Surface motion of shallow circular alluvial valleys for incident plane SH waves: analytical solution[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1991, 10(4): 192-200.
- [8] 杨在林, 许华南, 陈志刚. 等腰三角形凸起与半圆形凹陷地形对SH波的散射[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 1(增1): 6-11.
Yang Z L, Xu H N, Chen Z G. Scattering of SH-waves by two isosceles triangle hills and a semi-cylindrical canyon [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 1 (Sup1): 6-11. (in Chinese)
- [9] Gaffet S, Cultrera G, Dietrich M, et al. A site effect study in the Verchiano valley during the 1997 Umbria-Marche (Central Italy) earthquakes[J]. Journal of Seismology, 2000, 4(4): 525-541.
- [10] 吕晓棠, 刘殿魁. SH波入射时半圆形凸起与凹陷地形的地震动[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 14-20.
Lyu X T, Liu D K. Ground motion of a semi-cylindrical hill and a semi-cylindrical canyon by incident SH wave [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 14-20. (in Chinese)
- [11] 刘中宪, 武凤娇, 王冬. 沉积盆地-山体耦合场地对平面P波、SV波和Rayleigh波的二维散射分析[J]. 工程力学, 2016, 33(2): 160-171.
Liu Z X, Wu F J, Wang D. Two dimensional scattering analysis of plane P, SV, and Rayleigh waves by coupled alluvial basin-mountain terrain[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2): 160-171. (in Chinese)
- [12] 刘中宪, 马宁宁, 刘蕾. 盆山耦合场地对平面SH波的散射[J]. 应用力学学报, 2015, 32(5): 839-846.
Liu Z X, Ma N N, Liu L. The scattering of plane SH waves by the basin-mountain coupling terrain [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(5): 839-846. (in Chinese)

- [13] 梁建文,严林隽, Lee V W. 圆形凹陷地形表面覆盖层对入射平面 SV 波的影响[J]. 地震学报, 2001, 23(6): 622-636.
Liang J W, Yan L J, Lee V W. Effects of a Covering Layer in a circular-arc canyon on incident plane SV waves[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(6): 622-636. (in Chinese)
- [14] 袁晓铭. 圆弧状沉积盆地与软土单覆盖层出平面地表运动对比[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 16-21.
Yuan X M. Comparison of out-of-plane surface ground motion between a circular-arc alluvial valley and a single overburden soft layer[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 16-21. (in Chinese)
- [15] Louse G, Pierre Y B, Beatrice J. The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78(1): 42-63.
- [16] Rasse M, Ghobarah A, Heidebrecht A C. Site effects on the seismic response of a suspension bridge[J]. Engineering Structures, 1996, 18(5): 363-370.
- [17] Lee S J, Komatitsch D, Huang B S, et al. Effects of topography on seismic-wave propagation: An example from Northern Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(1): 314-325.
- [18] 车伟, 罗奇峰. 复杂地形条件下地震波的传播研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1333-1337.
Che W, Luo Q F. Seismic wave propagation in complex topography [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1333-1337. (in Chinese)
- [19] 丁海平, 朱荣初, 宋贞霞. 陡坎地形对地面运动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 28-32.
Ding H P, Zhu R C, Song Z X. Effects of scarp topography on seismic ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 28-32. (in Chinese)
- [20] 顾亮, 丁海平, 于彦彦. SV 波斜入射陡坎地形对地面运动的影响[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 39-47.
Gu L, Ding H P, Yu Y Y. Effects of scarp topography on seismic ground motion under inclined SV waves[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4): 39-47. (in Chinese)
- [21] 柴红保, 曹平, 林杭. 竖直上传播剪切波作用下边坡动力响应规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 1079-1084.
Chai H B, Cao P, Lin H. Dynamic response laws of slope under vertical shear wave [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(4): 1079-1084. (in Chinese)
- [22] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02—01—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [23] 傅淑芳, 刘宝成, 等. 地震学教程[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
Fu S F, Liu B C, et al. Tutorial of seismology[M]. Beijing: Seismological Press, 1991. (in Chinese)
- [24] 刘晶波, 王艳. 成层介质中平面自由波场的一维化时域算法[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 16-22.
Liu J B, Wang Y. A 1D time-domain method for in-plane wave motion of free field in layered media[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 16-22. (in Chinese)
- [25] 赵密, 杜修力, 刘晶波, 等. P-SV 波斜入射时成层半空间自由场的时域算法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 84-90.
Zhao M, Du X L, Liu J B, et al. Time-domain method for free field in layered half space under P-SV waves of oblique incidence [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 84-90. (in Chinese)
- [26] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Liao Z P. Introduction to wave motion theories for engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [27] 梁建文, 严林隽, 秦东, 等. 圆弧形沉积河谷场地在平面 SV 波入射下的动力响应[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 74-82.
Liang J W, Yan L J, Q D, et al. Dynamic response of circular-arc sedimentary valley site under incident plane sv waves[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(12): 74-82. (in Chinese)
- [28] 梁轩, 邢昊, 周俊, 等. 梯形山体地形效应及对周围场地地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(6): 45-55.
Liang X, Xing H, Zhou J, et al. Trapezoid mountain topographic effects and their impacts on seismic response of surrounding site[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36(6): 45-55. (in Chinese)
- [29] Geli L, Bard P Y, Jullien B. The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78(1): 42-63.

(本文责编: 周小潭)