

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.021

P 波斜入射陡坎地形对地面运动的影响

丁海平^{1,2}, 于彦彦¹, 郑志法¹

(1. 苏州科技大学 江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对陡坎地形, 采用数值模拟方法, 探讨了陡坎地形在 P 波斜入射时, 入射角度 θ 、坡角 α 和入射方向变化等参数对地震波传播的影响。结果表明: (1) 从陡坎底部到陡坎顶部, 放大系数逐渐增大, 而入射角度、坡角和入射方向没有影响。(2) 入射角度 θ 一定时, 无论地震波顺着陡坎方向 (左) 入射还是逆着陡坎方向 (右) 入射, 陡坎上侧的放大系数大于陡坎下侧的放大系数。同时, 放大系数随着坡角 α 的增大而增大。(3) 坡角 α 不变, 地震波顺着陡坎方向 (左) 入射时, x 分量的放大系数随着入射角的增大而增大, z 分量的放大系数则随着入射角的增大而减小。(4) 地震波逆着陡坎方向 (右) 入射时, 放大系数最大值基本在陡坎上侧边缘。地震波顺着陡坎方向 (左) 入射时, 放大系数最大值并没出现在陡坎上侧边缘, 坡角越大, 偏离越大。(5) 地震波顺着陡坎方向 (左) 入射时, x 分量的放大系数比地震波逆着陡坎方向 (右) 入射时的大, z 分量变化不大。

关 键 词: 陡坎地形; P 波斜入射; 地面运动; 放大系数

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)06-1716-10

Effects of scarp topography on seismic ground motion under inclined P waves

DING Hai-ping^{1,2}, YU Yan-yan¹, ZHENG Zhi-fa¹

(1. Key Laboratory of Structure Engineering of Jiangsu Province, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: In this study, the seismic ground motion of the scarp topography under inclined P waves was analyzed using numerical simulation method. The effects of the incident degree, the slope angle, and the incident direction of seismic ground motion were discussed as well. It is found that from the bottom of scarp to the top, the amplification factor increased gradually, whereas it had no influence on the incident degree, the slope angle and the incident direction. When the incident degree was constant, the amplification factor of the scarp upside region was greater than that of the scarp downside region, regardless of the incident directions. At the same time, the amplification factor at the crest of the slope increased with the increase of the slope angle. When the slope angle was constant and the waves travelled away from the slope, the amplification factor of x component increased, while the amplification factor of z component decreased with the increase of incident angle. The results show that for waves travelling into the slope, the maximum amplification factor is generally found around the crest of the slope. For waves travelling away from the slope, the maximum amplification factor shifted from the slope crest. Moreover, the larger the slope angle, the farther the departure. The amplification factor of x component was larger for waves travelling away from the slope as compared to waves travelling into the slope, but the amplification factor of z component had no obvious change with the incident direction.

Keywords: scarp topography; inclined P wave; ground motion; amplification factor

1 引 言

地形对地面运动的影响很大, 经常发现突出的

山梁、陡崖、高耸孤立的丘、陡坡和边坡边缘上的震害显著严重。如1966年云南东川地震, 位于山岗前缘的矽肺病疗养院的破坏比岗下和平台上的房

收稿日期: 2015-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51278323); 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 (No.91215301)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51278323) and the Major Research Plan Program of National Natural Science Foundation of China (91215301).

第一作者简介: 丁海平, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 主要从事地震工程和防灾减灾工程。E-mail: hpding@126.com

屋严重; 1970年云南通海地震中有不少村庄位于局部孤立突出的小山包或山梁上, 震害普遍比周围严重; 1988年云南澜沧—耿马地震中, 有些孤立山包上的楼房破坏, 而平房却完好^[1-3]。地震记录也反映了这一特点, 美国Davis等^[4]在San Fernando地震的余震测量中发现, 山顶的地震加速度比山脚的成倍增长; 卡格尔山山上和山脚两点的强余震速度观测记录显示, 山顶上地震动持续时间显著增长且放大效应显著^[5]; 2008年四川汶川特大地震中自贡西山公园强震动观测台阵记录也表明从山脚到山顶的7个基岩场地台站的PGA (Peak Ground Acceleration) 基本呈现出逐渐增大的趋势^[6]。

除了震害调查, 目前研究地形对地震动影响的手段还有解析和数值模拟方法。解析方法主要用于研究较规则的地形: 如SH波入射下半圆和半椭圆形峡谷^[7-8]、半圆和半椭圆形沉积盆地^[9-10]、任意圆弧形凹陷地形^[11]、任意圆弧形凸起地形^[12]和沉积河谷场地^[13]等的动力响应; P波入射下半圆凹陷地形^[14], SV波和P波入射下圆弧形沉积河谷场地^[15-16]等的动力响应。对于陡坎这样的不规则地形, 一般不适合采用解析方法, 大多采用数值方法^[17-21], 且多假定地震波垂直入射, 对于斜入射研究较少。Ashford和Sitar^[22-23]研究了SH波斜入射下陡坎地形的3个场地放大效应的参数, 即地形放大参数 A_t , 场地放大参数 A_s 和地表放大参数 A_a 。

文献[24-25]研究了地震体波斜入射情形下竖直、倾斜台阶地形的影响, 发现斜入射P波时的竖向运动分量和斜入射SV波时的水平向运动分量在台阶上角点处存在极大值、在台阶下角点处存在极小值, 同时在上、下台面还出现由角点激发、向台阶外传播的转换体波与面波, 转换Rayleigh面波最大振幅可达弹性半空间表面自由场位移的1.1倍左右。此外, 文献[26-28]利用振动台试验, 研究了斜坡场地在地震波作用下的动力响应, 结果均表明斜坡场地对地震动的放大效应明显强于水平场地。

本文将采用有限元法和透射人工边界相结合^[29-30]的数值模拟方法, 研究陡坎地形在P波斜入射时, 入射角度 θ 、坡角 α 和入射方向变化等参数对地震波传播的影响。

2 陡坎场地的计算方法和计算模型

2.1 计算方法

进行地震波斜入射的地形影响研究, 首先需要解决斜入射下的自由场问题, 该自由场将作为计算

模型的波动输入, 直接影响到最后的计算精度。地震波斜入射时, 均匀半空间自由场可以根据波动传播规律在时域内计算^[31], 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[32]提出了一种弹性水平成层半空间中斜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[33]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P波斜入射时自由波场时域计算的精度。本文即采用文献[33]计算P波斜入射时自由波场的方法, 同时, 这一时步计算方法也与本文的陡坎模型二维有限元法的计算过程相匹配。

采用有限元数值模拟时, 计算区域内的节点可以分为内节点和人工边界节点, 位于人工边界上的节点 u_0 称为人工边界节点, 其余的节点均为内节点 u , 自由表面上的节点属于内节点。全部内节点的运动方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; P 为外力矢量, 对于本文计算模型, P 为0。

人工边界点运动采用多次透射公式^[29]计算, 即边界上节点 u_0 在 $p+1$ 时刻的位移运动为

$$u_0^{p+1} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_j^{p+1-j} \quad (2)$$

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

式中: N 为透射阶数; 0为边界点; j 为与0相邻的内节点。

需要注意的是: 式(1)中位移 u 为全波场位移, 而式(2)中的位移是散射场位移。对于计算模型的底边界, 散射场位移=全波场位移-入射波场位移; 对于侧边界, 散射场位移=全波场位移-斜入射自由场。

2.2 均匀弹性半空间数值解和理论解的比较

假定一均匀线弹性半空间模型, 模型尺寸及测点位置见图1。 $L \times H = 1\,000\text{ m} \times 300\text{ m}$, 介质密度 $\rho = 1\,500\text{ kg/m}^3$ 。对于左侧边界, 从模型的A点向B点每隔20 m布置一个测点, 测点编号依次为1~16号点; 对于地表面, 从模型的B点向C点每隔100 m布置一个测点, 测点编号依次为16~26号点。

入射 P 波波速 $V_p = 866$ m/s, 入射角度 $\theta = 60^\circ$ 。入射波位移时程如图 2 所示。

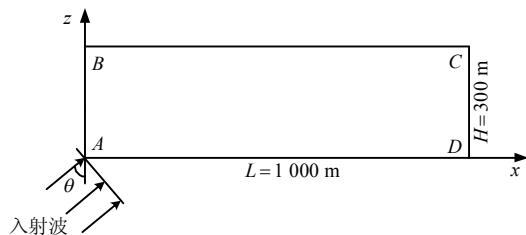


图 1 弹性半平面计算模型

Fig.1 Elastic calculation model of half-plane

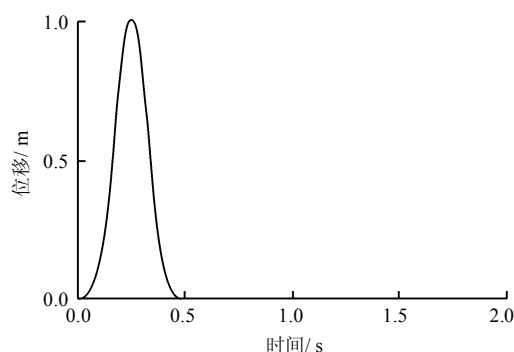


图 2 入射波位移时程

Fig.2 Displacement-time history of incident wave

图 3、4 给出了入射 P 波 60° 角入射时边界和地表各点的位移时程, 其中理论解是采用频域传递矩阵法^[31]得到。从结果可以看到, 均匀弹性半平面数值解和理论解吻合很好, 这说明本文利用文献[33]中给出的人工边界条件计算斜入射自由场, 而后采用有限元法和透射人工边界相结合的计算陡坎地形的数值模拟方法是可行的。

2.3 陡坎计算模型

假定一均匀、各向同性弹性半空间的表面为陡坎地形, 介质参数选取为剪切波速 $V_s = 1\,000$ m/s, 质量密度 $\rho = 1\,700$ kg/m³, 泊松比 $\mu = 0.25$ 。计算模型及测点位置见图 5, 测点 1 距离坡脚左侧边界

100 m, 测点 1~17 的间距为 40 m; 测点 17~25 的间距为 20 m; 测点 26~28 均匀分布在斜坡坡面上; 坡顶测点 29~37 的间距为 20 m, 测点 37~53 的间距为 40 m, 测点 53 距离右侧边界 100 m。

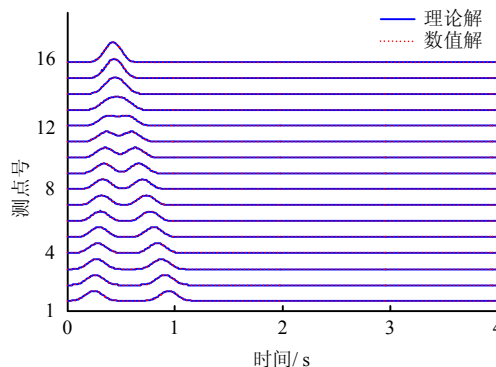


图 3 P 波 60° 入射下左边界各测点水平向位移时程
Fig.3 Time histories of horizontal displacements of observation points at left boundary for 60° inclined incident P wave

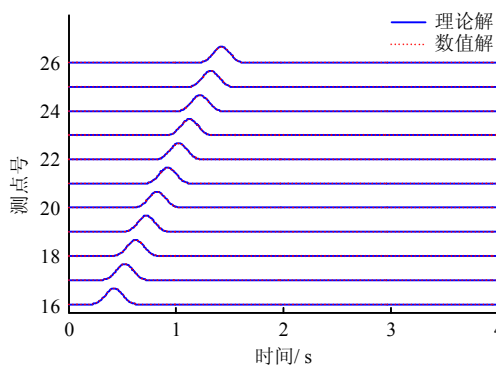


图 4 P 波 60° 入射下地表各测点水平向位移时程
Fig.4 Time histories of horizontal displacements of observation points at the free surface for 60° inclined incident P wave

分别从模型左侧和右侧斜入射 P 波, 左右两侧入射角度分别定义为 θ_1 和 θ_2 。选取的输入波为 El-Centro 波和宁河波, 如图 6 所示。

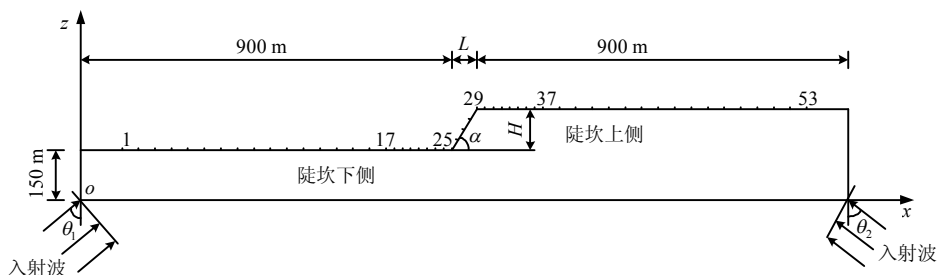


图 5 陡坎模型及测点位置示意图

Fig.5 Scarp model and the observers position layout

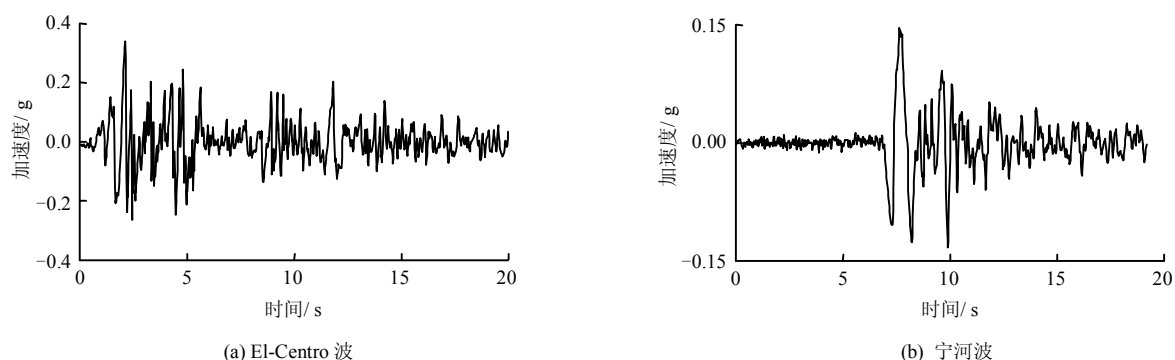


图6 输入 El-Centro 波和宁河波的加速度时程
Fig.6 Acceleration time history of incident El-Centro wave and Ninghe wave

3 陡坎场地地表地震动响应

定义地震动峰值放大系数(以下简称放大系数) β 为观测点地表地震动峰值 $A_{\max}$ 与输入地震动峰值 $A_{\max, \text{input}}$ 的比值,即 $\beta = |A_{\max} / A_{\max, \text{input}}|$,本文采用 β 来描述陡坎场地对波动的放大效应。

3.1 坡角 α 影响

取陡坎模型斜坡宽度 $L=60\text{ m}$,地震波以入射

角 $\theta=30^\circ$ 分别从左侧和右侧入射。图7~10给出了坡角 α 分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 和 50° 时,陡坎场地地表各观测点的地震动峰值放大系数。图中0的位置对应于测点25。

图7、8显示,地震波从左边入射,且入射角 $\theta_1=30^\circ$ 的情形下,对于 x 分量:陡坎的地震动峰值放大系数均小于2.0,即小于垂直入射水平地表的情形(放大系数理论值为2.0),介于0.8~1.3之间,

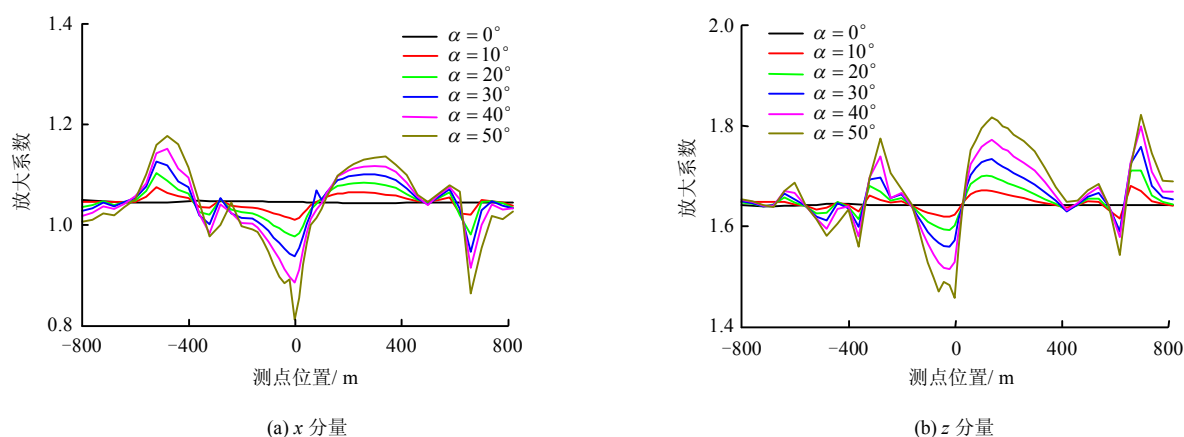


图7 入射角 $\theta_1=30^\circ$,左侧斜入射 El-Centro 波各测点地震动放大系数
Fig.7 Amplification factors of surface points for scarps with left incident El-Centro wave and incident angle $\theta_1=30^\circ$

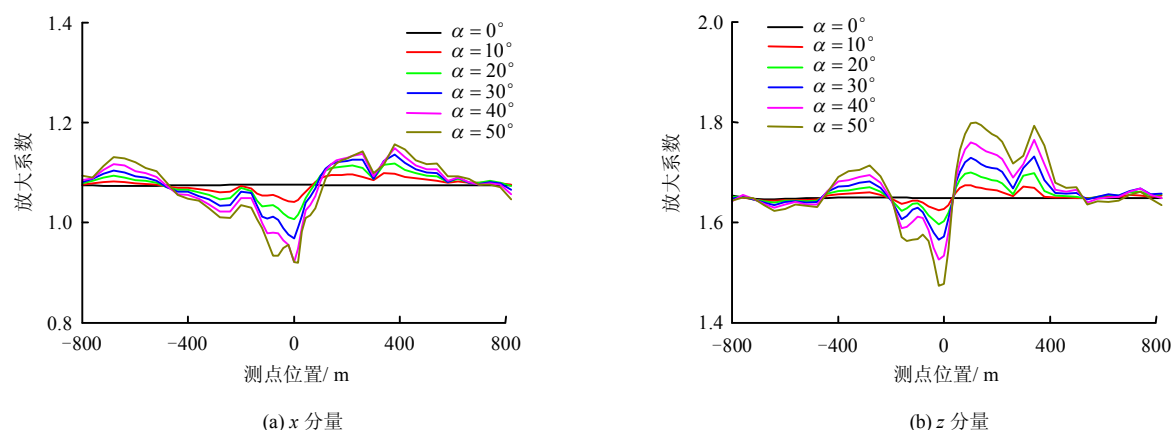


图8 入射角 $\theta_1=30^\circ$,左侧斜入射宁河波各测点地震动放大系数
Fig.8 Amplification factors of surface points for scarps with left incident Ninghe wave and incident angle $\theta_1=30^\circ$

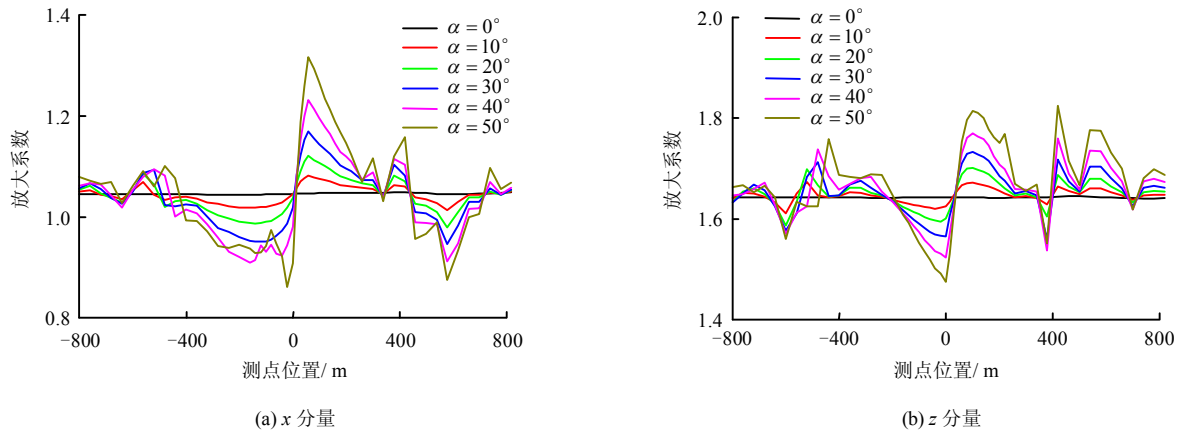


图9 入射角 $\theta_2 = 30^\circ$ ，右侧斜入射 El-Centro 波各测点地震动放大系数

Fig.9 Amplification factors of surface points for scarps with right incident El-Centro wave and incident angle $\theta_2 = 30^\circ$

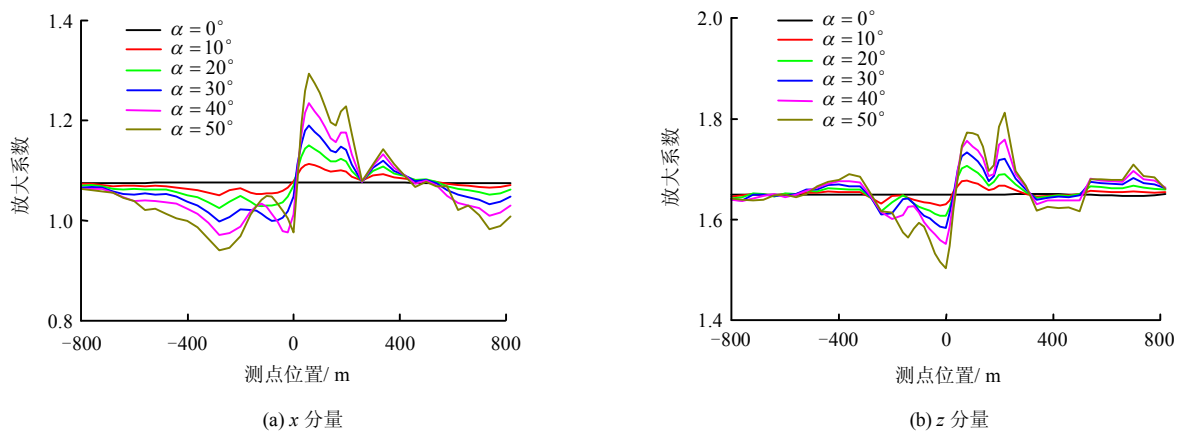


图10 入射角 $\theta_2 = 30^\circ$ ，右侧斜入射宁河波各测点地震动放大系数

Fig.10 Amplification factors of surface points for scarps with right incident Ninghe wave and incident angle $\theta_2 = 30^\circ$

上侧的比下侧的大；放大系数最大值并没出现在陡坎上侧边缘（测点 29），而是随着坡角 α 从 0° 逐渐增大到 50° 时，最大值距离上侧边缘为 260~340 m，然后缓慢减小，最后趋于平稳；陡坎下侧边缘（测点 25）的峰值放大系数为最小；从坡底到坡顶，峰值放大系数逐渐增大。

对于 z 分量：陡坎的峰值放大系数也都小于 2.0，介于 1.4~1.8 之间，上侧的比下侧的大；放大系数最大值并没出现在陡坎上侧边缘（测点 29），而是随着坡角 α 从 0° 逐渐增大到 50° 时，最大值距离上侧边缘为 120~160 m；陡坎下侧边缘（测点 25）的峰值放大系数为最小；从坡底到坡顶，峰值放大系数逐渐增大。

图 9、10 显示，地震波从右边入射，且入射角 $\theta_2 = 30^\circ$ 时，对于 x 分量：陡坎的地震动峰值放大系数介于 0.8~1.3 之间，上侧的比下侧的大；放大系数最大值出现在陡坎上侧边缘（测点 29），陡坎

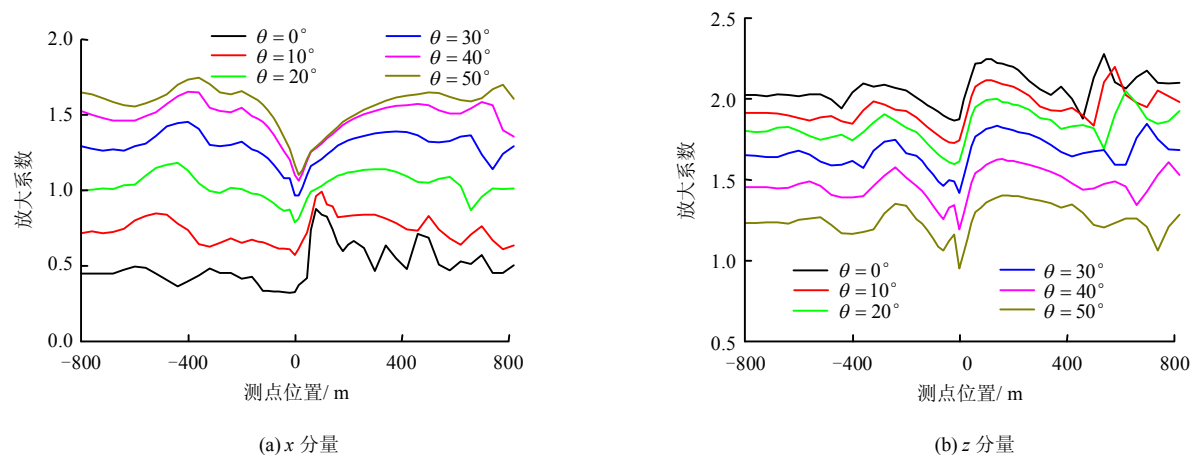
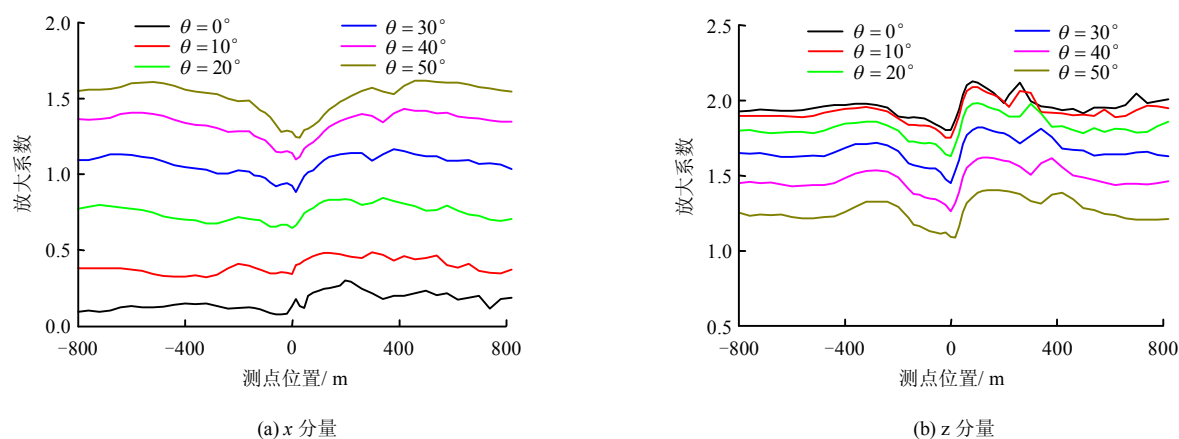
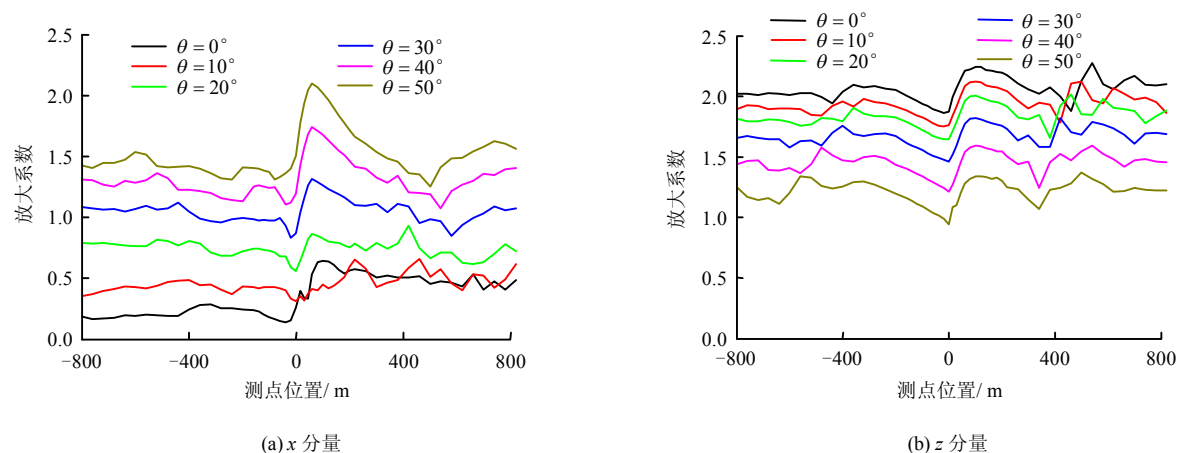
下侧边缘（测点 25）的峰值放大系数为最小；从坡底到坡顶，峰值放大系数逐渐增大。

对于 z 分量：陡坎的峰值放大系数介于 1.4~1.8 之间，上侧的比下侧的大；放大系数最大值并没出现在陡坎上侧边缘（测点 29），最大值距离上侧边缘为 120 m 左右，陡坎下侧边缘（测点 25）的峰值放大系数为最小；从坡底到坡顶，峰值放大系数逐渐增大。

总的趋势为：坡角 α 越大，陡坎上侧放大系数越大，陡坎下侧放大系数越小。

3.2 入射角 θ 影响

本节将探讨陡坎模型坡角 $\alpha = 45^\circ$ 一定，且取陡坎高度 H 和斜坡宽度 L 都等于 60 m 的情况下，陡坎场地随着入射波入射角度 θ 变化时的响应规律。图 11~14 给出了入射角 θ 分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 时，地震波分别从左、右两侧入射时陡坎场地地表各观测点的地震动峰值放大系数。

图 11 坡角 $\alpha = 45^\circ$, 左侧斜入射 El-Centro 波各测点地震动放大系数Fig.11 Amplification factors of surface points for scarps with left incident El-Centro wave and slope angle $\alpha = 45^\circ$ 图 12 坡角 $\alpha = 45^\circ$, 左侧斜入射宁河波各测点地震动放大系数Fig.12 Amplification factors of surface points for scarps with left incident Ninghe wave and slope angle $\alpha = 45^\circ$ 图 13 坡角 $\alpha = 45^\circ$, 右侧斜入射 El-Centro 波各测点地震动放大系数Fig.13 Amplification factors of surface points for scarps with right incident El-Centro wave and slope angle $\alpha = 45^\circ$

根据图 11、12, 当坡角 $\alpha = 45^\circ$, 地震波从左边斜入射时, 对于 x 分量: 陡坎的地震动峰值放大

系数均小于 2.0, 且随着入射角的增大而增大; 放大系数的最小值出现在陡坎下侧边缘, 放大系数最大

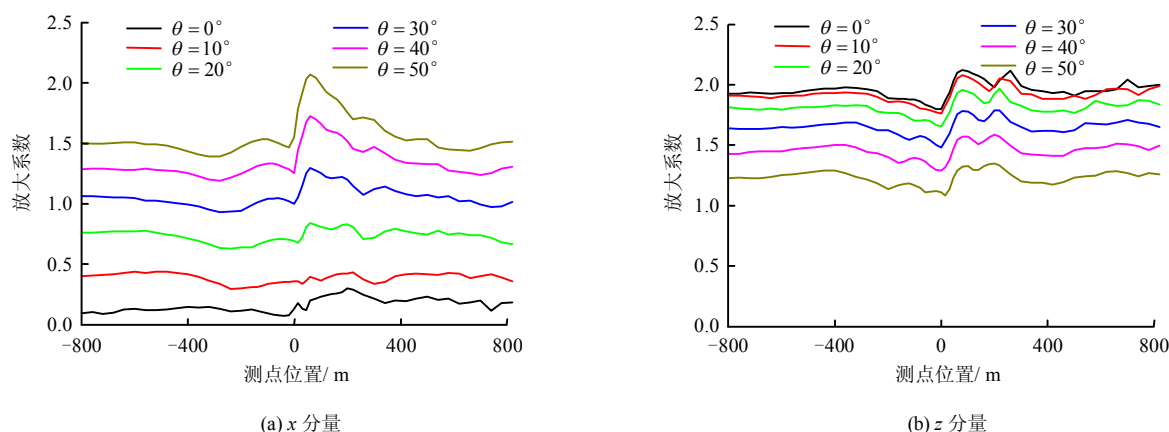


图 14 坡角 $\alpha = 45^\circ$ ，右侧斜入射宁河波各测点地震动放大系数

Fig.14 Amplification factors of surface points for scarps with right incident Ninghe wave and slope angle $\alpha = 45^\circ$

值并没出现在陡坎上侧边缘（测点 29），而是随着入射角的逐渐增大，越来越偏离上侧边缘；垂直入射时，放大系数最小。

对于 z 分量：当入射角越小时，放大系数越大，且放大系数最大值越靠近陡坎上侧边缘；垂直入射时，放大系数最大。

文献[19]给出了地震波垂直入射，坡脚 $\alpha = 45^\circ$ 的陡坎地表地震动反应峰值分布：当假定输入波为脉冲 P 波时，陡坎上侧的反应大于下侧， z 分量最大放大系数为 2.2，与本文结果（图 11、12）相似，但影响范围大约为 150 m，小于本文结果。

根据图 13、14，当坡角 $\alpha = 45^\circ$ ，地震波从右边斜入射时，对于 x 分量：陡坎的地震动峰值放大系数随着入射角的增大而增大，当入射角达到一定程度后，陡坎上侧的放大系数会大于 2.0，且越靠近陡坎上侧边缘；放大系数的最小值出现在陡坎下侧边缘；垂直入射时，放大系数最小。

对于 z 分量：当入射角越小时，放大系数越大，

且放大系数最大值越靠近陡坎上侧边缘；垂直入射时，放大系数最大；陡坎上侧的影响范围相比左入射时小。

此外，从图 7~14 可以看出，El-Centro 波和宁河波输入下，陡坎地震动峰值放大系数的影响程度和范围略有区别，但影响趋势类似。同时，斜入射的趋势较垂直入射的复杂。

3.3 和 SV 波斜入射结果的对比

取陡坎坡角 α 为 50° ，斜坡宽度 $L = 60$ m，地震波以入射角 $\theta = 30^\circ$ 从左侧入射。图 15、16 分别给出了 El-Centro 波和宁河波分别以 P 波和 SV 波的形式入射时，陡坎场地地表各观测点的地震动峰值放大系数。图中 0 的位置对应于测点 25。

与入射 P 波相比，SV 波入射时， x 分量的地震动反应峰值大于 z 分量。放大系数的分布趋势也与文献[22]的结果相似，因为计算模型的原因，如文献[22]考虑了介质阻尼，入射波最大频率 10 Hz 等，与本文放大系数的大小有差别。

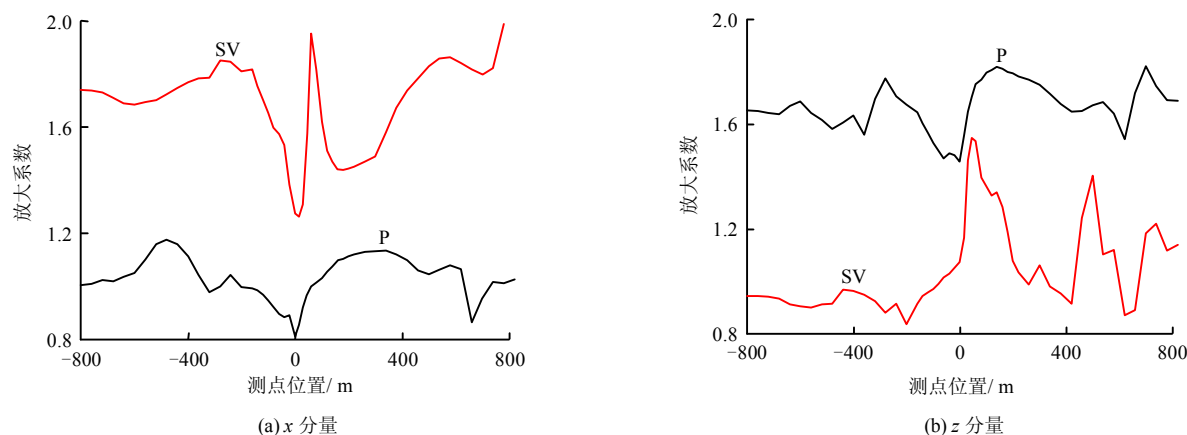


图 15 坡角 $\alpha = 50^\circ$ ，左侧 30° 斜入射 El-Centro 波各测点地震动放大系数

Fig.15 Amplification factors of surface points for scarps with 30° left incident El-Centro wave and slope angle $\alpha = 50^\circ$

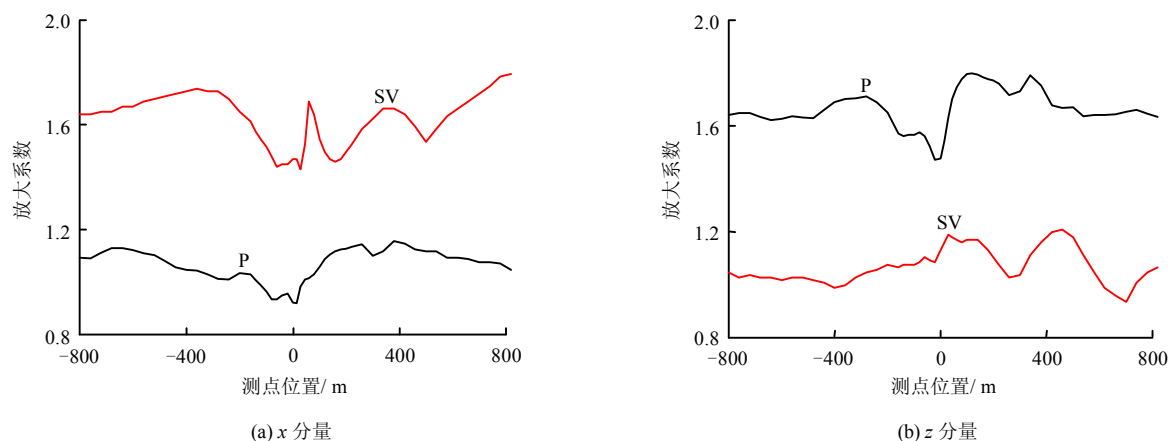


图 16 坡角 $\alpha = 50^\circ$, 左侧 30° 斜入射宁河波各测点地震动放大系数

Fig.16 Amplification factors of surface points for scarps with 30° left incident Ninghe wave and slope angle $\alpha = 50^\circ$

4 结 论

(1) 不同地震波作用下, 如 El-Centro 波和宁河波, 地震动峰值放大系数的影响程度和范围有一点区别, 但影响趋势基本类似, 斜入射的趋势较垂直入射的复杂, 与其他文献的比较也反映出这一趋势。

(2) 从陡坎下侧到陡坎上侧, 放大系数逐渐增大, 入射角度 θ 、坡角 α 和入射方向没有影响。

(3) 入射角度 θ 一定时, 无论地震波顺着陡坎方向(左)入射还是逆着陡坎方向(右)入射, 陡坎上侧的放大系数大于陡坎下侧的放大系数。同时, 放大系数随着坡角 α 的增大而增大。

(4) 坡角 α 不变, 地震波顺着陡坎方向(左)入射时, x 分量的放大系数随着入射角的增大而增大, z 分量的放大系数随着入射角的增大而减小。

(5) 地震波顺着陡坎方向(左)入射时, 放大系数最大值并没出现在陡坎上侧边缘, 坡角越大, 偏离越大, x 分量比 z 分量偏离大。地震波逆着陡坎方向(右)入射时, 放大系数最大值基本在陡坎上侧边缘, 特别是 x 分量。但无论哪种情形, 放大系数的最小值总是在陡坎下侧边缘。

(6) 地震波顺着陡坎方向(左)入射时, x 分量的放大系数比地震波逆着陡坎方向(右)入射时的大, z 分量变化不大。

(7) P 波和 SV 波斜入射时, 即便在半空间自由表面, 都将产生水平和垂直分量振动。P 波入射时, z 分量的地震动反应峰值大于 x 分量, SV 波入射时, x 分量的地震动反应峰值大于 z 分量。

参 考 文 献

[1] 田启文, 袁一凡. 工程地震学[M]. 北京: 地震出版社, 2012.

TIAN Qi-wen, YUAN Yi-fan. Engineering seismology[M]. Beijing: Seismological Press, 2012.

[2] 胡丰贤, 孙平善, 章在塘, 等. 场地条件对震害与地震动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 1980(试刊).

HU Yu-xian, SUN Ping-shan, ZHANG Zai-yong, et al. Effects of site conditions on earthquake damage and ground motion[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1980.

[3] 孙平善, 胡丰贤, 田启文, 等. 澜沧-耿马地震震害分布与场地影响[C]//澜沧-耿马地震震害论文集. 北京: 科学出版社, 1991.

SUN Ping-shan, HU Yu-xian, TIAN Qi-wen, et al. Seismic intensities distribution and site effect of the Lancang- Gengma earthquake[C]//Proceedings of the seismic intensities of Lancang-Gengma earthquake. Beijing: Science Press, 1991.

[4] DAVIS L L, WEST L R. Observed effects of topography on ground motion[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1973, 63(1): 283-298.

[5] CLOUGH R W, CHOPRA A K. Earthquake stress analysis in earth dams[J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 1966, 92(2): 197-212.

[6] 周正华, 王玉石, 王伟, 等. 汶川 Ms 8.0 地震中山脊地形效应-自贡西山公园事例[C]//纪念汶川地震一周年研讨会论文集. 北京: 地震出版社, 2009: 58-64.

ZHOU Zheng-hua, WANG Yu-shi, WANG Wei, et al. The effect of ridge topography on strong ground motion in Wenchuan Ms 8.0 earthquake: The case of Xishan Park, Zigong[C]//Proceedings of the symposium to mark the first anniversary of the Wenchuan earthquake. Beijing: Seismological Press, 2009: 58-64.

[7] TRIFUNAC M D. Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon[J]. **Earthquake Engineering and Structure Dynamics**, 1973, 1(3): 267-281.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] CAO H, LEE V W. Scattering of plane SH-waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio[J]. **European Earthquake Engineering**, 1989, 2: 29—37.
- [12] 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 Xiao-ming. Application research of wave function expansion method in scattering of elastic wave[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1994.
- [13] 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.
- [14] LEE V W, SABBAN M S, GHOSH T. 3-D surface motion of long semi-circular longitudinal canyons: incident plane P waves[J]. **European Journal of Earthquake Engineering**, 1996, 9(3): 12—22.
- [15] 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 Jian-wen, YAN Lin-jun, QIN Dong, et al. Dynamic response of circular-arc sedimentary valley site under incident plane SV wave[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2003, 36(12): 74—82.
- [16] 梁建文, 严林隽, 李军伟, 等. 圆弧形沉积河谷场地在平面 P 波入射下的响应[J]. **岩土力学**, 2001, 22(2): 138—143.
- LIANG Jian-wen, YAN Lin-jun, LI Jun-wei, et al. Response of circular-arc alluvial valleys under incident P wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(2): 138—143.
- [17] 祁生文. 单面边坡的两种动力反应形式及其临界高度[J]. **地球物理学报**, 2006, 49(2): 518—523.
- QI Sheng-wen. Two patterns of dynamic responses of single-free-surface slopes and their threshold height[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2006, 49(2): 518—523.
- [18] 柴红保, 曹平, 林杭. 坚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 Hong-bao, CAO Ping, LIN Hang. Dynamic response laws of slope under vertical shear wave[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2011, 42(4): 1079—1084.
- [19] 王伟. 地震动的山体地形效应[D]. 哈尔滨: 中国地震工程力学研究所, 2011.
- WANG Wei. Effect of hill topography on ground motion[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011.
- [20] 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 Wei, LUO Qi-feng. Seismic wave propagation in complex topography[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(9): 1333—1337.
- [21] 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 Hai-ping, ZHU Rong-chu, SONG Zhen-xia. Effects of scarp topography on seismic ground motion[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2013, 33(5): 28—32.
- [22] ASHFORD S A, SITAR N. Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1997, 87(3): 692—700.
- [23] ASHFORD S A, SITAR N, LYSMER J, et al. Topographic effects on the seismic response of steep slopes[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1997, 87(3): 701—709.
- [24] 李山有, 廖振鹏. 地震体波斜入射情形下台阶地形引起的波型转换[J]. **地震工程与工程振动**, 2002, 22(4): 9—15.
- LI Shan-you, LIAO Zhen-peng. Wave-type conversion caused by a step topography subjected to inclined seismic body wave[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, 22(4): 9—15.
- [25] 李山有, 马强, 韦庆海. 地震体波斜入射下的断层台阶地震反应分析[J]. **地震研究**, 2005, 28(3): 277—280.
- LI Shan-you, MA Qiang, WEI Qing-hai. Seismic response analysis of fault step subjected to obliquely incident body waves[J]. **Journal of Seismological Research**, 2005, 28(3): 277—280.