

邓鹏. 2020. 单体边坡地形的地震动力响应及其放大效应的数值分析. 地震学报, 42(3): 349-361. doi: 10.11939/jass.20190133.

Deng P. 2020. Numerical parametric study of seismic dynamic response and amplification effects of slope topography. *Acta Seismologica Sinica*, 42(3): 349-361. doi: 10.11939/jass.20190133.

单体边坡地形的地震动力响应及其放大效应的数值分析*

邓 鹏[†]

(中国武汉 430072 武汉大学土木建筑工程学院)

摘要 本文采用隐式动力有限单元法研究了不同的边坡角度和边坡高度对地形放大效应的影响,并以位移峰值放大系数为衡量地震动放大效应的标准,计算了不同边坡角度和边坡高度条件下的地震响应,在此基础上对模型关键监测点的输出波形以及位移峰值放大系数的变化趋势进行了分析,获得了不同监测点处的地震动时程曲线,揭示了坡角和坡高对单体边坡地震动放大效应的定量作用规律,数值结果表明,相同高度处坡面监测点的水平向位移峰值放大系数大于坡内监测点的,地形放大效应在水平方向具有趋表效应.由于坡面存在入射波和反射波的叠加,因此竖直向位移峰值放大系数的最大值出现在坡体内部.

关键词 地震动 放大效应 边坡地形 动力有限元

doi: 10.11939/jass.20190133

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Numerical parametric study of seismic dynamic response and amplification effects of slope topography

Deng Peng[†]

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, the implicit dynamic finite element method was applied to analyze the seismic dynamic response and amplification effects of slope topography with different slope angles and heights. With the peak displacement amplification factor (PDA) as the measurement of the amplification effects of seismic waves, the seismic dynamic response based on the PDA under the different conditions was investigated. And then the topographical amplification effects of seismic waves were investigated by analyzing the output waveforms of key monitoring points in the numerical model as well as the variation trend of PDA. Consequently, the time history curves of ground motion at the different monitoring points were obtained. The peak displacement amplification effects induced by different slope angles and heights were quantitatively analyzed and discussed. The numerical results showed that, when the monitoring points were at the same height, the PDAs at the slope surface were larger than those inside the slope. The PDA had the surface effect in horizontal direction. Namely, the more close to the surface was,

* 基金项目 国家自然科学基金(51809198)资助.

收稿日期 2019-11-20 收到初稿, 2020-04-18 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: 2013301550220@whu.edu.cn



the larger PDA was. Due to the superposition of the incident seismic waves and the reflected waves induced by the slope surface, the maximum amplification factor of vertical peak displacement appeared inside the slope. The numerical results can provide some guidance in predicting and evaluating the vibration intensity and disaster degree of slopes to some extent.

Key words: seismic loads; seismic amplification effect; slope topography; dynamic finite element

引言

地震是一种世界性的自然灾害,而我国又是一个地震灾害严重的国家,每年频发的地震灾害会造成大量的人员伤亡和经济损失.其造成人员伤亡的根本原因是地震动引发的工程结构破坏及其诱发的次生地质灾害,包括滑坡、泥石流、崩塌和落石等.国内外多次地震震后调查和地震监测台站资料(戴嘉伟, 2016)均显示地震诱发的斜坡破坏常常出现在凸出、孤立的 山脊等地形突变处,具有明显的地形放大效应.将地球表面视作自由面,复杂的地形条件会增加地表自由面的约束,诱导地震波在地形突变处发生动应力集中,进而造成显著的地形效应.因此,开展边坡地震地形放大效应的研究,对于我国的抗震加固设计、地震灾害防治和“西部大开发”战略的贯彻落实具有十分重要的理论意义和工程实际应用价值.

在地形地貌变化处(如山峰或峡谷)地震影响系数会显著放大或缩小,此即为地震动的地形放大效应.近年来,对于地震动地形放大效应的研究主要集中在两方面:其一,对地震现场以及模型试验观测数据的研究(Çelebi, 1987; 李白基等, 1999);其二,对数值算法的研究(梁建文等, 2012; Poursartip *et al.*, 2017)以及对于具有简单几何形状的地形的解析和半解析研究(高玉峰, 2019),如三角楔形体或半圆形山谷地形.

关于地震现场观测数据的研究主要有:Boore (1972)报道了 1971 年圣费尔南多山谷的地震动情况;Çelebi (1987)研究了 1985 年智利大地震的地形放大效应;Massa 等(2004)分析了 2002 年意大利莫利塞地震的场地放大现象.上述研究结果表明,建筑结构的损坏主要发生于山脊及软土地带,而且结构的损坏模式与因地表不规则性而引起的与地震频率相关的放大效应有关.此外,Çelebi (1991)收集并总结了三次地震的现场实测结果,为一系列不同频率下的地震引起的地表放大现象提供了佐证.

地形效应的解析解和半解析解方面的研究,主要聚焦于地震动的传播与媒介之间的相互影响关系.地震动传播理论总体可分为积分型和微分型波动传播理论,前者是基于惠更斯、菲涅尔和基尔霍夫积分等定理建立的一套理论体系,而后者则是基于连续介质微分体积元弹性动力学等原理建立起来的一套理论体系,二者在本质上具有一致性.Sills (1978)提出了一种解决均匀半无限空间中任意地形 SH 波散射问题的积分方程,Sánchez-Sesma 等(1982)提出了一种任何不规则地形下 SH 波散射问题的边界积分法,随后 Sánchez-Sesma (1985)又提出了另一种用于求解无限楔形山峰(山谷)的解析法.Trifunac (2010)提出了一种用于求解半圆柱状山谷中 SH 波衍射问题的封闭解,计算结果显示出显著的放大效应.

常用的数值方法包括域方法和边界方法两种类型.域方法包括有限差分法(Zhang *et al.*, 2012)、有限元法(Smith, 1975)和谱单元法(Wang *et al.*, 2018),该方法的优势在于对介质材料的精细模拟,但在模拟中需要施加人工边界,以便将半空间问题限制在一个有限的区域内求解.Fukushima 等(2013)运用动力弹塑性有限元方法模拟了考虑应变软化特征下边坡遭受地

震荷载时的应力应变关系; Lin 和 Huang (2017) 运用有限差分软件 FLAC 模拟地震作用下边坡滑移体的滑移过程, 并分析了其可能的影响区域. 另一方面, 边界方法可以轻松满足辐射条件并降低研究维度, 例如: Bouchon (1973) 应用离散波数法研究了凸起地形和凹陷地形对地震动的放大效应, Wong 和 Jennings (1975) 推导了边界积分方程以研究帕克伊马 (Pacoima) 河谷的两个理想断面在 SH 波沿任意角度入射情况下的放大效应, Sánchez-Sesma 和 Rosenblueth (1979) 提出了可用于任意形状二维河谷地形的非直接边界积分方程法. 上述这些直接或间接边界积分方程法(边界元法)均需要计算格林函数, 但是对于半平面问题而言其计算效率相对较低.

以往的研究主要集中在楔形地形、经典的半圆形河谷和半椭圆形河谷等地形. 对于工程中常见的单体边坡模型, 国内外也有一些研究成果. 刘汉龙等(2003)提出了用最小平均安全系数作为评价指标来反映安全系数随地震动变化的过程; 郑颖人等(2009)通过有限差分软件 FLAC 采用动力强度折减法对地震边坡的破坏机制进行了数值分析, 结果表明地震边坡的破坏由边坡潜在破裂区上部的拉破坏与下部的剪切破坏共同组成; Erzin 和 Cetin (2012) 运用人工神经网络和多元线性回归的方法分析了一种典型人工边坡在地震荷载作用下的临界安全系数变化; 刘新荣等(2019)结合振动台试验与理论分析方法, 对水平层状岩质边坡在反复地震动作用下的累积损伤和破坏模式进行了深入研究. 然而, 前述研究通过数值模拟和振动台试验等方法, 仅对边坡在地震动作用下的破坏形式进行了分析, 并未深入揭示地震灾害的成因; 事实上, 边坡地形效应的存在, 会使得地震波在地形突变处产生反射、叠加、衍射, 进而影响地震动的幅度.

为此, 本文拟采用动力有限单元法对单体边坡地形的地震响应及其放大规律进行参数分析, 以期厘清不同的坡角和坡高对地形放大效应的影响. 将位移峰值放大系数 (peak displacement amplification factor, 缩写为 PDA) 作为衡量地震动放大效应的标准, 分析模型关键监测点的输出波形及其放大系数的变化趋势, 以探究不同地形条件下地震动的放大效应, 以期对地震动所产生的工程破坏预测以及建筑结构的抗震设计提供参考.

1 数值模型的建立

1.1 分析模型

岩质边坡的模型如图 1 所示, 模型坡高 H 为 100 m, 坡顶宽度为 50 m. 为研究边坡地形对地震动放大效应的影响, 设置计算工况如下: 保持边坡高度 100 m 不变, 边坡角度分别取 30° , 45° , 60° , 75° ; 保持边坡角度 30° 不变, 边坡高度分别取 70, 80, 90, 100 m.

大型工程的抗震分析需要考虑地震波的辐射阻尼效应, 目前的研究常采用截取近场有限域并在其边界处施加人工虚拟边界的方法来解决此问题. 张伯艳和李德玉(2014)采用黏弹性边界为吸能

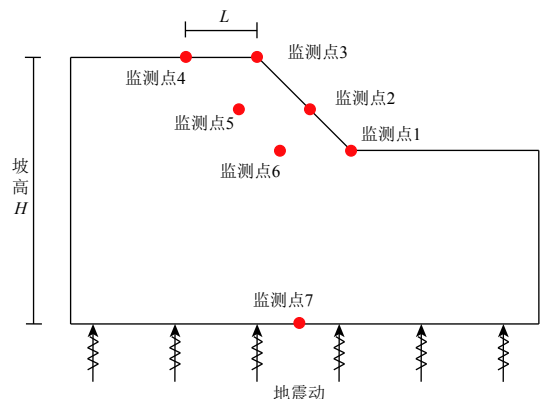


图 1 单体边坡几何模型示意图

Fig. 1 Geometry model of single slope

边界,以体现无限地基辐射阻尼的影响,并基于此对白鹤滩水电站左岸的岩质边坡进行了分析计算;陈宝魁等(2016)介绍了黏弹性人工边界在结构-地基动力相互作用等问题中的应用现状研究,重点叙述了黏弹性人工边界在有限元计算中的实现方法及其在地震工程中的应用;蒋锋云等(2018)采用黏弹性人工边界构建了川滇地区地壳三维黏弹性有限元模型,深入分析了汶川地震对川滇地区的震后影响.本文选用刘晶波等(2006)提出的等效二维一致黏弹性边界,即在模型边界处设置相应的弹簧和阻尼器(图2),当弹性地震动传播至模型边界时,弹性波的绝大部分能量均会被弹簧和阻尼器吸收,即经过处理后的模型边界可近似等效为无限边界.二维黏弹性人工边界等效物理系统的弹簧刚度和阻尼系数分别为:

切向边界:

$$K_{BT} = \alpha_T \cdot \frac{G}{R}, \tag{1}$$

$$C_{BT} = \rho \cdot v_S, \tag{2}$$

法向边界:

$$K_{BN} = \alpha_N \cdot \frac{G}{R}, \tag{3}$$

$$C_{BN} = \rho \cdot v_P, \tag{4}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \tag{5}$$

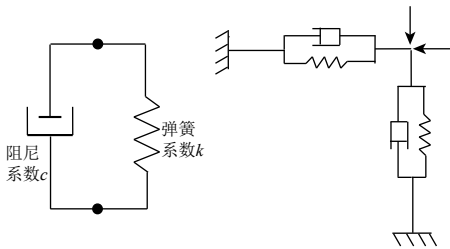


图 2 黏弹性人工边界

Fig. 2 Viscoelastic artificial boundary

式中: K_{BT} 和 K_{BN} 分别为弹簧切向和法向刚度; C_{BT} 和 C_{BN} 分别为弹簧切向和法向阻尼系数; R 为人工边界(黏弹性边界)与震源中心的距离; v_S 和 v_P 分别为半空间弹性介质的横波速度和纵波速度,其表达式分别为

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \tag{6}$$

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}; \tag{7}$$

E , G , ρ 和 μ 分别为半空间弹性介质的弹性模量、剪切模量、密度和泊松比; α_T 和 α_N 分别为切向及法向黏弹性人工边界参数,本文中取 $\alpha_T=0.5$, $\alpha_N=1$ (刘晶波等, 2006).

本文采用三节点三角形平面应变单元对计算区域进行离散,网格尺寸的大小直接影响计算精度和速度,但由于本文数值模型均为二维模型,相对而言对计算耗时的要求不及三维模型严格,再加上本文着重考虑确保模拟地震动的精度,因此本文选取的网格尺寸控制在最短波长.采用线弹性本构模型,其材料参数列于表1.

表 1 本文模型的材料参数

| Table 1 Material parameters of the model in this study | | | |
|--|--------------------------|----------|------|
| 材料 | 密度/(kg·m ⁻³) | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
| 岩体 | 2 400 | 50 | 0.25 |
| 节理 | 2 320 | 5 | 0.30 |

1.2 地震动输入

本文数值模型采用雷克子波模拟地震动输入,以位移荷载的形式施加于模型底部,以模拟垂直入射的平面地震动.雷克子波的表达式如下:

$$F(t) = A[1 - 2\pi^2 f^2 (t - t_0)^2] \exp[-\pi^2 f^2 (t - t_0)^2], \quad (8)$$

式中, A 为地震动最大振幅, f 为波形中心频率, 本文取 $f = 10$ Hz. 雷克子波在频域的波形如图 3 所示, 可见地震动持时为 0.2 s, 峰值加速度为 1.5 m/s^2 . 本文在模型底部同时施加水平和垂直方向的入射波. Chang 等(2015)为更好地表征不同模型尺寸的影响, 建议采用无量纲频率 η 来描述.

$$\eta = \frac{2H}{\lambda} = \frac{2Hf}{c}, \quad (9)$$

式中, H 为坡高, f 为波形中心频率, c 为波速. 根据本文数据可计算出当坡高分别为 70, 80, 90, 100 m 时, 对应的无量纲频率 η 分别为 0.28, 0.32, 0.36, 0.40.

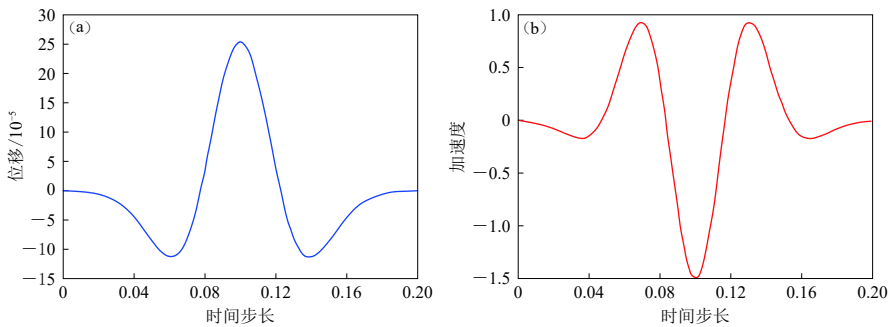


图 3 本模型输入的雷克子波的位移(a)和加速度(b)时程曲线

Fig. 3 Displacement (a) and acceleration (b) time-history curves of input Ricker wavelet

对于显式算法, 为了满足计算收敛和算法稳定性, 需满足最小时间积分步长的限制; 而对于本文采用的隐式算法, 时间步长取为输入时程的离散时间步距即可, 这对频带和计算精度均无影响. 本文取 $f = 10$ Hz, 采样时间间隔为 0.000 1 s.

2 单体边坡的地震动响应规律

2.1 关键点波形输出

张泽林等(2018)和詹志发等(2019)均在其边坡模型振动台试验中采取在关键点设置传感器的方法来记录相关试验数据, 进而分析边坡的动力响应规律; 丁梓涵等(2015)利用 FLAC3D 软件模拟了地震动作用下不同岩层倾角的顺倾向边坡, 从坡脚起沿顺坡面而上, 每隔 2 m 设置一个监测点, 探讨了岩层倾角对顺倾边坡所产生的地震效应的影响; 冯永等(2017)运用 ABAQUS 软件建立了三维模型, 并在边坡关键位置设置监测点来监测其应力应变的变化情况, 进一步探讨了地震动作用下的桩土作用机理. 本文选取的监测点及其标号如图 2 所示, 监测点 7 的地震动波形如图 4 所示.

对不同工况(边坡角度、边坡高度)下的计算结果, 选取入射监测点、沿坡面向上的三个监测点(1, 2, 3)的位移输出结果进行分析, 结果如图 5 所示, 可见: 不同监测点的波形呈现出相似性, 且随着监测点高度的增加(监测点 1→2→3), 坡体位移峰值出现的时间呈现滞后效应, 表明位置越高的监测点, 位移峰值出现的时间越靠后, 这与地震动的传播方向吻合. 本文施加的地震动作用在模型底部, 沿单体边坡向上传播, 因此峰值位移的出现时间呈现滞后

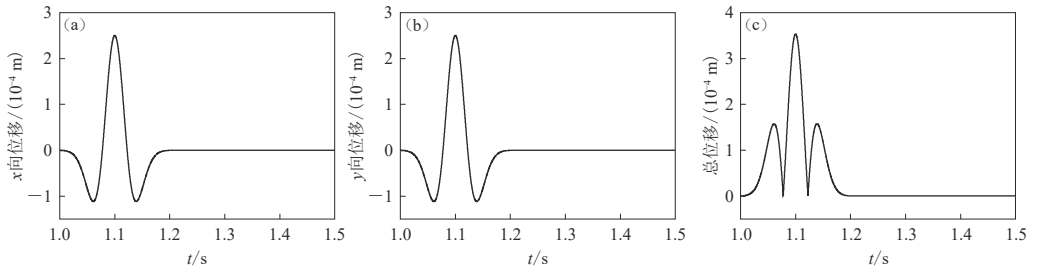


图 4 入射点沿 x 向(a)和 y 向(b)的入射波形以及总入射波形(c)

Fig. 4 Input waveform in x (a) and y (b) directions and total incident waveform (c)

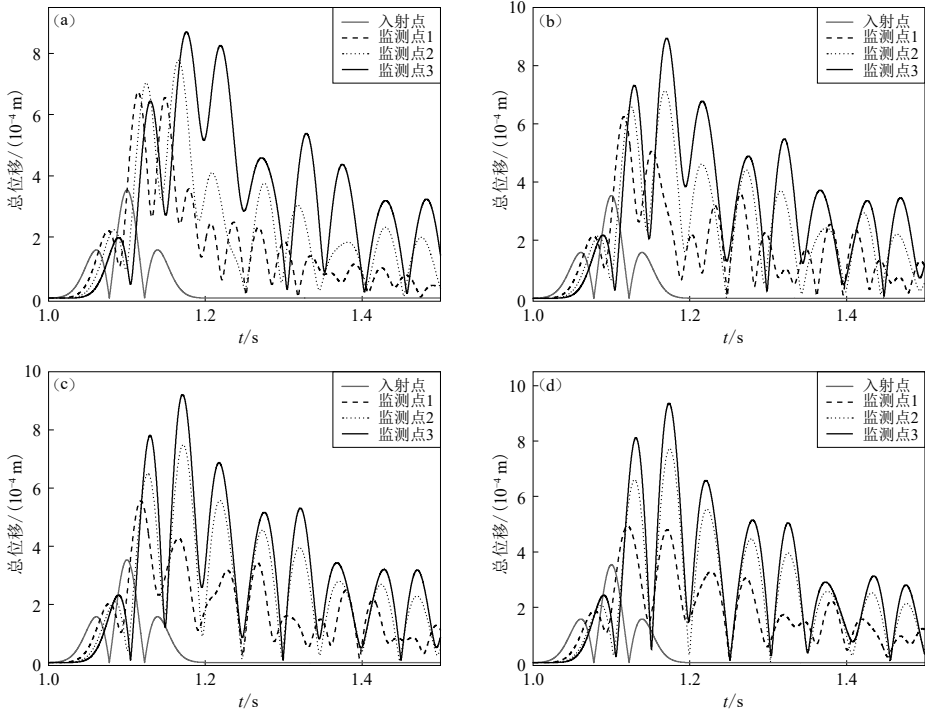


图 5 不同坡角 α 条件下关键监测点的总位移输出

Fig. 5 Total displacement output of key monitoring points under different slope angles α

(a) $\alpha=30^\circ$; (b) $\alpha=45^\circ$; (c) $\alpha=60^\circ$; (d) $\alpha=75^\circ$

效应. 此外, 不同坡角条件下, 位移峰值的出现呈现出相似的先后顺序, 即沿坡面向上位移峰值呈现递增趋势(监测点 1→2→3), 最大峰值位移出现在坡顶监测点 3 处.

2.2 地震动放大系数

为了更好地对地震动放大效应进行分析, 本文引入位移峰值放大系数这一概念来对单体边坡模型的放大效应进行定量分析. 定义位移峰值放大系数(PDA)为

$$PDA_i = \frac{U_i^{\max}}{U_0}, \tag{10}$$

式中, U_i^{\max} 为监测点 i 的位移峰值, U_0 为入射点的位移峰值. 本文以模型底部作为地震动的入射点(监测点 7), 入射点位移峰值即为监测点 7 的位移峰值, 其入射波形见图 4.

2.3 边坡中地震动放大效应的影响

在实际的隧道工程中,不同高程隧道洞口的存在改变了山体边坡表面及内部的场地条件,从而对坡面的稳定性产生影响,同样也会影响到山体边坡整体的地震响应.李天斌(2008)分析了汶川大地震造成位于震中附近的都江堰—汶川公路多座隧道严重受损的情况;王猛等(2019)设计了高陡黄土边坡大型振动台模型试验并分析了坡面不同高程以及隧道的存在对整体边坡地震动放大效应的影响;孙强强等(2019)利用数值方法研究了均匀弹性场地中圆形隧道对地表水平向峰值加速度的影响,分析了不同隧道埋深和不同入射波频率下地表水平向加速度的变化规律.因此,本文的分析中除考虑坡面地震动特征之外,也考虑了与坡面等高程处边坡内部监测点的地震动响应,并结合计算结果对其进行分析.为便于观察,本文对模型计算数据进行后处理,提取不同条件下相关关键监测点的位移峰值放大系数,结果如图6和图7所示.

从图6a可以看出:不同边坡角度 α 下,水平向位移放大系数的最大值均出现在边坡顶部监测点3,水平向位移峰值放大系数分别为2.36(坡角 $\alpha=30^\circ$),2.1($\alpha=45^\circ$),2.06($\alpha=60^\circ$),1.84($\alpha=75^\circ$);在坡顶同一高度处的位移峰值放大系数与坡顶监测点3相比略小,且随着坡角的增大,水平向位移峰值放大系数呈递减趋势;在相同高度处,坡面监测点

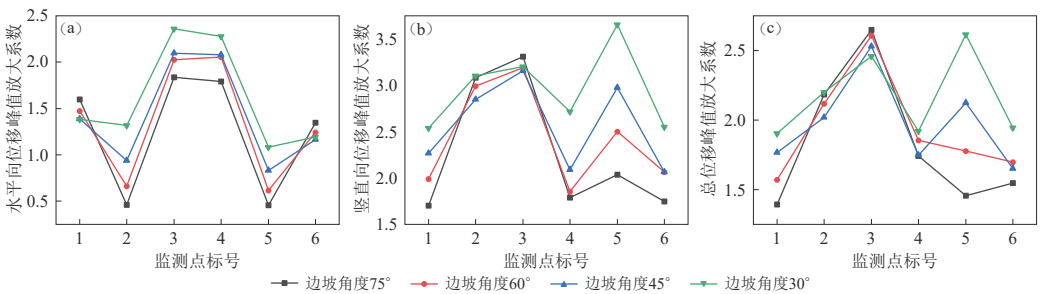


图6 不同坡角 α 时各监测点的位移峰值放大系数

(a) 水平向位移峰值放大系数; (b) 竖直向位移峰值放大系数; (c) 总位移峰值放大系数

Fig. 6 Peak displacement amplification factor (PDA) of the monitoring points under different slope angle α

(a) Horizontal PDA; (b) Vertical PDA; (c) Total PDA

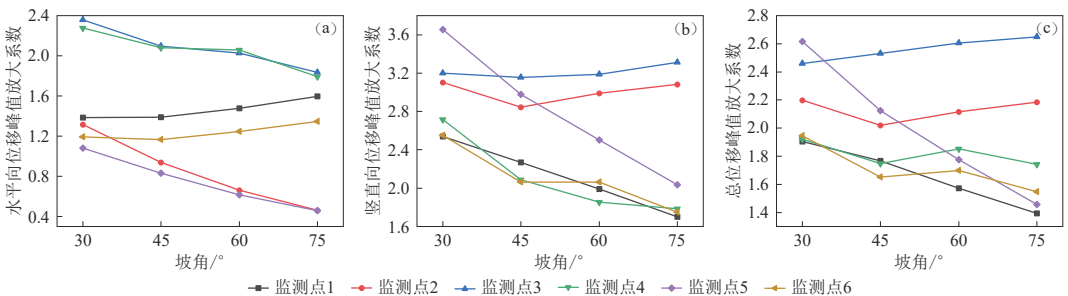


图7 各监测点位移峰值放大系数随坡角 α 的变化

(a) 水平向位移峰值放大系数; (b) 竖直向位移峰值放大系数; (c) 总位移峰值放大系数

Fig. 7 Variation of peak displacement amplification factor of monitoring points with slope angle α

(a) Horizontal PDA; (b) Vertical PDA; (c) Total PDA

的位移峰值放大系数略大于坡内监测点(监测点 1>6, 2>5, 3>4), 说明水平向位移峰值放大系数的分布呈现出一定的趋表效应. 从图 6b 可以看出: 坡角 $\alpha=45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 时, 竖直向位移峰值放大系数的最大值同样出现在边坡顶部监测点 3, 其值分别为 3.16 (坡角 $\alpha=45^\circ$), 3.19 ($\alpha=60^\circ$), 3.31 ($\alpha=75^\circ$); 当坡角 α 为 30° 时, 竖直向位移峰值放大系数的最大值反而出现在坡内监测点 5, 其值为 3.65, 究其原因是在坡度较缓的情况下 ($\alpha=30^\circ$), 入射的竖向波在坡面产生了一定程度的反射波, 反射波与入射波在坡内叠加, 进而造成了竖直向位移峰值放大系数最大值出现在坡体内部. 从图 6c 可以看出: 总位移峰值放大系数的分布与竖直向位移峰值放大系数的分布大致相似, 沿坡面向上的监测点的位移峰值放大系数呈现递增趋势(监测点 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3); 除坡角为 30° 时, 其余坡角的总位移峰值放大系数均出现在坡顶监测点 3 处, 其值分别为 2.53 ($\alpha=45^\circ$), 2.61 ($\alpha=60^\circ$) 和 2.65 ($\alpha=75^\circ$); 当坡角为 30° 时, 其总位移峰值放大系数为 2.62, 最大值出现在坡内监测点 5 处, 这是由于竖直向位移峰值放大系数的数值大于水平向位移峰值放大系数, 因此合成之后的位移最大值出现在监测点 5 处.

从图 7a 可以看出: 随着边坡角的增大, 监测点 2, 3, 4 和 5 的水平向位移峰值放大系数呈减小趋势; 监测点 1 和 6 的水平向位移峰值放大系数呈增大趋势, 水平向位移峰值放大系数的最大值出现在坡顶监测点 3 和 4 处. 由图 7b 可以看出: 随着边坡角的增大, 坡顶监测点 3 的竖直向位移峰值放大系数变化不大, 其值在 3.2—3.3 之间波动; 监测点 2 亦是如此, 其值在 2.9—3.1 之间上下波动, 变化幅度不大; 随着边坡角的增大, 监测点 1, 4, 5 和 6 的竖直向位移峰值放大系数均呈减小趋势. 图 7c 的总位移放大规律与竖直向位移放大规律类似, 即: 随着边坡角度的增大, 监测点 1, 4, 5 和 6 的总位移峰值放大系数呈减小趋势, 坡顶监测点 3 的总位移峰值放大系数则呈增大趋势, 坡面中部监测点 2 则上下波动, 变化不明显.

为全面揭示坡形影响, 沿着监测点 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 的方向, 即沿着从左往右的方向, 适当加密监测点, 每个监测点附近选取 5 个加密点, 共计 20 个监测点. 编制相关程序提取不同计算工况下的最大水平向、竖直向以及总位移值并计算相应的放大系数, 结果如图 8 所示.

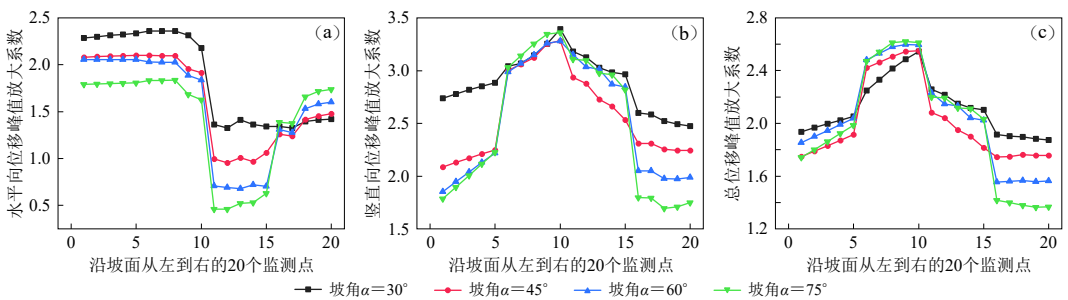


图 8 不同坡角工况下坡表面监测点位移放大系数

(a) 水平向位移峰值放大系数; (b) 竖直向位移峰值放大系数; (c) 总位移峰值放大系数

Fig. 8 PDA of observation points under different slope angle α

(a) Horizontal PDA; (b) Vertical PDA; (c) Total PDA

值得注意的是, 图 8 中横坐标监测点序数是按照监测点 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 的顺序进行加密, 即由坡顶沿坡面向下排列, 可以看出: 不同坡角工况下, 位移放大系数的变化趋势与前述分析基本吻合.

图9和图10分别给出了不同高度单体边坡关键点的位移放大系数的变化情况。从图9a可以看出: 水平向位移峰值放大系数出现在坡顶监测点3处, 且最大值出现在 $\eta=0.40$ 时, 其值分别为2.096 ($\eta=0.28$), 2.095 ($\eta=0.32$), 2.10 ($\eta=0.36$)和2.36 ($\eta=0.40$); 同一高度的水平向位移峰值放大系数呈现出一定的趋表效应, 即同一高度下坡面监测点(监测点1, 2和3)的水平向位移峰值放大系数略大于坡内监测点(监测点6, 5和4)。由图9b和图9c可知, 竖直向位移峰值放大系数与总位移峰值放大系数呈现大致相同的波动状况, 这是由于竖直向位移峰值放大系数大于水平向位移峰值放大系数, 因此合成之后占主导地位, 使得总位移峰值放大系数与竖直向位移峰值放大系数的波动状况相似, 在 η 分别为0.28, 0.32, 0.36, 0.40时均沿着坡面向上的监测点(监测点1, 2和3)呈递增趋势。

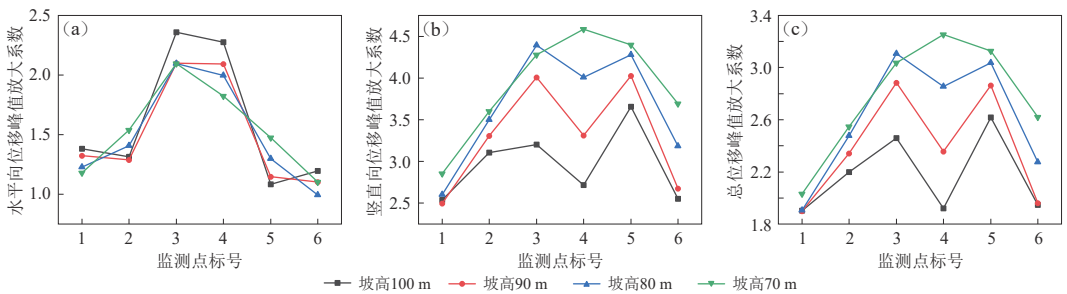


图9 不同位置监测点的放大效应规律

(a) 水平向位移峰值放大系数; (b) 竖直向位移峰值放大系数; (c) 总位移峰值放大系数

Fig. 9 Amplification effect of the monitoring points at different locations

(a) Horizontal PDA; (b) Vertical PDA; (c) Total PDA

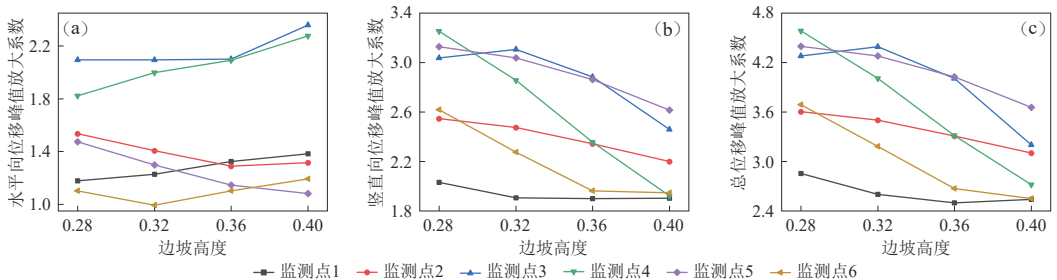


图10 边坡高度对各监测点放大效应的影响

(a) 水平向位移峰值放大系数; (b) 竖直向位移峰值放大系数; (c) 总位移峰值放大系数

Fig. 10 Amplification effect of the monitoring points under different slope height

(a) Horizontal PDA; (b) Vertical PDA; (c) Total PDA

由图10可以看出: 随着边坡高度的增大, 坡顶监测点3和4的水平向位移峰值放大系数随之增大, 而其余监测点的水平向位移峰值放大系数则呈下降趋势(图10a); 对于竖直向位移峰值放大系数而言, 所有监测点几乎都呈现随高度增加而减小的趋势(图10b), 且各监测点竖直向位移峰值放大系数大于水平向位移峰值放大系数, 因此总位移放大系数中竖直向位移峰值放大系数占主导地位, 其波动规律与竖直向位移峰值放大系数类似(图10c)。

为全面揭示坡形影响，沿着监测点 4→3→2→1 的方向，适当加密监测点，每个监测点附近选取 5 个加密点，共计 20 个监测点，编制相关程序提取不同坡高情况下其最大水平向、竖直向以及总位移，并计算相应的放大系数，结果如图 11 所示。

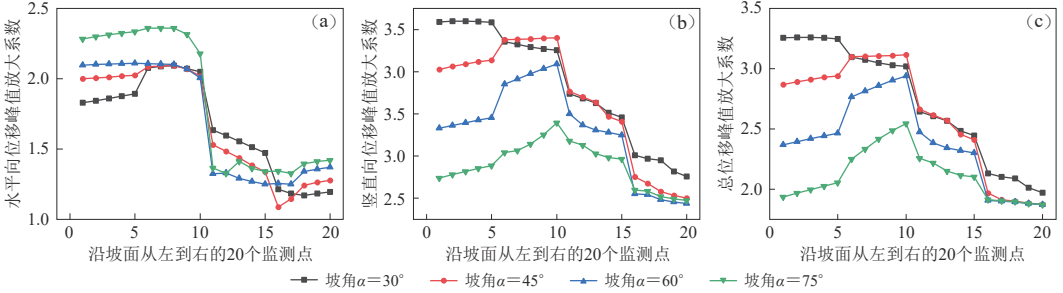


图 11 不同坡高工况下坡表面监测点的位移峰值放大系数

(a) 水平向位移峰值放大系数; (b) 竖直向位移峰值放大系数; (c) 总位移峰值放大系数

Fig. 11 PDA of the observation points under different slope height

(a) Horizontal PDA; (b) Vertical PDA; (c) Total PDA

与图 8 类似，横坐标按照监测点 4→3→2→1 的顺序进行加密，即由坡顶沿坡面向下排列，可以看出，不同坡高工况下位移峰值放大系数的变化趋势与前述分析基本一致。

3 讨论与结论

本文采用动力有限单元法，分析了单体边坡的地震动响应规律，研究了不同边坡角度、边坡高度工况下单体边坡的地形放大效应，根据计算结果，得出以下结论：

1) 不同监测点的波形表现出相似性，即：随着监测点高度的增加，坡体位移峰值出现时间呈现滞后效应，这与地震动的传播方向吻合；不同坡角条件下位移峰值的出现呈现相似的先后顺序，即沿坡面向上位移峰值呈现递增趋势，最大峰值位移出现在坡顶监测点 3 处。

2) 当坡角为 30°时，竖直向位移峰值放大系数和总位移峰值放大系数的最大值出现在坡内监测点 5，原因是在坡度较缓的情况下，入射的竖向波在坡面产生了一定程度的反射，反射波与入射波在坡内叠加，造成了竖直向位移峰值放大系数的最大值出现在坡体内部。监测点 2, 3, 4 和 5 的水平向位移峰值放大系数随坡角的增大均呈现减小的趋势，坡脚监测点 1 和 6 随着坡角增大呈递增趋势，水平向位移峰值放大系数的最大值出现在坡顶监测点 3 处。坡顶监测点 3 的水平向位移峰值放大系数随坡角的增大变化不大，在 3.2—3.3 之间波动，监测点 2 的值在 2.9—3.1 之间上下波动，监测点 1, 4, 5 和 6 的值随着坡角增大均呈现减小趋势。相同高度处，坡面监测点的位移峰值放大系数略大于坡内监测点，可见水平向位移峰值放大系数的分布呈现一定的趋表效应。

3) 在不同坡高的条件下，水平向位移峰值放大系数最大值出现在坡顶监测点 3 处，且最大值出现在 $\eta=0.4$ 时，同一高度的水平向位移峰值放大系数呈现一定的趋表效应，即同一高度时坡表面的水平向位移峰值放大系数大于坡体内部的水平向位移峰值放大系数。竖直向位移峰值放大系数与总位移峰值放大系数呈现出大致的波动状况，在 η 分别为 0.28, 0.32, 0.36, 0.40 (坡高为 70, 80, 90, 100 m) 时均沿着坡面向上的监测点呈递增趋势。随着边

坡高度的增大, 坡顶监测点3和4的水平向位移峰值放大系数也随着增大, 其余监测点的水平向位移峰值放大系数则随高度增大呈下降趋势. 对于竖直向位移峰值放大系数而言, 几乎所有监测点都呈现随高度增加而减小的趋势, 且各监测点的竖直向位移峰值放大系数大于水平向位移峰值放大系数, 其波动规律与竖直向位移峰值放大系数类似.

参 考 文 献

- 陈宝魁, 王东升, 成虎. 2016. 粘弹性人工边界在地震工程中应用研究综述[J]. *地震研究*, **39**(1): 137-142.
- Chen B K, Wang D S, Cheng H. 2016. Research review on the application of viscous-spring artificial boundary in earthquake engineering[J]. *Journal of Seismological Research*, **39**(1): 137-142 (in Chinese).
- 戴嘉伟. 2016. 利用地脉动和强震动观测数据分析汶川地震的场地效应[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 15-22.
- Dai J W. 2016. *Site Effects Analysis of Wenchuan Earthquake by Using Microtremor and Strong Motion Observation Data*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 15-22 (in Chinese).
- 丁梓涵, 赵其华, 彭社琴, 陈继彬, 喻豪俊. 2015. 岩层倾角对顺倾向边坡地震效应的影响[J]. *地震工程学报*, **37**(4): 956-962.
- Ding Z H, Zhao Q H, Peng S Q, Chen J B, Yu H J. 2015. Impact of dip angle of rock stratum on seismic response of consequent slope[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **37**(4): 956-962 (in Chinese).
- 冯永, 谢飞亚, 李旭光. 2017. 地震荷载下边坡抗滑桩桩土机理的三维模拟分析[J]. *地震工程学报*, **39**(1): 32-38.
- Feng Y, Xie F Y, Li X G. 2017. Three dimensional simulation of pile-soil interaction mechanism of anti-slide piles under seismic loads[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **39**(1): 32-38 (in Chinese).
- 高玉峰. 2019. 河谷场地地震波传播解析模型及放大效应[J]. *岩土工程学报*, **41**(1): 1-25.
- Gao Y F. 2019. Analytical models and amplification effects of seismic wave propagation in canyon sites[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **41**(1): 1-25 (in Chinese).
- 蒋锋云, 朱良玉, 李玉江. 2018. 基于三维粘弹性有限元研究汶川地震对川滇地区的震后影响[J]. *地震研究*, **41**(2): 233-243.
- Jiang F Y, Zhu L Y, Li Y J. 2018. Study of the co-seismic and post-seismic deformation deduced by the Wenchuan earthquake in the Sichuan-Yunnan region by three dimensional viscoelastic finite element model[J]. *Journal of Seismological Research*, **41**(2): 233-243 (in Chinese).
- 李白基, 秦嘉政, 罗娣华, 叶建庆, 陈敏恭, 蔡绍平, 刘学军. 1999. 云南丽江峡谷的场地放大[J]. *地震学报*, **21**(2): 175-179.
- Li B J, Qin J Z, Luo D H, Ye J Q, Chen M G, Cai S P, Liu X J. 1999. Site amplification in the valley of Lijiang, Yunnan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **21**(2): 175-179 (in Chinese).
- 李天斌. 2008. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. *工程地质学报*, **16**(6): 742-750.
- Li T B. 2008. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, **16**(6): 742-750 (in Chinese).
- 梁建文, 陈健琦, 巴振宇. 2012. 弹性层状半空间中无限长洞室对斜入射平面SH波的三维散射(I): 方法及验证[J]. *地震学报*, **34**(6): 785-792.
- Liang J W, Chen J Q, Ba Z N. 2012. 3D scattering of obliquely incident SH waves by a cylindrical cavity in layered elastic half-space (I): Methodology and verification[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(6): 785-792 (in Chinese).
- 刘汉龙, 费康, 高玉峰. 2003. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. *岩土力学*, **24**(4): 553-556.
- Liu H L, Fei K, Gao Y F. 2003. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **24**(4): 553-556 (in Chinese).
- 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 2006. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. *岩土工程学报*, **28**(9): 1070-1075.
- Liu J B, Gu Y, Du Y X. 2006. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **28**(9): 1070-1075 (in Chinese).
- 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 刘树林, 路雨明. 2019. 地震作用下水平层状岩质边坡累积损伤与破坏模式研究[J]. *岩土力学*,

40(7): 2507–2516.

- Liu X R, Deng Z Y, Liu Y Q, Liu S L, Lu Y M. 2019. Study of cumulative damage and failure mode of horizontal layered rock slope subjected to seismic loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **40**(7): 2507–2516 (in Chinese).
- 孙强强, 薄景山, 刘红帅, 景立平. 2019. 隧道对地表地震动放大作用的研究[J]. *现代隧道技术*, **56**(3): 65–71.
- Sun Q Q, Bao J S, Liu H S, Jing L P. 2019. Effects of a tunnel on ground motion amplification[J]. *Modern Tunnelling Technology*, **56**(3): 65–71 (in Chinese).
- 王猛, 梁庆国, 王丽丽, 边磊. 2019. 黄土隧道边仰坡动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, **39**(2): 141–150.
- Wang M, Liang Q G, Wang L L, Bian L. 2019. Large-scale shaking table model test study on dynamic response of loess tunnel side slope[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **39**(2): 141–150 (in Chinese).
- 詹志发, 祁生文, 何乃武, 郑博文, 葛传峰. 2019. 强震作用下均质岩质边坡动力响应的振动台模型试验研究[J]. *工程地质学报*, **27**(5): 946–954.
- Zhan Z F, Qi S W, He N W, Zheng B W, Ge C F. 2019. Shaking table test study of homogeneous rock slope model under strong earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, **27**(5): 946–954 (in Chinese).
- 张伯艳, 李德玉. 2014. 白鹤滩水电站左岸边坡抗震分析[J]. *工程力学*, **31**(增刊1): 149–154.
- Zhang B Y, Li D Y. 2014. Dynamic stability analyses of Bai He Tan hydropower-station left slope[J]. *Engineering Mechanics*, **31**(S1): 149–154 (in Chinese).
- 张泽林, 吴树仁, 王涛, 唐辉明, 梁昌玉. 2018. 地震波振幅对黄土-泥岩边坡动力响应规律的影响[J]. *岩土力学*, **39**(7): 2403–2412.
- Zhang Z L, Wu S R, Wang T, Tang H M, Liang C Y. 2018. Influence of seismic wave amplitude on dynamic response of loess-mudstone slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **39**(7): 2403–2412 (in Chinese).
- 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 2009. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, **28**(8): 1714–1723.
- Zheng Y R, Ye H L, Huang R Q. 2009. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **28**(8): 1714–1723 (in Chinese).
- Boore D M. 1972. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **62**(1): 275–284.
- Bouchon M. 1973. Effect of topography on surface motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **63**(3): 615–632.
- Çelebi M. 1987. Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(4): 1147–1167.
- Çelebi M. 1991. Topographical and geological amplification: Case studies and engineering implications[J]. *Struct Saf*, **10**(1/3): 199–217.
- Chang K H, Tsaur D H, Wang J H. 2015. Response of a shallow asymmetric V-shaped canyon to antiplane elastic waves[J]. *Proc Roy Soc A: Math Phys Eng Sci*, **471**(2174): 20140215.
- Erzin Y, Cetin T. 2012. The use of neural networks for the prediction of the critical factor of safety of an artificial slope subjected to earthquake forces[J]. *Sci Iran*, **19**(2): 188–194.
- Fukushima T, Matsushita K, Usami H, Wakai A. 2013. Finite element simulation for an earthquake-induced landslide considering strain-softening characteristics of sensitive clayey loam[G]//*Earthquake-Induced Landslides*. Berlin Heidelberg: Springer: 671–678.
- Lin M L, Huang C Y. 2017. Numerical simulation of run-out behavior of earthquake-induced landslides[G]//*Geotechnical Hazards From Large Earthquakes and Heavy Rainfalls*. Tokyo, Japan: Springer: 193–202.
- Massa M, Ferretti G, Cevasco A, Isella L, Eva C. 2004. Analysis of site amplification phenomena: An application in Ripabottoni for the 2002 Molise, Italy, earthquake[J]. *Earthq Spectra*, **20**(S1): S107–S118.
- Poursartip B, Fathi A, Kallivokas L F. 2017. Seismic wave amplification by topographic features: A parametric study[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **92**: 503–527.
- Sánchez-Sesma F J, Rosenblueth E. 1979. Ground motion at canyons of arbitrary shape under incident SH waves[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **7**(5): 441–450.
- Sánchez-Sesma F J, Herrera I, Avilés J. 1982. A boundary method for elastic wave diffraction: Application to scattering of SH

- waves by surface irregularities[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **72**(2): 473–490.
- Sánchez-Sesma F J. 1985. Diffraction of elastic SH waves by wedges[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(5): 1435–1446.
- Sills L B. 1978. Scattering of horizontally-polarized shear waves by surface irregularities[J]. *Geophys J R astr Soc*, **54**(2): 319–348.
- Smith W D. 1975. The application of finite element analysis to body wave propagation problems[J]. *Geophys J Int*, **42**(2): 747–768.
- Trifunac M D. 2010. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **1**(3): 267–281.
- Wang G, Du C Y, Huang D R, Jin F, Koo R C H, Kwan J S H. 2018. Parametric models for 3D topographic amplification of ground motions considering subsurface soils[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **115**: 41–54.
- Wong H L, Jennings P C. 1975. Effects of canyon topography on strong ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **65**(5): 1239–1257.
- Zhang W, Zhang Z G, Chen X F. 2012. Three-dimensional elastic wave numerical modelling in the presence of surface topography by a collocated-grid finite-difference method on curvilinear grids[J]. *Geophys J Int*, **190**(1): 358–378.