



翡翠河谷地震动地形效应解析分析

高玉峰 代登辉 张宁

Analytical study on the topographic effect on ground motion of Feitsui canyon

Gao Yufeng, Dai Denghui, Zhang Ning

引用本文:

高玉峰, 代登辉, 张宁. 2022. 翡翠河谷地震动地形效应解析分析. *地震学报*[J], 44(1): 40–49. DOI: 10.11939/jass.20210099

Gao Y F, Dai D H, Zhang N. 2022. Analytical study on the topographic effect on ground motion of Feitsui canyon. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(1): 40–49. DOI: 10.11939/jass.20210099

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210099>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平面SH波作用下部分充填圆弧形沉积谷的二维土层和地形放大效应

Two-dimensional soil and topographic amplification effects of a partially filled circular-arc alluvial valley under plane SH waves

地震学报. 2017, 39(5): 778–797 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.012>

局部山体地形对断层动力学破裂过程的影响研究

Study on the influence of local mountainous topography to fault dynamic rupture

地震学报. 2018, 40(6): 737–752 <https://doi.org/10.11939/jass.20180022>

岩土介质随机性对沉积河谷地震动放大效应的影响

Effect of randomness of geotechnical medium on the seismic ground motion amplification effect of a sedimentary valley

地震学报. 2017, 39(5): 764–777 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.011>

岩土介质随机性对沉积河谷地震动放大效应的影响

Effect of randomness of geotechnical medium on the seismic ground motion amplification effect of a sedimentary valley

地震学报. 2017, 39(6): 1–14 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.020>

含流体层的河谷场地对地震波散射的间接边界元法模拟

IBEM simulation of seismic wave scattering by valley topography with fluid layer

地震学报. 2020, 42(6): 657–668 <https://doi.org/10.11939/jass.20200008>

单体边坡地形的地震动力响应及其放大的数值分析

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

地震学报. 2020, 42(3): 349–361 <https://doi.org/10.11939/jass.20190133>

高玉峰, 代登辉, 张宁. 2022. 翡翠河谷地震动地形效应解析分析. 地震学报, 44(1): 40-49. doi: 10.11939/jass.20210099.

Gao Y F, Dai D H, Zhang N. 2022. Analytical study on the topographic effect on ground motion of Feitsui canyon. *Acta Seismologica Sinica*, 44(1): 40-49. doi: 10.11939/jass.20210099.

翡翠河谷地震动地形效应解析分析^{*}

高玉峰^{1,2),†} 代登辉^{1,2)} 张宁^{1,2)}

1) 中国南京 210098 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室

2) 中国南京 210098 河海大学土木与交通学院岩土工程科学研究所

摘要 地表不规则地形的存在往往会引起地震波的散射, 进而产生局部地震动放大或衰减的现象。虽然地形效应最早在异常地震记录中被发现, 然而利用地形影响台阵记录到的地震动数据却少之又少。基于 1992 年在我国台湾翡翠河谷上观测到的六条地形影响台阵记录, 利用线源 SH 波入射下非对称 V 形河谷地震波传播解析理论, 模拟得到了河谷台阵各点的地震动, 揭示了翡翠河谷地形效应对地震动影响的规律。与实测记录的对比结果表明利用笔者提出的地震波传播解析理论能够较好地反映河谷地形对地震动的影响。

关键词 翡翠河谷 地形效应 解析解 V 形河谷

doi: 10.11939/jass.20210099 **中图分类号:** P315.3[†] **文献标识码:** A

Analytical study on the topographic effect on ground motion of Feitsui canyon

Gao Yufeng^{1,2),†} Dai Denghui^{1,2)} Zhang Ning^{1,2)}

1) Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China

2) Geotechnical Research Institute, College of Civil and Transportation Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: The local amplification or attenuation of ground motion is often caused by the surface irregular topography, which is due to the scattering phenomenon when the seismic wave propagates to the local topography. Although the topographic effect was first discovered in the anomalous seismic records, the ground motion data recorded by the topographic influence array are very few. There are five earthquakes recorded by six strong-motion accelerometers deployed along the Feitsui canyon recorded from the Hualien earthquake in 1992. Using our analytical theory of seismic wave propagation around a non-symmetrical V-shaped canyon excited by a line source of SH waves, the strong motion accelerations of the site were simulated. The influences of topographic effect on the ground motion of the Feitsui canyon are revealed. The comparison between the simulated results and those ground motion accelerations recorded indicates that the proposed analytical theory of seismic wave propagation around

* 基金项目 国家自然科学基金(51479050)资助。

收稿日期 2021-06-07 收到初稿, 2021-08-31 决定采用修改稿。

作者简介 高玉峰, 博士, 教授, 长期从事地震波动理论、工程场地抗震输入方法及工程抗震技术科学方面的研究, e-mail: yfgao66@163.com



V-shaped canyon is suitable for simulating the topographic effects on ground motions.

Key words: Feitsui canyon; topographic effect; analytical solution; V-shaped canyon

引言

地震波传播特性与地震动输入是重大工程地震响应机制与灾变机理和抗震设计理论研究的基础, 由于涉及地震学与工程学的交叉, 这一基础研究滞后于地震响应分析, 因此一直是重大工程抗震设计的瓶颈。对于局部不规则场地, 其地震波传播特性极其复杂, 表现为地形效应十分突出(郭明珠等, 2013; 高玉峰等, 2021)。地震波传播至局部不规则场地后由于散射而导致场地地震动发生放大、衰减以及空间变化, 而这种地形效应往往加剧桥梁、隧道和大坝等工程的震害。以2008年汶川地震为例, 该地震由于发生在我国西部山区, 相较于唐山地震这类平原地区的地震, 其震害具有非常显著的差异, 该地震造成6140座桥梁、156条隧道和1996座水坝受损(杜修力等, 2008; 景立平等, 2009), 可见局部地区地形条件的影响不容忽视。

地震波地形效应最早始于对实际地震动记录的分析, 在1971年美国圣弗尔南多(San Fernando)地震中, Trifunac and Hudson (1971)发现帕克伊马(Pacoima)大坝上的台站观测数据出现异常的地震动放大现象。为了进一步研究地形效应, 世界上很多地震台阵得以布设。1991年我国台湾省翡翠河谷上布置了六台强震仪, 1992年9月花莲 M_L 5.5地震触发了此台阵, 获得了沿地形分布的地面运动加速度记录, 结果显示河谷两侧的地震动差异明显, 表现出了明显的地形效应(Huang, Chiu, 1995)。Spudich等(1996)在研究加州北岭(Northridge)地震记录时发现, 相对于山脚处, 山顶出现了明显的地震动放大效应。Parolai等(2004)通过对比回分析1999年土耳其伊兹米特(Izmit)地震的17条观测数据, 发现复杂的地形条件下会存在高达5倍的地震动放大效应。基于2008年汶川地震期间自贡西山地形影响台阵的观测数据, 王海云和谢礼立(2010)详细分析了地形及地质条件对地震动的影响, 其结果显示山体地形放大效应随高程的增加而愈加明显。此后, 杨宇等(2011)和唐晖等(2012)也针对自贡台阵观测数据进行了深入研究。王文才等(2020)针对2018年陕西宁强 M_S 5.3地震的地震动数据进行分析, 其结果显示了山体对地震中频段的地震动放大效应。

为了揭示地形效应的机理, 关于地形对地震波的散射和衍射的数值方法和解析研究得以大量开展, 数值方法主要包括有限元法(廖振鹏, 刘晶波, 1992; 章小龙等, 2017; 孙纬宇等, 2019)、有限差分法(Boore, 1972)、边界元法(林皋, 关飞, 1990; 巴振宁等, 2017; Liu et al, 2018; 何颖等, 2019)、谱元法(贺春晖等, 2017; 于彦彦等, 2017; 刘中宪等, 2020)等。虽然数值方法应用灵活, 但是其结果的准确性需要解析研究的验证。解析研究主要是波函数展开法, 该方法不仅可以揭示波散射问题的物理本质, 还可以检验各种数值方法的精度, 近年来得到广泛关注(Trifunac, 1973; Yuan, Liao, 1994; Tsaur, Chang, 2009; Gao et al, 2012; Zhang et al, 2017, 2019; 张宁等, 2021)。

V形河谷作为常见的河谷形态, 由于地震作用下河谷底部会产生应力奇异问题, 其地形效应的理论解一直未得到有效解决, 直到最近才由Tsaur教授带领的研究小组取得突破, 分别得到了浅河谷(Tsaur, Chang, 2008)和深河谷(Tsaur et al, 2010)的地震SH波散射问题解答。Zhang等(2012a)为了应用方便, 给出了不同深度河谷地震波散射的统一解答, 随后

Zhang 等(2012b)研究了非对称 V 形河谷的地震 SH 波放大效应, 并将此问题拓展至近源地震动的情况(Gao, Zhang, 2013)。针对河谷场地上的地震动地形观测台阵, 目前仅我国台湾省翡翠河谷上建立的六台强震仪在 1992 年花莲地震中记录到了相应的数据(Huang, Chiu, 1995), 且由于此河谷呈现典型的 V 形形态, 本文将运用 V 形河谷场地地震 SH 波散射问题的频域解答, 模拟其监测点位置处的地震动, 进而从理论上揭示地形对地震动响应的影响规律。

1 翡翠河谷地形及台阵记录

翡翠河谷位于我国台湾省花莲县, 其上建有翡翠大坝, 是为台北地区 450 万人供水的水源工程。在 1977 年到 1990 年间, 科研人员在翡翠大坝附近分别布设了三个 SMA-1 型强震

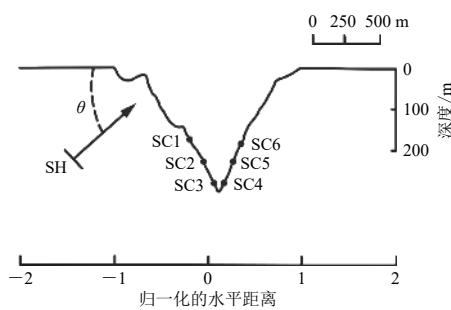


图 1 翡翠河谷地震动观测台阵剖面及台站分布示意图(Huang, Chiu, 1995)

Fig. 1 Definition sketch for the cross section of Feitsui canyon and the location of six stations (Huang, Chiu, 1995)

观测面。Huang 和 Chiu (1995) 根据实测地震动分离出了垂直于监测剖面方向的地震动分量, 即二维 SH 波地震动记录, 为后续地震动模拟提供了便利。台阵观测数据显示出显著的地震动地形效应, 各点峰值加速度(peak ground acceleration, 简写为 PGA)记录见表 1 (Huang, Chiu, 1995)。由表 1 可以看出, 河谷迎波面相对于背波面表现出较强的地震动放大现象, 迎波侧 PGA 最大可达 9.7 cm/s^2 , 而背波侧最大只有 6.0 cm/s^2 ; 同时可以看出越靠近河谷底部, 记录到的地震动 PGA 越小。为了分析这一现象产生的原因, 本文将从 V 形河谷周围地震波传播解析理论出发得到各点的地震动模拟结果, 以揭示其地震响应规律。

表 1 1992 年 9 月花莲地震中 SC1—SC6 台站记录到的地震动 PGA (Huang, Chiu, 1995)

Table 1 PGA values at stations SC1—SC6 during Hualien earthquake in September 1992 (Huang, Chiu, 1995)

台站名	PGA/(cm·s ⁻²)	台站名	PGA/(cm·s ⁻²)	台站名	PGA/(cm·s ⁻²)
SC1	9.7	SC2	6.5	SC3	5.2
SC4	3.6	SC5	4.5	SC6	6.0

2 理论模拟

2.1 频域内地震动场推导

由翡翠河谷剖面图可以看到, 河谷形状大致呈 V 形, 地震波自剖面左侧斜入射。本文将首先推导线源 SH 波入射下非对称 V 形河谷地震波传播理论, 得到频域内考虑地形效应的翡翠

仪, 主要用于观测河谷地形对翡翠大坝附近地震动在空间分布上的影响规律。但是由于台站距离翡翠大坝较近, 其观测结果会受到大坝的影响, Huang 和 Chiu (1995) 又于 1991 年在距离大坝 300 m 处沿翡翠河谷横断面布置了六台强震仪(SC1—SC6, 高程分别为 170, 120, 70, 70, 120, 160 m), 台站的具体位置如图 1 所示。

1992 年 9 月的花莲 $M_{\text{L}} 5.5$ 地震触发了此台阵, 由此获得了沿地形分布的地面运动加速度记录, 此次地震的震源深度为 50 km, 震中位于监测台阵南偏西方向距台阵 130 km 处, 震中至翡翠大坝的方向基本平行于台阵

翠河谷各点的地震动传递函数。由于翡翠河谷属于深度较浅的河谷,因此本文将针对浅的非对称V形河谷地震波传播理论进行推导。河谷的二维简化模型如图2所示,此图表示半空间中一个非对称V形河谷,深度为d,半宽为 b_1 (左侧)和 b_2 (右侧);模型的介质假设为弹性、各向同性、均质;介质的剪切模量为G和剪切波速为 v_S 。入射波假设为简谐的线源柱面SH波,圆频率为 ω ,位移在z方向(出平面)。在河谷底部建立局部坐标系(r_1, θ_1),在河谷中点建立整体坐标系(r, θ),采用半径为 $(b_1+b_2)/2$ 的半圆形辅助边界把整个空间分成两个子区域①和②。震源位置在整体极坐标系(r, θ)中为(r_0, θ_0),对于本研究的问题,需使用镜像法来考虑相对于水平面对称的两个波源,对于波源及其镜像分别使用两个极坐标系(r_f, θ_f)和(r'_f, θ'_f)。

通过四个坐标系的建立,引入半圆形辅助边界进行区域分解,得到区域①和区域②的运动方程(Sánchez-Sesma, 1985; Gao, Zhang, 2013):

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial u_1}{\partial r_1} + \frac{1}{r_1^2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \theta_1^2} + k^2 u_1 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \theta^2} + k^2 u_2 = -\frac{\delta(r-r_0)\delta(\theta-\theta_0)}{r}, \quad (2)$$

式中, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克δ函数, $k=\omega/v_S$ 为剪切波数。对于稳态出平面问题, u_1 和 u_2 分别表示区域①和区域②在频域内的位移。

引入镜像法将入射波源镜像至(r'_f, θ'_f)坐标系,通过波函数展开法可以得到区域①和区域②内含未知系数的位移表达式(Zhang et al, 2012b):

$$u_1(r_1, \theta_1) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_{nv}(kr_1) \cos[nv(\theta_1 + \beta_1)], \quad (3)$$

$$u_2(r, \theta) = u^f + \sum_{n=0}^{\infty} B_n H_{2n}^{(1)}(kr) \cos(2n\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} C_n H_{2n+1}^{(1)}(kr) \sin[(2n+1)\theta], \quad (4)$$

式中: $J_n(\cdot)$ 为n阶第一类贝塞尔函数, $H_n^{(1)}(\cdot)$ 为n阶第一类汉克尔函数; $\beta_1 = \pi - \arctan(b_1/d)$, $\beta_2 = \pi - \arctan(b_2/d)$, $v = \pi/(\beta_1 + \beta_2)$; $u^f = [H_0^{(1)}(kr_f) + H_0^{(1)}(kr'_f)]/H_0^{(1)}(kr_0)$, 表示自由场。

上述位移表达式需要满足河谷表面的应力自由边界条件和水平地表的应力自由边界条件:

$$\tau_{\theta_1 z_1}^{(1)} = \frac{G}{r_1} \frac{\partial u_1}{\partial \theta_1} = 0 \quad \theta_1 = -\beta_1, \beta_2, \quad (5)$$

$$\tau_{\theta z}^{(2)} = \frac{G}{r} \frac{\partial u_2}{\partial \theta} = 0 \quad \theta = \pm \frac{\pi}{2}, \quad r \geq \frac{b_1 + b_2}{2}, \quad (6)$$

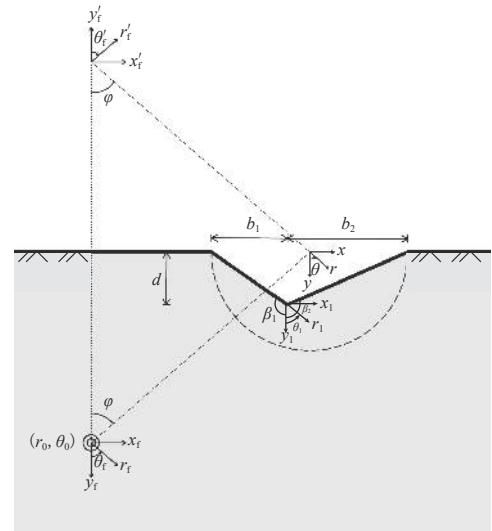


图2 翡翠河谷简化二维模型

Fig. 2 The simplified 2D model of the Feitsui canyon
Fig. 2 The simplified 2D model of the Feitsui canyon

同时满足两个子区域之间的位移连续和应力连续条件:

$$u_1(r, \theta) = u_2(r, \theta) \quad r = \frac{b_1 + b_2}{2}, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

$$\tau_{rz}^{(1)}(r, \theta) = \tau_{rz}^{(2)}(r, \theta) \quad r = \frac{b_1 + b_2}{2}, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

借助区域匹配策略和 Graf 加法公式, 通过恰当的求解方案, 最终可以得到位移场各未知系数 A_n , B_n 和 C_n 的解答, 进而各区域的位移即可根据方程(3)和(4)精确得到. 具体求解方案可参考 Gao 和 Zhang (2013).

2.2 地震动时程模拟

地震动记录多数是在地表面实测的加速度时程, 测点一般位于不受任何结构影响的自由场地. 理论上, 对于地震 SH 波, 自由场地加速度幅值是地下基岩地震动幅值的两倍, 因此, 为了得到结构抗震所需的输入地震波, 对于平坦场地, 将地表地震动记录的幅值减半作为输入的基岩地震动; 而对于河谷场地, 需要利用我们提出的地震动传播理论得到地形放大因子(相对于平坦场地)来获取场地地震动.

为了在给定地震动加速度时程输入的情况下得到河谷场地的空间变化地震动, 需建立考虑地形放大的河谷场地地震动时程合成方法. 这一方法建立的关键在于理解并应用河谷引起的地形放大因子, 说明如下: V 形河谷的波函数级数解以单位幅值稳态 SH 波作为入射波, 如果河谷不存在, 不同位置的水平地表位移幅值恒相等, 为自由场 $|u^f|$; 而河谷地形效应导致不同位置的地表位移幅值在自由场 $|u^f|$ 上下波动, 也就是说, 在某一频率下, 如果地表某一点的位移幅值大于自由场 $|u^f|$, 那么这一点的地面运动相对于地表自由场放大, 反之, 如果小于自由场 $|u^f|$, 地面运动减小. 根据这一原理, 将这些波函数级数解给出的河谷地表位移除以自由场 $|u^f|$, 即可得到河谷地形的地震动放大因子, 该放大因子为复数(包含幅值放大因子和相位调整因子). 因此如果得到了上述河谷地形的地震动放大因子随频率变化的函数, 则可根据基岩地震动得到场地某点的实际地震动, 具体步骤参见代登辉(2019).

2.3 翡翠河谷测点地震动模拟

由于监测台阵距震中 130 km, 震源深度为 50 km. 因此震源相对于河谷的位置为 $(x_0, y_0) =$

$(-130 \text{ km}, 50 \text{ km})$. 根据 Huang 和 Chiu (1995) 的数据, 翡翠河谷的模型参数为: 深度 $d = 350 \text{ m}$, 宽度 $b_1 \approx 800 \text{ m}$, $b_2 \approx 700 \text{ m}$, 介质密度 $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$, 剪切波速 $v_s = 1500 \text{ m/s}$.

运用频域内地震动场的推导公式, 可以得到河谷场地目标位置的频域地震动放大因子, 地震动放大因子为复数, 包含幅值和相位的信息. 图 3 给出了台站 SC1—SC6 所在位置的地震动放大因子随频率变化的曲线, 计算的频率范围为 0—10 Hz. 从图中可以明显地看出, 在 0—10 Hz 内, SC1—SC3 台站处的地震动放大因子最大可达 1.5 左右, 而 SC4—SC6 台站处的地震动放大因子均小于 1. 尽管在某些频率(如 5 Hz 左右)下, 迎波侧

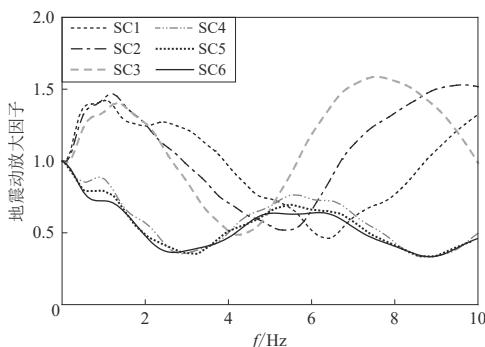


图 3 翡翠河谷上 SC1—SC6 台站所在位置的地震动放大因子随频率 f 的变化

Fig. 3 Variation of ground motion amplification factors as a function of frequency at the stations

SC1—SC6 in Feitsui canyon

的地震动放大因子会小于背波侧,但是迎波侧整体表现出相对于背波侧的地形放大现象,这也与实测地震动结果相吻合。

对于翡翠河谷台阵记录到的1992年9月的花莲地震,其主要频率在5 Hz以内,且主要集中在2—4 Hz,持时约30 s。由于缺乏相应的地震记录数据,为了更可靠地模拟该场地的地震响应,本文通过对Huang和Chiu(1995)一文中的数据进行读点,并依据实测数据的频谱结构适当调整,构造出符合上述频谱特征的人工地震动时程,并以SC3点作为地震动输入参考点,计算其它各点的地震响应。地震动输入参考点SC3的地震动时程如图4a所示,持时为30 s,PGA为5.2 cm/s²,相应的傅里叶谱如图4b所示,可见所构造的地震波与实测地震动波形基本一致,主要频率集中在2—4 Hz。

基于输入地震动和频域地震动放大因子,可以进一步得到河谷各点的地震动响应时程,关键步骤解释如下:

1) 将输入地震动加速度时程记录进行两次数值积分,得到位移时程 $u_{\text{inp}}(t)$,然后将位移时程进行傅里叶变换,得到其傅里叶谱

$$u_{\text{inp}}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_{\text{inp}}(t) e^{-i\omega t} dt; \quad (9)$$

2) 根据频域内地震动场的推导,求

解不同频率简谐振动下河谷场地各个位置的地形放大因子,得到河谷场地目标位置的频域放大传递函数 $A(\omega)$;

3) 根据频域放大因子调整目标位置地震动的傅里叶谱

$$u_{\text{outp}}(\omega) = A(\omega) u_{\text{inp}}(\omega); \quad (10)$$

4) 根据调整后的傅里叶谱,通过傅里叶逆变换来求解考虑地形效应的地震动时程,即

$$u_{\text{outp}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} u_{\text{outp}}(\omega) e^{i\omega t} dt, \quad (11)$$

将位移时程 $u_{\text{outp}}(t)$ 进行一次数值微分后得到速度时程,进行两次数值微分后得到加速度时程。

通过计算得到的地震动放大因子和地震动时程模拟方法得到各测点位置处的地震动加速度时程,如图5所示。表2给出了模拟得到的地震动PGA与监测结果的对比。从图5和表2可以看出,SC1—SC3点的地震动PGA明显大于SC4—SC6点,这说明模拟得到的各测点地震动地形分布规律与观测结果一致,即翡翠河谷迎波侧的地震动明显大于背波侧。这是因为,河谷的存在阻挡了地震波的传播,这使得地震波能量大部分集中在河谷迎波面,河谷背波面的地震运动主要是源于河谷引起的散射波的作用。同时可以看出:在河谷迎波面,SC1点的地震动PGA大于SC2点,SC3点最小;在河谷背波面,SC6点的地震动PGA大于SC5点,SC4点最小。这与观测结果相一致,同时可以得出:对于河谷同一坡面,随着所处高程的增加,其地震动也相应增大。从表2中可以看出,以SC3点作为地震动输入参考点,模

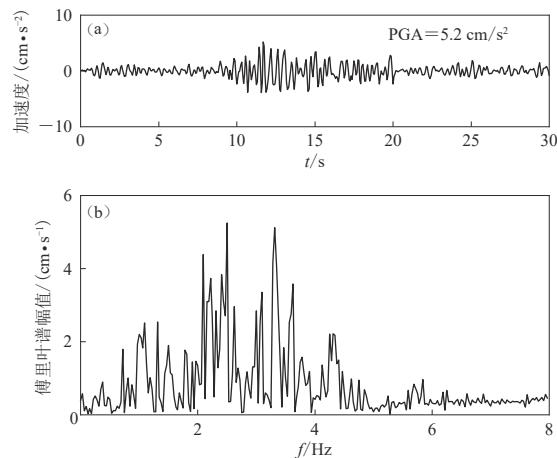


图4 输入参考点SC3台站的地震动时程(a)和相应的傅里叶谱(b)

Fig. 4 Ground motion history (a) and corresponding Fourier spectrum (b) at the input reference point SC3

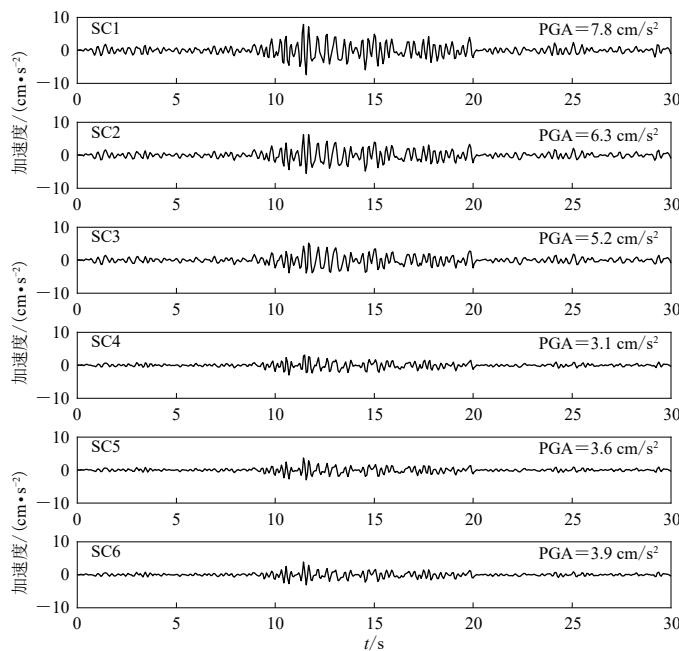


图 5 翡翠河谷上 SC1—SC6 台站的模拟加速度时程

Fig. 5 Response acceleration time histories at the stations SC1–SC6 in Feitsui canyon

表 2 SC1–SC6 台站的模拟地震动 PGA 与监测结果对比

Table 2 Comparisons of PGA values at the stations SC1–SC6 between the records and simulation

台站名	监测PGA /(cm·s⁻²)	模拟PGA /(cm·s⁻²)	台站名	监测PGA /(cm·s⁻²)	模拟PGA /(cm·s⁻²)	台站名	监测PGA /(cm·s⁻²)	模拟PGA /(cm·s⁻²)
SC1	9.7	7.8	SC3	5.2	5.2	SC5	4.5	3.6
SC2	6.5	6.3	SC4	3.6	3.1	SC6	6.0	3.9

拟得到的 SC2 和 SC4 点的地震动 PGA 与实测结果最为接近, SC1, SC5 和 SC6 点的模拟结果与实测结果有些许差别。这是因为地震动不只受地形因素的影响, 还会受很多其它因素的干扰, 如测点所处位置的地质差异、河谷底部沉积层的影响等, 所以离地震动输入参考点 SC3 越远, 地震动受其它因素的干扰越大, 其结果差别越明显。但是, 这种差异不影响结果的指导性, 从整体上看模拟结果能够较好地反映河谷场地表现出的地震动地形效应。

图 6 给出了计算得到的各监测点位置的地震动傅里叶谱幅值, 可以看出地形效应对地震波的主要频率范围影响较小, 但对其傅里叶谱幅值的影响较大。SC1—SC3 点的傅里叶谱幅值基本能反映其时域情况, SC1 点的傅里叶谱幅值整体大于 SC2 点和 SC3 点, SC4—SC6 点的傅里叶谱幅值基本相同, 因此其在时域内的加速度时程也相差较小, 三者的地震动 PGA 较为接近。由频谱特征分析可知: SC1—SC3 点的地震波主要频率集中在 2—4 Hz, 在该区间内傅里叶频谱幅值明显大于背波侧 SC4—SC6 点的傅里叶频谱幅值; 而 SC4—SC6 点的地震波主要频率集中在 3—5 Hz; 在 4—5 Hz 的频率范围内, 六个观测点的傅里叶谱幅值几乎保持不变。这是因为在 2—4 Hz 内, SC1—SC3 点相对于 SC4—SC6 点产生较大的地形放大, 而在 4—5 Hz 内, 六个观测点的地形放大因子差别不大, 这一规律同样可以在图 3 中看到。

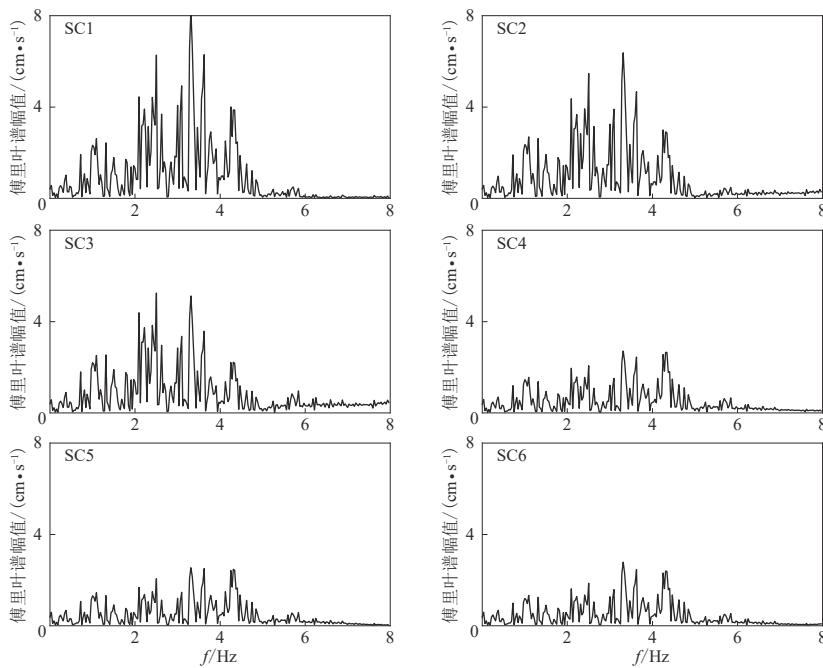


图 6 模拟得到的翡翠河谷上 SC1—SC6 各点加速度傅里叶谱幅值

Fig. 6 Response Fourier amplitudes of acceleration at the stations SC1—SC6 in Feitsui canyon

3 讨论与结论

翡翠河谷地形影响地震动观测台阵在 1992 年花莲地震中获得了相应的地形影响地震动记录, 通过分析河谷各监测点的地震动可知, 河谷迎波面相对于背波面表现出明显的地震动放大现象。为了分析此现象产生的原因, 本文利用线源 SH 波入射下非对称 V 形河谷地震波传播解析理论, 通过构造频段接近实际观测数据的地震波, 并以 SC3 点作为地震动输入参考点, 模拟得到了河谷各监测点位置的地震动。模拟结果进一步揭示了河谷地形效应对地震动影响的规律: 河谷地形使得地震波在传播过程中产生散射, 导致河谷场地表现出了与平坦场地不同的地震动规律。在河谷迎波侧, 散射波与入射波相长干涉, 表现出了地震动放大现象; 在河谷背波侧, 河谷对剪切波产生了过滤作用, 表现出了地震动衰减现象。结果进一步表明, 河谷同侧地震动表现出了地震动 PGA 随高程增加而增加的趋势。通过对比实测地震动与模拟结果可知, 本文提出的河谷场地地震波传播解析理论能够较好地模拟地形效应引起的地震动差异情况, 河谷两侧的地震动差异以及所处高程对地震动的影响均能够通过本解析理论得到较好的模拟。本解析理论不同于其它数值方法, 能够实现河谷场地全域全过程的地震动模拟, 同时本文提出的研究思路实现了解析理论的工程应用, 本文中考虑地形效应的地震动模拟方法可为 V 形河谷场地重大工程的抗震设计提供精确的地震动输入, 所得结果对地震区划的精细划分有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 巴振宁, 黄棣旸, 梁建文, 张艳菊. 2017. 层状半空间中周期分布凸起地形对平面 SH 波的散射 [J]. 地球物理学报, 60(3): 1039—1052.

- Ba Z N, Huang D Y, Liang J W, Zhang Y J. 2017. Scattering and diffraction of plane SH-waves by periodically distributed hill topographies[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(3): 1039–1052 (in Chinese).
- 代登辉. 2019. 高山峡谷场地 P-SV 波散射放大效应及地震动场模拟方法研究[D]. 南京: 河海大学: 77–79.
- Dai D H. 2019. *Scattering and Amplification Effect of P-SV Waves and Simulation of Earthquake Ground Motion Field in Alpine Canyon Sites*[D]. Nanjing: Hohai University: 77–79 (in Chinese).
- 杜修力, 韩强, 李忠献, 李立云, 陈少峰, 赵建锋. 2008. 5·12 汶川地震中山区公路桥梁震害及启示[J]. 北京工业大学学报, **34**(12): 1270–1279.
- Du X L, Han Q, Li Z X, Li L Y, Chen S F, Zhao J F. 2008. The seismic damage of bridges in the 2008 Wenchuan earthquake and lessons from its damage[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, **34**(12): 1270–1279 (in Chinese).
- 高玉峰, 代登辉, 张宁. 2021. 河谷地形地震放大效应研究进展与展望[J]. 防灾减灾工程学报, **41**(4): 734–752.
- Gao Y F, Dai D H, Zhang N. 2021. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, **41**(4): 734–752 (in Chinese).
- 郭明珠, 赵芳, 赵凤仙. 2013. 场地地震动局部地形效应研究进展[J]. *震灾防御技术*, **8**(3): 311–318.
- Guo M Z, Zhao F, Zhao F X. 2013. A review of the effect of small-scale surface topography on ground motions[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **8**(3): 311–318 (in Chinese).
- 贺春晖, 王进廷, 张楚汉. 2017. 基于震源-河谷波场数值模拟的坝址地震动参数确定方法[J]. *地球物理学报*, **60**(2): 585–592.
- He C H, Wang J T, Zhang C H. 2017. Determination of seismic parameters for dam sites by numerical simulation of the rupture-canyon wave field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(2): 585–592 (in Chinese).
- 何颖, 于琴, 刘中宪. 2019. 考虑散射效应沉积河谷空间相关多点地震动模拟[J]. 岩土力学, **40**(7): 2739–2747.
- He Y, Yu Q, Liu Z X. 2019. Simulation of multi-point spatially correlated earthquake ground motions of sedimentary valleys considering scattering effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **40**(7): 2739–2747 (in Chinese).
- 景立平, 陈国兴, 李永强, 汤皓. 2009. 汶川 8.0 级地震水坝震害调查[J]. 地震工程与工程振动, **29**(1): 14–23.
- Jing L P, Chen G X, Li Y Q, Tang H. 2009. Investigation on earthquake-induced dam damage during Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **29**(1): 14–23 (in Chinese).
- 廖振鹏, 刘晶波. 1992. 波动有限元模拟的基本问题[J]. 中国科学: B 辑, **22**(8): 874–882.
- Liao Z P, Liu J B. 1992. Fundamental problems in finite element simulation of wave motion[J]. *Science in China: Series B*, **35**(11): 1353–1364.
- 林皋, 关飞. 1990. 用边界元法研究地震波在不规则地形处的散射问题[J]. 大连理工大学学报, **30**(2): 145–152.
- Lin G, Guan F. 1990. Scattering of seismic waves at irregular topographies by boundary element method[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, **30**(2): 145–152 (in Chinese).
- 刘中宪, 苗岳云, 陈顿. 2020. 点震源作用下三维沉积盆地地震动谱元模拟[J]. 世界地震工程, **36**(2): 200–208.
- Liu Z X, Miao Y Y, Chen D. 2020. Seismic spectral element simulation of three-dimensional sedimentary basin under the action of point seismic source[J]. *World Earthquake Engineering*, **36**(2): 200–208 (in Chinese).
- 孙纬宇, 汪精河, 严松宏, 欧尔峰, 梁庆国. 2019. SV 波斜入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. 振动与冲击, **38**(20): 237–243.
- Sun W Y, Wang J H, Yan S H, Ou E F, Liang Q G. 2019. Characteristic analysis of ground motions of a canyon topography under obliquely incident SV waves[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **38**(20): 237–243 (in Chinese).
- 唐晖, 李小军, 李亚琦. 2012. 自贡西山公园山脊地形场地效应分析[J]. *振动与冲击*, **31**(8): 74–79.
- Tang H, Li X J, Li Y Q. 2012. Site effect of topography on ground motions of Xishan park of Zigong city[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **31**(8): 74–79 (in Chinese).
- 王海云, 谢礼立. 2010. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. *地球物理学报*, **53**(7): 1631–1638.
- Wang H Y, Xie L L. 2010. Effects of topography on ground motion in the Xishan park, Zigong city[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(7): 1631–1638 (in Chinese).
- 王文才, 尹志文, 苏小芸, 江志杰. 2020. 2018 年陕西安强 5.3 级地震强地面运动特征及局部场地效应分析[J]. *地震工程学报*, **42**(6): 1700–1705.
- Wang W C, Yin Z W, Su X Y, Jiang Z J. 2020. Characteristics of strong ground motion of the 2018 Ningqiang M5.3 earthquake in Shaanxi province and local site response analysis[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **42**(6): 1700–1705 (in Chinese).

- 杨宇, 李小军, 贺秋梅. 2011. 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟[J]. *震灾防御技术*, 6(4): 436–447.
- Yang Y, Li X J, He Q M. 2011. Numerical simulation for site effect of ridge terrain and overlaying soil in Zigong Xishan park[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 6(4): 436–447 (in Chinese).
- 于彦彦, 丁海平, 刘启方. 2017. 透射边界与谱元法的结合及对波动模拟精度的改进[J]. *振动与冲击*, 36(2): 13–22.
- Yu Y Y, Ding H P, Liu Q F. 2017. Integration of transmitting boundary and spectral-element method and improvement on the accuracy of wave motion simulation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 36(2): 13–22 (in Chinese).
- 张宁, 潘家瑛, 代登辉, 高玉峰. 2021. 含峭壁V形峡谷对地震SH波散射的解析解[J]. *地球物理学报*, 64(3): 896–906.
- Zhang N, Pan J S, Dai D H, Gao Y F. 2021. An analytical solution to the scattering of plane SH waves by a V-shaped canyon with cliffs[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(3): 896–906 (in Chinese).
- 章小龙, 李小军, 周正华, 陈国兴, 彭小波. 2017. 三维复杂山谷地形SV波垂直输入地震反应分析[J]. *地球物理学报*, 60(7): 2779–2790.
- Zhang X L, Li X J, Zhou Z H, Chen G X, Peng X B. 2017. The seismic response analysis of three-dimensional Canyon complex topography under incident SV seismic waves[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(7): 2779–2790 (in Chinese).
- Boore D. 1972. Finite difference methods for seismic wave propagation in heterogeneous materials[J]. *Methods Comput Phys: Adv Res Appl*, 11: 1–37.
- Gao Y F, Zhang N, Li D Y, Liu H L, Cai Y Q, Wu Y X. 2012. Effects of topographic amplification induced by a U-shaped canyon on seismic waves[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 102(4): 1748–1763.
- Gao Y F, Zhang N. 2013. Scattering of cylindrical SH waves induced by a symmetrical V-shaped canyon: Near-source topographic effects[J]. *Geophys J Int*, 193(2): 874–885.
- Huang H C, Chiu H C. 1995. The effect of canyon topography on strong ground motion at Feitsui damsite: Quantitative results[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, 24(7): 977–990.
- Liu Z X, Wang D, Liang J W, Wu F J, Wu C Q. 2018. The fast multi-pole indirect BEM for solving high-frequency seismic wave scattering by three-dimensional superficial irregularities[J]. *Eng Anal Bound Elem*, 90: 86–99.
- Parolai S, Bindi D, Baumbach M, Grosser H, Milkereit C, Karakisa S, Zümbül S. 2004. Comparison of different site response estimation techniques using aftershocks of the 1999 Izmit earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 94(3): 1096–1108.
- Sanchez-Sesma F J. 1985. Diffraction of elastic SH-wave in wedges[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 75(5): 1435–1446.
- Spudich P, Hellweg M, Lee W H K. 1996. Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake: Implications for mainshock motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 86(1B): S193–S208.
- Trifunac M D, Hudson D E. 1971. Analysis of the Pacoima dam accelerogram: San Fernando, California, earthquake of 1971[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 61(5): 1393–1411.
- Trifunac M D. 1973. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, 1(3): 267–281.
- Tsaur D H, Chang K H. 2008. An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical V-shaped canyon: Shallow case[J]. *Geophys J Int*, 174(1): 255–264.
- Tsaur D H, Chang K H. 2009. Scattering of SH waves by truncated semicircular canyon[J]. *J Eng Mech*, 135(8): 862–870.
- Tsaur D H, Chang K H, Hsu M S. 2010. An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical V-shaped canyon: Deep case[J]. *Geophys J Int*, 183(3): 1501–1511.
- Yuan X M, Liao Z P. 1994. Scattering of plane SH waves by a cylindrical canyon of circular-arc cross-section[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 13(6): 407–412.
- Zhang N, Gao Y F, Li D Y, Wu Y X, Zhang F. 2012a. Scattering of SH waves induced by a symmetrical V-shaped canyon: A unified analytical solution[J]. *Earthq Eng Eng Vib*, 11(4): 445–460.
- Zhang N, Gao Y F, Cai Y Q, Li D Y, Wu Y X. 2012b. Scattering of SH waves induced by a non-symmetrical V-shaped canyon[J]. *Geophys J Int*, 191(1): 243–256.
- Zhang N, Gao Y F, Pak R Y S. 2017. Soil and topographic effects on ground motion of a surficially inhomogeneous semi-cylindrical canyon under oblique incident SH waves[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 95: 17–28.
- Zhang N, Zhang Y, Gao Y F, Pak R Y S, Wu Y X, Zhang F. 2019. An exact solution for SH-wave scattering by a radially multi-layered inhomogeneous semicylindrical canyon[J]. *Geophys J Int*, 217(2): 1232–1260.