



汶川地震河流阶地建筑物的震害机制研究

熊文 王伟 杨研科 徐凯放 赵宁康 曹子昂 李昀松

Seismic damage mechanism of buildings on the river terrace during Wenchuan earthquake

Xiong Wen, Wang Wei, Yang Yanke, Xu Kaifang, Zhao Ningkang, Cao Zi' ang, Li Yunsong

引用本文:

熊文, 王伟, 杨研科, 徐凯放, 赵宁康, 曹子昂, 李昀松. 2025. 汶川地震河流阶地建筑物的震害机制研究. 地震学报[J], 47(5): 695–710. DOI: 10.11939/jass.20240079

Xiong W, Wang W, Yang Y K, Xu K F, Zhao N K, Cao Z A, Li Y S. 2025. Seismic damage mechanism of buildings on the river terrace during Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*[J], 47(5): 695–710. DOI: 10.11939/jass.20240079

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20240079>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多尺度分割和深度学习相结合的倾斜摄影三维影像建筑物震害信息提取

Extraction of seismic damage information of buildings from three-dimensional images of oblique photography based on multi-scale segmentation and deep learning

地震学报. 2022, 44(5): 881–890 <https://doi.org/10.11939/jass.20220105>

基于最优分割的高分辨率遥感影像震害建筑物识别技术

Earthquake damage building identification technology based on high resolution remote sensing image with optimal segmentation

地震学报. 2020, 42(6): 760–768 <https://doi.org/10.11939/jass.20200027>

考虑建筑群-沉积盆地动力相互作用的建筑群震害评估方法

Earthquake damage assessment for building group considering dynamic interaction between buildings and sedimentary basin

地震学报. 2024, 46(1): 129–143 <https://doi.org/10.11939/jass.20220130>

河流沉积相土层结构对砂土液化的影响研究

Effect of soil layer structure with fluvial sedimentary facies on sand liquefaction

地震学报. 2022, 44(4): 665–676 <https://doi.org/10.11939/jass.20210175>

基于颗粒流方法的黄土地震滑坡数值模拟

Numerical simulation of earthquake-induced loess landslides based on particle flow method

地震学报. 2022, 44(4): 677–687 <https://doi.org/10.11939/jass.20210035>

松散承压含水层水位的同震响应实验与数值模拟

Experiment and numerical simulation of co-seismic water level response in unconsolidated confined aquifer

地震学报. 2023, 45(1): 29–45 <https://doi.org/10.11939/jass.20210149>

熊文, 王伟, 杨研科, 徐凯放, 赵宁康, 曹子昂, 李昀松. 2025. 汶川地震河流阶地建筑物的震害机制研究. 地震学报, 47(5): 695–710. doi: 10.11939/jass.20240079.

Xiong W, Wang W, Yang Y K, Xu K F, Zhao N K, Cao Z A, Li Y S. 2025. Seismic damage mechanism of buildings on the river terrace during Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 47(5): 695–710. doi: 10.11939/jass.20240079.

汶川地震河流阶地建筑物的震害机制研究*

熊 文 王 伟[†] 杨研科 徐凯放
赵宁康 曹子昂 李昀松

(中国河北三河 065201 防灾科技学院)

摘要 2008 年汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震现场的震害调查资料显示, 河流阶地地形对建筑物震害分布的影响规律表现为: 阶地前缘冲洪积层较厚区域的建筑物遭受了严重的破坏, 而阶地后缘坡积层较薄区域受损则相对较轻, 总体上呈现出前缘震害显著大于后缘的特征。为研究该震害特征的机制, 利用有限差分软件 FLAC3D 构建三维阶地模型, 模拟分析了脉冲荷载作用下阶地模型的地震动响应。结果表明: 各级阶地前缘的地震动水平均显著高于后缘, 同时随着上覆土层的增厚, 峰值加速度、相对持时值、反应谱平台值以及放大系数均呈现上升趋势; 随着阶地级数的减小, 峰值加速度、持时和反应谱特征周期均呈下降趋势, 且随着模型阶地级数的增加, 对地震动低频成分的放大效应也显著增强。因此, 阶地级数和上覆土层厚度是影响地震动响应的关键因素, 高阶地和厚覆盖土层区域对地震动的放大效应更强, 建筑物遭受的破坏更严重。

关键词 汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震 河流阶地 建筑物震害 数值模拟

doi: 10.11939/jass.20240079 **中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

Seismic damage mechanism of buildings on the river terrace during Wenchuan earthquake

Xiong Wen Wang Wei[†] Yang Yanke Xu Kaifang
Zhao Ningkang Cao Zi'ang Li Yunsong

(Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China)

Abstract: The seismic ground motion topographic effect, as an important research content in the field of seismic engineering, the study on the mechanism of the effect of complex terrain on the ground motion characteristics can provide basis for engineering seismic defense. A large number of post-earthquake site investigations have shown that the complexity of local terrain has a significant impact on the distribution of seismic damage, especially the irregular terrain can change the intensity and spectral characteristics of ground motion. As a type of locally irregular topography widely existing in nature, the unique geometric shape of river terraces can cause complex scattering and diffraction of seismic waves, resulting in variation of ground mo-

* 基金项目 中国地震局地震科技星火计划项目(XH23062A)资助。

收稿日期 2024-08-15 收到初稿, 2024-10-18 决定采用修改稿。

作者简介 熊文, 在读硕士研究生, 主要从事地震动地形效应研究, e-mail:

1090531391@qq.com; [†]通信作者: 王伟, 博士, 副教授, 主要从事强震动观测和强地面运动研究, e-mail: wwwiem@163.com



tion in its local areas, and then affecting the seismic damage degree of surrounding buildings.

Based on on-site seismic damage investigation data of the river terraces during Wenchuan $M_{S}8.0$ earthquake in 2008, buildings in the area with thicker alluvial deposits at the front edge of the terrace suffered severe damage, while those in the area with thinner slope deposits at the rear edge of the terrace suffered relatively mild damage. In general, the seismic damage at the front edge was significantly greater than that at the rear edge. At the same time, in order to study the mechanism of this seismic damage feature, the river terraces were selected as the research object, and the finite difference software FLAC3D is used to establish three-dimensional river terrace analysis models with different thicknesses of overburden soil layers, and then simulate and calculate the ground motion response under impulse loading, thus further revealing the influence law and internal mechanism of river terrace topography on ground motion characteristics and the distribution of seismic damage to buildings.

For the same order terrace, the peak values of the horizontal and vertical acceleration and the 90% energy duration all show an upward trend with the increase of the overlying soil thickness, reaching the maximum value at the front edge of the terrace and the transition point with the steep slope. Meanwhile, the ground motion level at the front edge of each terrace is significantly higher than that at the rear edge. As the terrace order decreases, the peak values of the horizontal and vertical acceleration and the 90% energy duration at the corresponding area also gradually decrease. Similarly, the trend of the Fourier spectrum amplitude and ratio at different monitoring points on the same order terrace is basically consistent, but the amplitude and ratio increase gradually as the monitoring point approaches the edge of the terrace facing the steep slope and the front edge of the area with increased soil thickness. As the terrace order increases (the terrain height rises), the natural frequency of the structure increases accordingly, thereby significantly enhancing the amplification effect of low-frequency ground motion. The characteristic period T_g , platform value, and platform amplification coefficient β in the standard response spectrum of seismic acceleration for different monitoring points are all affected by the terrace order and overlying soil thickness. The T_g value decreases gradually as the terrace order decreases; the platform value increases as the overlying soil thickness at the front edge of the terrace increases; however, the platform amplification coefficient β decreases as the terrace order increases, and the amplification coefficient at the front edge of the terrace is significantly larger than that at the rear edge.

River terraces have a significant impact on the propagation of ground motion and the seismic damage degree to buildings. The change in the thickness of the overlying soil layer leads to different distributions of building damage by affecting the amplification of ground motion, while the terrace orders exacerbate or mitigate the seismic damage by affecting the spectral characteristics and overall level of ground motion. Therefore, the terrace orders and overlying soil thickness are the key factors affecting ground motion response, and the amplification effect of ground motion is stronger in high terrace and thick covering soil layer, which leads to severe damage of buildings.

Key words: Wenchuan $M_{S}8.0$ earthquake; fluvial terrace; seismic damage to buildings; numerical simulation

引言

地震动地形效应属于地震工程领域的重要研究内容,复杂地形对地震动特性的影响机制研究可以为工程抗震设防提供依据。二十世纪七十年代初,国外学者就已经开始系统地研究地形条件对地震动的影响(Boore, 1972; Davis, West, 1973)。众多的震后现场调查表明,复杂的局部地形对震害分布特征有显著影响,尤其是不规则地形能改变地震动的强度和频谱特性(刘晶波, 1996; Bouckovalas, Papadimitriou, 2005; Peng *et al.*, 2009)。河谷作为自然界中广泛存在的局部不规则地形,其独特的地形几何形态能够使地震波发生复杂的散射和衍射现象,这会导致地震动在局部区域内产生差异,进而影响周边建筑物的震害程度(高玉峰等, 2021)。历史上多次强震事件均有力地证明了河谷地形对震害的重要影响。例如:2005年巴基斯坦东部巴控克什米尔地区 M_S 7.8地震中,位于加甘谷河谷谷地附近的巴拉考特镇遭受了毁灭性的破坏,超过90%的建筑物倒塌,大量人员伤亡(曲国胜等, 2008);2008年中国四川攀枝花市仁和区与凉山州会理县交界的 M_S 6.1地震中,沿河谷地带的震害严重,地形效应显著(肖文海, 2009)。2008年汶川 M_S 8.0特大地震中,位于流沙河阶地之上的汉源县城出现了罕见的远震高烈度异常现象(李平等, 2016a);此外,平武县南坝镇涪江、彭州小鱼洞镇湔江、什邡市石亭江等河流阶地上不同位置的震害情况也呈现出显著差异(王伟, 2011)。

河谷地形地震动效应的研究方法主要包括强震动观测、理论解析和数值模拟等。强震动观测方法基于实际地震动记录开展研究(李平等, 2016b),观测对象为真实的自然地形,具有良好的直观性,但其应用受限于观测资料的获取难度和数量。理论解析则是基于波动理论,利用数学和力学的方法求解地震波在河谷地形下的响应,揭示了地震波波形、入射角和入射频率以及地形几何参数对地震动特性的重要影响(李伟华, 赵成刚, 2003; 董俊, 赵成刚, 2005; 梁建文等, 2005; 韩铮, 2006; 高玉峰等, 2022)。然而,理论解析方法的简化模型与实际情况存在差异,且对计算能力的要求高,这些均限制了该方法的广泛应用。相较而言,数值模拟方法因其具有灵活性强和计算精度高的特性,逐渐成为研究河谷地形效应的主流方法。国内外学者采用有限差分法(Boore, 1972; Tessmer, Kosloff, 1994; 王铭锋等, 2017)、有限元法(Kurita *et al.*, 2005; 周国良等, 2012; 章小龙等, 2017; 孙纬宇等, 2019; 沈欣茹等, 2023)及边界元法(林皋, 关飞, 1990; 何颖等, 2019; Frischknecht, Wagner, 2004; Gao *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2018)深入研究了地震动在河谷场地下的传播与响应,揭示了河谷场地深宽比、覆盖层厚度、坡角以及输入地震动强度和入射角对地表地震动的影响规律。

河流阶地经历了地质演化作用后具有复杂的几何结构和厚度不均匀的沉积地层特征,目前这两种因素对地震动的耦合效应影响机制研究较少。鉴于此,本文将基于2008年汶川 M_S 8.0地震河流阶地的现场震害调查资料,利用有限差分软件FLAC3D建立具有不同厚度覆盖土层的三维河流阶地分析模型,模拟计算脉冲荷载作用下的河流阶地模型的地震动响应,以期分析河流阶地地形对地震动特性的影响规律,探讨其对建筑物震害分布影响的内在机制。

1 河流阶地的现场震害调查

2008年汶川 M_S 8.0地震后,河流阶地上的建筑物震害调查现场资料显示,河流阶地不同位置处的覆盖层厚度存在显著差异,与相应位置建筑物的震害程度密切相关。具体而言,在冲洪积层较厚的阶地前缘区域,建筑物遭受了非常严重的破坏;相反,在阶地后缘与山体坡

脚连接的洪积层较薄区域，建筑物的受损程度则相对较轻。总体上，阶地前缘的建筑物震害程度显著高于阶地后缘。现分别对南坝镇、蓥华镇及小鱼洞镇的现场震害调查进行分析。

平武县南坝镇坐落于涪江顺流右侧的河谷盆地之中，与断层的直线距离仅为4.2 km，地震烈度高达XI度。在涪江的南岸，存在一高于江面30 m左右的Ⅲ级冲洪积阶地，其底部由厚度超过20 m的冲洪积卵砾层和漂石层构成，地表为相对较薄的黏土层。震害调查结果显示：阶地前缘（即靠近涪江一侧）的建筑物倒塌与破坏极为严重（图1a）；而阶地后缘因上覆层为较薄坡残积碎石层，该区域的建筑物大多保持完好或仅受轻微损害（图1b）。

什邡市的蓥华镇位于石亭江次流分支竹溪河的右岸，与主断层的直线距离约为20.2 km，地震烈度高达IX度。沿河流走向对该镇内各类建筑物进行了详尽的现场调查，包括村庄的民房、工厂的厂房、工人宿舍等80多个建筑物调查点。不同区域建筑物的震害程度分布如图2



图1 南坝镇河流阶地前缘和后缘的房屋震害程度

(a) 阶地前缘房屋倒塌严重；(b) 阶地后缘房屋基本完好

Fig. 1 Seismic damage degree of houses at the front and rear edges of the river terraces in Nanba town

(a) The houses at the front edge of the terrace collapsed seriously; (b) The houses at the rear edge of the terrace were basically intact



图2 蓉华镇建筑物破坏点调查分布图

Fig. 2 Distribution map of building damage points investigated in Yinghua town

所示,可以看出,在靠近河流的阶地前缘区域的建筑物破坏程度严重,而远离河流的山前阶地后缘区域的建筑物震害则相对较轻。具体表现为:阶地后缘的建筑物大多保持了较好的完整性或只遭受了轻微的损害(图3a);而阶地前缘的建筑物却受到严重破坏,尤其是恰好位于阶地前缘与坡地交会处的蓥峰实业工厂,其下覆盖层为厚度约30—50 m的坡洪积漂卵石层,汶川地震发生后该工厂的车间、厂房普遍倒塌破坏(图3b)。



图3 河流阶地后缘和前缘的房屋震害程度

(a) 阶地后缘民房基本完好; (b) 阶地前缘蓥峰实业工厂破坏严重

Fig. 3 Seismic damage degree of the houses at the rear and front edges of river terraces

(a) The houses at the rear edge of the terrace were basically intact; (b) The Yingfeng Industrial Factory at the front edge of the terrace were severely damaged

彭州小鱼洞镇坐落于湔江顺流右岸Ⅱ级阶地与山前洪积扇交会处,地震烈度为X度,与主断层直线距离为12.7 km。该镇地势自西向东逐渐降低,形成了明显的二级河流阶地地形(图4)。位于西南山脚处的基岩局部裸露,其覆盖层以坡残积为主;而沿着东北方向逐渐靠近湔江的过程中,覆盖层逐渐变为以坡洪积和冲洪积为主,厚度也由最初的3—5 m逐渐增加至20—30 m左右。在离湔江较近的Ⅱ级阶地前缘区域,存在厚度超过20 m的卵砾石层和漂卵石层,阶地表层则覆盖着厚度不足1 m的黏土层。小鱼洞镇建筑物震害分布如图5所示,震害调查的建筑物结构基本以单层砌体结构和多层框架结构为主,部分工厂的厂房则是钢结构,而房屋的基础类型多为条形基础,埋深较浅,约为1.0—2.0 m。结合Ⅱ级河流阶地地形剖面图,可以清晰地观察到从阶地前缘至后缘,建筑物的破坏程度呈现出明显的递减趋势。在阶地前缘(水平距离约为0.8—0.9 km),房屋倒塌和严重破坏的现象频繁发生(图6);而在山前较缓的阶地后缘(水平距离约为1.2 km),房屋则大多保持完好或受到轻微损害(图7)。值得注意的是,小鱼洞断裂的地表破裂在图5中以

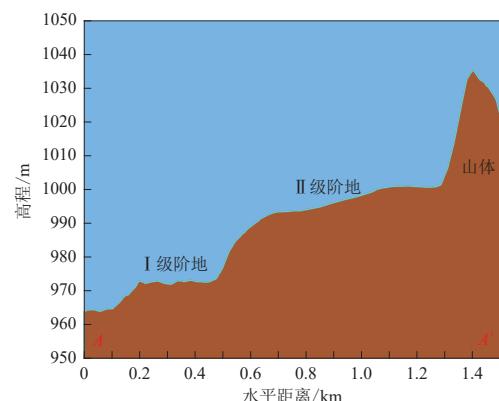


图4 小鱼洞镇河流阶地地形剖面图

Fig. 4 Topographic profile of the river terrace in Xiaoyudong town

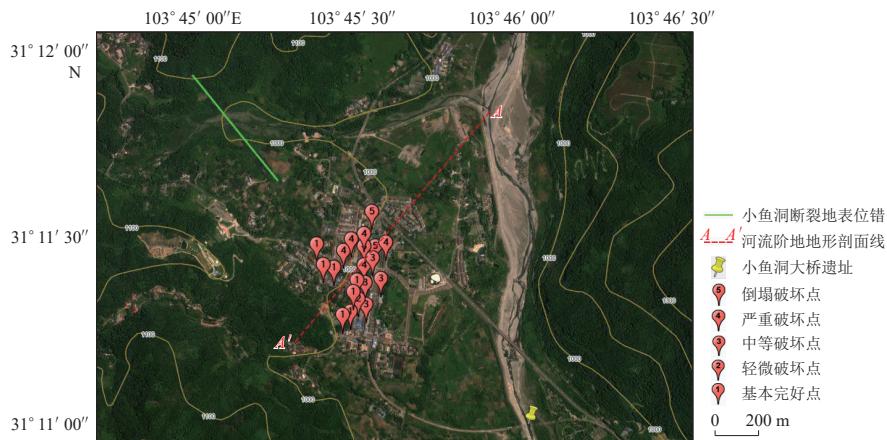


图 5 小鱼洞镇建筑物破坏点调查分布图

Fig. 5 Distribution map of building damage points investigated in Xiaoyudong town



图 6 小鱼洞镇阶地前缘房屋破坏严重

Fig. 6 The houses at the front edge of the terrace in Xiaoyudong Town were seriously damaged



图 7 罗阳村山前阶地后缘房屋基本完好

Fig. 7 The houses at the rear edge at the piedmont terrace in Luoyang Village remained basically intact

$N40^{\circ}W$ 方向展布, 向 SE 方向延伸至草坝, 破裂性质表现为左旋逆冲, 西南盘相对上升, 东北盘相对下降, 观测到的最大竖向位移达 2.7 m, 最大水平位移为 1.4 m, 地表破裂带的宽度为 2.3—20.0 m。2008 年汶川地震现场科考显示: 小鱼洞地表破裂带宽 21.0 m, 横穿罗阳村复兴路西侧建筑物, 导致建筑物倒塌, 竖向位错 1.0 m, 水平位错不明显; 建筑物完全倒塌宽度为 26.0 m, 上盘较下盘破坏严重(赵纪生等, 2009)。由此可见, 小鱼洞镇阶地前缘严重破坏和倒塌破坏的分布范围约为 400.0 m, 远大于断裂控制的 26.0 m, 故推测断裂并非小鱼洞大面积震害的主要控制因素。

2 河流阶地地震动数值模拟

2.1 建立阶地模型

基于汶川 $M_S 8.0$ 地震现场的震害调查与野外勘查资料, 选取河流一侧具有代表性的阶地地形作为研究对象, 通过构建三维模型来分析其地震响应特性。首先, 利用软件的插值拟合技术生成连续平滑的地层界面; 然后, 通过精细的离散化处理将地层界面转化为

FLAC3D 软件能高效读取的表格数据;最后,利用 FLAC3D 中的 topography 命令,对初始网格进行拉伸与变形,构建出具有复杂地形特征的几何模型。

为确保能够全面反映阶地地形的特性,对模型尺寸进行了设定。在水平方向上,x 轴长度设定为 70 m,充分覆盖了阶地地形的主要横截面特征,y 轴则延伸至 200 m;竖直方向上,以计算基底为准,设定了各级阶地及河流底部的高程,Ⅲ级阶地 52 m,Ⅱ级阶地 32 m,Ⅰ级阶地 17 m,河流底部 7 m。此外,也考虑了河流阶地的地质演化过程中阶地上覆土层存在厚度变化,即由阶地后缘向前缘覆盖土层厚度逐渐增加,如图 8 所示。

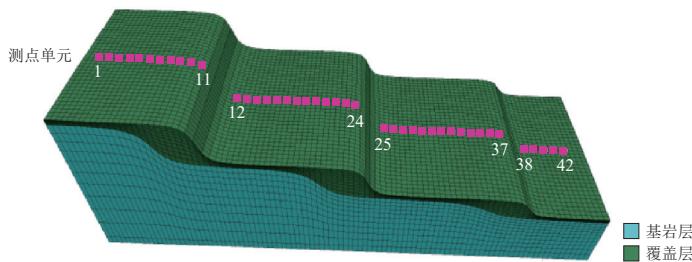


图 8 河流阶地模型与监测点分布

Fig. 8 Fluvial terrace model and distribution of monitoring points

在边界条件设置方面,为了逼真地模拟地震动在无限域或半无限域中的传播环境,模型四周采用了自由边界条件。同时,鉴于模型底部为模量较大的基岩,故直接在其底部施加加速度时程,以确保地震动的有效输入。选取瑞利阻尼作为模型的阻尼类型,设定临界阻尼比为 0.05,中心频率为 6.0 Hz。依据岩土体的物理力学参数经验值,对模型中不同岩土体设定了合理的参数(表 1),以确保数值分析的可靠性。

表 1 计算模型岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass for the calculation model

岩土类型	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/°
粉质黏土	1850	0.160	0.074	0.023	25
砂岩	2487	5.970	6.010	2.060	40

在计算过程中,沿模型底部 x, y, z 三个方向同时输入脉冲函数形式的动荷载,其宽度为 0.25 s,时间步距为 0.002 s,如图 9a 所示,相应的傅里叶谱如图 9b 所示,可知动荷载的频率成分截止到 10.0 Hz。在模型地表布置了 42 个加速度时程监测点,具体位置如图 8 所示。

2.2 数值模拟结果分析

通过对阶地模型底部 x, y, z 三个方向同时施加脉冲荷载,模拟其在三向地震作用下的动力响应,获得了阶地模型的加速度等值线云图与地表监测点的剖面加速度分布,如图 10 所示。图 10 清晰地揭示了阶地地形对地震动水平空间差异分布的影响,各级阶地加速度较高的区域主要集中在阶地前缘,而后缘的加速度水平则相对较低。

2.2.1 峰值加速度分析

为进一步量化峰值加速度分布特征,绘制了各级阶地的地表监测点在 x, y, z 三个方向上的峰值加速度变化趋势,如图 11 所示。可以看出,三个方向上的峰值加速度变化趋势基本一致,均随阶地地形的起伏和上覆土层厚度的变化而变化。具体而言,峰值加速度在各级阶

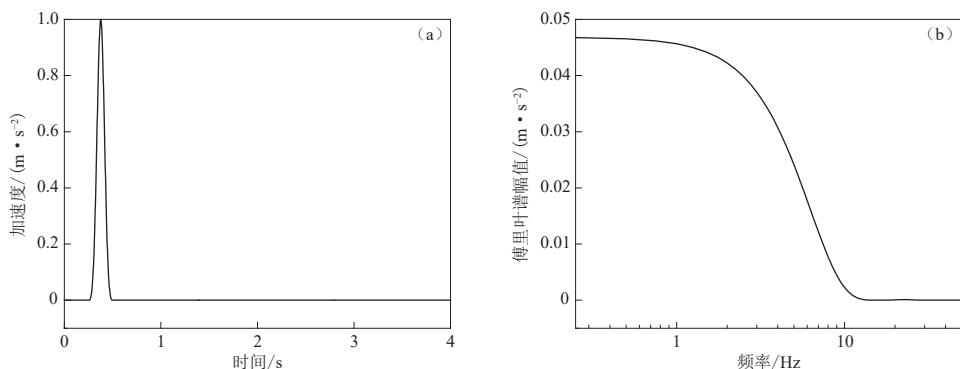


图 9 模型输入的脉冲函数(a)及其傅里叶谱(b)

Fig. 9 The impulse function input to the model (a) and its Fourier spectrum (b)

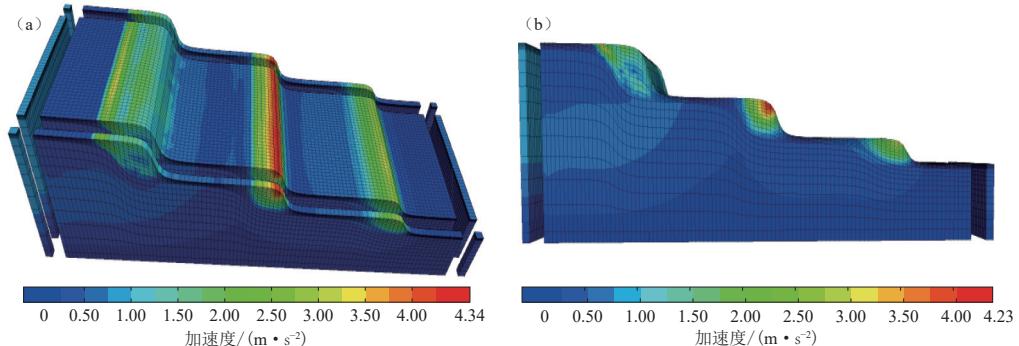


图 10 阶地模型加速度等值线(a)及监测点剖面加速度(b)分布

Fig. 10 The contour lines of the terrace model acceleration (a) and the distribution of the profile acceleration of the monitoring points (b)

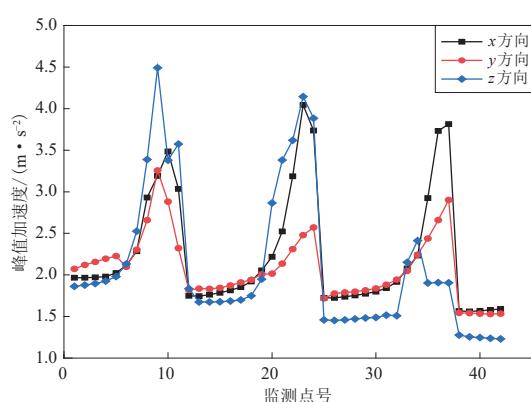


图 11 阶地模型地表各监测点的峰值加速度变化

Fig. 11 The variation of peak acceleration at each monitoring points on the surface of the terrace model

地的前缘区域都出现了极大值，随着阶地级数的减小，阶地对应区域的地表加速度峰值也逐渐下降。以竖直 z 向为例，Ⅲ级阶地后缘测点 1, 2, …, 5 的峰值加速度大多为 1.90 m/s^2 左右，Ⅱ级阶地后缘测点 13, 14, …, 18 的峰值加速度则在 1.68 m/s^2 左右，而Ⅰ级阶地后缘测点 26, 27, …, 31 的峰值加速度却处于更低的 1.50 m/s^2 附近。此外，对同一年级河流阶地，随着上覆土层厚度的增加，各方向上的峰值加速度呈现上升趋势，特别是在阶地前缘与陡坎转折处，由于地形的突变和波速的变化，加速度显著偏大。在Ⅲ级阶地上，随着上覆土

层厚度的增加(测点 6, 7, …, 10), 三个方向的峰值加速度均明显增大; 而位于阶地前缘与陡坎转折处的测点 11, 其 x , y 和 z 方向峰值加速度分别为 3.03 m/s^2 , 2.32 m/s^2 和 3.57 m/s^2 , 显著高于其它测点.

2.2.2 加速度持时分析

由于结构地震反应的破坏程度与输入地震动的能量有关, 故以给定比例的能量为准则确定地震动的持续时间. 按照式(1)计算能量函数 $E(t)$ 随时间的变化:

$$E(t) = \frac{\int_0^t a^2(t) dt}{\int_0^{T_0} a^2(t) dt}, \quad (1)$$

式中, $a(t)$ 为加速度时程, T_0 为总持续时间, $E(t)$ 的物理意义则可视为单位质量的单自由度体系在地震动 $a(t)$ 作用下, t 时刻的能量与总能量之比. 选取比值的上下限分别为 95% 和 5%, 则达到上限时刻 t_2 与下限时刻 t_1 之间的时间间隔为强地震动的能量持时, 它表示此时段内输入结构的能量占总能量的 90%, 被称为 90% 能量持时.

各级阶地地表监测点的 90% 能量持时变化如图 12 所示. 可以看出: 三个方向的相对持时变化趋势基本相似, 均随阶地级数的减小而波动下降; 而对同一级别阶地, 前缘的监测点持时水平明显大于后缘, 并且前缘区域受到上覆土层厚度和阶地几何形状的耦合影响, 出现了持时极大值; 在Ⅲ级阶地上, 随上覆土层厚度的增加, 测点 6, 7, 8, 9, 10 在三个方向上的相对持时也呈现上升趋势, 且这一上升趋势在阶地前缘与陡坎转折处的测点 11 处达到最大值, 该测点 x , y 和 z 方向上的持时值分别为 1.24 s, 1.83 s 和 1.24 s, 这一变化特征与前文所述峰值加速度的变化规律完全一致.

综合对比各级阶地地表监测点的峰值加速度和相对持时, 可以看出两者的变化趋势有一定相似性. ① 随着阶地级数的减小, 地表峰值加速度和相对持时值均下降, 表明阶地级数越高, 地震动在地形中的放大效应越显著; ② 同一级阶地上覆土层厚度变化明显的区域, 峰值加速度和相对持时值均变化显著, 且随着上覆土层厚度的增加, 峰值加速度和持时均呈现上升趋势; ③ 在阶地前缘与陡坎转折处, 加速度峰值和相对持时值均达到最大, 这表明地形几何形状的突变和厚覆盖土层对地震动的放大存在耦合效应; ④ 在同级别阶地上, 前缘区域的监测点加速度和持时水平明显高于后缘, 也进一步证明了阶地地形对地震动响应的空间分布差异具有显著影响.

2.2.3 加速度频谱分析

为深入分析各级阶地地表不同监测点的地震动频谱特性, 对监测点的加速度时程进行

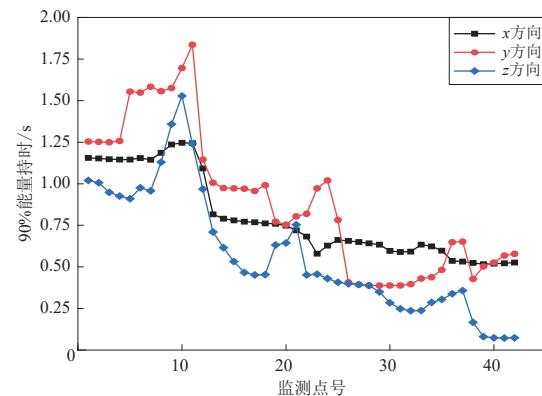


图 12 阶地模型地表各监测点的 90% 能量持时变化

Fig. 12 The variation of 90% energy duration at each monitoring points on the surface of the terrace model

傅里叶变换得到傅里叶谱。随后，将各测点的傅里叶谱与计算基底输入的脉冲荷载傅里叶谱进行谱比分析，以确定阶地不同位置对脉冲荷载各种频率成分的放大效应。此外，还对监测点的加速度反应谱进行规准，探讨其特征周期、平台值以及放大系数的变化规律。

从图 13 加速度傅里叶谱可以看出，各级阶地之间的幅值变化存在显著差异，这主要归结于阶地地形几何构造特征、土层厚度以及相对高度差异的综合影响。同一级阶地，虽各方向上的傅里叶幅值谱有所不同，但在相同方向上的傅里叶幅值谱形状却基本保持一致。对于Ⅲ级阶地在水平 x 和 y 方向上，傅里叶幅值谱的峰值均集中在 2.8 Hz 左右的频率处，表明在水平方向上的地震动能量主要集中在该频率附近；竖直 z 向的谱峰值则出现在 4.5 Hz 左右，说明竖向上地震动能量集中分布的频段高于水平向。在Ⅱ级阶地的水平 x 向和竖直 z 向上，最大谱值分别集中分布于 4.2 Hz 和 6 Hz 附近，表明随阶地级数的减小（即地形高度的降低），地震动能量的集中频率段有所升高；在水平 y 向上，傅里叶幅值谱在 2.8 Hz 和 4.6 Hz 两个频率处均出现较大的值，这可能与该方向上的地形复杂性或覆盖层不均匀性有关。而在Ⅰ级阶地的水平 x 向上，傅里叶幅值谱峰值出现在 5.8 Hz 左右，水平 y 向出现在 6 Hz 和 7.2 Hz 的频率处，进一步验证了随阶地级数减小，地震动能量集中频率上升的趋势；竖直 z 向的较大谱值则出现在 7.2 Hz 和 8.8 Hz 的频率附近，表明在低阶的阶地上，地震动频谱特性更为复杂，多频成分共存。

各级阶地不同测点的傅里叶谱比如图 14 所示，可以看出不同级别阶地对地震动频率成分的放大效应存在显著差异。例如水平 x 方向上，Ⅲ级阶地在 2.7 Hz 左右频率处出现较大的谱比值，而Ⅱ级和Ⅰ级阶地则分别在更高频段 4.0—6.0 Hz 和 5.0—8.0 Hz 范围内达到谱比峰值。随着阶地级数的增加，其对地震动低频成分的放大效应也显著地增强。这主要是因为阶地级数的增加（即地形高度上升），其自振周期也相应增大，从而在低频段内产生共振效应。由图 14 右列图可知，同一级别阶地上不同监测点的谱比值变化趋势虽然一致，但谱比值差异显著。阶地后缘区域的测点谱比曲线较为一致，随着测点向阶地前缘区域靠近，谱比值逐渐增加，其原因之一是测点位置逐渐靠近阶地陡坎临空面，该处测点振动所受周边岩土体的介质约束较小；另一方面则是上覆土层厚度的增加，对地震动有显著放大作用，因此阶地的几何形状与上覆土层对地震动的放大存在耦合效应。

对阶地模型地表监测点水平 x 和 y 方向的加速度反应谱 S_a 进行规准化处理，以得到地震动加速度规准反应谱。其中归准化参数包括地震动的峰值加速度 A_{\max} 、反应谱平台值放大系数 β_m 、第一拐点周期 T_0 （通常取 0.1 s）、第二拐点周期（特征周期） T_g 、周期值范围上限 T_m 以及下降段下降速度控制参数 γ （如衰减指数取 0.9），使用式(2)和式(3)进行具体计算。同时列举了测点 36 的规准反应谱曲线，如图 15 所示。

$$S_a(T) = A_{\max} \beta(T), \quad (2)$$

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 + (\beta_m - 1.0) \frac{T}{T_0} & 0 < T \leq T_0, \\ \beta_m & T_0 < T \leq T_g, \\ \beta_m \left(\frac{T_g}{T}\right)^{\gamma} & T_g < T \leq T_m. \end{cases} \quad (3)$$

阶地模型地表监测点的水平向规准反应谱具体参数见表 2，根据表中参数将各级阶地不

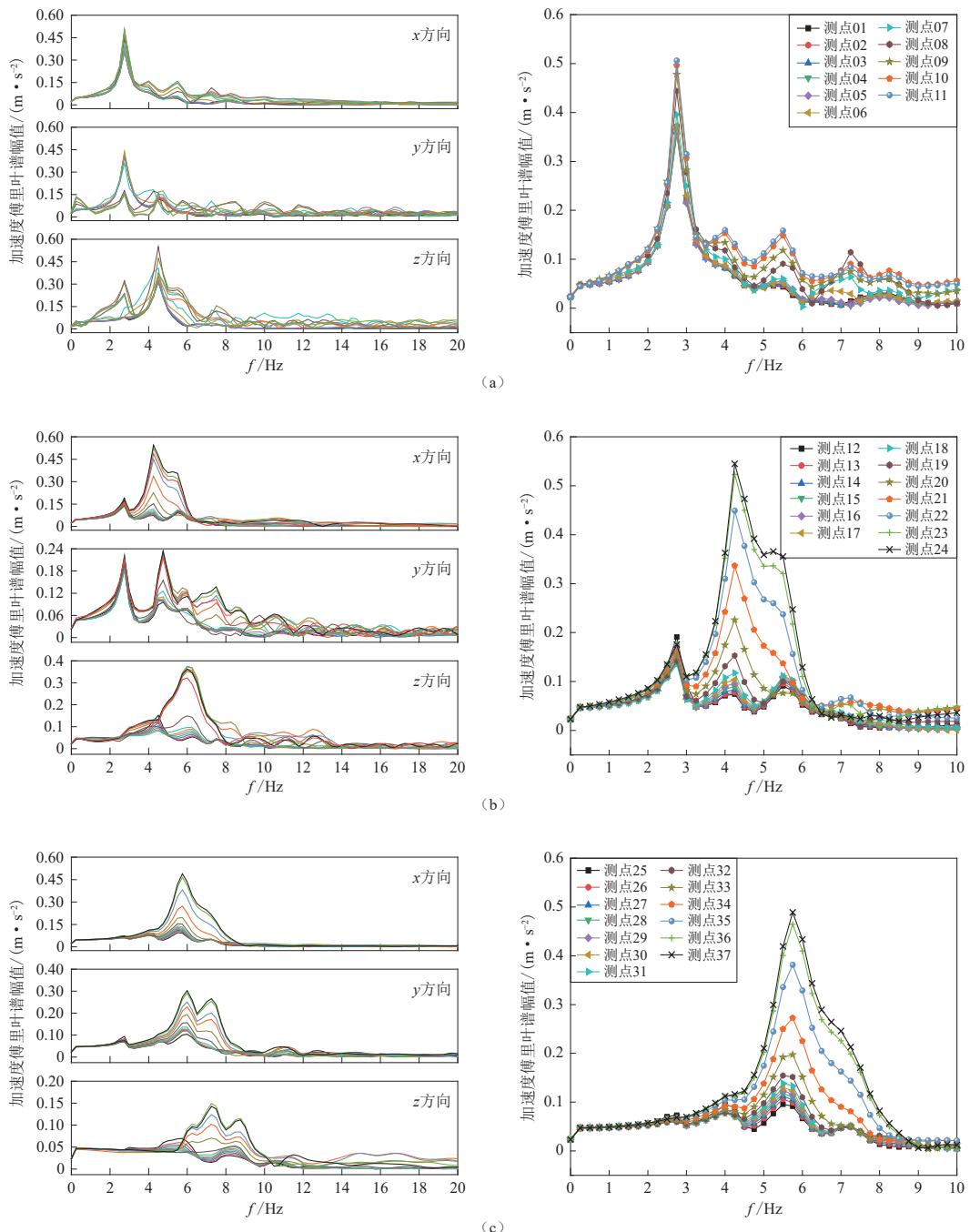


图 13 各级阶地三个方向(左)及各测点水平 x 方向(右)的加速度傅里叶谱

(a) III 级阶地; (b) II 级阶地; (c) I 级阶地

Fig. 13 The acceleration Fourier spectra of each terrace in three directions (left) and each

measurement point in horizontal x-direction (right)

(a) The third-order terrace; (b) The second-order terrace; (c) The first-order terrace

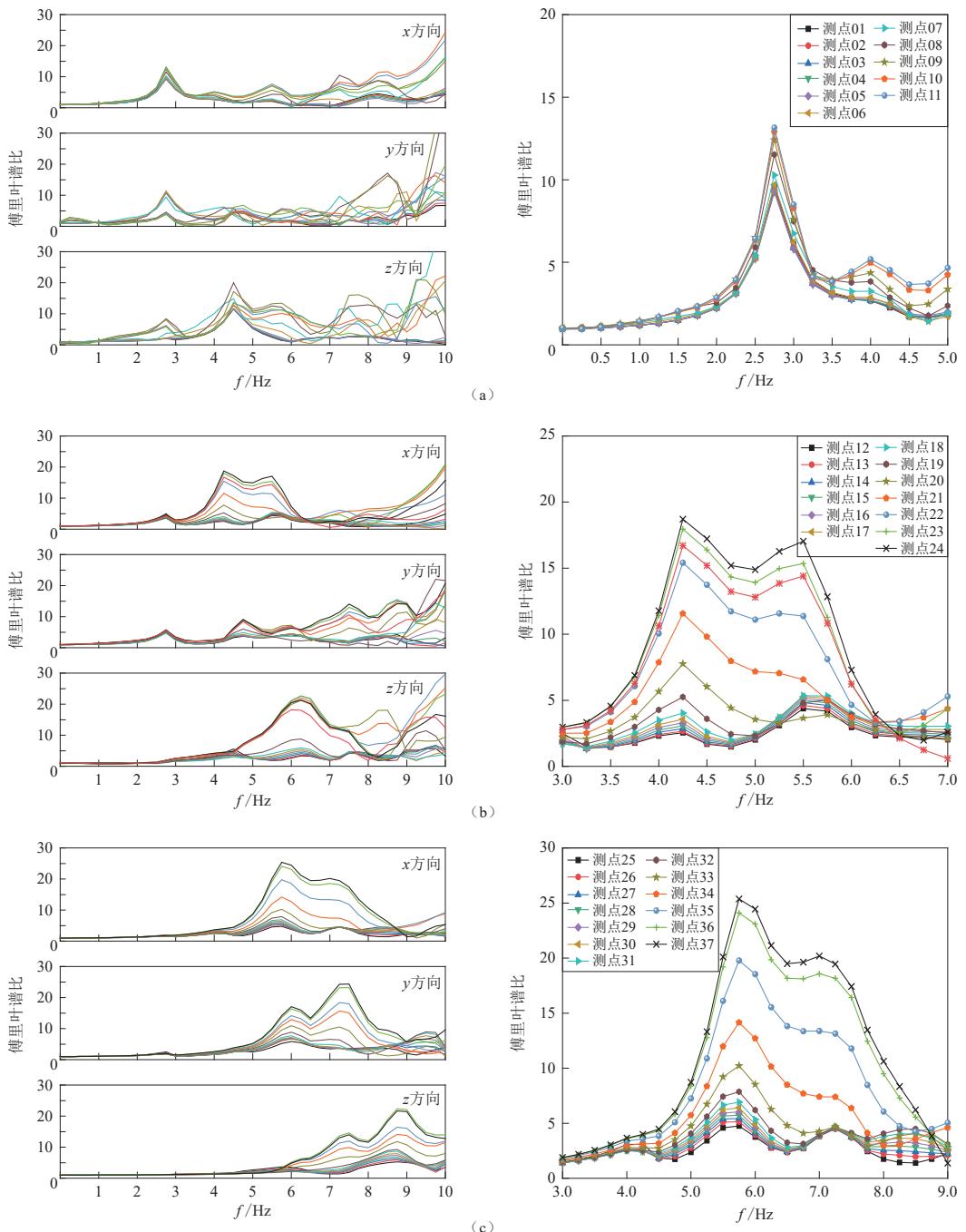


图 14 各级阶地三个方向(左)和各测点 x 方向(右)的傅里叶谱比图

(a) III 级阶地; (b) II 级阶地; (c) I 级阶地

Fig. 14 The Fourier spectrum ratio diagrams of each terrace in three directions (left) and each

measurement point in horizontal x -direction (right)

(a) The third-order terrace; (b) The second-order terrace; (c) The first-order terrace

同监测点反应谱的特征周期、平台值以及平台放大系数的变化趋势分别绘制图16和图17。其中特征周期 T_g 值受阶地级数影响显著,随级数的减小,特征周期也逐渐减小。Ⅲ级阶地的 T_g 值基本在0.4 s左右,Ⅱ级阶地则在0.25—0.35 s范围内,而Ⅰ级阶地却处于更低的0.2 s左右。说明高级阶地(地势较高)对地震动中的低频成分能量有显著的放大效应,这与阶地的几何尺寸和入射地震波波长有关。反应谱 S_a 的平台值则主要受到上覆土层厚度与地形几何形状的影响。同一级别阶地上前缘区域的平台值显著高于后缘,这与阶地前缘的几何

形状有关,即前缘部分临空面对地震动没有约束作用;同时随着前缘区域上覆土层厚度的增加,对地震动的放大效应增强,反应谱平台值也逐渐增大。此外,平台值放大系数 β 值同样受阶地级数与几何条件的影响,随阶地级数的增加,放大系数却呈下降趋势,这是因为高级阶地对高频地震动有滤波作用,导致高频成分减少,而放大系数 β 的大小却与地震动输入中的高频成分直接相关。在同一级别阶地上,前缘区域的放大系数明显大于后缘,这也进一步说明阶地几何形状对地震动有着显著影响。

表2 阶地模型地表监测点规准反应谱参数

Table 2 Acceleration standard response spectrum parameters of surface monitoring points for the terrace model

监测点号	第一拐点周期 T_0 /s	第二拐点周期 T_g /s	反应谱 S_a 平台值/(m·s ⁻²)	平台值放大系数 β	监测点号	第一拐点周期 T_0 /s	第二拐点周期 T_g /s	反应谱 S_a 平台值/(m·s ⁻²)	平台值放大系数 β
1	0.10	0.40	1.963	0.940	20	0.10	0.25	2.750	1.240
2	0.10	0.40	2.013	0.949	21	0.10	0.25	3.425	1.357
3	0.10	0.40	2.050	0.927	22	0.10	0.25	4.200	1.318
4	0.10	0.40	2.125	0.889	23	0.10	0.25	4.250	1.050
5	0.10	0.40	2.288	0.890	24	0.10	0.25	4.388	1.174
6	0.10	0.40	2.700	1.276	25	0.10	0.25	2.325	1.348
7	0.10	0.40	3.038	1.318	26	0.10	0.25	2.475	1.394
8	0.10	0.40	3.450	1.177	27	0.10	0.20	2.500	1.396
9	0.10	0.40	3.838	1.178	28	0.10	0.20	2.463	1.368
10	0.10	0.40	4.125	1.183	29	0.10	0.20	2.450	1.350
11	0.10	0.40	3.513	1.157	30	0.10	0.20	2.475	1.346
12	0.10	0.35	2.163	1.188	31	0.10	0.20	2.600	1.381
13	0.10	0.35	2.100	1.144	32	0.10	0.20	2.975	1.530
14	0.10	0.35	2.088	1.139	33	0.10	0.20	3.538	1.703
15	0.10	0.35	2.075	1.125	34	0.10	0.20	4.050	1.806
16	0.10	0.30	2.113	1.127	35	0.10	0.20	4.450	1.522
17	0.10	0.30	2.113	1.107	36	0.10	0.20	4.600	1.232
18	0.10	0.30	2.200	1.133	37	0.10	0.20	4.675	1.226
19	0.10	0.30	2.250	1.095					

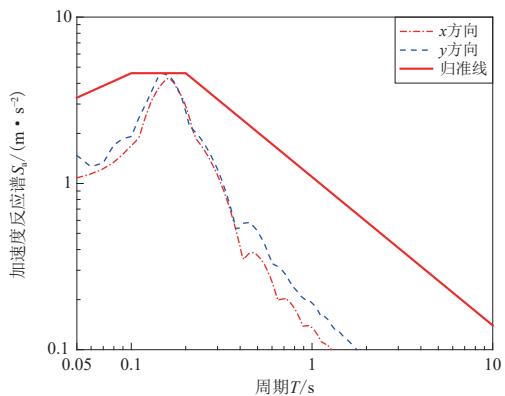


图15 测点36的加速度规准反应谱曲线

Fig. 15 Acceleration standard response spectrum curve at the measuring point 36

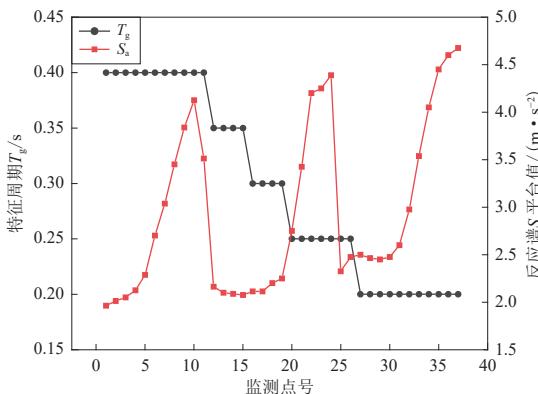


图 16 阶地监测点反应谱的特征周期 T_g 值和反应谱 S_a 平台值变化

Fig. 16 Variation of the characteristic period T_g and S_a platform value of spectral response at terrace monitoring points

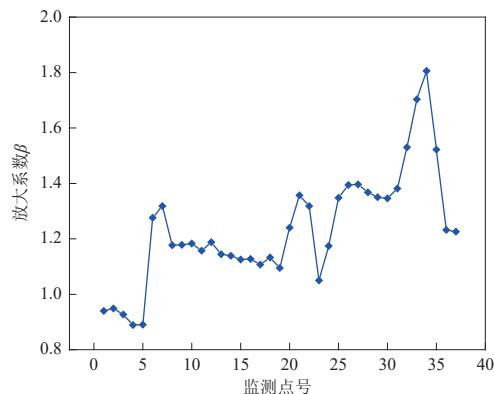


图 17 阶地监测点的反应谱平台值放大系数 β 的变化

Fig. 17 Variation of platform value amplification factor β of spectral response at the terrace monitoring points

3 讨论与结论

本文通过对汶川地震中典型河流阶地的现场震害调查，结合阶地地形的三维数值模拟结果，深入探讨了河流阶地地形对建筑物震害特征的影响及其产生机理。

现场调查发现阶地前缘建筑物震害程度显著高于后缘，这是由于前缘的厚冲洪积层放大地震动而导致震害严重，后缘则因薄坡积层对地震动的衰减使震害较轻。数值结果也表明，各级阶地前缘的地震动水平普遍高于后缘，且随着上覆土层的增厚，地表峰值加速度、相对持时、反应谱平台值以及平台值放大系数均呈上升趋势。研究还发现，阶地级数对地震动的空间分布和总体水平也有显著影响，且随阶地级数的减小，峰值加速度、相对持时和反应谱特征周期均呈现下降趋势。而阶地级数的增加则会增强对地震动低频成分的放大效应。阶地前缘与陡坎衔接处因地形几何条件与较厚的上覆土层对地震动放大的耦合作用，震害尤其严重，且该位置处的数值结果中峰值加速度、相对持时和反应谱平台值均达到极大值，这同样揭示了其震害严重的原因。

综上，本研究得出以下结论：① 河流阶地对地震动的传播和建筑物震害程度有显著影响，其中阶地上覆土层厚度变化是导致震害程度分布不同的主要原因之一；② 阶地级数通过影响地震动的频谱特性和总体水平来加剧或减轻震害，其中低级别阶地对地震动具有较强的衰减作用，而高级别阶地则会放大地震动的低频成分；③ 特殊地形条件如阶地前缘与陡坎转折位置在地震中可能遭受更为严重的破坏。这可为重大工程的抗震设计提供参考。

参 考 文 献

- 董俊, 赵成刚. 2005. 三维半球形凹陷饱和土地对平面 P 波散射 [J]. 地球物理学报, 48(3): 680–688.
 Dong J, Zhao C G. 2005. An analytic solution for the diffraction of plane P-wave by three-dimensional hemispherical canyons in a fluid-saturated porous media half space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 48(3): 680–688 (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).
- 高玉峰,代登辉,张宁.2022.翡翠河谷地震地形效应解析分析[J].*地震学报*,**44**(1): 40–49.
- Gao Y F, Dai D H, Zhang N. 2022. Analytical study on the topographic effect on ground motion of Feitsui canyon[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **41**(4): 40–49 (in Chinese).
- 韩铮.2006.半球形凹陷谷场地对Rayleigh波的三维散射[J].*山西建筑*,**32**(3): 52–53.
- Han Z. 2006. Three-dimensional scattering of Rayleigh waves in hemispherical canyon[J]. *Shanxi Architecture*, **32**(3): 52–53 (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).
- 李平,薄景山,李孝波,肖瑞杰.2016a.安宁河河谷及邛海地区土层场地对地震动的放大作用[J].*岩土工程学报*,**38**(2): 362–369.
- Li P, Bo J S, Li X B, Xiao R J. 2016a. Amplification effect of soil sites on ground motion in Anning River valley and Qionghai Lake area[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **38**(2): 362–369 (in Chinese).
- 李平,刘红帅,薄景山,李孝波,于晓辉.2016b.汶川M_S8.0地震河谷地形对汉源县城烈度异常的影响[J].*地球物理学报*,**59**(1): 174–184.
- Li P, Liu H S, Bo J S, Li X B, Yu X H. 2016b. Effects of river valley topography on anomalously high intensity in the Han-yuan town during the Wenchuan M_S8.0 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(1): 174–184 (in Chinese).
- 李伟华,赵成刚.2003.圆弧形凹陷饱和土地对平面P波散射问题的解析解[J].*地球物理学报*,**46**(4): 539–546.
- Li W H, Zhao C G. 2003. An analytical solution for the diffraction of plane P-waves by circular cylindrical canyons in a fluid-saturated porous media half space[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **46**(4): 539–546 (in Chinese).
- 梁建文,李方杰,顾晓鲁.2005.Rayleigh波在浅圆凹陷地形附近的散射:高频解答[J].*地震工程与工程振动*,**25**(5): 24–29.
- Liang J W, Li F J, Gu X L. 2005. Scattering of Rayleigh waves by a shallow circular canyon: High-frequency solution[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **25**(5): 24–29 (in Chinese).
- 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).
- 刘晶波.1996.局部不规则地形对地震地面运动的影响[J].*地震学报*,**18**(2): 239–245.
- Liu J B. 1996. The impact of local irregular topography on seismic ground motion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **18**(2): 239–245 (in Chinese).
- 曲国胜,黄建发,李小军,张晓东,宁宝坤,李亦纲.2008.南亚(巴基斯坦)地震灾害分布及成因分析[J].*震灾防御技术*,**3**(1): 85–94.
- Qu G S, Huang J F, Li X J, Zhang X D, Ning B K, Li Y G. 2008. The hazard assessment and analysis of Pakistan earthquake in 2005[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **3**(1): 85–94 (in Chinese).
- 沈欣茹,郝冰,李远东,陈珍,周正华.2023.河谷地形对地震动的影响分析[J].*地震学报*,**45**(4): 706–716.
- Shen X R, Hao B, Li Y D, Chen Z, Zhou Z H. 2023. The influence of valley topography on ground motion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **45**(4): 706–716 (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).
- 王铭锋,郑傲,章文波.2017.局部山体地形对强地面运动的影响研究[J].*地球物理学报*,**60**(12): 4655–4670.
- Wang M F, Zheng A, Zhang W B. 2017. Effect of local mountain topography on strong ground motion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(12): 4655–4670 (in Chinese).
- 王伟.2011.地震动的山体地形效应[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所:10–14.

- Wang W. 2011. *Effect of Hill Topography on Ground Motion*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 10–14 (in Chinese).
- 肖文海. 2009. 大型河谷场地地震动特征研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 1.
- Xiao W H. 2009. *Research on Ground Motion Characteristic at the Site of Large-Scale Valley*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 1 (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).
- 赵纪生, 吴景发, 师黎静, 王伟. 2009. 汶川地震地表破裂周围建筑物重建的避让距离 [J]. 地震工程与工程振动, **29**(6): 96–101.
- Zhao J S, Wu J F, Shi L J, Wang W. 2009. Setback distance determination in reconstruction along the trace of surface rupture caused by $M_{\text{S}}8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **29**(6): 96–101 (in Chinese).
- 周国良, 李小军, 侯春林, 李铁萍. 2012. SV 波入射下河谷地形地震动分布特征分析 [J]. 岩土力学, **33**(4): 1161–1166.
- Zhou G L, Li X J, Hou C L, Li T P. 2012. Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **33**(4): 1161–1166 (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.
- Bouckovalas G D, Papadimitriou A G. 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **25**(7/8/9/10): 547–558.
- Davis L L, West R L. 1973. Observed effects of topography on ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **63**(1): 283–298.
- Frischknecht C, Wagner J J. 2004. Seismic soil effect in an embanked deep Alpine valley: A numerical investigation of two-dimensional resonance[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(1): 171–186.
- Gao Y, Zhang N, Li D, Liu H, Cai Y, Wu Y. 2012. Effects of topographic amplification induced by a U-shaped canyon on seismic waves[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(4): 1748–1763.
- Kurita T, Annaka T, Takahashi S, Shimada M, Suehiro T. 2005. Effect of irregular topography on strong ground motion amplification[J]. *Jpn Assoc Earthquake Eng*, **5**(3): 1–11.
- 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.
- Peng W F, Wang C L, Chen S T, Lee S T. 2009. Incorporating the effects of topographic amplification and sliding areas in the modeling of earthquake-induced landslide hazards, using the cumulative displacement method[J]. *Comput Geosci*, **35**(5): 946–966.
- Tessmer E, Kosloff D. 1994. 3-D elastic modeling with surface topography by a Chebychev spectral method[J]. *Geophysics*, **59**(3): 464–473.