河谷地形的地震反应分析。

盛志强¹,卢育霞^{1,2,3},石玉成^{1,2,3},刘 琨^{1,2,3},万秀红¹

(1.中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000;2.中国地震局 黄土地震工程开放实验室, 甘肃兰州 730000;3.甘肃省岩土防灾工程技术研究中心,甘肃兰州 730000)

摘 要:震害现象显示在一些覆盖层很薄的基岩河谷山区地震动分布差异明显。为了厘清各形状要 素的均质地形模型对地震动特性的影响,侧重分析了河谷坡角、坡高及不对称坡体等要素对均质体 河谷模型的地震动(PGA)的影响。研究结果表明:河谷地形谷底内部的地面运动幅值在坡角40° ~50°范围内达到最大值;在高坡角的河谷内波衰减比较慢,波形相对较复杂;在深宽比较小时,高 频和低频脉冲的地面加速度峰值都呈现同样的变化趋势,且谷底地面各个位置PGA变化不明显, 随着深宽比的增加,高频脉冲的地震反应变化复杂,出现谷底中心加速度幅值大于山脚;河谷的不 对称形状对谷底 PGA 有影响,谷底 PGA 最大的位置靠近坡高小的一侧,且坡角大的一侧山脚附 近谷底 PGA 要小一些,即坡度和高差越大,会很大程度地增加河谷两侧坡体的临空面,并增大地 震加速度的放大系数,凸起地形对地震响应有放大作用,对它附近区域却有抑制作用,而且坡高、坡 角越大,抑制作用越明显。

关键词:河谷地形;反应谱;地面峰值加速度;深宽比;坡角

中图分类号: P315.913 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2013)01-0126-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0126

Seismic Response Analysis of Valley Topography

SHENG Zhi-qiang¹, LU Yu-xia^{1,2,3}, SHI Yu-cheng^{1,2,3}, LIU Kun^{1,2,3}, WAN Xiu-hong¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Open Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The earthquake damage phenomenon indicates that the distribution of earthquake ground motion differs significantly in various parts of bedrock valley areas. The amplitude of ground motion has an important direct impact on the extent of the seismic hazard; larger amplitudes result in more severe disasters. Many towns located in the valley areas are widely distributed over Shanxi, Gansu, and Sichuan provinces and sustain severe damages from earthquakes. Research on this type of area has recently increased with particular emphasis on valley terrain. Many scholars have reported that input data is a significant problem for calculating the parameters of ground motion during strong shocks in such cities because microzoning is often closely related to the characteristics of soil strata and the geomorphological conditions. Nevertheless, the conditions of terrain and geology are interdependent with each other and have an impact on ground motion; it is widely accepted that terrain has an important effect on ground motion. Common valley terrain can be divided into three categories including V valley, inverted trapezoidal valley, and trapezoidal valley. V valley and inverted trapezoidal valley are widespread and are the topics of

① 收稿日期:2012-12-25;中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2013011
 基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2012IESLZ02);国家自然科学基金(51248005)
 作者简介:盛志强(1987-)男(汉族),山东青岛人,硕士研究生,从事岩土地震工程研究,E-mail:sheng123zq@163.com

numerous studies. The bottom of V valley is narrow, and many geological disasters such as rockfalls occur in trapezoidal valleys. The inverted trapezoidal valley is more suitable for residency: therefore, research on this type of valley terrain is important. Because the drainage systems and valley landforms are generally not symmetric, homogeneous terrain models with various slope angles, depth-to-width ratios, and asymmetry of valley are used to analyze the variation of peak ground acceleration (PGA) in valley areas. By comparing the PGA, seismic spectra, and acceleration time history, the relationship between ground motion and topography is analyzed in this study. The results show that 1) the ground motion amplitude at the valley bottom appears to reach maximum value when the slope angles are approximately $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ and later decreases. The minimum is achieved when the angle is changed from 65° to 80° on the basis of spectrum ratio. These results are consistent with published results on the Wenchuan earthquake. The wave in the high-pitched slope valley decays slowly, which it could be due to diffraction of P, SV, and Rayleigh waves. 2) No obvious variation of PGA on various valley areas is observed when using a small depth-to-width ratio model, regardless of high-frequency and low-frequency impulse input. With an increase in depth-to-width ratio, an input of high-frequency impulse causes significant variation, and the PGA in the valley center is larger than that at the valley bottom. Diffraction of P, SV, and Rayleigh waves is higher with an increase of depth-to-width ratio, and the distribution of PGA is complex. In addition, the orographic effect is stronger when the wavelength was close to the width of the bottom of valley and slope. 3) The amplification factor of earthquake ground motion increases with slope angle and slope height. In addition, the valley asymmetry has an influence on the PGA at the valley bottom. The maximal PGA at the valley bottom is often close to the lower slope side, and the smaller PGA appears to correspond to the side with the larger slope angle; the amplification factors of both sides is increased due to free face changing with the increase in slope angle and slope height. 4) Ground motion is consistently amplified on or near the top of the hill areas compared with that at the bases. The protruding topography has amplification effect on ground motion while the hillside has a constrained effect. In addition, a larger slope angle and height relates to more severe damages to residential areas; the effect is less intense with distance from mountains. The amplification factor of the valley between two mountains is related to the distance of the two mountains. If the distance is shorter, the factor is smaller.

Key words: River valley; Response spectrum; PGA; Depth-to-width ratio; Angle of slope

0 引言

局部场地不同类别的土体通常呈水平层状分 布,相对平整场地的地震反应分析一般简化为一维 波动问题。但是在地形起伏比较大,土层力学参数 在水平向变化比较明显的场地,比如河谷、陡坡、高 山等,如果同样按一维波动理论方法^[1]进行分析,就 会有很大的误差。针对这种地形起伏较大、土层结 构分布不均匀的场地,近年来已有不少研究,如袁晓 铭等^[2]认为河谷深宽比是河谷地表地震动放大的主 要因素之一;高修建等^[3]通过计算得到狭窄河谷较 宽阔河谷影响更显著的认识;周国良^[4]以二维河谷 地形为例分析了均匀粘弹性半空间上河谷地形对地 震波的散射,研究表明:从河谷两侧角点到河谷底部,PGA和 PGD基本呈现逐渐减小的趋势;张孝波^[5]等研究认为在河谷场地最低点处的地震动放大作用最小,而在地势凸起处受地震动的影响明显。总之,局部不均匀场地条件对地震动的影响不容忽视。

地形条件及地质条件两者相互影响、相互依存, 这就造成了地震反应分析有很强的地域适用性,如 卢育霞等^[6]研究表明甘肃文县的高突场地的地震动 放大应归因于地形条件和其上覆松散层的共同作 用,目前关于这方面的研究大都要考虑两者共同作 用的结果。一些实际的震害现象显示在一些覆盖层 很薄的基岩河谷山区地震动分布差异明显,可见地 形效应不容忽视。为了阐明各形状要素的均质地形 模型对地震动特性的影响,本文侧重分析河谷坡角、 坡高及不对称坡体等要素对均质体河谷模型的地面 峰值加速度的影响。

1 计算参数的选取

1.1 输入的地震波

本次计算分析中输入的是 el centro 地震波和 加速度脉冲,从 el centro 傅氏谱可知,能量主要集 中在 10 Hz 以内。为了控制模型网格的尺寸,提高 数值计算的精度,通过滤波软件提取频率 10 Hz 以 内的 el centro 地震波。滤波之后的 el centro 波和 加速度脉冲如图 1,脉冲为三角状脉冲。



Fig. 1 Acceleration-time curve after filtering.

1.2 材料参数及本构模型

计算中模型为卵砾石材料。密度 ρ =2 300 kg/ m³, E=3 222.1 MPa, μ =0.1; V_s=798 m/s。由于 Mohr-Coulomb 模型在数值计算中比较繁琐、收敛 缓慢,计算中采用 Drucker-Prager 模型。在现场 试验和室内试验中得到的土体的物理力学参数是基 于 Mohr-Coulomb 准则给出,而 Drucker-Prager 模型中的内聚力 d、内摩擦角 β 和 Mohr-Coulomb 模型的内聚力 c、内摩擦角 φ 并不相等。在平面应 变问题中,三轴拉伸强度与三轴压缩强度之比 k= 1,两个模型的参数之间有如下关系,其中 ϕ 为剪胀 角:

$$\sin \varphi = \frac{\tan \beta \sqrt{3(9 - \tan^2 \psi)}}{9 - \tan \beta \tan \psi} \tag{1}$$

$$\cos \varphi = \frac{\sqrt{3(9 - \tan^2 \psi)}}{9 - \tan \beta \tan \psi}$$
(2)

在计算中采用非相关联流动法则, $\phi=0$,可得

$$\tan\beta = \sqrt{3}\sin\varphi \tag{3}$$

$$\frac{d}{c} = \sqrt{3}\cos\varphi \qquad (4)$$

1.3 网格尺寸的要求

输入波形的频率成分和土体的波速特性会影响 波的传播的数值精度。据研究表明,只有在网格的 尺寸 Δl小于输入波形最高频率对应的波长 λ 的 1/ 8 到 1/10 时,所得数据才有研究意义,即

$$\Delta \leqslant \left(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10}\right) \lambda \tag{5}$$

1.4 边界条件

由于实际场地是半无限空间,而有限元模型的 边界会对地震波产生反射等作用。为了减小边界的 影响,在模型底部采用粘弹性边界,两侧采用自由场 边界。由于自由场边界提供了与无限场地相同的效 果,因此向上的面波在边界上不会产生扭曲。人工 边界条件的截取对模型的计算有一定的影响,通过 变化人工边界与监测点之间的距离来研究这一影 响。计算模型示意图(图 2)中,为了保证计算精度, 对主扩展区内地形、地质情况进行较为准确的勘察; 而对于次扩展区,在其参数变化较小的情况下,可参 照离其最近的勘探资料,由此产生的误差较小^[7]。 模型厚度为 120 m,模型的边界长度从 50 到 500 m 变化,输入为1Hz加速度脉冲,计算结果如图3所 示。计算表明:随着人工边界截取的长度增大,边界 条件对计算结果的影响就越小,峰值加速度比和特 征频率都趋向一个稳定的值。所以本文计算模型边 界条件都截取的足够远,并考虑到计算的限度,两侧 边界长度为计算区域最大深度的5倍,即取 D/H= 2,L/H=5,以减小计算误差和其他不确定性。



Fig. 2 Schematic plan of calculation model^[7].







2 结果分析

常见的河谷横剖面地形大致分为三类:V型河谷、倒梯形河谷、梯形河谷。其中 V型河谷和倒梯 形河谷比较常见,针对这两类河谷研究的也很多。 V型河谷谷底较窄,梯形河谷少见又很容易发生滚 石等地质灾害,所以倒梯形河谷相对而言比较适合 人类居住,研究其更有现实意义。而在中国甘肃陇 南山区、四川川北地区、陕西南部山区等又多分布山 体陡峭、谷底狭窄且两侧极不对称的河谷地形,历次 地震中这些地区震害都很严重^[8-9]。基于此,本文分 析了不同倒梯形河谷的地震反应,考虑了河谷坡角、 坡高及不对称性的影响。

2.1 河谷坡角对谷底地震动的影响

河谷两侧坡角相同并同时从 10°到 80°变化,河 谷宽度为取为 50 m,左右斜坡宽度为 20 m,垂直向 上输入 1 Hz 加速度脉冲,计算结果见图 4(a)、(b)、 (c)。各图中左图为坡脚处的监测结果,右图为河谷 中央处的监测结果。由计算结果可看出:谷侧倾角 对坡脚处的影响较为明显,坡脚处的时域波形较为 复杂,其最大幅值为1.2,而谷底处为1.1;坡脚对监 测点特征频率影响不是很明显;通过对谱比计算结 果研究,坡脚处和谷底的最大谱比出现在坡角为 40°~50°范围内,最小值出现在 65°~80°范围内。 总体来看,随着坡角增大谷内地面运动幅值在 40° ~50°范围内达到最大值,接着又变小,而地面运动 幅值的大小将直接影响地震灾害的程度,幅值越大, 往往震害越大,这一变化趋势与田述军^[10-11]在汶川 地震灾害统计结果类似。高坡角的河谷内波衰减比 较慢,波形相对较复杂,这可能是模型谷底宽度不 变,高坡角使得河谷地形对加速度脉冲的更多次的 衍射、反射、散射等作用使之持时增加所致。

2.2 河谷深宽比对谷底地震动的影响

定义河谷深宽比为河谷深度与河谷谷底宽度的



Fig. 5 PGA curves in the valley with different depth-to-width ratios.

比值。对坡角为45°,深宽比分别为1:2、1:1、3:2和 2:1 的谷底宽度为 50 m 的河谷输入频率为 1 Hz、2 Hz、5 Hz和 10 Hz的加速度脉冲,得到了图 5 所示 的地面峰值加速度分布图。总的来说,山顶处峰值 加速度要大于河谷处。在深宽比为1:2时,高频和 低频脉冲的地面加速度峰值都呈现同样的变化趋 势,表现为山顶加速度幅值大于谷底,且谷底各个位 置变化不明显;随着深宽比的增加,高频脉冲的地震 反应变化复杂,并出现谷底中心加速度幅值大于山 脚。随着河谷深宽比的增加体波及面波的衍射、反 射和散射现象就会越明显,在地面峰值加速度分布 图上呈现出来的就会越复杂。模型频率也是影响地 面峰值加速度的因素之一,计算发现随着深宽比的 增加,河谷整体的频率减小。另外,输入地震波的波 长与河谷谷底宽度及坡宽相当时,地形效应影响明 显,即输入5Hz、10Hz加速度脉冲时PGA变化复 杂,这与参考文献[12]的研究结果一致,即输入地震 波的波长与河谷谷底宽及坡宽相当时,地形效应影 响[12]。

另在坡角固定为 45°,河谷谷底宽度为 50 m,深 宽比为 1:2、1:1 和 2:1 的河谷输入 el centro 波。 河谷谷底中心的地面加速度反应谱如图 6。可以看





2.3 河谷不对称性对河谷地震动的影响

本文将不对称河谷分为两类:一为河谷两侧坡 角相同、坡高不同,算例中取坡角 45°不变,谷底宽 度 50 m,左侧坡高 50 m 不变,右侧坡高为 40 m、20 m、10 m,依次编号为河谷 a、c、d;另一为河谷两侧坡 高相同、坡角不同,算例中取河谷两侧坡高 50 m,左 侧坡角 45°不变,右侧坡角 α 分别为 tan(α)=2、1、0. 5 的三个河谷模型,编号依次为河谷 e、f、g。输入 5 Hz 的加速度脉冲。

比较了河谷 a、b、c、d 的 PGA,发现坡高大的一





侧山顶峰值加速度要大于坡高低的一侧,两侧远离 山体的位置变化不明显,而且随着河谷两侧高差的 增大,坡高大的一侧对另一侧影响较大。另外,坡高 对谷底地面峰值加速度也有影响,谷底 PGA 最大 的位置靠近坡高小的一侧。对比河谷 e、f、g 可知, 坡角大的一侧山顶 PGA 要大于坡角小的一侧山 顶,山脚处却是前者的 PGA 小于后者的。坡度和 高差越大,会很大程度地增加河谷两侧坡体的临空 面,并增大地震加速度的放大系数。另外,虽然凸起 地形对地震响应有放大作用,对它附近区域却有抑 制作用^[13],而且坡高、坡角越大,抑制作用越明显, 距山体距离远时,河谷受山体的抑制作用减弱,放大 倍数增加,所以谷底及山脚 PGA 分布呈现如图7 所 示。

3 结论

仅考虑地形效应研究了不同坡角、不同深宽比 和不对称的河谷地形的地震反应,初步得出以下几 个结论:(1)随着坡角增大谷内地面运动幅值在40° ~50°范围内达到最大值,接着又变小;在高坡角的 河谷内波衰减比较慢,波形相对较复杂,高坡角使得 波在传播过程中衍射、散射、反射等作用加大。

(2)在深宽比较小时,高频和低频脉冲的地面 加速度峰值都呈现同样的变化趋势,表现为山顶加 速度幅值大于谷底,且谷底各个位置变化不明显;随 着深宽比的增加,高频脉冲的地震反应变化复杂。 另外随着深宽比的增加,高频脉冲出现谷底中心加 速度幅值大于山腰。河谷深宽比的增加,体波及面 波的衍射、反射和散射现象就会越明显,在地面峰值 加速度分布图上呈现出来的就会越复杂。

(3)算例中比较了两类不对称河谷。发现坡高 大的一侧山顶峰值加速度要大于坡高低的一侧,两 侧远离山体的位置变化不明显,而且随着河谷两侧 高差的增大,坡高大的一侧对另一侧影响较大。另 外,坡高对谷底地面峰值加速度也有影响,谷底 PGA最大的位置靠近坡高小的一侧;坡角大的一侧 山顶 PGA 要大于坡角小的一侧山顶,山脚处却是 前者的 PGA 小于后者的。坡度和高差越大,会很 大程度地增加河谷两侧坡体的临空面,并增大地震 加速度的放大系数;凸起地形对地震响应有放大作 用,对它附近区域却有抑制作用,而且坡高、坡角越 大,抑制作用越明显。

[参考文献]

[1] 廖振鹏.工程波动理论导论(第二版)[M].北京:科学出版社, 2002.

LIAO Zhen-peng. Introduction to Wave Motion Theories for Engineering(The second edition)[M]. Beijing, Science Press, 2002.

- [2] 袁晓铭,廖振鹏. 圆弧形凹陷地形对平面 SH 波散射问题的级数解答[J]. 地震工程与工程振动,1993,13(2):1-11.
 YUAN Xiao-ming, LIAO Zhen-peng. Series solution for scattering of plane SH waves by a canyon of circular-arc cross section[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1993,13(2):1-11.
- [3] 高修建,江彪、河谷形状对地震波散射的影响[J]. 低温建筑技术,2004,(3):39-40.
 GAO Xiu-jian, JIANG Biao. Influence of canyon shape on plane SH wave scattering[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2004,(3):39-40.
- [4] 周国良. 河谷地形对多支撑大跨桥梁地震反应影响[D]. 2010. ZHOU Guo-liang. Canyon topography effects on seismic response of multi-support bridges[D]. 2010.
- [5] 张孝波,景立平,肖文海.大型河谷场地地震动特性研究[J].防 灾减灾工程学报,2010,30(6):644-649.
 ZHANG Xiao-bo, JING Li-ping, XIAO Wen-hai. Research on ground motion characteristics of large-scale valley[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30 (6):644-649.
- [6] 卢育霞,刘琨,石玉成,等.甘肃文县上城台地的地震记录分析
 [J].西北地震学报,2011.33(增):393-397.
 LU Yu-xia, LIU Kun, SHI Yu-cheng, et al. Analysis on seismic records observed on Shangcheng platform in Wenxian, Gansu province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011.33(S1):393-397.
- [7] 白建方,楼梦麟. 复杂场地土层的有限元建模的两个问题研究
 [J]. 岩土工程界,2008,11(9):27-30.
 BAI Jian-fang, LOU Meng-lin. Study on two problems about finite element model of complex site[J]. Geotechnical Engineering World,2008,11(9):27-30.
- [8] 孙崇绍,闵祥仪,周民都.陇南山区局部地形对地震动强度的影响[J].西北地震学报,2011,33(4);331-335. SUN Chong-shao, MIN Xiang-yi, ZHOU Min-du. Influence of local topography on ground motion in mountain region of southern Gansu province [J]. Northwestern Seismological Journal,2011,33(4);331-335.
- [9] 乔震元,刘本玉,张远富.汶川 8.0级地震峰值地震动特性研究
 [J].西北地震学报,2011,33(1):91-95.
 QIAO Zhen-yuan, LIU Ben-yu, ZHANG Yuan-fu. Research on the peak ground motion characteristics of Wenchuan M_S 8.0
 earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal,2011,33 (1):91-95.

- [14] 刘白云,袁道阳,陈继锋,等. 玉树 M_S7.1 地震时空破裂过 程及与地表破裂带的对应关系[J]. 西北地震学报,2012,34 (1),23-29.
 LIU Bai-yun,YUAN Dao-yang,CHEN Ji-fen,et al. The Corresponding Relationship between Temporal-apatial Process and Earthquake Surface Ruptures Zone of Yushu M_S7.1 Earthquake[J]. Northwestern Seisological Journal,2012,34 (1),23-29.
- [15] 郭安宁,郭增建. 从震源模式讨论 2008 年汶川 8 级地震的回顾性预测[J]. 地震地质,2010,32(1):115-126.
 GUO An-ning, GUO Zeng-jian. A Discussion on the Retrospective Prediction of the M₈ 8.0 Wenchuan Earthquake in 2008 by Means of Earthquake Source models[J]. Seismology and Geology,2010,(1):115-126.
- [16] 李延兴,等. 汶川 M₈8.0 地震孕育发生的机制与动力学问题
 [J]. 地球物理学报,2009,52(2):519-531.
 LI Yan-xing, et al. The Mechanism and Dynamics of the Generation and Occurrence for Wenchuan M₈8.0 Earthquake
 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 519-531.

 [17] 郭增建,秦保燕. 地震成因与地震预报[M]. 北京: 地震出版 社,1991.
 GUO Zeng-jian, QIN Bao-yan. The Cause of Earthquakes and

Earthquake Prediction [M]. Beijing: Seismological Press, 1991.

[18] 贾鹏,张希,张晓亮,等. 汶川地震前后川滇及其邻区 GPS水 平运动演化特征[J].西北地震学报,2012,34(3),264-267, 273.

JIA Peng, ZHANG Xi, ZHANG Xiao-liang, et al. Evolution Features of Crustal Horizontal Movement from GPS Observation in Sichuan — Yunnan Region and Its Adjacent Area before and after the Wenchuan Earthquake[J]. Northwestern Seisological Journal, 2012, 34(3), 264 — 267, 273.

[19] 和平,李志雄,陆远忠,等.断层面的有限单元模拟方法综述
[J].,西北地震学报,2011,33(2),186-194.
HE Ping, LI Zhi-xiong, LU Yuan-zhong, et al. Overview of Researches on Fault Simulation by Finite Element Method
[J]. Northwestern Seisological Journal,2011,33(2),186-194.

[10] 田述军,孔纪名,阿发友,等. 汶川地震山地灾害对环境因素的 响应机制[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):92-98.

> TIAN Shu-jun, KONG Ji-ming, A You-fa, et al. Responsive Mechanism between Earthquake-induced Landslides and Environment in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 92-98.

 [11] 陈文凯,何少林,张苏平,等. 汶川地震甘肃省文县地震地质灾 害遥感分析[J]. 西北地震学报,2011,33(4):363-369.
 CHEN Wen-kai, HE Shao-lin, ZHANG Su-ping, et al. Analysis on the Geo-hazards Triggered by Wenchuan Earthquake in Wenxian courtry, Gansu province, Based on Remote Sensing Information [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 363-369.

- [12] Celebi M. Topographic and Geological Amplification Determined form Strong-motion and Aftershock Records of 3 March 1895 Chile Earthquake[J]. Bull. Soc. Am., 1987, 77:1147-1107.
- [13] 景立平,卓旭炀,王祥建.复杂场地对地震波传播的影响[J].
 地震工程与工程振动,2005,25(6):16-23.
 JING Li-ping, ZHUO Xu-yang, WANG Xiang-jian. Effect of Complex Site on Seismic Wave Propagation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2005,25(6):16-23.