

文章编号: 1001-7372(2024)08-0135-12

# Rayleigh 波对跨 V 形河谷拱桥地震反应的影响

罗超<sup>1,2</sup>, 盛川<sup>2</sup>, 宛俊舟<sup>2</sup>, 许春荣<sup>3</sup>, 郭慧乾<sup>3</sup>, 王昊<sup>\*1,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;  
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 为了研究 Rayleigh 波输入对跨越河谷拱桥地震反应的影响, 以某跨越 V 形河谷拱桥为例, 开展了 Rayleigh 波在 V 形河谷地形中传播时引起的河谷两岸的非一致激励对桥梁结构地震响应影响的研究。以 SV 波输入作为参考, 对比了 Rayleigh 波和 SV 波作用下的河谷场地地面运动的分布特征、拱脚处地震动输入、桥梁结构内力分布规律和桥梁结构关键部位地震响应。研究结果表明: 相较于 SV 波, Rayleigh 波入射时河谷场地的地震动峰值加速度 PGA 分布呈现出入射一侧放大和出射一侧减小的特点, 具有显著的非一致性; 在桥梁结构内力反应方面, Rayleigh 波入射时的主拱圈的轴力、弯矩和剪力均显著大于 SV 波入射时的情况, 其中轴力和弯矩的最大放大倍数在 1.8 倍以上, 同时 2 种波入射时桥梁结构的轴力和弯矩在拱圈上的分布规律也有显著区别; 在桥梁结构关键部位的地震反应方面, Rayleigh 波入射时主要激发绕横桥向转动的振型, 而 SV 波输入时主要激发纵桥向的振型; Rayleigh 波输入时高阶振型放大系数最大, 考虑到高阶振型频率对应的反应谱值更大, 会出现结构反应由高阶振型起控制作用的情况。在地震动输入时考虑 Rayleigh 波对桥梁结构地震反应有显著的影响, 在工程设计中应予以重视。

**关键词:** 桥梁工程; Rayleigh 波输入; 改进的域缩减法; V 形河谷; 大跨度拱桥; 非一致激励

**中图分类号:** U441 **文献标志码:** A

## Study on the Effect of Rayleigh Waves on the Seismic Response of a V-valley Arch Bridge

LUO Chao<sup>1,2</sup>, SHENG Chuan<sup>2</sup>, WAN Jun-zhou<sup>2</sup>, XU Chun-rong<sup>3</sup>,  
GUO Hui-qian<sup>3</sup>, WANG Hao<sup>\*1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 3. CCCC Highway Consultants Co. Ltd., Beijing 100010, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the impact of Rayleigh wave input on the seismic response of an arch bridge across a V-shaped river valley. Particularly, this study investigated the nonuniform excitation on both sides of a river valley caused by Rayleigh waves propagating in the river valley topography. Using the SV-wave input as a reference, this study compared the distribution characteristics of ground motion at the river valley site, ground motion input at the foot of the arch, internal force distribution of the bridge structure, and seismic response of

收稿日期: 2023-03-21

基金项目: 中央引导地方科技发展项目(基础研究项目)(216Z5402G); 中国国家铁路集团有限公司科技研发计划项目(P2022G013); 河北省自然科学基金青年科学基金项目(E2019210350); 河北省地震科技星火计划项目(DZ2023120500009)

作者简介: 罗超(1987-), 男, 河南周口人, 讲师, 工学博士, E-mail: luochao@stdu.edu.cn.

\* 通讯作者: 王昊(1989-), 女, 江西南昌人, 副教授, 工学博士, E-mail: wanghao@stdu.edu.cn.

critical parts of the bridge structure under Rayleigh and SV-wave inputs. The results indicate that the PGA distribution at the river valley site exhibited significant amplification on the incident side and a decrease on the outgoing side, which has a notable nonuniform characteristic compared with SV and Rayleigh waves. Moreover, the axial force, bending moment, and shear force of the main arch ring significantly increased under the Rayleigh wave input, with the maximum amplification of the axial force and bending moment being more than 1.8 times. The distribution patterns of the axial force and bending moment on the arch ring also differed significantly between the two incident waves. In terms of the seismic response of critical parts of the bridge structure, the Rayleigh wave input primarily excited the vibration mode of rotation around the cross-bridge direction, whereas the SV wave input mainly excited the vibration mode in the longitudinal direction. Considering that for the Rayleigh wave input, the amplification factor of the higher-order mode was the largest and frequency of the higher-order mode corresponded to a larger response spectrum value, the structural response was controlled by the higher-order mode. This study highlights the significant impact of Rayleigh waves in ground vibration input on the seismic response of bridge structures and emphasizes the importance of considering this factor in engineering design practices.

**Keywords:** bridge engineering; Rayleigh wave input; modified domain reduction method; V-shaped valley; long-span arch bridge; non-uniform excitation

**Received** 21 Mar. 2023

**Funding:** Project of Central Guiding Local Science and Technology Development Funds (Fundamental Research Project) (216Z5402G); Science and Technology Research and Development Plan of China State Railway Group Co., Ltd. (P2022G013); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2019210350); Earthquake Science and Technology Spark Project of Hebei Province (DZ2023120500009)

\* Corresponding author. *E-mail address:* wanghao@stdu.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.08.012>

## 0 引言

中国西部地区地理环境独特,河谷、深沟、盆地等地形常见。大跨钢管混凝土拱桥因具有刚度大、抗风抗震性能好和造价较低等优点,常作为跨河谷桥梁的首要选择<sup>[1]</sup>。河谷场地地形变化剧烈,河谷内各点处地震动在幅值、频谱特性、时间差等方面上存在显著差异<sup>[2]</sup>,在对跨域河谷的拱桥进行地震分析时,应充分考虑河谷地形对拱桥结构地震响的影响。

不规则地形对地震动场特征有显著影响<sup>[3-5]</sup>,特别是河谷地形。周国良等<sup>[6]</sup>开展了河谷地形的地震反应研究,结果表明河谷地形会影响斜坡上地震动峰值加速度;柳国环等<sup>[7-8]</sup>分析了峡谷地形上的地震动场分布特征,结果表明 V 形峡谷显著降低了峡谷斜坡上的地震动峰值加速度。对于同样的峡谷体系,不同类型的地震波对场地地震动分布特征的影响也不同<sup>[9-11]</sup>。当考虑 SV 波入射时, Li 等<sup>[12]</sup>研究了 SV 波作用下 V 形峡谷的地震动分布特征变化规

律,指出峡谷两侧的地震动分布特性一致且竖向地震动会在谷底处接近于 0;孙纬宇等<sup>[13]</sup>研究了 SV 波斜入射对河谷场地地震动场的影响,结果表明地震波入射角度与坡顶附近的加速度峰值呈正相关,且峡谷两岸的加速度峰值不对称。当考虑 Rayleigh 波入射时,肖薄等<sup>[14]</sup>研究了 Rayleigh 波入射对 V 形河谷的地形效应特征,结果表明 V 形河谷地形对 Rayleigh 的传播有一定的阻碍作用,即入射侧的地震动位移峰值要大于出射侧的位移峰值,且阻碍作用与场地凹陷深度成正比;巴振宁等<sup>[15]</sup>在研究 Rayleigh 波斜入射对凹陷地形的地震效应时得到了类似的结论,即波入射侧的地形越陡峭,位移峰值就越大,对 Rayleigh 波的阻碍作用也越明显,且阻碍作用会随着深度的增加而增强。总体来说,SV 波和 Rayleigh 波入射时的河谷地形场地效应不同,主要表现在 Rayleigh 波入射时,峡谷两侧地震动表现出显著的非一致性,而 SV 波垂直入射对称场地时,两侧的地震动变化规律相同。显然,这 2 种波入射

时引起的河谷两岸地震动的显著差异会进一步导致大跨度拱桥地震动输入的差异,进而引发桥梁结构地震反应的不同。

有关河谷地形对桥梁结构地震反应的研究,周国良等<sup>[16]</sup>研究了 SV 波入射时河谷地形对连续刚构桥地震反应的影响,结果表明,相比一致激励,考虑地形效应对刚构桥的地震反应有显著差异,不同杆件的内力反应峰值表现各不相同。Li 等<sup>[17]</sup>研究了峡谷地形效应对跨峡谷桥梁地震反应的影响,结果表明峡谷越深对桥梁结构地震反应的影响越大。叶丹等<sup>[18]</sup>考虑河谷场地效应研究了其对大跨拱桥地震反应的影响,得到了 V 形河谷场地效应会放大大部分主拱圈内力反应的结论。

Miller 等<sup>[19]</sup>研究了 3 种弹性地震波占地震总输入能量的百分比,其中面波占 67.3%,剪切波占 25.8%,压缩波占 6.9%,实测天然地震动往往是由上述多种成分的地震波组合而成的<sup>[20]</sup>。在地震工程的研究中,一般认为地震动在地表面引起的破坏力主要是横波和面波产生的<sup>[21-22]</sup>。目前,关于 Rayleigh 波对桥梁结构地震反应的影响的研究还很有限。Somaini<sup>[23]</sup>研究了水平行波对梁桥地震反应的影响,结果表明 Rayleigh 波在产生平动激励的同时,也会产生转动激励,且这种转动激励会增加桥梁结构的变形以及梁和支座之间的相对运动,特别是梁柱为铰接的桥梁结构。Betti 等<sup>[24]</sup>研究了仅考虑土-结构相互作用中的运动相互作用时,SH 波、SV 波、P 波和 Rayleigh 波斜入射情况下大跨度斜拉桥的地震反应,结果表明,不同类型的地震波对结构反应影响有显著差别,当输入地震波为 Rayleigh 波时,土-结构相互作用效应较输入其他类型地震波时更为显著。谷音等<sup>[25]</sup>对场地条件、软夹层位置、Rayleigh 的频率以及桩长等参数对 Rayleigh 波作用下桥梁结构动力反应以及地震场地反应的影响进行了讨论,得到了软夹层有一定的滤波作用,频率高的 Rayleigh 波会使结构水平和竖向位移得到明显放大,但对桩及墩的弯矩影响较小的结论。从上述研究可以看出, Rayleigh 波对桥梁结构地震反应的影响主要体现在面波波速较低引起的非一致输入效应、面波引起的转动效应以及考虑面波效应时会放大土-结构相互作用效应等方面。

综上所述,现有的研究多针对 SV 波入射下河谷地形效应对跨河谷桥梁的地震影响分析和 Rayleigh 波入射对桥梁结构的影响,但是针对 Rayleigh 波是如何影响桥梁-河谷相互作用体系方面的研究

还有待进一步深入。为此,本文以某大跨度钢管混凝土拱桥为工程背景,对比 Rayleigh 波和 SV 入射时,河谷地形效应对大跨钢管混凝土拱桥的地震反应的异同,并开展 Rayleigh 波对跨河谷拱桥地震反应的影响研究。

## 1 工程概况和计算模型

本文的研究对象是某跨越 V 形河谷的大跨度拱桥,如图 1 所示。桥梁为上承式钢管混凝土拱桥,计算跨径 475 m,矢高 90 m,拱轴线采用悬链线,拱轴系数 1.55,主拱肋采用桁架结构。主拱肋上下弦杆采用变截面钢管混凝土,钢管采用 Q355ND,管内灌注 C70 自密实补偿收缩混凝土,钢管混凝土截面如图 2(a)所示;拱肋腹杆及平联杆采用箱形和工字形截面,如图 2(b)、(c)所示;拱上立柱采用钢箱截面,如图 2(d)所示,主桥桥面系采用 33.6 m 跨钢混组合梁。由于主桥和引桥由交界墩分隔,本文仅建立主桥部分模型,在交界墩处添加集中质量来考虑引桥梁体质量对结构地震响应的影响。建立大跨度拱桥有限元模型,主拱圈、拱上立柱、桥道系均采用梁单元模拟。

拱桥所处场地为  $I_1$  场地,山体中波速随深度变化很小,因此近似的假设岩层的剪切波速为《建筑抗震设计规范》中  $I_1$  场地的最大值,即  $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,河谷场地模型的弹性材料参数如表 1 所示。

考虑河谷地形对拱桥地震反应的影响,还需要建立桥梁-河谷地形的土-结构相互作用模型。土-结构相互作用体系的地震反应分析是属于无限域问题,需要截取有限区域进行计算。根据 Luo 等<sup>[26]</sup>的研究,当局部场地模型的宽度  $D_{by}$  与峡谷宽度  $D_v$  的比值大于 2 时,使用改进的域缩减法(Modified Domain Reduction Method, MDRM)配合黏弹性人工边界可将地震动加速度峰值(Peak Ground Acceleration, PGA)的相对误差限制在 5% 以下。本文桥梁主跨为 504 m,可计算模型最小宽度为 1 008 m,本文取 1 160 m,如图 3 所示,模型的横向方向仅受到桥梁结构的扰动影响,将河谷模型的横向宽度  $D_{bx}$  取值为不小于峡谷宽度  $D_v$ ,本文取 500 m。在划分网格时,根据 Kuhlemeyer 等<sup>[27]</sup>的研究,在使用有限元模拟波的传播问题时,线性单元网格的尺寸不大于需要模拟的波的最小波长的 1/8。为模拟拱脚与山体锚固的情况,拱脚处梁单元和河谷实体单元通过定义约束方程的方法设置刚性区进行连接。综上所述,对桥梁-河谷相互作用体系进行建模,建立的有限元模型如图 4 所示。

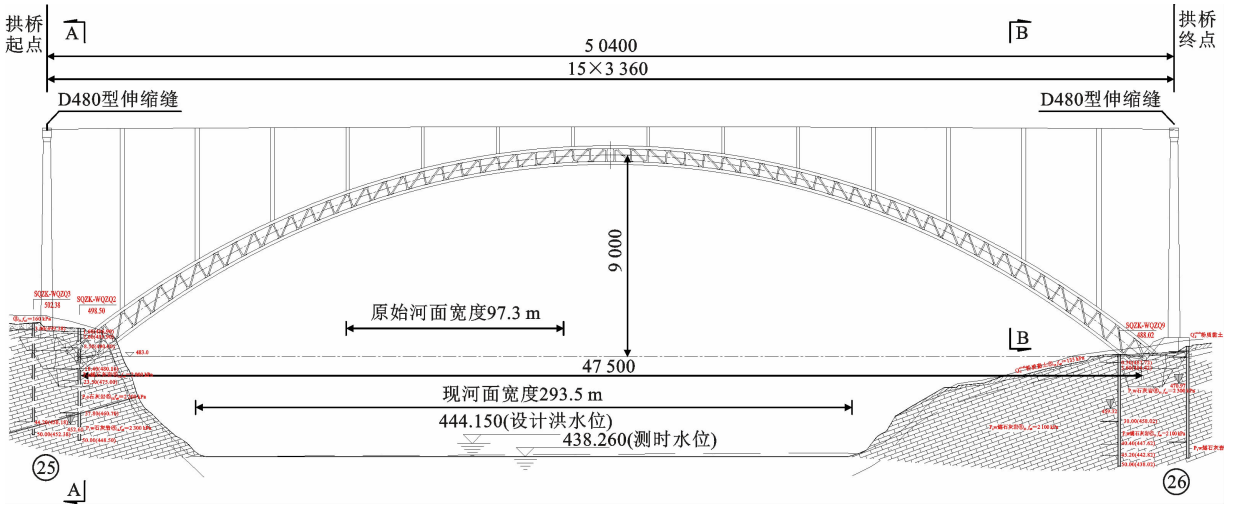


图1 河谷拱桥立面布置(单位:cm)

Fig. 1 Elevation Layout of River Valley Arch Bridge (Unit: cm)

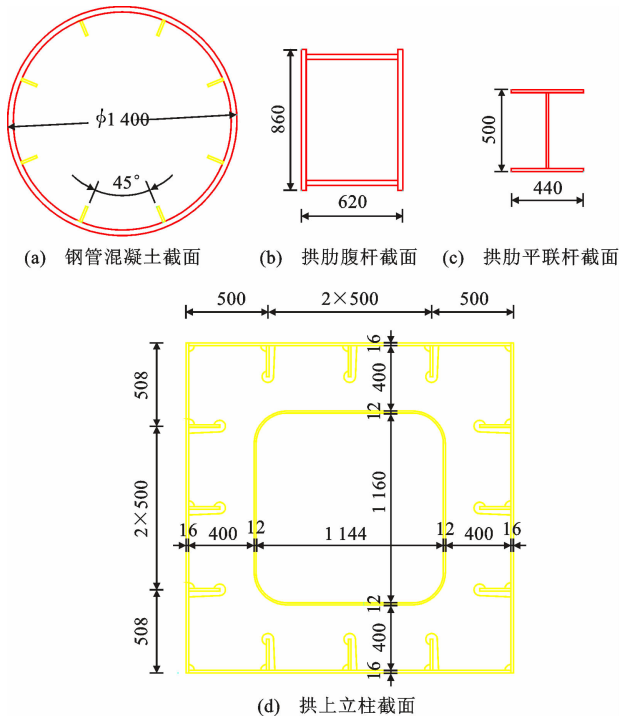


图2 拱桥关键部位截面(单位:mm)

Fig. 2 Cross Section of Key Parts of Arch Bridge (Unit: mm)

表1 河谷场地弹性材料参数

Table 1 Elastic Material Properties of River Valley

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ Pa	泊松比	剪切模量/ Pa	剪切波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	压缩波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
2 000	$3.328 \times 10^9$	0.3	$1.28 \times 10^9$	800	1 496.7

## 2 地震动输入方法

为了对比 Rayleigh 波输入和工程设计中常用的 SV 波垂直入射时桥梁结构地震反应的异同,本

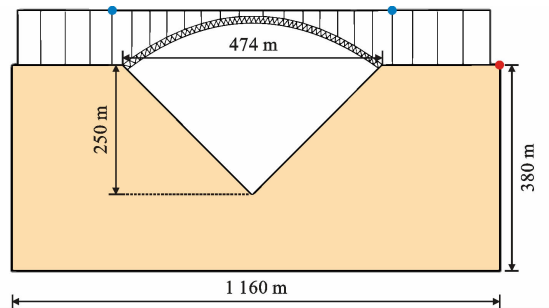


图3 河谷-拱桥相互作用体系计算范围示意

Fig. 3 Schematic Diagram of Calculation Range of River Valley-arch Bridge Interaction System

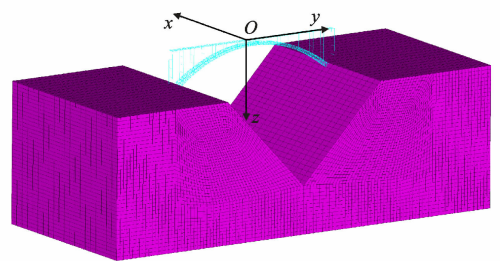


图4 河谷-拱桥相互作用有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model of Bridge-valley Interaction

文假设 2 种波入射时具有相同的自由场地面运动。考虑到 Rayleigh 波传播时在地表的自由场时程具有相位差,选择在模型的入射一侧地表位置处具有相同的地面运动,即图 3 中地表最右侧红色点处。

使用 MDRM<sup>[26]</sup> 对图 4 所示的模型进行加载,如图 5 所示。图 5 中蓝色部分表示计算时所关心的区域,记为  $\Omega$ ,黑色部分表示系统中的其他区域,记为  $\Omega^+$ 。一般来说局部场地距离断层较远,位于  $\Omega^+$  中;红色部分是前 2 个区域的交界面,用  $\Gamma$  表示。

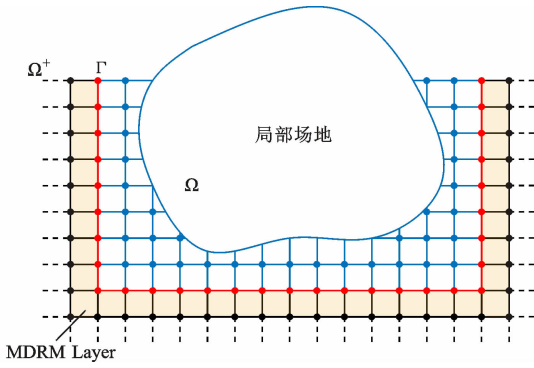


图 5 改进的区域缩减法计算示意

Fig. 5 Schematic Diagram of Modified Domain Reduction Method

改进的域缩减法的等效力荷载  $P_{eff}^{MDRM}$  可表示为

$$P_{eff}^{MDRM} = \begin{cases} 0 \\ -M_{be}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^0 - C_{be}^{\Omega^+} \dot{u}_e^0 - K_{be}^{\Omega^+} u_e^0 \\ M_{eb}^{\Omega^+} \ddot{u}_b^0 + C_{eb}^{\Omega^+} \dot{u}_b^0 + K_{eb}^{\Omega^+} u_b^0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为系统的质量矩阵、阻尼和刚度矩阵; 下标 b 和 e 分别代表区域  $\Gamma$  和  $\Omega^+$  上的节点;  $u^0$  为自由场位移反应。

MDRM 能有效地模拟区域  $\Omega$  内的位移场, 同时在区域  $\Omega^+$  中仅存在残余位移场  $\omega_e$ , 需在模型的外侧边界处放置人工边界吸收来避免其对区域  $\Omega$  内的位移场的干扰。MDRM 在使用时仅需已知模型边界处的自由场时程, 即可将外源激励问题转化为内源激励问题, 实现对有限区域的波动加载。要在有限元软件中实现 MDRM 的加载, 可首先将模型的整体刚度、质量和阻尼矩阵导出, 提取子矩阵, 再使用 Rayleigh 波和 SV 波的解析解计算边界节点的位移、速度和加速度时程, 即可通过式(1)计算等效力荷载对有限元模型进行加载。

### 3 计算工况

根据桥梁的设计资料, 工程场地的地震基本烈度为 6 度。本文使用动力时程分析方法对桥梁进行地震反应分析, 需要根据规范反应谱选取地震波。首先在 Peer 地震动数据库中, 选取在桥梁纵向前 3 阶自振周期与规范反应谱谱值相接近的实测地震波, 规范反应谱和筛选出的地震波反应谱如图 6 所示, 图 6 中黑色点从右至左分别代表桥梁的纵向第 1 阶自振频率、竖向第 1 阶自振频率、纵向第 2 阶自振频率。选取的地震波基本信息如表 2 所示, 3 条地震波的时程如图 7 所示。

根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T2331-

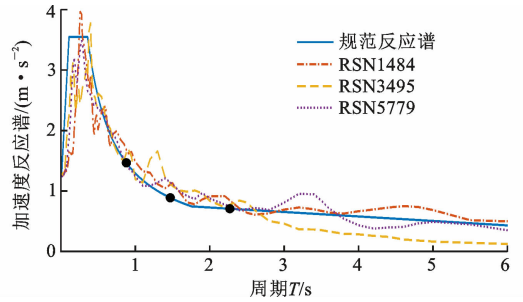


图 6 选取的天然地震波加速度反应谱和规范反应谱  
Fig. 6 Response Spectra of Selected Ground Motion and Code Response Spectra

表 2 地震波信息

Table 2 Seismic Wave Information

地震波名称	震中距/km	震源深度/km	震级	$V_{s30}/(m \cdot s^{-1})$
RSN1484	26.31	26.31	7.62	578.98
RSN3495	36.58	37.92	6.30	535.13
RSN5779	36.33	36.34	6.90	539.87

注:  $V_{s30}$  为地表以下 30 m 范围内土层的平均剪切波速。

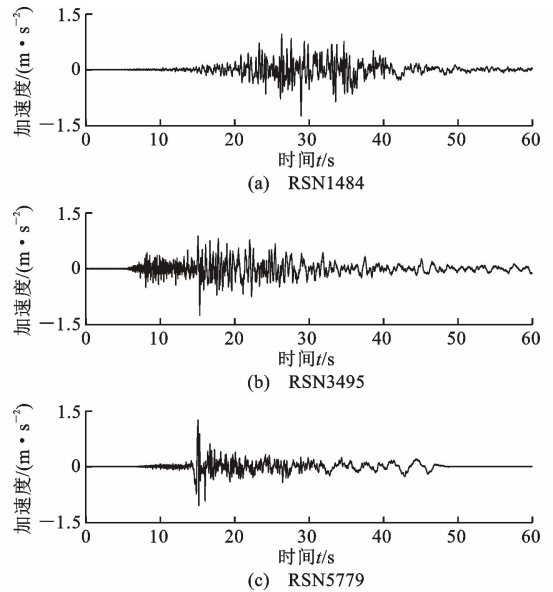


图 7 选取的天然地震动加速度时程

Fig. 7 Time History of Selected Ground Motion Acceleration

01—2020)<sup>[28]</sup>, 本文所研究桥梁属于 A 类桥梁, 需验算 E2 地震作用下桥梁结构在弹性范围内的截面内力状态, 因此在后续计算分析中, 均将所地震波幅值按照罕遇地震对应的地震加速度时程曲线最大值  $1.25 m \cdot s^{-2}$  进行调幅。

本文设计了 4 种计算工况来开展 Rayleigh 波对桥梁结构的地震影响研究, 如表 3 所示。为使 Rayleigh 波和 SV 波输入时的计算结果具有可比性, 假定 2 种波输入时在模型红色圆点处具有相同的地面运动(图 3), 即所选取的 3 条天然地震动。

表3 计算工况

Table 3 Calculation Cases

工况	地震波类型	计算模型
1	SV波	V形河谷模型
2	Rayleigh波	V形河谷模型
3	SV波	河谷-拱桥模型
4	Rayleigh波	河谷-拱桥模型

根据前文介绍,当使用改进的域缩减法时,仅需要已知模型边界节点处的自由场时程反应。对于Rayleigh波输入的工况,可以通过岳庆霞等<sup>[29]</sup>和Zhao等<sup>[30]</sup>提出的近似Rayleigh波的计算方法,通过入射点处的地震动计算出任意点的Rayleigh波自由场时程。值得注意的是,当使用近似Rayleigh波构造Rayleigh波自由场时程时,获得的任意点自由场时程包含水平和竖向2个分量。因此在SV波输入时,地震动的水平和竖向分量的幅值均与Rayleigh波的幅值相同,同时竖向分量以P波垂直入射的形式输入。为了方便描述,将上述SV波输入水平分量、P波输入竖向分量称为SV波输入的工况,后文不再赘述。对于SV波输入的工况,可以通过一维波动反演计算<sup>[31]</sup>出模型底部的入射波时程,再通过正演计算出任意深度处的自由场时程,最后代入式(1)计算等效荷载。

## 4 计算结果

### 4.1 正确性验证

#### 4.1.1 纵向地震反应

为了保证计算结果的正确性,首先设计算例对计算结果进行验证。由于现有的解析解多为半圆形河谷地形的解析解,缺少V形河谷的解析解<sup>[2]</sup>,因此本文选择使用远置人工边界,即使用一个沿纵向的扩展模型的解进行验证。关于远置人工边界在土层地震反应中的应用已有较多的研究,一般认为土层的水平计算宽度应取为不小于土层厚度的5~7倍<sup>[32-33]</sup>,本文保守地将局部场地模型的宽度取值为土层厚度的20倍。图8给出了计算模型和扩展模型地表水平PGA峰值的对比,图8中横坐标为以河谷最低点为原点河谷地形在地平面上的投影,黑色虚线表示V形河谷的位置。从图8可以看出,本文的计算模型与扩展模型的计算结果非常接近,其中拱脚处的PGA相对误差为3.71%,整个场地的最大相对误差仅为4.06%,这表明本文纵向边界的设置位置是合理的。

#### 4.1.2 横向地震反应

由于本文仅在桥梁的纵向和竖向施加地震荷

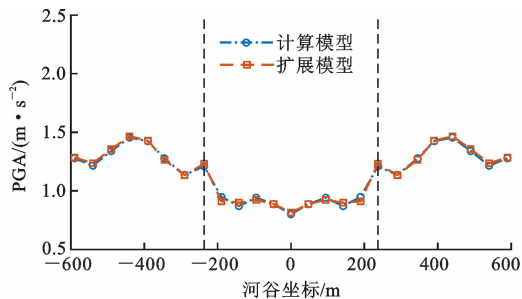


图8 计算模型和扩展模型地表PGA对比

Fig. 8 Comparison of Surface PGA Between Computation Model and Extended Model

载,模型横向地震反应的幅值应远小于纵向和竖向地震反应,且在对称轴处为0。图9绘制了在SV波和Rayleigh波输入时,图4所示的桥梁-河谷相互作用模型左侧河谷坡顶三向PGA峰值沿横向分布的情况。从图9可以看出,2种地震波输入时桥梁的横向地震反应均远小于纵向和竖向地震反应。在靠近桥梁结构的100m范围内,横向地震反应几乎为0,证明了横向边界设置的正确性。

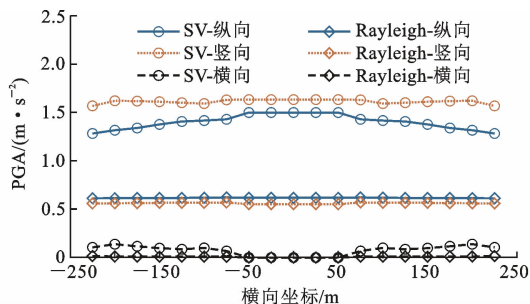


图9 河谷左侧坡顶三向PGA峰值沿横向分布

Fig. 9 Distribution of Peak PGA in Three Directions Along Transverse Direction at Left Top of River Valley

### 4.2 Rayleigh波对V形河谷地面运动的影响

#### 4.2.1 Rayleigh波对地表加速度峰值分布的影响

本节比较工况1、2下Rayleigh波和SV波入射时河谷两岸地震动场的分布特征。图10绘制了Rayleigh波和SV波入射下V形河谷场地PGA的分布,横坐标以河谷最低点为原点,代表河谷地形在地平面上的投影,图中黑色虚线表示V形河谷的位置,纵坐标为不同位置地表处的PGA。由图10可以看出:当SV波入射时,场地的PGA接近对称状分布,受到地形起伏的影响,PGA在斜坡上呈现出先减小,到谷底再增加的趋势;当Rayleigh波入射时V形河谷两侧的PGA分布有显著差异,入射侧的地震动要明显大于出射侧的地震动,并且PGA在入射侧有显著的放大现象,与肖薄等<sup>[14]</sup>和

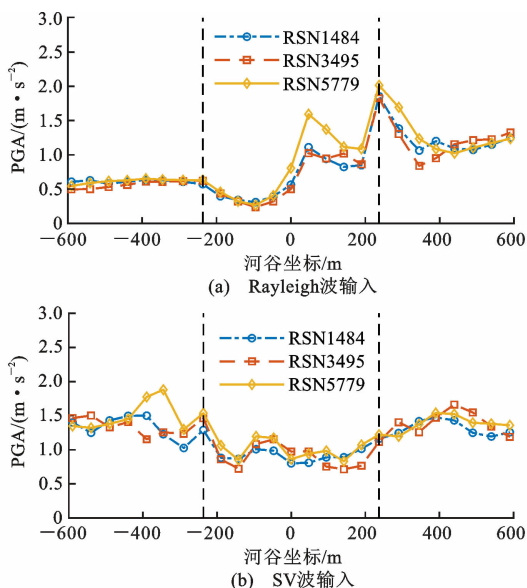


图 10 河谷场地地表加速度峰值分布规律

Fig. 10 Ground PGA Distribution of River Valley Site

巴振宁等<sup>[15]</sup>的研究结论类似。定义 Rayleigh 波入射和 SV 波入射时相同位置的地面运动加速度峰值之比为 Rayleigh 波放大系数,则 3 条波在入射一侧的 Rayleigh 波放大系数分别为 1.48、1.45、1.60,在出射一侧的 Rayleigh 波放大系数分别为 0.44、0.50、0.53,可以看出两岸的地震动在幅值上具有显著差异。综上, Rayleigh 波和 SV 波入射时, V 形河谷场地地震动分布特征有显著区别, Rayleigh 波会使两岸地震动在幅值上出现显著差异。

#### 4.2.2 Rayleigh 波对桥址处地震动的影响

本节着重分析大跨度拱桥拱脚处的地震动在时程曲线和频谱成分上的差异。图 11、12 分别绘制了 Rayleigh 波和 SV 波入射下, V 形河谷两侧坡顶拱脚处的地震动加速度时程和反应谱。图 11、12 中 R-入代表 Rayleigh 波入射时入射一侧的拱脚处的地震动, R-出代表出射一侧地震动, SV 代表 SV 波入射时图 3 中河谷右岸的地震动。

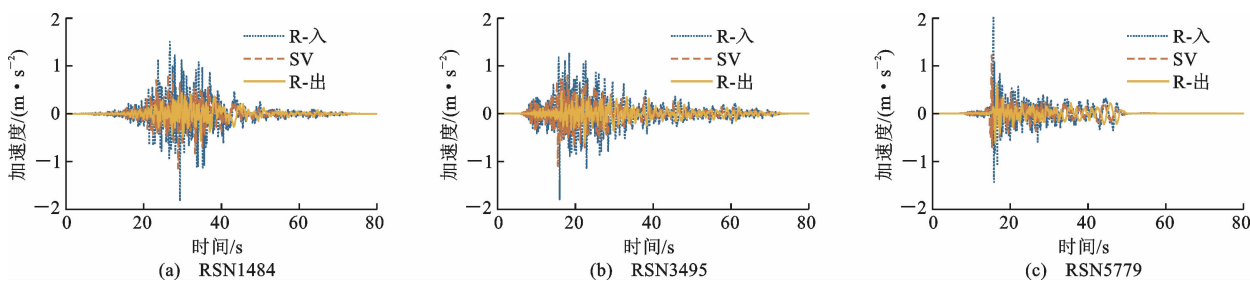


图 11 Rayleigh 波和 SV 波作用下拱脚处加速度反应时程对比

Fig. 11 Comparison of Acceleration Time History at Foot of Arch Under Rayleigh and SV Wave Excitations

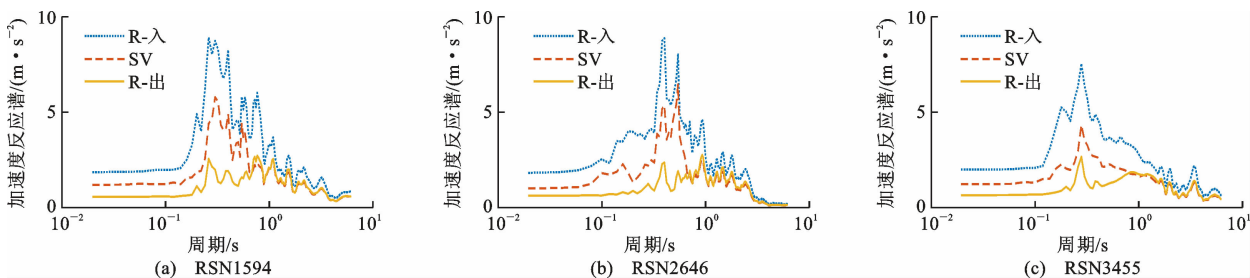


图 12 Rayleigh 波和 SV 波作用下拱脚处加速度反应谱对比

Fig. 12 Comparison of Response Spectra at Foot of Arch Under Rayleigh and SV Wave Excitations

从图 11 可以看出, Rayleigh 波入射侧的地震动幅值最大, SV 波入射下的地震动幅值次之, Rayleigh 波出射侧的地震动幅值最小。从图 12 可以看出, 3 条波在所有频谱范围内都呈现出 Rayleigh 波入射侧幅值最大、SV 波入射幅值次之、Rayleigh 波出射一侧幅值最小的规律。同时, 在 0.7~3 s 范围内, SV 波入射时的幅值与 Rayleigh 波出射一侧的幅值较为接近, 而在其他周期范围内, SV 波入射时

的幅值显著大于 Rayleigh 波出射一侧的幅值。显然 Rayleigh 波入射时河谷对地震动的传播表现出显著的阻碍效应, 引起了地面运动在入射一侧的反射放大和出射一侧阻碍减小。综上所述, Rayleigh 波入射时, 河谷地形的存在导致了大跨度桥梁在两岸承受了在幅值、频谱特性方面都具有显著差异的地震动输入, 将对大跨度拱桥这种对非一致激励敏感的结构的地震反应有显著的影响。

### 4.3 Rayleigh波对桥梁结构地震反应的影响

#### 4.3.1 Rayleigh波对桥梁结构内力反应的影响

本节讨论 Rayleigh波对拱桥地震反应的影响,比较工况 3 和工况 4,并引入量纲一参数  $r_{RS}$  表示 Rayleigh波和 SV波对桥梁结构内力反应的比例关系

$$r_{RS} = \frac{N_R}{N_S} \quad (2)$$

式中: $N_R$ 为 Rayleigh入射时构件的地震反应; $N_S$ 为 SV波入射时构件的地震反应。

表 4 列出了 SV波和 Rayleigh波入射下拱圈内力反应峰值的结果,图 13 绘制了 Rayleigh波和 SV波入射下桥梁主拱圈上下弦杆的内力反应趋势。

从图 13(a)、(b)和表 4 可以看出,相比 SV波, Rayleigh波入射时会放大对拱圈上下弦杆的轴力反应, Rayleigh波入射时拱圈上下弦杆轴力反应峰值相比 SV波入射几乎都放大了 1.5 倍以上,最大放大了 1.81 倍。同时,2种波入射所造成的轴力反应的变化趋势不同。在 SV波入射时拱圈上下弦杆在拱脚处轴力反应最大,主拱圈 1/3 位置次之,拱顶处的轴力反应最小;在 Rayleigh波入射时拱圈上弦杆

在拱脚和拱顶的轴力反应均较大,拱圈下弦杆在拱脚、拱圈 1/4 位置和拱顶的轴力反应均较大。

从图 13(c)、(d)和表 4 可以看出,相比 SV波, Rayleigh波入射时会放大拱圈上下弦杆的弯矩反应,弯矩反应峰值几乎都放大了 1.5 倍以上,最大达到了 1.62 倍。对于拱圈上弦杆, Rayleigh波和 SV波入射时弯矩反应变化趋势相近,拱脚和拱顶处的弯矩反应均较大。而对于拱圈下弦杆, Rayleigh波和 SV波入射时弯矩反应变化趋势不同; Rayleigh波作用下主拱脚和拱顶位置处的弯矩反应较大,而 SV波作用下拱脚、主拱圈 1/4 处和拱顶处弯矩反应较大。

从图 13(e)、(f)和表 4 可以看出,与轴力反应和弯矩反应相比, Rayleigh波对拱圈上下弦杆的剪力反应影响较小,最大只放大了 1.38 倍。 Rayleigh波和 SV波入射时拱圈上下弦杆的剪力反应变化趋势相同,剪力反应的峰值均出现在拱顶处。

综上,总体来说 Rayleigh波和 SV波入射时,对桥梁的地震反应有显著差异。相比 SV波, Rayleigh波入射时会显著增加拱圈的轴力和弯矩反应,对剪力反应的影响相对较小。

表 4 桥梁拱圈内力反应峰值

Table 4 Peak Value Internal Force Response of Arch Ring

内力反应峰值		RSN1484			RSN3495			RSN5779		
		SV波	Rayleigh波	$r_{RS}$	SV波	Rayleigh波	$r_{RS}$	SV波	Rayleigh波	$r_{RS}$
上弦杆	轴力/kN	11 967	21 660	<b>1.81</b>	11 561	16 308	<b>1.41</b>	11 542	17 563	<b>1.52</b>
	弯矩/(kN·m)	874	1 398	<b>1.60</b>	957	1 265	<b>1.32</b>	763	1 161	<b>1.52</b>
	剪力/kN	362	426	<b>1.18</b>	448	476	<b>1.06</b>	325	449	<b>1.38</b>
下弦杆	轴力/kN	12 198	21 279	<b>1.74</b>	12 142	17 166	<b>1.41</b>	12 236	17 170	<b>1.40</b>
	弯矩/(kN·m)	814	1 315	<b>1.62</b>	755	1 210	<b>1.60</b>	714	1 065	<b>1.49</b>
	剪力/kN	204	244	<b>1.20</b>	322	329	<b>1.02</b>	188	249	<b>1.32</b>

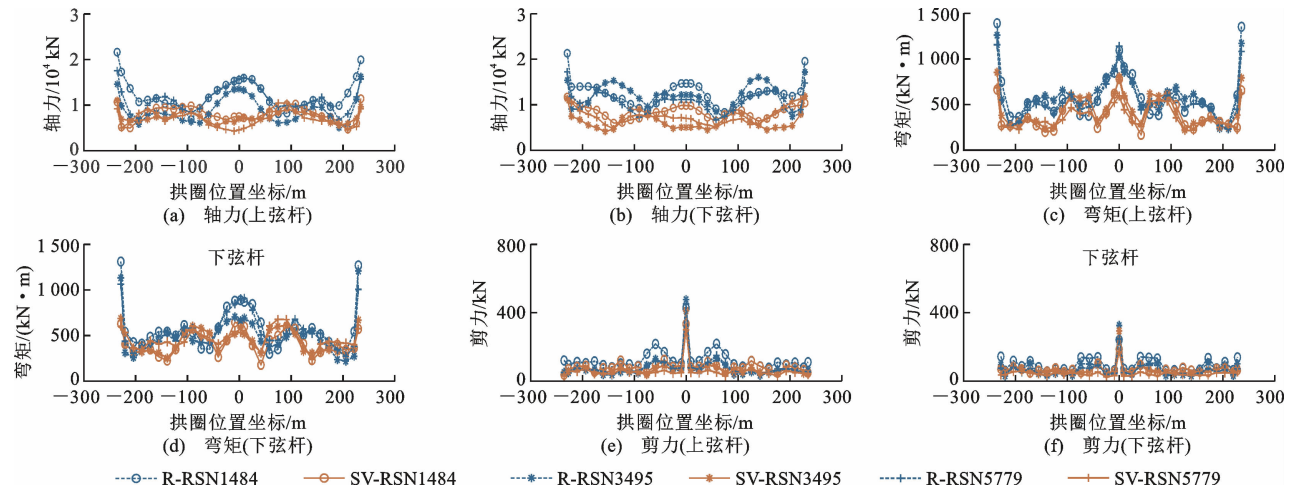


图 13 拱圈上/下弦杆内力反应

Fig. 13 Comparison of Internal Force Response of Upper/Lower Chord Bar of Arch Ring

4.3.2 Rayleigh 波对桥梁关键部位地震反应的影响

为进一步分析 Rayleigh 波对桥梁结构的地震反应,选取 RSN1484 输入时拱脚处的轴力和弯矩反应时程进行分析。图 14 绘制了拱脚上弦杆的轴力和弯矩时程。由图 14 可以看出, Rayleigh 波入射时,拱脚处的轴力和弯矩反应会显著大于 SV 波入射时的情况。图 15 绘制了拱脚处的轴力和弯矩 Fourier 谱图。由图 15 可以看出, Rayleigh 波入射时,拱脚轴力和弯矩的 Fourier 谱均在 0.675 Hz 处幅值最大,而 SV 波入射时,这些内力反应的 Fourier 谱峰值出现在 0.4 Hz 处。

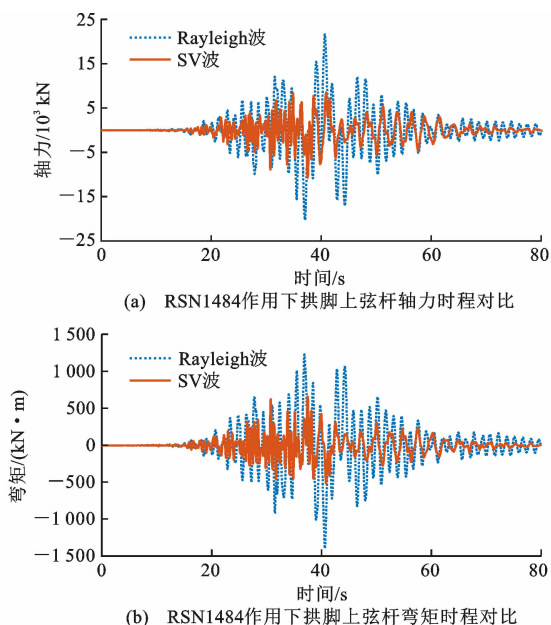


图 14 Rayleigh 波和 SV 波作用下拱脚内力时程反应对比  
Fig. 14 Comparison of Time Response of Internal Force of Arch Foot Under Rayleigh and SV Wave Excitations

为了解释上述现象,将上述频率与桥梁模态分析结果进行对比,表 5 列出了拱桥结构前 20 阶模态的频率和各方向的归一化振型参与系数。桥梁结构在桥梁纵向的第 1 阶频率为 0.44 Hz,在绕桥梁横向方向的第 1 阶频率为 0.68 Hz。由于考虑土-结构相互作用时,结构自振频率相对刚性地基假定时会偏低,因此可以判断,SV 波入射时,起控制作用的是桥梁纵向的第 1 阶频率,而在 Rayleigh 波入射时,起控制作用的是绕桥梁横桥向转动方向的第 1 阶频率。

表 5 桥梁结构模态频率和归一化振型参与系数

Table 5 Modal Frequencies and Normalized Vibration Participation Coefficients of Bridge Structure

模态	频率/ Hz	X (横桥向)	Y (顺桥向)	Z (竖向)	ROTX (绕 x 轴 转动)	ROTY (绕 y 轴 转动)	ROTZ (绕 z 轴 转动)
1	0.22	1.00	0.00	0.00	0.00	0.65	1.00
2	0.44	0.00	1.00	0.00	0.52	0.00	0.00
3	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43
4	0.66	0.49	0.00	0.00	0.00	0.57	0.48
5	0.68	0.00	0.00	0.13	0.13	0.00	0.00
6	0.83	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
7	0.95	0.33	0.00	0.00	0.00	1.00	0.33
8	1.01	0.00	0.29	0.01	0.01	0.00	0.00
9	1.03	0.00	0.20	0.01	0.03	0.00	0.00
10	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34
11	1.13	0.00	0.63	0.00	0.34	0.00	0.00
12	1.20	0.22	0.00	0.00	0.00	0.45	0.22
13	1.36	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
14	1.37	0.21	0.00	0.00	0.00	0.48	0.21
15	1.38	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
16	1.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
17	1.61	0.09	0.00	0.00	0.00	0.32	0.09
18	1.66	0.00	0.17	0.84	0.83	0.00	0.00
19	1.70	0.00	0.38	0.45	0.44	0.00	0.00
20	1.75	0.00	0.15	0.20	0.22	0.00	0.00

为了验证上述判断,图 16 绘制了 SV 波和 Rayleigh 波输入时拱脚轴力相对于输入地震动的频响函数,图 16 中虚线代表低于基频的部分,实线代表高于基频的部分。由图 16 可以看出,在高于基频部分, Rayleigh 波和 SV 波输入时均出现了 5 个显著的峰值,分别为 0.40、0.68、1.11、1.36、1.65 Hz,分别对应了结构的第 2、5、11、13、18 阶自振频率。但是 2 种输入方式在这 5 个频率的幅值有明显的差异:①当 SV 波输入时,如前文所述,为了与 Rayleigh 波保持一致,输入的地震动方向为桥梁纵向和竖向,因此在桥梁的纵向前 2 阶(0.44、1.13 Hz)以及竖向前 2 阶(1.36、1.66 Hz)附近有较大的幅值,

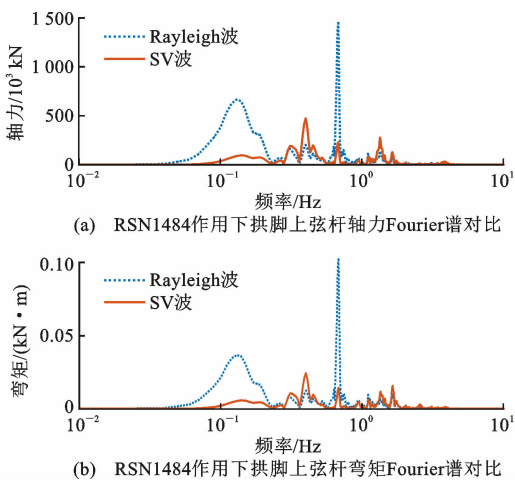


图 15 Rayleigh 波和 SV 波作用下拱脚内力 Fourier 谱对比  
Fig. 15 Comparison of Fourier Spectra of Internal Forces in Arch Foot Under Rayleigh and SV Wave Excitations

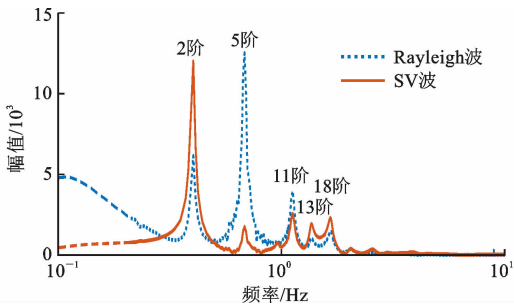


图 16 RSN1484 波作用下拱脚轴力频响函数  
Fig. 16 Transfer Function of Axial Force of Arch Foot Under Action of RSN1484

而 0.68 Hz 对应的振型在竖向的振型参与系数较低,虽然是较低阶的振型,但是幅值较小。综合来看,当输入 SV 波时,第 1 阶纵向振型对结构地震反应起主要控制作用。②当 Rayleigh 波输入时,桥梁在转动方向的前 5 阶振型频率均有显著放大,其中在转动方向的第 2 阶幅值最大,其次为第 1、3 阶。桥梁结构第 2 阶和第 5 阶的振型分别如图 17、18 所示。

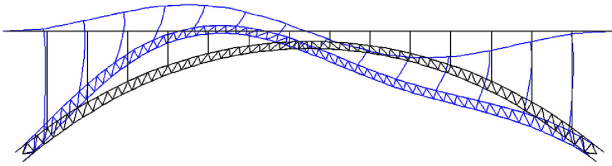


图 17 结构第 2 阶振型  
Fig. 17 Structure 2nd Order Vibration Mode

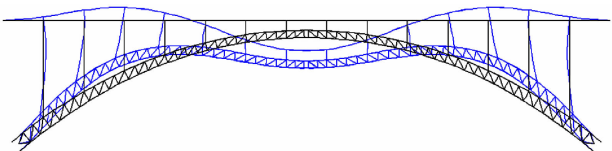


图 18 结构第 5 阶振型  
Fig. 18 Structure 5th Order Vibration Mode

根据上述讨论可以看出,在 Rayleigh 波输入时比 SV 波输入时更容易和更多的激发结构的高阶振型,例如输入 Rayleigh 波时拱脚处绕横桥向转动的高阶振型(第 5 阶)的幅值大于低阶振型(第 2 阶)。考虑到高阶振型频率对应的反应谱值也更大,进而会引发 Rayleigh 波输入时地震反应大于 SV 波输入时的地震反应的现象。由于本文研究的桥梁跨度较大,前 3 阶频率对应的周期均大于反应谱的平台段,对于跨径更短和刚度更大的桥梁,会出现高阶振型频率对应的反应谱值是低阶振型频率对应的反应谱值数倍的情况,此时 Rayleigh 波输入较 SV 波输入的计算结果偏大的现象将更加显著。

对比图 16 中低于基频的部分,可以看出输入 Rayleigh 波时频响函数的幅值显著大于输入 SV 波时的幅值的情况,这是由于 Rayleigh 波输入时由于两拱脚处的地震反应存在行波效应,行波效应带来的非一致激励会引起拟静力反应,因此在低频范围内存在较大的放大现象。

## 5 结语

本文以一跨越河谷的大跨度拱桥为研究对象,对比了 SV 波和 Rayleigh 波输入时桥梁结构地震反应的异同,并对 2 种波输入方式计算结果产生的差异进行了分析和讨论,主要结论如下:

(1)SV 波入射和 Rayleigh 波入射的主要差别体现在 2 种波输入时主要激发的振型阶数不同。SV 波入射时主要激发桥梁纵向和竖向的振型,而 Rayleigh 波入射时主要激发绕横桥向转动的振型。在 Rayleigh 波输入时,会出现频响函数幅值峰值出现在高阶振型频率的现象,由于高阶振型频率较低阶振型频率对应的反应谱值更大,桥梁结构的动力反应由高阶振型起控制作用,内力反应也较 SV 波输入时更大。

(2)由于 2 种波入射时激发的主要振型不同,拱桥结构主拱圈的峰值内力分布特征有显著差异。具体体现在 SV 波入射时,主拱圈轴力极值主要分布在拱脚和主拱圈 1/3 位置处;而 Rayleigh 波入射时,主拱圈轴力极值主要分布在拱脚、主拱圈 1/4 和拱顶位置处。

(3)Rayleigh 入射时河谷两岸地震动的非一致性较 SV 波入射时更为显著,使得桥梁产生了更大的拟静力反应。

综上所述, Rayleigh 波输入既使得桥址地震动具有显著的非一致性,又会激发桥梁转动方向的高阶振型,产生放大结构动力反应的效果,在工程设计中应予以重视。然而,天然地震动的成分复杂,受篇幅限制,本文未能考虑多种地震波成分耦合输入的情况,也没有考虑河谷介质非线性和河谷内水体对桥梁结构地震响应的影响,需要在后续研究中继续深入探讨。

## 参考文献:

### References:

- [1] 黄镇东,李彦武,刘鹏,等.中国公路峡谷大桥研究[J].中国公路,2017(1):58-65.  
HUANG Zhen-dong, LI Yan-wu, LIU Peng, et al. Study on

- China highway canyon bridge [J]. *China Highway*, 2017 (1): 58-65.
- [2] 高玉峰,代登辉,张 宁. 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*, 2021, 41(4): 734-752.  
GAO Yu-feng, DAI Deng-hui, ZHANG Ning. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41 (4): 734-752.
- [3] 肖钦心. 不规则地形条件下高墩大跨桥梁的地震反应分析[D]. 重庆:重庆大学, 2016.  
XIAO Qin-xin. Seismic analysis of long span continuous rigid frame bridge with high piers under irregular topographic condition [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [4] LI Y M, WANG G X, WANG Y T. Parametric investigation on the effect of sloping topography on horizontal and vertical ground motions [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 159: 107346.
- [5] POURSAITIP B, FATHI A, KALLIVOKAS L F. Seismic wave amplification by topographic features: A parametric study [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 92: 503-527.
- [6] 周国良,李小军,侯春林,等. SV 波入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 1161-1166.  
ZHOU Guo-liang, LI Xiao-jun, HOU Chun-lin, et al. Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (4): 1161-1166.
- [7] 柳国环,冯 啸,江大来. 跨越 V 形峡谷桥梁多层介质效应的多点激励破坏模式[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(8): 101-113.  
LIU Guo-huan, FENG Xiao, JIANG Da-lai. Failure mode of bridges under multi-support excitation in a V-shaped canyon with multi-layer topography [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32 (8): 101-113.
- [8] 柳国环,冯 啸. 跨越 V 形峡谷的桥梁抗震分析: 多水平成层非均匀介质 V 形场地多点地震动模拟[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(12): 150-158.  
LIU Guo-huan, FENG Xiao. Analysis of seismic response for bridges located on a V-shaped canyon: Simulation of multi-support seismic motions in a V-shaped canyon with inhomogeneous multi-layer topography [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30 (12): 150-158.
- [9] LUZÓN F, SÁNCHEZ-SESMA F J, RODRÍGUEZ-ZÁÑIGA J L, et al. Diffraction of P, S and Rayleigh waves by three-dimensional topographies [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 129 (3): 571-578.
- [10] WONG H. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, 72 (4): 1167-1183.
- [11] 丁海平,朱重洋,于彦彦. P, SV 波斜入射下凹陷地形地震动分布特征[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(12): 88-92, 98.  
DING Hai-ping, ZHU Chong-yang, YU Yan-yan. Characteristic of ground motions of a canyon topography under inclined P and SV waves [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36 (12): 88-92, 98.
- [12] LI Z L, WU W, LI J C, et al. Dynamic tensile failure of a V-shaped canyon induced by vertically travelling SV waves [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 162: 107458.
- [13] 孙伟宇,汪精河,严松宏,等. 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*, 2019, 38(20): 237-243, 265.  
SUN Wei-yu, WANG Jing-he, YAN Song-hong, et al. Characteristic analysis of ground motions of a canyon topography under obliquely incident SV waves [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38 (20): 237-243, 265.
- [14] 肖 薄,刘争平,黄 云,等. 瑞利面波地形效应的数值模拟研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(3): 1221-1228.  
XIAO Bo, LIU Zheng-ping, HUANG Yun, et al. Study to the topographical effect of Rayleigh surface waves by numerical simulation [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34 (3): 1221-1228.
- [15] 巴振宇,梁建文. 层状场地中凹陷地形 Rayleigh 波斜入射下三维地震响应分析[J]. *振动工程学报*, 2015, 28(5): 809-821.  
BA Zhen-ning, LIANG Jian-wen. 3-D seismic responses for oblique incident Rayleigh waves of a canyon cut in a layered half-space [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2015, 28 (5): 809-821.
- [16] 周国良,李小军,李铁萍,等. SV 波入射下峡谷地形对多支撑大跨桥梁地震反应影响分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1572-1578.  
ZHOU Guo-liang, LI Xiao-jun, LI Tie-ping, et al. Canyon topography effects on seismic responses of multi-support bridge under incident SV seismic waves [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (5): 1572-1578.
- [17] LI S, ZHANG F, WANG M D, et al. Seismic response sensitivity of a V-shaped canyon-crossing bridge considering the near-source canyon topographic effects [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 155: 107205.
- [18] 叶 丹,周建庭,王 领,等. 考虑河谷场地效应的大跨 CFST 拱桥地震响应分析[J]. *世界地震工程*, 2022, 38(3): 108-116.  
YE Dan, ZHOU Jian-ting, WANG Ling, et al. Seismic response analysis of long span CFST arch bridge under valley site effect [J]. *World Earthquake Engineering*, 2022, 38 (3): 108-116.
- [19] MILLER G F, PURSEY H, EDWARD C B. On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1955, 233 (1192): 55-69.
- [20] BOLT B A, TSAI Y B, YEH K, et al. Earthquake strong motions recorded by a large near-source array of digital seismographs [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1982, 10 (4): 561-573.
- [21] 李 杰,李国强. *地震工程学导论*[M]. 北京:地震出版社, 1992.

- LI Jie, LI Guo-qiang. Introduction to earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 1992.
- [22] WONG H. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72 (4): 1167-1183.
- [23] SOMAINI D R. Seismic behaviour of girder bridges for horizontally propagating waves [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1987, 15 (6): 777-793.
- [24] BETTI R, ABDEL-GHAFFAR A M, NIAZY A S. Kinematic soil-structure interaction for long-span cable-supported bridges [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22 (5): 415-430.
- [25] 谷音, 于志敏. Rayleigh波作用下桩-土-桥梁结构动力相互作用问题研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 98-102, 134.  
GU Yin, YU Zhi-min. A pile-soil-bridge structure with dynamic interaction under Rayleigh wave excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30 (12): 98-102, 134.
- [26] LUO C, LOU M L, GUI G Q, et al. A modified domain reduction method for numerical simulation of wave propagation in localized regions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 18 (1): 35-52.
- [27] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99 (5): 421-427.
- [28] JTG/T 2231-01—2020, 公路桥梁抗震设计规范[S].  
JTG/T 2231-01—2020, Brief introduction to specifications for seismic design of highway bridges [S].
- [29] 岳庆霞, 李杰. 近似 Rayleigh 地震波作用下地下综合管廊响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(4): 409-416.  
YUE Qing-xia, LI Jie. Response analysis of utility tunnel in earthquake of approximate Rayleigh waves [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28 (4): 409-416.
- [30] ZHAO W S, CHEN W Z, YANG D S, et al. Analytical solution for seismic response of tunnels with composite linings in elastic ground subjected to Rayleigh waves [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 153: 107113.
- [31] 王沿朝, 陈清军. 地震波反演与地下结构的动力响应分析[J]. 工程力学, 2016, 33(增1): 227-233.  
WANG Yan-chao, CHEN Qing-jun. Seismic waves inversion and dynamic response analysis of underground structures [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (S1): 227-233.
- [32] 楼梦麟, 潘旦光, 范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(7): 757-761.  
LOU Meng-lin, PAN Dan-guang, FAN Li-chu. Effect of vertical artificial boundary on seismic response of soil layer [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31 (7): 757-761.
- [33] 乔冠东, 楼梦麟. 大型沉井基础地震反应分析中侧向边界的影响[J]. 工程力学, 2012, 29(增1): 111-114.  
QIAO Guan-dong, LOU Meng-lin. Effect of vertical artificial boundary on seismic responses analysis of large-scale open caisson [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (S1): 111-114.