郭昆霖,李小军,王宁,等.山区河谷地形对高墩大跨桥梁地震反应的影响[J].地震工程学报,2026,48(6):1321-1336.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240527001

Guo Kunlin,Li Xiaojun,Wang Ning,et al.Influence of mountain valley topography on the seismic response of high-pier, long-span bridges[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(6):1321-1336.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240527001

山区河谷地形对高墩大跨桥梁地震反应的影响

郭昆霖[1,2], 李小军[3], 王 宁[1], 温增平[1], 王彦宾[2]

(1.中国地震局地球物理研究所,北京 100081;
2.北京大学 地球与空间科学学院,北京 100871;
3.北京工业大学 建筑与土木工程学院,北京 100124)

摘要:地震波在不规则地形场地传播,会导致场地表面地震动的幅值和频谱成分改变,从而使场地表面不同位置的地震动出现时空上的差异。地震波的斜向入射会加剧这种差异,导致场地上的桥梁结构地震反应变得更为复杂。通过构建场地及桥梁模型,以桥梁结构支撑处为观测点,计算分析不同入射角度下河谷地形场地表面地震动的变化规律。进一步以场地表面桥墩处的地震动作为输入,对多点非一致地震动输入下桥梁结构反应进行模拟,探讨山区河谷地形对高墩大跨桥梁地震反应的影响。计算分析表明:(1)地震波的入射角度显著改变地形效应对桥梁结构地震反应的影响程度;(2)地形效应引起的场地地震动的非一致性导致桥梁结构内力反应变得极为复杂,相比于一致激励,桥梁结构内力明显增加。建议跨河谷高墩大跨桥梁结构抗震设计时充分考虑地形效应对桥梁结构反应的影响,并对地震波入射方向及其不确定性的影响给予足够重视。

关键词:地形效应;高墩大跨桥梁;地震波入射角;地震反应

中图分类号:P315.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1321-16

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240527001

Influence of mountain valley topography on the seismic response of high-pier, long-span bridges

Guo Kunlin[1,2], Li Xiaojun[3], Wang Ning[1], Wen Zengping[1], Wang Yanbin[2]

(*1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China;*
2. School of Earth Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Seismic wave propagation across irregular topographic features can alter the amplitude and frequency content of ground motions, resulting in spatiotemporal variations of ground motions at different locations on site surfaces. The oblique incidence of seismic waves can further amplify these variations, making the seismic response of bridge structures on such terrains more complex. By con-

收稿日期:2024-05-27

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2023YFC3007400);国家自然科学基金(52192675);北京市自然科学基金资助(8242021)

第一作者简介:郭昆霖(1990-),男,博士,讲师,主要从事大跨度桥梁地震反应研究。E-mail:505745020@qq.com。

通信作者:李小军(1965-),男,博士,教授,主要从事生命线工程地震可靠性研究。E-mail:beerli@vip.sina.com。

structing models of sites and bridges as well as considering bridge supports as observation points, this study analyzes the variations in surface ground motion at a valley site under different incident angles. Furthermore, using the ground motions at the pier locations on site surfaces as input, simulations are performed to explore the effects of multisupport nonuniform seismic excitation on the response of high-pier, long-span bridges in mountainous valley terrains. The computational analysis demonstrates the following. (1) The incident angle of seismic waves considerably affects the extent of terrain effects on the seismic response of bridge structures. (2) The non-uniformity of ground motions induced by terrain effects renders the internal force response of bridge structures highly complex. Compared with the uniform excitation scenario, the internal forces of bridge structures increase markedly. It is suggested that the seismic design of high-pier, long-span bridges across valley terrains should thoroughly consider the impact of terrain effects on the bridge response and pay adequate attention to the incident directions of seismic waves and their uncertainties.

Keywords: terrain effect; high-pier, long-span bridge; incident angle of seismic wave; seismic response

0 引言

地震波在传播过程中,经过山区河谷地形场地会发生较为复杂的反射、叠加等地形效应,导致地震动的幅值和频谱成分改变,并引起场地表面不同位置地震动在时空上的显著差异。地震发生时,跨山区河谷地形的大跨桥梁结构各支撑处的地震动可能出现明显差异,从而引起桥梁结构在地震作用下的内力、位移等分布不均。这种差异是造成大跨桥梁结构地震损伤破坏的主要因素。随着西部大开发战略和“一带一路”倡议的提出,中西部地区交通事业快速发展,新建桥梁数量和密度大幅度增加。我国中西部多为山地、高原地区,多支撑的高墩、大跨桥梁以其卓越的跨越能力得到快速发展,发挥着越来越重要的作用。我国是一个地震多发国家,西部地区地震活动频繁[1],场地地震动地形效应对跨山区河谷地形高墩大跨桥梁结构地震反应的影响是一个不可忽视的安全问题。

早在 1971 年美国旧金山 6.6 级地震中,研究人员通过对记录到的 200 余条地震动数据进行分析,发现 Pacoima 河谷的谷肩处地震动加速度出现异常放大现象,峰值高达 1.25g,是谷底处地震动的 2 倍[2]。Boore[3]对其进行了详细的建模分析,发现地形效应对地震动的频率成分较为敏感,即低频成分受影响较弱,高频成分受影响较强。此后的诸多震害实例及地震动记录表明,河谷地形场地相对凸起位置通常会出现地震动的明显放大,而谷底等相对凹陷或平坦位置则常表现为一定程度的地震动减小[4-9]。唐晖等[10]、杨宇等[11]基于自贡地形台阵测得的数据对地形效应进行研究,认为地形对高频地震动放大效果显著,地震动的峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)随高度增加而增大。李英民等[12]、梁轩等[13]采用数值模拟方法,以梯形山体场地为研究对象,建立二维场地模型,探讨了地形坡度、输入地震动频谱特性及地震动入射角度等因素对场地表面地震动的影响。前人研究成果表明,地形局部突出位置(如河谷地形的肩部)对地震动有明显放大作用,相对凹陷位置对地震动有明显减小作用;河谷地形中不同位置地震动的幅值和相位特性均有所不同[2-15]。

地震动输入是河谷场地重大工程抗震分析、灾变机理和抗震设计理论研究的基础,其合理性和可靠性直接决定抗震计算的准确性。地形效应及地震行波效应导致的结构基础处输入地震动的差异,是影响跨河谷地形高墩大跨桥梁地震反应的主要因素[16-17]。在不考虑工程结构振动对工程场地地震动的影响时,自由河谷场地表面的地震动可作为工程结构的输入地震动[18-20]。针对该类型结构,需进行多点非一致地震激励的动力反应分析。周国良等[21-24]对多点激励问题进行了系统研究,对大质量法进行了误差分析和改进,并以一座多支撑大跨桥梁为研究对象,分析了河谷地形对多支撑大跨桥梁地震反应的影响。李忠献等[25]对某四跨连续刚构桥输入一组考虑行波效应的地震动时程,发现桥梁主梁的动力反应在行波效应的影响下增大。潘强等[26]分析了行波效应引起的多点非一致激励对连续刚构桥高低墩高差的影响,研究表明墩高差越大,结构受行波效应的影响越大。李吉涛等[27]对多点激励下大跨

度连续刚构桥的易损性进行分析，并给出了该类结构在地震作用下的破坏概率。郭昆霖等[17]考虑河谷地形的非对称性，分析了多点非一致激励中行波效应对高墩大跨桥梁地震反应的影响，发现地震行波效应对非对称结构地震反应的影响程度更大。

以往考虑河谷地形影响的高墩大跨桥梁地震多点激励研究大多只考虑行波效应，即仅考虑不同位置处地震动的相位差[16-17,25-26,28]，或者未考虑不对称地形对结构的影响[21,29-30]。在实际工程中，河谷的非对称地形会使地震波的传播变得复杂，而不只是行波效应引起的地震动时间差异。本文构建了考虑对称和非对称性的河谷地形场地-桥梁结构模型，首先分析河谷地形场地对地震波传播的影响（即地震动地形效应），进而探讨对称和非对称河谷场地地形效应对桥梁结构地震反应的影响。

1　河谷地形桥梁场地-桥梁结构地震反应分析模型

1.1　场地-桥梁结构计算模型

为研究河谷地形对跨河谷桥梁地震反应的影响，建立对称与非对称两种二维河谷黏弹性场地模型，并据此设置相应的对称与非对称高墩大跨桥梁结构模型，如图 1 所示。桥梁采用高墩大跨变截面连续箱梁结构。

在场地地形效应分析中，于场地表面设置 6 个观测点，分别对应桥梁桥墩基础（包括两岸）位置，如图 1 所示。模型 a 中各观测点坐标为（0，0）、（80，−65）、（210，−137）、（390，−137）、（520，−65）、（600，0）；模型 b 仅将观测点 4 的纵坐标改为 −95，其余观测点坐标与模型 a 一致；两场地模型其他参数均相同。场地为半无限基岩，介质的剪切波速值为 1 000 m/s，密度为 2 000 kg/m^3。在计算分析时，假设 SH 波以与垂直方向夹角分别为 0°、30°、60°、−30°和 −60°的入射角射向场地自由表面。通过不同入射角下的计算，获取两种地形场地模型表面各观测点的地震动加速度时程。通过对比两种场地的计算结果，分析地震波入射角度和场地地形条件对地表地震动的影响特征。

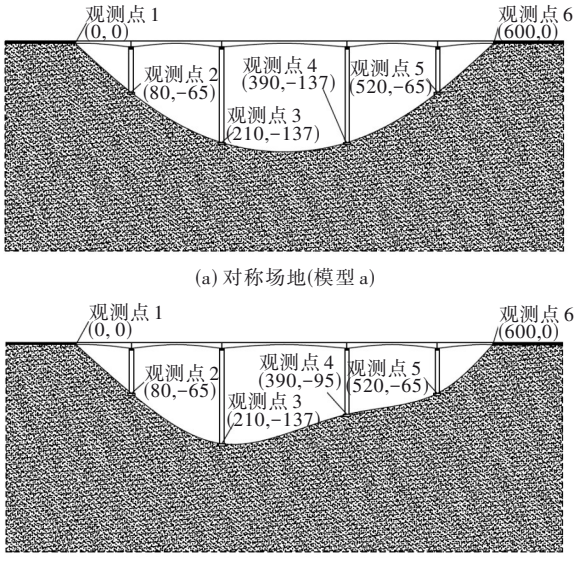


图 1　场地及桥梁模型示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the site and bridge models

忽略桥梁与基岩场地之间的相互作用，将各观测点获得的地震动时程作为桥墩基础处的地震动输入，对桥梁结构进行多点非一致激励计算分析，从而探讨河谷地形对高墩大跨桥梁结构地震反应的影响特征。

1.2　计算输入地震波

为考虑地震波频谱特性的影响，选用 El-Centro 波和 Wolong 波作为输入地震波。二者分别由美国 Imperial Valley 6.7 级地震中 El-Centro 台站、中国汶川 8.0 级地震中卧龙台站记录的 Wolong 强震动加速度时程构成，并取原记录幅值的一半作为场地模型人工边界处的入射波。选取这两条地震动记录的原因在于其时域强度变化和频谱特性具有显著差异。El-Centro 波和 Wolong 波的加速度时程及其对应的加速度反应谱如图 2 所示。

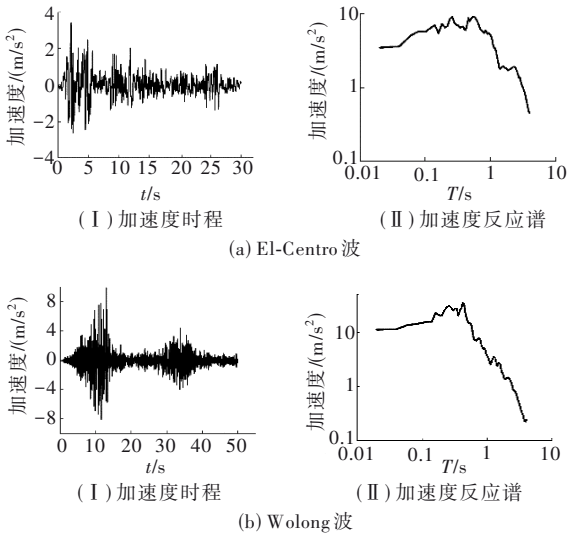


图 2　输入地震动加速度时程及反应谱曲线

Fig. 2　Acceleration time histories and response spectra of input ground motions

2 河谷场地地形对地震动影响分析

2.1 分析方法

场地模型如图3所示,即图1中不含桥梁结构的二维场地地形模型。采用显式有限元-有限差分法[31]对该模型进行空间离散,并结合透射人工边界进行计算分析。

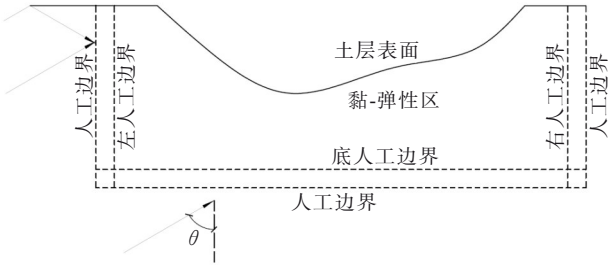


图3 二维场地计算模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two-dimensional site calculation model

2.2 场地地形对地震动影响特征分析

2.2.1 场地模型a

模型a在El-Centro波和Wolong波入射下,地表各观测点的地震反应加速度时程如图4所示。表1列出了各观测点计算得到的地震动峰值加速度(PGA)相对于弹性半空间情形(即入射波幅值的两倍)的变化率。

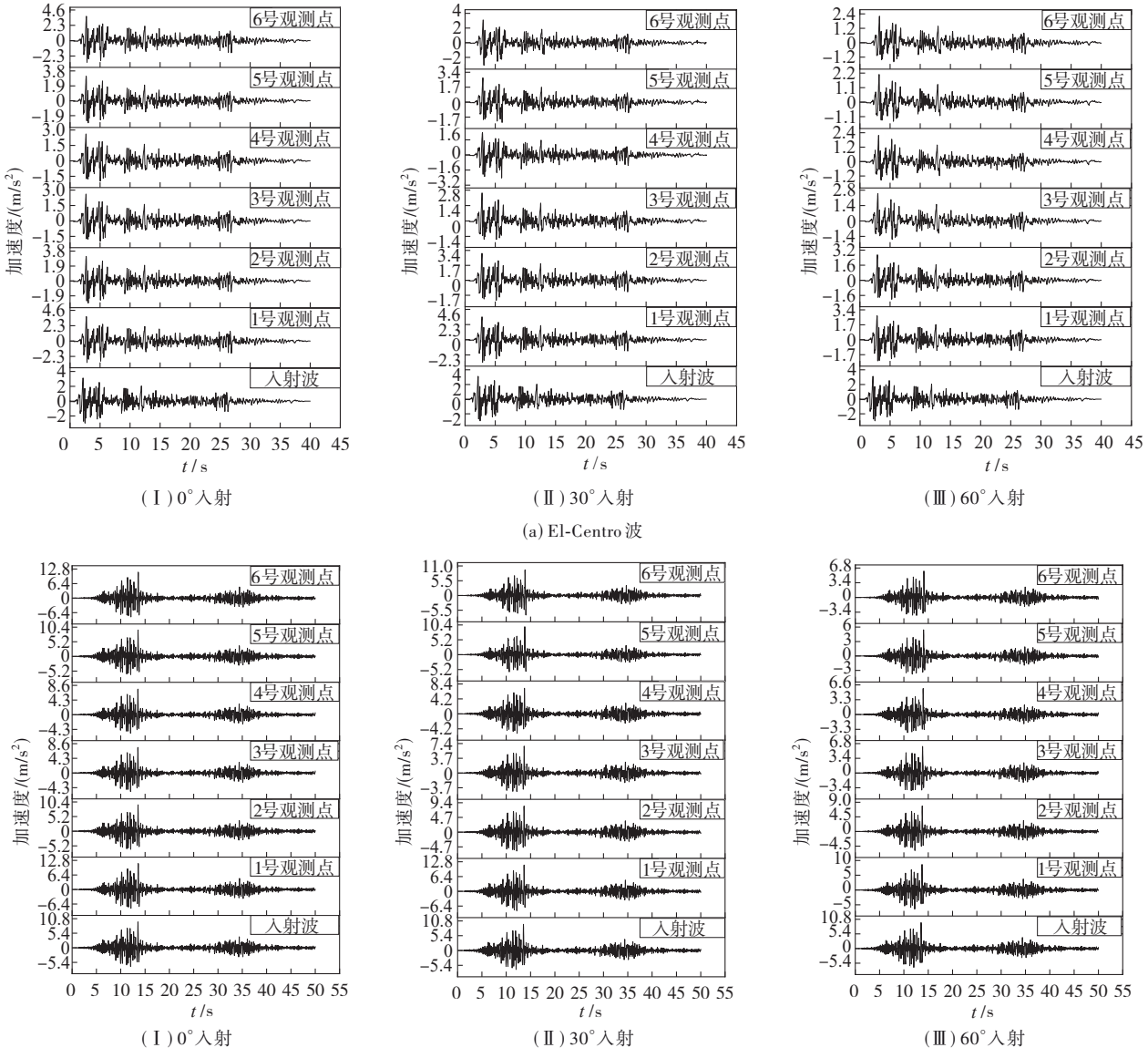


图4 场地模型a在El-Centro波、Wolong波入射下各观测点计算的地震动时程

Fig. 4 Computed ground motion time histories at observation points of site model a under El-Centro and Wolong wave incidence

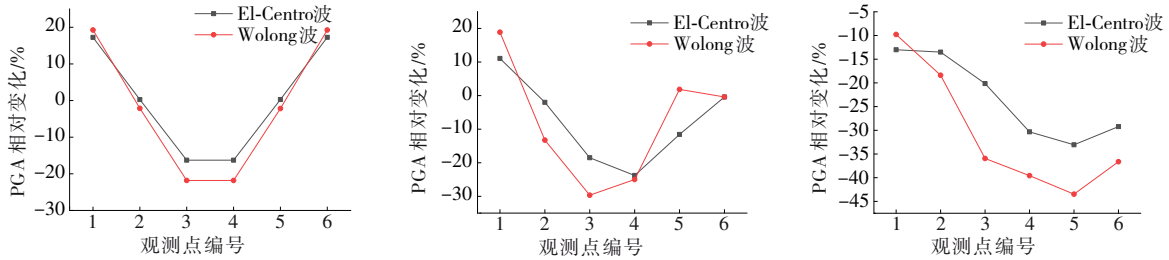
表 1　模型 a 在不同波入射下场地各观测点计算出的 PGA 相对变化（单位：%）

Table 1　Relative changes in PGA at observation points of site model a under different wave incidences (unit: %)

反应量	入射波	入射角	观测点					
			1	2	3	4	5	6
PGA	El-Centro 波	0°	17.2	0.3	−16.3	−16.3	0.3	17.2
		30°	11.1	−2	−18.5	−23.8	−11.6	−0.4
		60°	−13	−13.5	−20.1	−20.3	−33	−29
	Wolong 波	0°	19.3	−2.1	−21.8	−21.8	−2.1	19.3
		30°	18.9	−13.3	−29.7	−25	1.8	−0.4
		60°	−9.8	−18.4	−35.9	−39.6	−43.5	−36.6

计算结果表明，不论入射波为 El-Centro 波还是 Wolong 波，地形效应对地表地震动均具有显著影响。相较于输入地震动（弹性半空间响应），不同位置观测点的 PGA 变化不一致，增大或减小现象并存。

El-Centro 波和 Wolong 波入射下模型 a 的计算结果对比如图 5 所示。两种地震波入射引起的场地总体反应特征相近。模型 a 为左右对称，当地震波垂直（0°角度）入射时，场地表面各观测点反应呈对称分布；而在地震波斜向入射时，各观测点地震动表现出显著不对称性，且入射角越大，不对称现象越明显。与 El-Centro 波相比，地形对 Wolong 波地震动的影响更为显著。



(a) 0°入射　(b) 30°入射　(c) 60°入射

图 5　场地模型 a 在 El-Centro 波、Wolong 波入射下各观测点 PGA 相对变化对比

Fig. 5　Comparison of relative changes in PGA at observation points of site model a under El-Centro and Wolong wave incidence

2.2.2　场地模型 b

在 El-Centro 波和 Wolong 波入射下，场地模型 b 地表各观测点的地震反应加速度时程如图 6 所示。表 2 给出了各地表观测点计算得到的地震动峰值加速度（PGA）相对于弹性半空间情形（即入射波幅值的两倍）的变化率。

从计算结果可以看到，非对称地形场地的地形效应对场地地表地震动的影响较对称场地更为复杂。相比于输入地震动（弹性半空间情况的震动），不同部位观测点 PGA 变化情况不同，PGA 增大或减小并存。

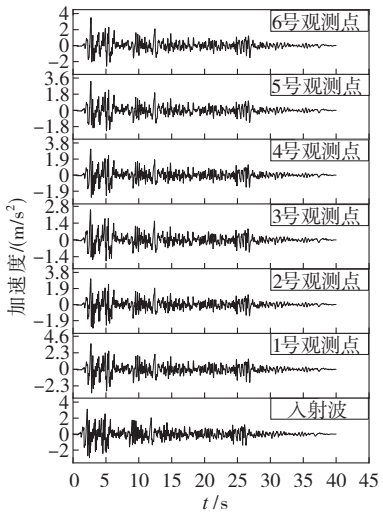
综合对比 El-Centro 波和 Wolong 波入射下模型 b 的计算结果（图 7）可知，两种地震波入射下的场地总体反应特征相近。模型 b 为左右非对称模型，当地震波垂直（0°）入射时，场地地表各观测点的地震动已表现出明显的不对称性；而当地震波斜向入射时，这种不对称性进一步加剧，且随入射角增大而更加显著。与 El-Centro 波相比，Wolong 波在场地模型 b 中受到的地形影响依然更为突出。

对称和非对称河谷地形场地的分析结果表明，场地地形对地震动具有显著且复杂的影响。因此，在跨河谷桥梁工程的抗震设防中，应充分考虑工程场地地形地震动效应对结构反应的影响。

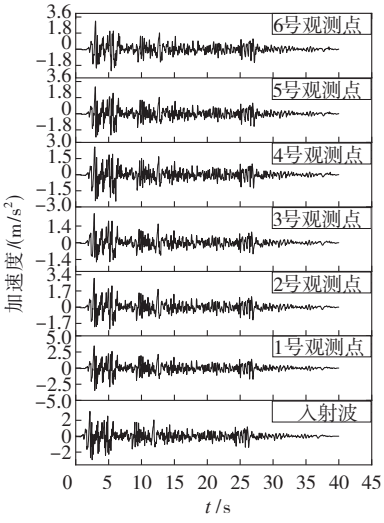
3　桥梁结构反应分析

3.1　桥梁结构及有限元分析模型

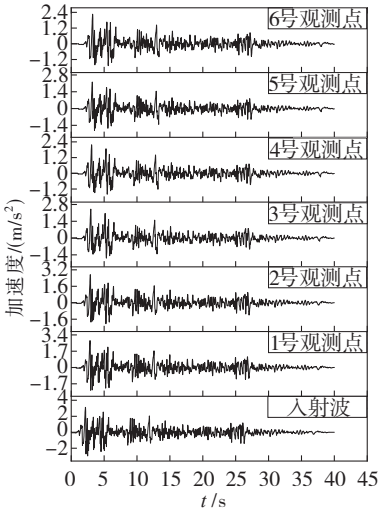
根据高墩大跨桥梁抗震设计要求，本文构建了两组桥梁结构计算模型。模型 a 为跨度组合 80+130+180+130+80（m）的预应力混凝土连续刚构桥，如图 8 所示。主梁采用变截面单室箱梁，桥墩为薄壁空心墩，如图 9 所示；墩高依次为 65、137、137、65 m；墩梁连接为固结形式；主梁与桥墩混凝土强度等级分别为 C50 和 C40，其余构件为 C30。主梁两端施加竖向位移约束、绕顺桥向转动约束；纵桥



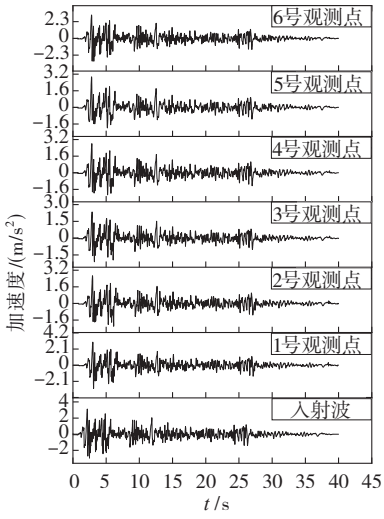
(Ⅰ)0°入射



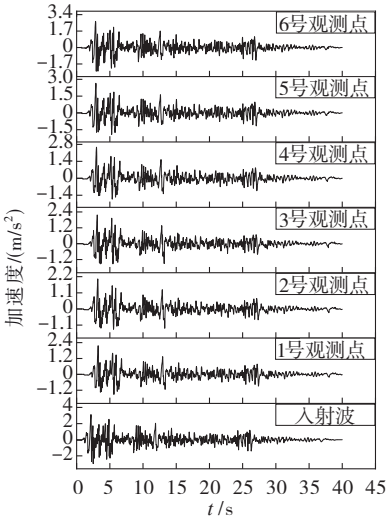
(Ⅱ)30°入射



(Ⅲ)60°入射

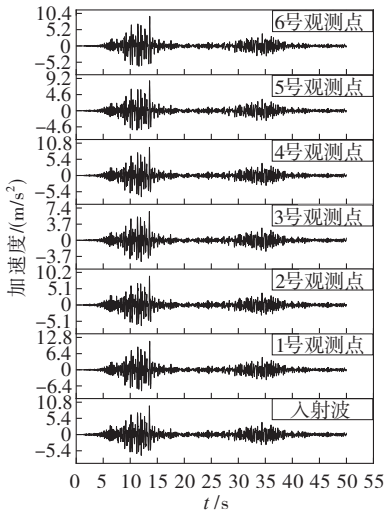


(Ⅳ)-30°入射

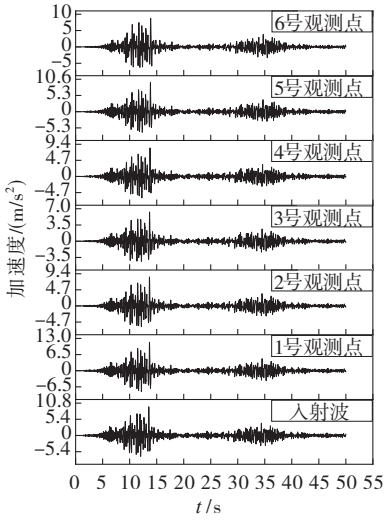


(Ⅴ)-60°入射

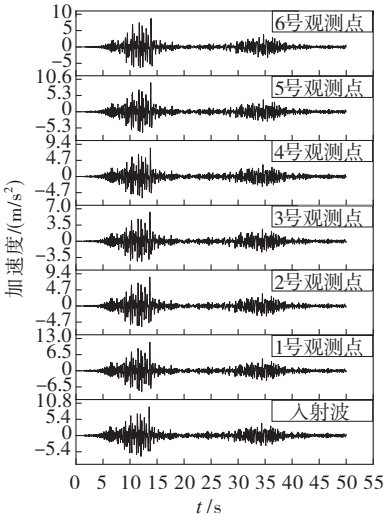
(a) El-Centro波



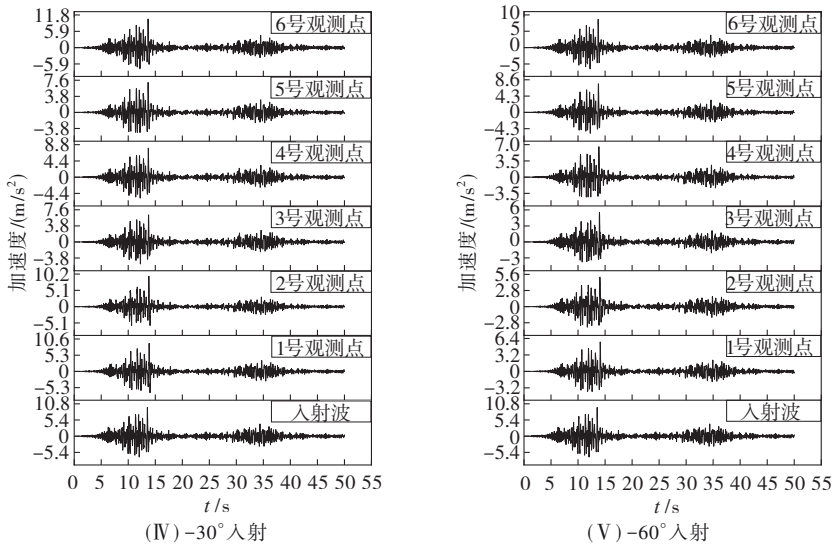
(Ⅰ)0°入射



(Ⅱ)30°入射



(Ⅲ)60°入射



(b) Wolong波

图 6　场地模型 b 在 El-Centro 波、Wolong 波入射下各观测点计算的地震动时程

Fig. 6　Computed ground motion time histories at observation points of site model b under El-Centro and Wolong wave incidence

表 2　场地模型 b 在不同波入射下场地各观测点计算出的 PGA 相对变化（单位：%）

Table 2　Relative changes in PGA at observation points of site model b under different wave incidences (unit: %)

反应量	入射波	入射波	观测点					
			1	2	3	4	5	6
PGA	El-Centro 波	0°	14.4	−2.3	−19.6	−1.5	3.2	11.8
		30°	10.5	−3.2	−25.1	−17.3	−3.6	0.6
		60°	−10.2	−12.5	−22.9	−30.6	−29.4	−27.6
		−30°	−4.1	−14.5	−25.1	−10	−6	2.9
		−60°	−30.8	−34.6	−30.5	−17.9	−15.2	−13.9
	Wolong 波	0°	17.6	−6.1	−31.4	−1.9	−11	−1.5
		30°	19.8	−12.1	−34.2	−13.2	−1.2	−8.5
		60°	−10.6	−18.5	−37.6	−38.9	−32.9	−32.3
		−30°	−4.5	−0.5	−33.4	−18.1	−26.4	7.6
		−60°	−40	−46.5	−42.5	−31.7	−21.5	−9.8

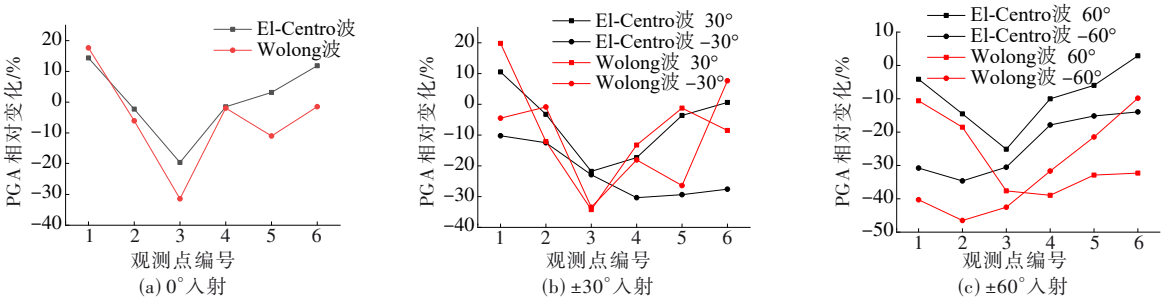


图 7　场地模型 b 在 El-Centro 波、Wolong 波入射下各观测点 PGA 相对变化对比

Fig. 7　Comparison of relative changes in PGA at observation points of site model b under El-Centro and Wolong wave incidence

向设置线性弹簧单元支座，其余自由度释放，具体列于表 3。模型 b 如图 10 所示，其布置与模型 a 基本相同，仅将 3 号墩高度调整为 95 m，其他参数不变。采用有限元程序 CSiBridge 建立桥梁结构模型，选用空间梁单元，全桥共划分为 600 个单元。计算中不考虑材料非线性，结构视为黏弹性体，阻尼采用 Rayleigh 阻尼模型（$\alpha=0.314$，$\beta=0.007\,63$）[17,21]。

3.2　地形效应对桥梁结构反应的影响特征

由于模型 a、b 的桥梁墩高度不同，考虑地形效应的桥梁结构地震反应分析所设置的工况也有所

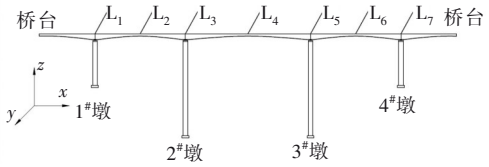


图8 桥梁计算模型a结构示意图

Fig. 8 Structural schematic diagram of bridge calculation model a

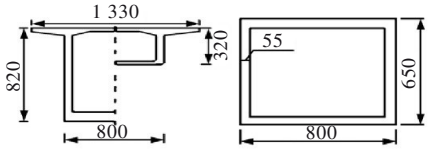


图9 桥梁变截面箱梁和空心薄壁墩截面图(单位：cm)

Fig. 9 Cross-sectional views of the variable cross-section box girder and hollow thin-walled pier (unit: cm)

表3 桥梁计算模型a约束条件

Table 3 Constraint conditions for bridge calculation model a

桥梁结构	桥台及墩梁连接处约束方式					
	x	y/(×10⁹ N/m)	z	绕x	绕y	绕z
桥台	释放	弹簧	约束	约束	释放	释放
1#墩	约束	弹簧	约束	约束	约束	约束
2#墩	约束	弹簧	约束	约束	约束	约束
3#墩	约束	弹簧	约束	约束	约束	约束
4#墩	约束	弹簧	约束	约束	约束	约束
桥台	释放	弹簧	约束	约束	释放	释放

区别。模型a共设置3种工况：工况①为地震波垂直入射(入射角0°)；工况②为斜向入射(入射角30°)；工况③为斜向入射(入射角60°)。因模型a为对称模型，−30°及−60°入射与30°及60°入射的结果呈等

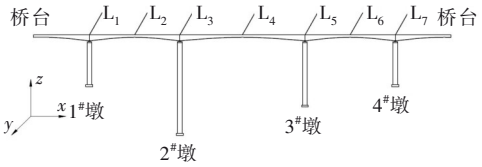


图10 桥梁计算模型b结构示意图

Fig. 10 Structural schematic diagram of bridge calculation model b

大反向关系，故不再单独设置。模型b设置5种工况：工况①～⑤分别对应入射角0°、30°、60°、−30°、−60°。本文重点探讨地形效应对桥梁结构地震反应的影响，各工况计算结果的变化量均相对于一致激励下桥梁结构地震反应进行计算；一致激励结果仅用于对比，不单独列出。

结合跨河谷高墩大跨桥梁的地震破坏特点，选取主梁跨中轴力、剪力、弯矩，主梁关键节点L_1～L_7的轴力、剪力、弯矩，以及各桥墩墩底节点P_1～P_4的剪力、弯矩等反应量进行具体分析。

3.2.1 El-Centro波入射情况

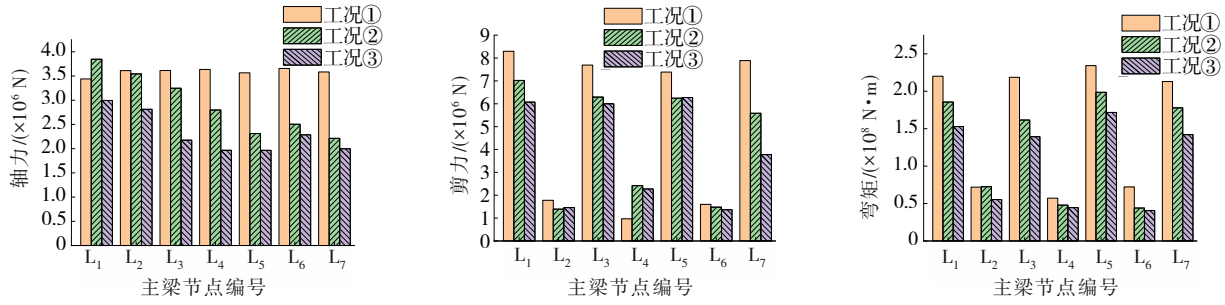
对桥梁模型a的计算结果如表4所列及如图11和图12所示。表4列出了考虑地形效应后结构反应的相对变化量；图11对比了主梁各关键节点的最大轴力、剪力和弯矩；图12对比了各墩底的最大剪力和弯矩。

从计算结果可知，地形效应引起的桥墩基础输入地震动差异，对桥梁结构地震反应具有显著影响。垂直入射时，由于河谷两端PGA显著增大、谷谷底PGA显著减小，导致桥梁结构主梁各节点内力较一致激励计算结果均有所增大，而墩低内力则有所减小。斜向入射时，结构反应变化较为复杂，主

表4 El-Centro波入射情况时桥梁模型a不同工况下结构反应与一致激励地震动输入工况的相对变化(单位：%)

Table 4 Relative changes in structural responses of bridge model a under different cases compared to the uniform seismic excitation case under El-Centro wave incidence (unit: %)

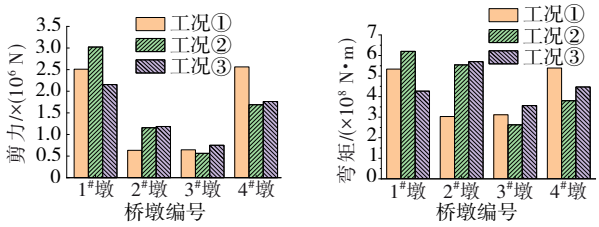
反应量	工况	主梁节点							桥墩节点			
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	P_1	P_2	P_3	P_4
轴力	①	22.1	23.7	7.6	7.7	6.6	15.2	16.6				
	②	29	31.2	−3.2	−17.1	−30.8	−21	−28				
	③	27.3	−11	−35.2	−41.7	−41.2	−28	−35.4				
剪力	①	22.1	20.2	7	8.6	−1	25.3	16.6	−13.7	−12.6	−12.5	−13.6
	②	3.3	−6	−12.5	357	−16.2	15.7	−17.4	3.9	59.6	−23.6	−43.1
	③	−10.6	−1.3	−16.5	340	−15.8	6.9	−44.1	−25.9	63.5	1.8	−40.6
弯矩	①	24.2	10.4	5.3	14.3	9.6	10.5	31.4	−13.7	−12.8	−12.6	−13.9
	②	4.7	0.7	−26.1	−16.3	−15.2	−39	−16.5	0.2	59.5	−26.3	−39.5
	③	−13.7	−15.1	−32.9	−10.9	−19.7	−37.8	−12.3	−31.8	64.1	−0.1	−28.6



(a) 轴力　(b) 剪力　(c) 弯矩

图 11　El-Centro 波入射下桥梁模型 a 主梁各节点最大轴力、剪力、弯矩对比

Fig. 11　Comparison of maximum axial force, shear force, and bending moment at main girder nodes of bridge model a under El-Centro wave incidence



(a) 最大剪力　(b) 最大弯矩

图 12　El-Centro 波入射下桥梁模型 a 各墩底最大剪力、弯矩对比

Fig. 12　Comparison of maximum shear force and bending moment at pier bottom of bridge model a under El-Centro wave incidence

梁节点与墩底节点的反应有增有减小，且随地震波入射角增大（即各桥墩输入地震动的时差增大），反应差异总体呈增大趋势。这是行波效应与地形效应共同作用的结果。

综合来看，桥梁模型 a 为对称桥梁结构，在垂直地震动输入下其反应呈现对称性；地震波斜向入射则使得桥梁结构反应变得极为复杂。对于桥梁主梁反应，影响最大的是中间跨主梁（节点 L_4），其剪力提高了 357%；对于桥梁桥墩反应，影响最大的是中间高墩，其墩底最大剪力提高了 63.5%，墩底最大弯矩提高了 64.1%。

对桥梁模型 b，其结构反应结果如表 5 所列及如图 13 和图 14 所示。计算结果表明，地形效应对非对称桥梁结构地震反应的影响更为复杂。垂直入射时，与一致激励相比，主梁各节点内力均有不同

表 5　El-Centro 波入射下桥梁模型 b 不同工况下结构反应与一致地震动输入工况的相对变化（单位：%）

Table 5　Relative changes in structural responses of bridge model b under different cases compared to the uniform seismic excitation case under El-Centro wave incidence (unit: %)

反应量	工况	主梁节点							桥墩节点			
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	P_1	P_2	P_3	P_4
轴力	①	13.4	8.3	3.3	6.2	11.2	8.2	7.7				
	②	31.1	13.2	−2.9	−17.5	−25.2	−21.4	5.8				
	③	5.3	−7.4	−28.5	−33.1	−37.6	−31	5.6				
	④	−15	−22.9	−27	−26.8	−1.5	7.8	−0.7				
	⑤	−20	−23	−41.2	−41.2	−21.4	−13.4	1.8				
剪力	①	16.8	24.7	−0.5	−22	20	−14	22.3	−12.4	−6.8	−12.8	−12.9
	②	3.5	−8	8.9	326	−11.3	33.3	−11.3	−2.1	68.6	−27.2	−41.7
	③	−11.5	2.1	3.7	251	−12.8	20	−39.4	−28.5	67.8	−5.5	−39
	④	23.8	87.7	25.4	388	13.4	89.2	12.9	−45	−11.7	59.7	6.1
	⑤	−22.2	29.7	15..8	194	−11.7	55	−6.5	−37.1	15.2	67.1	−26.4
弯矩	①	18.5	8.9	19.7	18.9	18.6	26	7	−15.1	−6.6	−13.4	−19.6
	②	3.1	10.4	−11.6	−1.1	−5.2	−30	−11.6	−5.2	71.2	−32	−44.5
	③	−16.9	−16.5	−30	−12.1	−17.6	−34	−30.7	−33.2	70.1	−8.6	−37.3
	④	−2.9	−30.1	9.7	−4.4	−4.5	17	−6.7	−44.7	−10.6	58.4	−11.1
	⑤	−50.5	−60	−21.4	−5.5	−69.3	−15	−32.5	−39.5	17.3	68	−38.8

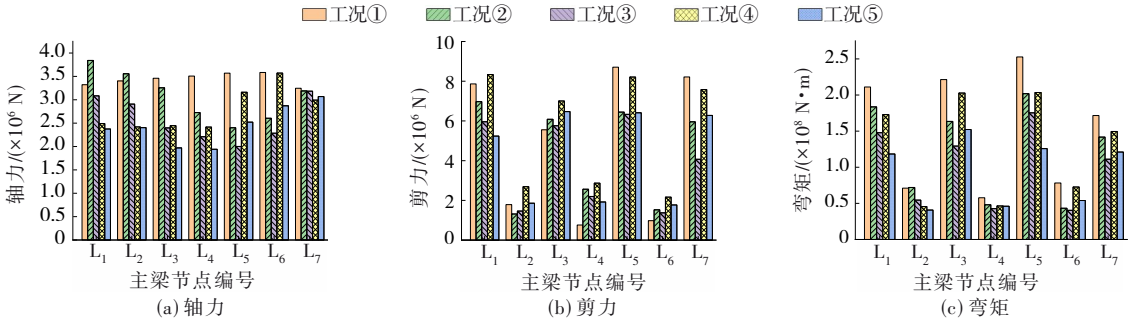


图 13 El-Centro 波入射下模型 b 主梁各节点最大轴力、剪力、弯矩对比

Fig. 13 Comparison of maximum axial force, shear force, and bending moment at main girder nodes of bridge model b under El-Centro wave incidence

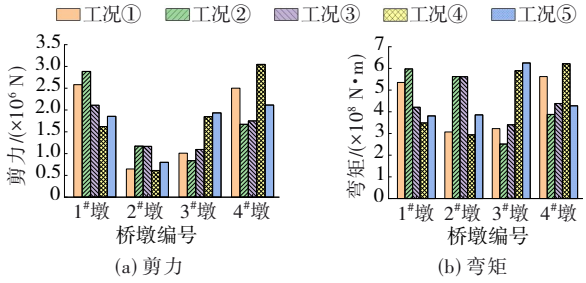


图 14 El-Centro 波入射下模型 b 各墩底最大剪力、弯矩对比

Fig. 14 Comparison of maximum shear force and bending moment at pier bottoms of bridge model b under El-Centro wave incidence

程度的增大，而墩底内力则普遍减小。斜向入射时，结构不同部位、不同反应量的变化非常复杂，主梁节点与墩底节点的反应有增有减，随着地震波入射角度增大(即各桥墩输入地震动的时差增大)，反应差异总体上呈增大趋势，且地震波分别从左侧与右侧入射时，其影响程度存在明显区别。

综合分析可知，桥梁模型 b 为左右不对称的桥梁结构。在地震波斜向入射下，桥梁结构反应表现出显著的不对称性，即某些部位的反应量被放大，而另一些部位则被减小。其中，桥梁主梁反应受影响最大的仍是中跨主梁(节点 L_4 处)，其最大剪力提高了 388%；桥梁桥墩反应受影响最大的是位于地震波入射一侧的较高桥墩，其墩底最大剪力提高了 68.6%，墩底最大弯矩提高了 70.1%。

上述计算分析结果展示了对称桥梁模型 a 和非对称桥梁模型 b 在地形效应及不同地震波入射角度下的地震响应特性。为进一步探讨场地地形对称性对桥梁结构地震反应的影响，本节将对模型 a 和模型 b 的计算结果进行比较分析。两种桥梁模型的主梁最大轴力、剪力和弯矩响应对比见图 15，各桥墩墩底最大剪力和弯矩的对比见图 16。

综合对比两个桥梁模型的计算结果可知，地形效应对跨河谷地区高墩大跨桥梁(无论结构对称与否)的地震反应均具有显著影响。由于各桥墩输入地震动的差异，主梁和桥墩的内力呈现明显的非均匀分布，且分布形态与地震波入射方向密切相关。同时，刚度较大的低墩对输入地震动差异的敏感性相对较低，但其内力响应数值较大；相比之下，刚度较低、柔性较高的高墩对输入差异更为敏感，但整体内力响应相对较小，这主要得益于高墩较强的变形能力。

3.2.2 Wolong 波入射情况

对桥梁模型 a 的计算结果如表 6 所列及如图 17、图 18 所示。可以看出，采用 Wolong 波作为输入时，随着入射角变化的结构反应趋势与 El-Centro 波基本相同。对于桥梁主梁反应，影响最大的是中跨主梁(节点 L_4)，其最大剪力提高了 269%；对于桥梁桥墩反应，影响最大的是两侧低墩，其墩底最大剪力提高了 46.6%，墩底最大弯矩提高了 13.3%。与 El-Centro 波的计算结果对比，Wolong 波引起的相对变化值略小。

对桥梁模型 b 的计算结果如表 7 所列及如图 19 和图 20 所示。从计算结果可以看到，Wolong 波输入下，结构反应趋势与 El-Centro 波基本一致。对于桥梁主梁反应，影响最大的仍然是中跨主梁(节点 L_4 处)，最大剪力提高了 258%；对于桥梁桥墩反应，内力增幅最大的是位于地震波入射另一侧的较低桥墩，其墩底最大剪力提高了 27.7%，墩底最大弯矩提高了 15.9%。

总体而言，Wolong 波与 El-Centro 波输入下，桥梁结构地震内力的变化趋势相似。然而，两条地震动对主梁轴力的作用结果差异明显，这可能与结

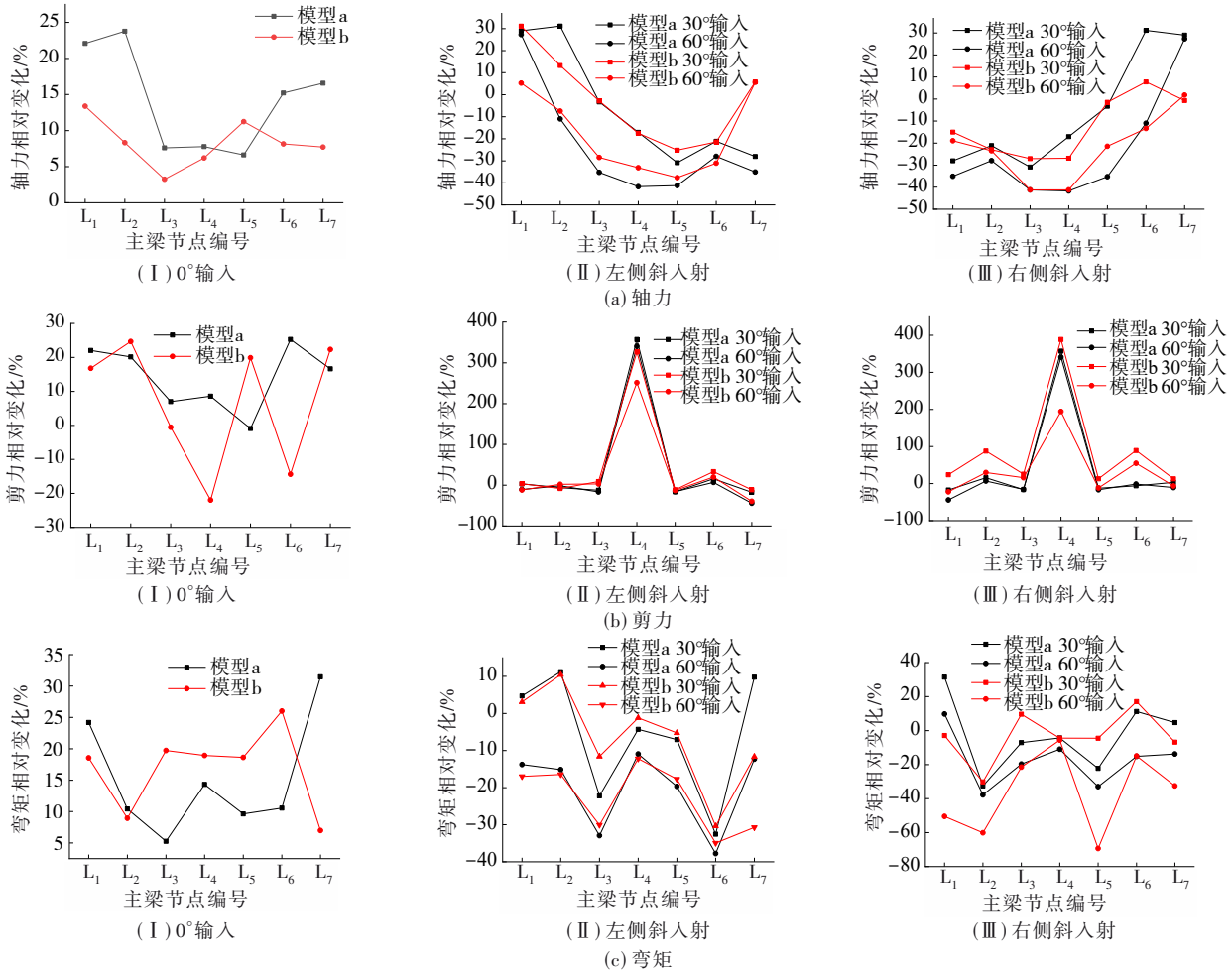


图 15　El-Centro 波入射下桥梁两个模型的主梁反应最大轴力、剪力和弯矩的相对变化对比

Fig. 15　Comparison of relative changes in maximum axial force, shear force, and bending moment of main girder for the two bridge models under El-Centro wave incidence

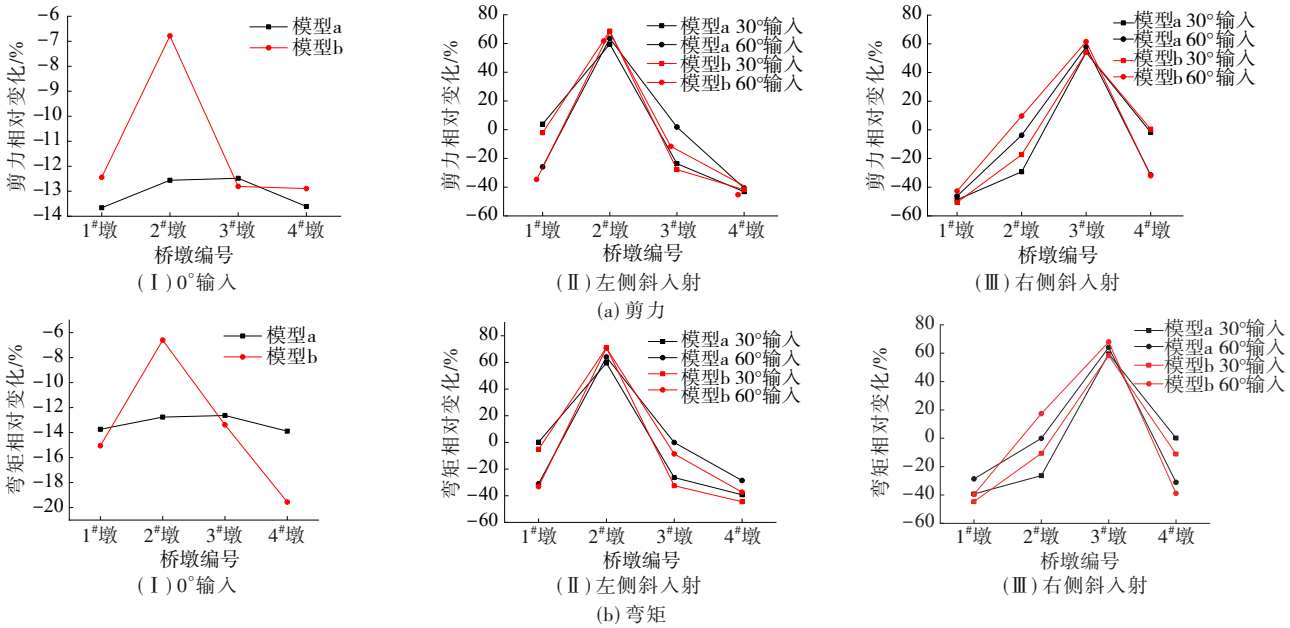


图 16　El-Centro 波入射下桥梁两个模型的桥墩反应墩底最大剪力和弯矩的相对变化对比

Fig. 16　Comparison of relative changes in maximum shear force and bending moment at pier bottom for the two bridge models under El-Centro wave incidence

表 6 Wolong 波入射下桥梁模型 a 不同工况下结构反应与一致地震动输入工况的相对变化(单位:%)

Table 6 Relative changes in structural responses of bridge model a under different cases compared to the uniform seismic excitation case under Wolong wave incidence (unit:%)

反应量	工况	主梁节点							桥墩节点			
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	P_1	P_2	P_3	P_4
轴力	①	−12.7	4.5	−1.9	−1.7	−1.9	−0.6	−10				
	②	−28.6	−44.6	−47	−59.6	−70.7	−63.3	−62.7				
	③	−34	−58.8	−68.7	−64	−62.2	−61.5	−67.3				
剪力	①	27.4	29.7	−17.2	−12.4	−14	12.3	18.6	−5.2	−6.7	−0.3	−5.3
	②	32.3	19.6	−17.8	269	−24.5	11.2	−5.3	−16.3	−16.7	−28.3	15.8
	③	53	37.1	−2.9	113	−26.7	−26	−47.5	−57.2	−18.4	−27.6	38.8
弯矩	①	29.5	15.2	8.2	0.4	7.7	15.4	39.6	−6.1	−6.8	−7.1	−6.3
	②	4.7	8.7	22.4	−57.6	20.3	−8.6	38.9	−16.8	−14.3	−33.4	6.2
	③	−22.4	−45.7	−0.2	−46	−31.4	−52.4	39.7	−30.7	−16.2	−31.8	2.2

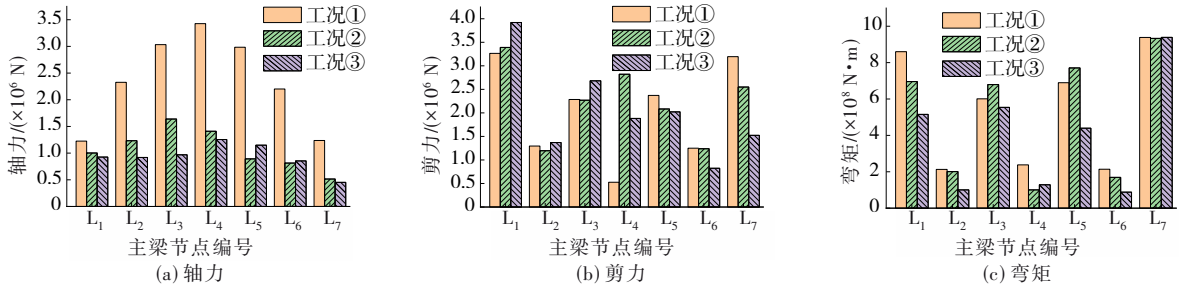


图 17 Wolong 波入射下桥梁模型 a 主梁各节点最大轴力、剪力、弯矩对比

Fig. 17 Comparison of maximum axial force, shear force, and bending moment at main girder nodes of bridge model a under Wolong wave incidence

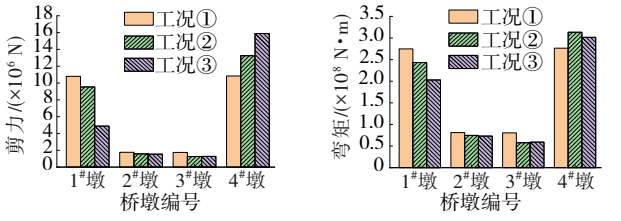


图 18 Wolong 波入射下桥梁模型 a 各墩底最大剪力、弯矩对比

Fig. 18 Comparison of maximum shear force and bending moment at pier bottom of bridge model a under Wolong wave incidence

构自振频率和输入地震动的卓越频率成分相近有关。其确切机理及相关解释仍需进一步研究,在抗震分析中应特别关注输入地震动的频谱特性。

上述计算分析表明,对称桥梁模型 a 和非对称模型 b 在地形效应影响下的地震反应规律存在差异。为更清晰地揭示其影响特征,对模型 a 和模型 b 的计算结果进行对比。两种桥梁模型的主梁最大轴力、剪力和弯矩对比结果如图 21 所示,各桥墩墩底最大剪力与弯矩的对比结果如图 22。

根据图 15、16、21、22 的综合对比分析,两个桥梁模型计算结果显示出以下规律:斜向入射时,模型 a、b 各主要节点的内力反应变化趋势基本一致,且两个结构的地震反应内力均呈不对称分布;而在垂直输入时,两个模型的主梁轴力、墩底剪力及弯矩的变化率差异显著。特别对于模型 b,垂直输入下结构两侧的地震反应已表现出不对称性,导致其内力反应规律趋于复杂、难以预测。这主要是由于地形效应引起各桥墩支撑处输入地震动产生显著差异所致。斜向入射使得模型 a、b 各支撑点输入地震动发生复杂变化,反而使两模型主要节点的内力变化趋势趋于一致,从而削弱了地形不对称性对桥梁地震反应的影响。因此,在地震波垂直入射时,地形的不对称性对桥梁结构地震反应影响较为突出,需予以重点关注。

表 7　Wolong 波入射下桥梁模型 b 不同工况下结构反应与一致地震动输入工况的相对变化（单位：%）

Table 7　Relative changes in structural responses of bridge model b under different cases compared to the uniform seismic excitation case under Wolong wave incidence（unit：%）

反应量	工况	主梁节点							桥墩节点			
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	P_1	P_2	P_3	P_4
轴力	①	−7.4	−6.9	−6.5	−2.5	0.8	3	8.4				
	②	−17.6	−40.2	−42.7	−53.7	−62.5	−62.5	−52.2				
	③	−28.2	−54.5	−58.5	−55.9	−60	−58.8	−56.1				
	④	−50	−68	−63	−61.8	−49.8	−46.8	−50				
	⑤	−53.2	−58.9	−62.9	−64.3	−68.1	−61.4	−48.4				
剪力	①	36.6	29	−13.2	−34.6	48.9	22.6	34.9	−12.5	−3.7	−15.8	4.1
	②	44.6	−27.8	−11.1	368	42.5	38.3	36.1	−18.2	−7	−30.1	6.7
	③	161.8	141.6	103.4	310.2	133	79.4	95.8	−57.2	−15.7	−40.4	33.1
	④	30.3	50.2	−7.5	312	44.2	55	26.7	35.1	−25.9	−20.3	−21.1
	⑤	3.4	−9.5	−13.9	190	16.9	14.5	−30.6	17.8	−23.1	−32.7	−60
弯矩	①	19.4	4.2	0.9	7.3	23	26.1	36.6	−14.8	−1.2	−16.5	4.9
	②	4.2	4.4	17.9	−50	35.1	−15.7	25.3	−19.8	−1.7	−27	9.3
	③	−20.5	−49.4	−10.6	−42.5	−37.4	−47.3	−2.2	−64.2	−11.1	−40.5	37.4
	④	21.7	−7.4	19.3	−56.8	23.5	7.3	12.1	−7.7	−24.7	−18.5	−34.6
	⑤	−28.9	−56.1	−9.7	−45.2	26.7	−50.7	−33.3	−1.2	−18.5	−27.9	−66.5

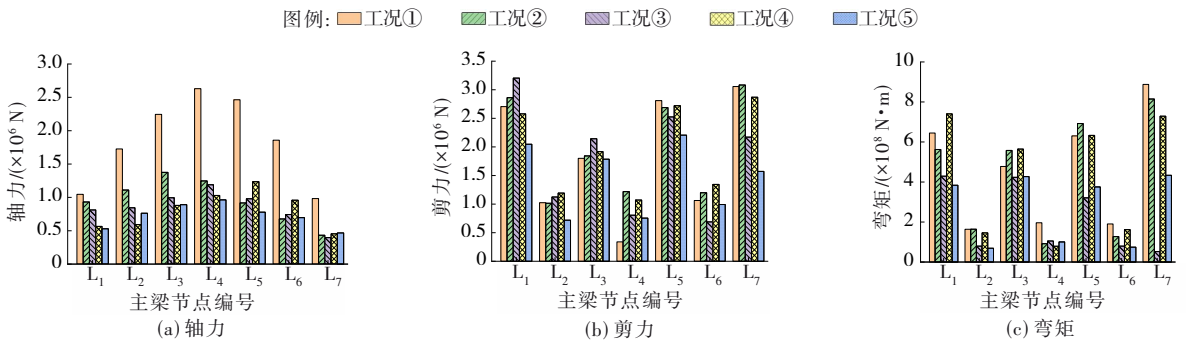


图 19　Wolong 波入射下模型 b 主梁各节点最大轴力、剪力、弯矩对比

Fig. 19　Comparison of maximum axial force, shear force, and bending moment at main girder nodes of bridge model b under Wolong wave incidence

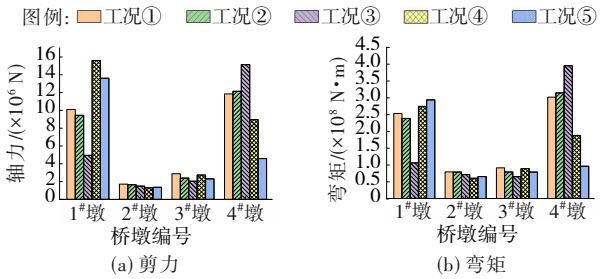


图 20　Wolong 波入射下模型 b 各墩底最大剪力、弯矩对比

Fig. 20　Comparison of maximum shear force and bending moment at pier bottom of bridge model b under Wolong wave incidence

4　结论

本文通过建立跨河谷高墩大跨桥梁的对称和非对称结构模型开展数值模拟，研究了地震动地形效应（即由此引起的各桥墩输入地震动差异）对桥梁结构反应的影响，得到以下主要结论：

（1）地震波入射角度显著影响地形效应对桥梁结构地震反应的贡献程度，其中垂直入射时桥梁结构对地形效应最为敏感。

（2）地震动地形效应导致的非一致输入对跨河谷高墩大跨桥梁地震反应具有重要影响，会显著

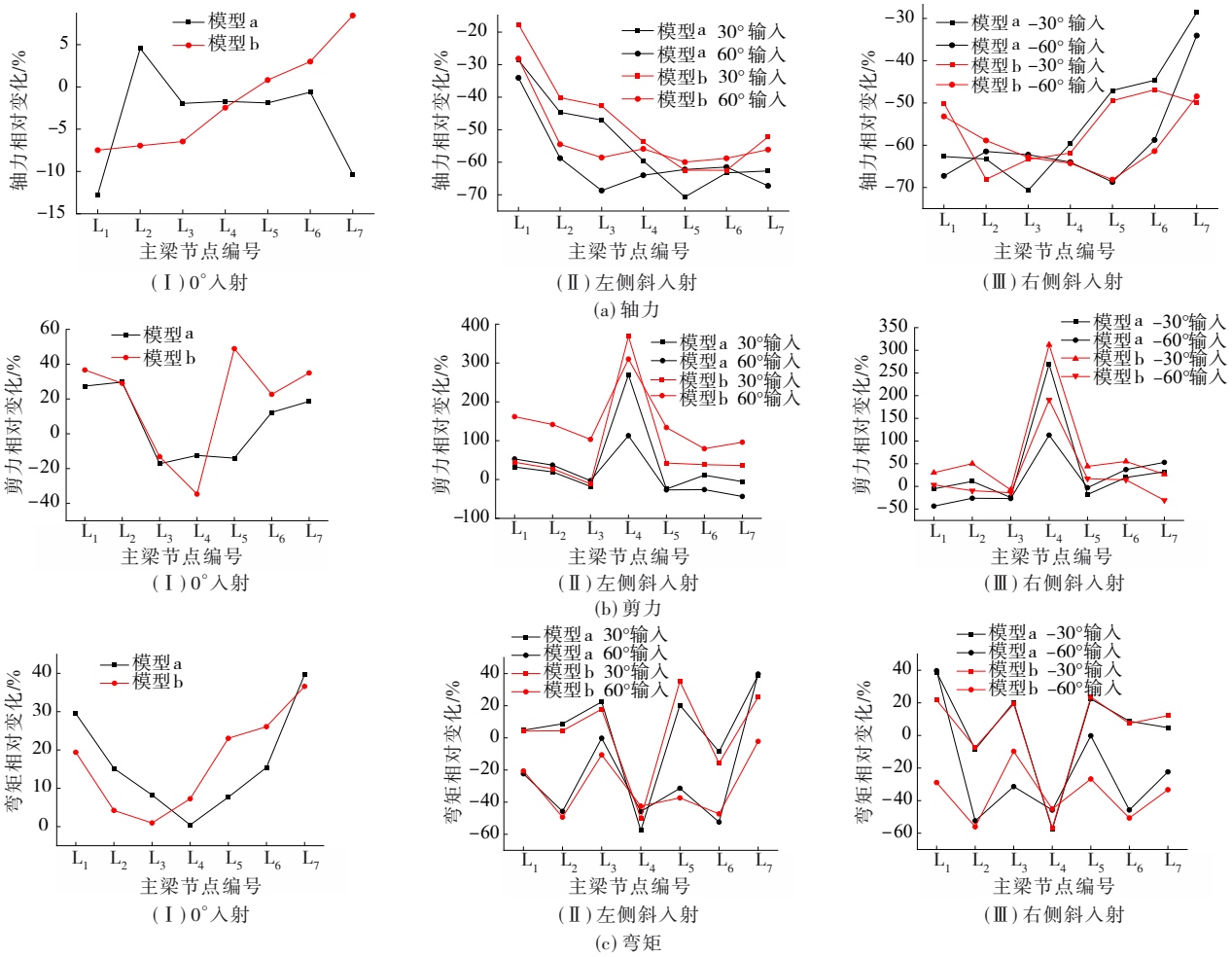


图 21 Wolong 波入射下两个桥梁模型的主梁反应最大轴力、剪力和弯矩的相对变化对比

Fig. 21 Comparison of relative changes in maximum axial force, shear force, and bending moment of main girder for the two bridge models under Wolong wave incidence

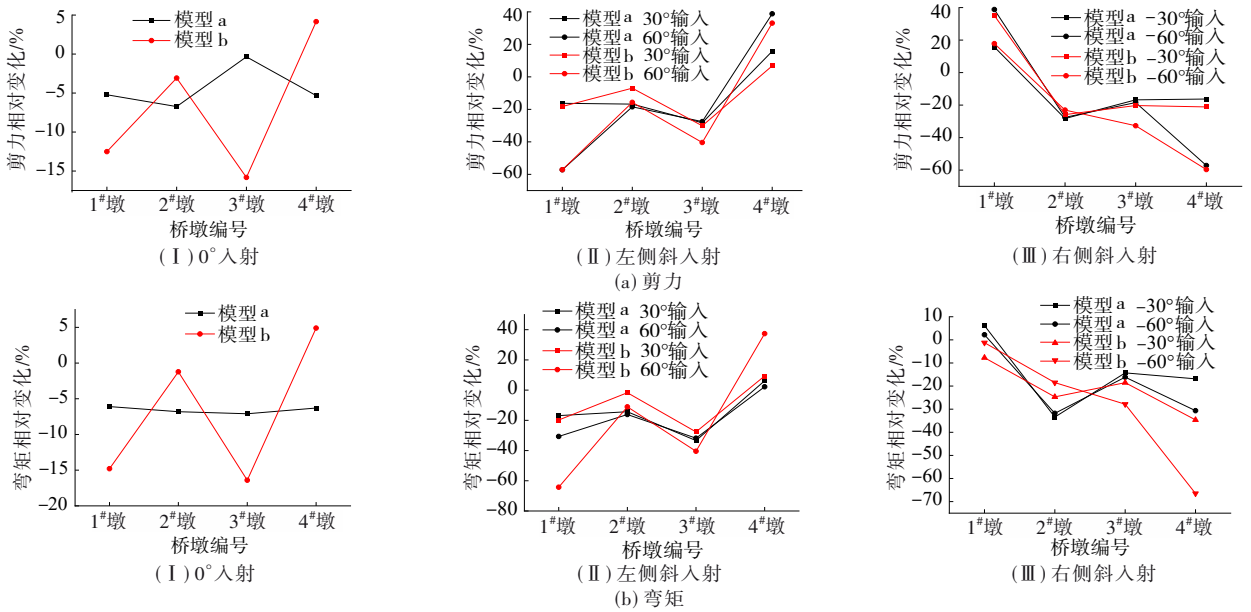


图 22 Wolong 波入射下两个桥梁模型的桥墩反应墩底最大剪力和弯矩的相对变化对比

Fig. 22 Comparison of relative changes in maximum shear force and bending moment at pier bottom for the two bridge models under Wolong wave incidence

增加结构内力反应的复杂性。斜向入射对结构内力影响较大，尤其使得两高墩之间主跨跨中剪力大幅增加。

（3）考虑地形效应时，地震波垂直入射与斜向入射对桥梁结构地震反应的影响机制不同。垂直入射下，对称桥梁模型的反应仍保持对称性；而斜向入射则会引起极为复杂的结构内力反应。

（4）在跨河谷高墩大跨桥梁的抗震设计中，应充分考虑地形效应对结构反应的影响，并高度重视地震波入射方向及其不确定性带来的影响。

参考文献（References）

[1] 胡聿贤 . 地震工程学[M]. 北京：地震出版社，2006.
Hu Yuxian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 2006.

[2] Trifunac M D, Hudson D E. Analysis of the Pacoima Dam accelerogram: San Fernando, California, earthquake of 1971[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 61(5): 1393-1411.

[3] Boore D M. The effect of simple topography on seismic waves: implications for the accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1973, 63(5): 1603-1609.

[4] 王海云，谢礼立 . 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报，2010，53(7)：1631-1638.
Wang Haiyun, Xie Lili. Effects of topography on ground motion in the Xishan Park, Zigong City[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(7): 1631-1638.

[5] 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 Chongshao, Min Xiangyi, Zhou Mindu. Influence of local topography on ground motion in mountain region of southern Gansu Province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 331-335.

[6] 王伟，刘必灯，刘欣，等 . 基于汶川 M_S8.0 地震强震动记录的山体地形效应分析[J]. 地震学报，2015，37(3)：452-462，532.
Wang Wei, Liu Bideng, Liu Xin, et al. Analysis on the hill topography effect based on the strong ground motion records of Wenchuan M_S8.0 earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2015, 37(3): 452-462, 532.

[7] 张世亮，马强，陶冬旺，等 . 应用邻近强震动站点主余震记录的场地及地形效应分析[J]. 振动与冲击，2023，42(21)：200-210.
Zhang Shiliang, Ma Qiang, Tao Dongwang, et al. Analysis of site and topography effects using strong motion records of the mainshock and aftershocks from nearby stations[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(21): 200-210.

[8] Hough S E, Altidor J R, Anglade D, et al. Localized damage caused by topographic amplification during the 2010 M7.0 Haiti earthquake[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(11): 778-782.

[9] 张立宝，傅磊，周正华，等 . 2021 年 5 月 21 日漾濞 M_S6.4 地震极震区地形效应对地震动特性的影响[J]. 地震学报，2024，46(1)：144-156.
Zhang Libao, Fu Lei, Zhou Zhenghua, et al. Impact of topographic effect on ground motion characteristics in the extreme seismic region of Yangbi M_S6.4 earthquake on May 21, 2021 [J]. Acta Seismologica Sinica, 2024, 46(1): 144-156.

[10] 唐晖，李小军，李亚琦 . 自贡西山公园山脊地形场地效应分析[J]. 振动与冲击，2012，31(8)：74-79.
Tang Hui, Li Xiaojun, Li Yaqi. Site effect of topograghy on ground motions of Xishan Park of Zigong City[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 74-79.

[11] 杨宇，李小军，贺秋梅 . 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，2011，6(4)：436-447.
Yang Yu, Li Xiaojun, He Qiumei. Numerical simulation for site effect of ridge terrain and overlaying soil in Zigong Xishan Park [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(4): 436-447.

[12] 李英民，王丽萍，赵耀 . 坡地地形对竖向地震动反应谱特性的影响分析[J]. 地震工程与工程振动，2010，30(5)：156-161.
Li Yingmin, Wang Liping, Zhao Yao. Influence of slope terrain on characteristics of vertical ground motion response spectra [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(5): 156-161.

[13] 梁轩，邢昊，周俊，等 . 梯形山体地形效应及对周围场地地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动，2016，36(6)：45-55.
Liang Xuan, Xing Hao, Zhou Jun, et al. Trapezoid mountain topographic effects and their impacts on seismic response of surrounding site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(6): 45-55.

[14] Di Fiore V. Seismic site amplification induced by topographic irregularity: results of a numerical analysis on 2D synthetic models[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3/4): 109-115.

[15] 张季，梁建文，巴振宁 . SH 波入射时凸起场地的地形和土层放大效应[J]. 地震工程与工程振动，2016，36(2)：56-67.
Zhang Ji, Liang Jianwen, Ba Zhenning. Topography and soil amplification for hill site when incident SH wave [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(2): 56-67.

[16] 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 Yufeng, Dai Denghui, 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.

[17] 郭昆霖，李小军，吴敬武，等 . 地震行波对跨河谷高墩大跨桥梁地震反应的影响[J]. 地震研究，2020，43(3)：531-538，603.
Guo Kunlin, Li Xiaojun, Wu Jingwu, et al. Seismic wave propagation effect on seismic response of long-span bridges with high piers across river valleys[J]. Journal of Seismologi-

cal Research, 2020, 43(3): 531-538, 603.

[18] 陈志伟, 蒲黔辉, 贾宏宇, 等. 基于场地效应的高墩大跨铁路桥梁地震响应分析[J]. 世界地震工程, 2016, 32(2): 82-88.
Chen Zhiwei, Pu Qianhui, Jia Hongyu, et al. Analysis of seismic response of high pier and long-span railway bridge based on site effect[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(2): 82-88.

[19] 李山有, 廖振鹏. 地震体波斜入射情形下台阶地形引起的波型转换[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 9-15.
Li Shanyou, Liao Zhenpeng. Wave-type conversion caused by a step topography subjected to inclined seismic body wave[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 9-15.

[20] 刘洪兵, 范立础. 大跨桥梁考虑地形及多点激励的地震响应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 641-646.
Liu Hongbing, Fan Lichu. Seismic analysis of long span bridges considering topographic effects and multi-supported excitations[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(6): 641-646.

[21] 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 Guoliang, Li Xiaojun, Li Tieping, 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.

[22] 周国良, 李小军, 刘必灯, 等. 大质量法在多点激励分析中的应用、误差分析与改进[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 48-54.
Zhou Guoliang, Li Xiaojun, Liu Bideng, et al. Error analysis and improvements of large mass method used in multi-support seismic excitation analysis[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 48-54.

[23] 周国良, 李小军, 刘必灯, 等. 大刚度法在结构动力分析中的应用、误差分析与改进[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 30-36, 44.
Zhou Guoliang, Li Xiaojun, Liu Bideng, et al. Error analysis and improvements of large spring/stiffness method for structural dynamic response analysis[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8): 30-36, 44.

[24] 周国良. 河谷地形对多支撑大跨桥梁地震反应影响[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010: 77-99.
Zhou Guoliang. The influence of valley topography on the seismic response of multi-support long-span bridges[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2010: 77-99.

[25] 李忠献, 史志利. 行波激励下大跨度连续刚构桥的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 68-76.
LI Zhongxian, SHI Zhili. Seismic response analysis for long-span continuous rigid-framed bridges under excitation of traveling waves[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(2): 68-76.

[26] 潘强, 方诗圣, 程晓东. 高墩大跨连续刚构桥地震反应的行波效应研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2010, 20(2): 82-85.
Pan Qiang, Fang Shisheng, Cheng Xiaodong. The traveling wave effect of seismic response of high-pier-span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2010, 20(2): 82-85.

[27] 李吉涛, 杨庆山, 刘阳冰. 多点地震激励下大跨连续钢构桥易损性分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 75-80.
Li Jitao, Yang Qingshan, Liu Yangbing. Fragility analysis of long span continuous rigid frame bridge under multi-support excitations[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5): 75-80.

[28] 何庆祥, 沈祖炎. 结构地震行波效应分析综述[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 50-57.
He Qingxiang, Shen Zuyan. Review of structural seismic analysis of travelling wave effects[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 50-57.

[29] 刘必灯. 考虑地形影响的多点输入下大跨桥梁地震反应及碰撞反应分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008: 11-19.
Liu Bideng. Seismic response and pounding response analysis of long-span bridges under multi-support excitations considering topographic effects[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008: 11-19.

[30] 王蕾, 赵成刚, 王智峰. 考虑地形影响和多点激励的大跨高墩桥地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 50-53, 59.
Wang Lei, Zhao Chenggang, Wang Zhifeng. Seismic responses analysis of continuous rigid-framed bridge with hige piers considering topographic effects and multi-support excitations[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(1): 50-53, 59.

[31] 李小军, 廖振鹏, 关慧敏. 粘弹性场地地形对地震动影响分析的显式有限元-有限差分方法[J]. 地震学报, 1995, 17(3): 362-369.
Li Xiaojun, Liao Zhenpeng, Guan Huimin. Explicit finite element-finite difference method for analyzing the influence of viscoelastic site topography on ground motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(3): 362-369.

(本文编辑:张向红)