

丁万鹏,虞庐松,李子奇,等.曲率半径对大温差地区小半径曲线梁桥地震响应影响分析[J].地震工程学报,2022,44(1):93-99.
DOI:10.20000/j.1000-0844.20200714001
DING Wanpeng, YU Lusong, LI Ziqi, et al. Influence of curvature radius on the seismic response of small radius curved girder bridges in large temperature difference area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 93-99. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20200714001

曲率半径对大温差地区小半径曲线梁桥 地震响应影响分析

丁万鹏¹, 虞庐松¹, 李子奇^{1,2}, 王力¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究曲率半径和近断层脉冲效应对大温差地区小半径曲线梁桥在地震作用下的动力响应和碰撞效应的影响规律,以某大温差地区曲线梁桥为研究对象,建立不同曲率半径的全桥非线性有限元模型,考虑温度变化对支座性能和伸缩缝间距的影响,开展桥梁地震响应分析。结果表明:随着主梁曲率半径增大,墩底内力响应逐渐增加,邻梁间碰撞效应逐渐增强;温度越高,墩底内力越小;近断层脉冲地震动作用下的桥墩响应较远场地震动作用大。

关键词:曲线梁桥;曲率半径;近断层脉冲型地震动;温度效应;碰撞效应

中图分类号:U448.215

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2022)01-0093-07

DOI:10.20000/j.1000-0844.20200714001

Influence of curvature radius on the seismic response of small radius curved girder bridges in large temperature difference area

DING Wanpeng¹, YU Lusong¹, LI Ziqi^{1,2}, WANG Li¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The seismic response and pounding effect of small radius curved girder bridges considering the curvature radius and the near-fault pulse-impulse effect in areas with large temperature difference were analyzed in this paper. Taking a curved girder bridge in large temperature difference area of Northwest China as a project example, different nonlinear finite element models of the whole bridge with different radius of curvature were established. The influence of thermal load on the bearing stiffness and beam expansion deformation was considered. The influence of curvature radius on the seismic response of the curved girder bridge was studied based on the internal force of pier and the pounding effect of adjacent girders. The results showed that with the increase of

收稿日期:2020-07-14

基金项目:长江学者和创新团队发展计划滚动支持(IRT15R29)

第一作者简介:丁万鹏(1996—),男,甘肃张掖人,硕士研究生,主要研究方向为桥梁抗震。E-mail:526845650@qq.com。

通信作者:虞庐松(1968—),男,安徽安庆人,教授,工学博士,主要从事桥梁抗震研究。E-mail:yulusong@mail.lzjtu.cn。

curvature radius of main beam, both the internal force response of pier bottom and the pounding effect between adjacent beams increase gradually. The internal force of pier bottom at extreme low temperature is much greater than that at extreme high temperature. The internal force of pier bottom under the action of near-fault pulse-like ground motion is larger than that under the action of far-field ground motion.

Keywords: curved girder bridge; radius of curvature; near-fault pulse-like ground motion; temperature effect; pounding effect

0 引言

地震发生后会给人类社会造成创巨痛深的影响,尤其是在大震作用下且灾区位于近断层地震区时,造成的损失更是不可估量。作为交通路网的重要组成部分,桥梁结构在地震中发生损伤及破坏不仅会造成巨大的伤亡和损失,还会阻碍灾后救援及重建工作的开展^[1]。曲线梁桥以其占地面积小,能克服地形限制和造型美观等优点,在城市交通网建设中被广泛应用,尤其在路网连接点等交通枢纽部位,常借助小半径曲线梁桥连接线路^[2];而我国作为一个地震活动发生较为频繁的国家,断层数量较多,已探测到有大量活断层位于城市及周边。故研究曲率半径及近断层脉冲效应对于曲线梁桥动力响应的影响规律具有十分重要的意义。

罕遇地震作用下桥梁的地震响应方面,文献[3-4]研究了桥梁在罕遇地震作用下的动力反应,贾毅等^[5]对罕遇地震作用下的减隔震支座参数进行了优化。上述研究表明桥梁结构在罕遇地震作用下的受力状态为非线性,应采用弹塑性时程分析方法;在曲线梁桥的地震响应方面,苏鹏等^[6]研究了近断层方向性效应作用下的曲线梁桥动力反应,文献[7-9]进行了曲线梁桥的减隔震方案对比,文献[10-11]研究了影响曲线梁桥地震易损性的因素,结果表明曲线梁桥在地震作用下易发生碰撞效应且破坏模式复杂,其地震反应受地震波输入角度、曲率半径和支座参数等因素影响较大;对于曲线梁桥的碰撞效应,文献[12-13]的研究发现桥梁的地震响应会由于邻梁碰撞效应而增大,碰撞效应的产生不利于结构安全;郑文智等^[14]的研究结果表明桥梁的地震响应受温度影响较大;文献[15-16]研究了支座性能对桥梁地震响应的影响,并进行了参数分析。

基于上述研究,本文以某大温差地区曲线梁桥为工程背景,考虑变温作用对支座性能的影响和相邻梁体之间的碰撞作用,建立不同曲率半径的非线性有限元模型,研究曲率半径及近断层脉冲效应对大温差地区曲线梁桥的地震响应和碰撞效应的影响规律。本

文成果可供同类型地区的桥梁设计人员参考。

1 计算模型

1.1 背景工程及有限元模型

以某曲线梁桥为工程背景,主桥三跨跨径均为 21.5 m,曲率半径 $R=50$ m,引桥长 30 m。桥址地处青藏高原,年平均温度 7.6°C ,历史最高温度为 36.5°C ,最低温度为 -24.9°C ,属大温差地区。本文有限元模拟中极端低温按 -30°C 考虑。

背景工程位于 II 类场地,抗震设防烈度为 VII 度,基本地震动峰值加速度为 $0.10g$,场地特征周期为 0.45 s。为研究曲率半径对曲线梁桥地震响应的影响,运用 MIDAS/Civil 有限元软件,分别建立曲率半径为 40 m、45 m、50 m、55 m 和 60 m 的全桥有限元模型(其他参数保持不变)。建模时 D5 墩位置保持不变,主梁曲线圆心与 D5 墩墩顶节点的整体坐标系 Y 坐标一致;全墩采用集中铰模拟非弹性特性,墩底固结。有限元模型如图 1 所示;图 2 和表 1 分别给出了计算得到的部分模态图和自振特性数据。

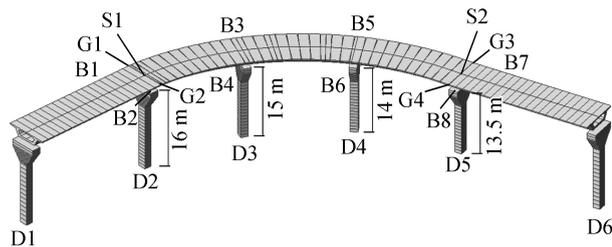


图 1 有限元模型($R=50$ m)

Fig.1 Finite element model ($R=50$ m)

算例桥梁上部结构采用钢筋混凝土现浇连续箱梁,单箱单室截面,材料为 C50 混凝土,主桥与引桥之间的伸缩缝编号分别为 S1, S2。

桥墩采用矩形截面独柱墩,墩顶呈弧形增大,材料为 C35 混凝土,编号 D1~D6,其中 D2、D5 为过渡墩。

主桥部分均使用高阻尼橡胶支座作为减隔震支座,采用有限元软件中的橡胶支座隔震装置模拟,编

号为 B1~B8,引桥部分 D1 和 D6 墩墩顶为固定支座,过渡墩墩顶采用滑动铰支座。为模拟邻梁碰撞

效应,每个伸缩缝的曲线内、外侧各布置一个碰撞单元,编号为 G1~G4。

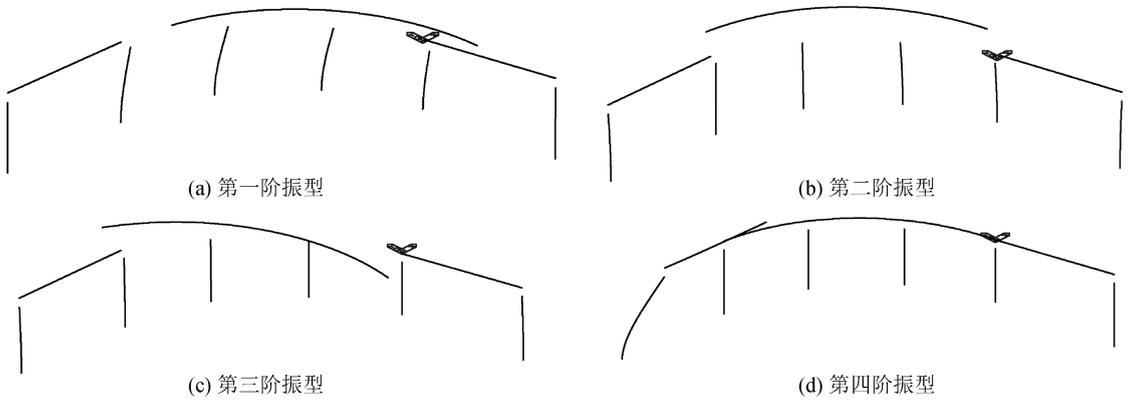


图 2 曲线梁桥部分模态图

Fig.2 Modal diagrams of curved beam bridge

表 1 结构自振特性

Table 1 Natural vibration characteristics of structure

振型	频率/Hz	周期/s
第一阶振型	0.724 8	1.379 6
第二阶振型	0.744 0	1.344 1
第三阶振型	0.874 5	1.143 5
第四阶振型	1.177 8	0.849 0

1.2 碰撞单元模拟

碰撞效应由忽略碰撞耗能的线性弹簧单元模拟,如图 3 所示。

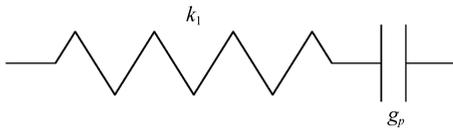


图 3 线性弹簧模型

Fig.3 Linear spring model

采用线性弹簧模型时,碰撞力表达式如下:

$$F_c = \begin{cases} k_1(u_1 - u_2 - g_p), & u_1 - u_2 \geq g_p \\ 0, & u_1 - u_2 < g_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_c 为碰撞力(单位:kN); k_1 为弹簧刚度(单位:kN/m); u_1 、 u_2 分别为主桥和引桥的梁端位移(单位:m); g_p 为间隙单元宽度(单位:m)。

变温作用会导致伸缩缝宽度发生变化,进而影响邻梁碰撞效应。背景桥梁年均温时伸缩缝间距为 80 mm,在有限元模型中施加系统温度荷载,得到极端温度时的梁端位移及对应的伸缩缝间距。不同曲率半径模型在各温度时伸缩缝间距列于表 2。

1.3 考虑温度影响的支座性能修正

温度变化对橡胶材料的性能影响较大,而国内

规范中对橡胶支座的温度效应并无明确说明,本文依据美国《Guide specification for seismic isolation design(4th Edition)》^[17](《指导性隔震设计指南(第四版)》,下文中简称《指南》)对支座的温度效应进行修正。支座屈服力计算方法如下

$$F_y = K_c \times d_y = Q_d + K_d \times d_y \quad (2)$$

式中: F_y 为屈服力(单位:kN); K_c 为弹性刚度(单位:kN/m); d_y 为屈服位移(单位:m); Q_d 为特征强度(单位:kN); K_d 为屈服后刚度(单位:kN/m)。

支座的温度效应修正见式(3)、(4)。

$$K'_d = K_d \times \lambda_t \quad (3)$$

$$Q'_d = Q_d \times \lambda_t \quad (4)$$

式中: λ_t 为修正系数; K'_d 、 Q'_d 分别为修正后的屈服后刚度和特征强度。《指南》中给出了高阻尼橡胶支座的修正系数列于表 3。

表 2 各温度下伸缩缝间距

Table 2 Spacing of expansion joints at different temperatures

模型 编号	曲率半径 /m	伸缩缝间距/mm		
		-30℃	7.6℃	36.5℃
模型 1	40	101.25	80.00	64.22
模型 2	45	101.63	80.00	64.33
模型 3	50	101.77	80.00	63.98
模型 4	55	102.06	80.00	63.59
模型 5	60	102.20	80.00	63.33

表 3 温度修正系数(λ_t)

Table 3 Temperature correction coefficient (λ_t)

温度/℃	21	0	-10	-30
Q_d	1.0	1.3	1.4	2.0
K_d	1.0	1.1	1.2	1.4

背景桥梁桥址处极端高温为 36.5℃,《指南》中

并未给出,需依据表3进行修正系数拟合,依据拟合函数计算所需的修正系数。拟合结果列于表4。

2 地震动选取

本文从 PEER 数据库中选取了 6 条地震动记录(表 5)进行桥梁地震响应分析。1[#]~3[#] 远场波反应谱曲线见图 4(a),有脉冲效应的 4[#]~6[#] 近断

层波反应谱曲线见图 4(b)。

表 4 修正系数拟合

参数	拟合函数($\lambda_i = a e^{bt}$)		相关系数(R^2)
	a	b	
Q_d	1.296 4	-0.013	0.980 7
K_d	1.129 6	-0.007	0.979 0

表 5 地震波信息

Table 5 Seismic waves information

类别	编号	地震名称	台站	PGA/g
远场波	1 [#]	Imperial Valley-03	El Centro Array #9	0.029
	2 [#]	Southern Calif	San Luis Obispo	0.036
	3 [#]	Central Calif-01	Hollister City Hall	0.049
近断层脉冲波	4 [#]	Chi-Chi Taiwan	TCU033	0.157
	5 [#]	Chi-Chi Taiwan	TCU049	0.244
	6 [#]	Chi-Chi Taiwan	TCU082	0.186

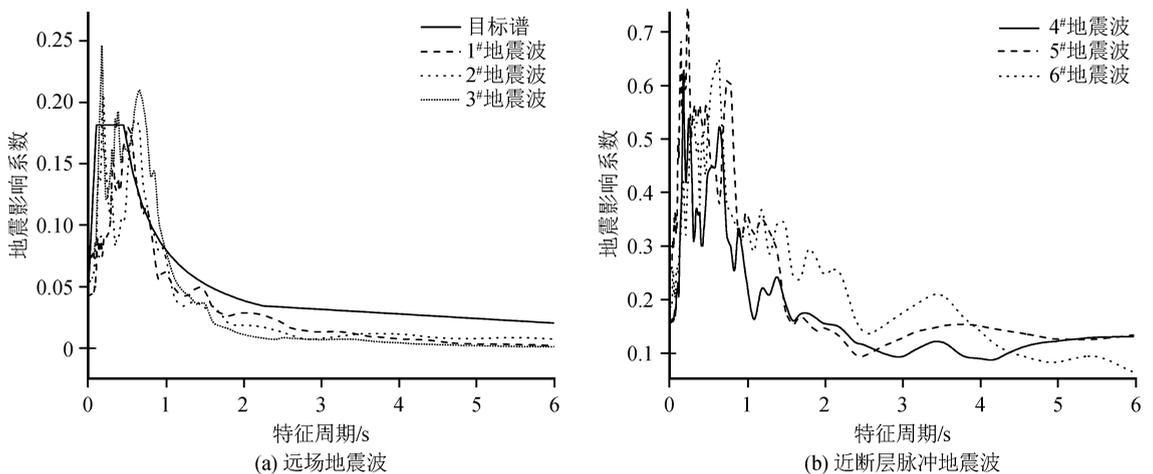


图 4 反应谱曲线

Fig.4 Response spectrum curves

3 动力响应分析

3.1 内力分析

对主梁桥墩截面进行弯矩-曲率分析,得到D2~D5墩的屈服弯矩分别为8 112.92 kN·m、8 142.73 kN·m、8 135.30 kN·m和8 059.77 kN·m。

根据《中国地震动参数区划图(GB 18306-2015)》,将地震波调幅至E2地震(0.195g),按照D4墩最不利输入角度进行加载^[18-19],桥梁系统阻尼取0.05。经计算,不同地震波作用下,各墩内力分布规律基本一致,本文仅给出各温度时1[#]、4[#]地震波作用下模型1~5的墩底弯矩结果(图5)。

由图5可知:(1)极端高、低温工况下,1[#]、4[#]地

震波作用于该曲线梁桥时,各墩均未进入屈服状态;(2)主梁曲率半径越大,墩底内力响应越大,但增幅渐趋平缓,以极端高温时4[#]地震波作用为例,模型2~5中D3墩的墩底弯矩是模型1的1.16、1.27、1.36、1.43倍;(3)对比图5(a)、(c)可知,极端低温时,墩梁间连接刚度随着支座刚度的增加而增大,致使其墩底内力远大于极端高温工况;(4)对比图5(b)、(c)可知,模型1~5在极端高温工况时,4[#]地震波作用下D2墩的墩底内力响应较1[#]地震波作用增大10.1%~27.4%,表明近断层地震动相较于远场地震动,对于结构更不利。

3.2 碰撞效应分析

通过有限元计算各模型在极端温度及常温时的

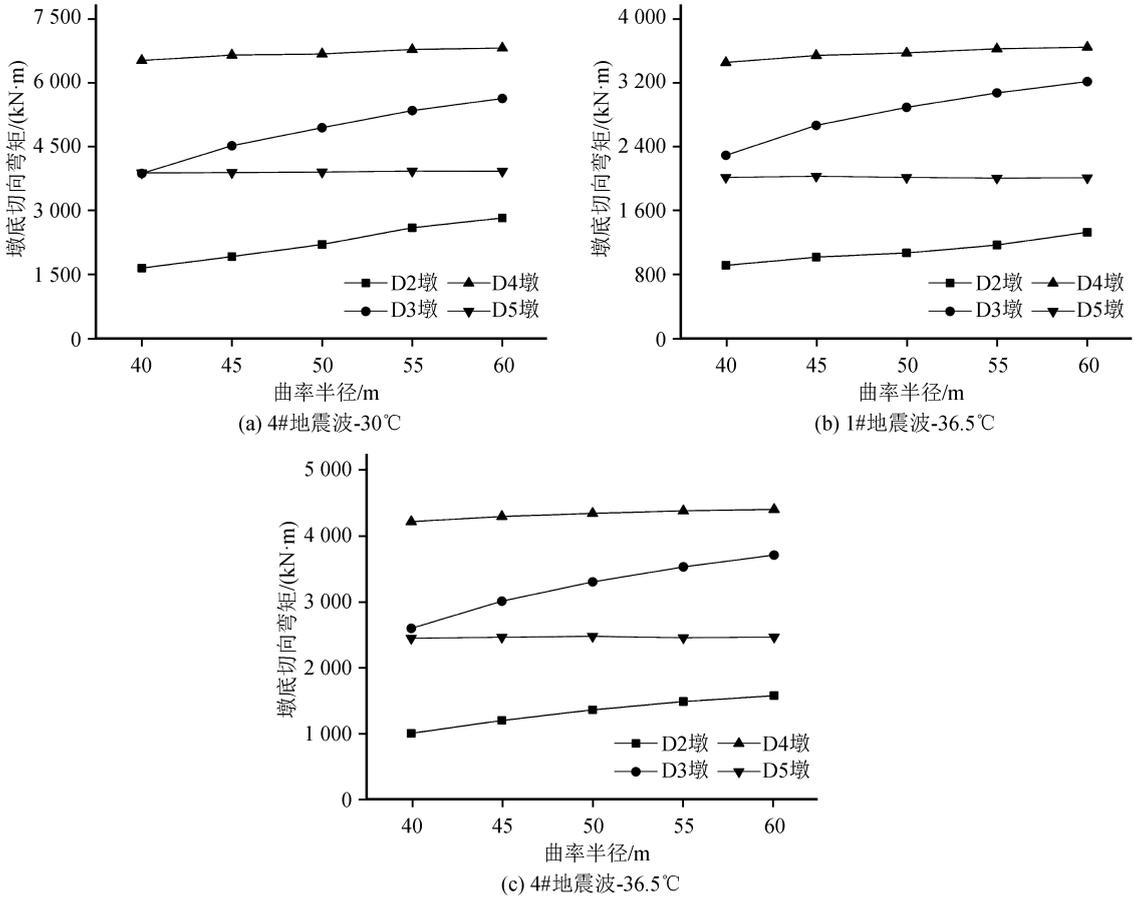


图 5 不同曲率半径模型墩底弯矩

Fig.5 Bending moment of pier bottom of models with different curvature radius

碰撞效应。由于极端低温和常温时伸缩缝间距及支座刚度较大,梁端位移较小,且 S2 伸缩缝发生碰撞已耗散巨大的地震能量,导致仅在 4 # 地震波作用下极端高温时,S2 伸缩缝处发生邻梁碰撞,S1 伸缩缝处未产生碰撞效应。

模型 1~5 的峰值碰撞力结果见图 6;同一地震波作用于不同曲率半径模型时的梁端相对位移基本一致,在此只给出极端高温时 6 条地震波作用于模型 3 时的 S2 伸缩缝处梁端相对位移时程曲线(图 7)。

由图 6 可知,随着主梁曲率半径增大,碰撞效应逐渐增强,模型 2~5 的峰值碰撞力较模型 1 分别增大 2.4%、2.8%、9.2%、9.6%;由图 7 可知,近断层脉冲地震动相较于远场地震动,对于结构安全更不利,其作用于桥梁时产生的梁端位移远大于远场地震作用。

4 结论

(1) 主梁曲率半径越大,墩底内力响应和伸缩缝

处邻梁碰撞效应越大,主梁曲率半径由 40~60 m 增大时,墩底弯矩增大 42.7%,碰撞力峰值增大 9.6%。

(2) 温度越低,主梁墩底内力响应越大,极端低温工况下的墩底弯矩最大可达极端高温时的 1.78 倍。

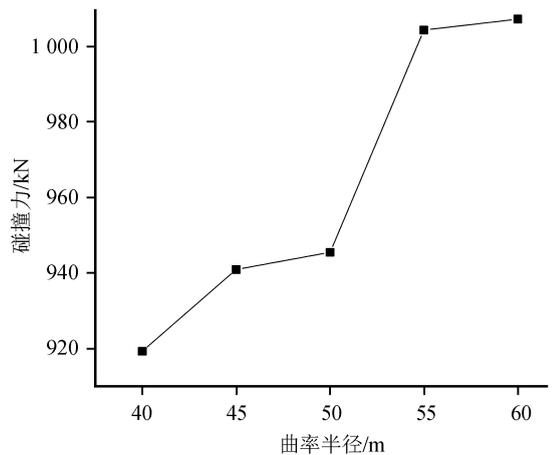


图 6 不同曲率半径时峰值碰撞力

Fig.6 Peak collision forces with different curvature radius

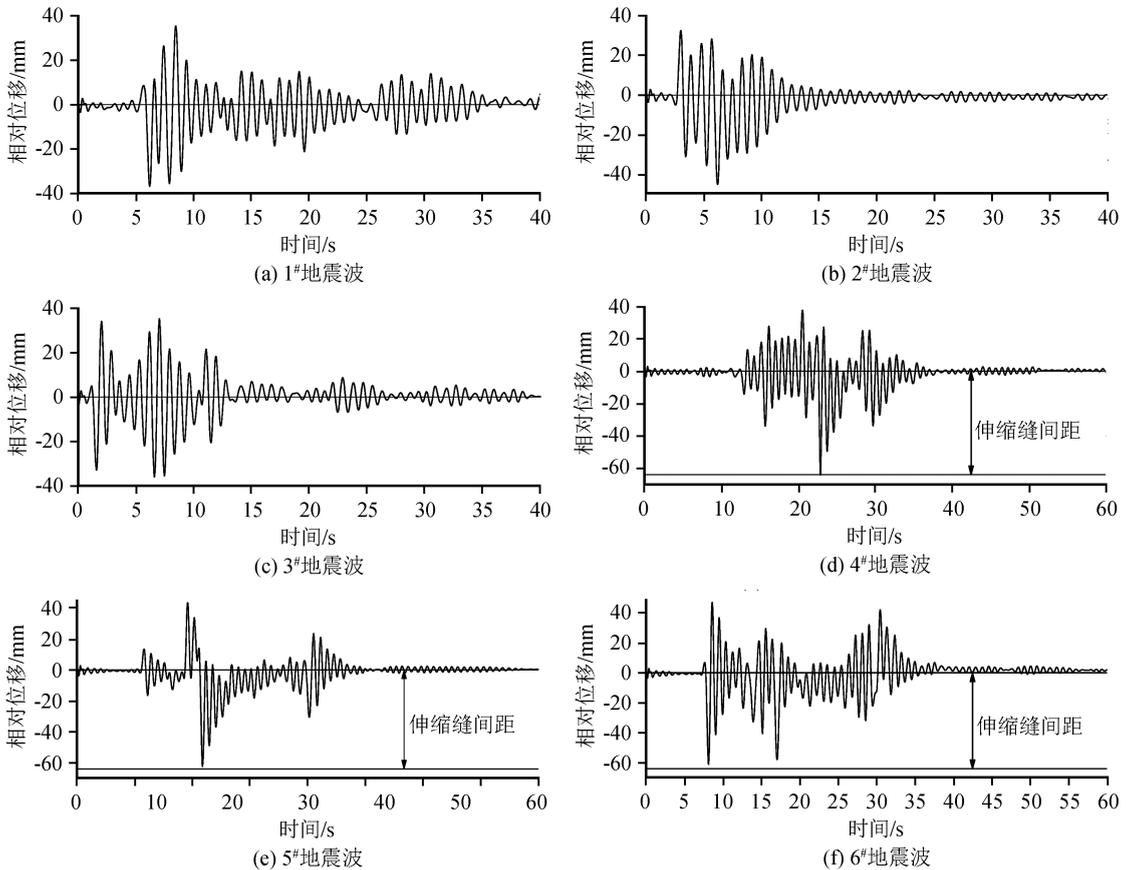


图7 不同地震波作用下梁端相对位移时程曲线

Fig.7 Time history curves of relative displacement of beam end under different seismic waves

(3) 近断层脉冲效应会导致墩底内力显著增大,不同曲率半径时,近断层脉冲型地震波作用下的墩底弯矩较远场地震波作用最大增大 27.4%。

参考文献(References)

- [1] 周波,魏镭,宋新龙.基于地震易损性的连续梁桥减隔震方案研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(11):118-122.
ZHOU Bo, WEI Liyun, SONG Xinlong. Study on schemes of seismic mitigation and isolation for continuous beam bridge based on seismic vulnerability[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(11): 118-122.
- [2] 刘英,邬晓光,钱若霖,等.考虑剪力影响的多跨曲线连续梁桥径向位移解析分析[J].铁道建筑,2017,57(8):7-14.
LIU Ying, WU Xiaoguang, QIAN Ruolin, et al. Analytical solution of radial displacement of multi-span continuous girder bridge considering shear force effect[J]. Railway Engineering, 2017, 57(8): 7-14.
- [3] 李林.罕遇地震下空心薄壁高墩大跨T形刚构桥弹塑性地震反应分析[J].地震工程学报,2013,35(1):56-61.
LI Lin. Elastic-plastic seismic response analysis of hollow thin-walled high-pier large-span T-shaped rigid frame bridge under high-level earthquake conditions[J]. China Earthquake Engi-

neering Journal, 2013, 35(1): 56-61.

- [4] 普云浩,廖玉凤,卢朝勇.高烈度区某高速铁路实心单薄壁墩连续刚构桥抗震分析[J].建筑结构,2018,48(增刊2):982-985.
PU Yunhao, LIAO Yufeng, LU Chaoyong. Seismic analysis of continuous rigid frame bridge with solid single thin-walled piers in high intensity region of a high speed railway[J]. Building Structure, 2018, 48(Suppl02): 982-985.
- [5] 贾毅,赵人达,廖平,等.罕遇地震作用下连续梁桥双曲面摩擦摆支座参数优化及减震效果研究[J].中国铁道科学,2018,39(3):31-40.
JIA Yi, ZHAO Renda, LIAO Ping, et al. Parameter optimization and damping effect of hyperbolic surface friction pendulum bearing for continuous girder bridge under rare earthquake[J]. China Railway Science, 2018, 39(3): 31-40.
- [6] 苏鹏,陈彦江,闫维明.近断层方向性效应地震作用下曲线梁桥试验[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(6):148-155.
SU Peng, CHEN Yanjiang, YAN Weiming. Experimental study on curved girder bridge under near-fault ground motion with directivity effect[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 148-155.
- [7] 李喜梅,杜永峰.非平稳地震激励下隔震曲线梁桥振动控制研究[J].地震工程学报,2016,38(1):103-108,115.
LI Ximei, DU Yongfeng. Vibration control of isolated curved

- girder bridges under nonstationary seismic excitation[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(1):103-108,115.
- [8] 李一鸣,虞庐松,南鹏.高烈度地震区曲线连续梁桥的减隔震方案研究[J].铁道建筑,2017,47(9):43-47.
LI Yiming, YU Lusong, NAN Peng. Seismic isolation scheme of curved continuous girder bridge in high earthquake intensity area[J]. Railway Engineering, 2017, 47(9): 43-47.
- [9] KATARIA N P, JANGID R S. The smart PFD with LRB for seismic protection of the horizontally curved bridge[J]. Smart Structures & Systems, 2016, 17(5): 691-708.
- [10] JONG-SU Jeon, REGINALD DesRoches, TAESIK Kim, et al. Geometric parameters affecting seismic fragilities of curved multi-frame concrete box-girder bridges with integral abutments[J]. Engineering Structures, 2016, 122(17): 121-143.
- [11] ADEL E Abdelnaby, THOMAS M Frankie, AMR S El-nashai, et al. Numerical and hybrid analysis of a curved bridge and methods of numerical model calibration[J]. Engineering Structures, 2014, 70(13): 234-245.
- [12] 王强,吴刚.地震作用下曲线梁桥双向碰撞作用影响分析[J].世界地震工程,2020,36(2):121-128.
WANG Qiang, WU Gang. Analysis on the influence of bidirectional collision effect of curved bridges under seismic actions [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2): 121-128.
- [13] 左焯,孙广俊,王志鹏,等.近断层地震动下曲线梁桥碰撞效应研究[J].振动与冲击,2018,37(21):52-60.
ZUO Ye, SUN Guangjun, WANG Zhipeng, et al. Pounding effect of curved bridges subjected to near-fault seismic ground motions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(21): 52-60.
- [14] 郑文智,王浩,沈惠军.强震下隔震连续梁桥地震响应的温度效应研究[J].工程力学,2019,36(4):188-195,205.
ZHENG Wenzhi, WANG Hao, SHEN Huijun. Thermal effects on response of seismic isolated bridges subjected to strong ground motions [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(4): 188-195, 205.
- [15] 王力,杨延超,刘世忠,等.长联大跨摩擦摆支座隔震连续梁桥多维地震反应分析[J].世界地震工程,2020,36(2):129-137.
WANG Li, YANG Yanchao, LIU Shizhong, et al. Multi-dimensional seismic response analysis of long-span isolated continuous girder bridge with friction pendulum system [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2): 129-137.
- [16] 梁瑞军,王浩,郑文智,等.隔震曲线连续梁桥铅芯橡胶支座参数优化[J].工程力学,2019,36(11):83-90.
LIANG Ruijun, WANG Hao, ZHENG Wenzhi, et al. Parameter optimization of lead rubber bearings of an isolated curved girder bridge [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11): 83-90.
- [17] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide specification for seismic isolation design GSID-2014[S]. 4th Edition. Washington, D.C., 2014.
- [18] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2016.
Seismic ground motion parameters zonation map of China:GB 18306—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [19] 城市桥梁抗震设计规范:CJJ 166—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Code for seismic design of urban bridges: CJJ 166—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.