

曲率半径和激励角度对刚构桥地震响应的影响

贾毅¹,李福海^{1,2},赵人达¹,廖平¹,王永宝¹

(1.西南交通大学土木工程学院,四川成都610031;2.陆地交通地质灾害防治技术
国家工程实验室,四川成都610031)

摘要 目的 研究曲率半径和地震动激励角度对高墩大跨连续刚构桥地震响应的影响,确定该类桥型的最不利地震激励方向.方法 以某跨度为(70+3×127+70)m的公路连续刚构桥为背景进行分析,采用有限元法建立全桥模型,并考虑桩-土相互作用,探讨曲率半径对结构动力特性的影响;采用反应谱法研究地震作用下桥梁结构的内力和位移响应.结果 分析结果表明:曲率半径对该类桥的自振特性有较大影响,随着曲率半径的减少,结构的自振频率和整体刚度逐渐降低;在纵桥向激励时,随着曲率半径的增大,桥墩纵桥向的内力及位移均有增大趋势,在横桥向激励时,随着曲率半径的增大,桥墩横桥向的内力及位移变化规律不明显.结论 该类桥梁的最不利地震动激励方向并不是纵桥向和横桥向,其最不利地震动激励角度大致为80°和165°.

关键词 桥梁工程;曲线连续刚构桥;曲率半径;激励角度;地震响应;反应谱法;有限元法

中图分类号 TU997;U448.23;U442.55

文献标志码 A

Study on the Effect of the Curvature Radius and Seismic Excitation Angle on the Seismic Responses of High Pier and Long-span Continuous Rigid Frame Bridge

JIA Yi¹, LI Fuhai^{1,2}, ZHAO Renda¹, LIAO Ping¹, WANG Yongbao¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. National Engineering Laboratory for Technology of Geological Disaster Prevention in Land Transportation, Chengdu, China, 610031)

Abstract: In order to study the effect of the curvature radius and seismic excitation angle on seismic response of the high pier and long-span rigid frame bridge, and determine the most unfavorable earthquake excitation direction of this kind of bridge, a highway rigid frame bridge with span arrangement(70+3×127+70)m was taken as an example and analyzed. The whole bridge is modeled by the finite element software considering the pile-soil interaction, in which the effect of cur-

收稿日期:2016-10-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB1200401);国家自然科学基金项目(51308471);广东省科技厅科技计划项目(2014-02-015)

作者简介:贾毅(1988—),男,博士研究生,主要从事大跨桥梁抗震、现代桥式及桥梁结构设计理论与工程实践等方面研究.

vature radius on the structural dynamic properties was discussed. In addition, the internal forces and displacements under the seismic action were analyzed based on the response spectrum method. The analysis results show that radius of curvature has a great effect on the natural vibration characteristic of this bridge. At the same time, the structure natural frequency and the overall stiffness decrease gradually with the curvature radius decreasing. With the curvature radius increasing, the internal force and the displacement of the pier in longitudinal direction increase gradually under the excitation of the longitudinal direction, while they change irregularly in transverse direction under the excitation of the transverse direction. The critical excitation direction of the ground motion is neither longitudinal nor transverse direction, while the critical seismic excitation angles are about 80° and 165° .

Key words: bridge engineering; curved continuous rigid frame bridge; curvature radius; excitation angle; seismic response; response spectrum method; finite element method

我国地域幅员辽阔,山区地形地势条件极其复杂,修建高等级公路需要桥梁服从道路线形的要求,因而不可避免地要修建高墩大跨度曲线桥梁^[1].由于曲率半径的存在,曲线连续刚构桥在其自身重力作用下将产生扭转,其弯扭耦合效应将导致该类桥没有明显的主方向^[2].且该类桥梁在两个垂直方向的地震激励下可能发生耦合作用,加上高墩的影响,使得高墩大跨曲线连续刚构桥在地震作用下的响应更加复杂^[3].

目前,在高墩大跨曲线连续刚构桥抗震性能的研究领域,李小珍^[4]等采用非线性动态时程法探讨了地震动输入方向对铁路部分斜拉桥地震响应的影响;陈兴冲^[5]等采用反应谱法研究了不同曲率半径及地震激励方向对城市曲线桥梁地震反应的影响;揭志羽^[6]等建立了某刚构-连续组合梁铁路特大桥的有限元模型,采用反应谱法和时程分析法对桥梁在地震作用下的内力及位移进行分析,确定了该类桥梁最不利地震波激励角度为 0° 、 90° ;李杰^[7]等以某大跨径双薄壁高墩曲线连续刚构桥为实例,建立该桥的有限元计算模型,探讨了墩底边界约束、曲率半径对该类桥型结构自振特性的影响.

虽然,曲率半径和地震动激励角度对曲线桥梁的地震响应影响已有一定研究,但是针对山区高墩大跨曲线连续刚构桥,考虑二者影响的地震响应研究还较为欠缺.鉴于此,

笔者以某高速公路上跨度为 $(70 + 3 \times 127 + 70)$ m 的连续连续刚构桥为研究背景,建立其全桥有限元分析模型,采用反应谱法探讨了曲率半径和地震动激励角度对高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应的规律.

1 工程概况

某高墩大跨曲线预应力混凝土连续刚构桥的跨度为 $(70 + 3 \times 127 + 70)$ m,桥梁位于曲率半径 $R = 805$ m 的圆曲线上,并设置 4% 的单向横坡,桥梁纵向线形为 2.5% 纵坡的直线接 $R = 16\ 000$ m 的竖曲线.上部结构采用纵、横、竖三向预应力体系.桥墩(5~10号墩)平均高度为 99.90 m,其中 7 号墩最高,高度为 120.50 m.主墩(6~9号墩)采用变截面矩形空心墩,承台采用整体式,桩基采用直 2.5 m 嵌岩桩.过渡墩(5、10号墩)采用变截面矩形空心墩,桩基采用直径为 2.0 m 嵌岩桩.主梁采用 C55 混凝土,桥墩和承台采用 C40 混凝土,桩基采用 C30 混凝土^[1],桥梁总体布置见图 1,主梁典型横断面见图 2.

2 有限元模型

采用 Midas Civil 有限元软件建立全桥地震响应分析模型,如图 3 所示.主梁及桥墩采用变截面空间梁单元模拟,承台及桩基础采用直线梁单元模拟,主梁和主墩之间的连接采用刚性连接模拟^[8].结构的阻尼比取

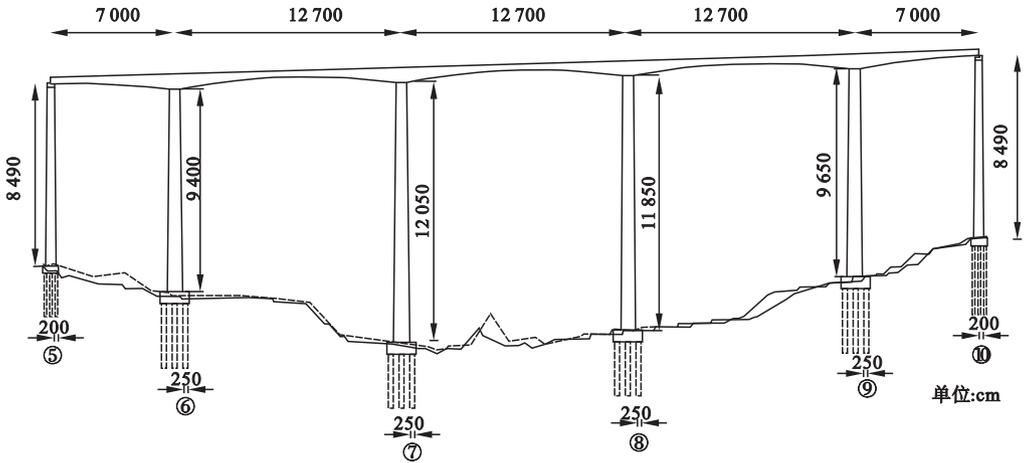


图1 桥梁总体布置

Fig. 1 The general arrangement of bridge

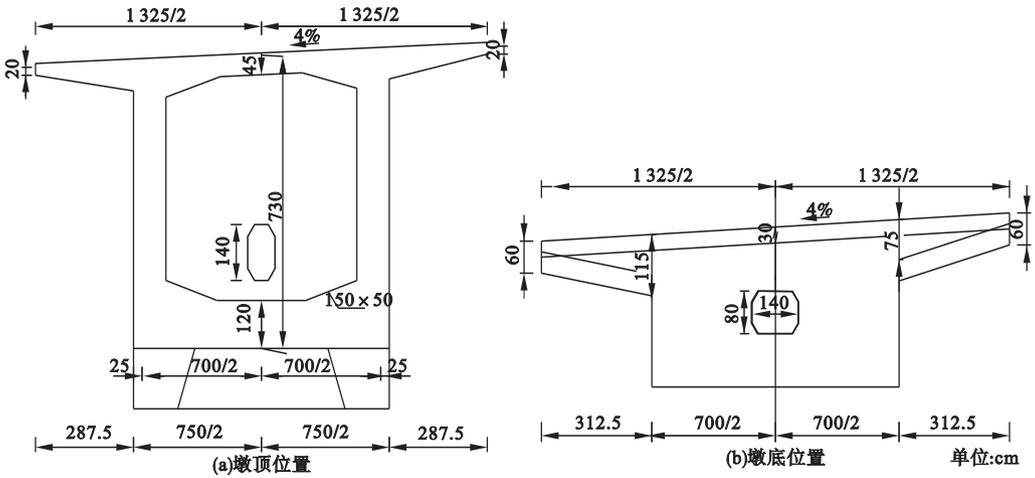


图2 主梁典型横断面

Fig. 2 Typical cross sections of main beam

0.05,二期恒载以均布荷载的形式施加在主梁单元上。桩-土的相互作用采用等代土弹簧模拟,等代土弹簧的刚度可采用表征土介质弹性值的 m 参数来计算^[9]。建模坐标轴规定:在整体坐标轴中, X 轴平行于两过渡墩之间的连线, Y 轴位于平面内与 X 轴垂直, Z 轴为竖向轴。在局部坐标轴中, X 轴平行于主梁曲线(5号过渡墩处)的切线, Y 轴位于水平面内与 X 轴垂直, Z 轴为竖向轴^[1]。

为探讨曲率半径对桥梁自振特性和地震响应的影响,以上述高墩大跨曲线连续刚构桥为基准模型,建立以曲率半径为参数的4个对比分析模型,曲率半径变量 R 分别为

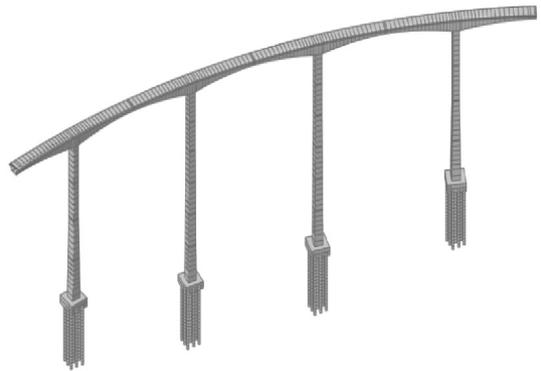


图3 全桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of bridge

805 m(原模型),1 600 m,2 400 m, ∞ (直线桥),其他建模参数保持不变。为分析地震动

激励角度对桥梁地震响应的影响以及确定最不利地震动输入方向,采用原模型作为分析对象.地震激励方向绕局部坐标 X 轴逆时针变化,从平行 X 轴方向 0° 递增至 180° ,沿变化方向地震动输入每增加 15° 作为一种荷载工况,即 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 、 105° 、 120° 、 135° 、 150° 、 165° 、 180° 共 13 种地震激励角度,荷载大小保持不变^[1,10].

3 桥梁自振特性

对桥梁结构进行自振特性分析可以初步

表 1 不同曲率半径下桥梁自振特性

Table 1 Natural vibration characteristics of bridge under different radius of curvature

模态 阶数	自振频率/Hz				振型描述
	$R = 805 \text{ m}$	$R = 1\ 600 \text{ m}$	$R = 2\ 400 \text{ m}$	$R = \infty$ (直线桥)	
1	0.273 6	0.274 6	0.276 3	0.276 6	整体正对称横弯
2	0.340 2	0.342 7	0.346 3	0.346 6	整体纵飘
3	0.478 1	0.480 2	0.486 3	0.491 8	整体反对称横弯
4	0.842 0	0.855 1	0.869 4	0.880 9	整体正对称横弯
5	0.939 8	0.942 6	0.955 4	0.960 8	整体正对称竖弯
6	1.106 9	1.116 5	1.132 4	1.146 4	整体反对称横弯
7	1.170 4	1.174 9	1.191 3	1.201 6	整体反对称竖弯
8	1.444 6	1.440 7	1.463 8	1.476 8	整体正对称竖弯
9	1.586 0	1.588 5	1.582 3	1.595 1	整体正对称横弯
10	1.711 3	1.729 8	1.731 4	1.742 9	整体反对称横弯

通过对 4 个不同曲率半径的桥梁模型自振特性分析可知,随着曲率半径的增大,结构的自振频率也逐渐增大,增幅最大为 3.2%. 这说明随着曲率半径的增大,桥梁的整体刚度也增大.从结构抗震性能来讲,在不考虑弯扭耦合效应情况,曲线连续刚构桥抗震性能优于直线形连续刚构桥^[14-15].曲线连续刚构桥前 10 阶振型与直线连续刚构桥大致相同,但曲率半径对前几阶振型各个方向耦合程度有一定影响,曲率半径越小,各个方向振动的耦合程度越大.由此可知,曲率半径对高墩大跨曲线连续刚构桥的自振周期和振型有一定的影响.

了解桥梁的动力特性和抗震性能,也是后续桥梁结构进行地震响应分析的基础工作.我国最新颁布的城市桥梁和公路桥梁抗震规范中规定:采用多振型反应谱进行抗震计算时,振型阶数在计算方向给出的有效振型参与质量不应低于该方向结构总质量的 90%^[11-13].所有计算模型均考虑前 150 阶模态参与抗震计算,以满足后续抗震分析的精度要求.为了研究曲率半径对桥梁结构自振特性的影响,表 1 列出了不同曲率半径下桥梁结构的前 10 阶自振特性.

4 地震反应谱响应分析

4.1 计算方法

地震反应谱分析方法已成为现今结构进行抗震计算的基本方法之一,它是将地震作用以静力荷载的形式施加在桥梁结构体系上以求得最大地震响应^[16-18].根据桥梁抗震规范^[10]确定用于计算的设计反应谱曲线.由于本桥位于高速公路上并且单跨跨径不超过 150 m,桥梁抗震设防类别为 B 类.根据桥址查询《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)该桥抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震动加速度峰值为 0.10 g,采用 8 度抗震设防措施.桥梁抗震重要性系数为 0.5,场地系

数和阻尼调整系数均为 1.0,场地的卓越周期为 0.45 s.本桥不考虑竖向地震作用,仅分别考虑纵桥向和横桥向 2 个水平方向地震动输入.由于曲线连续刚构桥主梁存在弯扭耦合作用,因此采用完全方根组合 CQC 方法计算地震作用效应^[19-21].

4.2 计算结果分析

4.2.1 不同曲率半径下结构地震响应分析

表 2 纵桥向激励下 7 号桥墩截面内力及位移

Table 2 Internal force and displacement of pier No. 7 under the excitation of the longitudinal direction

曲率半径/m	墩顶弯矩/(kN·m)		墩底弯矩/(kN·m)		墩顶剪力/kN		墩底剪力/kN		墩顶位移/mm	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
805	52 776.8	4 263.0	111 164.5	30 383.2	1 620.7	345.4	2 017.2	335.4	37.7	3.3
1 600	55 866.5	2 166.2	117 633.5	17 629.2	1 740.3	233.4	2 217.6	201.0	38.0	2.4
2 400	55 912.6	929.8	118 877.6	7 558.4	1 744.8	106.2	2 254.8	93.7	38.7	2.1
∞	57 113.5	202.0	121 619.1	460.8	1 775.5	7.0	2 298.6	10.7	39.5	0.0

表 3 横桥向激励下 7 号墩截面内力及位移

Table 3 Internal force and displacement of pier No. 7 under the excitation of the transverse direction

曲率半径/m	墩顶弯矩/(kN·m)		墩底弯矩/(kN·m)		墩顶剪力/kN		墩底剪力/kN		墩顶位移/mm	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
805	15 108.8	6 906.8	31 485.4	49 592.5	521.8	735.7	679.0	1 404.5	7.3	14.4
1 600	12 031.6	6 988.3	25 423.2	52 958.8	364.8	842.2	433.1	1 552.8	6.6	13.3
2 400	8 180.5	8 600.1	28 965.8	47 814.3	479.8	750.2	680.1	1 434.5	6.2	13.7
∞	19.8	7 060.4	192.0	53 917.0	5.9	857.8	11.8	1571.7	0.0	13.9

由表 2、表 3 可知:

(1)当结构仅在纵桥向激励时,7 号桥墩墩顶和墩底纵桥向弯矩、剪力都随着曲率半径增大而增大,横桥向弯矩则随着曲率半径增大而减小.当结构曲率半径为 ∞ 时(直线桥),相对于原模型,桥墩墩顶、墩底纵桥向弯矩分别增大了 8.2% 和 9.4%,桥墩墩顶、墩底纵桥向剪力分别增大了 9.6% 和 14.0%.

(2)当结构仅在横桥向激励时,墩顶纵桥向弯矩随着曲率半径增大而减小,当结构的曲率半径为 ∞ 时(直线桥),桥墩墩顶纵桥向弯矩值基本为零.随着结构曲率半径的增大,桥梁墩顶和墩底的剪力值变化规律不明显,但纵桥向剪力值有增大趋势,横桥向剪力

由于曲线连续刚构桥在地震作用下的响应规律相对直线连续刚构桥要复杂得多,为了研究曲率半径对结构地震响应的影响规律,对曲率半径 R 分别为 805 m、1 600 m、2 400 m、 ∞ 的 4 个模型进行了纵桥向和横桥向地震响应分析,并提取了 7 号桥墩墩顶及墩底的内力和位移结果,计算结果分别见表 2 和表 3.

值则有减小趋势.

(3)随着结构曲率半径的增大,当结构仅在纵桥向激励时,7 号桥墩墩顶位移有增大趋势,横桥向位移则逐渐减小.当结构仅在横桥向激励时,7 号桥墩墩顶横桥向位移变化幅度不大,纵桥向位移则逐渐减小.

4.2.2 不同地震动激励角度下结构地震响应分析

以原桥作为研究对象,地震动激励从 0° (平行于局部坐标 X 轴)方向输入,绕着 X 轴逆时针变化,激励角度每次增加 15° 作为一种荷载工况,共建立 13 种荷载工况.对桥墩关键截面内力及位移的最大值进行计算,计算结果仅给出 6 号桥墩墩顶和墩底截面内力和位移的结果(见图 4~图 6).

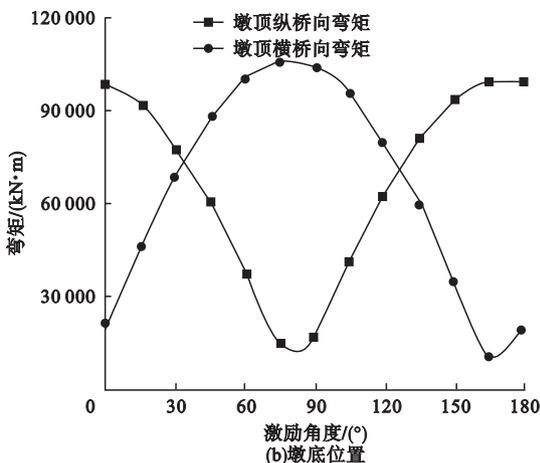
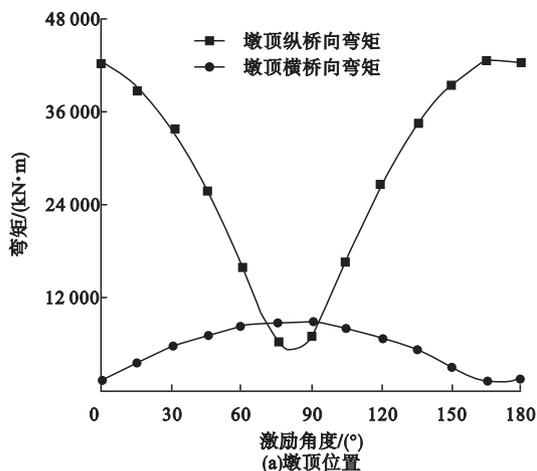


图4 桥墩弯矩随地震激励角度变化

Fig. 4 The moment of pier vs. seismic excitation angle

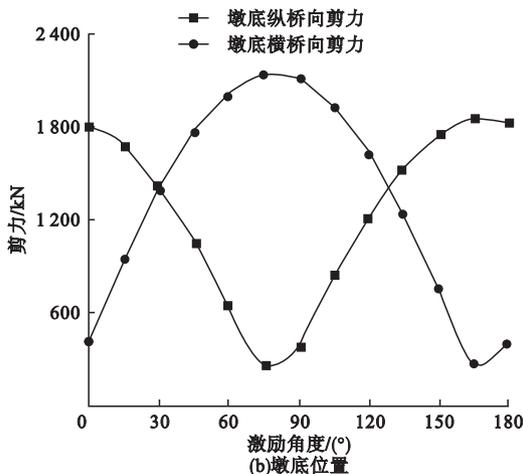
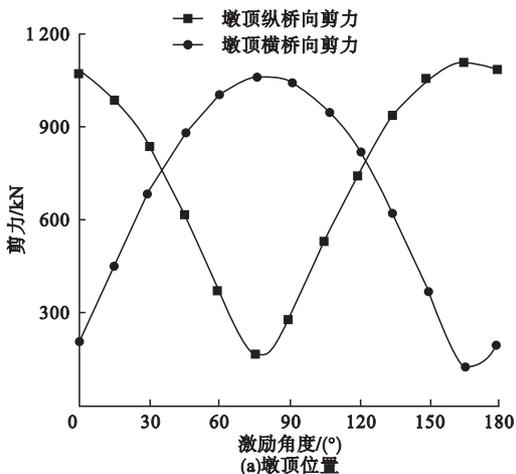


图5 桥墩剪力随地震激励角度变化

Fig. 5 The shear of pier vs. seismic excitation angle

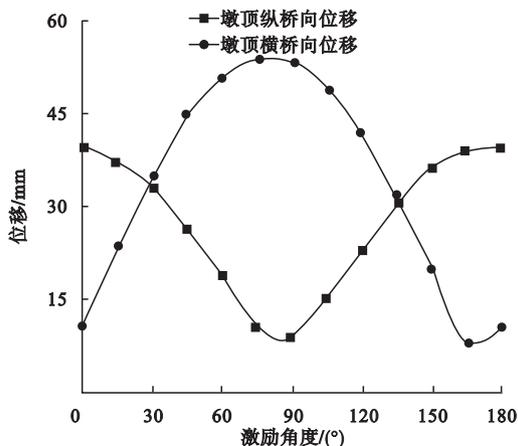


图6 墩顶位移随地震激励角度变化

Fig. 6 The displacement of pier top vs. seismic excitation

由图4分析可知:当地震动激励角度从0°增加至180°过程中,桥梁墩顶及墩底的纵桥向弯矩响应是先减小后增大趋势,而横桥向弯矩响应则正好相反,其规律是先增大后减小趋势;当地震动激励角度为80°左右时,桥梁墩顶和墩底纵桥向弯矩响应达到最小值,而横桥向弯矩响应则达到最大值;当地震动激励角度为165°左右时,桥梁墩顶和墩底纵桥向弯矩响应达到最大值,而横桥向弯矩响应则达到最小值。

由图5分析可知:当地震动激励角度从0°增加至180°过程中,桥梁墩顶及墩底的纵桥向剪力响应是先减小后增大趋势,而横桥

向剪力响应则正好相反,其规律是先增大后减小趋势;当地震动激励角度为 80° 左右时,桥梁墩顶和墩底纵桥向剪力响应达到最小值,而横桥向剪力响应则达到最大值;当地震动激励角度为 165° 左右时,桥梁墩顶和墩底纵桥向剪力响应达到最大值,而横桥向剪力响应则达到最小值。

由图6分析可知:当地震动激励角度从 0° 增加至 180° 过程中,桥墩墩顶的纵桥向位移响应是先减小后增大趋势,而横桥向位移响应则正好相反,其规律是先增大后减小趋势;当地震动激励角度为 80° 左右时,桥墩墩顶横桥向位移响应达到最大值,而纵桥向位移响应则达到最小值;当地震动激励角度为 165° 左右时,墩顶横桥向位移响应达到最小值,而纵桥向位移响应则达到最大值。

5 结 论

(1)曲率半径对高墩大跨连续刚构桥的自振特性有较大的影响。桥梁结构的整体刚度随着曲率半径增大而增大,同时曲率半径对该类桥梁前几阶振型有一定影响,曲率半径越小,各个方向振动的耦合程度越大。因此,曲线连续刚构桥在不考虑弯扭耦合效应情况下,其抗震性能优于直线形连续刚构桥。

(2)在纵桥向激励时,随着曲率半径的增大,桥墩顺桥向的内力及位移均有增大趋势;在横桥向激励时,随着曲率半径的增大,桥墩横桥向的内力及位移变化规律不明显。说明高墩大跨曲线连续刚构桥在横桥向激励时的地震响应相对纵桥向激励更复杂。

(3)地震动激励角度对高墩大跨曲线连续刚构桥的地震响应具有显著的影响。当激励角度为 80° 左右时,桥墩横桥向地震响应达到最大;当激励角度为 165° 左右时,桥墩纵桥向地震响应达到最大。因此,该桥最不利地震动激励角度大致为 80° 、 165° (分别对应于整体坐标下横桥向和顺桥向)。

参考文献

- [1] 贾毅.高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应分析[D].昆明:云南大学,2014.
(JIA Yi. Seismic response analysis of high pier and long-span curve continuous rigid frame bridge [D]. Kunming: Yunnan University, 2014.)
- [2] 朱东生,虞庐松,刘世忠.不规则桥梁地震动输入主方向的研究[J].兰州铁道学院学报,2000,19(6):37-40.
(ZHU Dongsheng, YU Lusong, LIU Shizhong. The study of earthquake input principal direction for irregular bridges [J]. Journal of Lanzhou railway university, 2000, 19(6): 37-40.)
- [3] 吴延伟.大跨度连续刚构桥罕遇地震下抗震分析[J].铁道工程学报,2010,137(2):54-59.
(WU Yanwei. Seismic analysis of large span continuous rigid frame bridge under rarely strong earthquake [J]. Journal of railway engineering society, 2010, 137(2): 54-59.)
- [4] 李小珍,洪沁焯,雷虎军,等.地震动输入方向对铁路部分斜拉桥地震响应的影响[J].桥梁建设,2015,45(1):26-32.
(LI Xiaozhen, HONG Qinye, LEI Hujun, et al. Effect of input directions of seismic ground motion on seismic responses of a railway extradosed bridge [J]. Bridge construction, 2015, 45(1): 26-32.)
- [5] 陈兴冲,侯文杰,张跃进,等.曲率半径对城市曲线桥梁地震反应的影响[J].世界地震工程,2012,28(3):43-48.
(CHEN Xingchong, HOU Wenjie, ZHANG Yuejin, et al. Influence of curvature radius change on seismic response of urban curved bridge [J]. World earthquake engineering, 2012, 28(3): 43-48.)
- [6] 揭志羽,卫星,李亚东,等.大跨高墩小半径刚构-连续组合梁桥地震响应分析[J].桥梁建设,2013,43(1):52-58.
(JIE Zhiyu, WEI Xing, LI Yadong, et al. Analysis of seismic response of long span high-rise pier and short radius curved hybrid bridge of rigid frame and continuous girder [J]. Bridge construction, 2013, 43(1): 52-58.)
- [7] 李杰,陈淮,王艳.双薄壁高墩曲线连续连续刚构桥地震响应分析[J].世界地震工程,2012,28(4):36-43.
(LI Jie, CHEN Huai, WANG Yan. Seismic re-

- sponse analysis of continuous rigid frame curved bridge with double thin-walled high pier [J]. *World earthquake engineering*, 2012, 28(4):36-43.)
- [8] 王一文,陈萍.大跨曲线高墩连续刚构桥自振特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(34):9415-9419.
(WANG Yiwu, CHEN Ping. Study on free vibration characteristics of long-span curved rigid frame bridge with high piers [J]. *World earthquake engineering*, 2012, 12(34):9415-9419.)
- [9] 王艳,陈淮,李杰.曲率半径和墩高对大跨刚构桥自振特性及抗震性能的影响分析[J]. *世界桥梁*, 2014, 42(3):65-70.
(WANG Yan, CHEN Huai, LI Jie. Effect of curvature radius and pier height on natural vibration property and seismic performance of long span rigid-frame bridge [J]. *World bridges*, 2014, 42(3):65-70.)
- [10] 张菊辉,管仲国.立交匝道桥地震响应及合理抗震体系研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(13):189-194.
(ZHANG Juhui, GUAN Zhongguo. Seismic response analysis and reasonable aseismic system design for a viaduct ramp bridge [J]. *Journal of vibration and shock*, 2015, 34(13):189-194.)
- [11] 重庆交通科研设计院.公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
(Chongqing Communications Research and Design Institute. Guidelines for seismic design of highway bridge; JTG/T B02-01-2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.)
- [12] 胡明刚.曲线梁桥的动力分析及抗震性能研究[D].成都:西南交通大学,2010.
(HU Minggang. Dynamic and seismic behavior researches on curved girder bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.)
- [13] 张菊辉,管仲国.匝道桥地震响应影响要素分析[J]. *桥梁建设*, 2015, 45(4):58-63.
(ZHANG Juhui, GUAN Zhongguo. Analysis of factors influencing seismic responses ramp bridges [J]. *Bridge construction*, 2015, 45(4):58-63.)
- [14] 代攀,杨涛,胡大琳.高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应分析[J]. *世界地震工程*, 2009, 25(4):181-187.
(DAI Pan, YANG Tao, HU Dalin. The seismic response analysis of continuous rigid frame bridge with high piers and long span [J]. *World earthquake engineering*, 2009, 25(4):181-187.)
- [15] 刘铁林,刘君.近断层地震作用下大跨度拱桥响应研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2014, 30(2):214-219.
(LIU Tielin, LIU Jun. Response long-span arch bridge under near-fault earthquake [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2014, 30(2):214-219.)
- [16] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1996.
(FAN Lichu. The seismic resistance of bridge [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.)
- [17] 何浩祥,闫维明.多点激励下连续桥梁地震响应特性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2011, 31(1):44-49.
(HE Haoxiang, YAN Weiming. Dynamic mechanism of continuous bridge under multi-support earthquake excitations [J]. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*, 2011, 31(1):44-49.)
- [18] 戴公连,刘文硕,曾敏.小半径城市高架曲线梁桥地震响应研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(2):155-160.
(DAI Gonglian, LIU Wenshuo, ZENG Min. Dynamic response of a small-radius curved bridge under earthquake [J]. *Journal of vibration and shock*, 2012, 31(2):155-160.)
- [19] 唐堂,钱永久.大跨度钢筋混凝土拱桥地震行波效应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(2):111-116.
(TANG Tang, QIAN Yongjiu. Traveling response analysis of large-span reinforced concert arch bridge [J]. *Earthquake engineering and engineering dynamics*, 2016, 36(2):111-116.)
- [20] 陈彦江,王巾杰,李晰.考虑地震动空间变化的曲线梁桥随机振动分析[J]. *工程抗震与加固改造*, 2014, 36(2):81-87.
(CHEN Yanjiang, WANG Jinjie, LI Xi. Random vibration analysis on a curved bridge considering the seismic spatial effect [J]. *Earthquake resistant engineering and retrofitting*, 2014, 36(2):81-87.)
- [21] 方诗圣,许永永,张鲲,等.曲线梁桥的最不利地震反应分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(8):1216-1221.
(FANG Shisheng, XU Yongyong, ZHANG Kun, et al. Critical seismic response analysis of curved beam bridge [J]. *Journal of Hefei university of technology (natural science)*, 2011, 34(8):1216-1221.)