

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.03.006

# 新型格构式高墩连续弯梁桥抗震性能分析

欧智菁, 张永健, 高强, 林建茂

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:**以四川雅泸高速公路干海子特大桥为工程背景,采用 Midas Civil 有限元软件建立三跨一联钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构。进行 E1 弹性地震响应分析,探讨了该类新型梁桥结构的动力特性、内力分布规律,以及地震波激励角度参数对全桥各个指标的影响规律,研究表明:钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构刚度较柔、周期长,不可忽视弯扭耦合效应。上部主梁弯矩值控制截面位于固定支座位置处,扭矩峰值出现在梁端位置处;下部格构墩弯矩和轴力控制截面均出现在固底墩墩底,墩顶为桥墩位移控制截面。支座中心连线和与之垂直的方向均为最不利激励角度。

**关键词:** 钢管混凝土; 格构式高墩; 弯梁桥; 抗震性能; 激励角度

**中图分类号:** TU398.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-4348(2018)03-0230-06

## Research on seismic performance analysis of a new type of continuous curved-beam bridges with latticed high-rise piers

OU Zhijing, ZHANG Yongjian, GAO Qiang, LIN Jianmao

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Based on the engineering background of Ganhaizi Super-large Bridge in Yalu Expressway in Sichuan Province, the finite element software Midas Civil was adopted to build the structure of three-span continuous curved-beam bridges with latticed high-rise piers of concrete-filled steel tubes (CFST). Based on the analysis of E1 elastic seismic response, discussions were made about such a new type bridge structure, to be specific, on the effects of its dynamic characteristics, its distribution law of internal forces and the effects of the parameters of its seismic wave's incentive angle on the various indexes of the whole bridge. Research results show that the curved continuous beam bridge with CFST latticed high-rise piers has a relatively flexible structure and a long period, and the coupling effects of the bending and torsion cannot be ignored. The control section of the upper main beam's bending moment is located at the position of the fixed bearing, and the maximum torque value is at the end of the beam; the bending moment and the axial force control section of the lower latticed pier are both at the bottom of the fixed bottom pier and the pier's top is its displacement control section. The centerline of the bearing and the direction perpendicular thereto are the most unfavorable incentive angles.

**Keywords:** concrete-filled steel tubes (CFST); latticed high piers; curved beam bridge; seismic performance; incentive angle

新型钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构具有抗震性能良好、承载力高、施工便捷、线型灵活等特点,已成为强震区的理想桥型之一<sup>[1-2]</sup>。与直梁桥相比,曲线梁桥的传力机理有所不同,尤

收稿日期: 2018-05-05  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51408128);福建省自然科学基金项目(2017J01471);福建省大学生创新创业训练支持项目(201710388042)  
第一作者简介: 欧智菁(1975-),女,福建南平人,教授,博士,研究方向:钢管混凝土组合结构和桥梁抗震。

其是激励角度、曲率半径等参数引起的主梁弯扭耦合效应不可忽略,使得结构受力更为复杂<sup>[3]</sup>。

曲线梁桥的动力特性及不同参数的抗震性能影响研究开展较早且成果丰富。如文献[4]对比分析了钢筋混凝土直桥与弯桥的动力特性,研究结果表明弯梁桥的整体性能不如直梁桥,建议适当加强结构的抗扭构件设计。文献[5]研究了混凝土连续弯梁桥结构在不同地震动激励角度输入下的影响规律,结果表明:地震输入角度对主梁面内外响应值影响较大;文献[6]对某三跨一联钢筋混凝土高墩小半径曲线梁桥进行地震响应分析,探讨了墩高、曲率半径和激励角度三者之间的影响关系,结果表明高墩曲线梁桥的最不利激励角度不受墩高和曲率半径参数影响,可分别将支座中心连线和与之垂直的方向作为最不利激励角度。文献[7]探讨了混凝土弯梁桥墩底截面曲率与地震动输入方向之间的关系,提出了该类梁桥最不利激励角度的计算简化公式。

综上所述,目前关于弯梁桥结构的动力特性及地震波激励角度参数影响研究主要集中在钢筋混凝土桥梁结构,而关于新型钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构的动力特性及地震响应规律方面的报道较为罕见,其理论研究严重滞后于工程应用,为此本文以干海子大桥为工程背景,探讨了该类新型弯梁桥结构的动力特性、内力分布规律、分析了不同地震波激励角度等对全桥结构的抗震性能影响规律,为其应用推广打下理论基础。

# 1 钢管混凝土格构式高墩连续梁桥有限元计算方法

## 1.1 工程背景

干海子特大桥位于四川省雅安石棉县境内,大桥全长 1 811 m,分三联三十六跨设计,第一联曲率半径为 353 m,第二联和第三联曲率半径均为 1 130 m。上部主梁采用钢管混凝土轻型组合桁梁结构,下部桥墩根据不同的墩高值,分别采用双柱式钢筋混凝土墩、钢管混凝土格构柱、钢管混凝土复合墩三种桥墩结构形式。干海子大桥实景图详见图 1。

上部主梁采用钢管混凝土桁架梁结构,分左右两幅,每幅均由钢管混凝土下弦杆、钢管腹杆和预应力混凝土顶板组成。梁高为 4.4 m,节间间距均为 4.4 m,下弦杆和腹杆分别为  $\Phi 813$  mm 和

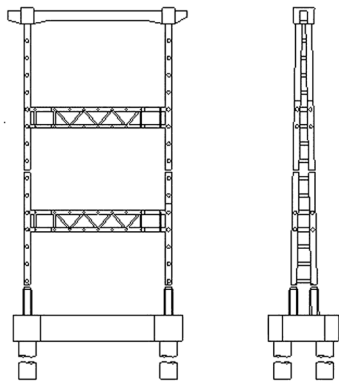


图 1 干海子大桥实景图

Fig.1 Panorama of Ganhaizi Bridge

$\Phi 406$  mm 钢管,内部填充 C60 混凝土。下弦杆间设置钢管桁架横系梁。

下部钢管混凝土格构墩柱肢是由 4 根  $\Phi 813$  (720)  $\times 12$  mm 钢管柱组成,管内填充 C50 混凝土,纵向柱肢坡度为 1:50,横向直立;柱肢纵桥向采用间距为 2 m 的  $\Phi 406$  mm 平钢管连接;横向采用间距为 10 m 的横撑桁架连接,盖梁采用钢筋混凝土结构。柱肢下面是由钢筋混凝土承台和桩基础连接而成的整体受力体系。具体的钢管混凝土格构墩构造详见图 2。



(a) 桥墩横断面图 (b) 桥墩纵断面图

图 2 钢管混凝土格构墩

Fig.2 CFST latticed piers

## 1.2 有限元计算方法介绍

采用 Midas Civil 2015 大型有限元程序建立三跨一联的钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构。格构墩和钢管混凝土桁梁均采用空间梁单元模拟,桥面二期恒载按 20 kN/m 考虑,桥面板、腹杆以及下弦杆为同节点。下弦管与混凝土柱肢单元均采用组合单元模拟两者间的相互作用。根据不同的弹性刚度值分别模拟,固定支座 GPZ-12.5GD 和盆式支座 YLXZ-1000  $\times 12$ 。上部主梁两

端分别限制其竖向与横向位移,并约束其绕  $Y$ 、 $Z$  轴转动。为简便计算,不计桩-土结合作用,格构墩墩底按固接方式模拟。全桥共有 1 059 个节点,1 423个单元,三维有限元模型如图 3 所示。

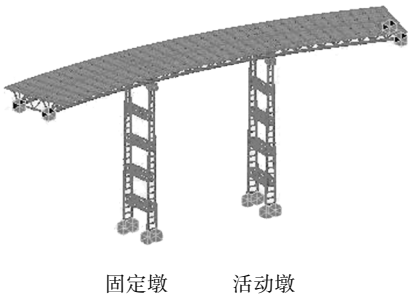


图 3 有限元模型(B-0)

Fig.3 Finite element model of bridge (B-0)

1.3 地震波输入

地震波作为一种地震动激励荷载,能否选择正确合理、适当的地震波是结构抗震性能判断的主要因素之一。

由于该桥址位置处没有相应的地震动记录,结合选波原则,选取 E1-centro 为地震波激励荷载。根据《中国地震动参数区划图》<sup>[8]</sup>和《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[9]</sup>有关条文规定,加速度峰值(PGA)为 0.086 g,仅考虑顺桥向地震工况。

2 全桥地震响应分析

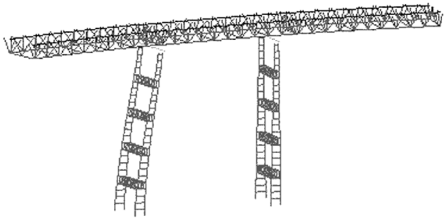
2.1 自振特性分析

为了掌握钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥的动力特性,有必要对该类新型梁桥结构进行振型模态分析。一般情况下前几阶振型对结构的动力特性影响起到决定性作用,因此对该类新型梁桥结构进行前几阶振型特性分析显得十分重要。篇幅局限,仅列出前 5 阶振型信息,详见表 1 和图 4。

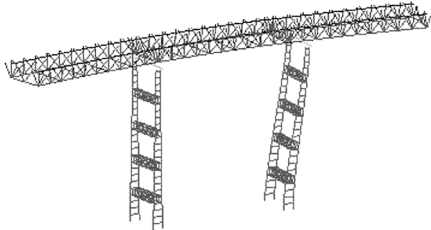
表 1 格构式高墩连续弯梁桥前 5 阶振型特性  
Tab.1 characteristics of the first 5 modes the curved beam bridge with latticed high-rise piers

| 模态号 | 频率/Hz | 周期/s | 振型描述        |
|-----|-------|------|-------------|
| 1   | 0.16  | 6.28 | 固定墩一阶纵向弯曲   |
| 2   | 0.76  | 1.31 | 活动墩一阶纵向弯曲   |
| 3   | 0.92  | 1.09 | 两个桥墩横向弯曲    |
| 4   | 1.16  | 0.86 | 两个桥墩均纵向扭转弯曲 |
| 5   | 1.7   | 0.61 | 主梁横向扭转弯曲    |

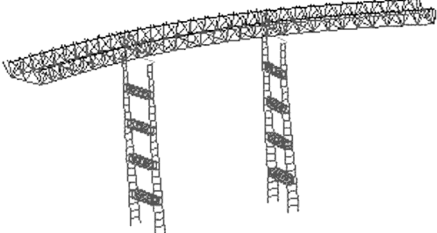
由表 1 和图 4 振型特性和模态信息可知:该类新型梁桥结构前四阶振型特性均表现为固定墩或活动墩弯曲变形,说明该类新型弯梁桥结构主梁空间桁架刚度较大,下部桥墩刚度相对较柔(尤其是纵向方向);另一方面,结构的自振周期特征数值表明,第一阶振型频率为 0.16 Hz,周期



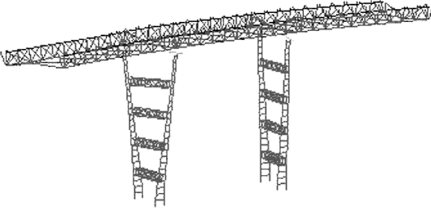
(a) 第一阶振型( $T=6.28$ )



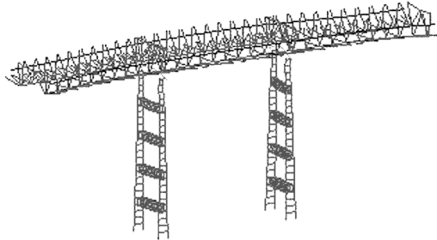
(b) 第二阶振型( $T=1.31$ )



(c) 第三阶振型( $T=1.09$ )



(d) 第四阶振型( $T=0.86$ )



(e) 第五阶振型( $T=0.61$ )

图 4 格构式高墩连续弯梁桥前五阶振型图

Fig.4 Diagram of the first 5 modes the curved beam bridge with latticed high-rise piers

长达 6.28 s,说明钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构整体刚度较柔,可有效避开与较为坚硬的场地产生的共振效应,有效减小结构的破坏几率具有良好的抗震性能。与文献[10]该类直梁桥结构的振型特性对比发现,弯桥结构第 5 阶就出现主梁扭转弯曲变形,而直梁桥结构直至第 10 阶才出现主梁弯扭耦合效应,因此应考虑钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥在自重作用下的弯扭耦合效应对整体结构的地震响应影响。

2.2 内力分布规律

桥梁结构地震响应分析时,通常选取结构的弯矩、轴力、剪力和位移等指标作为构件控制截面设计或抗震性能评价依据。通过对钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构的受力初步分析,桁梁下弦管和格构墩柱肢分别是主梁和桥墩的主要受力杆件;格构墩缀管主要起到连接柱肢构件的作用。

为了明确该类桥梁梁、墩控制截面位置,对模型进行地震响应内力分布规律探讨。结果表明格构墩柱肢对应的同一截面位置处单元内力值相差甚小,且桁梁结构也类似。因此,分别选取梁、墩同一截面位置处单元的内力平均值做为截面响应值。在顺桥向 E1 地震作用下,梁、墩典型截面的响应峰值见表 2,各个指标包络图如图 5~9 所示。

表 2 桥墩和主梁截面内力值  
Tab.2 Internal force values of the cross section between the pier and the main beam

| 结构 | 截面位置 | 弯矩 $M_y$ / (kN · m) | 扭矩 $M_z$ / (kN · m) | 剪力 / kN | 轴力 / kN | 位移 / mm |
|----|------|---------------------|---------------------|---------|---------|---------|
| 主梁 | B1   | 1 535               | 840                 | 2 921   | 10      | 212     |
|    | B2   | 26 331              | 554                 | 1 386   | 54      | 212     |
|    | B3   | 32 696              | 632                 | 4 431   | 184     | 213     |
|    | B4   | 32 696              | 503                 | 4 431   | 86      | 213     |
|    | B5   | 26 332              | 553                 | 1 386   | 39      | 213     |
|    | B6   | 1 535               | 840                 | 2 921   | 9       | 213     |
| 桥墩 | P1   | 378                 | 111                 | 77      | 9 541   | 0       |
|    | P2   | 342                 | 71                  | 127     | 5 353   | 213     |
|    | P3   | 201                 | 104                 | 50      | 6 955   | 0       |
|    | P4   | 102                 | 86                  | 44      | 4 625   | 60      |

结合上述图表计算数值可知,E1 地震作用下,钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥主梁典型

截面位置处的弯矩和剪力值基本对称分布,梁端(P1)为主梁扭矩峰值截面,扭矩值占弯矩值的 54.7%,因此不可忽视主梁的弯扭耦合效应。对于钢管混凝土格构墩,固定墩典型截面处的各个地震响应值均比活动墩高,且墩底径向、切向弯矩、轴力指标均比墩顶截面位置大。根据多遇地震下结构的内力分布规律,分别选取固定支座处作为主梁弯矩控制截面,梁端处作为主梁扭矩控制截面,并选取 P1 截面位置处的径向、切向弯矩值、轴力值以及 P2 截面处的位移值作为格构墩抗震控制截面依据指标。

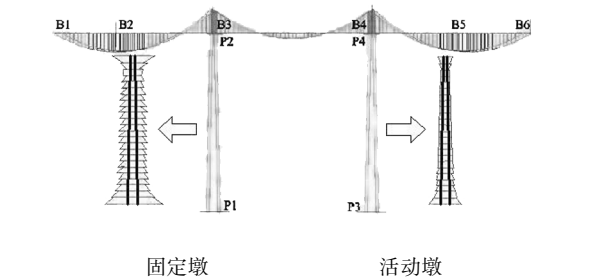


图 5 切向弯矩包络图  
Fig.5 The envelope diagram of tangential bending moment

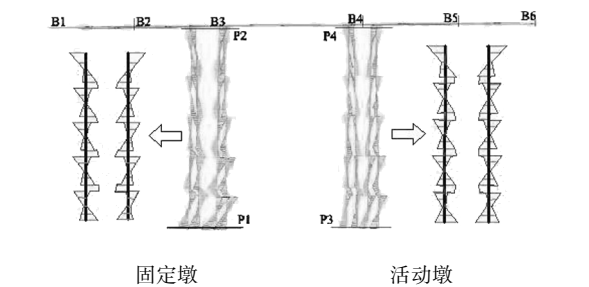


图 6 径向弯矩包络图  
Fig.6 The envelope diagram of the radial bending moment

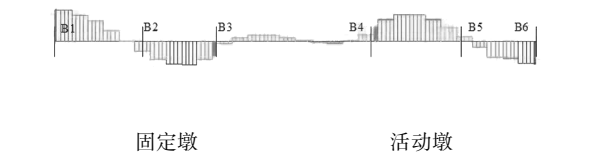


图 7 主梁扭矩包络图  
Fig.7 The envelope diagram of the main beam's torque moment

3 地震波激励角度影响分析



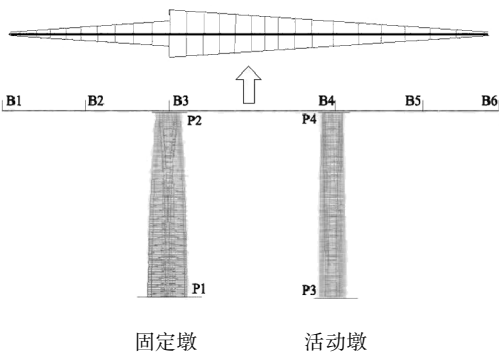


图 8 格构墩轴力包络图

Fig.8 The envelope diagram of the latticed pier's axial force

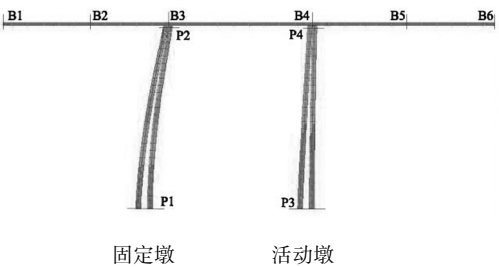


图 9 格构墩位移图

Fig.9 Displacement diagram of the latticed pier

2008) [9] 规定:对于直梁桥结构进行地震响应分析时,可分别考虑纵桥向和横桥向两个水平方向工况即可;曲线梁桥应分别沿着主梁支座连线和垂直于连线水平方向进行多方向地震输入分析计算,从而确定最不利输入方向。

本小节以地震波激励角度为参数,分析不同的激励方向对新型钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥地震响应值的影响规律,从而确定该类新型梁桥结构的最不利地震激励角度。规定两端支座中心连线方向为  $X$  方向,桥面内与之垂直的为  $Y$  方向,沿墩高方向为  $Z$  轴。两桥台连线方向为  $0^\circ$ ,每次递增  $15^\circ$ 直至入射角度为  $90^\circ$ (结构的对称性)。在不同的地震激励角度下,梁、墩控制截面的响应峰值和柱状图详见表 3 和图 10~ 13 所示。

由表 3 和图 11~ 14 可知,不同地震波激励角度下,固定墩控制截面位置处的切向弯矩、轴力和墩顶位移响应值指标均随着地震波输入角度的大小而逐渐减小,近似呈余弦变化规律曲线,当激励角度从  $0^\circ$ 增大到  $90^\circ$ 时,切向弯矩值、轴力值和墩顶位移值分别减小了  $91.3\%$ 、 $28.8\%$ 、 $31.5\%$ ;相反,桥墩的径向弯矩值随着激励角度从  $0^\circ$ 到  $90^\circ$ ,

表 3 不同激励角度下的控制截面响应峰值

Tab.3 Peak response values under different incentive angles

| 激励<br>角度/<br>( $^\circ$ ) | 主梁内力/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}$ ) |     | 桥墩弯矩/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}$ ) |     | 桥墩<br>轴力/<br>kN | 桥墩<br>位移/<br>mm |
|---------------------------|---|-----|---|-----|-----------------|-----------------|
|                           | 弯矩                                      | 扭矩  | 弯矩                                      | 扭矩  |                 |                 |
| 0                         | 32 696                                  | 840 | 378                                     | 111 | 9 541           | 213             |
| 15                        | 32 702                                  | 841 | 366                                     | 210 | 9 480           | 203             |
| 30                        | 32 710                                  | 844 | 333                                     | 409 | 9 311           | 189             |
| 45                        | 32 716                                  | 847 | 276                                     | 611 | 8 873           | 172             |
| 60                        | 32 721                                  | 850 | 202                                     | 771 | 8 260           | 156             |
| 75                        | 32 724                                  | 851 | 114                                     | 878 | 7 509           | 146             |
| 90                        | 32 724                                  | 852 | 33                                      | 923 | 6 796           | 146             |

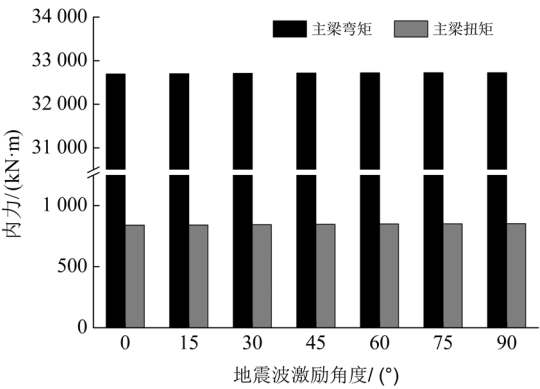


图 10 不同激励角度下的主梁内力峰值

Fig.10 Peak internal values of the main beam under different incentive angles

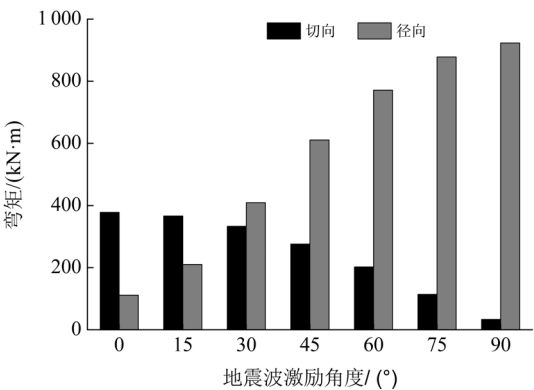


图 11 不同激励角度下的桥墩弯矩峰值

Fig.11 Bending moment's peak values of the pier under different incentive angles

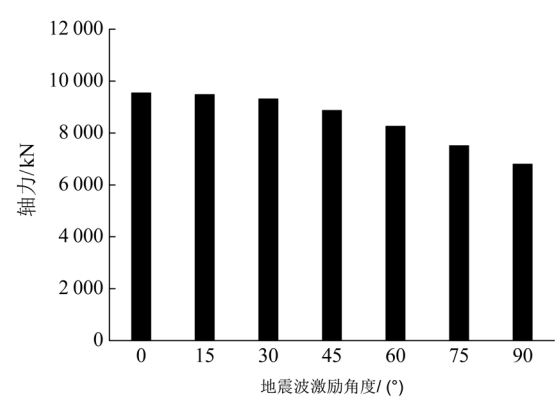


图 12 不同激励角度下的桥墩轴力峰值  
Fig.12 Axial force's peak values of the pier under different incentive angles

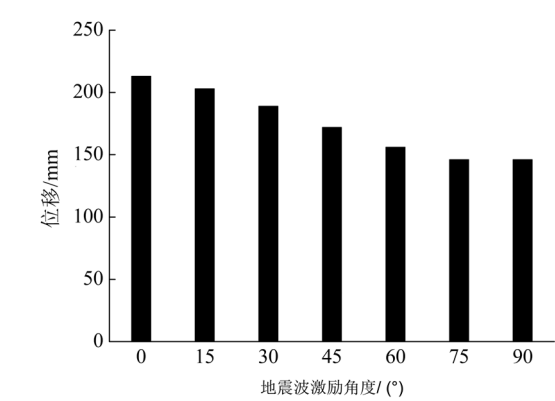


图 13 不同激励角度下的桥墩位移峰值  
Fig.13 Displacement's peak values of the pier under different incentive angles

参考文献：

[1] 袁辉辉,吴庆雄,陈宝春,等.平缀管式等截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验与有限元分析[J].工程力学,2016,33(10):226-235.

[2] 王阳春,徐秀丽,李雪红,等.小半径匝道曲线梁桥地震响应分析[J].世界地震工程,2014,30(1):154-159.

[3] 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.

[4] 梅志军,李爽,吴浪.直桥与弯桥动力特性对比分析[J].山西建筑,2009,35(26):311-312.

[5] 吴颖平.地震作用下曲线连续梁桥动力性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

[6] 滕军,吕海霞,吴红军,等.高墩小半径曲线梁桥抗震分析的若干问题探讨[J].工程抗震与加固改造,2008,30(5):55-60.

[7] 宋波,潘建仕.基于 Pushover 法的曲线桥地震波输入最不利角度分析[J].北京科技大学学报,2008(11):1223-1229.

[8] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.中国地震动参数区划图:GB 18306-2015[S].北京:中国标准出版社,2016.

[9] 中华人民共和国交通运输部发布.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.

[10] 林建茂.钢管混凝土格构式高墩连续梁桥抗震性能及抗震设计研究[D].福州:福建工程学院,2018.

增大了约 731.5%;主梁弯矩和扭矩值几乎不受激励角度变化影响。根据上述影响规律,对于钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构,选取 0°和 90°作为最不利地震激励角度工况。

4 结论

以钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥为研究对象,探讨了该类新型桥梁结构的动力特性、E1 地震作用下的内力分布规律、以及不同地震波激励角度对全桥地震响应的影响规律,得到以下几点结论：

- 1) 钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥结构刚度较柔、周期长,抗震性能良好;曲率半径产生的弯扭耦合效应不可忽视。
- 2) 钢管混凝土桁梁下弦管固定支座处是主梁弯矩的控制截面,主梁扭矩最大值处于梁端位置;固定墩墩底是钢管混凝土格构墩弯矩和轴力的控制截面,桥墩剪力和位移最大值位于固定墩墩顶。
- 3) 桥墩切向弯矩、轴力和墩顶位移最大值均出现在 0°激励角度,桥墩径向弯矩最大值出现在 90°。因此,可选取支座连线方向和与之垂直的方向作为钢管混凝土格构式高墩连续弯梁桥的最不利激励角度。