

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.06.001

# 钢管混凝土双肢格构墩梁桥抗震优化设计

欧智菁, 俞杰, 林上顺, 王金泽

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:**以黄楠湾特大桥为工程背景,选取轴压比、梁墩刚度比、系梁布置形式及柱肢混凝土强度等级为设计参数,应用 Midas Civil 有限元软件构造了 20 座三跨对称桥梁计算模型。研究 E1 地震作用下钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥主要控制截面参数地震响应,探讨各设计参数对钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥抗震性能的影响规律,并对全桥进行优化验证。研究结果表明:轴压比对地震作用下结构内力和位移有一定影响,建议控制在 0.15~0.25;梁墩刚度比对结构的抗震性能影响较大,控制在 4.08~10.90 时结构的内力分布更加合理;核心混凝土的强度在 C40~C50 时取值较为合理。

**关键词:** 钢管混凝土;双肢格构墩;抗震性能;抗震优化设计;梁墩刚度比

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)06-0511-07

## Seismic optimization design of beam bridge of concrete filled steel tubular two-element laced pier

OU Zhijing, YU Jie, LIN Shangshun, WANG Jinze

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

**Abstract:** With the Huangjuewan grand bridge as engineering background, taking axial compression ratio, stiffness ratio of beam and pier, layouts of lacing tubes and strength grade of column concrete as design parameters, 20 finite element models of three-span symmetric bridges were built by using Midas Civil engineering software. The seismic response of the major control section parameters of continuous beam bridges with concrete-filled steel tube two-element laced pier under the action of E1 earthquake was studied. Effects of the design parameters on the seismic performance were discussed, and the whole bridge was optimized and validated. Research results show that the axial pressure ratio has certain effects on the internal force and displacement of the structure under the action of earthquake and is suggested to be controlled during 0.15 and 0.25; the beam-pier stiffness ratio has a great effect on the seismic performance of the structure, and the internal force distribution of the structure is more reasonable when it is controlled within the range of 4.08~10.90; the strength of core concrete is reasonable with its value being among C40 to C50.

**Keywords:** concrete-filled steel tube (CFST); two-element laced pier; seismic performance; seismic optimization design; stiffness ratio of beam and pier

## 引言

钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥是采用钢管混凝土系梁连接的双肢钢管混凝土格构式新型组

合桥墩,因其承载力高、刚度大、延性和耗能性能好、施工便捷,在地震作用下能有效减少各柱肢承受的弯矩和剪力,提高结构整体受力性能,在我国西南地区被广为应用<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2019-03-18;修回日期:2019-04-09  
基金项目: 国家自然科学基金项目(518781722);福州市科技项目(2018-G-64);福建工程学院科研发展基金(GY-Z17148)  
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。

钢管混凝土格构墩的主要类型有双肢格构墩、四肢格构墩、四肢叠合格构墩 3 种结构形式。目前国内对钢管混凝土四肢格构墩(叠合格构墩)及四肢格构式高墩桥梁抗震性能和抗震设计方面的研究较为丰富。文献[4-6]通过四肢钢管混凝土斜缀管式和平缀管式格构柱的拟静力与拟动力试验,探讨了该类构件的抗震性能,研究了构件承载力、延性、滞回特性、刚度退化、耗能大小和破坏特征。文献[7-8]以不同形式的缀管和柱肢坡度为参数,通过四肢变截面钢管混凝土格构柱低周反复荷载试验研究结合有限元参数分析对结果进行拓展,得到了适合工程实例应用的四肢变截面钢管混凝土格构柱骨架曲线和恢复力模型的计算方法。文献[9]以实际工程为背景,按比例制作了两跨干海子大桥的结构模型,运用地震模拟振动台台阵系统,对该类桥梁的动力特性、耗能性能及失效破坏机理进行研究。文献[10-11]以干海子大桥实桥为研究对象,开展了结构的非线性地震响应数值分析、自振频率和振型分析,探讨了格构墩出现塑性铰的位置和顺序,分析了桥墩进入塑性后的内力重分布效应。文献[12-14]对钢管混凝土四肢格构墩连续直梁桥和弯梁桥的弹塑性抗震性能、各主要设计参数(梁墩刚度比、柱肢坡度、缀管布置形式、曲率半径等)的抗震适用性以及结构抗震设计简化算法等开展研究。文献[15-17]分别以腊八斤特大桥和黑石沟特大桥为背景,对钢管混凝土叠合格构式高墩连续刚构桥进行抗震性能分析,总结了该类桥梁的地震响应特点,研究了墩高、曲率半径和横向连接系等设计参数对结构动力性能的影响规律。

上述文献主要针对钢管混凝土四肢格构柱及四肢格构式高墩桥梁的抗震性能开展试验和理论研究,而对于工程中已有应用的钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥,目前国内可见文献仅[18]以黄桷湾立交桥为工程背景,介绍了高墩大跨斜弯桥中钢管混凝土单肢柱和双肢格构柱的设计要点和施工方法,而关于钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥全桥整体抗震性能和抗震设计方法的研究罕有报道。

为此,以重庆南岸区黄桷湾立交桥为工程背景,从 E1 地震弹性时程分析出发,探讨钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥的地震特性,系统研究各主要设计参数对全桥动力特性响应的影响规律及

其抗震适用性,为该类型桥梁的抗震优化设计提供有益参考和借鉴。

## 1 有限元分析模型建立

### 1.1 工程概况

重庆黄桷湾立交工程是三横线、内环高速及机场高速相交形成的五路交叉枢纽型立交,抗震设防烈度为 6 度,一类场地。主线桥分左右两幅,桥宽 24 m,最大跨度 50 m。上部结构为预应力混凝土单箱梁,下部采用钢管混凝土单肢墩和双肢格构墩(见图 1),最大墩高 36 m。双肢格构墩截面尺寸为  $3.6\text{ m} \times 1.9\text{ m}$ ,钢管混凝土柱肢采用  $\Phi 1\ 500\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  钢管,管内灌注 C40 混凝土。柱肢间每隔 1 m 采用一道钢管混凝土系梁连接。全桥钢管均为 Q345 钢材。



图 1 黄桷湾立交桥双肢格构墩

Fig.1 Two-element laced pier of Huangjuewan overpass

### 1.2 有限元建模

以黄桷湾大桥为工程背景,运用 Midas Civil 建立三跨一联的连续梁桥,跨度为 50 m,墩高为 36 m,桥面纵坡 2%。全桥共有 305 个节点,296 个单元。桥墩均采用梁杆单元模拟,桥面铺装以等恒载施加在桥面单元上,大小为  $33.8\text{ kN/m}$ 。桥墩固定支座和盆式支座均运采用不同的弹性连接刚度值进行模拟。除了主梁梁端纵向和绕 X 轴转动方向外,其余各个方向的自由度均受约束。同时,不考虑桩与土之间的作用关系,墩底约束按固接方式进行模拟。有限元模型如图 2 所示。

### 1.3 地震波输入

遵循频谱特性、记录峰值和持时时间三大准则作为选波的依据指标,选取三条常见的天然地震波:E1-centro、Taft、Northridge 地震波。根据《中

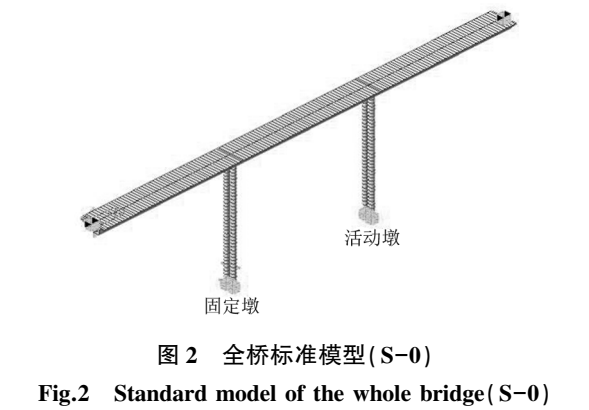


图 2 全桥标准模型 (S-0)

Fig.2 Standard model of the whole bridge(S-0)

国地震动参数区划图》<sup>[19]</sup> 和《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[20]</sup> 及抗震设防设计文件要求, 抗震设防的烈度为 6 度, 顺桥向的地震工况需要考虑。

2 结构动力响应

2.1 自振特性分析

动力特性对结构地震响应的影响较明显, 同时对其起决定性的作用是结构的前几阶自振频率和振型特征。采用 Rize 法对结构进行特性计算, 前 6 振型形态和自振信息详见表 1 及图 3。

表 1 S-0 标准模型前 6 振型动力特征  
Tab.1 Dynamic characteristics of the first six vibration modes of the S0 standard model

模态号	频率/Hz	振型描述
1	0.153	固定墩纵向弯曲
2	0.767	活动墩纵向弯曲
3	1.132	梁墩横向弯曲
4	1.400	固定墩二阶纵向弯曲

由表 1 和图 3 可见, 第 1 阶振型频率为 0.153 Hz, 周期  $T$  达 6.54 s, 钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥结构周期较长, 振型特征体现了固定墩纵向变形的能力, 同时纵桥向的刚度相对较小, 地震的能量大部分由桥墩弯曲变形来消耗。通过分析结构的前 6 阶振型可知, 钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥比较柔、周期较长, 因此地震荷载作用下与坚硬场地发生共振的概率低, 从而能有效地控制结构不受破坏。

2.2 内力分布规律

选用结构的重要指标(弯矩、轴力和位移率

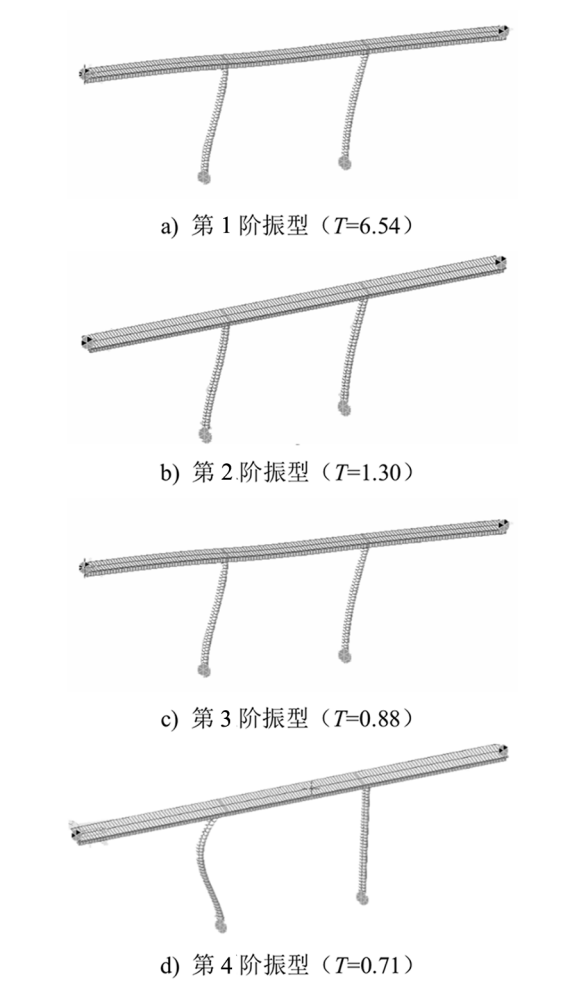


图 3 S-0 标准模型振型图

Fig.3 S-0 standard model's vibration diagram

等)作为结构抗震性能评判的依据, 探讨标准模型 S-0 的地震响应内力分布规律以明确双肢格构墩连续梁桥的控制截面的位置, 对结构主要截面的受力机理进行初步分析。在顺桥向 E1 地震作用下, 上部结构与下部结构内力和位移计算结果见表 2 及图 4。

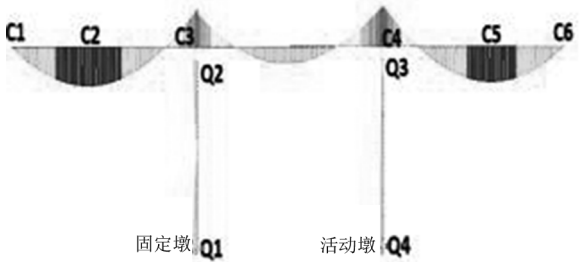


图 4 弯矩包络图

Fig.4 Moment envelope diagram

表 2 钢管混凝土桥墩典型截面响应峰值

Tab.2 Response peak values of typical sections of CFST pier

结构	截面位置	弯矩/ (kN·m)	剪力/ kN	轴力/ kN	位移/ mm
主梁	C1	3.69	5 992	3.20	281
	C2	68 790	2 230	330	281
	C3	70 842	10 508	645	281
	C4	70 842	10 508	645	281
	C5	68 790	2 230	330	281
	C5	3.69	5 992	3.20	281
桥墩柱肢	Q1	14 826	721	8 929	0
	Q2	10 712	683	8 930	281
	Q3	7 823	409	8 726	0
	Q4	1.37	271	8 727	73
系梁	墩顶	2 436	703	1.6	25
	0.5H	1 743	718	2.3	32
	墩底	2 154	267	2.8	36

结合表 2 和图 4 可以看出,E1 地震作用下钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥上部主梁的弯矩值、剪力值、轴力值均以中轴线为分界,在其两边大致呈对称分布,在支座位置处部分是有些差异的。同时固定墩墩顶安设的固定支座承担了大部分的主梁内力,导致在固定墩位置主梁的轴力、剪力和弯矩均为最大。

结合表 2 和图 4 可见,对于下部钢管混凝土双肢格构墩,固定墩柱肢截面的各个内力值和位移指标均比活动墩大 10%~25%;钢管混凝土双肢格构墩间的联系梁的弯矩、轴力和剪力值均很小,可视为弹性阶段。比较系梁与柱肢地震响应值大小可知,钢管混凝土柱肢为主要的受力构件。

所以,主梁控制截面指标选取固定墩墩顶 C3 截面的弯矩,同时桥墩控制截面抗震性能与抗震设计的依据,分别选取固定墩墩底 Q1 截面位置处的弯矩和轴力值以及固定墩墩顶 Q2 截面处的位移值作为参考指标。

3 概念设计参数的抗震适用性

考虑桥梁结构内力响应特性的影响,选取主要选控制截面的梁墩弯矩、桥墩轴力和墩顶位移作为抗震性能评价依据,分别探讨 E1 地震作用下各设计参数(轴压比、梁墩刚度比、系梁布置形

式以及混凝土强度等)对钢管混凝土双肢格构墩抗震性能的影响规律。

3.1 轴压比

选取适当的轴压比对桥梁设计至关重要,在保持其余参数与标准模型一致情况下,通过改变上部结构恒载,将轴压比  $n$  分别设为 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 和 0.35,在顺桥向的地震荷载作用下,各控制截面的地震响应峰值及曲线图见图 5-图 7。

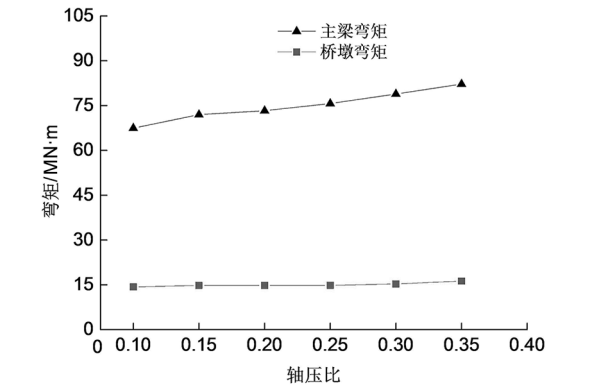


图 5 不同轴压比下弯矩值比较  
Fig.5 Comparison of the bending moments under different axial compression ratios

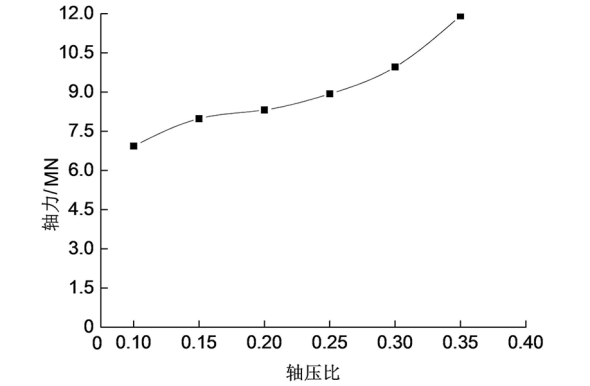


图 6 不同轴压比下桥墩轴力  
Fig.6 Axial forces of the pier under different axial compression ratios

由图 5-图 7 数据可知:钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥中,墩梁控制截面的内力值受轴压比参数变化影响明显,当轴压比从 0.10 增大到 0.35 时,主梁弯矩、桥墩弯矩值与轴力值分别增大了 21.9%、13.8% 和 72.0%。分析其原因,是由于随着轴压比值的增大,结构的自重会有所增加,这样地震力的作用增强,故提高了结构的内力值。



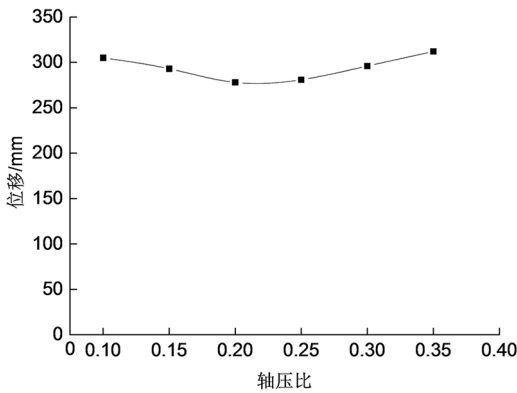


图 7 不同轴压比下桥墩位移

Fig.7 Displacements of the pier under different axial compression ratios

从图 7 数据还可以看出,对于钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥,其控制截面的墩顶位移值受轴压比参数影响不明显,响应峰值均在稳定值上下波动,在轴压比满足  $0.15 \leq n \leq 0.25$  时,桥墩位移值较小。综合上述内力和位移计算结果,建议钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥进行地震影响设计时,轴压比数值宜取介于  $0.15 \sim 0.25$ ,可使得该类桥梁结构的地震响应峰值有效降低。

### 3.2 梁墩刚度比

合梁墩刚度比值对结构的抗震性能的影响较大,同时梁墩刚度一定程度上决定了梁墩的内力分布。本节通过调整钢管混凝土双肢格构墩墩高 (25、36、50、65、75 m) 来改变梁墩刚度比值,  $R_1$  为梁墩纵向刚度相对比值大小。在承载力均满足要求的情况下选取  $1.37 \leq R_1 \leq 36.90$ 。内力值及曲线图见图 8 – 图 10。其中  $N/N_u$  为柱肢轴力与承载力之比; $\Delta/H$  为桥墩位移与墩高之比即位移率。

$$R_1 = \frac{2 E_G I_G H_i^3}{L^3 \left( \sum_{i=1}^2 E_p I_p \right)} \quad (1)$$

式中:  $E_G I_G$  为主梁纵向抗弯刚度,  $L$  为桥的全长;  $E_p I_p$  为桥墩纵向抗弯刚度,  $H_i$  为第  $i$  个桥墩的墩高。

由图 8、图 9 可知,对于钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥, E1 地震作用下结构控制截面处的主梁弯矩和双肢格构墩轴力响应值几乎不受梁墩刚度比参数影响 (随着墩高和梁墩刚度比的增大,格构墩承载力略有下降,因而轴力与承载力之比  $N/N_u$  小幅提升了 13.7%)。由图 8 还可看出,格构

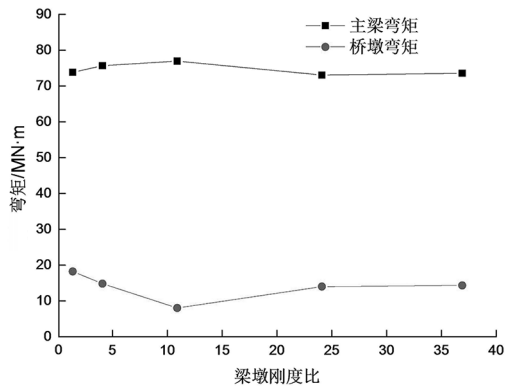


图 8 不同梁墩刚度比 ( $R_1$ ) 弯矩值

Fig.8 Bending moments under different beam-pier stiffness ratios ( $R_1$ )

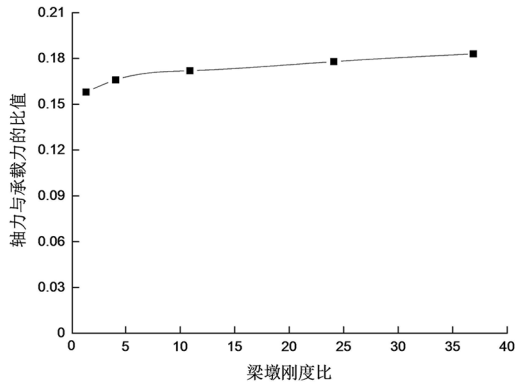


图 9 不同梁墩刚度比 ( $R_1$ ) 桥墩轴力与承载力的比值

Fig.9 Ratio of axial force to bearing capacity of the bridge pier ( $N/N_u$ ) under different beam-pier stiffness ratios

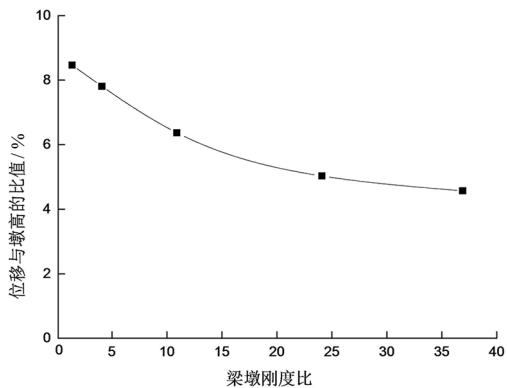


图 10 不同梁墩刚度比桥墩位移率

Fig.10 Ratio of displacement to pier under different beam-pier stiffness ratios ( $R_1$ )

墩弯矩受梁墩刚度比 ( $R_1$ ) 的影响较大,呈分段式:当  $R_1$  从 1.37 增大到 10.90 时,钢管混凝土双肢格构墩控制截面处的墩底弯矩值急剧下降了

55.9%,当 $R_1$ 由10.90增大到36.90时,墩底弯矩增大了约43.9%。由图10可知,格构墩墩顶位移受梁墩刚度比影响很大,随着 $R_1$ 由1.37增大到36.90时,桥墩位移持续增大了61.3%,位移率(墩顶位移与墩高比值 $\Delta/H$ )则持续降低,幅值达46.1%。

综上分析,梁墩刚度比 $R_1$ 对钢管混凝土双肢格构墩地震响应有较大的影响,刚度是影响结构的地震响应的重要原因;当 $R_1$ 较小时,结构刚度较大,此时地震响应对结构的影响较为敏感;反之,随着墩高的增加 $R_1$ 增大,结构的刚度变柔,内力分布更为均匀,桥墩位移小幅增加,更多的能量由桥墩变形耗散,而位移率降低;当 $R_1$ 继续增大超过一定限值( $R_1 \geq 10.90$ )时,桥梁结构整体稳定性明显下降,桥墩内力相对增加,尤其是桥墩弯矩值急剧上升。所以,建议在进行抗震设计时,梁墩刚度比值 $R_1$ 宜选取4.08~10.90之间,这样既可确保各项地震响应值的合理性,又可避免因桥墩的脆性破坏。

3.3 柱肢混凝土强度

承载力的大小主要受到钢管混凝土双肢格构墩柱肢混凝土强度等级的影响,在顺桥向E1地震作用下,不同混凝土强度等级(C40、C50、C60、C70、C80)的地震响应值见表3。

表 3 不同柱肢混凝土强度等级的各指标响应峰值  
Tab.3 Response peak values under different concrete strength grades of longitudinal elements

混凝土 强度等级	主梁弯矩/ (kN·m)	桥墩弯矩/ (kN·m)	桥墩轴力/ (kN)	桥墩位移/ (mm)
C40	75 683	14 826	8 930	281
C50	75 679	15 372	9 072	280
C60	75 683	15 963	9 237	281
C70	75 673	16 538	9 365	281
C80	75 681	16 637	9 671	282

由表3可以看出:对于钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥,主梁控制截面位置处的弯矩值及桥墩位移基本受下部双肢格构墩的柱肢核心混凝土强度变化的影响可以忽略,变化幅值仅在1%~2%之间;当核心混凝土强度等级由C40增加到C80时,双肢格构墩墩底控制截面位置处的弯矩

和轴力对应的内力值分别增大了12.1%、8.3%。分析其原因,双肢格构墩柱肢核心混凝土弹性模量随其强度的提高而提高,构件整体刚度也相应提升,因此在顺桥向地震力的作用下,分配到桥墩的弯矩和轴力值都呈现出不同程度的增大趋势。因此,在进行结构抗震设计时,核心混凝土强度等级不宜过高,控制在C40~C50时较为合理。

4 桥梁抗震优化设计

为验证提出的钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥主要设计参数抗震适用性以及研究结论的合理性,对黄桷湾大桥的实桥进行抗震优化。稳定主梁参数不变下,调整上部结构恒载以改变轴压比,减小柱肢直径大小以增大梁墩刚度比值,提高混凝土强度等级以保证承载力基本不变,具体设计参数见表4。在顺桥向E1地震作用下,对比实桥梁墩控制截面的地震响应峰值,对比结果见表5及图11、图12。

表 4 钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥参数优化  
Tab.4 Parameter optimization of continuous beam bridge of CFST two-element laced pier

设计参数	轴压比	梁墩刚度比	柱肢混凝土强度
标准模型	0.25	4.08	C40
优化模型	0.20	6.27	C50

表 5 优化前后各响应峰值对比结果  
Tab.5 Comparison of peak response values before and after optimization

模型	主梁弯矩 /(kN·m)	桥墩弯矩 /(kN·m)	桥墩轴力 /kN	桥墩位移 /mm
标准模型	76 176	14 826	8 930	281
优化模型	74 371	11 324	8 754	253

由表5和图11、图12可知,设计参数优化后的钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥结构,各指标的地震响应值均呈不同幅值的下降趋势,主梁弯矩、桥墩弯矩、桥墩轴力和位移值分别减小了2.4%、23.6%、2.0%和10.0%。由此可见,根据建议的设计参数取值范围进行抗震优化设计后,可有效改善钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥结构内力分布,提高全桥抗震性能。

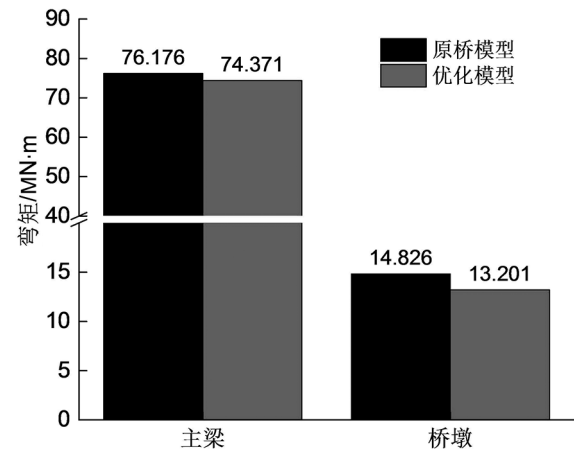


图 11 优化前后梁墩弯矩对比

Fig.11 Comparison of bending moments of beam and pier before and after optimization

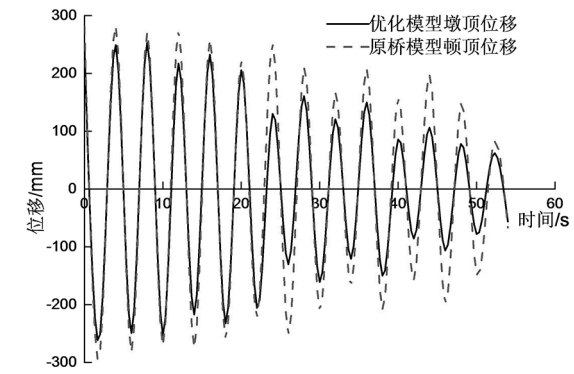


图 12 优化前后墩顶位移时程图比较

Fig.12 Comparison of time history diagram between displacements on the pier's top section before and after optimization

5 结论

对钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥上述的主要的抗震设计参数进行深入研究得以下结果：

1) 钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥结构周期较长,振型特征体现了固定墩纵向变形的能力,同时纵桥向的刚度相对较小,地震的能量大部分由双肢格构墩弯曲变形来消耗。

2) 下部钢管混凝土格构墩柱肢是桥墩的主要承载力构件,钢管混凝土平型系梁起到连接柱肢构件作用,非主要承重结构。固定支座处是主梁弯矩值的控制截面,固定墩墩底为钢管混凝土双肢格构墩弯矩和轴力的主要控制截面,固定墩墩顶为桥墩位移的控制截面。

3) 梁墩刚度比值对结构的抗震性能的影响较大。随着梁墩刚度比值的逐渐增大,双肢格构墩的地震响应值先出现急剧下降趋势之后又略有上升现象,梁墩刚度比 ( $R_1$ ) 宜控制在 4.08 ~ 10.90,可适当提高结构抗震性能,内力分布更加合理;轴压比 ( $n$ ) 对地震作用下结构内力和位移有一定影响,宜控制在 0.15~0.25,建议可采用轻型的钢-混凝土组合梁或钢管混凝土桁梁。

4) 随着柱肢混凝土强度等级的提高,钢管混凝土双肢格构墩连续梁桥的桥墩弯矩与轴力值有较大幅度增加,因此在实际工程中,核心混凝土的强度不宜过高,介于 C40~C50 时较为合理。

5) 根据给出的结构参数建议范围,对黄桷湾大桥结构进行抗震优化设计。由上述结果可知,优化后地震作用下结构的内力分布得到较大改善,同时,使结构的抗震性能得到有效提升。

参考文献：

[1] 杜福广. 双柱式钢管混凝土桥墩和钢筋混凝土圆柱的稳定性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.

[2] 范立础,卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.

[3] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.

[4] 邓萱奕. 钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.

[5] 罗瑶. 四肢钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.

[6] 吕银花. 平缀管式等截面钢管混凝土格构柱滞回性能研究[D]. 福州:福州大学, 2015.

[7] 欧智菁,陈盛富,吴庆雄,等. 变截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(3): 77-83.

[8] 陈盛富. 四肢变截面钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D]. 福州:福建工程学院, 2017.

[9] 吴庆雄,黄育凡,陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 89-96.

[10] 黄育凡. 钢管混凝土组合桁式梁-格构式高墩连续梁桥非线性地震性能研究[D]. 福州:福州大学, 2011.

[11] 张翀. 钢管混凝土桁架梁桥地震反应分析[D]. 成都:西南交通大学, 2011.