

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.09.011

钢管混凝土格构式高墩连续梁桥抗震设计

欧智菁, 林建茂, 林上顺, 林文

(福建工程学院 土木工程学院, 福州 350118)

摘要:以干海子特大桥为工程背景,选取不同的结构设计参数,包括墩高、柱肢坡度、轴压比、支主管管径比、平缀管竖向间距、柱肢含钢率、横撑道数、墩顶柱肢间距及柱肢截面形式,采用 midas civil 有限元软件构造 34 座三跨对称连续梁桥作为计算模型,进行 E1 弹性地震响应分析,研究结构设计参数对钢管混凝土格构式高墩连续梁桥抗震性能的影响规律和适用性,在此基础上进行全桥优化设计。计算结果表明,优化后的实桥模型可大大降低地震响应,改善结构内力分布。

关键词:钢管混凝土;格构式高墩;连续梁桥;抗震设计

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)09-094-10

Research on seismic design of continuous girder bridge with high piers of concrete filled steel tubular laced column

OU Zhijing, LIN Jianmao, LIN Shangshun, LIN Wen

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

Abstract: The continuous girder bridge with new high piers of Concrete Filled Steel Tubular (CFST) laced column has a broad prospect in the construction of bridges in earthquake area. Based on the engineering background of Gan haizi super-large bridge, 34 finite element models of three span continuous bridge were built by universal program of Midas Civil, with different structure design parameters including the pier height, longitudinal slope, axial compression ratio, diameter ratio of lacing tubes and longitudinal tubes, vertical spacing of flat lacing tubes, steel ratio of longitudinal element, number of bracing element, pier top spacing and section form of longitudinal element etc, and the influence of structural parameters on seismic performance of continuous girder bridge with high piers of CFST laced column and the application scope of these parameters were researched through elastic seismic response analysis on E1 earthquake. Then, optimum design of bridge was carried out on the base of numerical results, and calculation results indicated that seismic response of optimized model reduced greatly.

Keywords: concrete-filled steel tube; high pier with laced column; continuous girder bridge; seismic design

收稿日期:2018-01-08

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);福州市科技计划项目(2018-G-64)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51408128), the Science Foundation of the Fujian Province(2017J01471) and the Fuzhou Science and Technology Project(2018-G-64).

作者简介:欧智菁(1975—),博士,教授,主要从事钢管混凝土组合结构的研究,(E-mail)sina99@163.com。

钢管混凝土格构式高墩连续梁桥凭借其截面尺寸小、承压能力高、变形能力和抗震性能好、延性高、立面造型优美、节约材料等各种特性,已成为地震区高墩公路桥梁的理想桥型之一^[1-2]。对于钢管混凝土格构式高墩桥梁,现行的《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01-2008^[3]及相关的抗震规程均没有给出对应的设计方法,使得其应用缺乏理论基础和技术支撑,迫切需要进行该类桥型抗震设计的基础研究。

国内外对钢筋混凝土高墩大跨桥梁的抗震性能和设计控制研究已有较系统的设计参数分析和基于性能的钢筋混凝土高墩桥梁抗震设计方法^[4-10]。对于新兴发展的钢管混凝土格构式(叠合格构式)高墩桥梁,其动力特性和抗震设计方面的理论研究才刚刚起步。文献[11]以干海子大桥为工程背景,对地震作用下钢管混凝土格构式连续梁桥的抗震性能和地震响应特性进行了数值分析和试验研究,探讨了全桥塑性铰产生机制和内力重分布效应。文献[12-13]分别以腊八斤特大桥和黑石沟特大桥为工程背景,对钢管混凝土叠合格构式高墩连续刚构桥进行结构力学及抗震性能分析,总结了该类桥梁的地震响应特点。

文中以雅泸高速公路干海子特大桥为工程背景,从 E1 地震弹性时程分析出发,系统研究钢管混凝土格构式高墩连续梁桥下部结构各设计参数对结构动力特性响应的影响规律及其抗震适用性,为该类桥梁的弹性抗震优化设计提供借鉴。

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经石棉至泸沽高速公路,桥址地质复杂,处于强震到弱震活动的过渡区。主梁采用钢管混凝土桁梁形式,桥墩采用钢管混凝土组合高墩新型结构,利用高墩的柔性、自重轻等特点来降低结构的地震响应,从而提高结构的抗震性能。全桥共计 36 跨,分 3 联设计,第 1 联共有 11 跨(40.7 m + 9 × 44.5 m + 40.7 m),其中,墩高在 24~50 m 时,选用钢管混凝土格构墩;墩高低于 24 m 时,采用钢筋混凝土双柱式桥墩。第 2 联共 19 跨,分别采用了钢管混凝土格构墩(34~68 m)、钢管混凝土复合墩(在桥墩墩脚 30 m 范围内,设置 40 cm 厚的纵桥向钢筋混凝土腹板连接)和钢筋混凝土双柱墩 3 种桥墩形式。第 3 联 6 跨(31#~35#墩)均为低墩,采用钢筋混凝土双柱墩结构。

1.2 计算对象

为了研究钢管混凝土格构式高墩不同设计参数的抗震适用性,以干海子特大桥第 1 联为工程背景,构造了 3 跨连续梁桥(跨径均为 45 m)。考虑到实桥平曲线半径较大(分别为 356 m 和 1 130 m),建模时简化为直线桥。钢管混凝土格构墩高为 50 m,柱肢纵向坡度为 1:50。桥墩柱肢采用 4 根 $\Phi 720 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 钢管,管内灌注 C50 混凝土,墩顶柱肢截面尺寸为 $1.3 \text{ m} \times 12.25 \text{ m}$,横桥向设置 4 道钢管横撑,纵桥向柱肢采用竖向间距为 2 m 的平缀管连接,横撑弦管及平缀管尺寸均为 $\Phi 406 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,横撑腹杆采用 $\Phi 203 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管。桥宽 24 m,顶板为厚度 20 cm 的预应力混凝土结构,钢管混凝土桁梁高度 4.4 m,主梁下弦杆采用 $\Phi 813 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ 钢管内填 C60 混凝土。钢管腹杆尺寸为 $\Phi 406 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$,全桥钢管均用 Q345 钢材,盖梁采用 C40 混凝土结构。钢管混凝土格构式桥墩和桁架主梁截面形式如图 1 所示。

1.3 有限元计算方法介绍

采用有限元通用软件 Midas Civil,建立了钢管混凝土格构式高墩连续梁桥三维模型,对全桥进行 E1 地震动力时程分析。钢管混凝土桁梁和格构墩均采用空间梁单元进行模拟,选用组合截面。桥面铺装等重量转化为等效质量直接施加在相应节点上。固定墩盖梁与主梁之间采用固定支座 GPZ-12.5GD(SD_x 、 SD_y 、 SD_z 均为 ∞)连接,活动墩选用活动支座 YLXZ-1000 × 12,模拟真实支座约束效应($SD_x = 2.4 \times 10^{13} \text{ kN/m}$ 、 $SD_y = 2.4 \times 10^{13} \text{ kN/m}$ 、 $SD_z = 0$)。为了简化计算,不考虑桩-土结合作用,墩底视为固结形式。假设两边主梁边界均限制其竖向和横向位移,并限制扭转约束及横向弯曲。全桥共有 1 054 个节点,1 834 个单元。全桥材性特征值及有限元标准模型 B-0 分别如表 1 和图 2 所示。

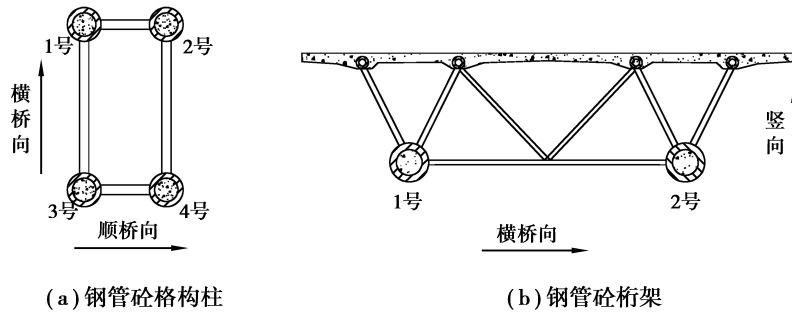


图 1 桥墩与主梁截面形式

Fig.1 Section form of pier and girder

表 1 主要材料特性

Table 1 The main material properties

材料	弹性模量/ MPa	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 μ
C40 混凝土	3.25×10^4	25.0	0.167
C50 混凝土	3.45×10^4	25.0	0.167
C60 混凝土	3.6×10^4	25.0	0.167
钢管	2.06×10^5	76.98	0.300

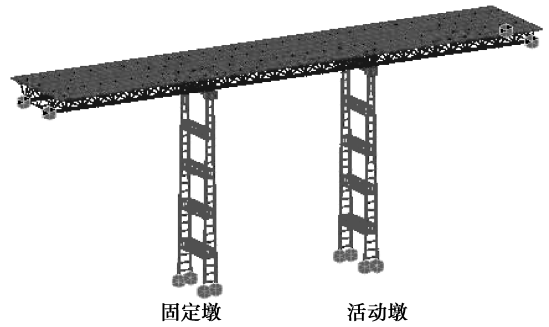


图 2 全桥有限元模型(B-0)

Fig.2 Finite element model of bridge(B-0)

1.4 地震波输入

据《公路桥梁抗震设计细则》JTG/T B02-01-2008^[3]和有关条文规定,干海子大桥为 B 类桥梁,场地土属于 II 类场地,按照 8 度抗震设防烈度要求,分别选择与其地质条件相适应的 3 条地震波: E1 Centro 波、Taft Lincoln School 波和 Northridge 波,加速度峰值 a_{\max} 为 0.086 g。采用时程分析法时,同时,考虑 3 个方向分量的地震作用效应,即荷载工况组合: 1.0(纵)+1.0(横)+0.5(竖)。

2 全桥地震响应分析

桥梁结构抗震设计时,通常选取地震作用下结构单元的弯矩、轴力、剪力和位移值作为设计参考依据。图 3、图 4 为 E1 地震作用下全桥结构的弯矩图和位移图。表 2 列出典型截面的内力值,其中, B1~B6 和 P1~P4 分别表示主梁和桥墩关键截面的编号。根据 B-0 标准模型有限元数值结果,钢管混凝土格构式桥墩

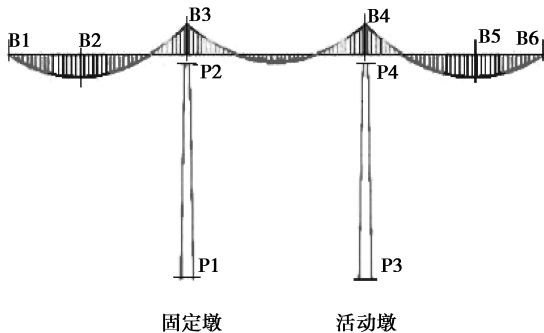


图 3 全桥结构弯矩图(B-0)

Fig.3 Bending moment diagram of bridge(B-0)

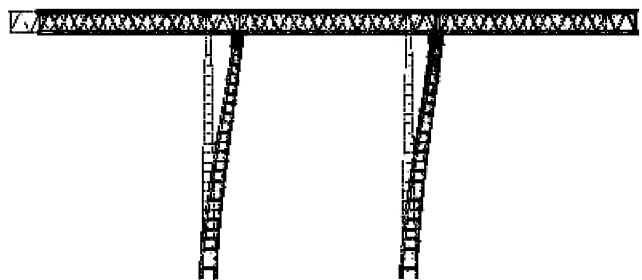


图 4 全桥结构位移图(B-0)

Fig.4 Displacement diagram of bridge(B-0)

中 4 根柱肢的单元内力响应值相差甚小,上部桁架结构中 2 根底梁的单元内力值几乎相同。文中选择 3 号柱肢和 2 号主梁,分析格构墩和主梁在多遇地震作用下的内力分布。

表 2 桥墩和主梁截面内力值
Table 2 Response values of Pier and girder cross section

结构	截面	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
主梁	B1	1 503	61	3 041	260
	B2	27 634	131	1 472	261
	B3	34 922	267	4 612	262
	B4	34 922	179	4 612	262
	B5	27 634	152	1 472	261
	B6	1 503	61	3 041	260
桥墩	P1	1 001	10 424	203	0
	P2	869	5 510	216	260
	P3	945	7 698	193	0
	P4	797	4 813	176	155

结合图 3、图 4 和表 2 可知,钢管混凝土桁梁结构 B3 截面处弯矩值最大,视为主梁弯矩控制截面。对于钢管混凝土格构墩桥墩,固定墩的内力和位移响应值均大于活动墩。根据计算结果,选取固定墩墩底 P1 位置作为桥墩内力(弯矩、剪力和轴力)的控制截面,选取固定墩墩顶 P2 处作为桥墩位移变形的控制截面。

3 拓展参数分析

为全面了解结构设计参数对钢管混凝土格构式高墩连续梁桥的抗震适用性,选取墩高、轴压比、柱肢坡度、支主管管径比、平级管竖向间距、柱肢含钢率、横撑道数、墩顶柱肢间距等为研究参数,结合标准模型 B-0,分别构造了 34 个计算模型。

3.1 墩高

建立了 9 个不同墩高模型进行对比,格构墩高度(H)的变化范围为 20~140 m。将不同墩高时各控制截面的内力值列于表 3(N/N_0 代表桥墩轴力与承载力之比, Δ/H 代表墩顶位移与墩高之比,即位移率),各响应峰值的比较如图 5~图 8 所示。

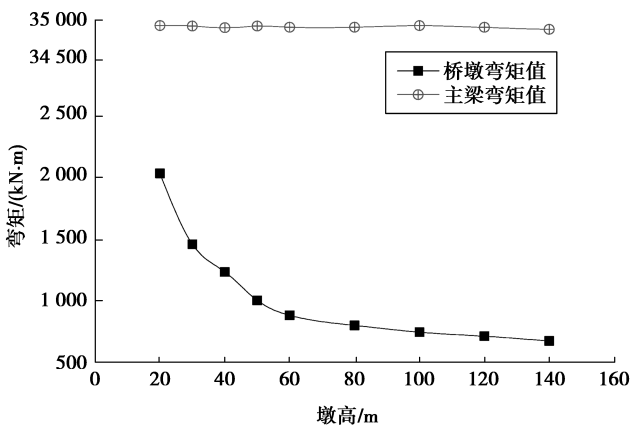


图 5 不同桥墩高度下弯矩值比较

Fig.5 Bending moment values under different pier height

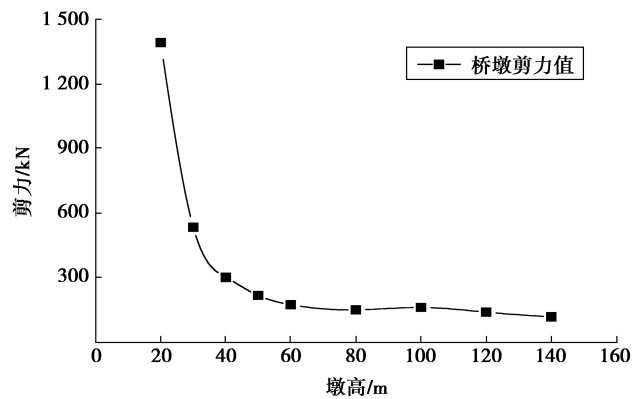


图 6 不同墩高下的桥墩剪力值比较

Fig.6 Shear values under different pier height

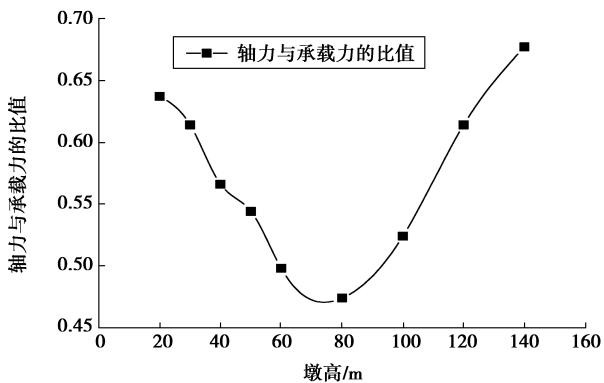


图 7 不同墩高下桥墩轴力与承载力比值

Fig.7 The value of N/N_u under different pier height

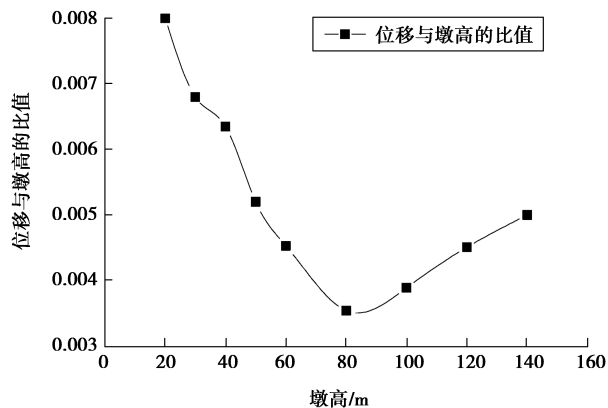


图 8 不同墩高下墩顶位移与墩高的比值

Fig.8 The value of Δ/H under different pier height

3.2 轴压比

结合图表可知,上部主梁弯矩值受墩高的影响较小。随着墩高增大,桥墩控制截面的弯矩值和剪力值先急剧减小,墩高超过 80 m 后逐渐趋于平缓,这是由于墩高(长细比)的增大,结构周期延长,地震引起的共振效果减弱,使得桥墩的内力值逐渐减小且趋于平缓。

从图 7 和图 8 可知,墩底轴力与承载力之比 N/N_u 和墩顶位移率 Δ/H 随墩高的变化曲线近似 V 型,转折点均位于 80 m 附近。这是因为当墩高达到 80 m 后(长细比 >58),格构墩长柱效应显著,导致桥墩的稳定承载力比轴力下降的趋势更快, N/N_u 值明显增大,墩顶位移率 Δ/H 也略有提高。建议钢管混凝土格构式高墩连续梁桥适用墩高选择在 40~80 m 范围内。

表 3 不同墩高的地震响应值

Table 3 Seismic response values under different pier height

墩高 H / m	弯矩/(kN·m)		剪力/kN	N/N_u	Δ/H
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	
20	34 929	2 033	1 389	0.637	1/125
30	34 924	1 457	532	0.614	1/147
40	34 901	1 232	300	0.566	1/153
50	34 922	1 001	216	0.544	1/192
60	34 909	880	173	0.498	1/221
80	34 908	798	149	0.474	1/282
100	34 927	743	160	0.524	1/257
120	34 906	710	138	0.614	1/222
140	34 880	672	116	0.677	1/200

选择适当的轴压比是桥梁结构设计的关键环节。改变上部结构恒载,将轴压比(n)分别设为 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 和 0.35,其余设计参数与 B-0 模型相同,控制截面地震响应值如表 4 所示。

表4 不同轴压比的地震响应值

Table 4 Seismic response values under different axial compression ratio

轴压比 n	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
0.10	23 003	941	8 955	219	261
0.15	34 922	1 001	11 523	216	260
0.20	45 978	1 038	13 338	226	266
0.25	57 258	1 113	14 591	240	288
0.30	68 733	1 348	15 690	299	292
0.35	79 556	1 437	17 542	312	302

从表4可知,梁、墩地震响应值受轴压比参数影响较大。当轴压比(n)从0.10增加到0.35时,控制截面的主梁弯矩、桥墩弯矩、轴力、剪力值和墩顶位移值分别提高了245.9%、52.7%、95.9%、42.5%和15.7%。随着轴压比的增大,上部结构自重增加,导致地震力增强,使得结构的内力值呈不同程度提高。根据计算结果,建议工程设计时,轴压比值控制在0.10~0.20之间,可有效降低钢管混凝土格构式高墩连续梁桥地震响应峰值。

3.3 柱肢坡度

桥墩柱肢坡度是影响结构整体稳定性和承载力的参数之一,分别构造了4个顺桥向柱肢坡度在1:60~1:30范围内的不同模型进行对比分析。地震荷载作用下各控制截面的内力峰值见表5。

由表5可知,柱肢坡度对钢管混凝土格构墩控制截面的内力值有不同程度影响。当柱肢坡度由1:60增大到1:30时,桥墩弯矩、轴力、剪力和墩顶位移值分别增加了9.0%、13.3%和45.2%。探究其规律,主要是因为格构墩的柱肢坡度越大,意味着桥墩刚度和墩梁刚度比值越大,桥墩分配到的内力相应增加。柱肢坡度对墩顶位移及主梁弯矩的影响很小。建议工程应用中,钢管混凝土格构墩的柱肢坡度选择在1:60~1:40范围内较为合理。

表5 不同柱肢坡度的地震响应值

Table 5 Seismic response values under different longitudinal slope

坡度	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
1:60	34 924	1 006	10 119	186	262
1:50	34 922	1 001	10 424	216	260
1:40	34 924	1 022	11 281	235	266
1:30	34 923	1 097	11 460	270	270

3.4 柱肢含钢率

钢管混凝土格构柱的柱肢截面含钢率通常在4%~20%之间。通过改变柱肢钢管的壁厚,建立了5个不同柱肢截面含钢率(4%、7%、11%、15%、19%)的计算模型,数值分析结果见表6。

表 6 不同柱肢含钢率的地震响应值

Table 6 Seismic response values under different steel ratio

含钢率/%	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
4	34 921	942	8 635	205	265
7	34 922	1 001	10 424	216	260
11	34 918	1 105	10 288	234	254
15	34 912	1 215	11 182	254	262
19	34 908	1 329	11 581	283	268

由表 6 可以看出,钢管混凝土格构墩柱肢截面的含钢率对桥墩控制截面内力值影响较大。与此同时,上部主梁弯矩值和墩顶位移变形量基本不受含钢率变化影响。当柱肢含钢率从 4% 增大到 19%,桥墩控制截面位置处的弯矩值、轴力值和剪力值分别增加了 41.1%、34.1% 和 38.0%。这是因为,随着钢管混凝土格构墩柱肢含钢率的增大,桥梁整体结构刚度增加,地震作用力增强,同时,墩梁刚度比也相应增大,使得桥墩分配到的内力值不同幅度提高。建议钢管混凝土格构式高墩连续梁桥的柱肢含钢率设计值不宜过大,控制在 4%~7% 之间较为合理。

3.5 支主管管径比

支主管管径比定义为平缀管与柱肢钢管的直径之比。通过改变平缀管管径(壁厚不变),构造 5 个支主管管径比计算模型,地震响应峰值如表 7 所示。

表 7 不同支主管管径比的地震响应值

Table 7 Seismic response values under different diameter ratio of tubes

支主管 管径比 d/D	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
0.30	34 922	1 066	8 918	197	262
0.45	34 922	1 030	9 627	209	262
0.55	34 922	1 001	10 424	216	260
0.70	34 922	995	11 055	226	259
0.80	34 922	986	11 517	230	259

表 7 数据表明,钢管混凝土格构式高墩连续梁桥的桥墩内力值受支主管管径比 d/D 影响较大。随着支主管管径比由 0.3 增大到 0.8,桥墩的弯矩值减小了 7.5%,轴力值和剪力值分别增加了 29.1% 和 16.8%;主梁弯矩与墩顶位移几乎不变。结合文献[14]钢管混凝土格构柱极限承载力研究成果(d/D 选择在 0.3~0.5 之间),缀管管径太大,内力值和用钢量将大大增加,而承载力却提高很少。建议工程设计中,钢管混凝土格构式高墩连续梁桥的柱墩支主管管径比选择在 0.3~0.5 之间较为合理。

3.6 平缀管竖向间距

为研究平缀管竖向间距参数变化对该类桥梁结构地震响应的影响规律,将平缀管竖向间距设为墩高 H 的 1/50(1 m)、1/25(2 m)、1/12(4 m)、1/6(8 m)。不同计算模型的地震响应值如表 8 所示。

表8 不同平缀管竖向间距的地震响应值

Table 8 Seismic response under different spacing of flat lacing tubes

平缀管 间距	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
$H/50$	34 922	994	9 856	229	259
$H/25$	34 922	1 001	10 424	216	260
$H/12$	34 922	1 028	8 638	209	262
$H/6$	34 922	1 052	8 494	204	261

由表8可知,当平缀管竖向间距由 $H/50$ 增大到 $H/6$ 时,桥墩弯矩值增大了5.8%,轴力和剪力峰值分别减小了13.8%和10.9%,上部主梁弯矩值和墩顶位移值变化幅度较小。由于平缀管布置形式对钢管混凝土格构式高墩连续梁桥地震相应的规律较为复杂,兼顾结构抗震性能、经济性和施工便捷性,建议实际工程中平缀管竖向间距可选择在 $H/25\sim H/12$ 之间。

3.7 横撑道数

为研究桥墩横向联系对该类桥梁的动力响应影响规律,所构造的横撑道数参数分别设为2~5道,结构的地震响应值如表9所示。

表9 不同横撑道数的地震响应值

Table 9 Seismic response values under different number of bracing

横撑 道数	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
2	34 734	1 043	9 986	170	306
3	34 728	981	10 359	185	272
4	34 922	1 001	10 424	216	260
5	34 737	902	10 216	251	250

通过表9数据对比可知,格构柱墩横撑道数对结构的地震响应影响无明显规律。这是因为格构墩主要由钢管混凝土柱肢提供竖向承载力和抗推能力,而横撑仅起横向连接作用,建议工程设计时柱墩横撑道数满足构造要求即可。

3.8 墩顶柱肢间距

为探究钢管混凝土格构式桥墩的墩顶柱肢间距参数变化对全桥抗震性能的影响规律,将墩顶柱肢中心间距分别调整为跨径的 $L/40(1.1\text{ m})$ 、 $L/35(1.3\text{ m})$ 、 $L/30(1.5\text{ m})$,结构地震响应值如表10所示。

表10 不同墩顶柱肢间距的地震响应值

Table 10 Seismic response under different longitudinal spacing

柱肢 间距	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
$L/40$	34 731	996	10 162	208	262
$L/35$	34 922	1 001	10 424	216	260
$L/30$	34 678	1 018	10 859	223	259

由表 10 可知,当墩顶柱肢中心距由 $L/40$ 增大到 $L/30$ 时,桥墩控制截面内力值小幅增加。墩顶柱肢间距对主梁弯矩值和墩顶位移几乎没有影响。建议实际工程设计时,钢管混凝土格构墩的墩顶柱肢间距不宜过大,选取在 $L/40 \sim L/35$ 之间较为适中。

3.9 柱肢截面形式

钢管混凝土截面形式主要有圆形和方形 2 种。为比较 2 种不同柱肢截面形式对该类桥梁的抗震适用性,采取柱墩截面面积相近原则,分别建模分析,其地震响应内力值比较如表 11 所示。

表 11 不同柱肢截面的地震响应值

Table 11 Seismic response values under different longitudinal section

柱肢截面形式	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
圆形	34 922	1 001	10 424	216	260
方形	34 737	1 046	10 504	224	421

由表 11 可知,采用圆形柱肢截面的钢管混凝土格构式高墩连续梁桥,其梁墩各个控制截面的地震响应值均比方形截面的同类桥梁小。主要是由于圆形钢管混凝土柱肢截面各个方向的惯性矩相同,内力分布更为均匀,从而有效提高桥梁整体抗震性能。此外,在钢材用量方面,前者约为后者的 0.88 倍,故采用圆形截面柱肢更为合理。

4 桥梁抗震优化设计验证

在上述拓展参数分析的基础上,保持墩高和轴压比不变,研究各参数最佳组合,以实现最优的全桥整体抗震效果。表 12 是优化设计前后结构设计参数的对比表。

表 12 桥梁抗震优化设计参数表

Table 12 Parameters of seismic optimum design of bridge

设计参数	标准模型	优化模型
柱肢纵向坡度	1:50	1:50
柱肢截面含钢率	7%	4%
支主管管径比	0.55	0.3
平级管竖向间距	$H/25$ (2 m)	$H/12$ (4 m)
横撑道数	4 道(10 m)	5 道(8 m)
墩顶柱肢间距	$L/35$ (1.3 m)	$L/40$ (1.1 m)

图 9~图 11 分别是 E1 地震作用下标准模型与优化设计后模型结构的控制截面内力值以及墩顶位移时程的对比图。桥梁抗震优化设计前后结构地震响应值的比较如表 13 所示。

表 13 优化设计前后模型地震响应值

Table 13 Seismic response value before and after optimization

模型	弯矩/(kN·m)		轴力/kN	剪力/kN	位移/mm
	主梁	桥墩	桥墩	桥墩	墩顶
B-0 标准模型	34 922	1 001	10 424	216	260
优化模型	34 731	895	8 466	194	246

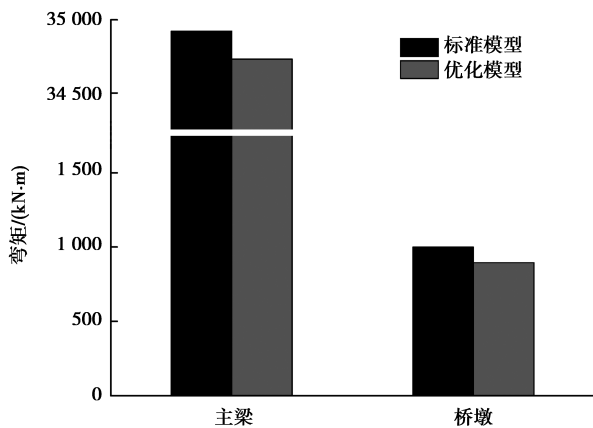


图 9 优化设计前后梁墩弯矩值对比

Fig.9 Comparison of moment values before and after optimization

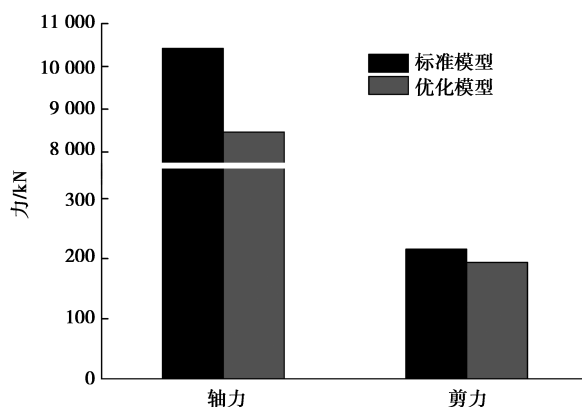


图 10 优化设计前后桥墩轴力与剪力值对比

Fig.10 Comparison of axial force and shear values

图 9~图 11 直观呈现了抗震优化设计后的钢管混凝土格构式高墩连续梁桥可适当降低梁墩的地震响应值。结合表 13 计算结果可知,主梁弯矩、桥墩弯矩、轴力、剪力和墩顶位移值分别降低了 0.5%、10.6%、18.8%、10.2% 和 5.4%。由此可见,根据文中建议参数范围进行优化设计组合成的桥梁结构,在多遇地震作用下可显著改善结构内力分布,有效提高抗震性能。

5 结 论

应用弹性时程分析法,研究多遇地震作用下,结构设计参数对钢管混凝土格构式高墩连续梁桥的内力影响规律,得到以下结论。

1)格构式桥墩的墩高、轴压比、柱肢纵向坡度、柱肢截面含钢率、支主管管径比和平缀管竖向间距是影响钢管混凝土格构式高墩连续梁桥结构地震响应值的重要参数。建议该类新型桥梁结构设计时,其适用墩高宜选择 40~80 m;轴压比控制在 0.1~0.2 之间;柱肢坡度 1:60~1:40、含钢率 4%~7%、支主管管径比 0.30~0.5、平缀管竖向间距 $H/25 \sim H/12$ 时较为合理。

2)墩顶柱肢间距和柱墩间横撑道数对该类桥梁抗震性能影响较小,建议满足构造要求即可。从结构受力性能和经济角度综合考虑,柱肢宜选择圆形截面。

3)设计参数取值范围,对钢管混凝土格构式高墩连续梁桥进行抗震优化设计,优化后的计算模型与实桥相比,可有效降低地震响应,改善内力分布,提升结构整体抗震性能。

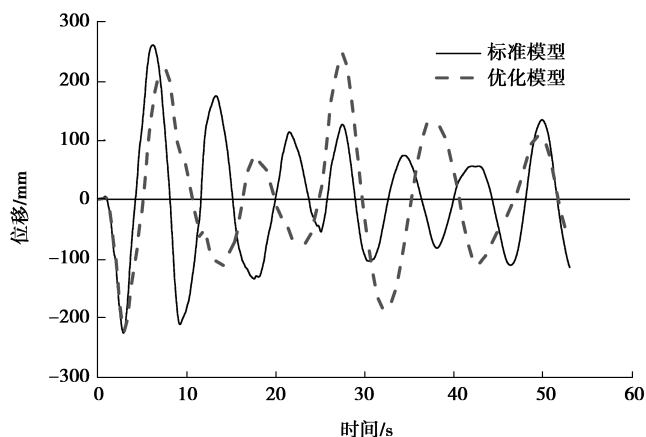


图 11 优化设计前后墩顶位移时程图对比

Fig.11 Comparison of time history diagram with pier top displacement

参考文献:

[1] Zhijing O.The practice of concrete filled steel tube piers to bridges;a review[J]. Applied Mechanics and Materials,2013, (405/406/407/408):1602-1605.
 [2] Zhijing O,Baochun C,Kai H,et al. Experimental and analytical investigation of concrete filled steel tubular columns[J].Journal of Structural Engineering,2011,137(6):635-645.
 [3] 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 transportation research and design institute. Guidelines for Seismic Design of Highway Bridge JTG/T B02-01-2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.(in Chinese)
- [4] 李飞.高墩大跨弯连续刚构桥设计参数的抗震适用性研究[D].西安:长安大学,2009.
LI Fei. Study on seismic applicability of the design parameters of curved continuous rigid frame bridges with long-span and high-pier[D].Xi'an: ChanganUniversity, 2009.(in Chinese)
- [5] Jack M, Gregory G D. A framework methodology for performance-based earthquake engineering [C] //13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada, August 1-6, 2004:679.
- [6] Xiong Z.Reinforced concrete column behavior under cyclic loading[D].Hong Kong:The Univers of Hong Kong,2001.
- [7] 李正英,李竞涛.钢筋混凝土高墩抗震性能评价指标[J].重庆大学学报,2014,37(2):69-74.
LI Zhengying, LI Jingtao. Seismic performance indexes of reinforced concrete high pier [J]. Journal of Chongqing University,2014,37(2):69-74.(in Chinese)
- [8] Dowel L, Robert K. Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete bridge structures [D]. San Diego: University of California,2009.
- [9] Jara M, Casas J R. A direct displacement-based method for the seismic design of bridges on bi-linear isolation devices [J].Engineering Structures,2006,28(6):869-879.
- [10] Priestley M J N. Performance based seismic design [C]. Sandiego, USA 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000: 2831.
- [11] 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.
WU Qingxiong, HUANG Yufan, CHEN Baochun. Shaking tables testing study of lightweight bridge with CFST composite truss girder and lattice pier[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 89-96.(in Chinese)
- [12] 郭毅,文华斌,占玉林.钢管混凝土组合格构柱高墩大跨连续刚构桥动力特性分析[J].四川建筑科学研究,2012,38(2):27-31.
GUO Yi, WEN Huabin, ZHAN Yulin. Dynamic characteristics of the high pier-long span continuous rigid-framed bridge with concrete filled steel tube colimns[J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(2): 27-31.(in Chinese)
- [13] 占玉林,宋瑞年,胡靖,等.钢管混凝土组合格构柱高墩的弯曲性能研究[J].建筑结构学报,2013,34(1):239-345.
ZHAN Yulin, SONG Ruinian, HU Jing, et al. Research of bending properties of high pier made of concrete-filled steel tube laced column [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 239-345.(in Chinese)
- [14] 欧智菁.四肢钢管混凝土格构柱极限承载力研究[D].福州:福州大学,2007.
OU Zhijing. Study on the ultimate load capacity of four-tube concrete filled steel tubular laced columns [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2007.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)