

大跨径钢管混凝土拱桥承载能力与动力特性分析

董荣强¹, 黑继伟²

(1 国家林业和草原局西南调查规划院, 云南 昆明 650031; 2 云南交投集团公路建设有限公司, 云南 昆明 650031)

摘要: 采用有限元分析软件, 对某大跨径钢管混凝土拱桥施工阶段受力、运营阶段承载能力极限状态、正常使用极限状态、以及动力特性等方面进行了分析计算, 结果表明大桥在施工及使用阶段的强度、刚度、稳定性及抗震性能均能满足现行规范要求, 且具有一定的安全富裕度, 说明大桥结构设计安全可靠, 为其他类似桥梁提供了有益参考。

关键词: 有限元; 拱桥; 承载能力; 结构设计

Analysis on bearing capacity and dynamic characteristics of long-span concrete-filled steel tube arch bridge

DONG Rongqiang¹, HEI Jiwei²

(1. Southwest Survey and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650031;

2. Yunnan Communications Investment Group Highway Construction Co., Ltd., Kunming 650031)

Abstract: The finite element analysis software is used to analyze and calculate the stress of a long-span concrete-filled steel tube arch bridge in the construction stage, the limit state of bearing capacity in the operation stage, the limit state of normal use, and the dynamic characteristics. The results show that the strength, stiffness, stability and seismic performance of the bridge in the construction and use stages can meet the requirements of the current specifications, and has a certain safety margin, which indicates that the bridge structure design is safe and reliable. It provides a useful reference for other similar bridges.

Keywords: finite element; arch bridge; bearing capacity; structural design

钢管混凝土构件一方面借助内填混凝土增强钢管壁的稳定性, 同时又因为钢管对核心混凝土的套箍作用, 核心混凝土处于三向受压状态, 使其具有更高的抗压强度和抗变形能力, 从而充分发挥了两种材料各自的优点, 力学性能优越、造价经济, 在工程中应用广泛。

钢管混凝土拱桥是先用钢管形成施工骨架, 然后在管内灌注混凝土形成钢管混凝土拱肋, 而后安装吊杆及桥面系统。其具有承载能力强、刚度大、施工简单、结构体系丰富和造型美观等优点, 在大跨度桥梁中具有较强的竞争力。

1 工程概况

某跨江大桥全长 257.5 m, 主桥为净跨 200 m 中承式钢管混凝土等截面桁架拱, 桥面标准宽度为 18.5 m, 主拱轴线采用悬链线, 拱轴线系数 $m=1.543$, 净矢高 $h=50$ m, 净矢跨比 $f=1/4$, 桥面系采用半漂浮体系。

主拱圈采用等宽度等高度空间桁架结构, 横桥

向由 2 片拱肋组成, 每片拱肋为 4 肢钢管桁架式断面, 弦管中心高度 3.9 m, 中心宽度 1.5 m, 上弦、下弦钢管采用 $\Phi 900 \times 25$ 及 $\Phi 900 \times 20$ 两种规格。吊杆纵向间距为 7.5 m, 全桥共 22 对吊杆。吊杆横梁、立柱横梁、肋间横梁均为工字型钢结构, 桥面系纵横梁采用格子体系, 横梁高 1.8 m, 桥面行车道板为预制 16 cm 厚 CF50 桥面板与 10 cm 厚现浇桥面板组合而成, 上铺 10 cm 改性沥青铺装面层。起点岸拱座采用扩大基础型式, 终点岸拱座采用桩基础型式。主拱断面布置及主桥立面布置如图 1 图 2 所示。

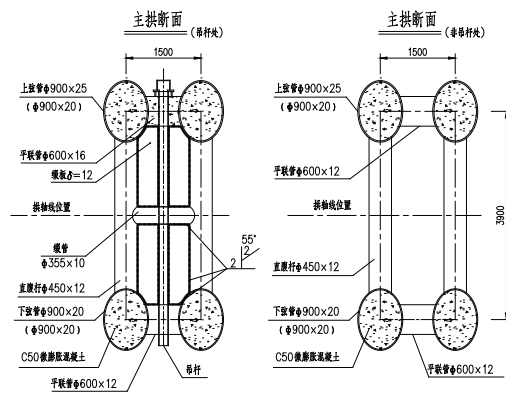


图 1 主拱断面布置示意图

收稿日期: 2023-09-23

作者简介: 董荣强, 男, 硕士, 工程师, 主要从事道桥设计工作。

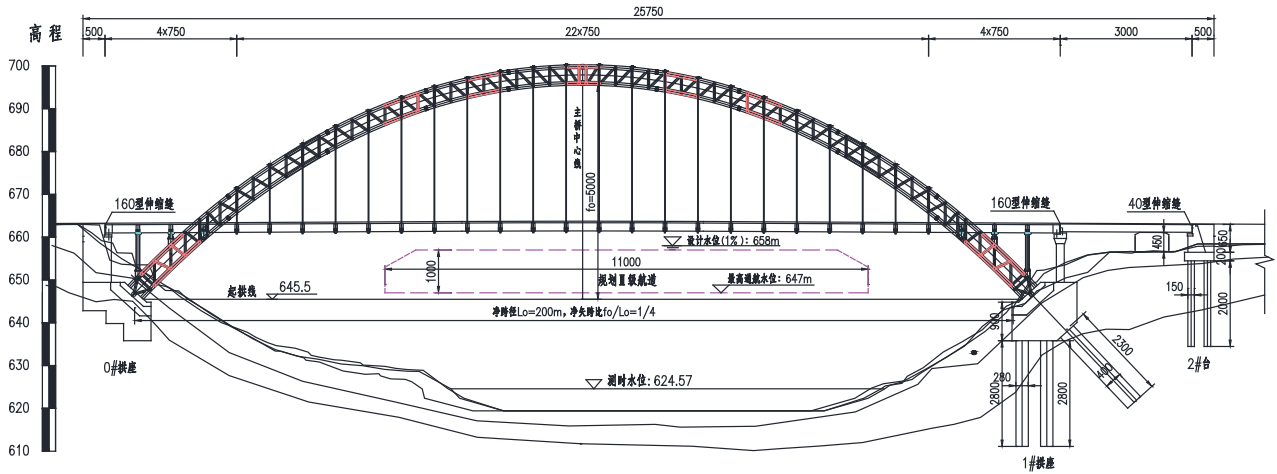


图 2 主桥立面布置示意图

2 材料及荷载参数

2.1 主要材料

钢管混凝土拱桥主拱圈内灌注 C50 微膨胀混凝土, 根据《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06-2015) 3.4.7, 钢管混凝土的线膨胀系数为 1.2×10^{-5} , 因此, 在计算主拱受力时, 管内混凝土的线膨胀系数同钢管, 取为 1.2×10^{-5} 。桥面系端部横梁采用 C40 混凝土, 混凝土各项力学性能见表 1 所示; 主拱圈、拱上立柱、钢横梁及钢纵梁均采用 Q355D 钢材, 其各项力学性能见表 2 所示; 钢管与混凝土组合截面力学特性见表 3 所示。

表 1 混凝土力学性能

力学性能	C50 砼	C40 砼
弹性模量 E /MPa	3.45×10^4	3.25×10^4
轴心抗压标准值 f_{ck} /MPa	32.4	26.8
轴心抗拉标准值 f_{tk} /MPa	2.65	2.4
轴心抗压设计值 f_{cd} /MPa	22.4	18.4
轴心抗拉设计值 f_{td} /MPa	1.83	1.65
热膨胀系数 α / $^{\circ}\text{C}$	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}
泊松比 γ	0.2	0.2

表 2 钢材力学性能

项目	力学性能
弹性模量 E /MPa	2.10×10^5
抗拉、抗压和抗弯强度设计值 /MPa	厚度或直径 $\leq 16\text{mm}$: 310 厚度或直径为 16~35mm: 295
热膨胀系数 α / $^{\circ}\text{C}$	1.20×10^{-5}
泊松比 γ	0.3

表 3 组合截面力学性能表

截面形式 /mm	约束效应系数 ξ_0	组合强度 f_{sc} /MPa	组合弹模 E_{sc} /MPa
900 × 25	1.42	55.563	54400
900 × 20	1.11	48.918	49500

2.2 荷载参数

(1) 结构自重。结构自重按实际断面尺寸计算, 素混凝土容重按 25 kN/m^3 取值, 钢筋混凝土容重按 26 kN/m^3 取值, 钢材容重按 78.5 kN/m^3 取值, 沥青混凝土铺装按 24 kN/m^3 取值, 单侧人行道 (含防撞护栏) 取 31.7 kN/m 。

(2) 混凝土收缩及徐变作用。管内混凝土收缩, 其对主拱内力的影响已经在钢管混凝土脱空折减系数中计入, 所以不再计算钢管混凝土收缩对主拱内力的影响。计算时考虑桥面系端部混凝土横梁及拱脚外包混凝土的收缩徐变作用, 钢管混凝土徐变内力及变形, 按照主拱肋降温 15°C 计算。

(3) 基础不均匀沉降。拱座基础不均匀沉降按水平位移 1 cm 、竖向位移 1 cm 计算。

(4) 汽车及人群荷载。汽车荷载: 公路 -I 级, 双向 2 车道。人群荷载: 2.5 kN/m^2 。

(5) 制动力。制动力按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015) 4.3.5 条取值。

(6) 温度作用。体系温差按当地极端最高气温和最低气温确定, 综合考虑后计算体系升温 25°C , 体系降温 25°C 。主拱截面温差效应按《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06-2015) 4.2.5 计算, 温度梯度曲线如图 3 所示。

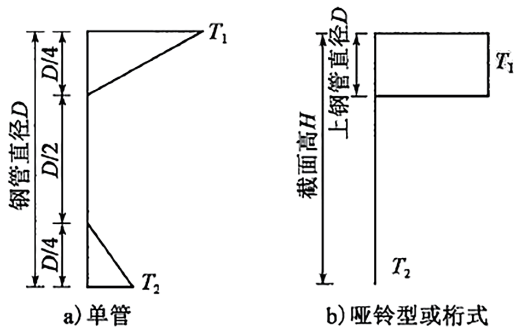


图 3 主拱截面温度梯度曲线 ($T_1=8^{\circ}\text{C}$ 、 $T_2=0^{\circ}\text{C}$)

(7) 风荷载。桥位处 10 年重现期基本风速为 21.6 m/s，桥梁设计基本风速为 25.4 m/s，与汽车组合的风速按桥面高度处 25 m/s 计算，工程场地桥位处风剖面幂指数 $\alpha=0.12$ ，阵风系数 $G_r=1.24$ 。

3 承载能力计算

3.1 结构计算模型

钢管混凝土拱肋在施工和运营阶段，均认为材料处于线弹性阶段，且符合平截面假定及虎克定律，不考虑应力、内力重分布，因而内力、应力计算均采用叠加法进行计算，并对其施工阶段、正常使用极限状态以及承载能力极限状态等内容进行验算。

采用桥梁专用有限元计算程序 Midas/Civil 进行建模，全桥除吊杆采用桁架单元模拟外，其余构件均采用梁单元模拟，钢管混凝土采用施工阶段联合截面模拟，结构计算模型如图 4 所示。

3.2 施工阶段划分

按照实际施工步骤，计算模型共划分为 6 个计算施工阶段，具体步骤如表 4 所示。



图 4 全桥有限元计算模型

3.3 荷载组合

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015) 的规定，结构分析主要考虑以下荷载组合。

表 4 计算施工工序

步骤	安装的构件	荷载工况	边界条件
1	吊装合拢钢桁架	激活结构自重	激活管端固结
2	灌注钢管内砼	激活砼湿重	/
3	钢管砼截面联合	钝化砼湿重	/
4	立柱吊杆桥面系	/	激活桥面约束
5	桥面铺装及附属	激活二期恒载	/
6	成桥运营十年	活荷载	/

(1) 施工阶段荷载主要为结构自重及有可能在施工过程发生的相关荷载，按标准值进行荷载组合。

(2) 运营阶段对构件按承载能力极限状态验算强度和稳定性。

组合 1: 恒载、沉降、汽车、人群、体系温差、局部温差、风荷载等。

组合 2: 恒载、沉降、百年风荷载。

其中恒载为按施工阶段逐步计算所获得的成桥状态，体系温差为整体升、降温的包络值，各项荷载效应的组合系数按规范进行取值。

3.4 施工阶段强度验算

由于模拟施工阶段较多，以下分别选取钢管拱圈合拢、钢管内混凝土灌注完成、以及二期恒载施工完成三个施工阶段列出计算结果。

(1) 钢管拱圈合拢时正截面应力包络如图 5 所示。

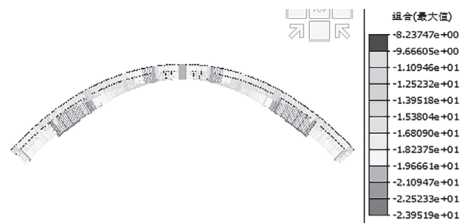


图 5 拱圈合拢时应力包络图 (单位:MPa)

(2) 管内混凝土灌注完成时钢管正截面应力包络如图 6 所示

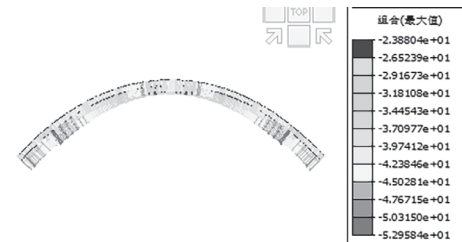


图 6 混凝土灌注完应力包络图 (单位:MPa)

(3) 二期恒载施工完成时钢管正截面应力包络图 7 所示。

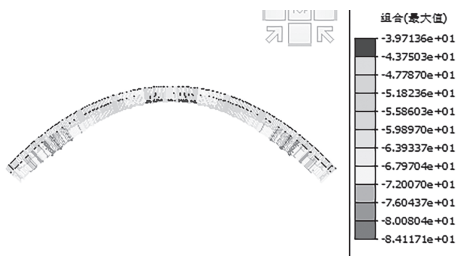


图 7 二期荷载施工完成应力包络图 (单位:MPa)

根据以上计算结果, 施工过程中主拱圈受力最不利位于距拱脚 1/3 位置, 钢管最大应力为 84.1 MPa, 钢管初应力度为 0.39, 小于规范要求的限值 0.65。

3.5 承载能力极限状态计算

根据有限元计算结果, 作用基本组合下钢管混凝土内力包络如图 8~ 图 10 所示。



图 8 基本组合钢管混凝土拱肋弯矩包络图 (单位:kN·m)



图 9 基本组合钢管混凝土拱肋轴力包络图 (kN)

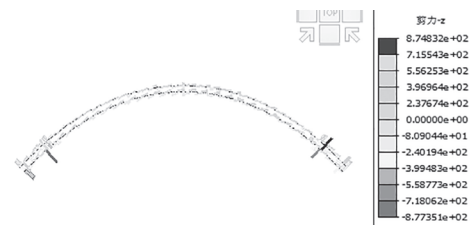


图 10 基本组合钢管混凝土拱肋剪力包络图 (kN)

根据《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06-2015), 对于桁式主拱, 应分别进行单管受压构件和组合受压构件承载力验算, 按照该规范条文

5.2 和 5.3, 分别按单管偏心受压和组合偏心受压构件计算主拱肋极限承载能力, 计算结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 承载能力计算表 (单管受压构件)

验算位置	长细比折减系数 φ_l	弯矩折减系数 φ_e	脱空折减系数 K_d	初应力折减系数 K_p	钢管砼面积 A_{sc}/mm^2	钢管砼强度 f_{sc}/Mpa	最大弯矩设计值 $rM/\text{kN} \cdot \text{m}$	对应轴向力设计值 rN/kN	单管承载力 N_u/kN	安全系数 N_u/rN	
上弦杆	拱脚	0.958	0.775	0.95	0.980	636 172.5	55.563	1 073.7	15 270.3	24 419.7	1.6
	1/8L	0.956	0.780	0.95	0.980	636 172.5	48.918	756.3	11 085.2	21 601.4	1.9
	1/4L	0.956	0.941	0.95	0.980	636 172.5	48.918	172.6	11 329.3	26 062.8	2.3
	3/8L	0.956	0.923	0.95	0.977	636 172.5	48.918	264.3	13 111.5	25 491.7	1.9
	拱顶	0.958	0.900	0.95	0.979	636 172.5	55.563	371.3	13 776.4	28 354.1	2.1
下弦杆	拱脚	0.958	0.737	0.95	0.977	636 172.5	55.563	1 353.7	15 734.5	23 176.0	1.5
	1/8L	0.956	0.812	0.95	0.976	636 172.5	48.918	608.9	10 855.2	22 395.5	2.1
	1/4L	0.956	0.882	0.95	0.979	636 172.5	48.918	295.1	9 118.2	24 401.7	2.7
	3/8L	0.956	0.818	0.95	0.984	636 172.5	48.918	408.6	7 561.7	22 750.0	3.0
	拱顶	0.956	0.722	0.95	0.987	636 172.5	48.918	552.4	5 921.4	20 154.0	3.4

表 6 承载能力计算表 (组合受压构件)

验算位置	组合长细比折减系数 φ_l'	组合弯矩折减系数 φ_e'	$\sum (K_p^i \cdot K_d \cdot f_{sc} \cdot A_{sc})/\text{kN}$	组合弯矩设计值 $rM/\text{kN} \cdot \text{m}$	组合轴向力设计值 rN/kN	组合承载力 N_u/kN	安全系数 N_u/rN
拱脚	0.895	0.953	131 422.1	6 149.1	63 601.7	112 016.4	1.76
1/8L	0.896	0.939	115 631.8	5 677.4	44 932.1	97 312.1	2.17
1/4L	0.906	0.883	115 815.2	10 769.9	41 516.1	92 608.6	2.23
3/8L	0.906	0.776	115 956.5	23 427.6	41 570.8	81 502.1	1.96
拱顶	0.914	0.695	124 132.8	34 205.8	39 898.8	78 800.5	1.98

根据表 5 和表 6 验算结果可知, 钢管混凝土拱肋分别按单管和组合构件计算, 安全系数均大于 1, 拱肋极限承载能力满足规范要求。

3.6 正常使用极限状态计算

3.6.1 钢管混凝土拱肋应力验算

正常使用极限状态下荷载标准值组合钢管混凝土拱肋钢管和钢管内混凝土的应力如图 11 和图 12 所示。

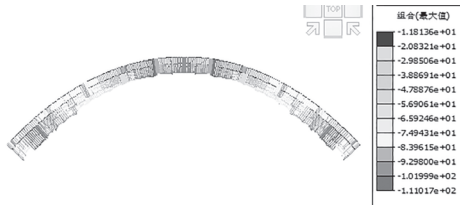


图 11 标准组合钢管应力图 (单位:MPa)



图 12 标准组合钢管内混凝土应力图 (单位:MPa)

钢管混凝土拱肋组合截面应力按照《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06-2015) 6.1.2 及附录 C 计算, 计算结果如表 7 及表 8 所示。

表 7 钢管混凝土拱肋正常使用极限状态应力计算表

验算位置	钢管初应力 σ_0/MPa	截面组合后增加内力		组合截面 应力 σ_{sc}/MPa	钢与钢管 砼弹模比 n_s	砼与钢管砼 弹模比 n_c	钢管 应力 σ_s/MPa	钢管内砼 应力 σ_c/MPa	
		弯矩 $M_{sc}/\text{kN}\cdot\text{m}$	轴力 N_{sc}/kN						
上弦杆	拱脚	39.5	799.8	9 367.7	25.9	3.787	0.634	137.6	16.4
	1/8L	40	552.3	6 479.1	17.9	4.162	0.697	114.5	12.5
	1/4L	39.1	116.7	6 212.3	11.4	4.162	0.697	86.5	7.9
	3/8L	45.3	177.4	7 719.0	14.6	4.162	0.697	106.1	10.2
	拱顶	40.6	222.5	8 230.5	16.0	3.787	0.634	101.4	10.2
下弦杆	拱脚	45.4	1020.9	9 165.6	28.7	3.787	0.634	154.0	18.2
	1/8L	47.3	399.3	6 101.4	15.2	4.162	0.697	110.4	10.6
	1/4L	42.1	168.0	4 687.1	9.7	4.162	0.697	82.5	6.8
	3/8L	31.2	161.2	3 782.0	8.2	4.162	0.697	65.3	5.7
	拱顶	25.6	364.2	3 135.5	10.0	4.162	0.697	67.3	7.0

表 8 钢管混凝土拱肋正常使用极限状态钢管及钢管内砼容许应力计算表

验算位置	钢材屈服 强度 f_y/MPa	截面 含钢率 a_s	砼轴心抗压 强度标准值 f_{ck}/MPa	核心砼 提高系数 K_1	核心砼 安全系数 K_2	钢管容许 应力 $[\sigma_s]/\text{MPa}$	钢管内砼 容许应力 $[\sigma_c]/\text{MPa}$	
上弦杆	拱脚	335	0.121	32.4	1.836	1.7	268.0	35.0
	1/8L	335	0.095	32.4	1.742	1.7	268.0	33.2
	1/4L	335	0.095	32.4	1.742	1.7	268.0	33.2
	3/8L	335	0.095	32.4	1.742	1.7	268.0	33.2
	拱顶	335	0.121	32.4	1.836	1.7	268.0	35.0
下弦杆	拱脚	335	0.121	32.4	1.836	1.7	268.0	35.0
	1/8L	335	0.095	32.4	1.742	1.7	268.0	33.2
	1/4L	335	0.095	32.4	1.742	1.7	268.0	33.2
	3/8L	335	0.095	32.4	1.742	1.7	268.0	33.2
	拱顶	335	0.095	32.4	1.742	1.7	268.0	33.2

由表 7 及表 8 计算结果可知, 正常使用极限状态标准组合下, 钢管混凝土组合截面中钢管最大应力为 137.6 MPa, 钢管内混凝土最大压应力为 16.4 MPa,

均小于钢管和钢管内混凝土正常使用极限状态容许应力。因此, 钢管混凝土拱肋满足正常使用极限状态受力要求。

3.6.2 刚度验算

在汽车荷载 (不计冲击力) 作用下, 钢管混凝土拱肋和桥面系的最大竖向挠度如图 13 和图 14 所示。



图 13 汽车作用下拱肋桥面系最大向上竖向挠度图 (单位 :mm)



图 14 汽车作用下拱肋桥面系最大向下竖向挠度图 (单位 :mm)

由以上计算结果可知, 汽车荷载作用下, 主拱最大向上竖向挠度为 11.9 mm, 最大向下竖向挠度为 -15.8 mm, 正负挠度绝对值之和为 22.7 mm < $L/1000=200$ mm, 桥面系最大向上竖向挠度为 12.0 mm, 最大向下竖向挠度为 -27.6 mm, 正负挠度绝对值之和为 39.6 mm < $L/800=250$ mm, 主桥结构刚度满足规范要求。

3.6.3 主拱稳定性分析

对主桥成桥运营阶段进行屈曲分析, 其一阶屈曲模态如图 15 所示。

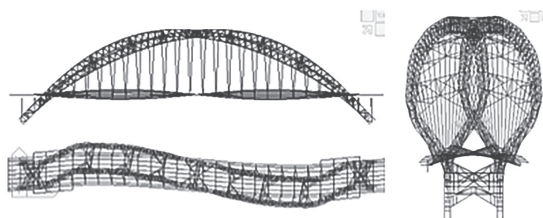


图 15 成桥运营一阶屈曲模态 ($\lambda=10.9$)

根据上述计算结果, 主桥成桥运营阶段的整体稳定系数为 11.2, 满足规范对拱桥稳定性验算的要求。

4 动力特性及抗震计算

4.1 动力特性

采用多重 Ritz 向量法进行主桥特征值分析, 其前

六阶自振频率及振型如表 9 和图 16 所示。

表 9 主桥自振模态特性表

阶数	频率 /Hz	周期 /s	振型特征
1	0.235	4.260	桥面系一阶横飘
2	0.374	2.673	桥面系一阶纵飘
3	0.447	2.236	拱肋一阶侧倾
4	0.511	1.956	桥面系一阶反对称横弯
5	0.780	1.283	桥面系二阶对称横弯

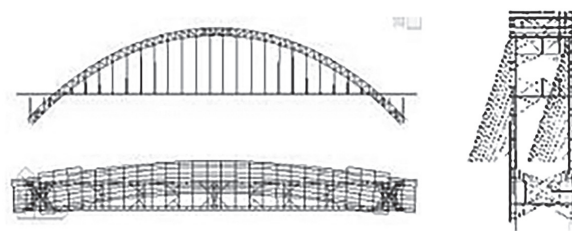


图 16 主桥一阶振形图

由上述计算可知, 主桥前几阶自振频率避开了人感频率 (2.5~3.5Hz), 满足规范要求。

4.2 抗震计算

采用反应谱法对全桥在 EI 地震作用下的内力情况进行计算, 地震作用验算采用承载能力极限状态偶然组合, 即恒载 (成桥后) + 地震作用。 EI 反应谱函数如图 17 所示。

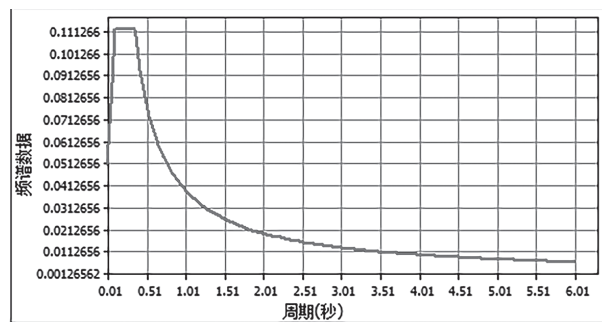


图 17 EI 反应谱函数图

地震偶然组合下主桥结构内力包络如图 18~ 图 21 所示。

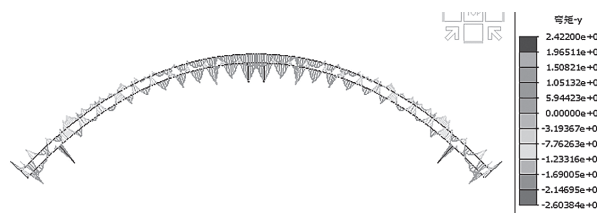


图 18 偶然组合弦杆弯矩包络图 (单位: $kN \cdot m$)

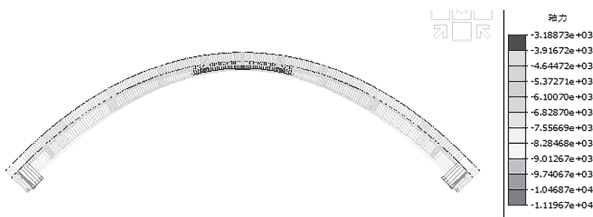


图 19 偶然组合弦杆轴力图 (单位 :kN)

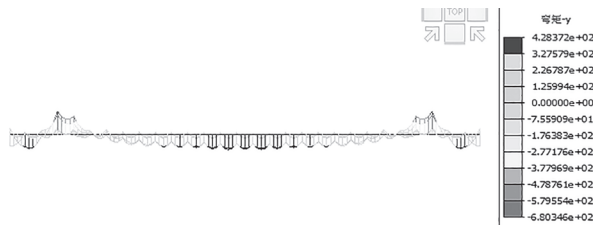


图 20 偶然组合桥面系钢纵梁弯矩包络图 (单位 :kN·m)

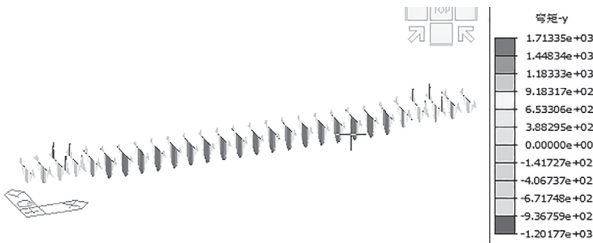


图 21 偶然组合桥面系钢横梁弯矩包络图 (单位 :kN·m)

由上述计算结果可知，地震偶然荷载组合下，上弦杆最大弯矩为 196.7 kN·m，最大轴力为 8 832.6 kN，下弦杆最大弯矩为 294.1 kN·m，最大轴力为 11 196.6 kN，桥面系钢纵梁最大弯矩为 680.3 kN·m，桥面系钢横梁最大弯矩为 1 713.5 kN·m，均小于承载能力极限状态基本组合计算得到的主拱及桥面系纵横梁内力值。因此，主桥结构设计不受地震作用控制，地震作用下结构承载能力满足规范要求。

5 结 语

钢管混凝土构件充分发挥了钢管和混凝土各自的材料性能，相互补充，提高了构件的承载能力，同时施工方便、造型优美，是大跨径拱桥主拱圈经济且合理的选择。

本文采用有限元分析软件，对某大跨径钢管混凝土拱桥施工阶段受力、运营阶段承载能力极限状态、正常使用极限状态、以及动力特性等进行了分析计算，结果表明大桥施工及使用阶段的强度、刚度、稳定性及抗震性能均满足规范要求，且具有一定的安全富裕度，从数值分析角度证明了大桥结构设计的合理性和可靠性。

参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥: 3 版 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [2] 曾勇, 马如进, 谭红梅. 大跨上承式钢管混凝土拱桥的动力特性研究 [J]. 中外公路, 2014,(3):113-117.
- [3] 熊起. 上承式钢管混凝土拱桥静动力分析及参数影响分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [4] 孙潮, 陈友杰. 桥梁计算示例丛书—钢管混凝土拱桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [5] 陈友杰, 陈宝春. 钢管混凝土肋拱面受力全过程有限元分析 [J]. 工程力学, 2000(增刊):753-758.
- [6] 钟善桐. 钢管混凝土结构 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [7] 张建新, 郑皆连, 肖汝诚. 钢管混凝土拱桥吊装过程的最优化计算分析 [J]. 中国公路学报, 2005,18(2):40-44.
- [8] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望 [J]. 土木工程学报, 2017,50(6):50-61.