

文章编号: 1002-0268 (2005) 06-0078-04

朝阳市东大桥钢管混凝土拱桥设计

张连振, 黄 侨, 杨大伟

(哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 朝阳市东大桥主桥采用中承式钢管混凝土系杆拱桥(30m+120m+30m)。详细论述该主桥的总体设计、构造特点、内力计算和结构设计。内力分析及结构设计时, 钢管混凝土的力学参数(刚度、强度)取值考虑钢管与混凝土之间的紧箍力的影响, 按照钢管混凝土统一理论计算。考虑到该种结构存在车桥振动较大的问题, 在结构分析中尤其重视了动力特性的计算, 并从结构设计上采用加大桥面系刚度和拱肋之间的横撑刚度等措施来改善桥梁的动力特性, 同时对拱桥的稳定计算进行了较为详细的讨论。最后给出了此类结构设计中应注意的问题和建议。

关键词: 中承式拱桥; 钢管混凝土拱桥; 结构设计; 稳定分析

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

Design of CFST East Chaoyang Arch Bridge

ZHANG Lian-zhen, HUANG Qiao, YANG Da-wei

(School of Science & Engineering on Communication, Harbin Institute of technology, Heilongjiang Harbin 150090 China)

Abstract: The main bridge of East Chaoyang bridge is half-through concrete-filled steel tube arch bridge (30m+120m+30m). The general design, construction features and the analysis and calculation of the internal force are presented in detail. Mechanics character of CFST such as stiffness and strength used in the structure analysis is calculated based on CFST uniform theory which considers the interplay between steel tube and concrete. This type bridge has a common problem of prominent vibration under heavy load traffic condition. Therefore, two methods are used to improve the dynamic character during the structure design of East Chaoyang bridge. One is to increase the stiffness of the bridge deck system, the other is to heighten the link stiffness between two arches. The stability analysis of the arch bridge is also discussed in detail. Some issues and advices merit attention during the design of CFST arch bridge are presented.

Key words: Half-through arch bridge; CFST arch bridge; Structure design; Stability analysis

0 工程概况

朝阳市东大桥位于辽宁省朝阳市东部出口, 跨越大凌河, 连接朝阳市城东拟建的凤凰组团, 是通往城东义县的交通要道。大凌河是辽宁省四大水系之一, 东支发源于建昌县, 西支发源于河北省平泉县, 两支在喀左县大城子附近汇合, 经建昌、喀左、凌源、朝阳、北票、义县、阜新, 于凌海市汇入渤海。流域面积 23 263km², 全长 435km。朝阳市位于大凌河中游。

朝阳市东大桥全长 540m, 主桥采用三跨双飞燕式钢管混凝土系杆拱桥, 全长 180m, 其跨径组合为 30m+120m+30m, 桥面宽度 26m, 在观景平台位置局部加宽到 29.5m。两侧引桥分别为 6×30m 后张预应力混凝土小箱梁, 桥型布置见图 1。

1 设计标准

- (1) 设计荷载: 城市 A 级; 人群荷载 4kN/m²。
- (2) 地震烈度 VII 度。

收稿日期: 2004-04-22

作者简介: 张连振(1979-), 男, 安徽萧县人, 工学博士, 主要从事大跨径桥梁设计理论和桥梁结构健康监测研究。

(zhanglianzen79@163.com)

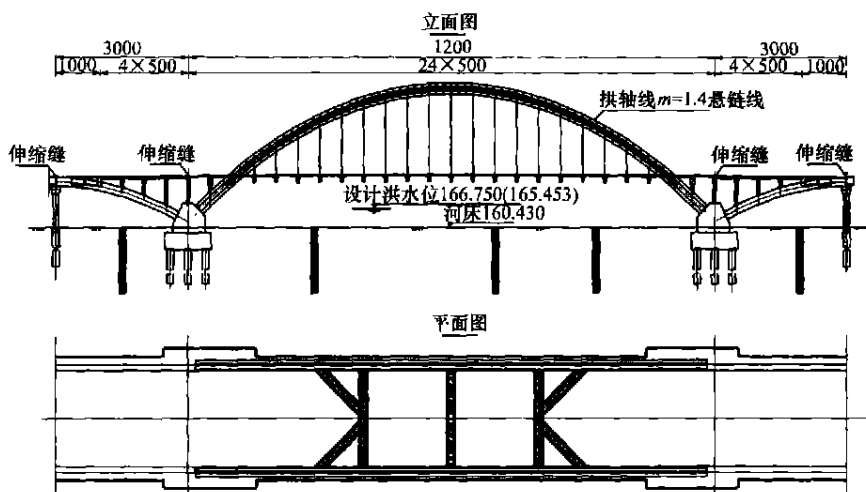


图1 朝阳市东大桥桥型布置图

- (3) 设计车速 60km/h。
- (4) 桥面设计纵坡 1%。
- (5) 桥面设计横坡: 车行道 1.5% 双向直线坡; 人行道 1% 单向向内直线坡。
- (6) 竖曲线最小半径: 桥梁凸曲线半径 6 000m。
- (7) 桥下净空: 梁底高于最高设计洪水位 > 0.75m。
- (8) 标准冻深 1.3m。
- (9) 设计洪水频率 1%。
- (10) 设计合拢温度 10℃。
- (11) 设计温度范围 -30~40℃。

2 结构设计

2.1 上部结构

(1) 主拱采用中承式悬链线无铰拱, 计算跨度 115m, 矢高 25.5m, 矢跨比 $1/4.5$, 拱轴系数 $m=1.4$ 。本桥选用四管式拱肋截面, 每条拱肋由 4 根 $\Phi 700 \times 14\text{mm}$ 的 Q345D 钢板卷制而成, 由横向平联杆、腹杆连接成为钢管混凝土桁架。沿拱轴线采用等截面, 截面高度为 2.4m, 宽 1.83m, 两拱肋之间中心距 22.5m。为保证桥梁在施工和运营中的稳定性, 分别在拱顶和四分点的位置各设 1 道“—”字形和 2 道“K”字形横撑, 全桥共设 3 道横撑。在拱肋的弦杆内灌注 50 号微膨胀混凝土, 腹杆和横撑钢管内则不灌混凝土。

(2) 边拱设置了 3 条钢筋混凝土拱肋, 线形按二次抛物线变化。2 根边肋采用钢筋混凝土矩形实体断面, 1 根中肋采用钢筋混凝土箱形断面。拱肋高度均为 1.8m, 拱肋端部 10.0m 段融入配重箱结构之中。边拱肋宽度 2.0m, 为保持主拱与边拱外形的一致性,

在其外侧设置与主跨拱肋外侧面相同的装饰钢板, 其外观颜色与主跨钢管混凝土拱肋一致。中拱肋宽度为 2.4m, 采用单箱双室断面以减轻其重量。

(3) 系杆采用 $22\Phi^{15}$ 24mm 的高强度低松弛环氧涂层钢绞线无粘结筋组成的可换索式系杆, 共 16 束, 每个边拱肋处 8 束。

(4) 主拱上设置 19 对吊杆, 间距为 5m, 采用配有纠偏装置的冷铸锚式吊杆系统。相应的吊杆为 PES (FD) 7-121 平行钢丝束新型低应力防腐成品索, 破断索力 7 777kN, 其两端的锚具型号为 OVMLZM (K) 7-121。吊杆下端设置弧形铰, 以利吊杆的变形需要。

(5) 吊杆横梁全部采用预应力混凝土横梁。边拱横梁采用钢筋混凝土结构。

(6) 行车道板采用预制槽型板, 并且槽形通过湿接头与吊杆横梁固结在一起, 纵向形成连续板结构, 横向通过桥面混凝土连成整体。

2.2 下部结构

主桥的中墩基础均为由 15 根 (3 排 $\times$ 5 根) 直径为 1.5m 的钻孔灌注桩组成的群桩构成, 桩上设厚度为 3.5m 的钢筋混凝土承台和高度为 5.8m 的实体式钢筋混凝土拱座。

2.3 附属设施

(1) 桥面铺装

桥面铺装为等厚度, 共 12cm。上层为 5cm 厚沥青混凝土, 下层为 7cm 厚钢筋网混凝土。桥面混凝土和沥青混凝土之间设置防水层。

(2) 支座及伸缩缝

伸缩缝采用 GQF-MZL80 型毛勒缝, 伸缩缝橡胶材料采用三元乙丙橡胶。

支座全部采用板式橡胶支座或四氟板式橡胶支座。

设置在边孔横梁、主孔固定横梁和立柱横梁上面。

3 结构计算与分析

3.1 上部结构静力计算与分析

3.1.1 结构与材料

本桥结构体系采用自锚式钢管混凝土拱桥，以抗压能力强的钢管混凝土作为拱肋、以抗拉能力强的钢绞线作为系杆，随着结构重量的增加逐步张拉系杆以平衡主拱所产生的巨大水平力及边拱肋巨大的负弯矩，最终形成对拱座只有较小推力的拱桥^[1,2]。总体来看为刚性拱柔性系杆结构，桥面刚度相比拱肋要小的多，拱肋为主要受力构件。

主拱肋钢管混凝土，含钢率为 0.085，刚度取值按照钢管混凝土统一理论计算。根据文献 [3]、[4] 中的实验资料和计算结果^[3]，计算出钢管混凝土的弹性模量并与钢材和混凝土作了比较，见表 1。

表 1 钢管混凝土弹性模量

材料	弹性模量/MPa
50 号混凝土	35000
Q 345D 钢	206000
钢管混凝土 $\alpha=0.085$	51363.73

3.1.2 计算图式

在主桥结构分析时，将上、下部结构在拱脚处分离，分别进行计算。然后将桥墩、承台及群桩基础作为整体进行强度验算，并严格控制拱脚位移量。对于立柱、横梁、桥面板及吊杆等局部构件分别建立模型进行设计、计算。

在主桥拱肋内力的计算中分别采用了空间、平面程序进行计算和比较，以证明计算模型的正确性。本桥主拱为双肋式对称结构，而边拱为 3 肋式结构。为精确分析系杆水平力对边拱 3 条肋的影响，在计算系杆张拉力和结构恒载内力时采用空间模型计算，如图

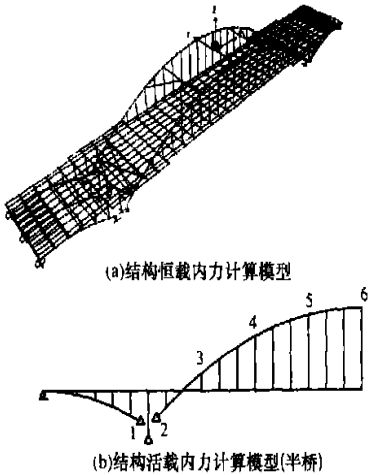


图 2 结构静力计算模型

2 (a) 所示。在计算活载内力时采用平面模型计算，如图 2 (b) 所示，然后按照横向分布系数分配到各条拱肋。使用阶段计算时将恒载与其他荷载相组合，其他荷载包括活载、温度作用、基础沉降等。

3.1.3 计算结果与分析

(1) 各控制截面内力

各控制截面内力组合后最不利工况是恒载+活载+降温，组合结果见表 2。

表 2 各主要截面最不利组合内力 kN

截面号	N_{max}	相应 M	M_{max}	相应 N
1 (边)	17101.7	-11538.9	-13201.8	17032.7
1 (中)	10734.5	-15618.9	-18365.7	10620.5
2	25430.2	-19314.8	-34799.8	23499
3	21362.7	-7535.07	-9427.77	2042.8
4	19251.0	1019.92	11097.1	17073.90
5	18065.0	8972.00	16432.10	16530.40
6	17654.40	14263.20	16873.70	16394.10

(2) 拱肋强度验算

主拱肋强度验算按照钢管混凝土格构式压弯构件验算，将计算的相应截面的最不利内力带入公式，计算得知，最不利截面位于拱脚，应力 $\sigma_{sc} = 30.92\text{MPa}$ $< f_{sc} = 52.6\text{MPa}$ ，可见截面强度满足要求。

(3) 吊杆计算

吊杆采用 PES (FD) 7-121 平行钢丝束新型低应力防腐成品索，破断索力 7 777kN，计算的吊杆的最大拉力为 1 787.825kN，所以吊杆的安全系数为 4.35，满足规范要求。

(4) 系杆计算

为平衡主拱强大的水平推力，沿纵桥向设置了水平系杆，锚固在两边孔的端部。同时系杆也相当于对边拱肋施加了体外预应力。基于这两点考虑，最终每条拱肋共施加了有效水平张拉力 1 550t，拉索应力水平 0.353 R_y 。

(5) 变形计算

主拱变形计算结果见表 3。

表 3 拱顶位置竖向变形 mm

荷载	拱顶变形 (向上为正)
全部自重	-30.1
城市-A 级荷载	-14.61
人群	-3.47
温升	38.7
降温	-77.5

主墩水平变位：为限制主墩的水平位移，沿桥梁纵向设置了水平系杆，通过施工中分批张拉系杆来平衡主拱推力。施工过程中系杆共分 4 次张拉，分别为：(1) 完成主拱圈混凝土灌注施工，边跨拱圈达到

设计强度, 撤掉支架后张拉第 1 批系杆; (2) 钢管混凝土达到设计强度后, 撤掉支架, 张拉第 2 批系杆; (3) 吊杆横梁, 桥面板施工完毕, 张拉第 3 批系杆; (4) 桥面系施工完毕, 张拉第 4 批系杆, 成桥。各施工阶段主墩的水平变位计算结果见表 4。

表 4 主墩水平变位		mm
施工阶段	主墩水平变位 (向河岸方向为正)	
张拉第 1 批系杆	-1. 68	
张拉第 2 批系杆	-1. 54	
张拉第 3 批系杆	-1. 64	
张拉第 4 批系杆	-0. 50	
成桥最不利工况	1. 50	

由表 4 看出, 通过在施工过程中不断施加水平系杆拉力, 大大平衡了主拱的推力, 使得主墩的水平变位较小。并且在施工中连续监测拱脚的水平变位, 保证其不超过 3mm, 否则调整施工加载顺序, 以保证基础的安全。

3.2 稳定性计算与分析

稳定问题是拱桥设计和建造中必须考虑的问题。拱桥结构可能发生的失稳形式有两种, 即平面内 (纵向) 失稳和平面外 (横向) 失稳。一般来讲, 拱桥的面内稳定性较高, 与面内稳定相比, 拱桥的面外稳定问题更为突出。对于中下承式拱桥来说, 由于吊杆的非保向力的作用, 降低了拱桥面外失稳的可能。



图 3 稳定、动力分析空间有限元模型

本桥稳定计算采用空间有限元程序计算, 通过求解结构特征值方法计算稳定系数。建模中将主拱肋、吊杆、桥面系等按照实际情况作为整体考虑。稳定计算模型见图 3。最终计算结果为: 在全部设计荷载作用下, 安全系数 $K=9.4$, 为面外扭倾失稳形式。可见, 本桥稳定性满足要求。

3.3 动力特性计算与分析

钢管混凝土拱桥结构较柔, 从已建成的同类桥型来看, 大部分桥梁都存在着车桥振动较大的问题, 因此, 对该类桥型的动力特性问题必须予以重视。我们认为, 解决这一问题的关键在于: (1) 加大桥面系的刚度, 加强桥面的整体性; (2) 增加拱肋之间的横

撑刚度。因此, 在本桥的设计中综合考虑了 (1)、(2) 两个措施。以改善结构的动力特性。

本桥动力特性计算采用与稳定计算同样的空间模型计算, 分析计算了前 8 阶振型, 计算结果见表 5。

表 5 朝阳东大桥主桥动力特性		
序号	频率/Hz	振型描述
1	1. 107	拱肋面内反对称振动
2	1. 144	拱肋面外对称振动
3	1. 620	拱肋与桥面耦合对称振动
4	1. 817	拱肋面外反对称振动
5	2. 060	以桥面为主的面内对称振动
6	2. 206	以桥面为主的面内反对称振动
7	2. 257	拱肋扭转振动
8	2. 388	桥面面外对称振动

从表 5 可以看出, 结构面内的自振频率与面外自振频率比较接近, 两者之比约为 0.967。

4 结语

(1) 钢管混凝土是一种高强轻质材料, 将它应用于拱桥, 大大减轻了桥梁的自重, 并且方便了主拱肋的施工, 是大跨径拱桥设计中比较理想的建筑材料。

(2) 由于钢管混凝土的高强轻质特点, 将它应用到拱桥中必将导致桥梁的刚度降低。因此钢管混凝土拱桥较传统的石拱桥和钢筋混凝土拱桥的动力和稳定问题更为突出, 必须予以重视。

(3) 钢管混凝土系杆拱桥的系杆是整个桥梁的生命线, 因此, 加强系杆的防腐和维护是极其重要的, 建议尽量采用可换式系杆, 并重视系杆张拉维修孔的防护设计。

(4) 钢管混凝土拱桥作为一种新型的桥梁结构形式, 其设计理论发展还不够完善。目前国内尚无该类桥型的设计和施工规范, 因此, 设计中必须重视该类桥梁的力学分析中合理设计计算参数的选取问题。

(5) 重视吊杆的防腐和防疲劳破坏设计。国内几座同类桥梁事故大都是由于吊杆 (尤其短吊杆) 的腐蚀和疲劳破坏导致桥毁事故。

参考文献:

[1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

[2] 范立础. 桥梁工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[3] 黄桥. 桥梁组合结构设计原理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[4] 钟善桐. 钢管混凝土理论 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2000.