文章编号：1002-0268（2005）06-0082-03

大跨中承式钢管混凝土拱桥桥道系合理位置分析

胡免缢[1]，周水兴[1]，周先颖[2]
（1. 重庆交通学院土木建筑学院，重庆 400074；2. 重庆市渝通公路工程总公司，重庆 400060）

摘要：从功能和构造要求及美学的角度系统地论述大跨中承式钢管混凝土拱桥的桥道系相对位置的设置方法，探讨桥道系相对位置对桥梁结构的稳定与振动的影响，并对部分大跨中承式钢管混凝土拱桥的桥道系相对位置进行统计分析。研究表明：将衡量桥道系相对位置的参数 c（桥道系距拱顶的高度与矢高的比值）设在 0.6 左右为合理位置，可使桥梁结构具有较好的横向稳定性和动力性能，并具有较强的美感。

关键词：中承式钢管混凝土拱桥；桥道系相对位置；美学；结构分析
中图分类号：U448.22 文献标识码：A

Analysis of the Best Bridge Deck's Relative Position for Long-span Half-through CFST Arch Bridge

HU Mian-yi[1]，*ZHOU Shui-xing*[1]，*ZHOU Xian-ying*[2]
（1. Institute of Architecture and Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Yutong General Corporation of Highway Engineering, Chongqing 400060, China）

Abstract: From the view of function, construction demand and aesthetic effect, the method to design the bridge deck system's position was systematically discussed for the long-span half-through concrete filled steel tubular arch bridge. The influence on the structural stability and vibration caused by various bridge deck system's positions were analyzed. The data of the bridge deck system's positions of some long-span half-through CFST arch bridges were collected and analyze by statistics method. It indicates that the best position of a bridge deck system can be confirmed when c, the parameter of a bridge deck system's position (ratio of the distance between deck and crown to rise), approximates 0.6. If so, the bridge construction will possess better lateral stability and dynamic performance, with more pleasant impression.

Key words: Half-through CFST arch bridge; Relative positron of bridge deck; Aesthetics; Structural analysis

目前，桥道系的相对位置主要是根据功能和构造要求来进行设置，具体涉及到桥位处的地形、地质及水文条件和道路线形、工程造价等诸多方面。在选定了桥位，进行了必要的水文水力计算，掌握了桥址处的地质、地形等资料后，并考虑各方面影响因素的基础上综合比较分析而确定的。但其具体过程则是在桥梁设计者们自觉或不自觉的意识下完成的，桥道系相对位置的确定不仅首先要满足功能和构造等外部条件，而且还需从美学观点以及对桥梁结构的整体稳定性和动力性能的影响等多角度进行综合考虑。

收稿日期：2004-02-19
基金项目：重庆市自然科学基金资助项目（2003074）
作者简介：胡免缢（1974—），男，四川武胜人，讲师，主要研究方向为桥梁设计理论.（mianyihu@163.com）

1　根据美学观点设置桥道系相对位置

大跨中承式钢管混凝土拱桥常常成为一个城市或地区的标志性建筑。其在立面上的形式可归结为曲线和直线的组合，曲线的拱肋具有优雅、柔软的感觉，曲度变化，产生运动的视觉冲击；直线的桥道系具有明显的方向性，水平的直线保持重力的平衡，具有安定感，两者的完美搭配形成一个刚柔相济的和谐整体。因此，桥道系的相对位置对拱肋曲线的分割，不仅要满足功能和构造上的要求，还要特别注重形式美，以达到与自然和社会的和谐统一。

1.1　桥道系相对位置的设置要注重与自然环境的和谐

桥梁和桥位处的自然景物及附近人工建筑物一起处在人们生活空间之中，构成整体景观。它既影响着环境，又对人们生活带来变化。因此，桥梁设计首先要考虑的是两者协调一致，互相配合、融为一体。

大跨中承式钢管混凝土拱桥以其优美的造型而被广泛采用，其桥道系的相对位置对整体造型以及与环境的协调亦起着重要作用。不同的桥道系相对位置会产生差异较大的美学效果。如图 1（a）所示，桥道系距拱顶太近，对行车产生较强压抑感，从立面上看也有一种不稳定的感觉，同时亦会增加两岸引道工程，而提高造价；图 1（c）虽对桥上行车空间有所扩张，其整体美学效果比图 1（a）要好，使用在 V 型山谷上效果会更佳，但若桥下通航必将产生压抑感，并且两岸接线会大面积开挖，势必会破坏自然景观；图1（b）给人感觉最佳，桥道系对拱肋的分割比较匀称，桥上、桥下的视野都比较开阔，与自然环境也比较协调。

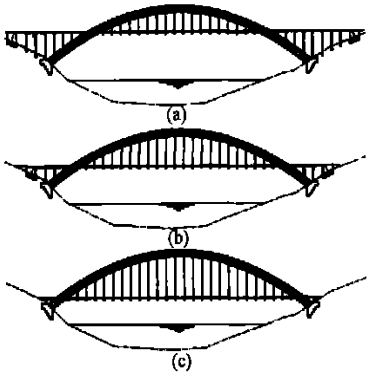

图 **1**　不同桥道系位置的美学效果

1.2　桥道系相对位置的设置要注重自身比例的协调

比例是以桥梁建筑各个局部所固有的功能联系和结构联系作为艺术构思的前提而产生的，并作为思想内容的形象化和艺术化的表达手段。桥梁美学设计使各部体型匀称、比例和谐，将赋予桥梁以协调一致性和艺术完整性。现代桥梁建筑是这样多彩多姿，很大程度上取决于设计者所选择的良好比例，以致比例成了至关重要的原则。正如意大利著名艺术家达·芬奇所说："美感完全建立在各部分的神圣的比例关系上"。现代桥梁的比例、尺度处理，不但应使之匀称、协调，而且还要给人们以简洁、明快的美感。桥道系对拱肋的分割比例亦是整个中承式钢管混凝土拱桥美学效果的重要影响因素之一。

众所周知，对于美的比例协调法则，主要有黄金分割（Golden Section）、费博纳西级数（the Fibonacci-serise）和动态匀称级数等 3 种学说。凡采用了以上比率的图形被公认为是美的，目前被广泛采用的是黄金分割比例。因此桥道系对拱肋的分割比例，即桥道系距拱顶的高度与主拱矢高之比可选用 0.6 左右，会达到较好的美学效果，如图 1（b）为 0.618，图 1（a）为0.410，图 1（c）为 0.801。

通过以上的分析，我们也可发现，功能美与形式美并不矛盾，它们也是辨证统一的。

2　部分大跨中承式钢管混凝土拱桥桥道系相对位置统计分析

将衡量桥道系相对位置的参数定义为

$$c = f_1 / f \tag{1}$$

式中，f_1 为桥道系距拱顶的高度；f 为主拱矢高。

将部分大跨中承式钢管混凝土拱桥桥道系相对位置列于表 1 中。

表 **1**　部分大跨中承式钢管混凝土拱桥桥道系相对位置

序号	桥名	L/m	f/L	$c = f_1/f$
1	重庆巫峡长江大桥	460	1/3.8（0.263）	0.470
2	广州丫髻沙（珠江）大桥	360	1/4.5（0.222）	0.643
3	湖南益阳茅草街大桥	356	1/5（0.200）	0.755
4	湖北秭归青干河大桥	256	1/4.945（0.202）	0.471
5	浙江三门健跳大桥	245	1/5（0.200）	0.516
6	武汉江汉五桥	240	1/5（0.200）	0.629
7	浙江象山铜瓦门大桥	238	1/4.822（0.207）	0.618
8	江苏京杭运河大桥	235	1/4（0.250）	0.696
9	湖北秭归龙潭河大桥	208	1/4.935（0.203）	0.556
10	广东南海三山西大桥	200	1/4.5（0.222）	0.885
11	广西梧州桂江三桥	175	1/4（0.250）	0.733
12	浙江东阳中山大桥	160	1/5（0.200）	0.772

分析表 1 中数据发现，c 值主要介于 0.6～0.8 之间。对表中数据进行线性回归分析，可得 c 对 L 及 c 对 f/L 的回归方程分别如式（2）和式（3），回归曲线分别如图2、图 3 所示。

c 对 L 的线性回归方程

$$c = -0.000\,619\,39L + 0.807\,04 \quad (2)$$

c 对 f/L 的线性回归方程

$$c = -0.047\,316(f/L) + 0.635\,01 \quad (3)$$

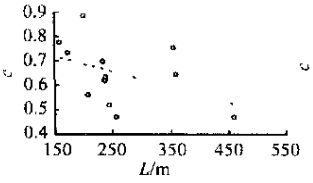

图 2 c 对 L 的回归曲线

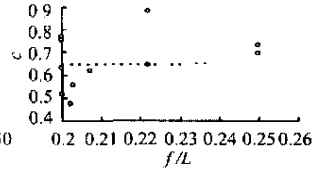

图 3 c 对 f/L 的回归曲线

考察式（2），c 的最大值约在 0.8 左右；同时考察式（3），c 的最小值约在 0.6 左右，由此可见，初步拟定 c 值时，亦可将其设在 0.6～0.8 之间。

3 桥道系位置对结构的稳定性影响分析

为分析桥道系相对位置对桥梁结构稳定性影响，确定桥例主拱参数如下：桥跨 $L = 160$m，矢跨比 $f/L = 1/5$，拱轴线形式为二次抛物线，拱肋为等高等宽桁式钢管混凝土结构，上下弦杆为 4Φ750×12mm 钢管，内灌注 C50 混凝土，全桥共设 5 道钢管空间桁式横撑。计算荷载取 100kN/m^2 均布于桥面板上。取桥道系相对位置参数 c 分别为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9，按空间结构进行屈曲分析。

为便于统一比较，忽略了桥道系位置的变化而改变横向联结系的布局，亦即分析时均采用相同的主拱结构。分析结果表明，在不同桥道系相对位置情况下，桥梁结构失稳模态均为面外失稳。将不同 c 值下屈曲分析的 1 阶特征值列于表 2 和图 4 中。

表 2 桥例大跨中承式钢管混凝土拱桥屈曲分析结果

$c = f_1/f$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
λ_1	1.266986	1.380874	2.386387	2.191463	1.970302	1.712262

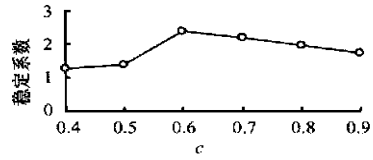

图 4 不同 c 值下结构的稳定安全系数

从表 2 和图 4 中可见：当 c 值由 0.4 逐渐增大（即桥道系相对位置逐渐降低）时，λ_1 值亦逐渐增大，但当 c 值大于 0.6 以后，λ_1 值则随 c 值的增大而减小。

分析其原因：当桥道系相对位置降低（亦即 c 值增大）时，拱上立柱促使侧移作用减弱，吊杆的非保向力效应增强，结构横向刚度降低，但前两者的作用对结构横向稳定性的贡献大于结构横向刚度降低对稳定的削弱程度，而使整个结构的横向稳定特征值增大；当达到某一位置后，继续降低桥道系位置则会导致结构横向刚度降低对稳定的削弱程度要大于拱上立柱和吊杆的作用对结构横向稳定的贡献，而使整个结构的横向稳定特征值减小。

因此，设置大跨中承式钢管混凝土拱桥的桥道系相对位置时，在满足其它条件下，将桥道系设在 $c = f_1/f = 0.6 \sim 0.8$ 之间可使桥梁具有较大的横向稳定性，此结论与文献 [8] 的分析结果是一致的。

4 桥道系位置对结构的动力性能影响分析

取桥例主拱参数同上节，桥道系相对位置参数 c 分别为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9，按空间结构进行模态分析。为便于统一比较，忽略了桥道系位置的变化而改变横向联结系的布局，亦即分析时均采用相同的主拱结构。将不同 c 值下模态分析的前 5 阶自振频率列于表 3 和图 5 中。

表 3 桥例大跨中承式钢管混凝土拱桥模态分析结果 Hz

阶次	振动模态	$c = f_1/f$					
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	面外侧倾振动	0.722545	0.651899	0.606633	0.540255	0.489648	0.469612
2	面内反对称弯曲振动	1.113793	0.999725	0.929432	0.850054	0.784941	0.727557
3	面外弯扭振动	1.425180	1.262426	1.175785	1.029324	0.926442	0.861090
4	面内对称弯曲振动	1.601676	1.527165	1.468008	1.358452	1.252855	1.145441
5	面外弯扭振动	1.704427	1.703539	1.636940	1.486808	1.393354	1.359537

从表 3 中可见：当 c 值由 0.4 逐渐增大（即桥道系相对位置逐渐降低）时，结构的各阶自振频率值则均逐渐减小。虽然桥道系位置降低使整个桥梁结构的重心位置下降，能提高各阶自振频率值，但同时因桥道系位置的降低也减弱了桥道系与拱肋的联合作用，从而降低了结构的整体刚度导致自振频率值降低，因大跨中承式钢管混凝土拱桥的桥道系一般均较轻柔，导致因重心位置降低的正面影响相对于因整体刚度降低的负面影响要弱，两者综合影响结果则导致结构的自振频率降低。

（下转第 93 页）

施工性能，保证其混合料的压实效果，减少沥青路面的水损害。建议高温性能主要通过改善集料级配来达到，增强抗变形能力主要通过采用优质沥青来实现。

（3）钢桥面沥青路面铺装体系的疲劳破坏主要有两种形式，最终出现什么形式的破坏取决于沥青铺装层与防水粘结层目前强度的相对强弱。

参考文献：

[1] 张起森，等．钢桥面沥青铺装层直道试验研究报告［R］．长沙理工大学，2001.

[2] 李宇峙，邵腊庚，等．宜昌长江公路大桥钢桥面沥青铺装体系直道试验研究［R］．长沙理工大学，2001.

[3] 张起森，等．厦门海沧大桥钢桥面沥青铺装层直道疲劳试验研究［J］．中国公路学报，2001（1）：60－65.

[4] LI Yu-shi, ZHANG Qi-sen, SHAO La-geng, LI Chuang-ming. Research on Fatigue test in the Direct Track for the Asphalt Deck Pavement of Steel Bridge［R］. The 6rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1999.

[5] 邵腊庚，等．直道钢桥面沥青铺装层动应变测试与分析［J］．公路，2000（1）：63－66.

[6] Kinghan, Kallas. Laboratory Fatigue and its Relationship to Pavement Performance［C］. The 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1972.

（上接第 77 页）

[3] 谢肖礼，秦荣．收缩徐变对钢管混凝土拱桥影响的理论研究［J］．桥梁建设，2001，4：1－4.

[4] 顾建中，刘西拉，陈卫峰．考虑徐变的钢管混凝土拱桥结构分析［J］．上海交通大学学报，2001，35（10）：1574－1577.

[5] 王元丰，韩冰．钢管混凝土轴心受压构件的徐变分析［J］．中国公路学报，2000，13（2）：57－60.

[6] Neville A M, Dilger W H, Brooks J J. Creep of Plain and Structure Concrete［M］. New York: Construction Press, 1983.

[7] 惠荣炎，黄国兴，易冰若．混凝土徐变［M］．北京：中国铁道出版社，1988.

[8] 谭素杰，齐加连．长期荷载对钢管混凝土受压构件强度影响的实验研究［J］．哈尔滨建筑工程学院学报，1987（2）：10－24.

（上接第 84 页）

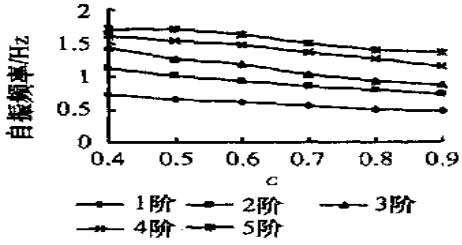

图 5　不同 c 值下结构的前 5 阶自振频率

分析图 5 曲线的斜率发现：c 值在 0.5～0.6 之间时各阶频率的曲线斜率相对较小，而在 0.6～0.7 之间时其斜率则相对较大。因此，设置大跨中承式钢管混凝土拱桥的桥道系相对位置时，在满足其它条件下，将桥道系设在 $c=f_1/f\leqslant 0.6$ 范围内可使桥梁结构具有较好的动力性能。

5　结论

（1）将衡量桥道系相对位置的参数 $c=f_1/f$ 设在 0.6 左右会得到较好的美学效果。

（2）通过对部分桥道系相对位置的统计分析发现，c 值主要介于 0.6～0.8 之间。

（3）通过屈曲分析得到，将桥道系设在 $c=0.6$～0.8 之间可使桥梁结构具有较大的横向稳定性。

（4）通过模态分析得到，将桥道系设在 $c\leqslant 0.6$ 范围内可使桥梁结构具有较好的动力性能。

（5）综合分析可知：在满足功能和构造要求及其它外部条件的情况下，将大跨中承式钢管混凝土拱桥的桥道系设在 $c=0.6$ 左右为合理位置，可使桥梁结构具有较好的横向稳定性和动力性能，并具有较强的美感。

参考文献：

[1] JTJ021-89，公路桥涵设计通用规范［S］．

[2] JTJ062-91，公路桥位勘测设计规范［S］．

[3] 姚玲森．桥梁工程［M］．北京：人民交通出版社，1998.

[4] 叶镇国．水力学及桥涵水文［M］．北京：人民交通出版社，1995.

[5] 赵经寰．形式美学入门［M］．沈阳：辽宁美术出版社，1998.

[6] 樊凡．桥梁美学［M］．北京：人民交通出版社，1987.

[7] 三本宏［日］著，姜维龙，盛建国，译．桥梁美学［M］．北京：人民交通出版社，1989.

[8] 向中富．中承式拱桥横向屈曲临界荷载实用计算［J］．重庆交通学院学报，1995，14（1）：27－31.