

文章编号: 1002-0268 (2007) 01-0090-05

飞鸟式钢管混凝土拱桥设计计算分析

郑怀颖¹, 陈宝春²

(1. 福建省交通规划勘测设计院, 福建 福州 350004 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 飞鸟式钢管混凝土拱桥美观且受力合理, 但该种桥型设计参数较多, 各参数相互关联, 给设计工作带来了困难。通过对该桥型结构受力特点的分析, 提出了恒载作用下的简化计算公式, 并以东莞水道特大桥为工程背景, 分析了结构水平力分配特点, 进行了系杆与吊杆的受力比较, 对全桥和主跨的 3 种计算模型进行了比较分析, 可为此类桥梁的设计计算提供借鉴。

关键词: 桥梁工程; 桥型; 钢管混凝土; 拱桥; 飞鸟式

中图分类号: TU528.59; U448.22 **文献标识码:** A

Design Calculation Analysis of Fly-bird-type CFST Arch Bridge

ZHENG Huai-ying¹, CHEN Bao-chun²

(1. Fujian Communication Planning & Design Institute, Fujian Fuzhou 350004, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fujian Fuzhou 350002, China)

Abstract: Fly-bird-type CFST arch bridge is a reasonable structure with nice appearance. Many parameters related to each other in such a structure make the design a hard work. Simplified calculation formulas for dead load action are put forward by analyzing the structure character of this type bridge. Taking Dongguan Shuidao Bridge as a case study, distribution of horizontal force and comparison of the behavior between tie bars and hangers are analyzed. Three calculation models for primary design are introduced and the results are compared. All the analysis can be reference for design of this type bridge.

Key words: bridge engineering; bridge type; concrete-filled steel tube; arch bridge; fly-bird-type

0 概述

飞鸟式也称飞燕式, 是钢管混凝土拱桥中极具特色的一种桥型。它是指两边跨为半跨悬臂上承式拱、主跨为中承式钢管混凝土拱, 通过锚固于两边跨端部的拉索来平衡主跨大部分水平推力的桥梁结构, 也有称自平衡式或自锚式的^[1-3]。飞鸟式桥型降低了平原地区或软基地区拱桥的下部与基础的工程量与造价, 同时造型美观, 因此受到人们的喜爱。广东南海三山西大桥是第 1 座飞鸟式钢管混凝土拱桥, 跨径组合为 45 + 200 + 45 m, 它也是钢管混凝土拱桥中第 1 座跨径上 200 m 的大桥。2000 年建成的广州丫髻沙大桥, 跨径组合为 76 + 360 + 76 m, 则把这一桥型, 也可以

说把钢管混凝土拱桥的跨径推上了一个新台阶。

飞鸟式钢管混凝土拱桥中的主跨、边跨、主拱墩及系杆 4 大组成部分, 四位一体, 相互影响、相互依存, 密不可分, 无论哪一部分都无法独立存在^[4]。飞鸟式钢管混凝土拱桥总体设计的关键是使这 4 个组成部分形成有机的、受力合理的结构。在大跨径拱桥中, 恒载往往在总荷载中所占的比重很大。因此, 在结构总体布置中, 应尽可能使结构在恒载作用下, 主拱的受力与固定拱相似、边跨的受力与半拱结构相似。为此, 恒载作用下拱墩结点的位移与转角应该较小, 边拱的弯矩也应该较小。飞鸟式拱桥最常见的是 3 跨结构形式, 见图 1。

这种桥型的特点是主跨为中承式拱, 跨径较大,

收稿日期: 2005-07-14

基金项目: 福建省重大科技资助项目 (2003F007)

作者简介: 郑怀颖 (1979-), 女, 福建福州人, 工学硕士, 研究方向为桥梁结构工程. (cnying3932@sina.com)

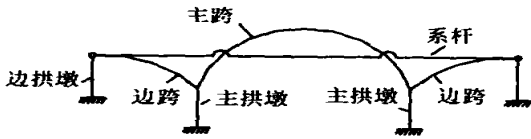


图 1 3 跨飞鸟式钢管混凝土拱桥形式

Fig. 1 Three-span fly-bird-type CFST arch bridge

矢跨比较大; 边跨为上承式半拱, 跨径较小, 矢跨比较小; 边跨的荷载集度较之主跨为大。结构的这些特点, 为利用边跨来平衡主跨的水平推力创造了条件。此外, 还有边跨端部的端横梁, 既是飞鸟式拱与引桥联系、各拱肋联结和拉索(系杆)锚固的需要, 也是平衡主跨水平推力一个十分有利的条件。

对于飞鸟式钢管混凝土拱桥的受力性能针对具体桥梁进行设计与施工的介绍性资料已较多, 但对其受力特点进行深入分析的还较少, 本文将以东莞水道特大桥为具体分析对象, 对这种结构在恒载作用下的受力性能、简化计算模型、系杆与桩基的受力特点等问题进行分析, 以供实际应用参考。

1 东莞水道特大桥和计算模型

东莞水道特大桥位于广东省东莞市五环路, 桥梁跨越东莞水道, 主桥为三孔 50 + 280 + 50 m 飞鸟式钢管混凝土拱桥。主拱拱轴线为悬链线, 计算跨径 271.5 m, 计算矢高 54.3 m, 计算矢跨比 1/5, 拱轴系数为 1.5。大桥总体布置图见图 2。

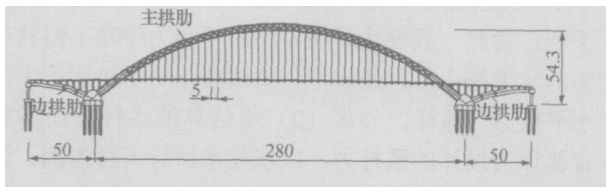


图 2 东莞水道大桥总体布置图 (单位: m)

Fig. 2 Elevation of Dongguan Shuidao bridge (unit: m)

主拱肋采用等截面钢管混凝土空间桁架结构, 拱肋全高为 5.5 m, 全宽为 2.5 m, 上下弦管为 $\phi 1\ 000 \times 16\ \text{mm}$ 的 Q345c 钢管, 拱脚第 1 段钢管壁厚增至 $\phi 1\ 000 \times 18\ \text{mm}$ 。弦管间横向缀板为 12 mm 厚的 Q345c 钢板。弦管及缀板内均填 50 号微膨胀混凝土形成钢管混凝土结构。腹杆为 $\phi 500 \times 12\ \text{mm}$ 的 Q345c 的空钢管。拱肋从拱脚至桥面以上约 2 m 为钢管混凝土实心结构, 全截面用混凝土填实。边拱肋为半跨 50 m 拱形结构, 采用钢筋混凝土实心断面, 端横梁位置断面尺寸为 4.0 m \times 3.19 m (高 \times 宽), 其他位置为 4.0 m \times 2.5 m (高 \times 宽)。边拱端部锚有强大的预应力钢绞线系杆。

东莞水道桥成桥受力采用 ANSYS 分析, 空间有限元模型见图 3。模型中, 主拱肋、边拱肋、横梁、横撑、纵梁、立柱、桩均模拟为 Beam4 空间梁单元。该桥拱肋为横哑铃形截面, 拱肋模型中将上(下)弦管、上(下)缀板各设为一个单元, 则拱肋截面被分为 6 个单元。拱肋截面具体的单元划分情况见图 4。

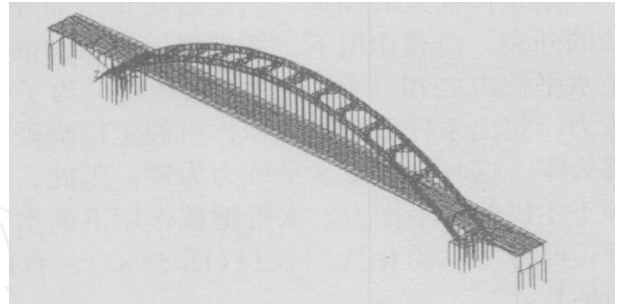


图 3 东莞水道桥成桥有限元空间模型

Fig. 3 Three-dimensional FE model of Dongguan Shuidao bridge

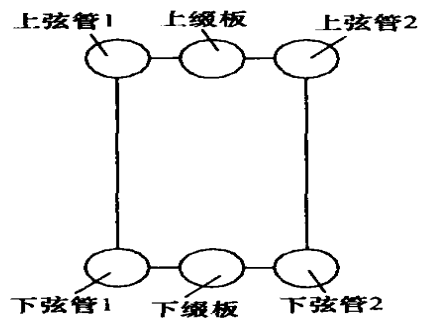


图 4 主拱截面划分情况

Fig. 4 Element in main arch-rib cross-section

吊杆与系杆用只受拉的 link10 单元模拟。系杆力近似地按张拉力大小作为水平力作用于端横梁上。桥面系用梁格法处理, 采用空间梁单元 Beam4 模拟。地基土作用用弹簧模拟, 地基土的水平抗力用 m 法计算。钢管混凝土拱肋等效为等刚度单一材料单元, 钢管和管内混凝土的应力根据刚度分配分别得到。钢管混凝土组合截面特性按式 (1) 进行计算:

$$\begin{cases} E_{sc} A_{sc} = E_c A_c + E_s A_s, \\ E_{sc} I_{sc} = E_c I_c + E_s I_s, \\ s_c A_{sc} = c A_c + s A_s, \end{cases} \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量; A 为面积; I 为惯性矩; ρ 为容重; 下标 SC、C、S 分别表示钢管混凝土、混凝土和钢。

2 恒载作用下结构总体受力简化分析

飞鸟式钢管混凝土拱桥的跨径一般较大, 恒载在总荷载中相当大的比重, 是设计中需要考虑的主要荷

载,同时由于恒载的分布接近均布,也使得简化分析易于实现,因此,本节着重探讨飞鸟式钢管混凝土拱桥在恒载作用下总体受力的简化分析。这种简化分析在进行桥梁总体设计和初步设计时将起到十分重要的作用。

飞鸟式钢管混凝土拱桥的设计有两个应考虑的问题。一是系杆张力的确定,二是要防止钢筋混凝土边拱肋的开裂。恒载作用下,系杆张力为主拱推力与地基土水平抗力之和(差),初步设计时,为了估算系杆张力,定出系杆所需的面积,可假定拱脚处的水平位移为零,这时地基土水平抗力为零。因此,系杆张力等于主拱的水平推力。求得恒载作用下的水平推力 T 时,可将主拱简化为三铰拱(图5(a)),有以下系杆力估算式

$$T = \frac{g_1 \cdot L_1^2}{8f_1}, \quad (2)$$

式中, T 为系杆力; g_1 为主拱恒载集度; L_1 为主跨跨径; f_1 为主拱矢高。

边拱的受力行为在恒载作用下应为半拱形式,才能最大限度地减小边拱肋的弯矩,从而避免因弯拉应力太大而导致混凝土的开裂。边拱肋所受恒载的作用力包括:边拱恒载 $g_2 L_2$ 、端横梁压重 P 、边墩支反力 R 及系杆拉力 T 。其中端横梁压重往往与边墩支反力互相抵消(支反力太大时,边拱恒载也有一部分参与抵消支反力),以避免发生边拱端部由于温降太大所引起的上抬。在边跨恒载和水平系杆拉力的作用下,拱脚的弯矩最大,边拱脚下缘混凝土容易开裂。为使边拱受力合理,令边拱脚的弯矩为零,这样边拱的受力就与一个半跨三铰拱的受力相同,见图5(b),有边拱弯矩平衡式

$$M_o = T \cdot f_2 - \frac{g_2 \cdot L_2^2}{2} = 0, \quad (3)$$

式中, M_o 为边拱脚弯矩; L_2 为边跨跨径; f_2 为边拱矢高; g_2 为边拱恒载集度;其他符号意义同前。

将式(2)代入式(3)可得

$$\frac{g_1 L_1^2}{8f_1} \cdot f_2 - \frac{g_2 \cdot L_2^2}{2} = 0. \quad (4)$$

式(4)给出了三跨飞鸟式拱在恒载作用下,结构总体受力简化计算的基本平衡方程。在这个方程中,主要变量有主跨跨径 L_1 、边跨跨径 L_2 、主跨矢高 f_1 、边跨矢高 f_2 、主跨恒载集度 g_1 、边拱恒载集度 g_2 。在初步设计时,可根据工程经验与已建桥梁的资料,确定某些变量,然后应用式(4)确定另一些变量。显然,由于飞鸟式拱的结构较为复杂,影响

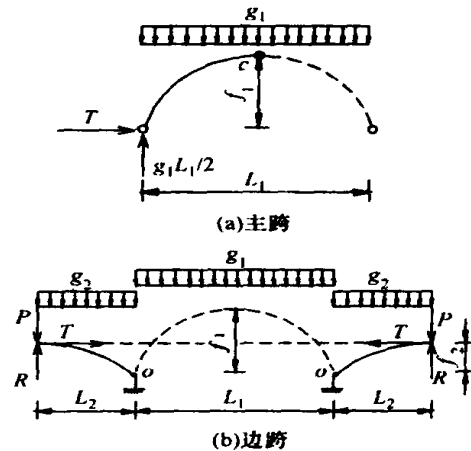


图5 恒载作用下结构受力分析简图

Fig. 5 Simplified figure of structure behavior analysis under dead loads

参数多,它比一般拱桥的结构拟定要复杂、更需要经验,也显得更为重要。

以东莞水道特大桥为例,计算单片拱肋受力情况。该桥中跨跨径271.5 m,矢高54.3 m,恒载集度 $g_1 = 266$ kN/m,将这些参数代入公式(2)可算得估算的系杆张力 T 为 4.51×10^4 kN。空间有限元计算的系杆张力为 4.44×10^4 kN。由此可见,用公式(2)估算系杆在恒载作用下的张力是可行的。

应该指出的是,活载作用下拱的水平推力由拱、桥墩和系杆共同承担,由于系杆抗拉刚度很小,所以水平力主要由拱和墩承担,这对于拱和墩的受力极为不利,为此一般设计时均考虑系杆张力中除了恒载产生的水平推力外,还加上一半活载作用下拱所产生的水平推力。这样,公式(2)所估算的系杆力还不能直接作为设计的系杆力。以东莞水道特大桥为例,该桥的设计系杆力是 6.1×10^4 kN,比前述估算的系杆力要大30%左右。

东莞水道特大桥的边跨计算跨径 $L_2 = 44.7$ m,计算矢高 $f_2 = 9.1$ m,恒载集度 $g_2 = 506.1$ kN/m。把边跨参数和估算的系杆张力 T 代入公式(3)的左边,可得, $M_o = -9.6 \times 10^4$ kN·m,说明拱脚有负弯矩产生,但此时的拱脚负弯矩比边跨作为悬臂曲梁要小很多,仅为悬臂梁弯矩 5.06×10^5 kN·m的19%。

上述计算是在边拱端横梁与边墩支反力相等的假定下给出的,实际上边跨的恒载自重也有一部分由边墩承担,由此边跨自重在拱脚所产生的负弯矩要小于作为悬臂梁所产生的负弯矩($g \cdot L_2^2$)/2,因此实际的边墩拱脚负弯矩要比式(3)计算出来的还要小。换言之,应用式(3)作为初步设计中的参数估算是可行的。

3 水平力分析

在飞鸟式钢管混凝土拱桥中, 主拱产生的水平推力由系杆、桩基础与主拱自身承担。本节以东莞水道大桥为例, 以其有限元计算结果进行分析。

东莞水道大桥设计施加的系杆张力为 6.10×10^4 kN, 它是主动力, 这个力除平衡主拱恒载产生的水平推力 4.44×10^4 kN 外, 还对结构储备了向着主拱方向的水平力, 此时桩基有朝主拱方向的水平力 0.93×10^4 kN。活载作用时主拱产生的水平力, 一部分由这个储备的水平力平衡, 余下的由桩基和系杆(作为构件)来承担。对于水平推力最大的工况, 桩基所承担的水平力为 0.396×10^4 kN(背离主拱方向), 系杆所承担的水平力(增量)为 0.018×10^4 kN。

对于桩基来说, 若取消系杆及系杆张力, 恒载作用下东莞水道大桥的桩基水平力为 3.695×10^4 kN, 是有系杆时的 3.97 倍; 活载作用下, 桩基水平力为 0.41×10^4 kN, 是有系杆时的 1.04 倍。显然, 飞鸟式拱由于系杆平衡了拱的水平推力的绝大部分, 使桩基所受的水平推力极大地降低, 使这种桥型在地质条件较差的地区的应用成为可能。

从上面的分析也可以看出, 对于刚架系杆拱来说, 活载作用下拱的水平推力基本由桥墩与基础承担, 从这个意义上来说, 考虑系杆变形后, 刚架系杆拱并不是真正意义上的无推力结构。然而, 由于对于大跨度钢管混凝土拱桥来说, 恒载在总荷载中所占的比重很大, 除去恒载后桥墩及基础所需承担的水平推力一般来说不大, 而且还可以通过适当的系杆超张拉给予最大限度的减小, 从这个角度可以看成无推力拱。

对于系杆来说, 活载作用下它作为构件受力, 也参与承担了主拱水平推力。然而, 由于其抗拉刚度远小于墩的抗推刚度, 所以系杆只承担很小部分的水平力。对于东莞水道大桥来说, 系杆的设计张力为 6.10×10^4 kN, 而在活载作用下(水平推力最大的工况)所产生的仅 0.018×10^4 kN(被动力), 仅为前者的 0.3%, 因此在实际计算时, 当跨径较大时, 恒载相对于活载的比例较大, 在系杆力的计算可以忽略活载作用下产生的拉力, 只需计算恒载作用下用于平衡水平推力的拉力。同时, 由于系杆的作用主要是以主动的张拉力来平衡恒载的水平力, 所以它与吊杆或斜拉桥中的拉索受力有很大的不同, 通常把系杆看成预应力体外索, 而不考虑其疲劳问题。

4 不同计算模型比较

4.1 计算模型介绍

由于飞鸟式钢管混凝土拱桥结构复杂, 在进行主拱的初步设计计算时, 若能将飞鸟式拱桥空间模型简化为固定拱或平面模型, 可大大减小计算量^[5~8]。因此, 本节采用有限元程序 ANSYS 建模, 除了图 3 所示的空间有限元模型外, 还建立了两个简化计算模型——固定拱模型和平面模型, 并将简化计算模型与空间有限元模型进行了比较。以下为简单起见, 用数字表示这 3 个模型: 模型 1 为空间有限元模型(图 3); 模型 2 为固定拱; 模型 3 为平面模型。

固定拱模型是把空间有限元模型中的两个边拱删去, 并将主拱肋拱脚处完全固结而形成的空间模型。平面模型是取空间有限元模型中的一片拱肋(含主边拱)作为研究对象, 无横向尺寸, 横向荷载通过杠杆法分配到偏载一方的桥面上。

4.2 截面内力

表 1 给出 3 种模型在荷载组合下的全截面计算内力比较。其中, 活载取拱脚负弯矩最大工况下的荷载布置方式。

表 1 3 种模型中拱内力差别(表中内力值均 $\times 10^3$)

Tab. 1 Comparison of arch-rib inner force among three models

项目	模型类别	拱脚		1/4 截面		拱顶	
		M / (kN·m)	N/kN	M / (kN·m)	N/kN	M / (kN·m)	N/kN
恒载作用	1	148	-702	-79	-510	198	-462
	2	88	-725	-72	-509	238	-462
	3	157	-683	-76	-504	186	-461
活载作用	1	17	-46	149	-19	-54	-19
	2	25	-41	149	-19	-57	-19
	3	11	-31	110	-31	-39	-14
1.2 × 恒载 + 1.4 × 活载	1	201	-907	114	-639	162	-581
	2	141	-927	122	-637	206	-581
	3	204	-863	63	-648	169	-573
N 差别	1 2	2 %		0.3 %		0	
百分比	1 3	5 %		1 %		1 %	

注: 轴力以拉为正, 压为负; 弯矩以拱背受压为正, 拱腹受压为负。

由表 1 可见, 在恒载作用下, 固定拱、平面模型的轴力值接近空间模型的计算值, 差别最大的仅 3%, 在拱脚处。在活载作用下, 3 种模型轴力值较恒载作用下的计算值小很多, 固定拱轴力值与空间模型的最大差别在拱脚处, 后者比前者大 11%; 平面模型轴力值与空间模型的最大差别在 1/4 截面处, 差别介于 26% ~ 63%。

在恒活载共同作用下, 固定拱、平面模型的轴力值与空间模型的差别均小于 5%。因此, 在计算主拱肋



全截面轴力时,可将飞鸟式拱简化为固定拱或平面模型。从上面分析看,3种模型计算的弯矩值相差较大,因此对于截面弯矩来说,简化计算会产生较大的误差。然而,对于桁式肋拱来说,截面的弯矩值最后也是以弦杆轴力为主承担的,因此,对于弦杆来说,截面弯矩值的差异会带来多大的影响,可不可以采用简化模型来计算,详见下一小节分析。

4.3 弦杆内力与极限承载力

为了进一步对主拱肋各弦杆截面内力进行比较,表2给出不同模型主拱外侧上弦杆内力差别。荷载组合按 $1.2 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{活载}$ 计, e 表示荷载组合下的偏心率折减系数(查文献[4]计算得出), N_u 为弦杆的轴向极限承载力, $N_u = \eta N_0$, $N_0 = f_c A_c (1 + \sqrt{1 + \frac{e}{f_a A_a / f_c A_c}})$, $\eta = f_a A_a / f_c A_c$, $\eta = 1$ 。

由表2可见,在恒载作用下,3种模型的弦杆轴力值相差很小,最大的仅为3%(在拱顶处)。在活载作用下,3种模型轴力值相差较大,固定拱轴力值与空间模型的最大差别在拱顶处,前者比后者大26%;平面模型轴力值与空间模型的最大差别在拱脚处,后者比前者大35%。然而,由于活载产生的弦杆的轴力值与表2 3种模型主拱外侧上弦杆内力(表中内力值均 $\times 10^2$)

Tab. 2 Inner force of outside main arch-rib upper chord of three models

项目	模型类别	拱脚		1/4 截面		拱顶	
		M / (kN·m)	N/kN	M / (kN·m)	N/kN	M / (kN·m)	N/kN
恒载作用	1	-0.099	-155	-1.07	-95.9	4.05	-112
	2	2.24	-156	-1.09	-96.2	4.18	-115
	3	-1.04	-152	-1.13	-94.5	2.24	-109
活载作用	1	-2.99	-11.4	0.565	-16.8	0.114	0.892
	2	-4.42	-11.8	0.571	-16.8	0.103	1.12
	3	-2.13	-7.38	0.438	-12.4	-0.108	0.759
1.2 × 恒载 + 1.4 × 活载	1	-4.305	-202	-0.493	-138.6	5.02	-133
	2	-3.5	-204	-0.509	-138.9	5.16	-136
	3	-4.23	-193	-0.743	-130.8	2.54	-130
N 差别	1 2	1%		0.2%		2%	
百分比	1 3	4%		6%		2%	
e	1	0.924		0.986		0.874	
	2	0.938		0.986		0.873	
	3	0.923		0.979		0.931	
N _u	1	554		562		498	
	2	562		562		497	
	3	553		558		531	
N _u 差别	1 2	1%		0		0.2%	
百分比	1 3	0.2%		0.7%		6%	

恒载效应相比小很多,因此,在恒活载共同作用下,固定拱、平面模型的轴力值与空间模型的差别均小于6%,轴向极限承载力的差别最大也不超过6%。因此,飞鸟式拱在进行主拱的初步设计计算时,可以将结构简化为固定拱或平面模型。

5 结语

(1) 本文提出了飞鸟式钢管混凝土拱桥的系杆力估算式与边拱的弯矩平衡式,以及由两个算式得出的三跨飞鸟式拱的简化平衡方程式,可供初步设计参考。由于飞鸟式拱结构的参数较多,所以在初步设计拟定结构轮廓尺寸时,还要根据工程经验与已建桥梁的资料,在一些参数基本确定后,进行另一些参数的比较,它是一个反复的过程。系杆的初步选型可根据本文提出的公式估算。

(2) 飞鸟式拱在恒载作用下,系杆主动张拉以抵消主拱与桩基础的水平力,系杆拉力为主动动力。活载作用下,系杆不主动张拉,主要作为构件受力,系杆力在主拱水平推力下产生,为被动动力,这时,主拱水平推力由系杆与桩基础的水平力抵消。飞鸟式拱采用系杆平衡了拱的水平推力的绝大部分,使桩基所受的水平推力极大地降低。

(3) 飞鸟式拱在进行主拱初步计算时,可将其简化为固定拱或平面模型。

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, 1999.
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥综述 [J]. 桥梁建设, 1997, (2): 8 - 13.
- [4] 唐黎明, 鲁应慧, 刘新痴, 孙勇, 郭小川. 武汉市江汉五桥的设计 [J]. 城市道桥与防洪, 2002, (2): 7 - 11.
- [5] 赖泉水, 张靖, 傅韵芬, 魏立新. 三山西大桥主桥设计简介 [J]. 桥梁建设, 1995, (4): 11 - 15.
- [6] 杨建国, 徐君, 陈继镇, 朱军, 李世华. 潮白河大桥主桥设计 [J]. 桥梁建设, 2001, (2): 45 - 49.
- [7] 倪顺龙. 自平衡钢管混凝土拱桥设计中的技术处理 [J]. 桥梁建设, 1999, (1): 25 - 27.
- [8] 颜全胜, 徐升桥. 大跨度钢管混凝土拱桥的稳定承载力分析 [J]. 铁道标准设计, 2003, (7): 16 - 18.
- [9] CECS 28: 90, 钢管混凝土结构设计与施工规程 [S].