

# 铁路桥梁钢管混凝土结构 理论与设计

徐升桥 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

# 铁路桥梁钢管混凝土 结构理论与设计

徐升桥 著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了铁路桥梁钢管混凝土结构的设计理论,以及作者多年来的相关研究成果,主要包括钢管混凝土结构设计参数的取值、典型节点疲劳试验、承载能力计算方法、钢管应力限值、构造措施等。通过将合成法的研究成果融入叠加法的计算分析过程,建立了实用的桥梁钢管混凝土结构承载能力设计方法;通过4个板管节点试件的疲劳试验,推导了板管节点的疲劳抗力方程,提出了钢管混凝土结构管节点的疲劳设计方法和构造要求;结合实际工程,详解了桥梁钢管混凝土结构的设计过程与技巧,并对可靠性设计进行了实例分析。

本书可供土木工程专业的科学研究人员、工程技术人员、研究生以及高等院校的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

铁路桥梁钢管混凝土结构理论与设计 / 徐升桥著.

— 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014. 12

ISBN 978-7-114-11738-1

I. ①铁… II. ①徐… III. ①铁路桥—钢管混凝土结构 IV. ①U448. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 223143 号

书 名: 铁路桥梁钢管混凝土结构理论与设计

著 作 者: 徐升桥

责任编辑: 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 10

字 数: 238 千

版 次: 2014 年 12 月 第 1 版

印 次: 2014 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11738-1

定 价: 30.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 序 言

钢管混凝土受压构件,其钢管对其内部混凝土的约束作用使混凝土处于三向受压状态,提高了混凝土的抗压强度;其内部混凝土又可以有效地防止钢管发生局部屈曲,钢管和混凝土之间的相互作用使钢管内部混凝土的破坏由脆性破坏转变为塑性破坏,构件的延性性能明显提高。钢管混凝土结构施工时,钢管可以作为劲性骨架承担施工阶段的施工荷载和结构重量,施工不受混凝土养护时间的影响;钢管混凝土结构施工时,不需要模板,具有施工便捷等特点。

钢管混凝土是组合结构的重要形式之一,具有良好的受力性能和施工性能,近年来被广泛使用于铁路、公路和城市桥梁工程中,在我国桥梁工程界取得了多项有影响的国际原创性成果,因此有必要对桥梁工程钢管混凝土结构的理论与设计进行综合性的论述,特别是疲劳设计方面,但到目前为止相关文献较少。

本书总结了关于钢管混凝土结构在铁路桥梁上的使用经验与研究成果,具有重要实用价值,通过简明扼要的论述,达到应用方便的目的;同时为从事桥梁工程设计研究的工程师与研究生们提供一些设计这种结构的准则与方法。

本书第2章通过将合成法的研究成果融入叠加法的计算分析过程,确定了桥梁钢管混凝土结构设计所必需的基本参数,满足了大跨度钢管混凝土结构对施工、运营阶段累计应力、位移的计算需求;第3章通过典型管节点的疲劳试验与分析,推导了管节点的疲劳抗力方程,提出了钢管混凝土结构管节点的疲劳设计方法和构造要求;第4~8章叙述了桥梁钢管混凝土结构的计算分析方法与设计规定,第9章对可靠性设计进行了实例分析,第10~11章结合实际工程,详解了桥梁钢管混凝土结构的设计过程与技巧。

作者长期从事铁路桥梁工程钢管混凝土结构的设计研究工作,在多方面开展了理论联系实际的研究,积累了不少新成果和新经验,出版此书正好可以满足桥梁钢管混凝土结构设计研究人员对这种专著的需求,亦可供有关院校师生阅读、参考。相信此书的出版,必将有助于促进我国桥梁工程尤其是钢管混凝土结构技术的进步和设计方法的发展。



2014年9月22日

# 前 言

钢管混凝土结构的计算分析方法主要有叠加法和合成法两类,两种方法都可以考虑钢管混凝土构件的套箍效应,在设计中各有其优缺点:合成法采用钢管混凝土统一理论,且有大量的研究成果,可直接进行构件设计,公式形式简单、概念清晰,最近出版的建筑行业设计与施工技术规程均基于合成法;叠加法符合桥梁工程师的设计习惯,可较好地反映大跨度钢管混凝土拱桥施工和运营过程钢管、混凝土应力变化以及结构位移变化的情况,便于设计者开展总体性桥梁结构分析,确保工程的建设和使用安全。

目前钢管混凝土结构在我国桥梁建设中已得到大量的应用,与建筑结构相比,桥梁结构具有跨度大、承受活载的特点,而且大跨度钢管混凝土结构在施工过程累积的应力、位移不可忽视,桥梁设计必须考虑施工过程,以确保桥梁工程的建设和使用安全。

为了充分利用相关行业已有的研究成果,本书结合桥梁工程的特点,对钢管混凝土结构的材料、强度、刚度等参数进行了相应的研究,提出了可考虑施工过程的桥梁钢管混凝土结构设计分析方法和配套的构造要求。钢管混凝土结构连接构造几何形态复杂,不同的焊接部位应力分布差异显著,导致其疲劳承载能力比普通钢结构连接构造的要低,疲劳问题突出,但目前国内外有关桥梁工程钢管混凝土结构疲劳设计方面的研究文献较少,本书在有关钢管混凝土结构典型焊接节点疲劳试验的基础上,提出了钢管混凝土结构的疲劳设计方法。

本书是作者多年研究成果的总结。全书共分 11 章,其主要内容有:基本设计参数研究,疲劳试验,材料与结构分析,构件承载力,节点连接,疲劳设计,构造与工艺要求,可靠性设计,简支组合拱桥设计,连续组合梁桥设计。

中国铁道科学研究院张玉玲研究员、西南交通大学范文理教授参加了第 3 章的试验工作;作者的同事任为东、彭岚平、简方梁、邹永伟、张华分别参加了第 6、7、9、10、11 章的有关研究与试设计工作;原铁道部、中铁工程设计咨询集团有限公司资助了有关建设标准和科技开发计划课题,书中也引用了同行的相关研究成果,在此深表感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第1章 绪论              | 1  |
| 1.1 桥梁工程中钢管混凝土结构的应用 | 1  |
| 1.2 术语和符号           | 2  |
| 第2章 基本设计参数          | 5  |
| 2.1 轴心抗压强度          | 5  |
| 2.2 混凝土徐变           | 7  |
| 2.3 混凝土收缩           | 9  |
| 2.4 结构安全系数与容许应力     | 10 |
| 2.5 刚度              | 12 |
| 2.6 其他设计参数          | 14 |
| 2.7 列车活载的冲击系数       | 15 |
| 第3章 疲劳试验            | 16 |
| 3.1 典型疲劳细节分类        | 16 |
| 3.2 管管节点疲劳          | 19 |
| 3.3 板管节点疲劳试验        | 21 |
| 3.4 实用设计公式          | 34 |
| 第4章 材料与结构分析         | 36 |
| 4.1 主要材料            | 36 |
| 4.2 基本规定            | 37 |
| 4.3 结构分析            | 41 |
| 第5章 构件承载力           | 43 |
| 5.1 轴心受压、纯弯构件       | 43 |
| 5.2 压弯构件            | 48 |
| 5.3 局部受压构件          | 49 |
| 第6章 节点连接            | 51 |
| 6.1 一般规定            | 51 |
| 6.2 圆管截面间的焊接连接      | 51 |
| 6.3 节点板与圆管连接节点      | 54 |
| 6.4 柱脚节点构造          | 55 |
| 第7章 疲劳设计            | 58 |
| 7.1 管管节点            | 58 |
| 7.2 板管节点            | 65 |

第 8 章 构造与工艺要求 ..... 67

8.1 构造要求..... 67

8.2 钢管构件制作..... 69

8.3 钢管结构的验收..... 71

8.4 涂装..... 71

8.5 钢管混凝土浇筑..... 71

第 9 章 可靠性设计 ..... 73

9.1 功能函数..... 73

9.2 工程可靠度求解常用近似方法..... 74

9.3 钢管混凝土结构承载力可靠度指标..... 75

第 10 章 简支组合拱桥设计..... 83

10.1 设计简介 ..... 83

10.2 计算参数 ..... 84

10.3 计算模型 ..... 87

10.4 总体计算结果 ..... 87

10.5 结构动力特性..... 101

10.6 屈曲稳定分析..... 102

10.7 计算参数的对比分析..... 102

第 11 章 连续组合梁桥设计 ..... 108

11.1 工程简介..... 108

11.2 主要构造尺寸及细节..... 109

11.3 总体计算分析..... 115

11.4 关键构造局部应力分析..... 137

11.5 中支点落梁措施..... 151

参考文献..... 153

# 第1章

## 绪 论



钢管混凝土结构<sup>[1-2]</sup>是由混凝土填入钢管内形成的一种新型组合结构。钢管混凝土结构能够更有效地发挥钢材和混凝土两种材料各自的优点,同时也克服了钢管结构容易发生局部屈曲的缺点。近年来,随着理论研究的深入和施工工艺的进步,钢管混凝土结构的工程应用日益广泛。钢管混凝土结构按照截面形式的不同,可以分为矩形钢管混凝土结构、圆钢管混凝土结构和多边形钢管混凝土结构等,其中圆钢管混凝土结构能最大限度地发挥钢管混凝土结构的套箍作用,应用最为广泛,将作为本书的叙述重点。

### 1.1 桥梁工程中钢管混凝土结构的应用

在桥梁工程中,钢管混凝土结构具有以下特点:

- (1) 由于钢管的径向约束限制了受压混凝土的膨胀,使混凝土处于三向受压状态,从而显著提高了混凝土的抗压强度。
- (2) 钢管兼有纵向主筋和横向套箍的作用,并可作为施工模板,方便混凝土浇筑。
- (3) 施工过程中,钢管还可作为劲性承重骨架,具有吊装重量轻的优点,从而简化了施工工艺,能有效缩短施工工期。

1879年,英国在赛文(Severn)铁路桥的桥墩设计中率先采用了钢管混凝土结构;1939年,苏联桥梁专家 Perederity 率先采用钢管混凝土结构,在列宁格勒涅瓦河建造了跨度为 101m 的拱梁组合体系公路桥,同时,另一名教授 RosnovsKiy 在西伯利亚也建造了一座跨度为 140m 的铁路钢管混凝土拱桥。

我国第一座钢管混凝土拱桥是 1990 年建成的跨径 110m 的四川旺苍东河大桥,1995 年,广东省三山西大桥是第一座跨径超过 200m 的钢管混凝土拱桥。钢管混凝土拱桥常用的拱肋结构有哑铃形实腹式和三管<sup>[7]</sup>、四管、六管式截面等。先后建成于 2000 年的主跨 360m 的广州市丫髻沙大桥<sup>[3]</sup>、2005 年的主跨 460m 的重庆巫峡长江大桥、2013 年的主跨 530m 的四川省合江波司登长江大桥分别把钢管混凝土拱桥的跨径推上了一个新的台阶。图 1.1-1 为贵阳花溪大桥的拱肋结构,图 1.1-2 为广州丫髻沙大桥。

在斜拉桥和梁式桥中也有采用钢管混凝土结构的实例,广东南海市紫洞大桥、湖北秭归县向家坝大桥、重庆万州大桥都采用了钢管混凝土空间桁架组合梁式结构,减轻了结构恒载,降





低了工程造价。

钢管混凝土结构还用于钢筋混凝土拱桥的劲性骨架,兼作拱桥钢筋混凝土拱肋施工的支撑结构,其代表性桥梁有主跨 420m 的重庆万县长江公路大桥、主跨 342m 的大瑞铁路澜沧江大桥和主跨 445m 的沪昆客运专线铁路北盘江大桥。



图 1.1-1 贵阳花溪大桥的拱肋结构



图 1.1-2 广州丫髻沙大桥

我国在客运专线铁路桥梁建设中也大量应用了钢管混凝土结构,主要的桥式为连续梁拱组合桥和简支组合拱桥。如东莞至惠州城际铁路的东莞水道特大桥是桥跨为 100m+180m+100m 的预应力混凝土连续梁—钢管混凝土拱的组合结构桥(图 1.1-3);郑州至焦作城际铁路郑州黄河特大桥跨大堤桥是主跨为 120m 的预应力混凝土简支梁与钢管混凝土拱的组合结构桥(图 1.1-4)。



图 1.1-3 莞惠城际铁路东莞水道桥



图 1.1-4 郑焦城际铁路跨黄河大堤桥

据不完全统计,截至目前,我国已建的钢管混凝土结构桥梁有 300 多座,其中包括几十座铁路桥。钢管混凝土结构适用于多种桥型,如拱桥、连续梁(刚构)桥、斜拉桥、悬索桥等,推广其应用必将带来显著的经济效益和社会效益。

## 1.2 术语和符号

### 1.2.1 术语

(1) 钢管混凝土构件 concrete filled steel tubular member

在圆形截面钢管内浇筑混凝土且两种材料共同受力的构件。

(2) 钢管混凝土结构 concrete filled steel tubular structure

以钢管混凝土为主要受力构件的结构。

(3) 轴压承载力 composite compressive strength

钢管混凝土构件截面所能承受的轴向屈服压力。

(4) 轴压弹性模量 composite compressive modulus of elasticity

钢管混凝土构件截面在单向受压,且其纵向名义应力与应变近似呈线性关系时,截面上名义正应力与对应正应变的比值。

(5) 弹性抗弯刚度 composite bending stiffness of elasticity

钢管混凝土构件的曲率与截面弯矩近似呈线性关系时,截面弯矩与曲率的比值。

(6) 剪切弹性模量 composite shear modulus of elasticity

钢管混凝土构件截面在受纯剪,且其切向名义应力与应变近似呈线性关系时,截面上名义剪应力与对应剪应变的比值。

(7) 弹性剪切刚度 composite shear stiffness of elasticity

钢管混凝土构件的扭转角与截面扭矩近似呈线性关系时,截面扭矩和扭转角的比值。

(8) 套箍系数 constraining coefficient

反映钢管混凝土构件截面几何特征和组成材料物理特性的综合参数  $\xi, \xi = A_s f_s / (A_c f_c)$ 。

### 1.2.2 符号

(1) 内力、外力

$N$ ——轴向力;

$M$ ——弯矩。

(2) 材料性能

$f_c$ ——混凝土轴心抗压强度;

$[\sigma_c]$ ——混凝土轴心受压容许应力;

$f_s$ ——钢材屈服强度;

$[\sigma_s]$ ——钢材轴向容许应力;

$[\tau]$ ——钢材剪切容许应力;

$[\sigma_0]$ ——钢构件或连接的疲劳容许应力幅;

$E$ ——弹性模量;

$G$ ——剪切模量;

$EA$ ——构件的轴压刚度;

$EI$ ——构件的抗弯刚度。

(3) 几何特性

$L$ ——几何长度;

$L_0$ ——构件的计算长度;

$D$ ——钢管直径;

$A_c$ ——钢管内混凝土的截面面积;



$A_L$ ——混凝土的局部受压面积；

$A_s$ ——钢管的截面面积；

$I_c$ ——混凝土截面惯性矩；

$I_s$ ——钢管截面惯性矩；

$\theta$ ——腹杆与弦管的夹角；

$g$ ——节点内两腹杆的间隙值；

$e$ ——腹杆与弦管交点与弦管形心的偏心距；

$t$ ——钢管的壁厚。

#### (4) 计算系数

$\alpha_c$ ——混凝土的温度线膨胀系数；

$\alpha_s$ ——钢的温度线膨胀系数；

$\alpha$ ——钢管混凝土构件截面的含钢率,  $\alpha = A_s / A_c$ ；

$\gamma_m$ ——钢管混凝土构件截面抗弯塑性发展系数；

$\varphi$ ——轴心受压稳定系数；

$\lambda$ ——长细比, 圆钢管混凝土构件  $\lambda = 4L_0 / D$ ；

$K_1$ ——钢管混凝土结构的线弹性稳定安全系数；

$\beta$ ——节点内腹杆与弦杆的直径比；

$\gamma$ ——节点内腹杆的半径与壁厚比；

$\tau$ ——节点内腹杆与弦杆的壁厚比。

## 第2章

# 基本设计参数

钢管混凝土结构的计算分析方法主要有叠加法和合成法(统一理论)两类,两种方法都可以考虑钢管混凝土构件的套箍效应,在设计中各有其优缺点。

合成法采用钢管混凝土统一理论,且有大量的研究成果,可直接进行构件设计,公式形式简单、概念清晰。最近出版的建筑行业设计与施工技术规程均基于合成法。

与建筑结构相比,桥梁结构具有跨度大、承受活载的特点,叠加法符合桥梁工程师的设计习惯,可较好地反映大跨度钢管混凝土拱桥施工和运营过程中钢管、混凝土应力变化以及结构位移变化的情况,便于设计者开展总体性桥梁结构分析,确保工程的使用与安全性能。

目前钢管混凝土结构<sup>[17-20]</sup>在我国桥梁建设中已得到大量的应用,为了充分利用建筑行业的研究成果,有必要对钢管混凝土结构的强度、刚度<sup>[4-7]</sup>等参数进行相应的研究,为制定桥梁结构的设计规范提供必要的技术依据。

## 2.1 轴心抗压强度

### 2.1.1 计算方法

(1)叠加法计算公式

$$\text{容许轴压力:} \quad [N] = A_s [\sigma_s] + C_1 A_c [\sigma_c] \quad (2.1-1)$$

$$\text{屈服轴压力:} \quad N_u = A_s f_y + C_2 A_c f_c \quad (2.1-2)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$ ——混凝土强度换算系数。

(2)合成法计算公式

$$\text{容许轴压力:} \quad [N] = (A_s + A_c)(1.14 + 1.02\xi)[\sigma_c] \quad (2.1-3)$$

$$\text{屈服轴压力:} \quad N_u = (A_s + A_c)(1.14 + 1.02\xi)f_c \quad (2.1-4)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{A_s}{A_c} \\ \beta &= \frac{f_s}{f_c} \\ \gamma &= \frac{[\sigma_s]}{[\sigma_c]} \\ \xi &= \alpha\beta \end{aligned} \right\} \quad (2.1-5)$$



式中:  $\alpha$ ——钢管混凝土截面的含钢率;  
 $\xi$ ——钢管混凝土截面的套箍系数。

令

$$C_0 = 1.14 + 1.02\xi \quad (2.1-6)$$

式中:  $C_0$ ——钢管混凝土强度计算系数。

比较式(2.1-1)、式(2.1-3),可得:

$$C_1 = (1 + \alpha)C_0 - \alpha\gamma \quad (2.1-7)$$

比较式(2.1-2)、式(2.1-4),可得:

$$C_2 = (1 + \alpha)C_0 - \alpha\beta \quad (2.1-8)$$

通过合成法的计算公式可以导出叠加法公式的计算参数,美国规范 AISC 360—05 也按此思路进行钢管混凝土轴心受压构件承载力计算,且规定  $C_1 = 0.95$ 。

按式(2.1-7)、式(2.1-8)计算的铁路桥梁钢管混凝土构件  $C_1$ 、 $C_2$  值见表 2.1-1、表 2.1-2。

钢管混凝土容许轴压力  $[N]$  计算参数  $C_1$

表 2.1-1

| 含钢率 $\alpha$ | Q235 |      |      | Q345 |      |      | Q370 |      |      | Q420 |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | C40  | C50  | C60  | C40  | C50  | C60  | C40  | C50  | C60  | C40  | C50  | C60  |
| 0.05         | 1.04 | 1.07 | 1.09 | 0.96 | 1.00 | 1.03 | 0.96 | 1.00 | 1.04 | 0.97 | 1.01 | 1.04 |
| 0.1          | 0.98 | 1.03 | 1.07 | 0.84 | 0.92 | 0.97 | 0.85 | 0.93 | 0.98 | 0.87 | 0.94 | 0.99 |
| 0.15         | 0.97 | 1.03 | 1.08 | 0.78 | 0.88 | 0.95 | 0.81 | 0.90 | 0.97 | 0.85 | 0.94 | 1.00 |
| 0.2          | 1.00 | 1.07 | 1.12 | 0.79 | 0.90 | 0.98 | 0.83 | 0.94 | 1.01 | 0.92 | 1.00 | 1.06 |

钢管混凝土屈服轴压力  $N_u$  计算参数  $C_2$

表 2.1-2

| 含钢率 $\alpha$ | Q235 |      |      | Q345 |      |      | Q370 |      |      | Q420 |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | C40  | C50  | C60  | C40  | C50  | C60  | C40  | C50  | C60  | C40  | C50  | C60  |
| 0.05         | 1.23 | 1.22 | 1.22 | 1.24 | 1.23 | 1.23 | 1.25 | 1.24 | 1.23 | 1.25 | 1.24 | 1.23 |
| 0.1          | 1.36 | 1.34 | 1.33 | 1.41 | 1.38 | 1.36 | 1.42 | 1.39 | 1.37 | 1.44 | 1.41 | 1.38 |
| 0.15         | 1.54 | 1.49 | 1.46 | 1.64 | 1.58 | 1.53 | 1.67 | 1.60 | 1.55 | 1.71 | 1.64 | 1.58 |
| 0.2          | 1.76 | 1.68 | 1.63 | 1.94 | 1.83 | 1.75 | 1.98 | 1.86 | 1.78 | 2.06 | 1.93 | 1.84 |

由表 2.1-1、表 2.1-2 可以看出,  $C_1$ 、 $C_2$  的取值与含钢率、钢材种类、混凝土强度等级有关。与美国规范相比, 本书给出的计算方法更合理、安全。

## 2.1.2 截面有限元分析

为了验证以上计算方法, 利用材料非线性有限元分析程序, 分别按照钢、混凝土的应力应变曲线建立计算分析模型, 计算其屈服轴压力和极限轴压力, 模型由 Q345 的  $\phi 1000 \times 46$  钢管、C50 混凝土组成。

有限元计算结果如图 2.1-1 所示。钢管混凝土结构具有与钢结构相近的延性性能,屈服轴压力为 86710kN、极限轴压力为 89700kN,而按式(2.1-1)、式(2.1-2)分别计算的容许、屈服轴压力为 35535kN、88838kN,两者屈服强度吻合好,根据式(2.1-1)计算的容许轴压力具有很高的安全储备。

### 2.1.3 结论

按照式(2.1-2)计算的屈服轴压力除以 2.0 的安全系数,得到的容许轴压力将比按照式(2.1-1)计算的容许轴压力大 20%以上,考虑到桥梁工程中钢管混凝土结构具有一定的初始应力,以及钢管混凝土结构的初始缺陷和运营阶段由于混凝土收缩在钢管、混凝土间可能产生缝隙,钢管混凝土容许轴压承载力仍应按式(2.1-1)进行设计计算,但钢管的容许应力可较《铁路桥梁钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—2005)(以下简称《桥规》)提高 10%左右。

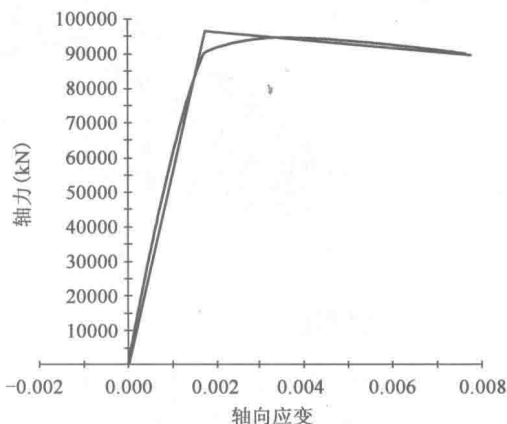


图 2.1-1 钢管混凝土结构轴压承载力计算曲线

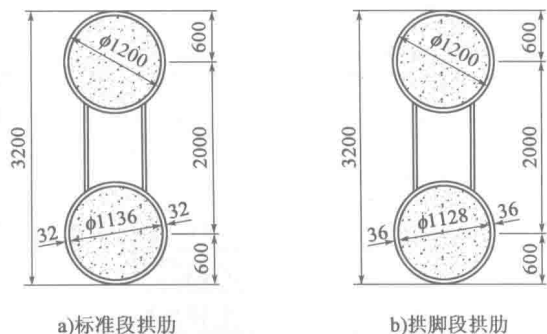
## 2.2 混凝土徐变

### 2.2.1 计算方法

混凝土徐变使组合截面中钢管分担的内力增加,管内混凝土分担的内力减小。目前的铁路钢管混凝土拱桥设计,徐变计算多参照混凝土桥梁的计算方法。

时速 250km 客运专线铁路有砟轨道双线简支组合拱[专桥(2010)0227-IV]为钢管混凝土拱肋与混凝土主梁构成的组合桥梁结构,主梁长 122m,计算跨度 118m。主拱拱肋为钢管混凝土平行拱,拱轴线采用二次抛物线,矢高 23.6m,矢跨比 1:5。拱肋采用 Q345q 钢、哑铃形截面的钢管混凝土,截面由 2 根钢管及连接腹板组成,截面全高 3.2m,钢管直径 1.2m,壁厚 32mm(拱脚段 36mm),腹板厚 16mm,管内灌注 C50 自密实混凝土(图 2.2-1)。

按以下 3 种计算条件,进行比较计算:



a) 标准段拱肋

b) 拱脚段拱肋

图 2.2-1 钢管混凝土拱肋截面(尺寸单位:mm)

(1) 不计钢管内混凝土的徐变。

(2) 灌注钢管内混凝土 10d 后张拉吊杆,参照混凝土梁《桥规》<sup>[15]</sup> 的计算方法,钢管内混凝土徐变终极系数取 1.7。

(3) 钢管内混凝土徐变终极系数取 2.0。

采用 MIDAS/Civil 建立空间有限元模型,主梁、拱肋、横撑均采用梁单元模拟;拱肋单元为哑铃形截面,采用施工阶段联合截面来模拟钢管和管内混凝土的相互作用。模型共



包括 291 个节点和 339 个单元,分析模型如图 2. 2-2 所示。

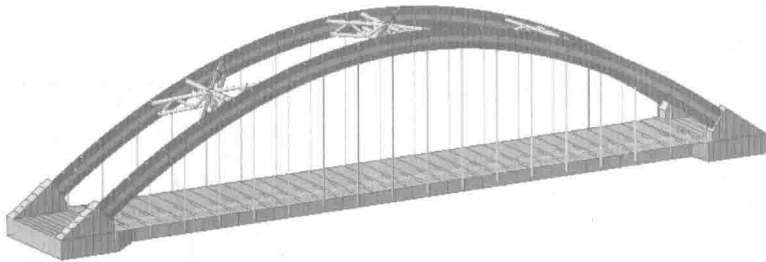


图 2. 2-2 空间有限元模型

2.2.2 计算结果

以上 3 种计算方法得到的结构内力见表 2. 2-1。考虑钢管内混凝土徐变,钢管内力增加、混凝土内力减小,分两种情况取值。徐变系数取 1. 7 时,钢管轴力增加约 41. 8%,混凝土轴力减小约 51. 5%;徐变系数取 2. 0 时,钢管轴力增加约 47. 7%,混凝土轴力减小约 58. 3%。

拱 肋 恒 载 轴 力 表 2. 2-1

| 项目<br>位置 | 徐变系数 0. 0 |       | 徐变系数 1. 7 |       | 徐变系数 2. 0 |       |
|----------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|          | 轴力(kN)    |       | 轴力(kN)    |       | 轴力(kN)    |       |
|          | 钢管        | 混凝土   | 钢管        | 混凝土   | 钢管        | 混凝土   |
| 拱顶       | 34389     | 28701 | 48763     | 13928 | 50783     | 11964 |
| 1/4 跨度   | 37111     | 30988 | 52652     | 15041 | 54833     | 12921 |
| 拱脚       | 42534     | 35443 | 60257     | 17201 | 62737     | 14759 |

2.2.3 实桥测试成果分析

广州丫髻沙大桥主桥<sup>[3]</sup>为主跨达 360m 的钢管混凝土拱桥,每肋截面由 6- $\phi$ 750 钢管组成,管内灌注 C50 混凝土,含钢率为 0. 10,具有长期的拱轴线测量资料和成桥、运营 1 周年的应力测试资料,对大跨度拱桥的徐变效应分析具有很高的研究价值。

(1)同徐变参数下的计算挠度、应力与内力

不同徐变系数终值  $\phi(t_{\infty}, \tau)$  对应的拱顶截面的挠度及应力计算结果见表 2. 2-2,其对应的主拱拱顶截面轴力和弯矩计算结果见表 2. 2-3。

恒载作用下拱顶截面上缘的挠度、应力 表 2. 2-2

| 徐变 $\phi(t_{\infty}, \tau)$ | 挠度 $f(m)$ | 应力 $\sigma(MPa)$ |       |
|-----------------------------|-----------|------------------|-------|
|                             |           | 钢管               | 混凝土   |
| 0. 0                        | 0. 429    | 171              | 15. 0 |
| 1. 6                        | 0. 562    | 224              | 9. 7  |
| 1. 8                        | 0. 580    | 231              | 9. 2  |
| 2. 0                        | 0. 593    | 237              | 8. 8  |
| 2. 5                        | 0. 631    | 252              | 7. 8  |

主拱拱肋拱顶截面内力 表 2. 2-3

| 徐变系数<br>$\phi(t_{\infty}, \tau)$ | 轴 力(kN) |       |        | 弯 矩(kN · m) |       |        |
|----------------------------------|---------|-------|--------|-------------|-------|--------|
|                                  | 钢管      | 混凝土   | 合计     | 钢管          | 混凝土   | 合计     |
| 0. 0                             | 72820   | 61680 | 134500 | 58420       | 51160 | 109580 |
| 1. 6                             | 95420   | 39170 | 134590 | 77230       | 32460 | 109690 |
| 1. 8                             | 98070   | 36520 | 134590 | 79450       | 30270 | 109720 |
| 2. 0                             | 100700  | 33890 | 134590 | 81640       | 28090 | 109730 |
| 2. 5                             | 107120  | 27500 | 134620 | 87040       | 22750 | 109790 |

(2)实测结果

成桥时、通车运营 1 年后的主拱拱肋拱顶截面实测内力及应力见表 2. 2-4,大桥运营 1 年后发生的徐变总挠度实测值为 0. 12m(此时拱肋混凝土的加载龄期约为 18 个月),大桥运营 10 年后拱轴线(扣除温度影响)与运营 1 年的拱轴线相比基本没有发生变化。

恒载作用下拱顶截面应力与内力 表 2. 2-4

| 构件 \ 时间   |     | 成桥状态(2000 年 6 月) | 运营 1 年(2001 年 6 月) |
|-----------|-----|------------------|--------------------|
| 上缘应力(MPa) | 钢管  | 206. 4           | 218. 3             |
|           | 混凝土 | 13. 8            | 11. 3              |
| 轴力(kN)    | 钢管  | 93110            | 94330              |
|           | 混凝土 | 41530            | 40310              |

(3)计算与实测结果对比分析

按照运营 1 年后徐变已完成约 80%推算,对比表 2. 2-2~表 2. 2-4 的数据可以看出,广州丫髻沙大桥主桥的徐变系数  $\phi(t_{\infty}, \tau)$ 取 1. 8~1. 9 时,计算与实测结果吻合较好。

2.2.4 结论

钢管内混凝土的徐变系数终极值  $\phi(t_{\infty}, \tau)$ 可取 1. 8~2. 0。

2.3 混凝土收缩

2.3.1 计算方法

钢管内混凝土的纵向收缩,将在截面上产生收缩自应力,对于钢管是压应力,对于混凝土则是拉应力。按以下 3 种计算条件,对上述时速 250 公里客运专线铁路有砟轨道双线简支组合拱[专桥(2010)0227—IV]进行比较计算:

- (1)不计管内混凝土收缩。
- (2)参照混凝土梁《桥规》<sup>[15]</sup>的计算方法,收缩应变终极值取 0. 00011。
- (3)管内混凝土收缩按混凝土降温 10℃计算。



### 2.3.2 计算结果

计算结果见表 2.3-1。

拱肋恒载轴力

表 2.3-1

| 项目<br>位置 | 不计混凝土收缩 |       | 混凝土收缩按常规计算 |       | 管内混凝土降温 10℃ |       |
|----------|---------|-------|------------|-------|-------------|-------|
|          | 轴力(kN)  |       | 轴力(kN)     |       | 轴力(kN)      |       |
|          | 钢管      | 混凝土   | 钢管         | 混凝土   | 钢管          | 混凝土   |
| 拱顶       | 34389   | 28701 | 40997      | 21369 | 40620       | 22309 |
| 1/4 跨度   | 37111   | 30988 | 43708      | 23639 | 43308       | 24591 |
| 拱脚       | 42534   | 35443 | 49133      | 28092 | 48738       | 29015 |

从表 2.3-1 可知,混凝土收缩按管内混凝土降温 10℃ 计算与按《桥规》方法计算,计算结果较为接近。

考虑管内混凝土收缩,钢管轴力增加 14.6%~18.1%,混凝土轴力减小 18.1%~22.2%,混凝土收缩效应不可忽视。

### 2.3.3 结论

钢管混凝土结构的混凝土收缩值较普通钢筋混凝土结构要小,混凝土收缩产生的内力可按混凝土降温 10℃ 计算。

## 2.4 结构安全系数与容许应力

对时速 250km 客运专线铁路有砟轨道双线简支组合拱设计图[专桥(2010)0227-IV]和大瑞铁路澜沧江特大桥建立空间有限元分析模型,考虑施工过程中钢管、管内混凝土单元应力的逐步累加,以及混凝土收缩徐变的影响,进行结构安全系数与容许应力的取值计算分析。

### 2.4.1 专桥(2010)0227-IV

#### (1) 拱肋组合应力

主力组合作用下,钢管最大应力 171.4MPa、最小应力 137.6MPa(受压),混凝土最大压应力 7.6MPa。

主+附组合作用下,钢管最大应力 171.4MPa、最小应力 128.4MPa(受压),混凝土最大压应力 7.6MPa。

#### (2) 拱肋强度

轴心受压构件的强度按下式计算:

$$K = \frac{N_u}{N} \quad (2.4-1)$$

$$N_u = \varphi(A_s f_s + C_2 A_c f_c) \quad (2.4-2)$$

拱肋截面强度计算结果如图 2.4-1、图 2.4-2 所示。