



21世纪交通版高等学校教学辅导用书
桥梁计算示例丛书

钢管混凝土拱桥

Gangguan Hunningtu Gongqiao

孙 潮 陈友杰 主 编
陈宝春 主 审



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

21 世纪交通版高等学校教学辅导用书

桥梁计算示例丛书

钢管混凝土拱桥

孙 潮 陈友杰 主 编
陈宝春 主 审



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

内 容 提 要

本书为《桥梁工程》教材的配套教学参考书,由 8 个比较典型的钢管混凝土拱桥计算示例组成,均按国家标准《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)编写。在结构体系方面,示例包括 5 种主要的结构体系:有推力上承式拱、有推力中承式拱、部分推力中承式(飞鸟式)拱、无推力拱梁组合结构(下承式)和部分推力下承式刚架系杆拱。在主拱肋截面形式方面,示例包括了单圆管、哑铃形和四肢桁式 3 种最常用的形式。

本书可供高等院校土木工程专业,道路桥梁与渡河工程专业师生以及与桥梁工程有关的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土拱桥 / 孙潮,陈友杰主编. —北京 :
人民交通出版社股份有限公司,2015
(桥梁计算示例丛书)
21 世纪交通版高等学校教学辅导用书
ISBN 978-7-114-12396-2

I. ①钢… II. ①孙… ②陈… III. ①钢管混凝土拱
桥—高等学校—教学参考资料 IV. ①U448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 161069 号

桥梁计算示例丛书

书 名: 钢管混凝土拱桥
著 者: 孙 潮 陈友杰
责任编辑: 曲 乐 李 喆
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.ccpres.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: 北京盈盛恒通印刷有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 14.75
字 数: 350 千
版 次: 2015 年 7 月 第 1 版
印 次: 2015 年 7 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-12396-2
定 价: 32.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

钢管混凝土拱桥是我国自 1990 年以来发展应用很快的一种桥型。随着研究的不断深入和应用数量的不断增加,设计理论体系已基本形成,工程实践经验极为丰富。在此基础上,国家标准《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)已于 2013 年 11 月 1 日由住房和城乡建设部([2013]第 210 号公告)批准,由住房和城乡建设部和国家质量监督检验检疫总局联合发布,并于 2014 年 6 月 1 日起在全国实施。

钢管混凝土拱桥已成为我国桥梁工程课程介绍的重要内容之一,同时也是桥梁工程本科生毕业设计的主要桥型之一。然而,目前桥梁工程毕业设计中缺乏一本针对钢管混凝土拱桥的计算算例。本书可作为桥梁工程教材的配套教学参考书,供相关专业师生课程学习、毕业设计等参考,也可供相关工程技术人员工程应用参考。读者在阅读应用本书时,可配合阅读人民交通出版社出版的《钢管混凝土拱桥》(第三版)和中国建筑工业出版社出版的《钢管混凝土拱桥设计计算方法与应用》。

本书从实际工程出发,选取实际工程的各种不同类型的桥例,尽可能使其具有代表性。钢管混凝土拱肋截面主要有单圆管、哑铃形和桁式,结构形式主要有上承式有推力拱、中承式有推力拱、中承式刚架系杆拱、下承式刚架系杆拱和下承式拱梁组合。本书的算例包含了以上三种主要截面形式和主要结构形式。所选算例虽然均为作者参与设计、复核、科研等实际桥梁,但当时许多桥梁的设计荷载参照的是《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—1989),本书在编写时参照了《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)。

书中除注明具体规范名外,《规范》均指国家标准《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)。该规范适用于我国城市桥梁与公路桥梁中钢管混凝土拱桥的设计、施工与养护。规范主要针对的是钢管混凝土拱桥中的钢管混凝土拱肋等特殊结构,本书算例的计算内容仅限于《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)规定的计算内容。其他结构,如桥面系、墩台与基础结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、圬工结构的设计计算与验算,未包含在算例之内,应按照公路或城市桥梁的相应的设计规范要求要求进行计算,如《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)等。算例中,引用《规范》中的计算公式时,均采用了《规范》中的公式号,以便查找。

本书由福州大学孙潮、陈友杰主编,陈宝春主审。硕士生叶智威、凌伟、陈津凯、胡灿、聂尚杰、王锋、蓝文亮参与了算例的具体计算。

编 者

2015 年 2 月 4 日

目 录

示例一 钢管混凝土单圆管中承式拱桥

一、设计基本资料	1
(一)工程概述	1
(二)技术标准	1
(三)主要材料	2
二、结构内力计算	2
(一)有限元计算模型	2
(二)拱肋截面参数和其他计算参数	3
(三)作用及作用组合	4
(四)内力计算结果	4
三、拱肋强度计算	7
(一)《规范》验算要求	7
(二)拱脚截面	7
(三) $L/4$ 截面	8
(四)拱顶截面	9
四、拱肋面内稳定承载力计算	9
(一)《规范》验算要求	9
(二)稳定系数	10
(三)偏心折减系数	10
(四)混凝土徐变折减系数	10
(五)初应力度影响系数	11
(六)稳定承载力	12
五、主拱空间弹性稳定计算	12
六、正常使用极限状态计算	13
(一)桥面挠度	13
(二)钢管应力	13
七、主拱施工阶段计算	14
(一)《规范》验算要求	14
(二)施工阶段一	15
(三)施工阶段二	15
(四)施工阶段三	16
八、吊杆计算	17

示例二 钢管混凝土提篮拱人行桥

一、设计基本资料	19
(一)工程概述	19
(二)技术标准	20
(三)主要材料	21
二、结构内力计算	21
(一)有限元计算模型	21
(二)拱肋截面参数和其他计算参数	21
(三)作用及作用组合	24
(四)内力计算结果	24
三、拱肋强度计算	26
(一)《规范》验算要求	26
(二)弦管强度验算	28
(三)整体截面强度验算	31
四、拱肋面内稳定承载力计算	35
(一)《规范》验算要求	35
(二)稳定系数	35
(三)偏心率折减系数	36
(四)混凝土徐变折减系数	37
(五)初应力度影响系数	37
(六)稳定承载力	38
五、主拱空间弹性稳定分析	39
六、正常使用极限状态计算	39
(一)桥面挠度	39
(二)钢管应力	40
七、主拱施工阶段计算	41
(一)《规范》验算要求	41
(二)施工阶段一	41
(三)施工阶段二	42
八、吊杆计算	42

示例三 钢管混凝土哑铃形下承式刚架系杆拱桥

一、设计基本资料	45
(一)工程概述	45
(二)技术标准	46
(三)主要材料	46
二、结构内力计算	47

(一)有限元计算模型	47
(二)拱肋截面参数和其他计算参数	47
(三)设计荷载及荷载组合	49
(四)中拱拱肋内力计算结果	49
三、拱肋强度计算	52
(一)《规范》验算要求	52
(二)弦管强度验算	54
(三)整体截面强度验算	56
四、拱肋面内稳定承载力计算	59
(一)《规范》验算要求	59
(二)稳定系数	60
(三)偏心率折减系数	60
(四)混凝土徐变折减系数	61
(五)初应力度影响系数	62
(六)稳定承载力	63
五、主拱空间弹性稳定计算	63
六、正常使用极限状态计算	64
(一)桥面挠度	64
(二)持久状况下钢管应力验算	64
七、主拱施工阶段计算	65
(一)《规范》验算要求	65
(二)施工阶段一	65
(三)施工阶段二	66
八、其他计算	66
(一)吊杆	66
(二)系杆	68

示例四 钢管混凝土哑铃形拱梁组合桥

一、设计基本资料	69
(一)工程概述	69
(二)技术标准	70
(三)主要材料	70
二、结构内力计算	70
(一)有限元计算模型	70
(二)拱肋截面参数和其他计算参数	71
(三)设计荷载及荷载组合	73
(四)内力计算结果	73
三、拱肋强度计算	75

(一)《规范》验算要求	75
(二)弦管强度验算	77
(三)整体截面强度验算	80
四、拱肋面内稳定承载力计算	84
(一)《规范》验算要求	84
(二)稳定系数	84
(三)偏心率折减系数	85
(四)混凝土徐变折减系数	85
(五)初应力度影响系数	86
(六)稳定承载力	87
五、主拱空间弹性稳定计算	87
六、正常使用极限状态计算	88
(一)桥面挠度	88
(二)持久状况下钢管应力验算	88
七、主拱施工阶段计算	90
(一)《规范》验算要求	90
(二)第一个施工阶段	90
(三)第三个施工阶段	90
八、其他计算	91
(一)吊杆	91
(二)系梁	92

示例五 钢管混凝土桁肋中承式拱桥

一、设计基本资料	93
(一)工程概述	93
(二)技术标准	94
(三)主要材料	94
二、结构内力计算	94
(一)有限元计算模型	94
(二)拱肋截面参数和其他计算参数	94
(三)设计荷载及荷载组合	96
(四)内力计算结果	97
三、拱肋强度计算	102
(一)《规范》验算要求	102
(二)弦管强度验算	103
(三)腹杆强度和稳定验算	105
(四)整体截面强度验算	107
四、拱肋面内稳定承载力计算	110

(一)《规范》验算要求	110
(二)稳定系数	110
(三)偏心率折减系数	112
(四)混凝土徐变折减系数	112
(五)初应力度影响系数	113
(六)稳定承载力	114
五、主拱空间弹性稳定计算	115
六、正常使用极限状态计算	116
(一)桥面挠度	116
(二)持久状况下钢管应力验算	116
七、主拱施工阶段计算	117
(一)《规范》验算要求	117
(二)施工阶段一	118
(三)施工阶段二	118
八、吊杆计算	119

示例六 钢管混凝土中承式刚架系杆拱桥(飞鸟拱)

一、设计基本资料	122
(一)工程概况	122
(二)技术标准	123
(三)主要材料	123
二、结构内力计算	124
(一)有限元计算模型	124
(二)拱肋截面参数及其他计算参数	124
(三)设计荷载及荷载组合	127
(四)内力计算结果	128
三、拱肋强度计算	136
(一)《规范》验算要求	136
(二)弦管强度验算	137
(三)腹杆强度和稳定验算	144
(四)整体截面强度验算	146
四、拱肋面内稳定承载力计算	150
(一)《规范》验算要求	150
(二)稳定系数	151
(三)偏心折减系数	152
(四)混凝土徐变折减系数	153
(五)初应力度影响系数	154
(六)稳定承载力	155

五、主拱空间弹性稳定计算	155
六、正常使用极限状态计算	156
(一)桥面挠度	156
(二)持久状况下钢管应力验算	156
七、主拱施工阶段计算	157
(一)《规范》验算要求	157
(二)施工阶段一	158
(三)施工阶段二	158
八、其他计算	159
(一)吊杆	159
(二)系杆	160

示例七 钢管混凝土桁肋下承式刚架系杆拱桥

一、设计基本资料	162
(一)工程概述	162
(二)技术标准	163
(三)主要材料	164
二、结构内力计算	164
(一)有限元计算模型	164
(二)拱肋截面参数和其他计算参数	164
(三)设计荷载及荷载组合	166
(四)内力计算结果	166
三、拱肋强度计算	172
(一)《规范》验算要求	172
(二)弦管强度验算	173
(三)腹杆强度和稳定验算	176
(四)整体截面强度验算	177
四、拱肋面内稳定承载力计算	180
(一)《规范》验算要求	180
(二)稳定系数	180
(三)偏心率折减系数	182
(四)混凝土徐变折减系数	183
(五)初应力度影响系数	184
(六)稳定承载力	185
五、主拱空间弹性稳定计算	185
六、正常使用极限状态计算	186
(一)桥面挠度	186
(二)持久状况下钢管应力验算	186
七、主拱施工阶段计算	187

(一)《规范》验算要求	187
(二)施工阶段一	188
(三)施工阶段二	188
八、其他计算	189
(一)吊杆	189
(二)系杆	191

示例八 钢管混凝土桁肋上承式拱桥

一、设计基本资料	193
(一)工程概述	193
(二)技术标准	193
(三)主要材料	195
二、结构内力计算	196
(一)有限元计算模型	196
(二)拱肋截面参数和其他计算参数	196
(三)设计荷载及荷载组合	200
(四)内力计算结果	201
三、拱肋强度计算	204
(一)《规范》验算要求	204
(二)弦管强度验算	205
(三)腹杆强度和稳定验算	211
(四)整体截面强度验算	212
四、拱肋面内稳定承载力计算	215
(一)《规范》验算要求	215
(二)稳定系数	216
(三)偏心率折减系数	217
(四)混凝土徐变折减系数	218
(五)初应力度影响系数	218
(六)稳定承载力	219
五、主拱空间弹性稳定计算	220
六、正常使用极限状态计算	220
(一)桥面挠度	220
(二)持久状况下钢管应力验算	220
七、主拱施工阶段计算	222
(一)《规范》验算要求	222
(二)施工阶段一	222
(三)施工阶段二	223
参考文献	224

示例一 钢管混凝土单圆管中承式拱桥

一、设计基本资料

(一) 工程概述

示例一为一座单孔净跨径 46m、净矢跨比 1/3 的中承式钢管混凝土拱桥。其拱轴线为二次抛物线,拱肋断面由 $\phi 800\text{mm} \times 14\text{mm}$ 钢管内灌 C30 混凝土组成。桥面以下采用 $\phi 600\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的下横撑和斜撑,桥面上采用 $\phi 700\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的上横撑形成整体。吊杆由 109 根 $\phi 5\text{mm}$ 高强钢丝组成,采用 PE 防护,其间距为 4.0m。桥面系采用整体现浇钢筋混凝土结构。1/2 半平面图见图 1-1,立面图见图 1-2,1/2 I-I 和 1/2 II-II 见图 1-3。

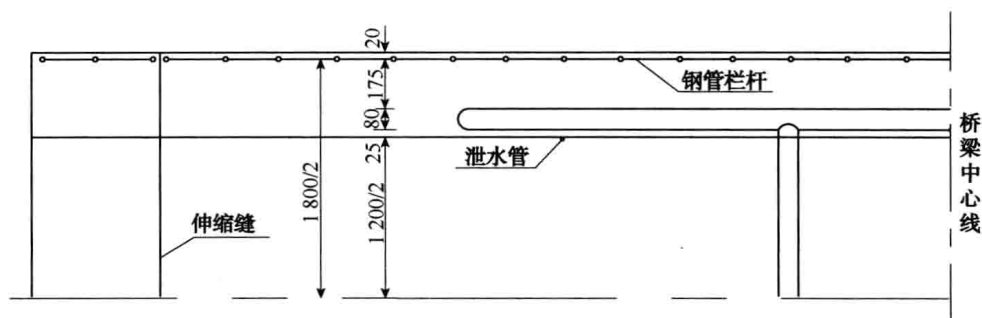


图 1-1 1/2 半平面图(尺寸单位:cm)

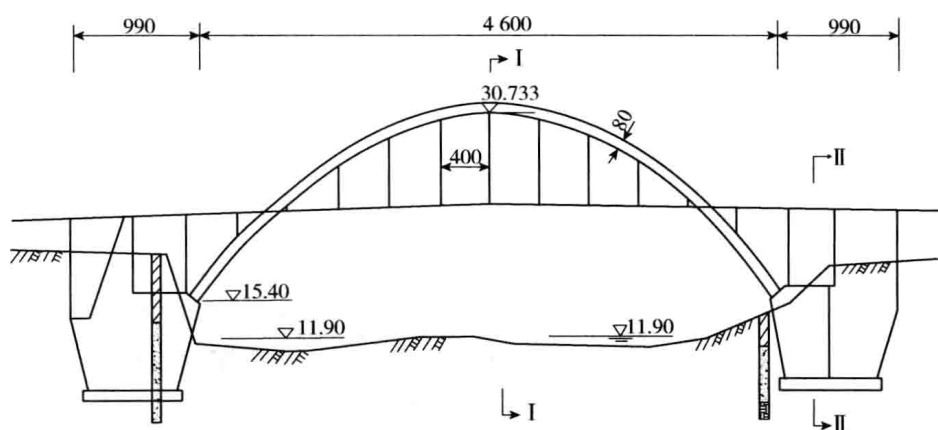


图 1-2 立面图(尺寸单位:cm;高程单位:m)

(二) 技术标准

(1) 设计荷载:汽—20 级,挂—100,人群荷载为 3.5kN/m^2 。

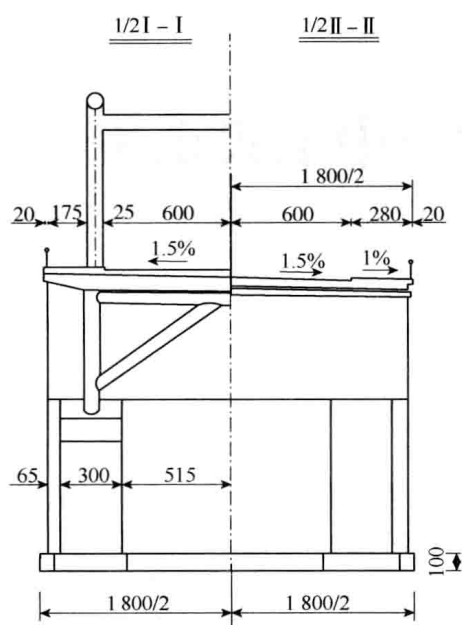


图 1-3 1/2 I-I 和 1/2 II-II 图(尺寸单位:cm)

(2) 桥面宽:净—12+2×0.25(防护栏)+2×0.8(拱肋)+2×1.75(人行道)+2×0.2(栏杆)=18(m)。

(3) 桥面坡:双面坡 1.5%。

(4) 设计洪水频率:百年一遇。

(三) 主要材料

(1) 拱肋及横撑:拱肋采用钢管混凝土,其钢管采用 $\phi 800\text{mm} \times 14\text{mm}$, Q235(A3) 钢, $f_s = 190\text{MPa}$, 弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5\text{MPa}$, 重度 $\gamma_s = 78.5\text{kN/m}^3$ 。拱肋内灌 C30 混凝土, $f_{cd} = 14.3\text{MPa}$, 弹性模量 $E_c = 3 \times 10^4\text{MPa}$, 重度 $\gamma_c = 25\text{kN/m}^3$ 。上横撑为 $\phi 700\text{mm} \times 10\text{mm}$ 空钢管, 下横撑和斜撑为 $\phi 600\text{mm} \times 8\text{mm}$ 空钢管。

(2) 吊杆:采用 $\phi 5\text{mm}$ 高强钢丝, $R_y^b = 1670\text{MPa}$ 。

(3) 桥面系:横梁、加劲纵梁、桥面板均采用 C30 混凝土。

二、结构内力计算

(一) 有限元计算模型

采用 Midas 建立三维杆系计算模型,如图 1-4 所示。全桥除吊杆采用桁架单元外,其余均采用梁单元建模,桥面采用梁格系进行模拟。钢管混凝土拱肋采用组合截面进行模拟。边界条件中,拱脚、边立柱端铰接,下端固结,两桥面端部只有竖向支承。模型共有 515 个节点,994 个单元。

该 Midas 模型的施工分为三个阶段:

- (1) 安装拱肋空钢管。
- (2) 泵送法灌注钢管内混凝土。
- (3) 施工吊杆、立柱及桥面系。

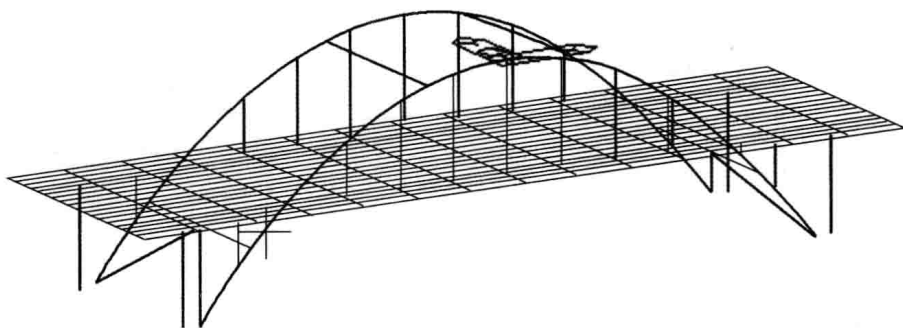


图 1-4 示例一的有限元模型

(二) 拱肋截面参数和其他计算参数

1. 拱肋截面的几何性质计算

(1) 钢管的截面面积 A_s 和惯性矩 I_s

$$A_s = \frac{\pi}{4} \times (0.80^2 - 0.772^2) = 0.034\ 57(\text{m}^2)$$

$$I_s = \frac{\pi}{64}(0.80^4 - 0.772^4) = 0.002\ 67(\text{m}^4)$$

(2) 混凝土的截面面积 A_c 和惯性矩 I_c

$$A_c = \frac{\pi}{4} \times 0.772^2 = 0.468\ 1(\text{m}^2)$$

$$I_c = \frac{\pi}{64} \times 0.772^4 = 0.017\ 4(\text{m}^4)$$

(3) 钢管混凝土的抗压刚度和抗弯刚度

按照《规范》第 4.3.4 条, 拱肋截面整体轴压设计刚度与抗弯设计刚度计算如下:

$$\begin{aligned}(EA)_{sc} &= E_s A_{s1} + E_c A_{c1} \\ &= 2.06 \times 10^{11} \times 0.034\ 57 + 3.00 \times 10^{10} \times 0.468\ 1 \\ &= 2.116 \times 10^{10}(\text{N})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(EI)_{sc} &= E_s I_{s1} + 0.6E_c I_{c1} \\ &= 2.06 \times 10^{11} \times 0.002\ 67 + 0.6 \times 3.00 \times 10^{10} \times 0.017\ 4 \\ &= 8.632 \times 10^8(\text{N} \cdot \text{m}^2)\end{aligned}$$

2. 拱肋冲击系数的计算

按照《规范》第 4.2.2 条, 拱肋冲击系数按下式计算:

$$\mu_0 = 0.057\ 36f_0 + 0.074\ 8 \quad (4.2.2-1)$$

式中: f_0 ——钢管混凝土拱桥的一阶竖向频率。

由有限元模型计算得到示例一的一阶竖向振动频率 $f_0 = 1.619\text{Hz}$, 故冲击系数为 $\mu_0 = 0.057\ 36 \times 1.619 + 0.074\ 8 = 0.168$ 。

3. 计算合龙温度

按照《规范》第 4.2.3 条规定, 拱肋计算合龙温度 T 可按下式计算:

$$T = T_{28} + \frac{D - 0.85}{0.2} + T_0 \quad (4.2.3-2)$$

示例一拱桥于 1998 年 7 月建成, 为夏季合龙, 其管内混凝土强度等级为 C30, 所以其附加升温值 T_0 取 $5^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C} = 4^\circ\text{C}$; 当地 7 月平均气温为 29.1°C ; 钢管外径为 0.8m。则拱肋计算合龙温度 T 为:

$$T = T_{28} + \frac{D - 0.85}{0.2} + T_0 = 29.1 + \frac{0.8 - 0.85}{0.2} + 4 = 32.85(^\circ\text{C})$$

最高与最低有效温度可取当地最高与最低气温, 最低有效温度取 0°C , 最高有效温度取 43.2°C 。

由上, 示例一的计算合龙温度为 32.85°C , 升温温差为 $(43.2 - 32.85) = 10.35(^\circ\text{C})$, 降温温差为 32.85°C 。

4. 混凝土徐变系数的计算

《规范》第 6.0.3 条规定:钢管混凝土结构或构件变形计算中,混凝土徐变系数在无可靠实测资料时,可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)的规定计算。

由于徐变系数为徐变变形 ε_{cr} 与弹性变形 ε_{el} 的比值,即 $\varphi = \varepsilon_{cr} / \varepsilon_{el}$, 因此由徐变系数可求得徐变变形,进而应用于预拱度等的计算中。

(三) 作用及作用组合

作用类型:包括结构自重、活载、温度荷载和混凝土的收缩徐变等。结构自重包括结构一期恒载、二期恒载,其中二期恒载考虑桥面铺装、人行道、防撞栏杆以及桥面其他附属设施。活载为公路—II级,人群活载为 3.5kN/m^2 。对于温度荷载及混凝土的徐变、收缩的计算参数见前文“拱肋截面参数和其他计算参数”一节。

作用组合:根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)等规范规定,针对拱肋及其他主要结构主要考虑以下几种作用组合。

组合 I:1.2 自重+1.4 汽车荷载(含汽车冲击力)+0.8×1.4 人群荷载;

组合 II:1.2 自重+1.4 汽车荷载(含汽车冲击力)+1.0 收缩+1.0 徐变 +0.7×1.4(均匀降温+人群荷载);

组合 III:1.2 自重+1.4 汽车荷载(含汽车冲击力)+1.0 收缩+1.0 徐变+0.7×1.4(均匀升温+人群荷载);

组合 IV:1.0 自重+1.0 汽车荷载(不含汽车冲击力)+1.0 人群荷载;

组合 V:1.0 自重+1.0 汽车荷载(不含汽车冲击力)+1.0 收缩+1.0 徐变+1.0 均匀降温+1.0 人群荷载;

组合 VI:1.0 自重+1.0 汽车荷载(不含汽车冲击力)+1.0 收缩+1.0 徐变+1.0 均匀升温+1.0 人群荷载。

其中,验算结构在承载能力极限状态下的受力情况为组合 I、II、III,验算结构在正常使用极限状态下的受力情况为组合 IV、V、VI。组合 IV、V、VI按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)第 4.1.8 条考虑标准组合,各作用效应的分项系数及组合系数均取为 1.0。

(四) 内力计算结果

内力计算结果见表 1-1~表 1-3,表中的轴力拉为正,压为负,弯矩顺时针为正,逆时针为负。弯矩单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$,轴力和剪力单位: kN 。

单项荷载内力(汽车荷载不计冲击系数)

表 1-1

内力汇总	拱 顶			L/4 截面			拱 脚		
	M	V	N	M	V	N	M	V	N
恒载	135	183	-2 099	34	106	-2 434	-215	-1	-3 480
汽(M_{\max})	187	45	-265	202	22	-177	546	139	-125
汽(M_{\min})	-95	12	-223	-143	17	-301	-628	-150	-409
汽(N_{\max})	16	-3	30	-4	-4	33	189	55	137

续上表

内力汇总	拱 顶			L/4 截面			拱 脚		
	M	V	N	M	V	N	M	V	N
汽(N_{\min})	137	58	-372	-109	10	-450	-119	-3	-657
人群(M_{\max})	29	8	-62	32	3	-48	112	29	-77
人群(M_{\min})	-19	4	-55	-30	4	-87	-118	-26	-113
人群(N_{\max})	1	0	2	0	0	2	10	3	7
人群(N_{\min})	9	12	-119	2	7	-137	-15	0	-197
温度上升	-32	2	-29	-7	2	-31	-27	-16	-73
温度下降	102	-7	91	23	-16	98	86	51	230
混凝土收缩	8	-1	15	-3	-2	17	138	46	111
混凝土徐变	-2	1	-14	6	1	-16	-16	-7	-40

注:表中汽为汽车荷载,人群为人群荷载。

承载能力极限状态内力

表 1-2

荷载组合	内力汇总	拱 顶			L/4 截面			拱 脚		
		M	V	N	M	V	N	M	V	N
组合 I	恒+汽(M_{\max})+人(M_{\max})	456	292	-2 959	359	161	-3 222	632	226	-4 437
	恒+汽(M_{\min})+人(M_{\min})	8	241	-2 893	-193	155	-3 440	-1 269	-240	-4 875
	恒+汽(N_{\max})+人(N_{\max})	186	215	-2 475	35	122	-2 872	18	79	-3 976
	恒+汽(N_{\min})+人(N_{\min})	364	314	-3 173	-110	149	-3 704	-441	-5	-5 316
组合 II	恒+汽(M_{\max})+人(M_{\max})+温降+混凝土收缩+混凝土徐变	602	294	-2 923	428	149	-3 352	951	343	-4 159
	恒+汽(M_{\min})+人(M_{\min})+温降+混凝土收缩+混凝土徐变	94	236	-2 847	-197	142	-3 593	-1 194	-183	-4 659
	恒+汽(N_{\max})+人(N_{\max})+温降+混凝土收缩+混凝土徐变	295	208	-2 378	60	104	-2 960	267	181	-3 649
	恒+汽(N_{\min})+人(N_{\min})+温降+混凝土收缩+混凝土徐变	501	319	-3 154	-110	134	-3 886	-261	83	-5 147
组合 III	恒+汽(M_{\max})+人(M_{\max})+温升+混凝土收缩+混凝土徐变	470	304	-3 041	399	168	-3 287	841	277	-4 456
	恒+汽(M_{\min})+人(M_{\min})+温升+混凝土收缩+混凝土徐变	-37	245	-2 964	-226	160	-3 528	-1 306	-248	-4 956
	恒+汽(N_{\max})+人(N_{\max})+温升+混凝土收缩+混凝土徐变	164	216	-2 495	30	121	-2 894	157	115	-3 946
	恒+汽(N_{\min})+人(N_{\min})+温升+混凝土收缩+混凝土徐变	369	329	-3 270	-139	152	-3 821	-372	17	-5 443

注:1.表中恒为恒载,汽为汽车荷载,人为人群荷载,温升为温度上升,温降为温度下降。

2.表中加粗和加下划线的数值为控制设计的内力值。

正常使用极限状态内力

表 1-3

荷载组合	内力汇总	拱 顶			L/4 截面			拱 脚		
		M	V	N	M	V	N	M	V	N
组合 IV	恒+汽(M_{\max})+人(M_{\max})	351	236	-2 426	268	131	-2 659	443	167	-3 682
	恒+汽(M_{\min})+人(M_{\min})	21	199	-2 377	-139	127	-2 822	<u>-961</u>	-177	<u>-4 002</u>
	恒+汽(N_{\max})+人(N_{\max})	152	180	-2 067	30	102	-2 399	-16	57	-3 336
	恒+汽(N_{\min})+人(N_{\min})	281	253	-2 590	-73	123	-3 021	-349	-4	-4 334
组合 V	恒+汽(M_{\max})+人(M_{\max})+温降+混凝土收缩+混凝土徐变	<u>459</u>	229	<u>-2 334</u>	<u>294</u>	114	<u>-2 756</u>	651	257	-3 381
	恒+汽(M_{\min})+人(M_{\min})+温降+混凝土收缩+混凝土徐变	129	-191	2 239	-66	-105	2 657	-545	43	3 501
	恒+汽(N_{\max})+人(N_{\max})+温降+混凝土收缩+混凝土徐变	260	173	-1 975	56	85	-2 496	192	147	-3 035
	恒+汽(N_{\min})+人(N_{\min})+温降+混凝土收缩+混凝土徐变	389	246	-2 498	<u>-47</u>	106	<u>-3 118</u>	-141	86	-4 033
组合 VI	恒+汽(M_{\max})+人(M_{\max})+温升+混凝土收缩+混凝土徐变	325	238	-2 454	264	132	-2 689	538	190	-3 684
	恒+汽(M_{\min})+人(M_{\min})+温升+混凝土收缩+混凝土徐变	-5	201	-2 405	-143	128	-2 852	-866	-154	-4 004
	恒+汽(N_{\max})+人(N_{\max})+温升+混凝土收缩+混凝土徐变	126	182	-2 095	26	103	-2 429	79	80	-3 338
	恒+汽(N_{\min})+人(N_{\min})+温升+混凝土收缩+混凝土徐变	<u>255</u>	255	<u>-2 618</u>	-77	124	-3 051	<u>-254</u>	19	<u>-4 336</u>

注:同表 1-2。

由以上内力计算表格可知,恒载作用下拱肋内力为:

(1) 拱脚截面: $N=3\ 480\text{kN}$, $M=-215\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

(2) L/4 截面: $N=2\ 434\text{kN}$, $M=34\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

(3) 拱顶处: $N=2\ 099\text{kN}$, $M=135\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

承载能力极限状态最不利内力组合为:

(1) 拱脚截面: $M_{\max}=-1\ 306\text{kN}\cdot\text{m}$,对应的轴力 $N=-4\ 956\text{kN}$; $N_{\max}=-5\ 443\text{kN}$,对应的弯矩 $M=-372\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

(2) L/4 截面: $M_{\max}=428\text{kN}\cdot\text{m}$,对应的轴力 $N=-3\ 352\text{kN}$; $N_{\max}=-3\ 886\text{kN}$,对应的弯矩 $M=-110\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

(3) 拱顶截面: $M_{\max}=602\text{kN}\cdot\text{m}$,对应的轴力 $N=-2\ 923\text{kN}$; $N_{\max}=-3\ 270\text{kN}$,对应的弯矩 $M=369\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

正常使用极限状态最不利内力组合为:

(1) 拱脚截面: $M_{\max}=-961\text{kN}\cdot\text{m}$,对应的轴力 $N=-4\ 002\text{kN}$; $N_{\max}=-4\ 336\text{kN}$,对应的弯矩 $M=-254\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

(2) L/4 截面: $M_{\max}=294\text{kN}\cdot\text{m}$,对应的轴力 $N=-2\ 756\text{kN}$; $N_{\max}=-3\ 118\text{kN}$,对应的弯矩