

公路桥梁设计丛书

钢管混凝土 系杆拱桥

徐 岳 朱红亮 陈万春 邹存俊 著



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

公路桥梁设计丛书

Concrete-filled Steel Tube Tied Arch Bridge

钢管混凝土系杆拱桥

徐 岳 朱红亮 陈万春 邹存俊 著



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

内 容 提 要

本书以现行设计规范为基础,以相关最新研究成果为指导,以钢管混凝土系杆拱桥设计计算与验算内容为主导,以工程实例为主线,详细介绍基于整体吊装施工方法的组合吊杆钢管混凝土系杆拱桥的设计特点、原理、方法和步骤。

本书可作为高等院校桥梁工程课程设计或毕业设计的参考用书,同时可供从事桥梁工程的专业技术人员参考,亦可为相关技术标准规范的修订提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土系杆拱桥 / 徐岳等著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.5

ISBN 978-7-114-13816-4

I. ①钢… II. ①徐… III. ①钢管混凝土拱桥—系杆拱桥 IV. ①U448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 100824 号

公路桥梁设计丛书

书 名: 钢管混凝土系杆拱桥

著 作 者: 徐 岳 朱红亮 陈万春 邹存俊

责任编辑: 周 宇 石 遥

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: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 27.25

字 数: 656 千

版 次: 2017 年 6 月 第 1 版

印 次: 2017 年 6 月 第 1 次印刷

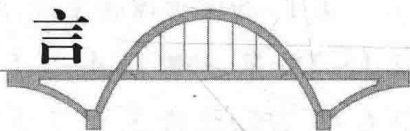
书 号: ISBN 978-7-114-13816-4

定 价: 120.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)



前言



钢管混凝土系杆拱桥通过在钢管内填充混凝土形成复合材料拱肋,是一种以拱肋、吊杆、系杆及横梁为主要受力构件的组合结构体系桥梁。钢管混凝土系杆拱桥结构性能优越、造型优美,已在我国大量使用。钢管混凝土系杆拱桥从结构形式上可以分为中承式和下承式两种,其中,下承式钢管混凝土系杆拱桥是一种外部静定、内部超静定的特殊结构,兼有拱桥跨越能力大和简支梁桥地基适应能力强的特点。本书主要介绍下承式钢管混凝土系杆拱桥的设计计算方法。

根据钢管混凝土系杆拱桥的特点,进行钢管混凝土系杆拱桥上部结构设计时,所涉及的技术标准与规范应当包括:《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)、《公路钢结构桥梁设计规范》(JTD D64—2015)、《钢管混凝土结构设计施工规范》(CECS 28:2012)、《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)以及《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)等。这些规范制定背景不同,对各构件的设计计算规定也有所差异,且均未针对组合吊杆钢管混凝土系杆拱桥设计做出具体、系统的规定。故本书以“精心选用、正确使用、合理补充、科学完善”为基本原则,构建明确的组合吊杆钢管混凝土系杆拱桥设计方法体系。其中,“精心选用、正确使用”均以现行规范为基础,“合理补充、科学完善”则通过作者主持完成的江苏省交通运输科技项目“整体吊装组合吊杆钢管混凝土系杆拱桥设计与施工技术研究”(2015T19),以及交通运输部重大科技专项“桥梁耐久性关键技术研究”(200631822302)的成果应用来实现。

本书以现行设计规范为基础,以相关最新研究成果为指导,以钢管混凝土系杆拱桥设计计算与验算内容为主导,以工程实例为主线,详细介绍基于整体吊装施工方法

的组合吊杆钢管混凝土系杆拱桥的设计特点、原理、方法和步骤。

全书共 11 章,并设 4 个附录,具体分工如下:

第 1~5 章由徐岳主持,其中,何磊:1.1 节;张昊男:1.2 节;孙鹏:1.3 节;罗学睿:2.1~2.3 节;孙鹏:2.4~2.5 节;王世栋:2.6~2.8 节;罗学睿:3.1~3.5 节;虎洁琼:3.6~3.7 节;杜朋:3.8~3.9 节;安朗:3.10~3.11 节;陈万春:3.12~3.13 节;张昊男:3.14 节;邹存俊:3.15~3.16 节;申成岳:4.1~4.4 节;罗学睿:5.1~5.2 节;朱红亮:5.3~5.4 节。

第 6~7 章由陈万春主持,其中,罗学睿:6.1 节;李扬:6.2~6.4 节;申成岳:7.1 节;崔凤坤:7.2~7.4 节。

第 8~9 章由邹存俊主持,其中,王虎军:8.1~8.2 节;葛粟粟:8.3~8.4 节;王江龙:9.1~9.2 节;何磊:9.3~9.4 节;张昊男:9.5~9.6 节。

第 10~11 章及附录由朱红亮主持,其中,杜岳涛:10.1~10.3 节;张昊男:10.4~10.5 节;刘少天:10.6~10.7 节;申成岳:11.1~11.4 节;朱谊彪:11.5~11.6 节;申成岳:附录 A~附录 B;何磊:附录 C;张昊男:附录 D。

全书由长安大学徐岳教授策划、组稿、统稿、定稿。

为了方便读者阅读,作者搭建了公路钢管混凝土系杆拱桥设计交流群(QQ 群号:119079749),并在共享文件中提供各章的计算模型及其他资源。

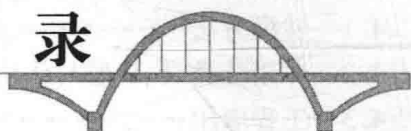
借此机会,作者感谢交通运输部、江苏省交通运输厅对于相关科技项目的资助与指导,感谢所列参考文献的作者或单位给予的启迪与帮助,感谢人民交通出版社的全程鼓励与支持。

限于作者水平,书中不足之处在所难免,恳请读者指正。

作者

2017 年 1 月 3 日

目 录



第1章 绪论	1
1.1 桥型特点	1
1.2 技术标准与规范	8
1.3 施工方法	18
第2章 构造设计原理与方法	26
2.1 设计依据	26
2.2 体系构造	26
2.3 构件构造	29
2.4 连接构造	36
2.5 附属设施构造	40
2.6 特殊构造	47
2.7 可检修可更换构造	48
2.8 本章小结	49
第3章 实例工程结构设计	50
3.1 工程概况	50
3.2 设计步骤	50
3.3 结构体系构造	52
3.4 拱肋构造	52
3.5 系杆构造	54
3.6 吊杆和横梁间距	57
3.7 桥面板和横梁构造	58
3.8 横撑构造	59
3.9 吊杆类型和初张力	60
3.10 混凝土横梁及系杆内力估算	62
3.11 横梁预应力钢束估算	63
3.12 系杆预应力钢束估算	74
3.13 连接构造	78
3.14 附属设施构造	81



3.15	构造优化	86
3.16	本章小结	88
第4章	整体吊装组合吊杆钢管混凝土系杆拱桥有限元分析	89
4.1	建模方法	89
4.2	作用分类、代表值与作用效应组合	92
4.3	工程应用	96
4.4	本章小结	184
第5章	持久状况承载能力极限状态计算与验算	185
5.1	原理与方法	185
5.2	验算指标限值	197
5.3	工程应用	200
5.4	本章小结	227
第6章	持久状况正常使用极限状态计算与验算	228
6.1	原理与方法	228
6.2	验算指标限值	249
6.3	工程应用	251
6.4	本章小结	266
第7章	持久状况和短暂状况构件应力计算与验算	267
7.1	原理与方法	267
7.2	验算指标限值	274
7.3	工程应用	276
7.4	本章小结	302
第8章	短暂状况结构变形和稳定性计算与验算	303
8.1	原理与方法	303
8.2	验算指标限值	306
8.3	工程应用	306
8.4	本章小结	318
第9章	拱肋混凝土浇注顺序设计与分析	319
9.1	原理与方法	319
9.2	拱肋应力计算结果及分析	320
9.3	系杆应力计算结果及分析	326
9.4	拱肋变形计算结果及分析	330
9.5	稳定性计算结果及分析	335
9.6	本章小结	336
第10章	吊杆与系杆张拉设计与分析	337
10.1	原理与方法	337
10.2	张拉方案设计	337
10.3	吊杆一次张拉应力计算与验算	339



10.4	吊杆一次张拉变形计算与验算	343
10.5	吊杆一次张拉稳定性计算与验算	345
10.6	对比分析	348
10.7	本章小结	361
第 11 章	结构耐久性设计与分析	362
11.1	概述	362
11.2	吊杆和支座更换方案	363
11.3	计算方法与内容	364
11.4	吊杆更换计算结果及分析	366
11.5	支座更换计算结果及分析	383
11.6	本章小结	391
附录 A	施工阶段数据结构	392
附录 B	钢管混凝土收缩徐变模式的选择	401
附录 C	钢管混凝土梯度温度模式的选择	408
附录 D	设计图示例	411
参考文献		426

第 1 章 绪 论

钢管混凝土系杆拱桥 (Concrete-filled Steel Tube Tied Arch Bridge) 是一种应用复合材料、组合结构体系与多种施工技术,以拱肋、吊杆、系杆及横梁为主要承重构件的组合结构桥梁,能够充分发挥组成材料的性能优势、体现组合结构体系的受力特点、结合各种施工技术的先进工艺,经济性好、承载能力强,因而在中大跨径桥梁方案中成为极富竞争力的桥型之一。

从结构形式上可以将钢管混凝土系杆拱桥分为中承式和下承式。其中,下承式钢管混凝土系杆拱桥作为一种外部静定、内部超静定的特殊结构,具有受力合理、造型美观、地基适应能力强、跨越能力大等一系列优势,因而在我国拱桥建设中被广泛采用。本书将详细介绍下承式钢管混凝土系杆拱桥(以下简称钢管混凝土系杆拱桥)的设计计算特点、原理及方法。

1.1 桥 型 特 点

钢管混凝土系杆拱桥是由钢管混凝土拱肋、吊杆、吊杆横梁、系杆和桥面板组成的拱梁组合结构体系桥梁,在结构材料、受力、施工和运营维护等方面独具特色。在结构材料方面,钢管混凝土系杆拱桥由钢管混凝土、预应力混凝土及钢材等多种材料构成;结构受力方面,具有外部静定、内部超静定的特殊结构体系特点;施工方法方面,主要有“支架施工”和“整体吊装”等多种施工工艺;运营维护方面,则需综合借鉴预应力混凝土桥梁、钢管混凝土拱桥及钢桥等多种基本桥梁结构体系的运营维护方法与管理经验。

1.1.1 材料特点

拱肋是拱桥主要的受力构件。钢管混凝土系杆拱桥拱肋的材料为钢管混凝土 (Concrete-filled Steel Tubes) 复合材料。钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成的构件,是在劲性钢筋混凝土结构、螺旋配筋钢筋混凝土结构及钢管结构的基础上演变和发展而来的一种组合结构。钢管混凝土从材料学设计原理上来讲是一种复合材料,由金属钢材与无机非金属的混凝土复合而成,是钢—混凝土组合结构中最重要的一种形式。如图 1-1 所示,钢管内的混凝土受到钢管壁的套箍作用,改变了混凝土的受力状态,在轴心受压荷载作用下,混凝土由单向受力状态变为三向受压,可提高混凝土的抗压强度、塑性和韧性,延缓混凝土受压时的纵向开裂,因此可提高拱肋的力学性能。与此同时钢管中填充了混凝土,可延缓或避免薄壁钢管过早发生局部屈曲,提高钢管的局部稳定性,并减少用钢量。

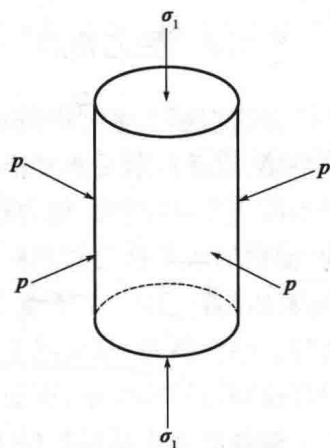


图 1-1 钢管混凝土三向应力状态

在钢管封闭状态下,混凝土与外界侵蚀性有害介质隔绝,有利于提高混凝土的耐久性;同时,碱性混凝土紧贴钢管内壁,无须采取其他防腐措施,只需对钢管外壁进行防腐处理,因此钢管混凝土具有良好的抗腐蚀和耐久性能。

吊杆是钢管混凝土拱肋和桥面系的荷载传递纽带。钢管混凝土系杆拱桥的吊杆可分为刚性吊杆和柔性吊杆两大类。刚性吊杆一般采用抗弯刚度较大的预应力混凝土结构,也可采用型钢结构。施工过程中通过预应力钢筋给吊杆施加预压应力,抵消吊杆在荷载作用下受到的拉应力。刚性吊杆除了受到轴向拉应力,还受到上下节点传递的弯矩。通常,刚性吊杆在顺桥向的构造尺寸较小,可减少承受的弯矩;在横桥向的尺寸较大,可增强拱肋的稳定性。柔性吊杆只承受轴向拉应力,不能受压,通常由钢绞线或高强丝束、防护构造和锚具组成。柔性吊杆应具有较高的承载能力和稳定的高弹性模量(低松弛)、良好的耐疲劳和抗腐蚀能力,以保证吊杆耐久性。

系杆在钢管混凝土系杆拱桥设计中是关键构件之一,系杆的可靠性、耐久性及适应性关系到系杆拱桥结构的正常使用和安全性能。钢管混凝土系杆拱桥的系杆主要有柔性系杆和刚性系杆两种形式。柔性系杆采用预应力拉索,常用的拉索体系有夹片群锚半平行钢绞线索、镦头锚或冷铸锚的平行高强钢丝索;刚性系杆一般为预应力混凝土构件。系杆防腐通常采用PE防护,高强钢丝采用镀锌、环氧涂层或镀锌—环氧涂层防护,系杆箱中可灌以防腐密封材料。

横梁可分为端横梁和吊杆横梁两种。端横梁在钢管混凝土系杆拱桥中需要有较大的刚度,以便约束拱肋或系杆的扭转变形,因此端横梁应具有较大的抗扭刚度和抗变形能力。端横梁一般采用预应力混凝土或钢管(箱)混凝土,并与拱脚连接成整体。吊杆横梁由吊杆约束,计算跨径一般等于拱肋的中距,所承受的荷载范围一般为吊杆之间的间距,通常可分为预应力混凝土或普通钢筋混凝土吊杆横梁或钢吊杆横梁。钢管混凝土系杆拱桥中,吊杆横梁通常称为中横梁,一般采用预应力混凝土或普通钢筋混凝土结构,并且与预应力混凝土系杆刚接,形成梁格结构。

桥面板是钢管混凝土系杆拱桥直接承受车辆轮压的承重结构。桥面板一般采用钢筋混凝土结构,对于跨径较大的桥面板也可施加预应力,即采用预应力混凝土结构。

1.1.2 受力特点

钢管混凝土系杆拱桥是由钢管混凝土拱肋、吊杆、系杆和桥面板等协同工作的梁拱组合体系桥梁,以系杆承受水平推力为主要受力特征,充分发挥梁受弯、拱受压的结构受力特性。钢管混凝土系杆拱桥的传力路径为车辆和行人荷载通过桥面板传给吊杆横梁,再由吊杆传给拱肋,而拱的水平推力靠系杆承受,竖向力则通过支座传至下部结构。系杆承受拱脚水平推力,拱脚处设置支座。由于整个桥跨结构简支在下部结构之上,故钢管混凝土系杆拱桥外部整体为静定结构体系,基础沉降对整体结构不产生次内力。而钢管混凝土系杆拱桥的构件组成为内部超静定结构体系,拱肋、吊杆、系杆和横梁等构件受力相互影响,高度耦合。

钢管混凝土系杆拱桥主要受力构件包括钢管混凝土拱肋、吊杆和系杆,其中拱肋以承压为主,刚性吊杆和系杆以承受轴力为主,以承受弯矩为辅;柔性吊杆和系杆则以承受轴力为主。



按照拱肋和系杆(主梁)的相对截面刚度比,钢管混凝土系杆拱桥可划分为柔性系杆刚性拱、刚性系杆柔性拱和刚性系杆刚性拱,如图 1-2 所示。

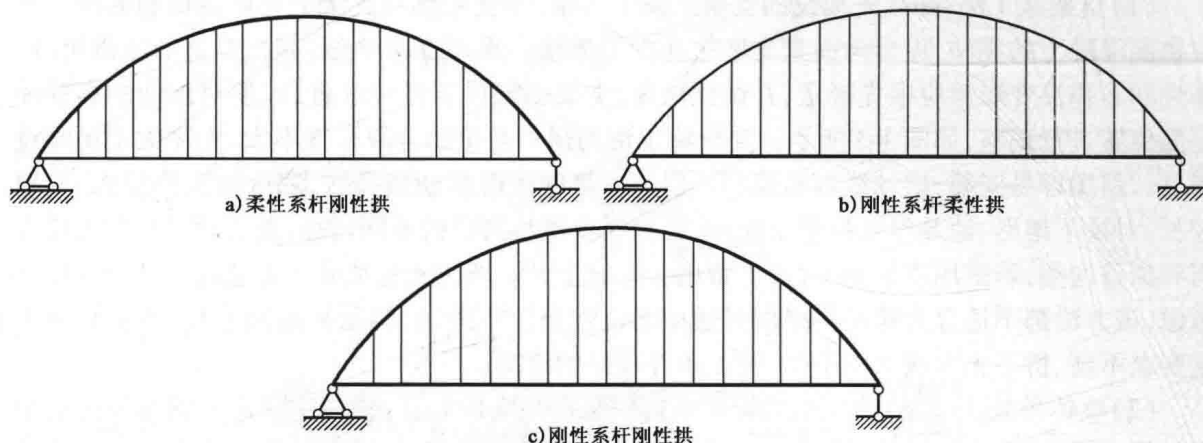


图 1-2 钢管混凝土系杆拱桥类型

柔性系杆刚性拱中,系杆和吊杆均为柔性构件,只承受轴向拉力而不承受弯矩,拱肋为偏心受压构件,承受轴向压力和弯矩。刚性系杆柔性拱中,拱肋截面抗弯刚度远小于系杆截面抗弯刚度,按刚度分配到拱肋的弯矩远小于系杆分配到的弯矩,故在计算分析时可忽略拱肋承受的弯矩,认为刚性系杆同时承受轴向拉力和弯矩,柔性拱肋只承受轴向压力,吊杆只承受轴向拉力。刚性系杆刚性拱的受力特点介于柔性系杆刚性拱和刚性系杆柔性拱之间,系杆和拱肋抗弯刚度相当,故荷载效应在拱肋和系杆之间按刚度分配,即拱肋和系杆都同时承受轴向力和弯矩,而吊杆只承受轴向拉力。

吊杆通常分为刚性吊杆和柔性吊杆。柔性吊杆一般为平行钢丝束或钢绞线,截面抗弯刚度较小,因此只承受轴向拉力。刚性吊杆一般为预应力混凝土或型钢构件。由于刚性吊杆截面抗弯刚度较大,对于拱肋和吊杆横梁约束较强,因此刚性吊杆除了承受轴向拉力还承受上下节点传递的弯矩。

钢管混凝土系杆拱桥的系杆一般为预应力混凝土构件,主要承受拱脚水平推力、预应力产生的轴向力以及由吊杆横梁和桥面板传递的荷载效应。系杆在恒、活载作用下产生的弯矩,相对于抵消掉拱脚水平推力的永存预加力很小,因此,系杆在构件受力特点方面更接近于偏心受压构件。

钢管混凝土系杆拱桥中,吊杆横梁与系杆固结在一起,形成梁格结构体系,通过吊杆与钢管混凝土拱肋相连,并与系杆组成外部静定结构受力体系。端横梁一般采用预应力混凝土梁或钢管混凝土梁,并与拱脚连接形成整体,因此端横梁可视为两端固结梁。桥面板主要有简支或连续支承于吊杆横梁之上两种形式,受力特点与普通简支梁或多跨连续梁类似;另外,还可将桥面板与吊杆横梁通过湿接缝刚性连接,受力特点为支承于吊杆的多跨正交异性板。

1.1.3 施工特点

钢管混凝土系杆拱桥施工方法按拱梁施工先后顺序可分为两大类,一类为“先梁后拱”法,另一类为“先拱后梁”法。随着施工方法的不断推陈出新,目前“先梁后拱”法常用的施工

方法主要有支架施工法、整体吊装法和浮运拖拉法等,“先拱后梁”法常用的施工方法主要有缆索吊装法、转体施工法等。

(1) 支架施工法,即在先架设的支架上施工主梁,并在主梁和支架上完成主拱肋的拼装和主拱圈混凝土的浇注,可分为满堂支架法和少支架法。采用支架法施工时,支架的基础沉降、弹性和非弹性变形等应事先确定,并留预拱度,支架顶部设置微调装置,以便对拱肋的高程和平面位置进行调整,如图 1-3 所示。支架施工法的优点是拱肋分段长度不大,无须大型吊装设备,横、斜撑容易安装,拱轴线容易控制。但是支架施工时拱肋接头较多,焊接工作量大,工期较长,对桥下地形、地基等条件要求较高,并且随着拱桥跨径的不断增大,尤其对于跨越大江大河和深谷沟壑,若采用支架施工,施工费用会急剧上升。所以无论从施工方法还是从经济角度考虑,该方法都不适合大跨径桥梁而只适用于百米及以下跨径、拱肋离地面不高、不通航或通航要求不高、桥下无水或水位不深、施工条件较好的情况。

(2) 整体吊装法,是将整孔钢结构在岸边预制拼装完成后,分别利用浮吊或缆索等吊运至桥位处,就位后固定抗风装置和设置临时横梁使其成为整体的施工方法,如图 1-4 所示。整体吊装可分为钢管拱单肋整片吊装法、将劲性骨架系杆及吊杆外套钢管与钢管拱肋焊接成整体再吊装的方法。整体吊装法相对于缆索吊装和转体施工而言,具有现场施工工期短、工艺简单易行、不确定因素少、安全高效、技术先进、节省造价、对桥下通航影响时间短等优点,且岸边拼装整体吊装使得拱肋的线形和质量容易得到保障,但需要预拼场地,施工过程中结构体系转换及施工工艺也比较复杂,并对吊装设备提出了较高的要求。对于拱肋及劲性骨架系杆,吊装就位后还需要固定风撑和设置临时横撑以提高整体稳定性。



图 1-3 支架施工法施工



图 1-4 整体吊装法施工

(3) 浮运拖拉法施工时,先在河岸场地拼装系杆拱劲性骨架并加设临时支撑体系,河面组装浮体,对接浮体与临时支撑体系上的滑移轨道,拖拉拱桥骨架到浮体上,释放浮体上滑移装置约束,通过顶升滑移装置,拖拉浮体与拱桥骨架到预定位置,整体顶升一定高度后,调整结构纵横向轴线,移出滑移轨道,整体就位落架,连接支座,完成浮拖,施工示意如图 1-5 所示。浮运拖拉法具有安全、优质、快速和无需支架等优点,对航道运营干扰小,而且骨架拼装焊接过程在岸边场地进行,施工方便经济。但浮运拖拉法在施工过程中结构受力状态变化较大,施工应力状态与运营应力状态相差也较大,因此采用浮运拖拉法施工时,需同时满足施工与运营荷载的要求。

(4) 转体施工法,是利用桥梁结构本身及结构用钢作为施工设施,在非设计轴线位置浇筑



或拼装成形后,利用摩擦系数很小的滑道及合理的转盘结构,以简单的设备将结构整体旋转到位的一种施工方法,如图 1-6 所示。转体施工法按转动方位的不同分为平面转体法、竖向转体法及平竖结合转体法三种。

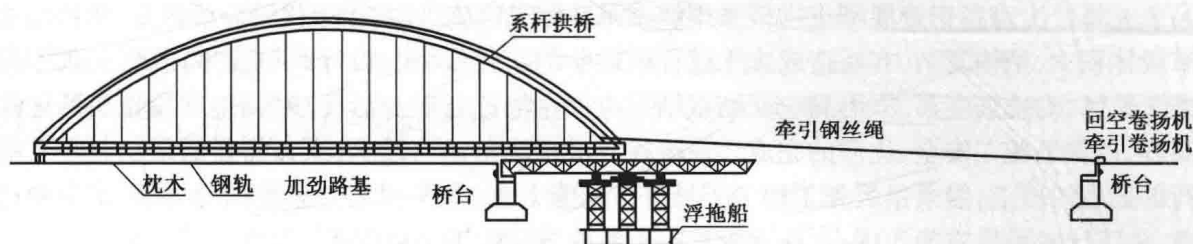


图 1-5 浮运拖拉法施工

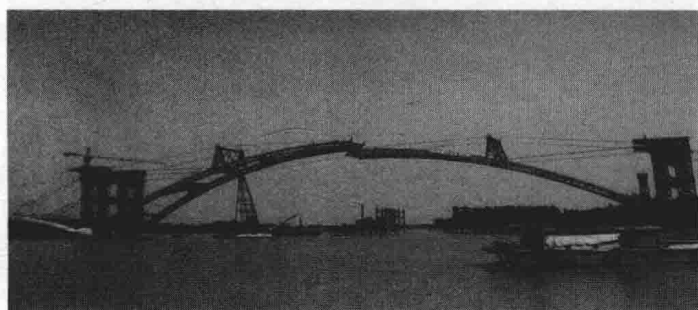


图 1-6 转体施工法施工

平面转体法是将拱圈分为两个半拱,分别在两岸偏离桥位的位置,利用山体、岸坡或引桥的桥墩设置支架(膺架),拼装拱肋和拱上立柱,形成半拱,然后水平转体就位,再拼装合龙段成拱。平面转体法分为有平衡重转体和无平衡重转体。其中有平衡重转体是一种在旋转过程中自平衡的转体,对于单跨拱桥通常需要利用桥台背墙重量及附加平衡压重,以平衡半跨拱圈(肋)的自重力矩。无平衡重转体是指以两岸山体岩石的锚碇锚固半跨拱在悬臂状态平衡时所产生的水平拉力,借助拱脚处立柱下端转盘和上端转轴使拱体实现平面转动。

竖向转体法是在拱脚处建造竖立的半拱,当半拱完成后,绕着拱的底端旋转吊装就位,并在拱顶处合龙。竖向转体法可分为下放式转体和上提式转体。下放式转体时首先在拱脚处用水平杆给予初始推力,然后用拉索将半拱从高位到低位下放,直到最终位置,并在拱顶处形成临时或永久的铰。与国外的高位浇注或拼装后下放的竖转不同,我国的竖转施工主要采用的是低位浇注或拼装后往高位提升的上提式竖转法。竖向转体法较支架施工法可节省投资和材料,但需要有较大的提升能力,如果拱桥跨径过大,拱圈(肋)过长,则竖向转动不易控制,故一般只宜在中、小跨径拱桥中使用。

当拱桥跨越宽阔河流或桥位地形较平坦时,由于采用平面转体法难以有效利用地形,常采用竖向转体与平面转体相结合的施工方法,即通过竖转将组拼拱肋的高空作业变为在低矮支架之上拼装拱肋的低空作业,然后通过平转完成对障碍物的跨越。转体法将复杂的水上高空作业转为岸边陆上施工,容易控制拱肋线形,结构受力安全可靠,空中对接时间短,施工速度快,避免水上高空作业,减少了机具设备及施工费用,降低了施工成本。但随着拱桥跨径的增大,转体质量增大,转盘圬工量大,且转体法对两岸地形有特殊要求,因此无法实现大跨径、大规模使用。

(5) 缆索吊装施工法,是大跨径钢管混凝土系杆拱桥自架设施工主要方法之一。如图 1-7 所示,缆索吊装施工法通常根据缆索吊机的吊装能力将拱肋分段预制,再由缆索吊机先将两拱脚段吊装就位,并用扣索将其固定,再依次吊装其余各段并与前节段对接焊牢,直至全桥合龙、吊装完毕。大跨径钢管混凝土拱桥采用缆索吊装施工法施工时,由于拱肋分段数多、单件吊装节段体积大、结构复杂,容易造成施工过程中拱肋的实际线形与设计线形发生偏离,必须通过施工控制,对现场变形、索力和应变测试结果与理论值进行对比后,及时调整节段接头的定位高程,以保证施工安全、优质的完成。在峡谷或水深流急的河段上,或在需要满足船只顺利通行的通航河段上,缆索吊装施工法由于具有跨越能力大,水平和垂直运输机动灵活,不影响通航,施工比较稳妥方便等优点,在钢管混凝土系杆拱桥施工中被广泛采用。

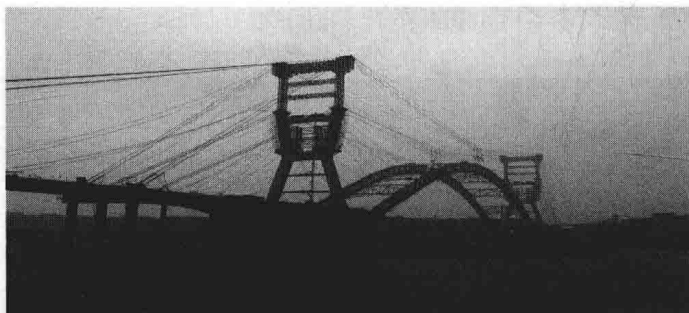


图 1-7 缆索吊装法施工

少支架和无支架施工方法的发展,进一步拓宽了钢管混凝土系杆拱桥的使用条件和应用范围。整体吊装技术也成功应用到钢管混凝土系杆拱桥的施工中,通过将主要构件装配成整体后吊装到设计桥位,极大地减少了河流的封航时间,同时降低了成本,缩短了工期,为钢管混凝土系杆拱桥的发展注入了新的活力。随着设计理论、方法与施工技术的进一步发展,钢管混凝土系杆拱桥必将在桥梁建设中扮演更加重要的角色。

1.1.4 运营维护特点

钢管混凝土系杆拱桥作为一种拱梁组合结构,其钢管混凝土、预应力混凝土及钢材等多种结构材料特点,钢管混凝土拱肋、预应力混凝土系梁以及柔性(或刚性)吊杆的组合结构受力特点,以及“先拱后梁”或“先梁后拱”的施工特点,决定了钢管混凝土系杆拱桥独特的运营维护特点。运营维护过程中,在结构体系层面,应重点关注支座及连接构造;在结构构件层面,需要重点观察拱肋、系杆、吊杆及拱座。常见的钢管混凝土系杆拱桥病害有:支座老化或功能受限、主要构件之间的连接受损;钢管混凝土脱空、钢管与锚具锈蚀、吊杆断丝(尤其是短吊杆)、吊杆索力不均匀,系杆断裂、主拱拱脚截面开裂、桥面系开裂等。这些病害既涉及钢管混凝土、预应力混凝土、钢材等各种材料的常见病害,同时也涉及下承式拱桥、预应力混凝土梁桥等不同桥型结构的常见病害。因此钢管混凝土系杆拱桥的后期运营维护需综合借鉴预应力混凝土梁桥和拱桥、钢管混凝土结构、预应力混凝土结构和钢结构等多种结构的运营维护特点和养护经验,并重点追溯反馈设计阶段应特别关注的问题。

1.1.4.1 结构体系

钢管混凝土系杆拱桥结构体系层面在运营维护时,应重点关注支座及连接构造在使用过



程中可能存在的问题。

支座是重要的传力构件,钢管混凝土系杆拱桥常用的支座类型有盆式橡胶支座与钢支座等。盆式橡胶支座在使用过程中会出现橡胶老化、变质等现象,导致支座丧失自由伸缩变形的能力。而钢支座可能发生锈蚀,使得支座功能无法正常发挥。实际工程中也会出现因施工不当造成支座摆放位置错误或支座脱空等现象。支座在运营维护过程中一旦发现问题须及时维修更换,因此要求在设计中,支座位置应预留支座更换空间及相应的配套构造,从而保证结构体系的边界条件与设计要求相一致。

钢管混凝土系杆拱桥通过连接构件将拱肋、系杆、吊杆和横梁等构件连接在一起,连接构件损坏会造成不可挽回的后果。连接构件损坏主要出现在吊杆与系杆、拱肋与系杆、拱肋与横撑、拱肋与吊杆、吊杆与横梁、系杆与横梁、桥面系各部分之间等关键构件连接处,往往出现局部应力过大等问题,因此在设计、施工时应按照规范逐一进行验算。

由于焊接质量问题,焊缝处可能出现裂纹、未熔合、夹渣、未填满、弧坑等缺陷,并产生开裂、脱落、锈蚀,在应力集中处容易诱发疲劳裂纹。在多种因素作用下裂纹会迅速发展,如果处理不及时会危害到桥梁安全,因此应重视焊缝设计、施工及运营检查。

1.1.4.2 拱肋

钢管混凝土拱肋作为拱桥的主要承重构件,由钢管和内部的混凝土组成。钢管混凝土系杆拱桥拱肋为曲线,而且跨径大,限于施工工艺和质量的问题,会造成混凝土不密实、混凝土与钢管不能紧密结合、管内混凝土出现脱空现象等问题。由于钢管与混凝土的吸热、散热速度相差较大,昼夜温差大、气温变化大的季节会加速混凝土的收缩和徐变,增大钢管与混凝土之间的空隙。钢管混凝土拱内的主要脱空还可能分布在钢管腹板和下部圆管的结合处,泵送施工时出浆嘴处形成的空鼓、空隙也比较普遍,当锚垫板下配筋较密时也会出现局部混凝土不密实等问题。若混凝土配合比设计不合适,混凝土将严重收缩,钢管与混凝土的脱空现象也会更加明显。钢管胀裂也是钢管混凝土拱肋的一种常见病害。产生钢管胀裂的主要原因有:混凝土膨胀剂添加不均匀,导致局部混凝土膨胀剂过多或混凝土配合比不合理引起混凝土体积膨胀较大,造成钢管局部胀裂。因此在设计过程中应选取合理的混凝土配合比,并在施工过程中对混凝土充分搅拌且采取相应措施,避免钢管胀裂病害。

钢管涂层由于擦碰或施工质量问题,会出现表面龟裂、起皮、剥落等现象,导致钢管在雨水侵蚀下发生锈蚀。当钢管多处锈蚀成洞时,会对结构安全造成严重影响。因此,在设计阶段就应当重视涂装设计,施工阶段应严格按照设计要求对钢管进行防腐处理,运营过程中应按防腐设计技术条件定期更新涂装。

1.1.4.3 系杆

系杆是钢管混凝土系杆拱桥的生命线,承受与平衡钢管混凝土拱肋传来的所有水平推力,系杆的耐久性关系到钢管混凝土系杆拱桥的使用寿命。系杆主要存在钢绞线锈蚀、断裂和系杆预应力张拉力不均匀等病害。

系杆箱积水以及排水不畅会导致钢绞线腐蚀。另外,施工过程中系杆预应力张拉不足、预应力损失过大及保护层厚度不够也会引起系杆内侧出现较多裂缝,空气中二氧化碳、水等有害介质会通过空隙进入系杆,进而腐蚀预应力筋,降低系杆耐久性。因此,在系杆设计过程中应

合理设置通风和排水构造,保持系杆箱内干燥。

1.1.4.4 吊杆

钢管混凝土系杆拱桥吊杆系统包括上下锚头、索体以及吊杆防护装置。桥梁工程中,常见的吊杆防护方式有涂层防护、镀层防护和外裹防护(PE)。对于涂层防护,主要的病害有老化、涂层剥落和破损等。对于镀层防护,主要的病害有点蚀和撞击破坏等。对于外裹防护(PE),开裂破损的主要原因有:①外荷载超过护套的极限承载能力使护套破损;②在紫外线的照射、雨水冲淋及有害气体的腐蚀等环境作用下,护套老化,力学性能降低,当抗力低于荷载作用时护套开裂失效;③护套力学性能并没有降低,外荷载也低于极限荷载,但护套长期处于高应力状态下,而导致护套开裂;④施工对索体的保护措施不够,施工过程中造成对索体护套的损伤。若不及时处理,水沿开裂处进入吊杆内部,可能使吊杆钢丝束加速锈蚀,进而断裂,危及桥梁安全。另外,由于施工误差造成吊杆与锚固面不垂直,使得吊杆在锚固区承受较大剪切力,造成吊杆损伤。因此在设计过程中应对吊杆锚固区采取特殊构造措施,保证吊杆与锚固面垂直,避免吊杆发生损伤。

锚头防护历来是吊杆防护中的薄弱环节,吊杆锚端积水会造成钢丝大量锈蚀,容易引起钢丝的应力集中和脆性断裂。吊杆锚端积水的主要原因有:①某些桥梁的防水罩从设计到制造、安装均未达到防水的要求,防水罩失效,水直接沿索体进入预埋管内;②大多数桥梁施工过程中的防水与排水的措施不到位,造成预埋管积水;③桥梁预埋管太短,没有高于桥面,水直接流入预埋管造成积水;④冷凝水造成预埋管积水和潮湿度增加,下锚头保护罩内大量积水,会造成钢丝锈蚀破坏。针对吊杆锚头病害,应在设计过程中对钢套管及锚头进行排水构造设计,保持吊杆干燥,避免锈蚀破坏。

1.1.4.5 拱座

钢管混凝土系杆拱桥拱座是拱肋与系杆结合部位,承受拱肋与系杆的共同作用并同时承受支座的竖向反力,受力复杂,通常采用大体积混凝土作为钢管混凝土系杆拱座。混凝土开裂是拱座的常见病害,引起开裂的原因主要有:①混凝土的施工质量差,混凝土振捣不够密实;②大体积混凝土浇筑过程中水化热过大,造成混凝土开裂;③混凝土内外温差大,混凝土收缩产生拉应力引起开裂;④拱座在荷载的作用下,会使拱肋在拱脚处产生弯矩、剪力和轴力。如果拱座混凝土不能满足承载力要求,则容易造成混凝土的开裂起皮。因此在设计过程中应合理设置拱座截面构造形式与尺寸,保证拱座混凝土满足抗裂要求,并在施工过程中采取相应措施,避免混凝土产生裂缝。

1.2 技术标准与规范

截至目前,我国工程建设方面的技术标准与规范大致有4类:即国家、建设(勘察设计)协会、行业以及地方技术标准与规范,其中仅与桥梁设计相关的现行技术标准与规范就达百种以上。因此,进行桥梁结构设计时,应根据桥型特点选择密切相关、必不可少的技术标准与规范。

钢管混凝土系杆拱桥主要构件中的拱肋为钢混组合结构,以承压为主;吊杆、系杆和横梁



多数采用钢绞线或预应力混凝土结构。根据钢管混凝土系杆拱桥的复合材料特点、组合结构特点、力学性能特点、施工技术特点以及运营维护特点,进行钢管混凝土系杆拱桥设计时,所涉及的技术标准与规范应当包括:《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)、《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)、《钢管混凝土结构设计与施工规范》(CECS 28:2012)、《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)以及《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)。这些规范制定背景不同,对各构件的计算规定也有所差异,且均未明确针对钢管混凝土系杆拱桥设计做出具体、全面而系统的规定。故本书以“精心选用、正确使用、合理补充、科学完善”为基本原则,着力构建明确的钢管混凝土系杆拱桥设计方法体系。其中,“精心选用”与“正确使用”均以现行规范为基础,“合理补充”与“科学完善”则通过作者完成的江苏省交通运输科技项目“整体吊装组合吊杆钢管混凝土系杆拱桥设计与施工技术研究”(2015T19),以及交通运输部重大专项“桥梁耐久性关键技术研究”(200631822302)的成果应用来实现。

钢管混凝土系杆拱桥的设计重点涉及作用与作用效应组合、截面刚度取值、极限承载力的计算、应力验算、温度效应的计算、收缩徐变作用和汽车荷载冲击系数等问题。由于不同规范对这些设计内容的规定存在较大的差异,本节将对相关规范进行分析比对,以便充分发挥各规范所长,补充不足,更加科学合理地对钢管混凝土系杆拱桥进行设计计算。

1.2.1 作用与作用效应组合

《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)第4.2.1条和《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)第4.2.1条均规定,钢管混凝土拱桥有关作用的分类、组合及结构重要性系数,应符合现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)的规定。

新版通用规范(JTG D60—2015)相比于旧版通用规范(JTG D60—2004),对作用与作用效应组合部分进行了较大的修订。旧版通用规范(JTG D60—2004)对“作用效应”进行组合,而新版通用规范(JTG D60—2015)先对“作用”进行组合,再计算作用效应。虽然新版通用规范与旧版区别较大,但与新版通用规范匹配的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》还未发布,在对钢管混凝土系杆拱桥中的混凝土和预应力混凝土构件进行相关设计计算时,仍需使用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)。考虑到新版规范体系并不完备,故本书作用与作用效应组合的内容仍采用通用规范(JTG D60—2004)的相关规定进行计算。

1.2.2 刚度取值

1.2.2.1 拱肋

钢管混凝土系杆拱桥是外部静定、内部超静定结构,其截面特性会影响到内力、变形和稳定计算结果。在施工过程中,对于由多根钢管组成的拱肋,一般情况下管内混凝土是逐根灌注的,为了缩短工期,通常前面一根管内混凝土强度达到90%左右就开始灌注下一根,因此施工过程中管内混凝土的刚度取值会影响到钢管与管内混凝土的应力分配,也影响到施工过程的