

# 桥梁施工 控制技术

向中富  
编著



QIAOLIANG SHIGONG  
KONGZHI JISHU

人民交通出版社

# 桥梁施工控制技术

Qiaoliang Shigong Kongzhi Jishu

向中富 编 著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书共分十章,主要介绍桥梁施工控制技术在桥梁施工中的作用及发展情况,桥梁施工控制的理论与方法,几种主要类型桥梁的施工控制特点、方法与实例。

本书可供桥梁工程设计、施工、监理、控制等技术人员参考,亦可作为桥梁工程专业研究生以及土木工程专业高年级本科生的学习参考书或教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

桥梁施工控制技术 / 向中富编著. —北京:人民交通出版社, 2001

ISBN 7-114-03857-7

I. 桥... II. 向... III. 桥梁工程-工程施工-控制方法 IV. U445.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 11239 号

### 桥梁施工控制技术

向中富 编 著

正文设计:彭小秋 责任校对:宿秀英 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×1092  $\frac{1}{16}$  印张:19.75 字数:493 千

2001 年 5 月 第 1 版

2001 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001~5000 册 定价:39.00 元

ISBN 7-114-03857-7

U · 02800

## 前 言

桥梁施工是桥梁建设的关键环节,桥梁施工技术的高低则直接影响桥梁建设的发展。桥梁施工技术包括施工设计计算、施工方法、手段与工艺、施工控制等内容。以往,在桥梁施工技术中并未突出施工控制的内容,甚至没有提到“施工控制”。而事实上,施工控制是施工技术的重要组成部分,并始终贯穿于桥梁施工中。施工控制在施工技术中未被重视的原因是由于过去所建桥梁一般跨径不大、规模较小、影响因素少等,因为施工控制不力而产生的不良后果也就不明显,从而使人们忽视了它的重要性。

随着交通事业发展的需要,桥梁建设任务将更加艰巨,施工难度越来越大。事实上,任何桥梁施工,特别是大跨径桥梁的施工,都是一个系统工程。在该系统中,设计图纸要求是施工的目标,在为实现设计目标而必须经历的施工过程中,将受到许许多多确定和不确定因素(误差)的影响,如何从各种失真的结构参数中找出相对真实之值,对施工状态进行实时识别(监测)、调整(纠偏)、预测,使施工系统处于控制之中,对设计目标安全、顺利实现是至关重要的。在近年来的桥梁建设中,人们已普遍认识到施工控制在施工技术中的重要地位与作用,并在许多桥梁施工中实施了控制,取得了良好效果。目前专门论述桥梁施工技术的书籍并不多见,本书是在对国内众多桥梁施工控制研究、实践以及本院近几年来施工控制工作基础上完成的。

全书共分十章。

第一章“概述”,主要介绍桥梁建设情况及发展趋势、桥梁施工控制技术在桥梁施工中的重要性。

第二章“桥梁施工与施工控制”,回顾了常见桥梁的施工方法与需注意的问题;介绍了桥梁施工控制的任务与工作内容;简述了桥梁施工控制的发展情况。

第三章“桥梁施工控制系统与方法”,主要介绍桥梁施工控制方法、影响因素、控制系统建立、实施方案编制。

第四章“桥梁施工控制结构分析”,重点介绍桥梁施工控制中施工过程模拟结构分析方法(包括正装法、倒装法、无应力状态法)以及结构分析中对有关问题的考虑。

第五章“桥梁施工控制误差分析、参数识别与状态预测”,主要介绍桥梁施工误差分析、参数识别以及状态预测的方法,着重介绍了 Kalman 滤波法、灰色理论法和最小二乘法。

第六章“桥梁施工监测”,施工监测在施工控制中占有非常重要的地位,主要介绍了桥梁施工监测的主要内容与方法。

第七章“梁式桥梁施工控制”,主要介绍了顶推施工的连续梁桥以及悬臂施工的连续梁(刚构)桥的施工控制特点,给出了施工控制实例(重庆黄花园大桥)。

第八章“拱式桥梁施工控制”,着重介绍拱式桥梁施工控制特点、目标、内容与方法,给出了施工控制实例(重庆万县长江大桥)。

第九章“斜拉桥施工控制”,首先介绍了斜拉桥施工控制的重要性及其施工控制技术的发展情况,然后就斜拉桥施工计算分析理论、施工控制方法进行论述,最后给出了施工控制实例(温州大桥)。

第十章“悬索桥施工控制”,阐述了悬索桥施工控制工作内容、施工控制方法、施工控制结构分析方法、索股线形控制,给出了施工控制实例(广东虎门大桥)。

本书第四章由张永水、向中富编写,第五章由张永水编写;第七章第三节例二由王银辉编写;第九章第四节例一引用文献[8]的示例;其余由向中富编写。全书由向中富统编。

在编写过程中得到了顾安邦教授、徐君兰教授的关心、支持与帮助,特别是顾安邦教授在百忙之中审阅了全书并提出了宝贵意见,人民交通出版社孙玺等同志为该书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心感谢。

由于作者拥有资料及水平有限,编写时间紧迫,书中定有缺点与错误,恳请读者批评指正。

作 者

2000 年 12 月于重庆交通学院

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第一章 绪论</b> .....          | 1  |
| 第一节 桥梁工程建设情况与发展趋势.....       | 1  |
| 第二节 桥梁建设与施工技术.....           | 3  |
| 第三节 桥梁施工技术与施工控制.....         | 3  |
| <b>第二章 桥梁施工与施工控制</b> .....   | 5  |
| 第一节 桥梁施工方法发展回顾.....          | 5  |
| 第二节 桥梁施工方法及施工中需注意的问题.....    | 5  |
| 一、梁式桥梁 .....                 | 5  |
| 二、拱式桥梁 .....                 | 8  |
| 三、斜拉桥 .....                  | 13 |
| 四、悬索桥 .....                  | 14 |
| 第三节 桥梁施工控制的任务与工作内容 .....     | 15 |
| 一、几何(变形)控制 .....             | 15 |
| 二、应力控制 .....                 | 16 |
| 三、稳定控制 .....                 | 17 |
| 四、安全控制 .....                 | 17 |
| 第四节 桥梁施工控制与桥梁施工质量控制的关系 ..... | 17 |
| 第五节 桥梁施工控制的发展 .....          | 18 |
| 一、桥梁施工控制的起因 .....            | 18 |
| 二、桥梁施工控制技术的发展 .....          | 19 |
| <b>第三章 桥梁施工控制系统与方法</b> ..... | 20 |
| 第一节 现代控制论简介 .....            | 20 |
| 一、控制论的发展 .....               | 20 |
| 二、现代控制理论与方法 .....            | 21 |
| 三、现代控制论与桥梁施工控制 .....         | 26 |
| 第二节 桥梁施工控制方法 .....           | 26 |
| 第三节 影响桥梁施工控制的因素 .....        | 28 |
| 第四节 桥梁施工控制系统 .....           | 29 |
| 一、施工控制管理分系统 .....            | 30 |
| 二、施工现场(微机)控制分系统 .....        | 31 |
| 三、结构状态监测分系统 .....            | 33 |
| 第五节 桥梁施工控制实施方案编制 .....       | 33 |
| <b>第四章 桥梁施工控制结构分析</b> .....  | 41 |
| 第一节 概述 .....                 | 41 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第二节 桥梁施工过程模拟分析方法 .....           | 42  |
| 一、正装计算法 .....                    | 42  |
| 二、倒装计算法 .....                    | 43  |
| 三、无应力状态法 .....                   | 45  |
| 第三节 桥梁施工控制结构分析方法 .....           | 45  |
| 一、有限元法 .....                     | 45  |
| 二、解析法 .....                      | 53  |
| 第四节 桥梁施工控制结构分析需考虑的有关问题 .....     | 53  |
| 一、正装法计算中需考虑的问题 .....             | 53  |
| 二、倒装法计算中需考虑的问题 .....             | 65  |
| 第五章 桥梁施工控制中的误差分析、参数识别与状态预测 ..... | 69  |
| 第一节 施工控制误差分析 .....               | 69  |
| 第二节 参数识别的内容与方法 .....             | 70  |
| 一、引起结构状态偏差的设计参数 .....            | 70  |
| 二、设计参数的敏感性分析 .....               | 71  |
| 三、主要设计参数的估计和修正 .....             | 72  |
| 第三节 状态预测方法 .....                 | 72  |
| 一、卡尔曼(Kalman)滤波法 .....           | 72  |
| 二、灰色系统理论法 .....                  | 88  |
| 三、最小二乘法 .....                    | 103 |
| 第六章 桥梁施工监测 .....                 | 117 |
| 第一节 概述 .....                     | 117 |
| 第二节 施工监测系统的建立 .....              | 117 |
| 第三节 施工监测方法 .....                 | 118 |
| 一、几何形态监测 .....                   | 118 |
| 二、应力监测 .....                     | 130 |
| 三、索力监测 .....                     | 133 |
| 四、预应力监测 .....                    | 139 |
| 五、温度监测 .....                     | 139 |
| 六、桥梁施工远程监测 .....                 | 140 |
| 第七章 梁式桥梁施工控制 .....               | 143 |
| 第一节 连续梁桥顶推施工控制 .....             | 143 |
| 一、顶推过程模拟结构分析 .....               | 143 |
| 二、顶推施工监测 .....                   | 143 |
| 三、顶推落梁控制 .....                   | 144 |
| 第二节 预应力混凝土连续梁桥、连续刚构桥悬臂施工控制 ..... | 145 |
| 一、连续梁桥、连续刚构桥施工控制的目的、内容 .....     | 145 |
| 二、施工控制结构分析(计算) .....             | 146 |
| 三、施工控制监测 .....                   | 150 |
| 四、施工控制的理论与方法 .....               | 151 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第三节 梁桥施工控制实例 .....              | 152 |
| 一、重庆黄花园大桥施工控制 .....             | 152 |
| 二、重庆万州大桥(全焊钢管空间桁架)的顶推施工控制 ..... | 166 |
| 第八章 拱式桥梁施工控制 .....              | 172 |
| 第一节 拱式桥梁施工控制特点 .....            | 172 |
| 第二节 拱式桥梁的施工控制目标、内容与方法 .....     | 173 |
| 一、外置式拱架施工 .....                 | 173 |
| 二、劲性骨架施工 .....                  | 173 |
| 三、预制吊装施工 .....                  | 177 |
| 四、悬臂施工 .....                    | 178 |
| 第三节 拱桥施工控制实例 .....              | 181 |
| 一、重庆万县长江大桥施工控制 .....            | 181 |
| 二、洛一三高速公路许沟特大桥施工监测与控制实施方案 ..... | 198 |
| 第九章 斜拉桥施工控制 .....               | 205 |
| 第一节 概述 .....                    | 205 |
| 第二节 斜拉桥施工理论分析 .....             | 207 |
| 一、施工计算的一般原则 .....               | 207 |
| 二、施工阶段计算模型 .....                | 208 |
| 三、几何非线性与二次效应问题 .....            | 209 |
| 四、施工阶段计算荷载 .....                | 211 |
| 五、斜拉桥施工控制模拟分析方法 .....           | 212 |
| 第三节 斜拉桥施工控制方法 .....             | 213 |
| 一、斜拉桥施工控制系统 .....               | 213 |
| 二、斜拉桥施工控制的目的、内容与原则 .....        | 213 |
| 三、斜拉桥施工监测 .....                 | 215 |
| 四、斜拉桥施工控制方法 .....               | 220 |
| 第四节 斜拉桥施工控制实例 .....             | 226 |
| 一、温州大桥施工控制 .....                | 226 |
| 二、日本东神户大桥上部结构架设精度控制简介 .....     | 242 |
| 三、荆州长江公路大桥(混凝土斜拉桥)施工控制方案 .....  | 247 |
| 第十章 悬索桥施工控制 .....               | 256 |
| 第一节 概述 .....                    | 256 |
| 第二节 悬索桥施工控制工作内容 .....           | 256 |
| 第三节 悬索桥施工控制方法 .....             | 265 |
| 一、建立结构系统状态方程 .....              | 265 |
| 二、建立测量方程 .....                  | 266 |
| 三、定义控制指标 .....                  | 267 |
| 四、建立最优随机控制过程 .....              | 268 |
| 第四节 悬索桥施工控制模拟结构分析 .....         | 269 |
| 一、有限元法 .....                    | 269 |



|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 二、解析法 .....                 | 279 |
| 第五节 索股线形控制 .....            | 285 |
| 一、索股线形监控条件 .....            | 286 |
| 二、索股绝对标高的调整 .....           | 286 |
| 三、索股相对标高的调整 .....           | 291 |
| 四、索股锚跨张力调整 .....            | 293 |
| 五、索股调整精度标准 .....            | 294 |
| 第六节 悬索桥施工控制实例(广东虎门大桥) ..... | 294 |
| 一、工程概况 .....                | 294 |
| 二、施工控制的主要内容 .....           | 294 |
| 三、施工控制的目标与任务 .....          | 297 |
| 四、施工控制准备 .....              | 298 |
| 五、施工控制系统 .....              | 299 |
| 六、施工控制实施 .....              | 301 |
| 主要参考文献 .....                | 306 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 桥梁工程建设情况与发展趋势

桥梁工程为土木工程的重要组成部分,其功能除主要为道路交通需要而跨越河流、峡谷、海域等天然障碍,变天堑为通途外,它也是城市基础设施建设的重要内容。

桥梁工程的发展经历了一个漫长的历史过程。与其他工程建设事业的发展一样,桥梁工程在其发展过程中,无不受到各发展阶段当时的桥梁设计理论、桥用材料和施工技术发展水平的制约,特别是在桥梁的跨越能力上受到的制约更为明显。在历史即将跨入 21 世纪的今天,桥梁工程事业随着整个科学技术水平的提高而得到了迅猛发展。

在基础理论方面,通过大量的研究与实践,人们对桥梁结构的基本理论、结构机理、受力性能等有了更为深入的认识,已基本具备了解决包括大型、超大型、复杂桥梁在内的桥梁设计中的一般理论问题的能力,为桥梁事业的进一步发展奠定了理论基础;在桥用材料的开发利用方面取得了丰硕成果,大量的轻质、高强材料在桥梁上得到了应用,为提高建桥水平提供了物质条件;在桥梁施工技术水平的提高方面取得了突破性进展,不同的适用于各种桥梁结构的先进施工技术应运而生,为现代桥梁的建设提供了可靠的施工手段。

桥梁跨越能力是体现桥梁建设水平的重要指标,下面就从跨径方面谈谈桥梁的发展情况。

梁式桥梁在桥梁建设中占有主导地位。在 19 世纪后期,由于钢筋混凝土和预应力混凝土技术还未发展起来,国外在钢桥方面发展较快,1873 年就建成了世界最大跨径的钢连续桥梁(跨径为 227m)。目前世界最大跨径的钢连续桥要数 1917 年建成的加拿大魁北克桥,其跨径达 549m。我国在 1957 年建成了跨径为 128m 的武汉长江大桥,1993 年建成的九江长江大桥(钢桁梁与钢拱组合体系),其跨径也达到了 216m。跨径达 120m 的钢管桁梁桥正在建设中(重庆万州)。随着 20 世纪初钢筋混凝土与预应力混凝土技术的兴起,混凝土梁式桥得到了突飞猛进的发展。目前世界最大跨径预应力混凝土简支梁桥是 1977 年建成的奥地利阿尔姆桥,跨径为 76m;最大跨径的预应力混凝土连续梁桥则已在葡萄牙建成,跨径为 250m;最大跨径的预应力混凝土连续刚构桥是 1999 年建成的挪威 Raft Sundet 桥,跨径为 298m。我国在钢筋混凝土梁式桥方面虽起步较晚,但发展也很快,目前已广泛使用于大中型桥梁上。最大跨径的预应力混凝土简支梁桥于 1985 年在浙江飞云江建成,跨径为 62m;在建中的南京长江第二大桥北汉桥采用预应力混凝土连续梁,其跨径已达到 165m;跨径为 270m 的连续刚构桥——虎门辅航道桥已于 1997 年建成。

拱式桥梁在桥梁建设中占有重要地位。中国一直在石拱桥建设技术上领先于世界,自 1959 年建成主跨为 60m 的湖南黄虎港大桥而打破赵州桥保持的石拱桥最大跨径历史纪录以来,其跨越能力不断提高。1990 年就建成了世界最大跨径的石拱桥——湖南凤凰鸟巢桥,其

跨径为 120m。目前,世界更大跨径的石拱桥—跨径达 146m 的山西晋城丹河大桥已经建成,它为世界石拱桥的建设史写下了最为光辉灿烂的篇章。钢筋混凝土拱桥在国外发展较早,1930 年在法国建成的博浪加斯脱桥,其跨径就达 186m。1979 年又建成了当时世界第一并保持了近 20 年世界纪录的南斯拉夫克拉克桥,跨径为 390m。我国的钢筋混凝土拱桥建设起步虽晚,但发展很快,形式多样,数量惊人,现已处于世界领先水平。1995 年建成的跨径为 330m 的贵州江界河大桥(预应力混凝土桁式组合拱桥)和 1997 年建成的跨径达 420m 的重庆万县长江大桥(钢管混凝土劲性骨架上承式箱板拱桥)均居同类桥梁世界第一位。自 1990 年我国第一座钢管混凝土拱桥—115m 跨径的四川旺苍东河桥建成以来,钢管混凝土拱桥以其材料和施工方面的独特优势得到了广泛应用。主跨 360m 的广州丫髻沙钢管混凝土中承飞燕式拱桥已建成通车,跨径预计在 460m 左右的钢管混凝土拱桥——重庆巫山长江大桥已在设计中。在钢拱桥方面,国外发展较早,早在 1932 年就建成了跨径为 503m 的公铁两用钢桁架拱桥(澳大利亚),我国在 20 世纪 60 年代末也建成了一批钢拱桥,跨径达到 180m。其后由于材料供应方面的原因而未得到更大的发展。目前世界最大跨径的钢拱桥当属跨径为 518m 的美国新河桥。

自 1955 年世界上第一座现代斜拉桥——跨径 182.6m 的瑞典斯特罗姆海峡钢斜拉桥建成以来,斜拉桥得到了快速发展。1991 年建成的挪威斯卡思圣特桥,跨径为 530m,至今仍保持世界最大跨径混凝土斜拉桥的纪录。而 1995 年建成的法国诺曼底桥采用钢质中孔和钢筋混凝土边孔的混合结构,其跨径达到了 856m,日本在建的 890m 多多罗钢斜拉桥则将雄居世界钢斜拉桥榜首。在我国,虽然斜拉桥在 1975 年才开始试建造,但在过去的 20 多年里,斜拉桥建设高潮迭起,其建设水平已开始步入世界先进行列,不但在数量上已成为建造斜拉桥最多的国家,在结合梁斜拉桥方面,跨径为 602m 的上海杨浦大桥仍居世界首位。在建中的跨径为 628m 的南京长江二桥届时将摘取同类斜拉桥桂冠。

悬索桥(吊桥)是能充分发挥高强钢材优越性的独特桥型。美国早在 1937 年就利用近代吊桥技术建成了主跨达 1280m 的金门大桥;1981 年英国建成了跨径为 1410m 的享伯尔桥,并成为世界最大跨径的桥梁。而今,世界桥梁之王则非刚建成的跨径为 1990m 的日本明石海峡桥莫属。在中国,现代吊桥建设发展相对较慢,直到 20 世纪 90 年代初,公路吊桥的跨径也不超过 200m,但在近十年里,我国吊桥建设发展速度可谓惊人,1999 年建成的跨径为 1385m 的江苏江阴长江大桥已居世界第四位。

从以上可见,不论是国外还是国内,在桥梁建设上都取得了可喜成绩,技术水平已达到了相当的程度。是否可以说桥梁建设事业的发展已无太大空间了?已不存在更多的问题需要解决了?答案是否定的。随着社会、经济的发展需要,将有更多的、规模更大的、跨径更大的桥梁等待建设。在中国,以高速公路为主的五纵七横国道主干线将在 21 世纪初基本形成,各省级干线路网技术标准也将明显提高,跨越江河、深谷、海峡等的大量桥梁需要建设,桥梁建设必将以较高速度持续发展。建设任务十分艰巨,其中不仅数量多,而且桥梁的规模、跨径将越来越大,技术要求将越来越高。仅就上述五纵七横中的同(江)—三(亚)线上就拟建 5 个跨海工程,其中包括跨越渤海湾、杭州湾、琼州海峡等的特(超)大型桥梁需要建设。根据需要和技术水平的提高,桥梁在跨越能力方面将有更大的发展。桥梁结构体系将还有新的发展,深水基础将越来越多。为适应桥梁建设的发展需要,不论在桥梁设计理论上、桥用材料上,还是在施工技术上都需作更深入的研究和提高。特别对我国来讲,桥梁建设的总体水平与国外的差距还不小,有待桥梁建设者的继续努力。

## 第二节 桥梁建设与施工技术

建设一座桥梁通常要经过规划、工程可行性研究、勘测设计和施工等阶段。施工是具体体现桥梁规划、设计思想和意图的一个过程,其最终目的是建设一个既满足交通需要,又能作为一种空间艺术品(结构)存在于社会之中的工程实体,而施工技术无论是在设计阶段还是在施工阶段都起着非常重要的作用。

在科学技术高速发展的今天,虽然在一般情况下桥梁结构理论分析和受力计算上都不存在什么问题,但桥梁设计者的设计意图能否真正得以实现往往还取决于施工技术,有些时候还由于施工技术的限制而直接影响桥梁建设的发展,因此,高水平的桥梁设计必须要有高水平的桥梁施工技术来支持,桥梁建设事业的发展依赖于桥梁施工技术的发展。

另一方面,桥梁施工技术的发展为实现桥梁设计意图提供了灵活多样的手段,为增大桥梁跨越能力、新型桥梁结构体系的开发、新型材料的应用、成桥状态受力与线形的改善、工程质量的提高、建设工期的缩短和工程造价的降低等提供了充分的条件和技术保障。所以,要提高桥梁建设水平,就必须提高其施工技术水平。

## 第三节 桥梁施工技术与施工控制

桥梁施工技术包含施工设计计算、施工方法、手段与工艺、施工控制等内容。以往,在桥梁施工技术中并未突出施工控制的内容,甚至没有提到“施工控制”。而事实上,施工控制是施工技术的重要组成部分,并始终贯穿于桥梁施工中。施工控制在施工技术中未被重视的原因是由于过去所建桥梁一般跨径不大,规模较小,影响因素少等,因为施工控制不力而产生的不良后果也就不明显,从而使人们忽视了它的重要性。

随着交通事业发展需要,大量的公路需要建设,桥梁作为公路的咽喉工程,其建设任务更加艰巨。从过去十年我国的交通建设中就可以看出桥梁建设的艰辛。事实上,任何桥梁施工,特别是大跨径桥梁的施工,都是一个系统工程。在该系统中,设计图只是目标,而在自开工到竣工整个为实现设计目标而必须经历的过程中,将受到许许多多确定和不确定因素(误差)的影响,包括设计计算、桥用材料性能、施工精度、荷载、大气温度等诸多方面在理想状态与实际状态之间存在的差异,施工中如何从各种受误差影响而失真的参数中找出相对真实之值,对施工状态进行实时识别(监测)、调整(纠偏)、预测,对设计目标的实现是至关重要的。上述工作一般需以现代控制论为理论基础来进行,所以称之为施工控制。在近年来的桥梁建设中,人们已普遍认识到施工控制在施工技术中的重要地位与作用。实际上,桥梁施工控制早在以前的施工过程中就已被人们采用,如在施工中为了保证桥梁建成时的线形符合设计要求,在有支架施工时总是要在支架上设置预拱度;在悬臂施工中总是要使施工节段的立模(或安装)标高高于设计标高一定数值,这实质上就是在对施工实施控制,这些处理的好坏常常被看作是施工技术水平高低的体现。

桥梁施工控制不仅是桥梁施工技术的重要组成部分,而且也是实施难度相对较大的部分。对不同体系、不同施工方法、不同材料等的桥梁,其施工控制技术要求也不一样。以钢桁梁的悬臂架设为例,为使最终满足设计标高,通常采用预设拱度的方法来解决,即将先架设的节点预先抬高来考虑后架设节段的影响。由于钢材的匀质性和制造尺寸的准确性,预设拱度方法在钢桁梁悬臂拼装过程中是较为成功的方法。但是,对于同样采用悬臂法施工的混凝土桥梁

就不那么简单。因为混凝土桥梁除了本身材料的非匀质和材料特性的不稳定外,它还要受温度、湿度、时间等因素的影响,加上采用悬臂施工这种自架设体系施工方法,各节段混凝土或各层混凝土相互影响,且这种相互影响又有差异,这就必然造成各节段或层的内力和位移随着混凝土浇筑或块件拼装过程变化而偏离设计值的现象,甚至出现超过设计允许的内力和位移。对这种情况,若不通过有效的施工控制及时发现、及时调整,就势必造成成桥状态的线形与内力不符合设计要求或在施工过程中结构的破坏。

桥梁施工控制是确保桥梁施工宏观质量的关键。衡量一座桥梁的施工宏观质量标准就是其成桥状态的线形以及受力情况符合设计要求。对于桥梁的下部结构,只要基础埋置深度和尺寸以及墩台尺寸准确就能达到标准要求,且容易检查和控制。而对采用多工序、多阶段施工的桥梁上部结构,要求结构内力和标高的最终状态符合设计要求,就不那么容易了。比如预应力混凝土刚构桥和斜拉桥在悬臂安装 1 号块件时,如预抛高设置不准,可能影响到以后各节段和合拢标高以及全桥的线形。斜拉桥除了主梁的混凝土浇筑或预制块件悬臂拼装中要考虑预抛高而使主梁标高符合设计要求外,还要求在斜拉桥建成时斜拉索的内力也达到设计要求,否则,斜拉索受力不均将影响斜拉桥的使用寿命。因为,斜拉桥是多次超静定结构,在施工过程中主梁标高的调整将影响到斜拉索的内力,某根斜拉索内力的调整又影响到主梁标高和邻近斜拉索的内力,这说明斜拉桥比混凝土刚构桥更加复杂。为确保桥梁施工质量,对施工过程进行控制是必不可少的。目前我国计算机的应用已非常普遍,技术人员完全可以对多阶段、多程序的自架设体系施工方法进行模拟,可预先计算出各阶段内力和位移,称之为预计值。将施工中的实测值与预计值进行比较,若有误差可以进行调整,直到达到最满意的设计状态。也就是通过施工控制,使各阶段内力和变形达到预计值,最终达到设计要求,确保建桥的施工质量。我国借鉴国外的经验,从建设第一座斜拉桥起,就注意施工过程控制的重要性。只是在对这个问题的解决上还存在差异,有个别斜拉桥施工完成后线形不够理想。比如有座跨径组合为 210m+200m 的单塔单索面混凝土斜拉桥,在施工中采用劲性骨架悬臂浇筑主梁的施工方法,浇筑主梁时通过水箱放水减载与浇筑的混凝土重量相平衡,以此保持设计线形(设计标高),理论上是完善的,但由于主梁分边箱和中箱两次浇筑,施工工序除纵向分节段外,横向又分两次完成,工序太多,不容易控制,所以造成该桥完工后,主梁外观呈波浪形,在桥面行车时更为明显,不但影响行车舒适,也留下外观缺憾。而各斜拉索受力是否符合设计要求,也难以确定。这就再次说明,为了建成质量高、外形美的桥梁,施工控制是绝不可少的。

桥梁施工控制又是桥梁建设的安全保证。为了安全可靠地建好每座桥,施工控制将变得非常重要。因为每种体系的桥梁所采用的施工方法均按预定的程序进行,施工中的每一阶段,结构的内力和变形是可以预计的,同时可通过监测得到各施工阶段结构的实际内力和变形,从而完全可以跟踪掌握施工进度和发展情况。当发现施工过程中监测的实际值与计算的预计值相差过大时,就要进行检查和原因分析,而不能再继续进行施工,否则,将可能出现事故。这方面实例太多,例如,跨径 548.64m 的加拿大魁北克桥就是因为在施工中两次发生事故而闻名于世的。该桥采用悬臂拼装法施工,当南侧锚碇桁架快架完时,突然崩塌坠落。原因是悬出的桁架太长(悬臂长 176.8m),靠近中间墩处的下弦杆受力过大,致使下弦杆腹板失去稳定而引起全桁架严重破坏。尽管造成事故的原因是设计问题,若当时采用了施工控制手段,在内力较大的杆件中布置监测点,当发现异常现象时,及时停工检查,就不会发生突然崩塌坠落事故。由此可知,为避免突发事件的出现,按期、安全地建成一座桥梁,施工控制是有力的保证。换句话说,桥梁施工控制系统也就是桥梁建设的安全系统。

## 第二章 桥梁施工与施工控制

### 第一节 桥梁施工方法发展回顾

19 世纪中期以前,桥梁一般采用有支架施工。有支架施工是在桥跨位置架设支架,在支架上拼装主梁或浇筑混凝土主梁。整个施工过程中,主梁处于无应力状态。对桥梁的主梁来说,有支架施工是最简单、最可靠的施工方法。但随着科学技术的发展,桥梁跨度不断增大,尤其对跨越大江、大河和深谷的桥梁,若仍然采用有支架的施工方法,将变得非常困难,甚至是不可能的。随着钢铁工业的发展,19 世纪中期,美国等国家修建了为数不多的连续桁梁。但是,在建设和使用过程中,由于温度变化、墩台沉陷等的影响,尤其是多次超静定结构,在当时设计手段落后的情况下,深感设计理论的复杂。由此,连续钢桁梁的应用受到一定的影响。后来在连续中采用了铰构造,把连续桁梁转化为静定的悬臂桁梁,从此,悬臂桁梁获得广泛的采用。悬臂桁梁的出现不仅解决了当时设计上的困难,在施工中,采用悬臂法架设桁梁,其施工阶段的应力状态与营运阶段的应力状态一致,给悬臂施工即无支架施工方法提供了有力的依据,使无支架施工方法得以广泛采用。与此同时,悬索桥以它固有的特点,使它在 19 世纪及 20 世纪中期成为大跨度桥梁采用的唯一桥型。当时美国修建的悬索桥数量最多,其中以最早修建的(1883 年完工)跨径 486m 的纽约勃罗克林桥最为有名。悬索桥的修建,使得最典型、最完善的无支架施工法得以广泛采用与发展。它给了工程界缆索吊机施工方法以很大的启发,以致长达 100 多年以来,缆索吊机始终为一个完善、可靠的主要吊装工具,并成功地应用于梁桥、拱桥的无支架施工中。应该特别提出的是,在拱桥无支架施工中,常采用多拱段吊装安装拱圈。为了能够临时固定未合拢的各拱段,法国工程师首先采用扣索临时扣挂各拱段的方法,使无支架吊装拱桥的施工方法更加完善,一直沿用至今。20 世纪 70 年代,随着预应力混凝土工艺的完善,尤其是后张学会于 1976 年的成立,使用于桥梁上的预应力混凝土工艺更加成熟。德国工程师率先采用悬臂浇筑混凝土法修建预应力混凝土连续梁桥,为至今仍然采用的悬臂浇筑混凝土连续梁、T 型刚构、连续刚构、斜拉桥等无支架(自架设)施工方法奠定了基础。无支架施工方法的采用,促进了桥梁(特别是大跨径桥梁)的建设与发展。

### 第二节 桥梁施工方法及施工中需注意的问题

#### 一、梁式桥梁

##### (一) 简支梁(板)桥

简支梁(板)桥在小跨径桥梁中广泛采用,其施工方法主要有支架现浇和预制安装两种。

支架现浇法是指在桥跨间设置支架、安装模板、绑扎钢筋、现场浇注混凝土的施工方法。采用这种方法施工时,要特别注意支架的强度、刚度和稳定性(包括局部和整体稳定)问题,支架地基可靠、浇注顺序合理、预应力(如果为预应力混凝土梁板桥)张拉控制有效等技术问题。

预制安装法主要用于预应力混凝土梁(板)桥施工,安装方法较多,根据实际情况可采用自行式吊车安装、跨墩龙门架安装、架桥机安装、扒杆安装、浮吊安装等。这种桥梁施工中关键是控制好预制精度、预应力体系的建立、预拱度的设置,避免梁体在预制时由于张拉不当引起的开裂,对架桥机等安装设备的强度、刚度和稳定予以重视。

## (二) 等截面连续梁(板)桥

在中小跨径的桥梁(特别是立交桥)中采用等截面连续梁(板)桥较多。其施工方法包括:

### 1. 逐孔现浇法

逐孔现浇法又分为在支架上逐孔现浇和移动模架逐孔现浇两种。现浇法与前述简支梁(板)桥现浇不同处仅在于只需在一孔(或两孔)间设置支架。施工中同样要注意支架或模架的强度、刚度与稳定。另外,对不断进行的体系转换(施工接头位于跨间,连续孔数逐渐增多)时的结构受力与变形要特别注意。

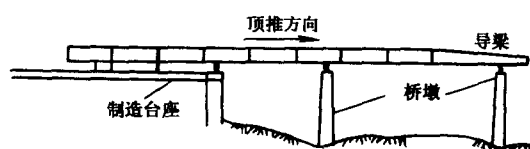
### 2. 先简支后连续法

这种施工与简支梁预制安装施工相似,但桥面系施工往往在已成的连续体系上进行,需注意梁体的受力变化。

### 3. 顶推法

顶推法是指在桥台后平台上预制梁体,逐节向前推出,如图 2-1。这种桥梁施工的关键包

短跨径情况



长跨径情况

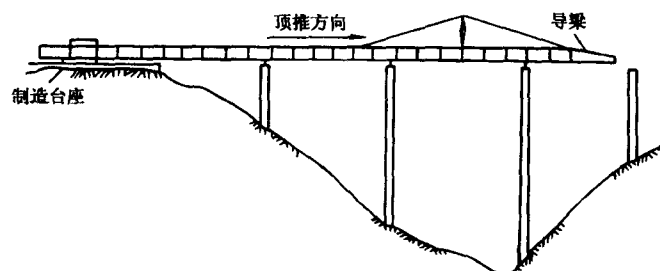
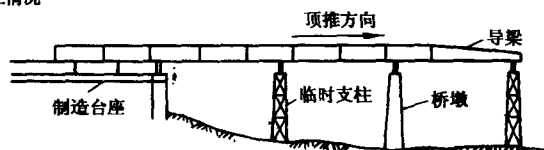


图 2-1 顶推法施工示意

括:梁体预制精度(特别是梁体底面平整度)、顶推同步、临时支墩(如果有)的变形、梁体在顶推

过程中的内力、挠度变化等。

### (三) 预应力混凝土变截面连续梁桥

变截面连续梁桥主要用于大中跨径连续梁桥,常用施工方法有:

#### 1. 支架现浇法

支架现浇法适用于旱地且跨径不太大的桥梁,施工中支架的安全、变形等是必须引起重视的问题。

#### 2. 悬臂施工法

悬臂施工法是大跨径连续梁桥常用的施工方法,属于一种自架设方式,分为悬臂拼装与悬臂浇筑两种,如图 2-2。

悬臂拼装指在预制场预制梁节段,然后进行逐节对称拼装。拼装方法主要有扒杆吊装法、缆索吊装法、提升法等。

悬臂浇筑法则是利用挂篮在桥墩两侧对称浇注箱梁节段,待已浇节段混凝土强度达到要求的张拉强度后进行预应力张拉,然后移动挂篮进行下一节段施工,直至全桥合拢。

不论悬拼还是悬浇,都是属于自架设方式施工,且已成结构的状态(包括受力、变形)具有不可调整性,所以,施工成败的关键在于临时锚固的可靠性,施工过程中的应力、变形与标高满足要求以及体系转换的实施。

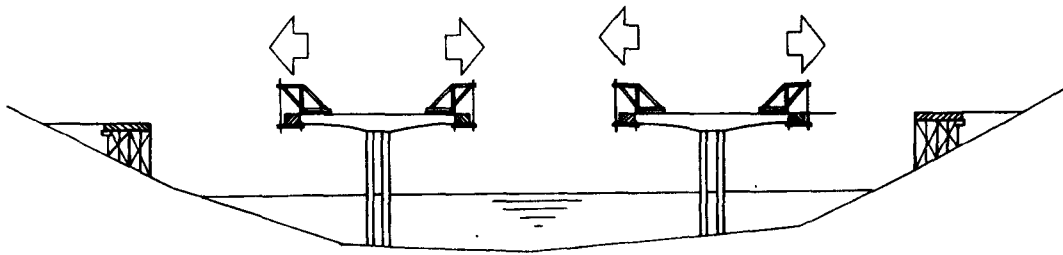


图 2-2 混凝土梁桥悬臂施工示意

### (四) 预应力混凝土连续刚构桥

预应力混凝土连续刚构桥通常用在较大跨径的梁式桥梁上,一般采用悬臂浇筑施工,如图 2-2。由于其结构为墩梁固结,避免了墩梁临时固结及解除固结这个复杂过程,所以,其施工看起来比连续梁简单些。而实际上,由于连续刚构桥跨径大,孔数多(可三孔或五孔),在施工中遇到的问题更多。首先,连续刚构桥墩为柔性,主梁相对较纤细,施工过程中桥墩、主梁的受力安全及稳定性都需特别注意;其次是桥梁悬臂施工节段多、工期较长,其纵面高程受多种因素影响,容易出现较大的悬臂标高误差,甚至出现两相对悬臂端标高相对误差太大,造成合拢困难的情况。若为保证线形而采取措施强迫合拢,必将在结构中产生不利的附加内力,影响结构受力安全,所以,确保成桥线形与内力状态符合要求显得非常重要。

### (五) 钢梁桥

钢梁桥包括简支或连续体系的钢板梁和钢桁梁桥。钢梁桥一般为工厂加工,现场架设施工。



钢梁桥架设方法很多,主要有整孔吊装法、支架拼装法、缆索吊拼装法、转体法、顶推法、拖拉法和悬臂拼装法。拖拉法与悬臂拼装法使用较多。

拖拉法是将钢梁在路堤、支架或已拼好的钢梁上拼装,并在其下设置上滑道,在拼装台顶面和墩台顶面设置下滑道,通过滑车组或绞车等将钢梁拖至预定桥孔就位,如图 2-3 所示。由于拖拉时梁体应力大,且与使用阶段应力状态不一致,所以,必须对施工中梁体各杆件的应力、稳定进行控制。

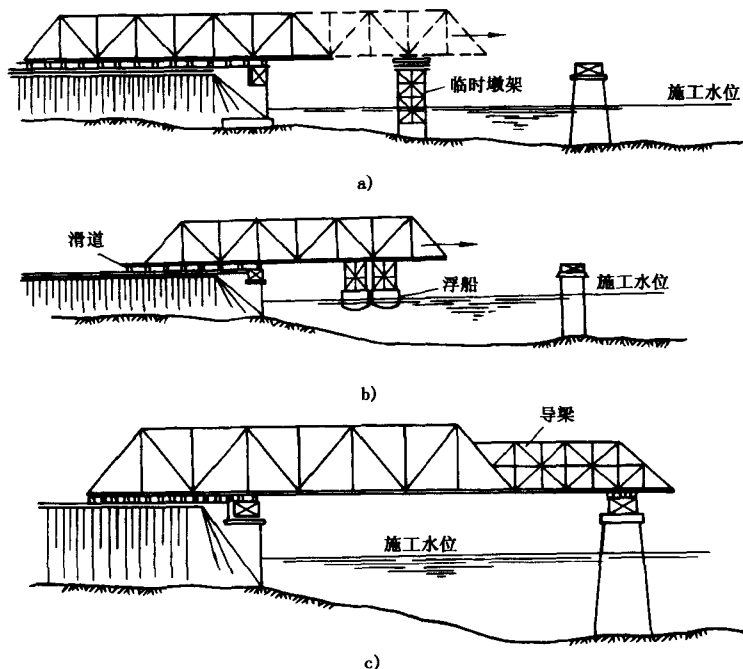


图 2-3 钢梁桥拖拉施工示意

a)中间临时墩架的纵向拖拉;b)中间浮运支承的纵向拖拉;c)全悬臂的纵向拖拉

悬臂拼装法是将钢梁杆件在桥跨中依次悬臂拼装至前方墩(台)或合拢。如图 2-4 所示,悬臂拼装施工中,首先要控制好钢梁的稳定性;其次是悬拼过程中各杆件应力及局部稳定虽在设计中已有考虑,但由于各种误差影响,施工中很有可能出现杆件应力过高的情况,故需予以关注;三是悬拼时梁的挠度同样需要观测、调整,使其挠度在控制范围内,保证合拢顺利和梁体线形符合要求;四是悬拼过程中的梁体振动也应注意;五是做好合拢控制。

## 二、拱式桥梁

拱桥作为一种传统桥型,应用非常广泛。拱桥结构形式很多,各自的施工(架设)方法也不一样。

### (一) 石拱桥主拱圈施工

对于石拱桥这种砌体结构,一般采用拱架法施工,如图 2-5 所示的山西丹河大桥的施工情况。拱架形式有满堂式、撑架式等。在有条件的地方也可采用土牛拱胎。采用拱架施工石拱