



高等学校教材

大跨度桥梁 施工控制

徐君兰 主编
项海帆 主审

(土木工程专业用)

人民交通出版社

责任编辑 / 周往莲
封面设计 / 彭小秋

DAKUADU QIAOLIANG SHIGONG KONGZHI

ISBN 7-114-03618-3



9 787114 036187 >

ISBN 7-114-03618-3

U · 02615

定价: 26.00 元

高等学校教材

Dakuadu Qiaoliang Shigong Kongzhi

大跨度桥梁施工控制

(土木工程专业用)

徐君兰 主编

项海帆 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要讲述大跨度桥梁施工控制的内容和方法,施工控制系统、监测系统的建立,施工控制结构计算方法以及施工误差调整理论和方法。书后附有典型大跨度桥梁施工控制实例。

本书是高等院校土木工程专业教学用书,亦可供从事桥梁设计、施工的专业技术人员及科研工作者学习参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

大跨度桥梁施工控制/徐君兰主编. -北京:人民交通出版社, 2000.5
ISBN 7-114-03618-3

I. 大… II. 徐… III. 长跨桥-工程施工-施工管理-高等学校-教材 IV. U448.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 23444 号

高等学校教材 大跨度桥梁施工控制 (土木工程专业用)

徐君兰 主编

项海帆 主审

责任印制: 杨柏力 正文设计: 王秋红 责任校对: 尹 静

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.25 插页: 3 字数: 304 千

2000 年 8 月 第 1 版

2000 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001 — 5000 册 定价 26.00 元

ISBN 7-114-03618-3

U · 02615

前 言

本教材是根据交通部高等学校路桥、交通工程专业教学指导委员会于1996年11月审定的《大跨度桥梁施工控制》编写大纲编写的。

本书共有八章：第一章大跨度桥梁施工控制的重要性；第二章大跨度桥梁施工控制的发展；第三章大跨度桥梁施工控制的内容和方法；第四章桥梁施工控制系统的建立；第五章大跨度桥梁施工控制结构计算方法；第六章大跨度桥梁施工误差调整理论和方法；第七章施工监测与仪器；第八章大跨度桥梁施工控制实例。

本书第一、二章和第三章第一、二节由重庆交通学院徐君兰教授编写；第三章第三节由重庆交通学院刘忠教授编写；第四章由重庆交通学院向中富副教授、刘忠教授编写；第五、六章由重庆交通学院张永水讲师编写；第七章和第八章第一、二、三节由向中富副教授编写；第八章第四节由同济大学石雪飞副教授编写。全书由徐君兰教授主编，由同济大学项海帆院士主审。本书在编写过程中得到交通部重庆公路科学研究所王建民研究员、四川省交通厅公路规划勘察设计研究院谢邦珠高级工程师、重庆交通学院顾安邦教授等的悉心指导，在此表示感谢！

本书为高等院校土木工程专业(桥梁工程专门化)教学用书，亦可供从事桥梁工程的技术人员学习参考。由于本教材可参考的书籍和资料较少，再加上编者水平有限，编写时间又较紧迫，谬误之处一定不少，敬请读者批评指出，并将意见寄重庆交通学院。

编 者

1999年4月

目 录

第一章 大跨度桥梁施工控制的重要性	1
第一节 桥梁施工方法回顾	1
第二节 桥梁施工控制的重要性	1
第二章 大跨度桥梁施工控制的发展	4
第一节 大跨度钢桥的施工控制	4
第二节 自架设体系桥梁的施工控制	8
第三节 桥梁施工控制的发展趋势	13
第三章 大跨度桥梁施工控制的内容和方法	14
第一节 大跨度桥梁施工控制内容	14
第二节 大跨度桥梁施工控制方法	17
第三节 各种桥型施工控制特点	18
第四章 桥梁施工控制系统的建立	20
第一节 现代控制论简介	20
第二节 大跨度桥梁施工控制影响因素	23
第三节 大跨度桥梁施工控制系统的建立	24
第五章 大跨度桥梁施工控制结构计算方法	28
第一节 正装计算法	29
第二节 倒装计算法	44
第三节 无应力状态法	49
第四节 桥梁结构分析的有限元法及其程序构造	53
第六章 大跨度桥梁施工误差调整理论和方法	69
第一节 设计参数的识别和修正	69
第二节 卡尔曼(Kalman)滤波法	73
第三节 灰色系统理论法	90
第四节 最小二乘法	109
第七章 施工监测与仪器	126
第一节 概述	126
第二节 施工监测系统的建立	126
第三节 施工监测方法	126
第八章 大跨度桥梁施工控制实例	136
第一节 重庆万县长江大桥(主跨 420m 钢筋混凝土拱桥)施工控制	136
第二节 重庆黄花园大桥(137.16m + 3 × 250m + 137.16m 连续刚构)施工控制	149
第三节 广东虎门大桥(主跨 888m 悬索桥)施工控制	162
第四节 温州大桥(主跨 270m 斜拉桥)施工控制	175
主要参考文献	189

第一章 大跨度桥梁施工控制的重要性

第一节 桥梁施工方法回顾

19 世纪中期以前,各种桥梁均采用有支架的施工法。有支架施工是在桥跨位置架设支架,在支架上拼装钢梁或浇筑混凝土主梁,整个施工过程主梁处于无应力状态。对桥梁的主梁来说,无支架施工是最简单、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、大河和深沟的桥梁,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,美国等国修建了为数不多的连续钢桁梁,但是,在建设使用过程中,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。后来在连续梁中采用了铰,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难题,在施工中,悬臂桁梁的施工应力与营运应力的一致,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惟一桥型。当时美国修建的悬索桥数量最多,其中以最早修建的、1883 年完工的跨径 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。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,缆索吊机成为一个完善、可靠的主要吊装工具,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龙的各段拱段,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挂篮悬臂浇筑混凝土,修建预应力混凝土连续梁桥,为至今仍采用的悬臂浇筑混凝土连续梁、T 型刚构、斜拉桥等无支架施工方法奠定了基础。无支架施工方法的采用,促进了大跨度桥梁的建设,但是,无支架施工方法的采用,在施工中又将带来许多问题。

第二节 桥梁施工控制的重要性

随着交通事业的发展,急需修建更多的大跨度桥梁以跨越大江、大河和海湾,采用更加经济合理的混凝土桥梁,改变过去凡建大跨度桥梁,必然是钢桥一统天下的局面。为了建桥中不中断通航,不设造价昂贵的河道支架,在混凝土桥施工中引入了钢桥自架设体系的施工方法,即将桥梁的上部结构分节段或分层进行施工,后期节段或后层是靠已浇节段或已浇层来支撑,逐步完成全桥的施工,也就是无支架而靠自身结构进行施工,人们称之为自架设体

系施工法。它的广泛采用,使得混凝土桥得到了较大发展,比如 T 型刚构、大跨度钢筋混凝土拱桥、预应力混凝土斜拉桥等于 20 世纪能在世界各地广泛修建,不能不说是由于自架设体系施工方法采用的结果。自架设体系施工方法的采用,必然给桥梁结构带来较为复杂的内力和位移变化,为了保证桥梁施工质量和桥梁施工安全,桥梁施工控制是不可缺少的。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,例如钢桁梁的悬臂架设,为使架设的各杆件最终满足设计标高,设计者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,预设拱度的方法在钢桁梁悬臂拼装过程中是较为成功的方法。但是,自架设体系施工方法应用在非匀质的混凝土桥中就不那么简单。因为混凝土桥除了本身材料是非匀质材料和材质特性不稳定外,它还要受温度、湿度、时间等因素的影响,加上采用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,由此,这些影响因素必然造成各节段或各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。为了保证施工质量,必须对建桥的整个过程进行严格的施工控制。也可以这样说,桥梁施工控制是桥梁建设质量的保证。衡量一座桥梁的质量标准就是要保证已成桥的线形以及受力状态符合设计要求。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,容易检查和控制,而对采用多工序、多阶段自架设体系施工的大跨度桥梁的上部结构而言,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浇筑 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龙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,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,为确保斜拉桥施工质量,更加急需和不可缺少随施工过程中而进行的施工控制。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、多工序的自架设体系施工方法进行模拟,对各阶段可预先计算出内力和位移,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,就注意到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 $210\text{m}+200\text{m}$ 跨径的单塔单索面斜拉桥,在施工中采用劲性骨架悬臂浇筑主梁,浇筑主梁时通过水箱放水减载与浇筑的混凝土重力相平衡,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,也造成外观缺憾。而各斜拉索受力是否符合设计要求,就更不得而知了。从而再次说明,为了建设质量高、外形美观的桥梁,施工控制是绝不可少的。桥梁施工控制是确保桥梁施工质量的关键。

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,同时可通过监测手段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，就要进行检查和分析原因，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），因此，靠近中间墩处的下弦杆受压力过大，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，但若当时采用了施工控制手段，在内力较大的杆件中布置监控测点，当发现异常现象时，及时停工检查，就不会发生突然崩塌附落事故。由此可知，为避免突发事件的出现，能按时安全地建成一座桥，施工控制是有力的保证。也可以这样说，桥梁施工控制系统就是桥梁建设的安全系统。为确保桥梁施工的安全，桥梁施工控制必不可少，尤其对造价昂贵的大跨度桥梁，更为重要。

施工控制不仅是建桥中的安全系统，也是桥梁营运中安全性和耐久性的综合监测系统。随着交通事业的发展，荷载等级、交通流量、行车速度等必然提高，还有一些不可预测的自然破坏力也将会危及桥梁的安全，若在建设桥梁时进行了施工控制，并预留长期观测点，将会给桥梁创造终身安全监测的条件，从而给桥梁营运阶段的养护工作提供科学的、可靠的数据，给桥梁安全使用提供可靠保证。这方面的反面事例在工程界是存在的。比如韩国圣水桥，于 1994 年 10 月突然在中跨断塌 50m，其中 15m 掉入江中，造成 32 人死亡，17 人受重伤的重大事故，据称造成该桥在行车高峰期突然断裂的原因是该桥长期超负荷运营，钢桁梁螺栓和杆件疲劳破坏所致。又如我国广州海印大桥，因斜拉索的防护措施不够完善、可靠，造成斜拉索超应力，只使用几年就突然断裂，创造了世界损桥年限最短的纪录，不但造成重大的经济损失，而且也带来不良的社会影响。以上实例说明，对于桥梁的营运阶段仍然急需一套长期有效的监测系统，使桥梁养护部门能根据该桥的实际使用情况进行有效的更换和维护，而不是目前只靠外观检查等简单手段，得到粗略的依据进行不切要害的养护。要彻底改变目前我国桥梁养护部门的现状，科学地、较为主动地预报桥梁各部位营运情况，必须在桥梁施工中进行施工控制系统的建立，并使其能长期对桥梁营运阶段进行监测，这样才能确保这些耗资巨大、与国计民生密切相关的大桥的安全耐久。由此可见，桥梁施工控制是现代桥梁建设的必然趋势。

第二章 大跨度桥梁施工控制的发展

第一节 大跨度钢桥的施工控制

钢桥所用钢材具有强度高和拉、压应力相等的特点，在钢桥的架设中，多采用无支架架设方法建桥。大跨度钢桥多采用桁架体系，其架设方法又以最为简便合理的悬臂拼装方法为主。即采用移动式刚腿转臂起重机，在已拼桁架上拼装前端节间杆件，逐节间吊装完后向前移动，完成全桁架的拼装工作。我国在修建跨越长江的第一座大桥——武汉长江大桥时，就非常成功地采用了长悬臂拼装方法，顺利完成三联 $3 \times 128\text{m}$ 的连续桁梁桥的拼装工作。后又在重庆白沙沱长江大桥、枝城长江大桥、南京长江大桥、九江长江大桥施工中成功地采用了悬臂拼装法。在短短的时间内，连续钢桁梁的跨度从 128m 增加到 216m ，积累了钢桁梁大悬臂拼装施工经验。目前的自架设体系施工方法即源于此。采用悬臂拼装的大跨度钢桁梁桥，在施工中出现了如何保证钢桁梁拼装到位、顺利合龙以及成桥后线形和应力是否符合设计要求的问题，这就要求对各悬臂拼装阶段的变形和应力进行控制与调整，也就提出了要进行桥梁施工控制的问题，当时的桥梁建设者已注意到这个问题并进行了这方面的工作，比如，1957年建成的武汉长江大桥，在施工中对钢桁梁悬臂拼装过程中的应力和变形进行了控制，现介绍如下。

1. 安装内力控制

图 2-1 为武汉长江大桥三孔一联的等跨度连续钢桁梁，在设计时，边跨部分杆件的内力大于中跨部分杆件的内力，由此，中跨部分杆件的截面小于边跨部分杆件的截面，在悬臂拼装桁梁时，中跨部分杆件在最大悬臂时将出现超应力现象，为了确保施工安全，又不增加额外的钢材，要解决局部杆件的超应力问题，该桥是这样进行控制的：首先，在悬臂较长时，力求减轻悬臂重力，将多余的待拼装杆件、管路、脚手材料等清除出悬臂孔；其次，为了降低部分杆件的超应力，在拼装过程中对安装应力作了调整。根据具体情况采用了多种方法，现将该桥采用的应力调整措施简述如下：

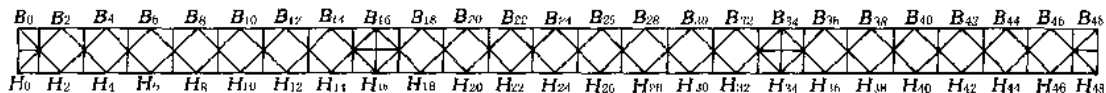


图 2-1

第一联三孔连续钢桁梁在悬臂拼装时的内力调整措施假定以等截面梁来说明。

如图 2-2 所示，图 a) 为连续梁截面和荷载情况，其弯矩图如图 b)。由于中跨 28~30 节点处弦杆截面较小，而该处又在悬臂最大时将产生较大的负弯矩，出现弦杆超应力，为降低 28~30 节点处的弦杆应力，采用了调整支座标高的方法，如图 c) 所示。抬高 32 或 0 支点，或者降低 16 支点的标高，其桁梁产生的弯矩如图 d) 所示，这样增加了 28~30 节点处的正弯矩，但同时也提高了第一孔 8~10 节点处的正弯矩，使 8~10 节点处的杆件因正弯矩增加

而发生超应力现象，故同时再利用试验墩作一个支点(如图 e)),其产生的弯矩如图 f)，这样既增加了 28~30 节点处的正弯矩，同时又降低了 8~10 节点处的正弯矩。由于以上两种方法的混合采用，消除了 28~30 节点处的超应力现象。同时将 32 支点适当抬高，可以适当消减第三孔悬臂端点下垂过低现象。在第二联与第三联钢桁梁悬臂拼装至第三孔时，也同样发生了 28~30 节点处弦杆超应力现象，除了调整 0、16、32 支点的相对标高外，还在 28~30 节点处加了集中力(压重)，如图 g)所示，其产生的弯矩如图 h)，这样既增加了 28~30 节点处的正弯矩，同时也减少了 8~10 节点处的正弯矩，最终达到调整部分弦杆超应力的目的，把中跨部分弦杆内力控制在安全范围内。

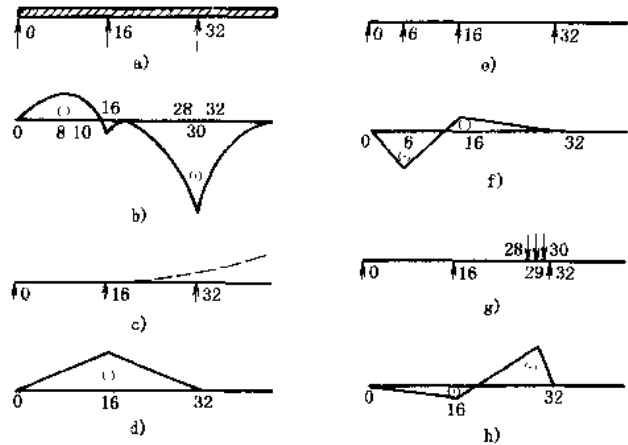


图 2-2 调整应力措施

该桥在设计时端跨跨中的弦杆控制内力约达 $\pm 25\,200\text{kN}$ ，支点两侧的弦杆内力约为 $\pm 22\,300\text{kN}$ ，如按此设计杆件截面，当悬臂拼装至全伸臂时，支点弦杆强度不足，必须加强。假如恒载端反力减小 300kN ，相当于端支座座下降约 13.8cm 。经过如此调整，不论跨中还是支座附近，主桁最大弦杆内力均约为 $\pm 24\,600\text{kN}$ ，可以达到弦杆截面受力较均匀的目的，以适合拼装要求。因此，采用调整反力的办法，是有利而且也是必要的，如图 2-3。

调整桁架弦杆内力，也可把钢桁梁在无内力时做成两端向上翘起的预定轮廓外形，钢梁安装后，将支座落于同一水平的各支点上，即端支座标高降低，同样可达到调整反力的目的，并使整个桁架外形适合反挠度的要求。

此调整反力的措施，实质上是给支点预留一些恒载变位，而不改变弹性变形公式的基本内容。由此可见，在连续梁设计中，这是应当充分利用的一个有利因素。表 2-1 为武汉长江

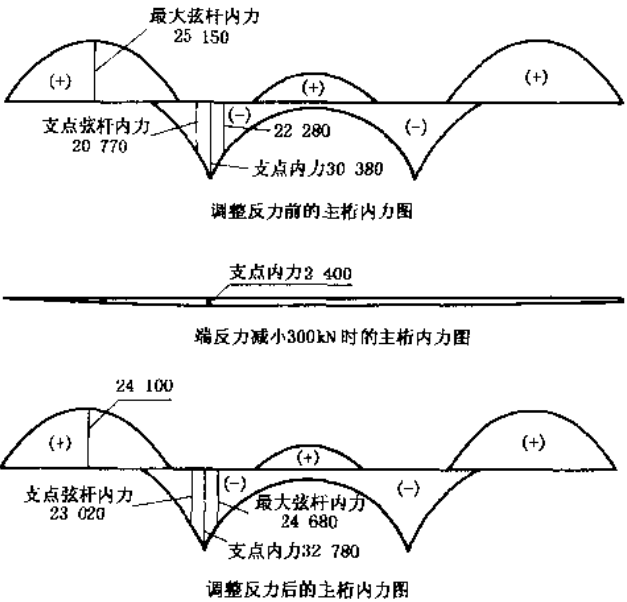


图 2-3 钢梁调整内力图 (单位: kN)

大桥通车前的静载试验实测应力，从表可见，所采用的应力调整措施是成功的。

静载试验实测应力表 表 2-1

杆 件		理论计算应力 (MPa)	实测轴心应力 (MPa)	结构校正 系 数
弦 杆	$H_{47}H_{48}$	+ 6.2	+ 5.0	0.8
	$H_{40}H_{41}$	+ 25.6	+ 19.0	0.74
	$B_{40}B_{41}$	- 27.5	20.6	0.75
	$H_{33}H_{34}$	- 22.2	- 19.7	0.89
	$B_{33}B_{34}$	+ 21.2	+ 16.8	0.79
	$H_{25}H_{26}$	+ 21.8	+ 18.6	0.85
	$B_{25}B_{26}$	22.7	- 18.6	0.79
斜 杆	$H_{46}C_{46}$	+ 25.6	+ 21.5	0.84
	$C_{47}B_{48}$	+ 22.0	+ 25.2	0.87
	$C_{47}H_{48}$	- 17.0	- 19.0	0.94
	$C_{41}H_{40}$	- 11.3	8.4	0.74
	$C_{33}H_{34}$	+ 23.1	+ 19.0	0.82
	$C_{33}H_{32}$	- 22.9	+ 24.8	1.08
	$C_{25}H_{26}$	16.2	- 15.6	0.96
竖 杆	$C_{25}H_{25}$	- 23.0	+ 21.1	0.917

2. 桁梁标高控制

桁梁标高控制的目的是使主桁架在悬臂拼装过程中能顺利通过各桥墩和临时支点，且最终线形符合设计要求。

为了校核悬臂桁梁的挠度是否与理论计算相符，下弦各节点是否按设计要求的预拱度进行拼装，并且为了决定平衡梁的纵向坡度和各节点应有的标高，以及计算梁端至墩旁托架顶或墩顶间的垂直距离是否有足够的容纳顶梁设备的空间，计算拼装过程中各节点的标高便具有重大的意义。因此在设计中，每拼装两个小节间，即悬臂端每向前推进 16m，就要计算一次挠度。但是，计算的挠度是否精确，和锚孔跨上的假定荷载是否与实际相符有着直接的关系。同时，在具体情况下，要把爬行吊机安装构件的进度和锚孔跨上其他临时附加上去的荷载事先予以规定，但荷载一成不变又很难办到，这样，势必使挠度计算趋于复杂。解决这个问题的办法是，把理论挠度划分为两部分：第一部分按固定荷载进行计算，即按主桁架吊机行走道、运料便道、人行便道、吊机和脚手架等自动进行计算，并和预设上拱度叠加，即为悬臂孔各节点的相对挠度；第二部分计算出锚孔内单位荷载所产生的支点处的角变位的影响线，作为参变数，结合实际荷载情况和节点坐标，求得改正值。把这些资料提供给现场工程师，现场工程师就可以根据施工时的实际情况很快地推算出当时的正确挠度，并作为指导和核对拼装工作的依据。由此可以看出，只要严格地按拼装顺序进行施工，并每隔两个小节间监测一次挠度，就可使桁梁拼装工作得以顺利进行，并达到较好的线形。

图 2-4 为钢桁梁的挠度曲线图，从图中可看出，恒载的实际反挠度值与理论计算值不符，其最大差值为 3.1cm，经研究认为，在设计时，曾对按梁的挠度公式和按桁架的挠度公式的计算值进行了比较，结果前者偏小，后者因计算时考虑了腹杆的变形，其结果又偏大，最后按梁的挠度计算结果进行了预拱度的设置，拼装完后，其恒载挠度过大，说明设计中预拱度设置不够，但施工中的标高控制仍然是较为成功的。

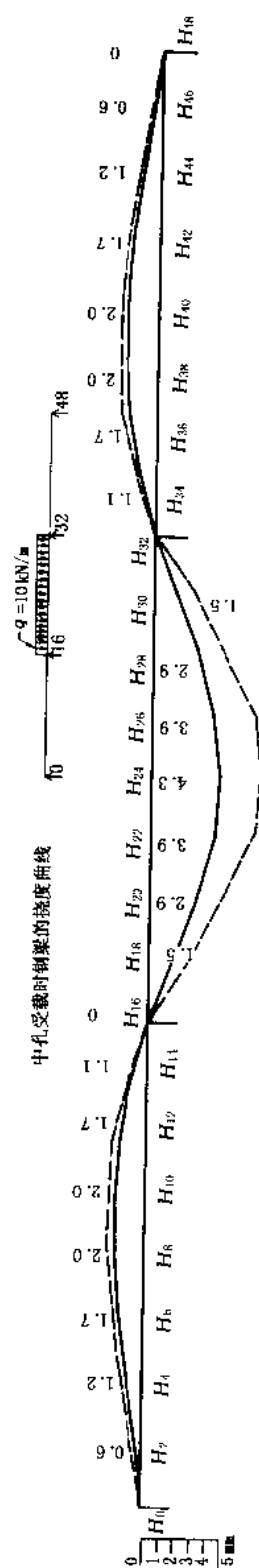
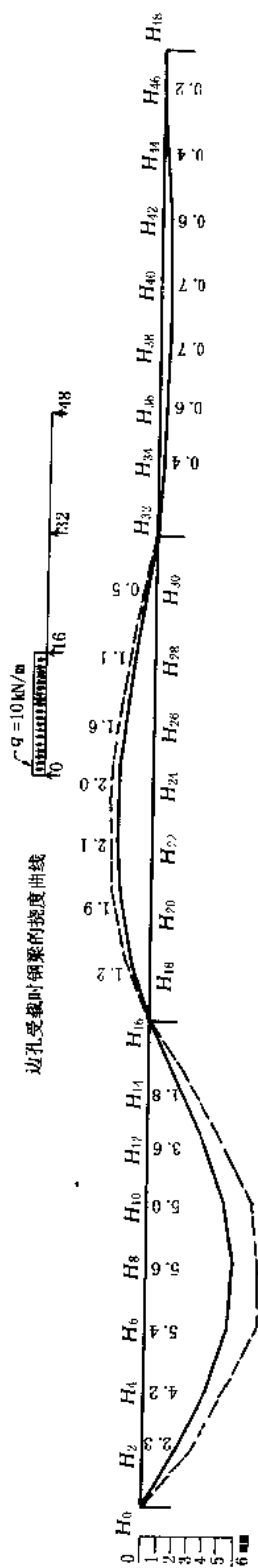
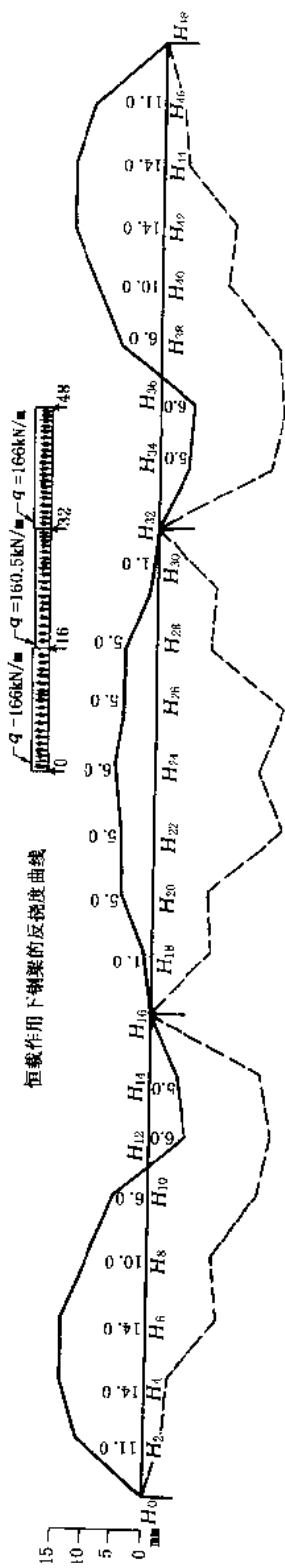


图 2-4 挠度曲线图

注:实线为理论挠度曲线;虚线为实际挠度曲线。

第二节 自架设体系桥梁的施工控制

随着预应力混凝土桥跨度的增大,20世纪50年代初出现了模拟钢桁梁悬臂施工方法的悬臂浇筑混凝土或悬臂拼装混凝土节段的自架设体系预应力混凝土桥梁。很快,这种桥梁在体系和跨度上得到迅速发展,它对施工控制亦提出了更高更新的要求。

一、预应力混凝土T型刚构桥

世界上第一座自架设体系的预应力混凝土T型刚构桥,是前联邦德国于1953年建成的沃尔姆斯桥,跨度为101.65m+114.2m+104.2m带铰的T型刚构,施工中采用悬臂施工的新工艺,使这种桥型的结构性能和施工特点达到高度的协调统一,它为混凝土桥向跨度长大化、施工机械化、装配化等方面发展开辟了新的途径。从20世纪70年代开始,美国也建造了较多的无支架悬臂施工的预应力混凝土T型刚构桥,如1972年建成的多美尼加 Rio Higuamo 桥,主跨达190m,与此同时,我国也修建了不少的T型刚构桥,从主跨60m的红卫桥到主跨174m的重庆长江大桥,在十多年中,全国各地建成了几十座预应力混凝土T型刚构桥,这种桥型都采用自架设体系的悬臂施工法,即在桥墩两边平衡悬臂浇筑混凝土或悬臂拼装混凝土预制块。由于施工中各节段或各预制块件是逐步悬伸的,各节段经历了浇筑、张拉、不断地加载等过程,而各节段的混凝土龄期又不同,其收缩、徐变影响较复杂,因此,它的应力和变形比悬臂拼装钢梁要复杂,其对施工控制的要求也就比较高。现以重庆长江一桥的施工控制情况为例说明T型刚构桥的施工控制。

重庆长江一桥是我国最大的预应力混凝土T型刚构桥,它由五个小T和两个大T及每孔跨径35m的挂梁所组成,全桥布置如图2-5。

各个T构均采用悬臂浇筑混凝土的自架设体系的施工方法,混凝土的浇筑采用斜拉组合挂篮进行悬臂浇筑,如图2-6所示。

为了保证施工结束后,T型刚构的线形符合设计要求,该桥重点对各个T型刚构的悬臂浇筑混凝土的标高进行了控制。每悬臂浇筑一个节段要观测六个工况的标高:①浇筑混凝土前;②浇筑混凝土后;③预应力张拉前;④预应力张拉后;⑤挂篮移动前;⑥挂篮移动后。同时还要校核已浇相邻节段的标高,观察预拱度变化趋势。为了及时掌握T型刚构悬臂预拱度的变化情况,每施工完一个节段,都必须及时整理测量资料,以便决定下一节段施工时是否调整底模标高。由于认真控制了悬臂浇筑各节段底模标高,各个T型刚构的预拱度曲线与设计值较为吻合。图2-7为大T悬臂预拱度曲线。

当各个T型刚构的混凝土浇筑完后,要进行挂梁架设,架设挂梁常采用架桥机进行,一般从一端至另一端,这样,必然在T型刚构的一个悬臂端产生过大变形及在悬臂根部产生较大的弯矩。该桥从已架孔向南架设时,北端产生的不平衡力矩远远大于T型刚构设计时允许的最大不平衡力矩。为了保证各个T型刚构在挂梁架设阶段不致产生过大的变形,在各跨挂梁架设及架桥机通过挂梁时,在T型刚构南端加平衡重,其平衡重随架梁进度分级增加,原则上架每一片挂梁增加的平衡重的重力就是一片挂梁的重力。当架桥机由T型刚构的北端行走至T型刚构的南端时,T型刚构两端荷载发生了变化,这时应分阶段将南端的平衡重分级卸掉,以此来调整两端的标高。图2-8为该桥架设大T挂梁时的平衡重,采用在箱梁内部加水和在顶面加水袋形成。根据挂梁和架桥机通过时的平衡需要,分别求出各

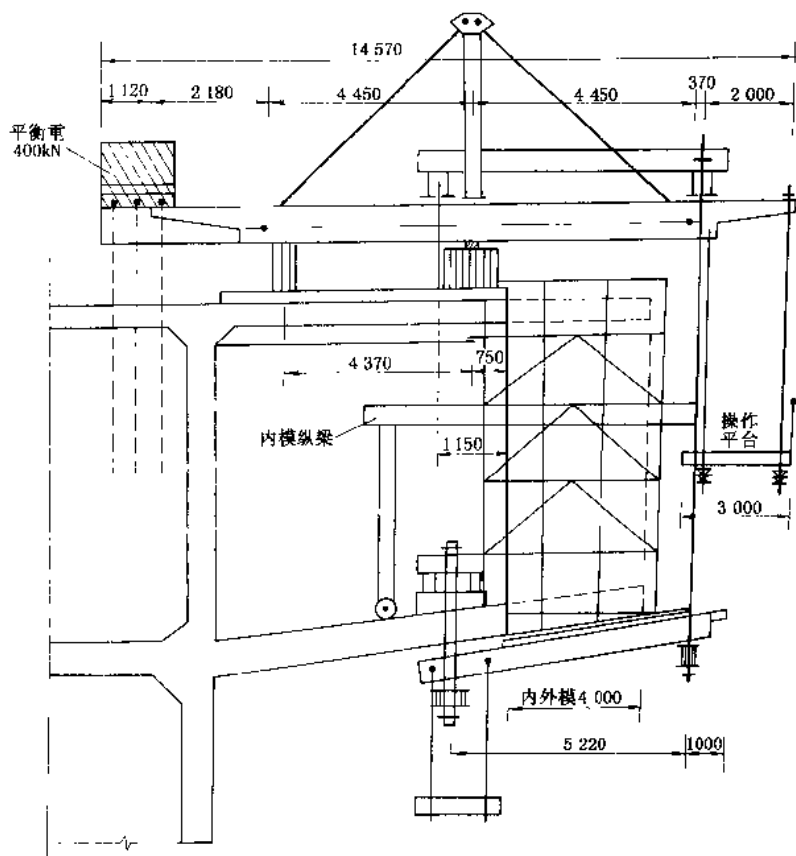


图 2-6 (单位: mm)

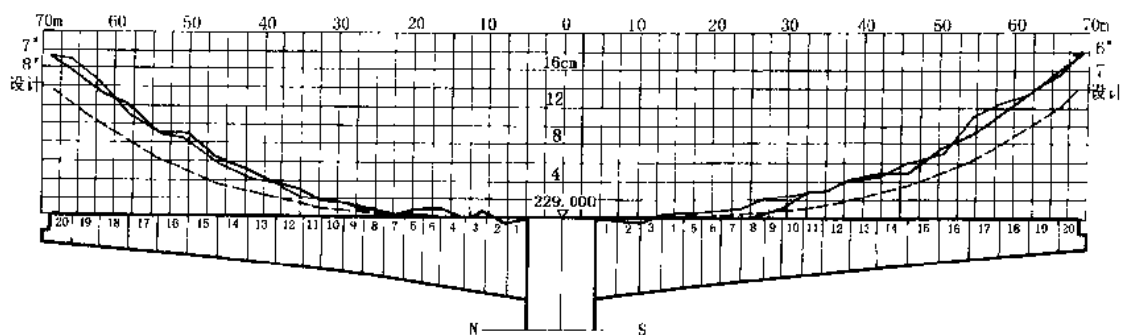


图 2-7 6号、7号T构预拱度曲线示意图

阶段的加水量和放水量,最后,当各个T型刚构相互连通时,变形值逐渐趋于均衡。

对于内力控制,主要反映在预加力的控制上,该桥为保证预加力较为准确,除了预加力严格按施工规范进行外,还对预压及锚口损失值、孔道摩阻损失值、钢丝束张拉伸长值、锥形锚具内缩量等关键数值进行认真测定,求得较为可靠的预应力值。可以看出,当时对自架设体系的预应力混凝土T型刚构桥,已十分重视施工中的标高和内力的控制,只是控制的理论和方法还不成熟,控制的效果还不很理想。

二、预应力混凝土连续梁桥和连续刚构桥

近年来,国内外在自架设体系 T 型刚构桥的基础上,相继修建了许多预应力混凝土连续梁桥和连续刚构桥,这两种桥型具有跨越能力大、受力合理、行车平顺、施工方便和养护费用少等优点,它已成为大跨桥梁中的主要桥型。这种桥一般采用的施工方法是:在其各主墩上按“T 构”用挂篮分段对称悬臂浇筑(或拼装),在落地支架上浇筑边跨现浇段,在吊架上现浇跨中合龙段,全桥按对称悬臂浇筑→边跨合龙→中跨合龙的顺序进行施工。对于连续梁桥,在悬臂浇筑节段前还要将主梁与桥墩临时固结,待跨中合龙施加预应力后,再去掉墩顶临时固结,主梁支承于支座上。

由此可见,预应力混凝土连续梁和连续刚构桥的施工过程比 T 型刚构要复杂,它不但要经历 T 型刚构悬臂浇筑(拼装)节段形成主梁的过程,还要经历体系转换的过程,即由对称的单“T”静定结构转变为超静定结构。通过理论计算,可以得到各施工阶段的理想标高和内力值,但实际施工中受各种因素的干扰,可能导致合龙困难,使成桥线形与内力状态偏离设计要求,给桥梁施工安全、外形、可靠性、行车条件和经济性等方面带来不同程度的影响,因此,要求在施工过程中,必须实施有效的施工控制。从某种意义上讲,施工控制成了这两种桥型修建和发展必不可少的保证措施。目前针对这两种桥型的结构及施工特点,已初步研制了施工控制软件,并逐渐改进了应力和变形的监测方法和仪器,初步形成了施工控制的管理系统,使桥梁施工控制得到了进一步重视,桥梁施工控制的内容、理论和方法得到了发展。

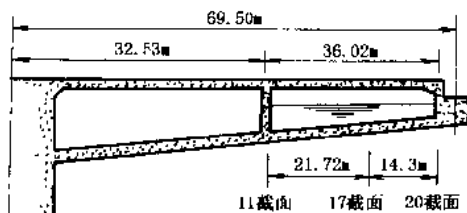


图 2-8 大 T 箱内装水剖面图

三、混凝土斜拉桥

自 1962 年委内瑞拉建成世界上第一座混凝土斜拉桥——马拉开波桥后,世界各地修建了许多混凝土斜拉桥,其最大跨度已达到 530m(挪威斯卡恩圣特桥)。我国在 20 世纪 70 年代中期开始修建斜拉桥,近 20 多年来已建成斜拉桥 40 多座,其中大部分是混凝土斜拉桥,其中最大跨度为即将通车的主跨为 450m 的重庆大佛寺长江大桥。

混凝土斜拉桥多采用自架设体系的施工方法,即采用对称于桥塔的悬臂施工,在边跨和中跨处进行合龙段现浇。斜拉桥是高次超静定结构,其施工方法和安装程序与成桥后的主梁线形和结构内力有密切关系,特别是斜拉桥在施工中要进行索力调整,这势必引起主梁内力和标高的变化,再加上混凝土徐变、收缩的影响,使得混凝土斜拉桥在施工过程中受力十分复杂,因此,必须对斜拉桥拉索张拉吨位和主梁挠度、塔柱位移等施工控制参数的理论计算值,以及施工程序作出明确的规定,并在施工中加以有效的管理和控制,以确保斜拉桥在施工过程中结构始终处于安全范围内,并在成桥后主梁的线形符合设计要求,使结构处于最优受力状态。由此可见,混凝土斜拉桥的施工控制是十分重要和必需的。我国《公路斜拉桥设计规范(试行)》(JTJ 027—96)明确规定,对斜拉桥应进行施工控制。近年来,国内外对斜拉桥施工控制的理论和技术进行了深入研究,大大地促进了桥梁施工控制的发展,下面举例说明斜拉桥施工控制的发展概况。

天津永和桥是一座主跨 260m 的混凝土斜拉桥,其主梁采用悬臂拼装,由同济大学负责

该桥的施工控制工作。除了进行必要的科学试验，以求得各种参数并进行识别外，为了保证成桥状态符合设计要求，首先在该桥主梁安装计算时采用了倒退分析法，编制了“倒拆法”计算程序。为了较准确地调整索力，编制了“恒载自动调索”程序，使施工中的计算较好的接近真实受力状态。在分析中除利用 Ernst 公式修正拉索的垂度影响外，还利用拖动坐标计入大变形影响，以同时考虑大变形、梁柱效应及索垂度等三方面的非线性影响。为了减小徐变影响，还合理安排预制块的养生期，为该桥缩短工期作出了贡献。实践证明，该桥的内力和变形控制良好。

日本白屋桥为混凝土斜拉桥，其现场施工控制体系如图 2-9 所示。监测内容有主梁和主塔的变形；主梁的应力及温度应力；斜拉索张力等。现场监测系统由三大块组成，图的右上角为大型计算机设计计算系统，按各施工程序进行设计计算，该系统提供结构的资料、变形及应力的计算值；斜拉索索力调整量；主梁的预拱度等。左上角框图是施工顺序，依次为吊篮移动；安装模板、钢管、斜拉索；浇筑混凝土，施加预应力；斜拉索张拉；斜拉索最终张拉；施工終了。图中间部

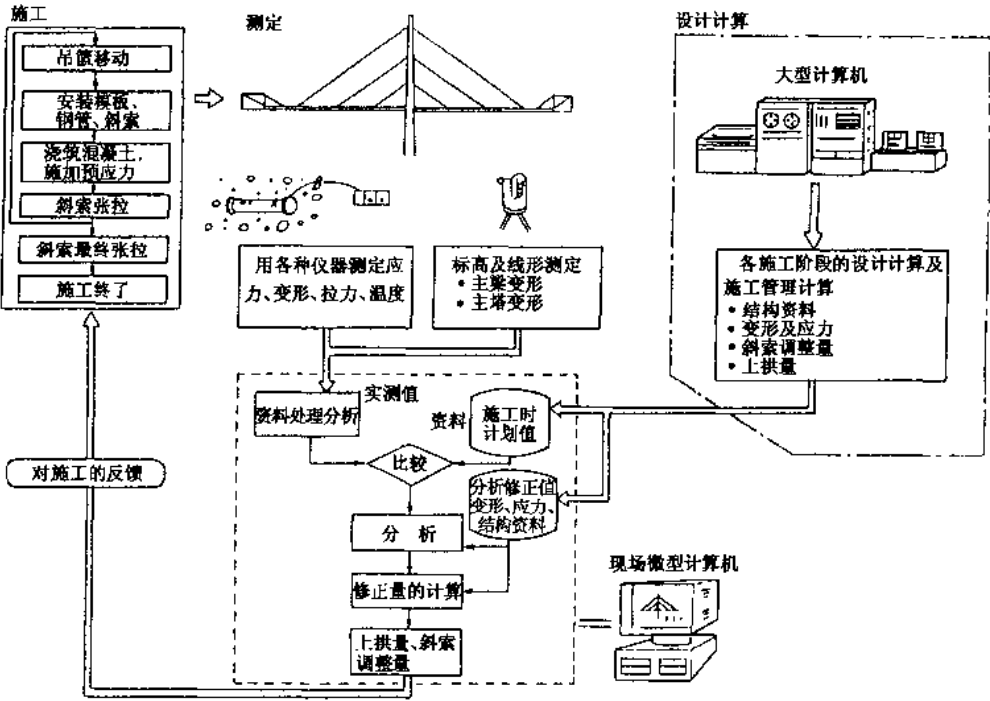


图 2-9 日本白屋桥施工现场管理系统

分是根据设计计算系统提供的施工时的计划值和经分析计算的修正值，经对变形、应力、结构资料与实测值进行比较、分析，然后，对比进行修正量的计算，对预拱度和斜拉索调整量提出修正值，由此对施工进行控制。从图中可以清楚的看出，标高和线形测定、主塔变位、主梁的位移均由仪器自动测量获得，数据的收集迅速、处理迅速，完全自动的进行现场控制。对于应力、变形、拉力、温度等均采用精密仪器测定，并与计算机联网，保证测试数据的精确和快速。图 2-10 为混凝土埋入式应力计，其工作原理是一根钢弦，与国内



图 2-10 埋入式应力计