



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21世纪交通版高等学校教材

桥梁工程控制

Bridge Engineering Control

向中富 主编
肖汝诚 颜东煌 主审



人民交通出版社
China Communications Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪交通版高等学校教材

Bridge Engineering Control

桥梁工程控制

向中富 主编
肖汝诚 颜东煌 主审

人民交通出版社

21 世纪交通版
高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

顾问:王秉纲 (长安大学)

主任委员:沙爱民 (长安大学)

副主任委员:(按姓氏笔画排序)

王 炜 (东南大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐 岳 (长安大学)

梁乃兴 (重庆交通大学)

韩 敏 (人民交通出版社)

委员:(按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王殿海 (吉林大学)

叶见曙 (东南大学)

石 京 (清华大学)

向中富 (重庆交通大学)

关宏志 (北京工业大学)

何东坡 (东北林业大学)

陈 红 (长安大学)

邵旭东 (湖南大学)

陈宝春 (福州大学)

杨晓光 (同济大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

陈静云 (大连理工大学)

赵明华 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

袁剑波 (长沙理工大学)

黄晓明 (东南大学)

符铎砂 (华南理工大学)

裴玉龙 (哈尔滨工业大学)

颜东煌 (长沙理工大学)

秘书长:沈鸿雁 (人民交通出版社)

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,全球经济一体化趋势进一步加强,科技对于经济增长的作用日益显著,教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪,面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点,我国的高等教育迎来了良好的发展机遇,同时也面临着巨大的挑战,高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一,加入 WTO,中国经济已融入到世界经济的发展进程之中,国家间的竞争更趋激烈,竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上,因此,高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二,我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期,这一时期,我国经济结构调整将进一步深化,对外开放将进一步扩大,改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题,高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求,党中央国务院提出扩大高等教育规模,着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤,同时,也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要,早在 1998 年 7 月,教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,原先的公路与城市道路工程,桥梁工程,隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求,对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养 21 世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的,面对新的变化,要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整,以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求,同时,也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求,人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析,提出了组织编写一套 21 世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想,得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000 年 6 月,由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的 12 所高校的专家学者组成 21 世纪交通版高等学校教材(公路类)编审委员会,并召开第一次会议,会议决定着手组织编写土木工程专业具有交通特色的道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材。会议经过充分研讨,确定了包括基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次以及教学辅助层次在内的约 130 种教材,范围涵盖本科与研究生用教材。会后,人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作,经过自由申报及专家推荐的方式,近 20 所高校的百余名教授承担约 130 种教材的主编工作。2001 年 6 月,教材编委会召开第二次会议,全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲,之后,编写工作全面展开。

21 世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是:(1)顺应高等教育改革的形势,专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通,同时保留原专业的主干课程,既顺应向土木工程专业过渡的需要,又保持服务公路交通的特色,适应宽口径复合型人才的需要。(2)注重学生基本素质、基本能力的

培养,为学生知识、能力、素质的综合协调发展创造条件。基于这样的考虑,将教材区分为二个主层次与一个辅助层次,即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前,中国的经济发展存在地区间的不平衡,各高校之间的发展也不平衡,因此,教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求,尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上,注意体现原创性内容,把握好技术与教学需要的关系,努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求,着力提高学生的创新思维能力,使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展,积极配套相应的教学辅件,便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一,全面做好教材建设工作,是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织,由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材,教材力求反映交通科技发展的先进水平,力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定,他们都是各校相关学科的骨干,在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编,能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐,随后,将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版,对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用,同时,也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是,该批教材中研究生教材占有较大比例,研究生教材多具有较高的理论水平,因此,该套教材不仅对在校学生,同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21 世纪初叶,是我国社会经济发展的重要时期,同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期,公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务,希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力,尽快使全套 21 世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世,为我国交通事业的发展做出贡献。

21 世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001 年 12 月

前言

桥梁施工是桥梁建设的关键环节。桥梁施工技术是施工方法与工艺、施工设计与计算、施工监测与控制等的总称,对保障桥梁安全、顺利地建成至关重要。对于以小跨径简单体系桥梁为主的时代(20 世纪 80 年代以前),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”。但事实上,施工控制是施工技术的重要组成部分,并贯穿于各种跨径、各种类型桥梁的施工全过程。任何桥梁施工,包括小跨径桥梁施工,都是一个系统的工程,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的影响,如何从各种失真的结构参数中找出相对真实的值,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、顺利实现十分重要。近年来,人们已经普遍认识到施工控制在施工技术中的重要性,并在桥梁施工中普遍实施了施工控制,为保证桥梁施工过程结构的安全以及成桥状态符合设计要求起到了决定性的作用。随着大跨径桥梁建设的不断发展、结构形成过程(体系变换)越来越复杂,桥梁施工控制已成为桥梁施工中不可缺少的内容。

桥梁长期安全使用是桥梁建设的最终目的,过去,由于缺乏必要的监测和评估,导致桥梁结构得不到及时的养护维修,桥梁突然破坏和倒塌事故时有发生,造成了巨大的生命与财产损失。如今,桥梁健康监测与安全控制的重要性逐渐被人们所认识,对服役桥梁实施健康监测与安全控制已成为学术界和工程界关注的热点。

本教材共分十一章,系统介绍了桥梁施工过程控制,阐述了桥梁服役期的安全控制。第一章主要介绍了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;第二章主要介绍了常见桥梁的施工方法、需注意的问题以及桥梁施工控制的任務与工作内容;第三章主要介绍了桥梁施工控制方法、影响因素、控制系统建立、实施方案编制;第四章重点介绍了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;第五章主要介绍了桥梁施工误差分析、参数识别以及状态预测的方法,着重介绍了 Kalman 滤波法、灰色理论法等;第六章介绍了桥梁施工监测的主要内容与方法;第七、八、九、十章分别介绍了梁式桥梁、拱式桥梁、斜拉桥以及悬索桥施工控制;第十一章介绍了桥梁健康监测的概念、内容与方法以及服役桥梁损伤识别、状态评估。

本书第四、五章由张永水、向中富、谭红梅编写;第十章由向中富、谭红梅编写;第十一章由曾勇、向中富编写;其余章节由向中富编写。全书由重庆交通大学向中富教授主编,同济大学肖汝诚教授和长沙理工大学颜东煌教授主审。教材中难免有差错和不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2011 年 5 月

目 录

第一章 概述	1
第一节 桥梁工程建设与发展	1
第二节 桥梁工程建设与施工技术	3
第三节 桥梁施工技术与施工控制	3
第四节 桥梁健康监测与服役安全控制	5
第五节 桥梁工程控制的主要任务	7
第六节 桥梁工程控制的发展现状与趋势	9
第二章 桥梁施工方法及其控制	12
第一节 桥梁施工方法发展回顾	12
第二节 桥梁主要施工方法及施工中需注意的问题	12
第三节 桥梁施工控制的工作内容	21
第三章 桥梁施工控制系统与方法	25
第一节 现代控制论简介	25
第二节 桥梁施工控制方法	30
第三节 影响桥梁施工控制的因素	32
第四节 桥梁施工控制系统	33
第五节 桥梁施工控制实施方案编制	37
第四章 桥梁施工控制结构分析	39
第一节 概述	39
第二节 桥梁施工过程模拟分析方法	40
第三节 桥梁施工控制结构分析方法	43
第四节 桥梁施工控制结构分析需考虑的有关问题	52
第五章 桥梁施工控制误差分析、参数识别与状态预测	67
第一节 施工控制误差分析	67
第二节 参数识别的内容与方法	68
第三节 状态预测方法	70
第六章 桥梁施工监测	95
第一节 桥梁施工监测系统的建立	95
第二节 施工监测方法	96
第七章 梁式桥梁施工控制	115
第一节 施工控制的目的及内容	115
第二节 施工控制结构分析(计算)	116
第三节 施工监测	120

第四节	施工控制的理论与方法·····	127
第五节	梁桥施工控制实例·····	127
第八章	拱式桥梁施工控制·····	141
第一节	拱式桥梁施工控制特点·····	141
第二节	拱式桥梁的施工控制目标、内容与方法·····	142
第三节	拱桥施工控制实例·····	149
第九章	斜拉桥施工控制·····	180
第一节	概述·····	180
第二节	斜拉桥施工理论分析·····	182
第三节	斜拉桥施工控制方法·····	188
第四节	斜拉桥施工控制实例·····	201
第十章	悬索桥施工控制·····	216
第一节	概述·····	216
第二节	悬索桥施工方法·····	216
第三节	悬索桥施工控制工作内容·····	219
第四节	悬索桥施工控制方法·····	228
第五节	悬索桥施工控制结构分析方法·····	231
第六节	索股线形控制·····	247
第七节	悬索桥施工控制实例(广东虎门大桥)·····	255
第十一章	桥梁服役健康监测与安全控制·····	267
第一节	桥梁健康监测的兴起与发展·····	267
第二节	桥梁健康监测系统·····	270
第三节	桥梁结构损伤识别和状态评估·····	285
第四节	重庆涪陵石板沟长江大桥健康监测简介·····	299
参考文献	·····	311

第一章 概 述

桥梁工程是指桥梁规划、勘测、设计、施工、管养等的工作过程,以及研究这一过程的科学和技术,是土木工程的重要分支。桥梁工程控制涉及的内容很广,本教材重点介绍桥梁施工过程中控制与桥梁服役期的健康监测与安全控制。

第一节 桥梁工程建设与发展

桥梁,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,也是城市基础设施建设中高架、立交,跨越铁道等的重要手段。

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 21 世纪的今天,桥梁工程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、高强度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也取得了突破性进展,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 年就建成了当时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梁桥为 1997 年建成的日本生月大桥(主跨 400m),世界最大跨径的钢悬臂桁梁桥要数 1918 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。20 世纪初,随着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。2001 年建成的南京长江第二大桥北汊桥采用预应力混凝土连续梁,其跨径达到 165m。1998 年,在挪威建成了当时世界最大跨径的预应力混凝土连续刚构桥——挪威 Stolma 桥,跨径为 301m,其中采用了轻质混凝土。我国在钢筋混凝土梁式桥方面虽起步较晚,但发展很快,自 1988 年建成国内首座大跨径连续刚构桥——主跨 180m 的广东洛溪桥以来,跨径 120~250m 的连续刚构桥已广泛应用于大型桥梁建设,2006 年建成通车的重庆长江大桥复线桥,采用钢混混合刚构-连续组合结构梁桥,主跨 330m,跨径位列当今混凝土梁桥世界第一,其中,主跨中央 108m 采用钢结构箱梁。

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处于世界领先地位,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年就建成了当时世界最大跨径的石拱桥——湖南凤凰鸟巢桥,其跨径为120m。目前,世界最大跨径的石拱桥——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年前南斯拉夫建成了当时世界第一并保持了近20年世界纪录的克拉克桥,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——跨径115m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,2005年通车的钢管混凝土拱桥——重庆巫山长江大桥主跨跨径为460m。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;21世纪以来,先后建成了主跨550m的卢浦大桥和主跨552m的朝天门大桥,其跨径分别居世界钢拱桥排名的前两位。

自1955年世界上第一座现代斜拉桥——跨径为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年建成的挪威斯卡恩圣特桥,跨径为530m,至今仍保持着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,1999年建成通车的日本多多罗钢斜拉桥,跨径达890m,成为当时跨径最大的斜拉桥,其纪录保持了9年。我国自1975年在重庆云阳建成第一座预应力混凝土公路斜拉桥(跨径75m)以来,斜拉桥的建设取得了长足进展,现在已是世界上拥有大跨径斜拉桥最多的国家。1993年建成的上海杨浦大桥主跨602m,是当时世界最大跨度的斜拉桥。2008年通车的苏通长江大桥为主跨1088m的斜拉桥,位列当今世界斜拉桥之首。目前,世界跨径排名前50位的斜拉桥中,中国占了一半。跨径前10名的斜拉桥中,除日本多多罗大桥排名第三、法国诺曼底大桥排名第五、韩国仁川大桥排名第八外,其他都在中国,包括2010年12月通车的世界跨径最大(主跨816m)的高低塔混合梁斜拉桥——荆岳长江公路大桥,排第七位;在建的九江长江公路大桥主桥(双塔混合梁斜拉桥,主跨818m),排第六位。

悬索桥(吊桥)属于能充分发挥高强钢材优越性的独特桥型,在500~1000m跨径,仅有斜拉桥与之竞争,是1000m以上桥梁的主要桥型。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的亨伯桥,并成为世界最大跨径的桥梁。而今,世界上跨径最大的桥梁为1998年建成的跨径为1991m的日本明石海峡桥。在中国,现代吊桥建设起步较晚,但发展迅速。1991年,中国建成第一座现代大跨径悬索桥——主跨452m的汕头海湾大桥,之后,虎门大桥、西陵长江大桥、厦门海沧大桥、江阴长江大桥、宜昌长江公路大桥和润扬长江大桥等10多座大跨度悬索桥相继建成。2009年11月,主跨1650m的浙江舟山大陆连岛工程西堠门大桥建成通车,其跨径仅次于日本明石海峡大桥,居世界第二、中国第一,标志着我国悬索桥建设技术进入世界前列。截至2010年10月,中国已建成的千米级悬索桥8座。

从以上可见,不论是国外还是国内,桥梁建设速度与技术水平已达到了相当高的程度,这是否意味着桥梁建设事业的发展已无太大空间了?答案是否定的。随着社会、经济的发展,将有更多的、规模更大的、跨径更大的桥梁等待建设。就中国来看,1988 年开始建设高速公路,原计划 30 年建成的国家高速公路网(总规模约 8.5 万公里,由 7 条首都放射线、9 条南北纵线和 18 条东西横线组成,简称 7918 网),因为经济社会的发展需要,将提前于 21 世纪初完成。同样因为经济社会的发展需要,国家高速公路网将进一步扩大,地方高速公路也已纳入建设计划,预计我国高速公路总里程将达到 12~15 万公里,加之各省级干线路网技术标准也将明显提高,其中,大量跨越江河、深谷、海峡(如琼州海峡桥)等的大跨径、大规模桥梁需要建设。另一方面,随着城市建设步伐的不断加快,城市桥梁建设任务也十分繁重。因此,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,以适应桥梁建设发展的需要。

第二节 桥梁工程建设与施工技术

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。施工是具体实现桥梁规划、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已不存在什么问题,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,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,为增大桥梁跨越能力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另一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。

随着交通事业的发展,大量的公路需要建设,桥梁作为公路的关键工程,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,设计图纸是目标,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着差异,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的值,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(安装)高程高于设计高程一定数值,这些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,为使最终满足设计高程,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中就不那么简单。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,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(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,要求结构内力和高程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(浇筑)1号块件时,当预抛高设置不准,可能影响到以后各节段和合龙高程以及全桥的线形。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高程符合设计要求外,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,在施工过程中主梁高程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高程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,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质量相平衡,以此保持设计线形(设计高程),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,施工控制是必不可少的。

桥梁施工控制是桥梁建设的安全保证。为了安全可靠地建设好每座桥,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;所以施工中的每一阶段,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,如图 1-1 所示。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坠落事故。前不久,国内某大型斜拉桥在合龙前发生了混凝土主梁断裂的重大事故,其经济损失非常巨大。发生事故的原因固然是多方面的,但试想如果该桥的施工控制更有效一些,或许能避免其事故的发生。由此可知,为避免突发事故的发生,能按期、安全地建成一座桥梁,施工控制是有力的保证。换句话说,桥梁施工控制系统就是桥梁建设的安全系统。



图 1-1 即将竣工时垮塌的加拿大魁北克大桥
(1907 年)

第四节 桥梁健康监测与服役安全控制

桥梁作为道路的咽喉,一方面,为保证陆路交通通畅和经济建设与发展起到了关键作用,另一方面,由于缺乏必要的健康监测和服役状态评估,导致桥梁结构得不到及时养护维修,桥梁突然破坏和倒塌事故在世界各地不断出现,造成了巨大的生命与财产损失。如美国华盛顿州的塔科马海峡大桥在远低于设计风速 19m/s 时,发生强烈的风致振动,桥面经历了 70min 振幅不断增大的反对称扭转振动,最终导致桥面折断坠落到峡谷中,如图 1-2 所示。美国俄亥俄河上的一座主要桥梁(Silver Bridge)在 1967 年突然倒塌,造成 46 人丧生;1994 年 10 月韩国圣水(Sungsu)大桥中孔突发崩塌,造成 32 人死亡,17 人重伤;中国广州海印桥的斜拉索以及宜宾南门大桥吊杆突然断裂(图 1-3),造成很大的损失和不良的社会影响等。因此,对桥梁运营状态(健康)进行监测,对服役安全进行控制是刻不容缓的。

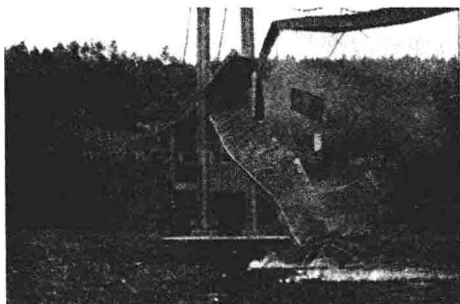


图 1-2 在运营中垮塌的塔科马海峡大桥(1940 年)

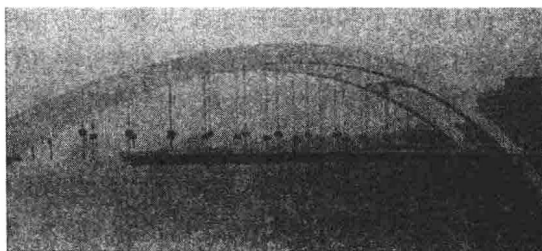


图 1-3 在运营中垮塌的四川宜宾南门大桥(2001 年)

事实上,自 20 世纪 50 年代开始,桥梁工程健康监测与控制的重要性逐渐被人们所认识,但受监测理论与技术发展的限制,实施很不理想。近年来随着大跨径桥梁的轻型化及形式与功能的多样化,对已建成的桥梁采用有效的手段进行监测和健康状况评定、维修和控制损伤,总结新建桥梁的经验和教训,建立长期的安全监测与控制系统,已成为学术界和工程界关注的热点。许多国家都在一些已建和在建的大跨桥梁上进行了有益的尝试。如丹麦曾对总长 1 726m 的 Faroe 跨海斜拉桥施工过程与运营采取了监测措施,同时,在主跨 1 624m 的 Great Belt East 悬索桥上也开始相关的尝试;泰国与韩国也已开始在重要桥梁上安装永久性的实时结构整体与安全性报警设备;我国香港的青马大桥以及内地的虎门大桥、徐浦大桥、江阴大桥、东海大桥等均在运营期间的健康状态实行监测。

由于桥梁,特别是大型、复杂桥梁,其结构和力学特点以及桥梁所处的环境对服役期结构健康的影响很难在设计阶段被完全掌握和预测;所以,只有通过桥梁健康监测获得的实际结构的动静力行为来检验桥梁的设计理论与计算假定;同时,在桥梁健康监测与评估的基础上,对桥梁服役安全实施控制,确保桥梁长期安全服役(运营)。

桥梁健康监测,不只是对传统桥梁检测技术的简单改进,而是运用现代的传感与通信技术,实时监测桥梁服役阶段在各种环境荷载条件下的结构响应与行为,获取反映结构状态和环境因素的各种信息,由此分析结构的健康状态、评估结构的可靠性,为桥梁的管理与维护提供科学依据。

对于具体的一座桥梁,服役安全控制的目的一致,但由于其本身的结构特点、使用环境不同,其健康监测重点、监测内容、规模、方式和手段等也各不相同。

近 20 年来,运用整体健康监测对桥梁结构进行系统化检查与评估的研究工作已有很大发展。目前现代桥梁健康诊断试验与研究取得的进展主要有以下几个方面。

(1)在车重、车速及支承对桥梁模态参数的影响方面,有较深入研究的理论基础,可以证明用环境振动法进行桥梁自动检测的可行性。

(2)人们对桥梁健康监测的重视程度逐年增加,越来越多的新建桥梁安装桥梁健康监测系统,不但用于运营阶段桥梁状态的监测,而且从施工控制开始完整、连续的记录结构的各种变化信息。

(3)监测内容全面完整,不仅对结构本身的状态和行为(如应力、位移、加速度、动力特性等)进行监测,而且还对环境条件(如风、地震、温度、车辆荷载等)进行记录监测和分析。

(4)监测仪器设备多元化、先进化,在资金条件允许下,很多监测系统都采用当时较先进的仪器,如光纤传感器和 GPS 等。

(5)监测系统本身的整体功能在不断完善,大部分监测系统都具有快速大量的信息采集与传输通信能力,有的还实现了通过计算机网络远程传输和控制、分析、诊断功能。

(6)开发了各种基于频率、振型、模态曲率、模态应变等改变量的损伤识别定位技术,在处理方法上探寻了 MAC(模态保证准则)法、COMAC(坐标模态保证准则)法、柔度矩阵法、矩阵振动修正法、非线性迭代法及神经网络法等。

对结构整体监测的理论研究,主要集中于利用基于环境结构振动特性或响应的变化进行损伤识别的技术。结构在各种激励下的动力响应是其整体状态的一种量度,当结构的质量、刚度和阻尼特性因结构损伤(质量退化)而发生任何变化,其振动响应也将发生变化,而这一变化可以通过振动测试方法测得。利用振动试验分析进行结构安全监测正是基于这一原理。

桥梁健康监测及状态评估技术的研究,目前仍然处于探索阶段,需要多学科的进一步交叉

与发展,特别是大型桥梁的动力测试技术和信号处理技术。基于环境结构振动特性或响应的变化进行损伤识别技术的出现为最终实现这一目标展现了美好的前景,而推动这一技术在实际中的真正应用,基本实现大型桥梁健康监测(长期、定时、自动、经济、不妨碍交通)的要求,尚有许多问题有待研究解决。此项技术的最终成功应用,其在结构安全、可靠(对地震,强风等强烈自然灾害后结构的状态进行快速和有效的评估,为维修决策提供依据),延长结构使用寿命(提早发现不定时的损伤累积,为有效遏制事态严重化提供保障)和科学探索(揭示结构在自然环境中真实的结构响应以验证现有桥梁理论)等方面将产生重大的技术变革。

第五节 桥梁工程控制的主要任务

一、桥梁施工控制与桥梁施工质量控制的关系

桥梁施工质量控制是对施工全过程,各工序进行检查、监督和管理、制止影响工程质量的行为和各种不利因素的存在,使所完成的工程符合设计图纸、技术规范要求和验收标准。该项工作通常通过企业自控、社会监理、政府监督来实现。

桥梁施工控制就是对桥梁施工过程结构的受力、变形及稳定进行监控,使施工中的结构状态处于最优状态,保证施工过程安全和成桥状态(包括内力 and 线形状态)符合设计、规范要求。施工控制通常由施工控制单位(小组)来完成。

从上述两者所作的工作和要达到的目的来看,桥梁施工控制与桥梁施工质量控制目标是一致的,都是保证桥梁建设质量的手段。桥梁施工质量控制重在“微观控制”,而桥梁施工控制重在“宏观调控”,是桥梁施工质量控制的补充与前提。以悬臂施工钢筋混凝土梁段为例,质量控制重在钢筋(钢绞线)自身质量控制、钢筋制安精度控制、模板安装精度控制、混凝土原材料及混凝土拌制质量控制、混凝土浇筑、保养质量控制、成品结构混凝土强度检验、预应力张拉控制、管道灌浆质量控制等;而施工控制则是根据已成梁体状态,在考虑各种影响因素后为后续施工梁段提供立模高程、在梁段施工中监测结构内力情况和变形情况,为施工能否继续进行或下一梁段立模高程发出指示。可见桥梁施工控制属于施工质量与安全控制范畴,但不能完全替代质量控制,它为质量控制的总体目标实现提供保障。在一些小跨径、小规模桥梁施工中,如果不实施单独的施工控制,则在施工质量控制中必然要包含施工控制的内容。

二、桥梁健康监测与桥梁使用安全控制的关系

桥梁健康监测的主要任务是通过监测桥梁服役期间结构受力及几何状态的监测,为桥梁工程在正常运营及特殊条件下(如恶劣气候、大件交通等)的结构安全状态发出预警信号,为桥梁养护、维修与管理决策提供依据。

桥梁从交付使用开始,其使用价值(特别是安全性)就随着时间的推移而不断降低,当使用价值降至安全限值时,必须通过维修加固,维持或提高其使用价值,该过程在设计使用期限内持续发生。桥梁使用安全控制就是根据桥梁状态的监测结果,对桥梁的结构状况与安全进行评估与预测,从而对桥梁是否需要控制交通、是否需要特殊检查、是否需要维修加固等作出决策,以便维持桥梁的正常使用价值,使桥梁长期使用安全处于控制之中。

可见,桥梁健康监测是桥梁安全控制的基础,桥梁安全控制则是健康监测的目的。健康监测重在桥梁受力、几何状态等参量的获取;而安全控制是针对桥梁结构体系、设计、施工与管养

具体情况,结合监测参量,从理论上评估桥梁的健康或寿命状况,为保证桥梁结构与运营安全所采取的维护加固等措施决策提供依据。值得指出的是桥梁健康监测不能替代常规的桥梁养护,它是桥梁,特别是大跨径桥梁养护的重要补充与特殊手段。

三、桥梁施工控制的主要任务

桥梁施工控制的任务就是对桥梁施工过程实施控制,确保桥梁在施工过程中结构的内力和变形始终处于安全范围内,确保桥梁施工过程安全和成桥状态(包括成桥线形与成桥结构内力状态)符合设计要求。

桥梁施工控制围绕上述控制任务而展开,不同类型的桥梁,其施工控制工作内容不一定完全相同,但从总体上来看,均包括下列几个方面。

1. 变形控制

不论采用什么施工方法,桥梁结构在施工过程中总要产生变形(挠曲),并且结构的变形将受到诸多因素的影响,极易使桥梁结构在施工过程中的实际位置(立面高程,平面位置)状态偏离预期状态,使桥梁难以顺利合龙,或成桥线形形状与设计要求不符,所以必须对其实施控制,使其结构在施工中的实际位置状态与预期状态之间的误差控制在容许范围,成桥线形状态符合设计要求。对施工过程中的误差容许值需根据具体桥梁的施工控制需要具体确定。对成桥状态(包括合龙状态)则需满足设计与规范的要求。

2. 应力控制

桥梁结构在施工过程中以及在成桥状态的受力情况是否与设计相符合是施工控制要明确的重要问题。通常通过结构应力的监测来了解实际应力状态,若发现实际应力状态与理论(计算)应力状态的差别超限就要进行原因查找和调控,使之在允许范围内变化。结构应力控制的好坏不像变形控制那样易于发现,若应力控制不力将会给结构造成危害,严重时将使结构发生破坏(国内某斜拉桥在合龙前的破坏就是一个例子),所以,它比变形控制显得更加重要,必须对结构应力实施严格监控。目前,对应力控制项目和精度还没有明确的规定,需根据实际情况确定。

3. 稳定控制

桥梁结构的稳定性关系到桥梁结构的安全,它与桥梁的强度有着同等的,甚至更重要的意义。

国外曾经有过不少桥梁在施工过程中由于失稳而导致全桥破坏的例子,最典型的要数加拿大的魁北克(Quebec)桥。该桥在南侧锚碇桁架快要架完时,由于悬臂端下弦杆的腹板屈曲而发生突然崩塌坠落。我国四川州河大桥也因悬臂体系的主梁在吊装主跨中段时承受过大的轴力而失稳破坏。因此,桥梁施工过程中不仅要严格控制变形和应力,而且要严格控制施工各阶段结构构件的局部和整体稳定。

目前,桥梁的稳定性已引起人们的重视,但主要注重于桥梁的稳定计算,而对施工过程中可能出现的失稳现象还没有可靠的监测手段,尤其是随着桥梁跨径的增大,受动荷载或突发情况的影响,还没有快速反映系统,所以,很难保证桥梁施工安全。为此,应建立一套完整的稳定监控系统。目前主要通过稳定分析计算(稳定安全系数),并结合结构应力、变形情况来综合评定、控制其稳定性。

桥梁的稳定安全系数是衡量结构安全的重要指标,但现行规范中尚未详细列出不同材料的不同结构,在不同工况下的最小稳定系数,有待今后完善。

施工中,除桥梁结构本身的稳定性必须得到控制外,施工过程中所用的支架、挂篮、缆索吊装系统等施工设施的各项稳定系数应满足要求。

4. 安全控制

桥梁施工过程中安全控制是桥梁施工控制的重要内容,只有保证了施工过程中的安全,才谈得上其他控制与桥梁的建成。其实,桥梁施工安全控制是上述变形控制、应力控制、稳定控制的综合体现,上述各项得到了控制,安全也就得到了控制(由于桥梁施工质量问题引起的安全问题除外)。为了突出其重要性,这里将其列举出来介绍。由于结构形式不同,直接影响施工安全的因素也不一样,在施工控制中需根据实际情况,确定其安全控制重点。

从具体工作来看,一般的桥梁施工控制包括下列内容。

- (1) 施工过程各阶段结构理想状态的确定。
- (2) 施工过程各阶段的力学、几何等监测。
- (3) 根据施工过程的力学、几何等监测结果,对施工阶段结构的安全性作出评价。
- (4) 将施工中的结构实际状态与理想状态进行比较,当其偏差超出限值时对结构状态做必要的调整。
- (5) 根据测试结果,对误差进行预测,采用参数估计方法对与实际状态不相符合的边界条件和结构设计计算参数进行调整,并修正结构的理想状态。
- (6) 适时采取与桥梁施工安全与质量有关的技术措施。

四、桥梁健康监测与服役安全控制的主要任务

现代桥梁健康监测是指采取有效的监测手段,进行桥梁服役期结构的损伤状态识别、定位与参量获取,实时进行桥梁结构的功能定量评估与桥梁结构的使用风险趋势预测,为桥梁管养与安全控制提供直接依据。桥梁服役安全控制则是在健康监测基础上,实现对桥梁结构营运能力、承载能力、耐久能力的评估和预测,对桥梁结构存在的缺陷进行及时的加固处理,通过合理、科学的养护管理与安全预警,保障桥梁结构服役期间的健康与安全。具体任务体现在如下几个方面。

- (1) 在大桥竣工后进行结构安全验证测试,建立桥梁原始健康档案。
- (2) 对桥梁服役状态进行在线监测,及时发现桥梁病害。
- (3) 确定桥梁损伤部位并进行定性和定量分析,在突发事件之后评估桥梁的剩余寿命,为桥梁养护管理与维修加固决策提供依据和指导。
- (4) 在桥梁运营状况严重异常时触发预警信号,有效预防桥梁安全事故,保障桥梁结构及运营安全。
- (5) 根据实时监测数据和分析结论,为提高人们对大型复杂结构的认识(如真正的环境荷载和桥梁动力响应)提供科学、可靠的依据;为实现桥梁结构的“虚拟设计”奠定基础。
- (6) 保证桥梁结构的使用寿命,减少经济损失。

第六节 桥梁工程控制的发展现状与趋势

一、桥梁施工过程控制

武汉长江大桥和重庆长江大桥在施工过程中所做的应力、高程的调整,实际上就是桥梁施