



桥梁

王继成 向中富 彭 凯

编著

罗 杰 杜小平

预应力及索力张拉测控技术

Qiaoliang

Yuyingli ji Suoli Zhangla Cekong Jishu



人民交通出版社
China Communications Press



王继成 向中富 彭 凯

编著

罗 杰 杜小平

桥梁

预应力及索力张拉测控技术

Qiaoliang

Yuyingli ji Suoli Zhangla Cekong Jishu



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书对桥梁预应力和索力张拉施工技术现状以及测控方法手段进行了系统总结和分析,提出了桥梁预应力和索力“精细化”施工理念及“全程化、系统化、定量化、智能化”测控技术原则,构建了张拉施工智能测控体系,并结合大量应用实例,介绍了智能测控体系的软硬件组成、功能特点、操作方法和应用效果等。

本书主要用于指导桥梁预应力和索力张拉“精细化”施工,也可供相关专业高校师生和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁预应力及索力张拉测控技术 / 王继成等编著.

—北京:人民交通出版社,2010.4

ISBN 978-7-114-08296-2

I. ①桥… II. ①王… III. ①桥梁结构:预应力结构
—桥梁工程—工程质量—质量检验②桥梁结构:预应力结
构—桥梁工程—工程验收 IV. ①U445

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第064883号

书 名:桥梁预应力及索力张拉测控技术

著 作 者:王继成等

责任编辑:李 萍 李 农

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门内大街斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京交通印务实业公司

开 本:787×960 1/16

印 张:11.5

字 数:196千

版 次:2010年4月第1版

印 次:2010年4月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08296-2

印 数:0001~3500册

定 价:30.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

预应力技术是现代桥梁工程的核心技术之一。桥梁预应力和索力的建立对相关的材料、器具、设备、人员和施工的技术要求很高。对大量在役桥梁的调查和检测表明,相当部分的桥梁质量隐患来源于预应力和索力张拉施工的质量控制不力。目前国内桥梁预应力和索力张拉施工质量的现场控制大都还停留在传统的认识阶段和技术状态,有限的实桥预应力施工过程检测分析往往因为造价较高、配套不齐、操作困难、效率低下而难以实现规模化的工程应用。

总体上看,目前国内桥梁预应力和索力张拉施工受现场条件和人为因素干扰较多,具有较大的随意性和变异性,施工质量稳定性和可靠度较低,亟待在操作流程的规范性和精准度上予以加强。因此,应积极利用现代化的过程测控手段,实施严格的过程验收评估标准,推动桥梁预应力和索力张拉“精细化”施工,为工程质量“百年大计”提供有力的技术保障,这也是出版本书的宗旨。

针对上述问题,重庆交通大学等单位合作开展了持续深入的理论分析、试验研究和产品开发、应用验证,借助现代检测技术和信息智能手段构建了“桥梁预应力及索力张拉施工智能测控”技术体系,形成系列化配套的软、硬件产品系统,并在大量实桥应用的基础上编制了重庆市公路工程行业标准《桥梁预应力及索力张拉施工质量检测验收规程》(CQJTG/T F81—2009),为桥梁预应力、索力张拉“精细化”施工提供了高效可靠的技术支撑和质量保障。本书与该规程配套出版,对该规程条文的技术背景做了全面、系统的阐释,为规程的贯彻执行和推广应用起到指南和向导作用。

本书由重庆交通大学、重庆忠诚预应力工程技术有限公司和重庆高速公路集团有限公司的科研、技术和管理人员合作完成。限于作者水平,书中疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教。作者联系方式,电子邮箱:zcjsgs@163.com 或 piqueuni@163.com;书面来函请寄:重庆市南岸区学府大道66号,教育部山区桥梁结构与材料研究中心预应力技术研究部(邮编:400074)。

作 者

2010年2月

目 录

第一章 现代桥梁预应力和索力	1
第一节 预应力混凝土桥梁与预应力技术	1
第二节 缆索承重桥梁与索力张拉调整	14
第二章 预应力和索力与桥梁病害	21
第一节 预应力混凝土桥梁和缆索承重桥梁常见病害案例	21
第二节 桥梁病害与预应力及索力张拉施工的关联	32
第三章 预应力、索力张拉施工技术现状分析与对策	34
第一节 张拉施工技术现状	34
第二节 传统张拉施工技术存在的问题	36
第三节 传统张拉施工过程常见质量隐患	38
第四节 对传统张拉施工工艺的评价	41
第五节 预应力及索力张拉施工智能化测控体系的提出	42
第四章 预应力及索力张拉智能测控技术体系组成	49
第一节 核心技术	49
第二节 系列软硬件成套产品	49
第三节 张拉施工智能测控体系执行的相关规范、规程条文	55
第五章 预应力及索力张拉智能测控技术体系功能	60
第一节 锚具成品质量检测	60
第二节 梳编穿束	62
第三节 预应力、索力张拉施工跟踪控制	63
第四节 斜拉桥索力检测调整	64
第五节 预应力、索力张拉施工质量检测	65
第六节 预应力、索力张拉施工质量智能验收评估系统	68
第六章 预应力器材及其质量检测	76
第一节 预应力筋	76
第二节 锚具、夹具和连接器	82
第三节 管道	85
第四节 混凝土	87
第五节 水泥浆	89



第七章 预应力张拉施工准备	90
第一节 管道布置和安装	90
第二节 锚具、夹具和连接器安装	91
第三节 混凝土浇筑	92
第四节 摩阻测试	93
第五节 预应力筋安装	95
第六节 张拉仪器标定	99
第七节 张拉伸长值计算	100
第八节 其他准备工作	101
第九节 张拉安全注意事项	102
第十节 张拉前检查要点	102
第八章 预应力张拉	104
第一节 张拉施工跟踪控制	104
第二节 预应力筋锚固	111
第三节 张拉施工注意事项	113
第九章 预应力管道压浆与封锚	116
第一节 预应力管道压浆	116
第二节 封锚	120
第十章 预应力张拉施工质量检测验收	122
第一节 检验频率与标准	122
第二节 检验内容	125
第三节 验收评估	129
第四节 补救措施	131
第五节 连续刚构桥竖向索预应力施工控制	132
第六节 连续 T 梁、箱梁桥现浇连续段预应力施工控制	133
第七节 环形束预应力施工控制	133
第十一章 索力张拉施工测控	134
第一节 索的制作与安装	134
第二节 索力张拉施工测控方法	136
第三节 有效索力检验	137
第四节 成桥线形调索	138
第十二章 应用实例	139
第一节 梳编穿束实例	139

第二节	张拉跟踪控制实例.....	148
第三节	有效预应力检测实例(阆中马嘯溪嘉陵江大桥)	152
第四节	智能验收评估系统应用实例.....	155
第五节	三峡库区某长江大桥.....	158
第六节	重庆市某嘉陵江大桥(合龙段)	168
参考文献		173

第一章 现代桥梁预应力和索力

第一节 预应力混凝土桥梁与预应力技术

预应力混凝土(PC),就是构件在使用荷载作用前,预先人为地在混凝土中引入内部应力,且其值和分布能将使用荷载产生的应力抵消到一个合适的程度。也就是说,按照一定的应力大小和分布规律,预先对钢筋混凝土构件施加压应力(或拉应力),使之建立一种人为的应力状态,以便抵消使用荷载作用下产生的拉应力(或压应力),从而使混凝土构件在使用荷载作用下不致开裂,或者减小裂缝开展的宽度。

预应力混凝土结构经过半个多世纪的发展,从理论、材料、工艺到应用,都取得了巨大的发展和成就。其设计和施工技术的发展,在桥梁结构方面最具有代表性。

一、预应力混凝土桥梁的发展

1. 现代预应力混凝土桥梁的诞生

1886年,美国人 Jackson P. H. 提出了在圬工拱桥中使用预张拉紧的钢系杆的概念。

1888年,德国人 Doebling C. E. W. 发明了混凝土内埋置预应力钢筋的板和小跨径梁,并获得专利。

1908年,美国人 Stainer C. R. 认识到混凝土徐变和收缩对预应力损失的影响,并提出后期补张拉的方法。

1926年,法国人 Freyssinet E. 在认识到普通钢筋无法克服混凝土徐变收缩造成的预应力损失后,开始采用高强钢丝(极限强度 1725MPa,屈服强度 1240MPa,与今天使用的高强钢材强度基本相当)。

1937年,第一座体外预应力混凝土桥梁——德国的萨克森州奥厄公路桥建成,为体外预应力混凝土悬臂桥,跨径布置为 25.20m + 69.00m + 25.20m;1938年,第一座体内预应力混凝土桥梁建成。

1939年, Freyssinet E. 发明了锥塞锚体系用于后张法预应力混凝土锚固。



该体系后被称为弗氏锚体系(图 1-1),弗氏本人也被认为是现代预应力混凝土(桥梁)之父。

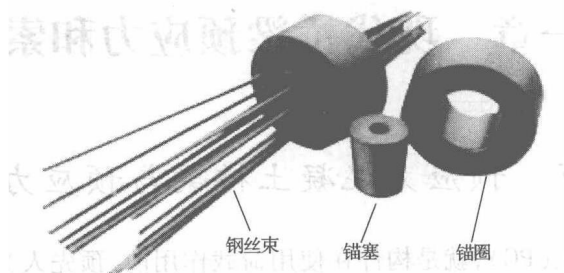


图 1-1 弗氏锚体系

从预应力混凝土概念的提出到预应力混凝土桥梁结构的工程实现历程来看,工业化生产的预应力材料(包括高强混凝土和高强钢材)和器具、设备起到了关键性的基础支撑作用。没有高强预应力材料和可靠的器具、设备,就难以在混凝土结构中建立并持久保存期望的预应力,也就难以实现轻型、大跨和重载的预应力混凝土桥梁工程奇迹。因此,预应力作为一个非常古老的概念,虽然早就蕴含在人们的日常生活当中(比如人们对木桶桶箍、自行车辐条进行预张紧以抵消使用中的不利应力状态等),但只有借助现代材料、设备等技术手段解决了施工和耐久使用等实践层面的问题,才能走向大规模的工程应用,进而使得桥梁等结构工程的面貌得以深刻地改观。

2. 第二次世界大战后桥梁工程中预应力混凝土技术的突飞猛进

(1) 第二次世界大战后欧美大量桥梁的修复和新建

1948 年,法国人 Freyssinet E. 采用预应力混凝土技术修复了巴黎以东马恩河上的 5 座桥梁。

第二次世界大战后,预应力混凝土技术在比利时、英国、德国、瑞士、荷兰等国也快速发展;1949~1953 年间修建的 500 座桥梁中,就有 350 座预应力混凝土桥梁。

1950 年,比利时设计建造了 Sclayn 等数座体外预应力桥;1952 年,古巴建造了美洲第一座体外预应力桥——Canas 河大桥,该桥采用三跨连续箱梁结构,跨径布置为 $15\text{m} + 76\text{m} + 15\text{m}$ 。

20 世纪 70 年代中期,世界上第一座采用后张法预应力筋的双预应力混凝土简支梁桥——阿尔姆桥在奥地利建成,其跨径达到 76m ,高跨比为 $1/30.4$ 。

20 世纪 80 年代以后,国外建成的大跨度预应力连续刚构桥有澳大利亚给

脱威桥(主跨 260m)、挪威 Stolma 桥(主跨 301m)和拉夫特桥(主跨 298m)。

(2) 预应力技术用于发展悬臂现浇施工方法

1950 和 1951 年,Finsterwalder 与联邦德国的 Dyckerhoff 和 Widmann 公司,在 Neckarreis 等桥的设计和施工中首次将预应力混凝土技术用于悬臂现浇施工桥梁。

1962 年,不设中间铰的悬臂现浇施工预应力混凝土连续桥梁被许多国家认可和接受。

20 世纪 70 年代之前,美国的分段施工预应力混凝土桥梁绝大多数采用悬臂现浇施工技术。图 1-2 为多跨连续刚构桥利用平衡悬臂现浇施工的情形。

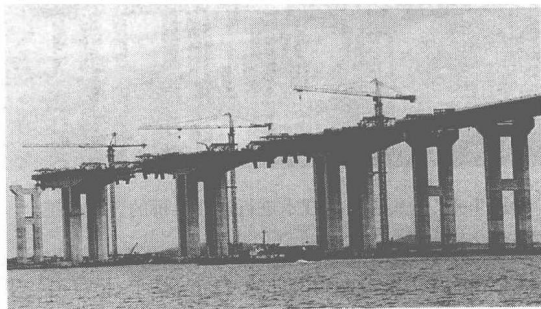


图 1-2 利用预应力技术进行多跨连续刚构桥的平衡悬臂现浇施工

(3) 预应力技术用于节段预制拼装施工

1945 ~ 1948 年,Freyssinet E. 首次采用分段预制拼装施工法。

1952 年,Freyssinet E. 的公司第一次采用了设置剪力键的密接匹配预制法。

1962 年,Jean Muller 对节段剪力键构造、密接匹配预制及拼装工艺进行了改进,从此该技术从法国推广到全世界。图 1-3 为连续梁桥的预制节段拼装。

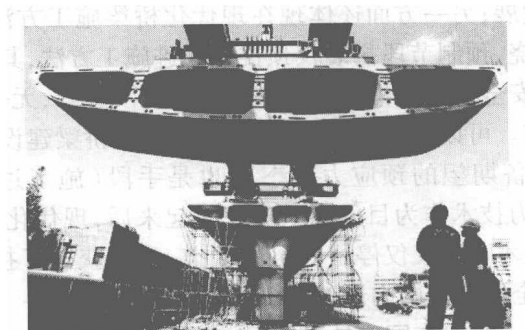


图 1-3 利用预应力技术进行连续梁桥的预制节段拼装



(4) 预应力技术用于顶推施工方法

1962 ~ 1963 年, Leonhardt 等在委内瑞拉的 Rio Caroni 桥施工中首次使用了顶推施工技术。

1972 年, 加拿大的 Val Ristel 桥又发展了预应力混凝土弯梁桥曲线顶推技术。图 1-4 为连续梁桥的顶推施工。



图 1-4 利用预应力技术进行连续梁桥的顶推施工

(5) 预应力桥梁的标准化

20 世纪 40 年代后期, 标准设计的预应力混凝土工字梁、T 形简支梁得到了较大发展, 如美国国家公路与运输协会 (AASHTO)、预应力混凝土协会 (PCI) 推荐的各类标准设计图; 更大跨径和体量的桥梁预制梁 (件) 标准设计也被 PCI 和波特兰水泥协会 (PCA) 推荐, 以适应桥梁建设机械化、标准化和快速化的要求。

第二次世界大战使得欧洲的交通基础设施破坏殆尽, 建设和发展成为战后世界各主要国家的政策重点, 这就为刚刚诞生的预应力混凝土桥梁结构提供了有利的发展契机和广阔的应用空间。第二次世界大战后桥梁预应力技术的发展一方面体现在结构体系和构造措施方面的进步, 如预应力混凝土连续梁桥、连续刚构桥的出现和发展; 另一方面还体现在现代化桥梁施工方法和工艺的突飞猛进, 如平衡悬臂现浇、预制节段拼装及顶推等先进施工方法, 其实施过程本身, 包括施工组织、施工安全以及结构线形和应力状态的演进等, 无一不依赖于预应力的精确施加和调控。可以说, 在现代化预应力混凝土桥梁建设过程中, 预应力既是目的 (成桥应具备期望的预应力状态), 也是手段 (施工过程的核心技术环节)。只有当预应力技术作为目的和手段统一起来后, 现代化轻型、大跨和重载预应力混凝土桥梁才不再仅仅停留在可能性上, 而是获得了技术和经济上的现实可行性, 进而在全世界范围内迅速得到推广应用。

3. 预应力混凝土桥梁在国内的发展

我国从解放后不久就开始研究预应力混凝土在桥梁上的应用。1956 年, 在

东陇海铁路上,成功修建了一座 28 孔、跨径为 23.8m 的预应力混凝土铁路桥。1957 年,在京周公路上,又修建了第一座跨径为 29m 的简支 T 形梁预应力混凝土桥。从此以后,我国预应力混凝土结构在桥梁中的应用得到了迅速的发展。

1980 年建成的重庆长江大桥,是主跨为 174m 的三向预应力混凝土箱梁结构。1988 年在浙江飞云江上修建的预应力混凝土 T 形梁桥,最大跨径达 62m。1990 年建成的云南六库怒江桥,采用预应力混凝土连续梁,最大跨径达 154m。

1988 年建成的广东洛溪大桥(主跨 180m),开创了我国修建大跨径预应力混凝土连续刚构桥的先例。十多年来,全国范围内建成的预应力混凝土梁桥,跨径大于 120m 的有 74 座。世界已建成 17 座跨度大于 240m 的预应力混凝土梁桥,中国占 7 座。1997 年建成的虎门大桥辅航道桥(主跨 270m),其跨度为当时预应力混凝土连续刚构桥世界第一。近几年相继建成了泸州长江二桥(主跨 252m)、重庆黄花园大桥(主跨 250m)、重庆高家花园大桥(主跨 245m)、贵州六广河大桥(主跨 240m)等等,近期还将建成一大批大跨径的预应力混凝土连续刚构桥。2006 年 8 月 28 日竣工通车的重庆石板坡长江大桥复线桥,主通航孔采用预应力混凝土—钢组合连续刚构,跨径达 330m,成为同类桥梁世界第一跨。我国大跨径预应力混凝土连续刚构桥和连续梁桥的建桥技术,已居世界领先水平。

4. 预应力混凝土技术的比较优势

与普通钢筋混凝土相比,预应力混凝土具有下列明显优势:

(1) 提高构件的抗裂性、刚度和耐久性

在预应力混凝土构件中,由于预应力的存在,构件在使用荷载作用下不会出现或大大推迟出现裂缝,构件全截面工作,刚度得到充分利用;内埋钢筋得到更好的锈蚀防护,构件耐久性提高。

(2) 节省材料、降低自重

预应力混凝土结构采用高强混凝土和高强钢材,且可实现全截面工作,因此高强材料的刚度和强度特性能够得到充分发挥,材料用量和结构自重大幅降低,为大跨、重载结构的实现奠定了基础。

(3) 减小混凝土梁的竖向剪力和主拉应力

预应力混凝土梁的纵向竖弯预应力筋可抵消支座附近弯剪区段的部分荷载剪力;竖向预应力筋和纵向预应力筋分别在各自方向上提供的混凝土预压应力可以大大减小荷载作用下的主拉应力,这就使得主梁腹板厚度可以减薄,主梁自重进一步减小。

(4) 结构质量安全可靠



施加预应力时,钢材和混凝土同时经受了一次强度检验,材料和工艺缺陷往往在施工阶段可以暴露出来并及时得以解决,为后期使用阶段提供了可靠的工程质量保障。

(5)催生了新的施工方法和结构体系

此外,预应力还可以改善结构的耐疲劳性能。由于在钢筋截面上保存有较高的预应力值,由使用荷载引起的应力变幅相对较小,从而引起疲劳破坏的可能性也会降低。

另一方面,也应该看到预应力混凝土技术工艺更复杂,需要的专用设备更多、费用更高,预应力反拱度随时间发展难以估计和控制等,预应力混凝土技术的使用也应有适度的范围和边界。

二、预应力混凝土桥梁的技术特点

如果要用一句话来概括预应力混凝土桥梁的技术特点,那就是:预应力是预应力混凝土桥梁的生命。这一技术特点可以从以下几个方面来进行理解。

1. 有关预应力基本概念的不同观点

对预应力在预应力混凝土桥梁中的核心地位和作用,工程界从不同角度出发,形成了不同的观点。

(1)预应力使得混凝土变成拉压性能基本对称的线弹性材料

这也是预应力混凝土之父——Freyssinet E. 本人的基本观点。没有预存压应力的混凝土材料是抗压不抗拉的脆性材料,只能用于受压结构和小跨受弯结构;然而一旦通过张拉预应力筋给混凝土施加预压应力,得到的预应力混凝土就可以根据需要获得期望的抗拉性能,赋予结构设计和施工以极大的灵活性。

由此观点,产生了无拉应力(或称全预应力)的预应力混凝土结构设计、施工准则。即在施工或使用阶段,通过预应力平衡和抵消施工或使用荷载产生的拉应力,结构混凝土的应力叠加效果为压应力,因而不会再出现混凝土受拉开裂的情况,构件截面刚度可以得到充分利用,结构后期耐久使用性能也能得到更好的保障。无拉应力准则也是目前大多数预应力混凝土桥梁设计和施工遵循的通行准则。

然而,要真正达到无拉应力准则的要求,就需要首先对施工或使用荷载在结构中的作用效应进行准确的预估,并基于荷载应力的特性设计适当的预应力大小和分布;更为重要的是,需要通过精细化的预应力张拉施工,使得桥梁结构自预应力工程开始直至竣工成桥,其应力状态始终能够准确实现设计意图,全程满足无拉应力准则。众所周知,预应力张拉施工工序多、技术难度较大,结构获得

的有效预应力取决于材料、器具、设备及张拉操作工艺等诸多细部环节,需要有效率可靠的全过程控制手段进行严格规范和跟踪调节,才能确保预应力张拉的对称、均匀和精准到位,这就对预应力张拉测控技术提出了很高的要求。

(2) 预应力使得高强钢材和高强混凝土有效匹配工作

这种观点将预应力混凝土视为由高强钢材和高强混凝土匹配结合形成的复合材料。预应力混凝土中常用高强钢材的极限抗拉强度在 1800MPa 左右,在强度充分利用之前需经历很大的伸长应变。如果按照普通钢筋混凝土的方法简单地将高强钢筋包裹在混凝土里,则混凝土在钢筋应力达到强度之前将会出现非常严重的开裂,不能满足结构耐久使用的要求。

在普通钢筋混凝土结构中,直到荷载作用下混凝土开裂后钢筋应力才会有明显的增加,可以认为钢筋是在被动地发挥抗拉作用。而在预应力混凝土结构中,高强钢筋在使用前就已被张拉至很高的应力,余留对应于承担使用荷载的拉伸应变被限制在合适的范围,由此可以认为高强钢筋是在主动发挥抗拉作用:即利用自身抗拉强度和极限拉应变均很高的优势,预支相当部分的拉伸应力和应变用于改善混凝土抗拉性能,从而使得高强钢材和高强混凝土在使用荷载下能够有效匹配工作。将预应力引入钢筋混凝土结构,既能充分利用高强材料性能,又能实现混凝土不开裂或有限开裂,结构耐久性得到可靠的保障。

(3) 预应力实现荷载平衡

该观点由已故美籍华人林同炎首先提出,认为在混凝土结构中预加应力的目的是为了平衡施加在结构上的外荷载,或者认为预应力的作用等效于与外荷载反向的预加荷载。不同的预应力筋布置线形等效为不同形式的反向荷载,如与构件轴线平行的预应力筋等效为轴向压力,主梁中抛物线形的预应力筋等效为竖直向上作用的均布荷载,等等。预应力实现荷载平衡的观点概念清晰简洁,大大简化了复杂结构的预应力设计和分析工作,在实践中具有较大的应用价值。

2. 使用日趋复杂的三向预应力

最初预应力混凝土结构中只布置纵向预应力筋,用于平衡荷载在桥梁纵向产生的弯矩效应。随着桥梁跨径增大,截面形式由简单的实心矩形向 T 形、空心箱形等形式发展,主梁竖向抗剪以及桥面板横向局部受力越来越受到关注,相应地,竖向预应力和横向预应力逐渐被引入混凝土桥梁中,分别用于抵抗荷载在主梁腹板产生的主拉应力和桥面板局部横向荷载弯矩。三向预应力的功能要求、布置方式和施工条件均不相同,在工程实践中应视各自特点,采取有针对性的合理措施。

(1) 纵向预应力



纵向预应力是实现预应力混凝土桥梁纵向抗弯的关键手段,对成桥线形和应力状态起到决定作用,直接影响后续桥梁的安全正常使用和耐久可靠性能。

纵向预应力的配束方案通常根据受弯梁的弯矩包络图确定。按照结构挠度计算的基本理论,预应力混凝土桥梁主梁挠度由预加力引起的上挠度和外荷载(静、动载)所产生的下挠度两部分组成,即:

$$w_1 = -\eta_{\theta,pe}\delta_{pe} + \eta_{\theta,Ms}w_{Ms} \quad (1-1)$$

式中: w_1 ——荷载短期效应组合并考虑长期效应下的总挠度;

δ_{pe} ——永存预加力所产生的上挠度;

w_{Ms} ——由荷载效应组合计算的弯矩值引起的挠度值;

$\eta_{\theta,pe}$ ——预加力反拱设置考虑长期效应的增长系数;

$\eta_{\theta,Ms}$ ——短期荷载效应组合考虑长期效应的挠度增长系数。

由式(1-1)可见,为保证桥梁线形与安全,纵向预应力所产生的上挠度应能抵消荷载引起的下挠度;当预加力产生的长期反拱值小于按荷载短期组合计算的长期挠度时,应设置预拱度。

合理确定预加力作用点的位置对预应力混凝土梁至关重要。在弯矩最大的跨中截面处,应尽可能使预应力钢筋的重心降低,使其产生较大的预应力负弯矩($M_p = -N_p e_p$)来平衡外荷载引起的正弯矩。如令 N_p 沿梁近似不变,则对于弯矩较小的其他截面,应相应地减小偏心距 e_p 值,以免由于过大的预应力负弯矩而引起构件上缘的混凝土出现拉应力。通过精准的预应力张拉施工, N_p 作用点的位置应严格按设计要求落在束界区域内,以保证构件在最小外荷载和最不利荷载作用下,其上下缘混凝土均不会出现拉应力。

纵向预应力还会引起横向变形。一方面,由于纵向预应力张拉吨位较大、作用较为集中,根据泊松比效应,混凝土产生的横向变形也较大;若构造钢筋不足、预压区混凝土厚度过小,可能会引起混凝土沿预应力筋方向出现受压开裂。另一方面,在主梁同一断面上,如果纵向预应力张拉施工的对称均匀性不够好,可能会造成主梁横向挠曲甚至发生扭转变形,导致主梁线形和应力状态偏离正常设计要求。

对大跨桥梁,纵向预应力束连续长度较大,单束含筋量多、张拉吨位高,力筋布置受束界严格限制,预应力筋的管道定位、梳编穿束、张拉和管道灌浆难度均很大,管道摩阻引起的预应力损失受很多不确定性因素影响难以准确估计,预应力张拉施工的跟踪检测和实时控制显得尤为重要。近年来,针对这一问题的研究逐渐引起工程界的重视,一些研究对纵向预应力筋长束张拉施工中初应力、控

制应力持荷时间等工艺参数进行了较为详细的试验测试,并推荐了相应的控制手段和措施。

(2) 竖向预应力

随着预应力混凝土桥梁跨径的增大,减薄主梁腹板以减轻结构自重成为必然的要求。然而,主梁腹板是荷载产生的剪应力峰值分布区,腹板减薄后,其抗剪能力相应弱化,应通过预应力技术予以人为加强。经过大量理论和实践探索,工程应用中通常采用竖向预应力与纵向预应力的竖弯相匹配,来共同抵消荷载作用下腹板区域较高的主拉应力,消除使用荷载下可能产生的危险的斜裂缝。

配置竖向预应力筋也可视为是对普通钢筋混凝土梁中箍筋的革新。按照结构设计原理可知,配箍筋的普通钢筋混凝土梁,当其剪弯区域腹板斜裂缝出现前,箍筋的应力很低、作用不明显;只有当斜裂缝出现并穿过箍筋后,箍筋的应力才会突增,箍筋的抗剪作用才会显示出来。然而,无论是预应力混凝土还是普通钢筋混凝土梁,在正常使用极限状态下都不希望出现斜裂缝。普通钢筋混凝土梁在正常使用状态下主要通过剪弯区段加厚的腹板混凝土自身来抵抗荷载产生的主拉应力,从而消除使用阶段斜裂缝。而预应力混凝土梁在减薄腹板以获得更轻自重和更大跨越能力时,腹板混凝土单靠自身难以抵抗荷载产生的主拉应力,必须对普通腹筋按照预应力原理进行改造,即通过对竖向布置的高强钢材进行预张拉,从而获得腹板混凝土预压应力。此外纵向预应力筋的适当竖弯,也能主动提供部分抗剪能力。

然而在实践中竖向预应力的施工质量往往难以控制,主要原因归结起来有:

①竖向预应力筋长度相比纵向预应力筋小得多,达到同样的张拉控制应力水平时力筋的伸长量也小很多,因而其有效预应力水平对张拉控制精度以及各类预应力损失因素均非常敏感;②目前常用的精轧螺纹钢类型的竖向预应力筋,预应力总损失可达初始张拉应力的45%以上,其中锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩引起的预应力损失往往占到总损失的50%以上,该项损失在钢材、锚具质量稳定的情况下,受张拉、锚固操作工艺的影响而波动很大,其张拉施工控制技术还有待改进和提高;③国内外对预应力损失的研究,大多针对桥梁纵向预应力损失,而对竖向预应力损失的研究还较少,可供参考借鉴的成功经验不多。

近年来,国内部分预应力混凝土连续箱梁桥、连续刚构桥在运营阶段出现了主梁腹板斜裂缝等通病,严重危及桥梁的安全和耐久使用性能。经分析研究,这些病害与竖向预应力张拉施工质量有紧密关联,已引起了工程界的重视。部分有针对性的措施研究也逐渐开展,如《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“竖向预应力较困难的施工条件”,给出在计算



主梁腹板混凝土主应力时对竖向预应力钢筋产生的混凝土竖向预压应力乘以系数 0.6 进行折减的对策;也有研究者提出加强施工质量管理、采用滞后张拉工艺、对竖向预应力筋进行二次张拉等应对措施。事实上,如果能够利用高效快捷的手段对施工现场竖向预应力进行实时跟踪抽样检测(允许的情况下可进行全部检测控制),发现其关键工艺参数和施工质量之间存在的规律并用于指导和控制张拉操作,是解决竖向预应力施工质量问题的最直接、最有效的方法。

(3) 横向预应力

对主梁桥面板在横向腹板间跨径较大或腹板外悬臂宽度较大的桥梁,应为桥面板配置横向预应力筋以协助抵抗使用荷载产生的局部横向弯矩。采用横向预应力可增大桥面板和悬臂部分横向刚度,减少腹板数量和下部结构工程量,从而降低上部结构自重并节省下部工程造价;横向预应力还可以起到防止桥面板温度和收缩裂缝的作用。

对大跨桥梁而言,为了尽量减轻上部结构自重,桥面板厚度一般较小,因此横向预应力筋(一般为体内有粘结形式)布设安装的空间非常有限,施工中预应力管道位置和线形需严格精准控制。否则,一旦出现预应力管道上浮等施工质量问题,再施加预应力就难以达到预期的效果,甚至会产生相反的效果。

3. 高强、高性能预应力材料

(1) 高强、高性能混凝土

预应力混凝土技术是适应结构轻型、大跨的需求而不断发展的,这就对混凝土材料的物理力学性能提出越来越高的要求。国内外一般称强度指标低于 C50 的混凝土为普通混凝土,高于 C50 的为高强混凝土(High-Strength Concrete, HSC)。后者相比前者有几项重要的优势:①强度、弹性模量高;②徐变、收缩小;③防渗、抗冻融、抗碳化、抗氯离子等性能好。因此,同样跨度的预应力混凝土结构,采用 HSC 可以节省混凝土方量、自重和工时,降低收缩、徐变引起的结构内力、变形等次效应,同时 HSC 的高密实度能够使内埋钢材得到更好的防护,从而结构耐久性得以改善。因此,预应力混凝土桥梁采用 HSC,具有明显的综合技术经济效益。

从 20 世纪 60 年代开始,美国、挪威等国家大量使用强度为 41MPa 的混凝土,1965 年开始采用 52MPa 的混凝土,1982 年达到 75MPa 并开始试用 76.6MPa 的混凝土,1987 年开始使用 117MPa 的混凝土,1988 年跃为 133MPa。1970 ~ 1986 年,美国、日本、加拿大在公路、铁路桥梁中使用了 41.4 ~ 78.6MPa 的混凝土。现在部分发达国家已经具备在现浇整体和预应力混凝土结构中大量采用 140MPa 混凝土的可能性。相应地,各土木工程强国均针对 HSC 制定了技术标