



同濟大學

现代桥梁技术丛书

桥梁体外预应力设计技术

徐 栋 编著



人民交通出版社

China Communications Press



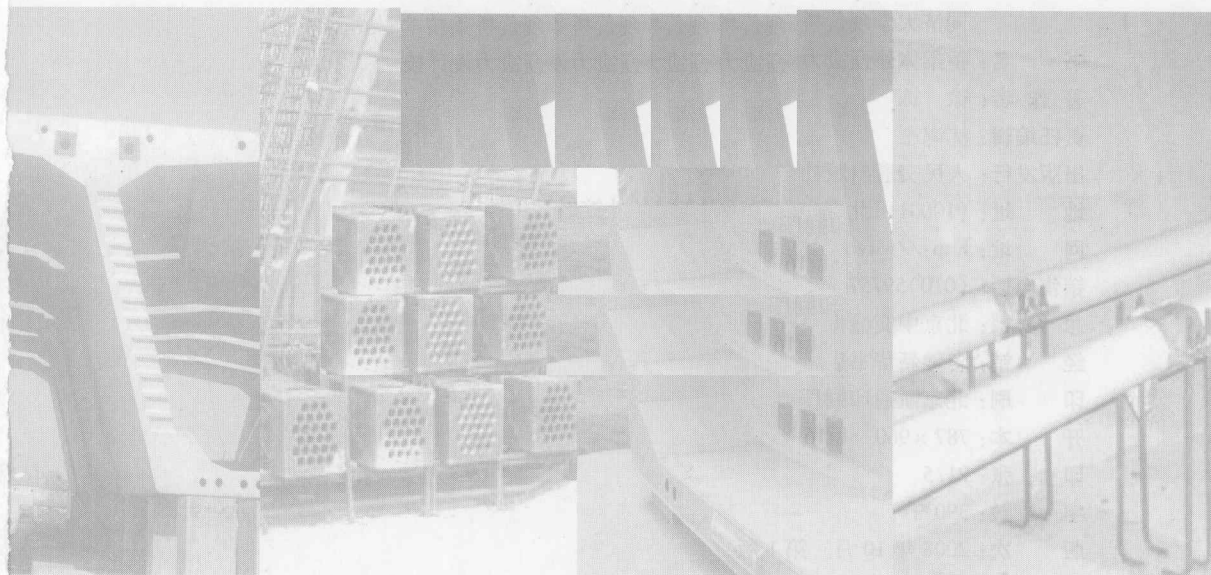
同濟大學

现代桥梁技术丛书

Design of External Prestressing in Bridges

桥梁体外预应力设计技术

徐 栋 编著



人民交通出版社

内 容 提 要

本书为《同济大学现代桥梁技术丛书》之一。全书共分九章,包括体外预应力混凝土桥梁概论、体外预应力混凝土桥梁弹性阶段的设计计算方法、体外预应力钢束的疲劳评价、体外预应力混凝土桥梁极限状态的力学性能、体外预应力钢束体系与钢束设计、体外预应力混凝土桥梁的转向结构和锚固结构设计方法、预应力混凝土结构中非预应力钢筋配筋设计新概念、预应力混凝土箱梁桥空间分析与开裂下挠问题、设计建议和发展展望。

本书可供桥梁科研、设计及施工人员使用,也可供高等院校高年级本科生及研究生教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁体外预应力设计技术/徐栋编著. —北京:人民交通出版社,2008.10

(同济大学现代桥梁技术丛书)

ISBN 978-7-114-07354-0

I. 桥… II. 徐… III. 桥梁结构:预应力结构—结构设计 IV. U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 133655 号

同济大学现代桥梁技术丛书

书 名:桥梁体外预应力设计技术

著 作 者:徐 栋

责任编辑:沈鸿雁

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京凯通印刷厂

开 本:787×960 1/16

印 张:21.5

字 数:390千

版 次:2008年10月 第1版

印 次:2008年10月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07354-0

印 数:0001~3000册

定 价:48.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

PREFACE

由德国工程师 Dischinger 于 1936 年建造的第一座体外预应力混凝土桥梁采用的是比当今传统的后张体内预应力混凝土桥梁更早出现的一种预应力技术。由于在 20 世纪 30 年代尚不能解决体外索的防腐问题,因而实际应用很少,很快就被以法国工程师 Freyssinet 为代表的后张体内预应力技术所取代。

20 世纪 70 年代初,欧洲各国相继发现了体内预应力技术存在的缺陷,即密集的管道造成混凝土灌注的困难;管道中的预应力束因压浆不密而产生腐蚀,又难以检测和更换。同时,斜拉桥的发展使拉索的防腐技术日益进步,在这一形势下,体外预应力又重新登上了舞台。这种施工快捷,养护方便,又易于检测和更换的新技术逐步成为国际上最常用的混凝土桥梁形式,并且也符合全寿命和可持续发展的当代设计理念。

30 多年来,体外预应力桥梁在国外大型桥梁工程的引桥、城市高架以及轻轨桥梁中得到了广泛应用,取得了很好的社会经济效益。然而,遗憾的是,在国内近 20 年的桥梁建设高潮中,由于体制、材料、设计规范、施工设备等方面的滞后,这种先进的体外预应力技术并未得到重视和推广。直到在 2008 年建成的苏通大桥的引桥中,才第一次较大规模地采用了体外预应力技术,落后了国外近 30 年。

徐栋教授是同济大学桥梁工程系混凝土研究室副主任,他在我的指导下完成了体外预应力桥梁设计理论的博士学业,后又和同济 OVM 预应力研究中心合作开发了体外预应力工艺设备,为苏通大桥成功实施体外预应力建设方案创造了条件。

中国是一个桥梁大国,每年桥梁建设的规模和数量巨大,其中混凝土桥梁占总数 90% 以上。混凝土桥梁的耐久性是世界共同关注的问题,而中国的混凝土桥梁的早期劣化又比较严重,体外预应力的发展有可能成为解决耐久性的重要手段。本书是徐栋教授多年来研究成果的汇总,希望能在国内进一步推广体外预应力技术的进程中发挥重要的作用。

我期望中国桥梁界能尽快推广体外预应力技术,以提高混凝土桥梁的品质和耐久性,保障其正常使用寿命,同时也为国际预应力事业的发展作出中国桥梁界的一份贡献。

中国工程院院士 同济大学教授

项海帆

2008. 7. 29

前言

FORWORDS

本书反映作者从1995年2月开始师从项海帆院士攻读博士学位至今,在桥梁结构体外预应力设计技术以及在更具基础性的预应力混凝土结构中非预应力钢筋的设计计算理论方面的研究成果。

本书第一章综述了体外预应力技术和预制节段施工在国内外的发展和应用情况;第二章详细研究了体外预应力钢束滑移和二次效应对结构使用阶段受力性能的影响;第三章对体外预应力钢束进行疲劳评价,研究了体外预应力钢束整体和局部的应力变幅,以及钢束与PE套管在转向处的局部磨损;第四章详细研究阐述了体外预应力混凝土桥梁极限状态的力学性能以及分析方法;第五章综述各种体外预应力钢束体系,并详细讨论了体外预应力钢束的设计和布设方法;第六章完成了较为完整的体外预应力桥梁的转向结构和锚固结构的配筋设计计算方法。

由于体外预应力技术多用于中、大跨径箱形截面连续梁桥,不可避免碰到目前困扰业界的开裂下挠问题,作者认识到,大跨径预应力混凝土桥梁开裂下挠病害不仅是使用状态计算的问题,也是极限状态剪切配筋的问题。体外预应力技术可能是对这些病害桥梁进行加固和维修的重要手段,但前提是首先要弄清楚病害的原因,才能够做到“对症下药”。同时,在预应力混凝土结构中理清各构件和构件各受力方向的受力状态对于明确体外预应力产生的结构效应以及体外预应力技术的发展本身都是非常重要的。

本书第七章提出预应力混凝土结构中非预应力钢筋配筋设计新概念,将从一个全新的角度诠释混凝土桥梁结构的计算方法和配筋设计之间的关系,并在评述国内外现行规范抗剪配筋理论体系的基础上,提出了具有普遍适用性的混凝土结构抗剪配筋设计新方法;第八章应用预应力混凝土结构中非预应力钢筋配筋设计新概念研究讨论大跨径预应力混凝土箱梁桥开裂下挠病害的机理和发展过程;第九章在前述各章研究成果的基础上总结提出了体外预应力桥梁的设计建议以及发展展望。

感谢项海帆院士一直的关注和鞭策,并为本书作序。书中的“预应力混凝土结构中非预应力钢筋的配筋设计原理”新概念正是项老师在百忙中审阅本书时提出命名的。

感谢杜国华教授、郑信光教授的无私帮助,他们深厚的力学功底和勤勉的研

究风格是我的榜样。书中第四章部分内容引用了本系李国平教授的研究成果;刘超讲师参与了本书部分内容的写作;柳州欧维姆(OVM)建筑机械有限公司谢正元副总工程师对第五章第一节内容提出了宝贵的建议;作者的历届研究生为本书完成做了大量艰辛的准备工作,有些内容直接来自于他们的学位论文,作者在此一并向他们表示由衷的感谢。

感谢本系陈艾荣教授的不断鼓励和催促,人民交通出版社沈鸿雁主任的信任和耐心。感谢同济大学建筑设计研究院桥梁分院、中交公路规划设计院有限公司、天津城建设计院有限公司、四川省交通厅公路规划勘察设计研究院、辽宁省交通勘测设计院、江苏省苏通大桥建设指挥部、重庆高速公路发展有限公司给予的科研合作机会和提供的实际桥例资料,使作者的研究得以点滴的积累和进步,并能紧密结合工程实践、迅速了解工程需求。

希望这本书可以对我国体外预应力技术的发展有所裨益。但由于作者水平所限,书中疏漏甚至不当之处在所难免,恳请读者不吝批评指正。

徐 栋

同济大学桥梁工程系

2008年5月

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	1
第一节 体外预应力技术的发展和应	1
第二节 预制节段施工方法概述	8
第三节 体外预应力技术与预制节段施工方法在我国的运用	12
第四节 体外预应力混凝土桥梁评述	17
本章参考文献	22
第二章 体外预应力混凝土桥梁弹性阶段的设计计算方法	23
第一节 体外预应力混凝土桥梁在弹性阶段的计算特点	23
第二节 体外预应力混凝土桥梁的预应力损失计算	24
第三节 体外预应力钢束在转向处的滑移研究	35
第四节 体外预应力钢束的二次效应	50
本章参考文献	57
第三章 体外预应力钢束的疲劳评价	58
第一节 概述和研究方法	58
第二节 疲劳荷载描述	59
第三节 体外预应力钢束疲劳特性研究	62
第四节 体外预应力钢束在转向处局部磨损研究	81
本章参考文献	95
第四章 体外预应力混凝土桥梁极限状态的力学性能	100
第一节 体外预应力混凝土桥梁极限状态受弯力学性能	100
第二节 基于《04 桥规》的体外预应力混凝土桥梁 极限状态抗剪设计方法	125
本章参考文献	128
第五章 体外预应力钢束体系与钢束设计	130
第一节 体外预应力钢束体系	130
第二节 体外预应力钢束设计	144
第三节 旨在取消竖向预应力的体内体外混合配束设计	157

本章参考文献	168
第六章 体外预应力混凝土桥梁转向结构和锚固结构设计	169
第一节 转向结构受力性能的参数化分析	169
第二节 转向结构简化计算方法	187
第三节 基于应力的锚固横梁配筋方法	195
第四节 拉压杆模型配筋设计法	206
第五节 计算结果的比较	210
本章参考文献	213
第七章 预应力混凝土结构中非预应力配筋设计新概念	214
第一节 引言	214
第二节 应力的来源及其交付配筋的基本构件	220
第三节 国内外现行规范抗剪配筋设计方法综述	229
第四节 基于应力的混凝土结构抗剪配筋设计原理	244
本章参考文献	268
第八章 预应力混凝土箱梁桥空间分析与开裂下挠问题	270
第一节 预应力混凝土箱梁桥发展现状及分析方法综述	270
第二节 混凝土箱梁截面上的关注位置与 活载剪应力放大系数	280
第三节 采用七自由度算法分析病害桥梁	291
第四节 基于空间网格模型的预应力混凝土箱梁桥 开裂下挠病害解析	299
本章参考文献	320
第九章 设计建议及发展展望	321

第一章 绪 论

第一节 体外预应力技术的发展和运用

一、早期的运用^{[1][2][3][4][5]}

预应力的概念是非常古老的,人类很早便有了主动的应用。例如,我们熟悉的箍紧盛水木桶的铁箍,铁箍对木桶施加了预紧力,木桶在盛水后才不会漏水,从这个古老的应用可以看出将预应力放在结构外部是非常自然的想法。

在钢筋混凝土结构出现后,现代预应力思想开始萌芽:1886年美国旧金山的工程师 P. H. Jackson 获得了向混凝土楼板钢筋施加预拉力的专利;1888年德国柏林的 C. E. W. Dohring 获得了在混凝土预制板及小梁制作过程中对混凝土施加预应力的专利。但由于那时预应力是直接对普通钢筋施加的,所以预应力值非常有限,很快便由于混凝土的收缩徐变而丧失殆尽。

现代预应力技术的发展公认归功于法国工程师 Eugene Freyssinet(也有文献将他称为“现代预应力技术之父”),1926~1929年他通过试验,非常明确地表明了混凝土应变随时间变化的黏弹性效应(混凝土的徐变、收缩),在1928年他提出预应力筋必须采用高强度钢丝,并获得专利。

由于当时对已结硬的混凝土结构内部施加预应力仍然存在技术障碍,于是较为“直截了当”的体外预应力技术走在了前面。

1934年,德国工程师 Franz Dischinger 获取了对结构施加体外预应力的专利。Dischinger 采用体外预应力的主要考虑是:在当时他已经了解到 Freyssinet 的试验结果,但由于他提出著名的老化理论计算徐变效应是在以后的1939年,故在当时无法算清楚的情况下,他希望保留预应力筋能够再次张拉的可能性。

1936年,Dischinger 的想法付诸实现,他设计了位于德国 Saxony 州 Aue 的 A. H 桥,这座悬臂加挂孔的桥梁跨径为 25.20m + 69.00m + 23.40m,见图 1-1。这座桥实际上也是世界上第一座预应力混凝土桥。该桥在 1962 年和 1983 年的两次维修及对预应力筋的重新张拉后,使用至今。在 20 世纪 30 年代末期和 40

年代初, Dischinger 和其他一些工程师设计了一些基于相同概念的公路和铁路体外预应力混凝土桥梁, 最大跨径达 150m。

虽然 Freyssinet 也尝试过先张法的设想, 但德国人 E. Hoyer 于 1938 年在德国 Oelde 首先付诸实施。这座桥跨越多特蒙德至汉诺威之间的高速公路, 是由 4 个 33m 简支孔组成的桥梁, 实际上也是世界上第一座在预应力钢束和混凝土结构之间完全有黏结的桥梁。

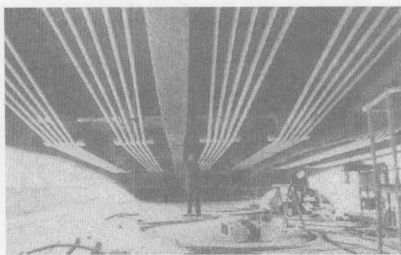


图 1-1 A. H 桥的体外预应力钢束^[2]

Freyssinet 通过不断探索, 终于在随后的 1939 年发明了用于后张法的圆锥形锚具(后被称为弗式锚)及配套双作用千斤顶, 从而彻底解决了预应力技术的可靠性和经济性问题, 现代预应力技术从此开始得到广泛的应用。

显然, 现代预应力技术的发展是以 Freyssinet 的后张体内预应力技术为代表的, 其影响巨大。同时, 各国工程师也均认识到了体内有黏结预应力结构形式所具有的优势: 即在极限状态下具有更高的使用效率, 包括能得到更大的偏心距和钢束极限应力, 以及钢束由于受到周围握裹混凝土的自然保护而“免于担心”环境对其的腐蚀。甚至体外预应力结构的创始者 Dischinger 也于 1949 年转变成成为体内有黏结预应力的支持者。

虽然如此, 各国工程师们并没有停止对体外预应力结构的尝试, 同时也是为了避开 Freyssinet 的后张体内预应力技术专利。在法国、比利时、英国等国相继建造了一些体外预应力桥梁, 但由于体外束的防护与防腐蚀问题在当时未能得到很好的解决, 这些早期建成桥梁的体外预应力筋通常采用外裹沥青或者涂油漆等简单的防腐措施。由于先天的防腐不足加上养护上的问题, 许多桥梁在建造不久后即出现钢筋锈蚀, 甚至有些桥梁的预应力筋在完工后不久便要进行更换。这些情况的频繁出现致使人们对体外预应力留下非常不好的印象, 导致的后果便是在其后的近 30 年中, 体外预应力在实际工程中应用极少。显然, 体外预应力钢束的腐蚀是制约其发展的关键因素。

二、再发展的原因

体外束得以再发展的原因主要有四点。一是加固和维修原有预应力混凝土体内配束桥梁及钢筋混凝土桥梁得到的经验; 二是斜拉桥的复兴促进了体外索的发展; 三是伴随着节段施工法大量运用的施工技术的进展; 四是对体内预应力“自然防腐”的再认识。

20 世纪 70 年代,欧洲各国相继发现用体内布筋建造的预应力混凝土桥梁,由于建造时对摩擦造成的预应力损失及混凝土徐变、温度影响估计不足,破损严重,致使多数需要补强。荷载等级的提高也需要对原有桥梁进行加固。加固时通常都不得不在原桥结构外部进行,即必须把预应力束布置在混凝土截面以外,使体外束补强措施成为一种主要的也是最积极的桥梁加固方法。在桥梁加固方面的经验使工程师们认识了体外预应力的诸多好处,如预应力束布置大大简化,操作与追加新束方便,并大大减少了由于管道摩擦造成的预应力损失。同时,高强度钢绞线的发展及应用导致了体外束数量减少,使体外束桥梁的设计、施工更为简易。

随着 20 世纪 60 年代以来斜拉桥的发展,同样也促进了与其属于同一范畴的体外预应力的发展。斜拉索的防护问题在不断得以解决和完善的同时,其相关技术也被大量应用于解决体外预应力束的防腐问题,从而使制约体外预应力结构发展几十年的关键因素——钢束防腐蚀问题得到了很大程度的解决,从而大大促进了因腐蚀问题而停滞不前的体外预应力桥梁的发展。

20 世纪 70 年代以来,节段施工法成为桥梁建设的主流,这使桥梁的设计、施工和管理成为相互紧密关联的因素,桥梁的经济性不再仅仅由桥梁结构本身所耗费的材料指标所决定。在施工速度、施工费用、对施工质量的把握以及将来对桥梁的管理和维护方面,多数条件下体外预应力具有体内预应力难以比拟的优势。美国和法国是现代体外预应力结构应用的先驱者。在美国,考虑桥梁建设的经济性是首要的,其工程合同一般总是给最低标价的承包人,采用体外束因能减小腹板厚度而使其成为减轻结构重量的一种方法,而且在不考虑替换钢束的情况下,这种预应力技术在多跨长桥中是最简单和最经济的。所以,来自法国的著名工程师 Jean Muller 的体外预应力预制节段施工方案能够成功地取代通常采用的 AASHTO 标准梁方案,在美国建造了如 Long Key、Channel Five、Seven Miles 等一系列分段施工的桥梁。在法国,在政府的影响下,体外束的发展首先是作为提高施工质量的一种方法。体外束具有简单的力筋布置,防护不依赖于灌浆质量,在腹板中去除了管道又可改善浇筑混凝土的条件。最为重要的是,体外束能够方便地进行检测和替换,并能随时对结构进行简便地加固。所以近 20 多年来欧洲,包括著名的法国 Normandie 大桥的引桥等几乎所有大桥均使用体外预应力。

20 世纪 90 年代以来,认为体内预应力筋因管道压浆而不会受到腐蚀的观念正日益受到挑战。如预应力管道内(特别是曲线段内)由于压浆往往无法彻底填密而致使管道内存在空洞;密集的预应力管道也往往导致混凝土浇筑困难,

使混凝土出现蜂窝状,预应力钢筋受到了腐蚀。这些问题使工程师们对体内后张预应力桥梁的施工质量难以把握,而深埋在混凝土体内的钢束在现有技术下无法进行检测和调换。对许多被更换下来的旧梁的检测和对事故的调查证实了这一点。1985年英国威尔士的 Ynys-y-Gwas 桥由于节段间体内预应力钢束的腐蚀造成桥梁倒塌事故,致使1992年英国宣布在新建桥梁设计中不准采用成桥后无法检测和更换的后张体内预应力体系,只能采用体外束。此禁令在1996年得到部分解除,前提是有良好的细部构造和施工质量。

三、现代体外预应力结构的发展和运用

这里对“现代体外预应力桥梁”的定义需要满足两方面的要求:一是在设计之初便主动运用体外预应力技术 (originally designed with external prestressing); 二是其运用是成功的。

1974~1976年在英国建造的连接伯明翰和普利茅斯之间高速公路上相邻的 Exe 高架桥和 Exminster 高架桥满足上述两个条件。这两座桥均由英国安城咨询公司 (Hyder Consulting) 的前身 Freeman Fox and Partners 咨询公司设计,其设计条件较为特殊——由于桥址地质条件糟糕,设计目标是想得到最轻的混凝土结构,故设计采用了现在看来仍然相当先进的全体外预应力设计。但是,由于在英国与它们同期建造的另一座体外预应力桥梁 Bournemouth 桥的体外预应力钢束腐蚀严重,同时这两座桥并没有产生多大的影响力,故也有文献将这三座桥一并归到英国的早期运用中去。

对现代体外预应力桥梁的发展产生重大影响的首座桥是1979年法国人 Jean Muller 设计的在美国佛罗里达州的 Long Key 桥。Jean Muller 同期在美国设计的一批类似桥梁,以及紧接着法国1981年开始在 Michel Virlogeux 领导的 SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes) 桥梁部门的大力研究和应用,现代体外预应力桥梁得到快速广泛的发展和运用,并迅速遍及全球。

作者在文献[5]中将现代体外预应力桥梁的运用可以归纳为以下四种类型:

第一种类型是以 Long Key 桥为代表的采用逐跨预制节段施工的长桥,见图1-2。这种类型的体外预应力结构应用最早、最为广泛,并沿用至今。其突出的优势在于设计和施工的标准化和施工速度的快捷,是预制安装施工方法与体外预应力技术的完美结合。20多年来,它是国际上最广泛采用的体外预应力桥梁形式,在国外城市的高架道路和轻轨干线的建设中得到大量的应用。

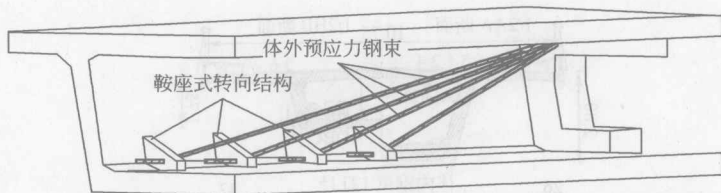


图 1-2 Long Key 桥的体外预应力布置

这种类型的体外预应力结构通常在预制节段间采用多重剪力键 (multiple shear key)。为了最大限度地加快节段预制进度和现场拼装速度,经常采用全体外预应力体系或仅有少量的体内预应力钢束,并在节段间采用干接缝。当整跨所有的预制节块在支撑结构上安装(吊装)就位后,施加体外预应力钢束,形成一跨的整体结构,体外预应力钢束在跨内的转向结构处偏转。

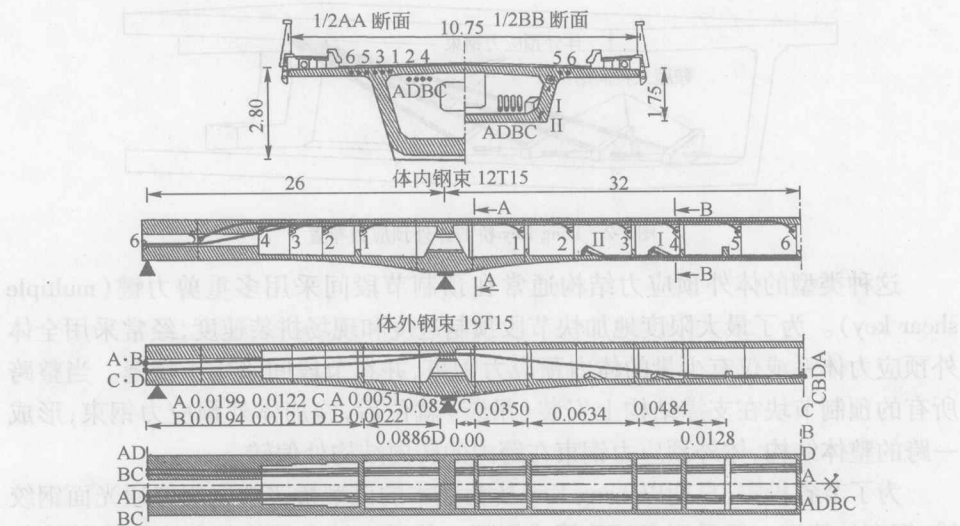
为了节省投资,早期以 Long Key 桥为蓝本的该型桥梁常采用普通光面钢绞线,钢束的管道一般采用 HDPE 管或钢管。管道在转向结构处与主梁浇筑成整体,水泥压浆防护,无法更换。由于体外预应力钢束与转向结构间具有较好的黏结,所以可以称之为“有离散黏结”的体外束。近来的发展大多采用在转向及锚固处布置双重管道,使体外预应力钢束可以切断后拆除,以满足日后更换钢束的需要。

这种类型的结构受支撑结构的影响,单跨跨径一般不超过 50m,它具有施工速度快、施工简易、施工质量基本只由预制质量控制的优点。同时,由于预制块件小、容易运输,施工时仅影响到本跨区域,对现有交通和周围环境破坏小。它通常在通航要求不高的多跨长桥、长大桥梁的引桥以及人口密集和交通组织困难的城市高架公路和轻轨干线中采用。

第二种类型是采用悬臂施工或顶推施工的预应力混凝土连续箱梁桥,通常采用体内、体外混合配束,适合于较大的跨径。其突出的优点是采用大吨位的体外钢束替代了原先配置在腹板内的大量体内钢束,从而较大幅度地减少了原体内钢束,简化了腹板的构造,也减薄了它的厚度。

图 1-3 为 1982~1983 年悬臂施工建造的法国 Loir 桥的体内体外混合配束设计。

当采用悬臂施工时,为简化预应力施工,I 期悬臂束多为线形近乎直线的体内预应力钢束,悬臂拼装或悬臂浇筑施工,节段间采用多重剪力键并采用铰接缝;在成桥后张拉的 II 期连续束采用大吨位的体外束,从而在现场施工中免除了大量的穿束和灌浆的繁杂工序,现场施工质量易于控制。


图 1-3 法国 Loir 桥的体内体外钢束布置^[9] (尺寸单位:m)

当采用顶推施工时,由于各截面在施工过程中均要经历最大的正、负弯矩,需要有较多的施工用束。在传统的体内预应力结构中,由于腹板需要布置成桥钢束,故箱梁顶、底板便成了配置这些施工钢束的地方,导致了截面的笨重,也增加了恒载。采用体外配束,不但具有与悬臂施工同样的能简化腹板构造和现场预应力施工工序的优点,而且可以把部分体外钢束临时反向布置,与成桥预应力钢束形成较大的中心预应力以满足施工需要,甚至这些临时钢束可以在施工结束后放松再作为追加的成桥钢束,见图 1-4。

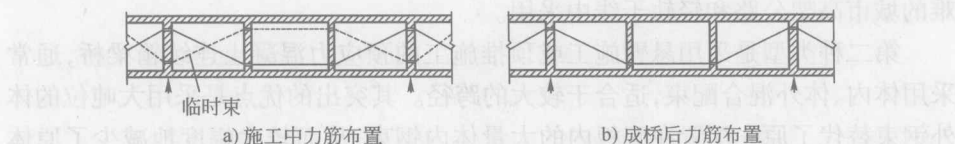


图 1-4 顶推法施工中的反向临时钢束

这种结构类型的体外预应力钢束通常能自由放松和便于替换,所以钢束和管道之间没有任何黏结联系,可以称之为“无黏结”的体外束。它需要特殊的钢束生产工艺、灌浆材料和特殊的转向和锚固装置。法国 Loir 桥是采用悬臂施工、体内体外混合配束的第一座桥。对于“无黏结”的体外预应力体系,Freyssinet 预应力公司做了大量的试验研究,试验的管道包括钢管和 HDPE 管,灌浆材料包括石蜡、油脂、水泥砂浆等,体外钢束包括普通光面钢绞线和单根防腐的无黏结

钢束,通过实际工程施工掌握了穿束和灌浆的相关工艺,为体外预应力技术的发展作出了卓越的贡献。

第三种类型的体外预应力结构实际上是前述第二种类型的延续,也是对第二种类型结构实践应用后的创新成果。由于可以大量减少体内束而采用体外束,故法国工程师又设想在悬臂施工的大跨径桥梁中将体内束全部去除而采用全体外钢束配置,但经过几座桥的实践后发现,大跨径桥梁采用全体外配束后钢束布置太过繁杂,同时也浪费了混凝土箱形截面顶板和腹板相交的加腋处天然的钢束布置面积,故在大跨径混凝土箱梁结构中采用体内、体外混合配束在实践后成为了业内的共识。但是,法国工程师并没有放弃追求全体外配束方式的努力,尝试彻底放弃混凝土腹板布置体内钢束的功能,仅维持其抗剪扭的功能,而尽量减小结构重量成为实现全体外配束方式的重要途径。法国 Bouygues 集团在科威特建造的 Bubiyan 桥将传统的混凝土箱梁腹板改成混凝土桁架形式(图 1-5)。

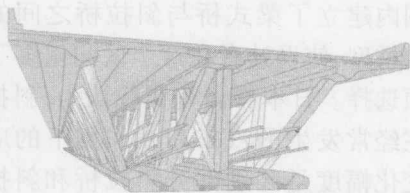


图 1-5 采用混凝土桁架的体外预应力结构^[1]

体外预应力技术促进了新结构的发展,也促进了预应力技术与钢结构、钢—混凝土组合结构的融合。腹板采用钢板结构成为更加减轻结构重量的当然选择,但腹板采用平板钢板后,混凝土徐变使施加在混凝土顶板或混凝土底板上的预应力效应朝轴向刚度更大的钢腹板移动,故在实践后采用了波纹钢腹板以减小腹板的轴向刚度,这样可以使作用于混凝土中的有效预应力不流失。由法国原 Campenon Bernard 集团建造的法国 Maupre 桥,底板采用高强度钢管混凝土,使得整个桥梁横截面成为三角形(图 1-6)。该桥采用顶推法施工,叠合结构和高强度混凝土的运用及美观的外形使其成为体外预应力结构的代表作。除了法国,日本在钢—混凝土叠合梁结构结合体外预应力技术方面也已经有了较多的研究和实践,图 1-7 为一座采用波纹钢腹板的体外预应力叠合梁桥。

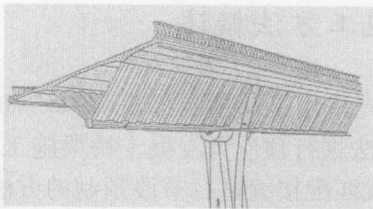


图 1-6 法国 Maupre 桥^[1]

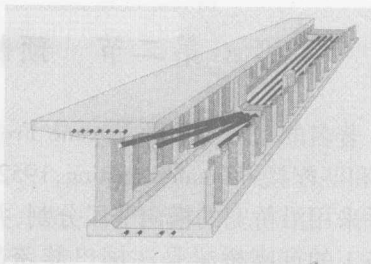


图 1-7 采用钢腹板的体外预应力结构

第四种类型的体外预应力结构是源于前述的在悬臂施工的大跨径预应力混凝土桥梁中全部采用体外预应力钢束的设计思想,即所有悬臂施工钢束也采用体外束,并在截面高度之外,以获得更大的偏心距。这种外形像斜拉桥的桥型是由法国工程师 J. Mathivat 命名的,称为“Extradosed”预应力混凝土桥。这种预应力结构概念的第一次出现是在法国 Quillery 公司为 Arret-Darre 桥招投标时所出的方案中,但在实际工程中真正实现却是在日本。在日本它们被称作“部分斜拉桥”,在我国有时被称为“矮塔斜拉桥”,图 1-8 为这种类型结构的原型桥——日本的小田原港桥。

部分斜拉桥在 100 ~ 250m 跨径范围内建立了梁式桥与斜拉桥之间的衔接桥型,使设计者在这个区间里多了一项选择。日本有研究实践认为,斜拉索在经常发生的汽车荷载作用下的应力变化幅度是区别部分斜拉桥和斜拉桥的关键指标,即当该应力变化幅度小于 50MPa 时,便是部分斜拉桥范畴;当该应力变化幅度大于 50MPa 时,便是斜拉桥的范畴。在设计时它们的区别是斜拉索疲劳安全系数的取值,部分斜拉桥的斜拉索安全系数可以与预应力钢束相同,即取为 1.5,而不是斜拉桥的 2.5。

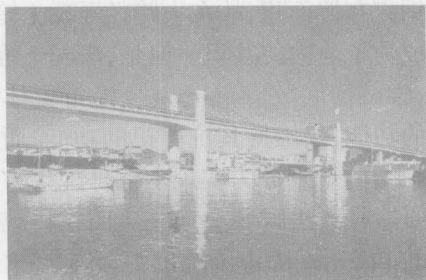


图 1-8 第一座部分斜拉桥——日本小田原港桥

事实上,部分斜拉桥均采用体内、体外混合配束,在施工阶段仍然采用 I 期悬臂施工体内钢束,在施工上优势不明显,在横截面上还需要留出布束区。但是,部分斜拉桥可以明显降低梁式桥的梁高,同时,其突出的优点是可以使设计者根据其设计理念和美学观点自由调整塔高、塔形、索面、索数以及塔梁墩的联结形式。也就是说,设计者可以不用顾忌到底是斜拉桥还是部分斜拉桥,只要有与计算结果相匹配的细部设计和构造处理即可。

第二节 预制节段施工方法概述

著名的法国工程师 Eugene Freyssinet 首先采用纵向预制梁段(1945 ~ 1948 年)和匹配接缝(match casting, 1952 年)的方法进行预应力混凝土桥梁施工;而全桥采用沿桥宽的横向节段分割,并采用短线匹配接缝进行节段预制的方法进行施工的首座桥梁是法国巴黎跨越塞纳河的 Choisy-le-Roi 桥,由法国工程师 Jean Muller 设计,法国水务集团(Camponon Bernard)于 1962 ~ 1964 年建成。该

桥为中跨 55m 的等高度三跨连续梁桥,节段预制场就设在桥梁附近的塞纳河岸,预制节段由浮吊采用平衡悬臂法拼装施工,全桥钢束均为体内束。

当桥梁跨径在 50m 以上时,往往采用预制节段悬臂拼装施工。预制节段悬臂拼装施工中采用的拼装设备往往与需要拼装施工的桥梁总跨数有关,当连续跨数较多并采用逐跨悬臂拼装施工时,采用架桥机(Launching Gantry)成为施工速度最快的方法。图 1-9、图 1-10 为采用第一种类型架桥机(架桥机长度约为 1 倍跨径长)进行悬臂拼装施工的主要步骤示意;图 1-11、图 1-12 为采用第二种类型架桥机(架桥机长度约为 2 倍跨径长)进行悬臂拼装的苏通大桥深水区段引桥施工过程照片。

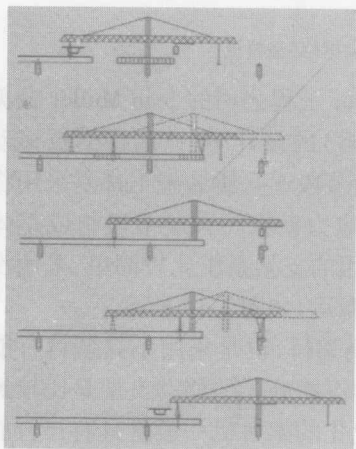


图 1-9 架桥机悬拼施工的主要步骤

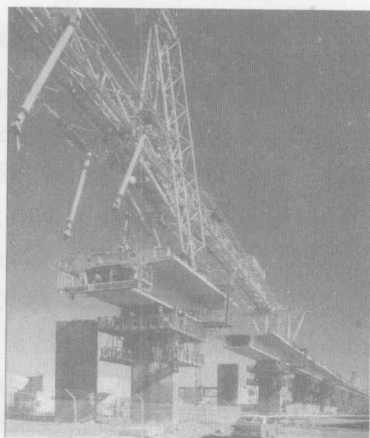


图 1-10 采用斜拉式架桥机悬拼施工的桥梁^[6]



图 1-11 采用桁架式架桥机悬拼施工的
苏通大桥深水区段引桥



图 1-12 正在进行节段吊装施工的
苏通大桥深水区段引桥