



预应力混凝土桥梁新技术

——探索与实践

Exploration and Practice of New
Techniques in Prestressed Concrete Bridges

周志祥 范 亮 吴海军 著



35



人民交通出版社
China Communications Press

1
交通科技丛书

Exploration and Practice of New Techniques
in Prestressed Concrete Bridges

预应力混凝土桥梁新技术
——探索与实践

周志祥 范 亮 吴海军 著

人民交通出版社
1

图书在版编目 (CIP) 数据

预应力混凝土桥梁新技术探索与实践/周志祥, 范亮, 吴海军著. —北京: 人民交通出版社, 2005.1

ISBN 7-114-05401-7

I. 预... II. ①周...②范...③吴... III. 预应力混凝土桥-预应力技术-研究 IV. U448.35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 137345 号

交通科技丛书

书 名: 预应力混凝土桥梁新技术——探索与实践

著 作 者: 周志祥 范 亮 吴海军

责任编辑: 韩 敏 师 云

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.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)85285656, 85285838, 85285995

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: 787×980 1/16

印 张: 13.5

字 数: 226 千

版 次: 2005 年 1 月第 1 版

印 次: 2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05401-7

印 数: 0001~3500 册

定 价: 36.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

笔者自 20 世纪 80 年代中期开始从事预应力混凝土结构的研究,20 多年来,先后主持和参与完成了 3 个国家级、20 余个省部级及地方有关预应力混凝土结构研究的课题,完成了 100 余根先张法、后张有粘结及无粘结预应力混凝土梁的静力和疲劳破坏试验,对各型预应力混凝土梁的工艺及性能进行了系统深入地研究。笔者赞叹预应力混凝土的创始人巧妙地构思了预应力混凝土,从而能动地把高强钢筋与混凝土结合起来;赞叹发明家们提出了无粘结预应力混凝土,从而简化了预应力混凝土的施工工艺;更赞叹最初阶段无粘结预应力混凝土的应用者们,他们重视其优点,宽容了其力学性能降低的缺陷,从而发展到今天这样相对成熟的实用阶段。科学技术的发展是永无止境的,纵观现有各种预应力混凝土技术,可以说均远未达到,也难以达到十分完美的程度(因为人们对发展后的技术还会提出更高的要求)。这就需要我们针对现有技术存在的问题和缺陷进行不断地探索和研究,从而不断地丰富和完善其施工方法和设计理论,使其技术、经济及社会效益都得到不断的提高。

自 20 世纪 90 年代初,笔者即致力于寻求一种兼顾良好的使用性能、用料的经济性和施工的简易性于一体的预应力混凝土技术。于 1993 年将预弯复合梁原理应用于钢筋混凝土梁中,率先提出并研制成功了“预弯预应力钢筋混凝土梁”,先后成功地应用到德阳旌湖大桥等三座桥梁中,获得了 1996 年交通部科技进步三等奖;在此基础上探索了预弯无粘结预应力混凝土梁,并进行了一些试验研究,虽然并未取得成功,但却得到一些新的认识和启示;综合预弯复合梁和双预应力混凝土梁的优势提出了预弯双预应力复合梁的设想,并按此设想对阿尔姆桥提出了新的构想;针对预弯预应力钢筋混凝土梁需长时间预加载和存在原始裂缝的缺陷,于 1994 年提出将预弯预应力钢筋混凝土梁通过预加载条件下二次浇筑混凝土来建立预应力,转变为以梁底为反力承压面,沿垂直于力筋的方向张拉钢束来建立预应力,从而形成了“横张预应力混凝土梁”的构思,并就此征求了科研、设计和施工方面众多专家的意见,确认“横张预应力混凝土梁”可在保持良好力学性能的前提下既节省钢材,又简化工艺,具有明显的技术经济效益,经重庆市科委上报国家科委审批后,将“横张预应力混凝土梁工艺及性能试验研究”列入“一九九五年国家级地方重点攻关计划”,并进行了较系统地试验研究和理

论分析,在渝长高速公路红槽房大桥等六座桥梁中成功应用,获得 1999 年度重庆市科技进步一等奖;还将该项技术成功应用于连续梁桥中,完成的“横张预应力混凝土连续梁桥研究”获得 2003 年度重庆市技术发明三等奖。之后,进一步探索了横张预应力技术在大跨度结构中的应用前景,提出了横张预应力复合梁。博士研究生范亮和吴海军参与了上述探索和实践的部分研究工作,并与笔者共同完成了本书的撰写。

本书记述了笔者 20 年来对预应力混凝土桥梁新技术的探索、创新与实践历程;阐述了在现有技术和研究工作的基础上,如何发现问题、分析问题、解决问题,直至形成新的构想;介绍了从新技术的初步设想、完善构思、具体研究至实践应用的全过程。在开展这些探索和实践的过程中,先后得到交通部、重庆市科委、重庆市交委、重庆市教委、四川省德阳市建委、雅安地区交通局,尤其是重庆高速公路发展有限公司领导和专家的支持、关心和指导,还得到了西南交通大学、大连理工大学、东南大学、同济大学以及中国建研院结构所、交通部交通科学研究院、重庆交通科研设计院、重庆交通规划勘察设计院、重庆渝通公路工程总公司等单位部分专家的直接指导和支持,重庆交通学院的部分教师和研究生参与了其中的研究工作,在此谨向所有对本书工作给予支持、指导、关心和参与的单位领导、专家和个人致以真诚的感谢,同时感谢人民交通出版社对本书撰写和出版给予的大力支持。

本书名谓“探索”,加之作者水平有限,谬误之处在所难免,真诚恳请同行读者们批评指正。

周志祥

2004 年 11 月于重庆交通学院

目 录

第一章 预应力混凝土的发展	1
第一节 概述	1
第二节 预应力混凝土的产生及发展	1
第三节 各种主要预应力混凝土技术及其特点	5
第二章 预弯复合梁	18
第一节 预弯复合梁的基本概念及应用	18
第二节 预弯复合梁桥的设计要点	22
第三节 预弯复合梁的正截面强度计算	28
第四节 预弯复合梁的优缺点	33
第三章 预弯双预应力复合梁	35
第一节 双预应力混凝土梁的提出	35
第二节 双作用预应力的原理与工艺	36
第三节 预弯双预应力复合梁的构想	41
第四节 关于阿尔姆桥的新构想	47
第四章 预弯预应力钢筋混凝土梁	55
第一节 问题的提出	55
第二节 预弯预应力钢筋混凝土梁的基本原理	55
第三节 预弯预应力钢筋混凝土梁的试验研究	57
第四节 预弯预应力钢筋混凝土梁的计算方法	71
第五节 预弯预应力钢筋混凝土梁的主要特点	79
第六节 预弯预应力钢筋混凝土梁的计算示例	82
第五章 预弯预应力钢筋混凝土梁的工程应用	91
第一节 预弯预应力钢筋混凝土梁在德阳旌湖大桥中的应用	91
第二节 预弯预应力钢筋混凝土梁在民生桥中的应用	114
第三节 预弯预应力钢筋混凝土梁在通兴桥中的应用	125
第四节 结论	127
第六章 预弯无粘结预应力混凝土梁	128

第一节	问题的提出	128
第二节	预弯无粘结预应力混凝土梁的构想	128
第三节	预弯无粘结预应力混凝土梁的改进构想	132
第四节	预弯无粘结预应力混凝土梁改进方案的计算方法	136
第七章	横张预应力混凝土	142
第一节	横张预应力混凝土的基本概念	142
第二节	横张预应力混凝土梁的计算方法	144
第三节	横张预应力混凝土梁研究工作简介	165
第四节	小结	168
第八章	横张预应力混凝土的工程实践	169
第一节	简支 T 形梁桥应用实例	169
第二节	用横张预应力箱形梁加固旧桥	176
第三节	横张预应力空心板桥的工程实践	183
第四节	横张预应力混凝土连续梁桥应用实例	187
第九章	横张预应力复合梁	190
第一节	横张预应力复合梁的原理及制作方法	190
第二节	横张预应力复合梁的应力验算	192
第三节	极限强度计算方法	195
第四节	横张预应力混凝土复合梁计算算例	198
主要参考文献		206

第一章 预应力混凝土的发展

第一节 概 述

预应力这一术语的出现虽然历时不很长,但预应力原理的运用却古已有之。预应力的基本原理过去常用于制作木桶的行业中:工匠们将加工好的木板条拼装成圆锥等形状,套以浸泡过的竹箍或加热过的铁箍,自细端向粗端嵌入锥体,使木板条间产生巨大的挤压力,即环向的压应力。如施加的环向压力超过桶内液体压力引起的环向张力,木桶就不会开裂和漏水。换言之,桶箍和桶板二者均获得了预应力后,才能承受荷载。现代预应力混凝土圆形水池的原理与上述套箍木桶是一样的,所以套箍木桶实质上是一种预应力木结构。

在生产、生活中还有很多事例都涉及预应力技术,但人们往往没有自觉地去认识它、利用它。例如,绸布、织物和膜面的自然状态是柔软、折皱不成型的,只有在双向预应力作用下才能具有刚度和承受外载。生活中常使用的雨伞及帐篷是使柔性膜面经预拉后可以抵抗大气荷载的另类预应力用具。现代仪器工业中许多罐头的封口及开口技术中也蕴含着预应力的道理。在日常生活中,木锯、自行车车轮的辐条、带拉索的无线电高耸桅杆也是一些熟悉的例子。

上述例子和许多实践都表明,既可以用预压应力来抵抗结构承受的拉应力或弯矩,又可用预拉应力来抵抗结构承受的压应力。因此,只要善于运用预应力原理和技术,就可能获得改善结构性能和提高结构承载能力的效果。

第二节 预应力混凝土的产生及发展

一、预应力混凝土产生的背景

钢筋混凝土的产生曾使人类建筑事业得到了蓬勃发展,但在长期的使用过程中,人们逐渐认识到钢筋混凝土受弯或受拉构件存在着难以克服的

缺陷,这些缺陷极大地限制了其使用范围,但也正是这些缺陷促成了预应力混凝土的产生和发展。钢筋混凝土结构存在的主要问题包括:

1. 钢筋混凝土构件为带裂缝工作。裂缝的存在,不仅使构件刚度下降,而且不能应用于不允许开裂的结构中。图 1-1 表示钢筋混凝土梁承受弯折的情况,梁因荷载逐渐加大并弯曲到一定程度时,下缘混凝土开裂,产生了裂缝。钢筋混凝土梁的开裂是正常现象,并不影响其承载能力。但若裂缝宽度过大,则可能有水、水气或其它有害物质进入梁内,侵蚀钢筋,久而久之,可能导致钢筋失效,使梁体破坏。裂缝的容许宽度视结构物的重要性和所处的环境而异,一般为 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ 。

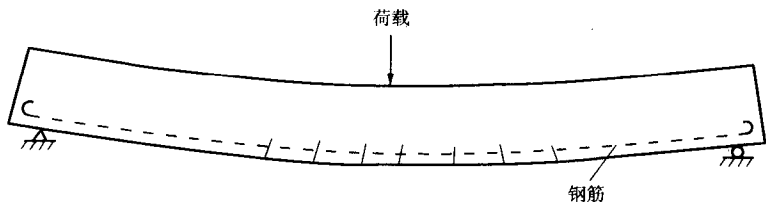


图 1-1 钢筋混凝土梁受弯变形示意图

2. 钢筋混凝土构件无法充分利用高强材料的强度。钢筋混凝土构件中的钢筋主要是用来承受拉力。但是,混凝土自身的极限拉应变很小,每米仅能伸长 $0.10 \sim 0.15\text{mm}$,再伸长就要出现裂缝。如果要求混凝土构件在使用时不开裂,则钢筋的拉应力只能达到 $20 \sim 30\text{MPa}$;即使允许开裂(但为了保证构件的适用性和耐久性,通常将裂缝宽度控制在 $0.20 \sim 0.25\text{mm}$ 以内),此时钢筋拉应力也只能达到 $150 \sim 250\text{MPa}$,可见高强度钢筋将无法在钢筋混凝土结构中充分发挥其高强度的优势。

在此情况下,当荷载增加时,就只有靠增加构件截面尺寸或钢筋用量的方法来增加结构的承载能力和控制构件的裂缝和变形,这又将导致构件自重增加、外荷载效应增大,形成恶性循环。对于桥梁结构,随着跨度的增大,自重占总荷载效应的比例显著增大。当跨度达到某一值时,构件就只能承受其自重,而不再有负载能力,因此钢筋混凝土结构的跨越能力受到很大限制。

要使钢筋混凝土结构得到进一步的发展,就必须克服混凝土抗拉强度低这一缺点,于是人们曾设想:如果能预先采取一种措施,使混凝土永远保持在其自身特性相适应的受压状态下工作,构件就不会开裂,即可克服钢筋混凝土的致命弱点,这就是预应力混凝土思想的萌芽。在此基础上进一

步发展即形成了预应力混凝土的基本原理:以混凝土为支承而张拉钢筋,从而使钢筋在预先受拉的同时,使混凝土预先受压,以抵消外荷载所产生的拉应力,延缓或避免出现裂缝,从根本上改善钢筋混凝土受弯构件的性能。

预应力混凝土的出现是混凝土结构发展史上的一次飞跃,它使得结构混凝土成为一种具有强大生命力的新型结构材料。但科学技术的发展是无止境的,人们在预应力混凝土的长期工程实践中进行了不断的探索和研究,从而极大地丰富和完善了预应力混凝土的设计理论和施工方法,使其技术、经济及社会效益都得到了不断的提高。

二、预应力混凝土的发展历程

预应力混凝土能发展到今天这样的水平,是 20 世纪以来无数工程师不断探索和实践的结果。这些探索和研究,极大地丰富和完善了预应力混凝土的设计理论和施工方法,使其技术、经济及社会效益都得到了不断的提高。回顾这些发展历程对于我们充分认识预应力混凝土的本质和概念有十分重要的意义。

用预应力抵消荷载引起的应力的概念,是奥地利的 J. Mandl 于 1896 年首次提出的。通过张拉钢筋,在钢筋混凝土中引入内应力的第一次尝试大约是在 1886 年。那时,旧金山的一位工程师杰克逊(P. H. Jackson)获得了一项美国专利——即在楼板的混凝土构件中采用拉紧的钢筋。1888 年,德国柏林的德林(C. E. W. Dobring)用张拉台预加应力,获得了一项制造混凝土板、板条和小梁的专利。为了结构上的需要,他在混凝土中埋置了张拉的钢丝,以减少混凝土的裂缝,这就是采用张拉的钢筋制造预制混凝土构件的初次尝试。但是当时使用的钢筋强度不高,即使拉到最大限度,也只能在混凝土中建立有限的预压应力。据此原理修建了一些结构,它们起初表现的性能达到了预期效果;但是,由于只能得到低碳钢钢筋,能够施加的预应力非常低,所以,随着混凝土的徐变、收缩和钢筋的松弛的产生,构件所获得的预应力也逐渐降低甚至消失。这样,预应力结构也就随之退化为普通钢筋混凝土结构,因而他们的方法未获得成功。此后,虽然又有人作了种种努力,但都由于技术或经济上的原因未能得到推广应用。

为了恢复损失的预应力,1908 年美国的斯坦纳(C. R. Steiner)建议,混凝土产生徐变和收缩之后,可以再次张拉钢筋。斯坦纳也是最早建议采用弧线预应力钢束的。但由于当时的条件,这样做的费用太高,因而未能得到推广应用。

1925年,美国内布拉斯加的 R. E. 迪尔进一步采取措施来消除混凝土简支梁存在的拉应力,他的办法是在混凝土硬化后张拉高强钢丝,高强钢丝通过适当的涂层防止粘结。他明确指出了使用高弹性极限和高强度钢筋与使用普通钢筋比较所具有的优点。

预应力混凝土进入实用阶段与现代预应力混凝土发展的功臣——法国工程师弗莱西奈(E. Freyssinet)的贡献是分不开的。他在对混凝土及钢材性能进行大量研究和总结前人经验的基础上,考虑到混凝土收缩和徐变产生的损失,于1928年提出了预应力混凝土必须采用高强钢材和高强混凝土。弗氏这一论断是预应力混凝土在理论上的关键性突破。从此,对预应力混凝土的认识开始进入理性阶段,但对预应力混凝土的生产工艺,当时并没有解决。

弗莱西奈于1928年开始采用高强钢丝施加预应力,并于1930年研究成功锚固钢丝束的弗式锥形锚具及配套的双作用张拉千斤顶。他曾试验了利用先张预应力法将钢丝用端头锚具粘结在混凝土里。但是,直到大约1938年,霍约(E. Hoyer)研究成功靠高强细钢丝(直径0.5~2mm)和混凝土之间的粘结力自锚(而不靠锚头传力)的先张法,才第一次实际应用这种方法。1940年,比利时的玛哥那(G. Magnel)研究成功可以一次同时张拉两根钢丝的麦式楔块锚,这些成就为先张法与后张法预应力混凝土提供了安全而经济的张拉方法和端头锚具。在此基础上,预应力技术才可能得到广泛的应用和推广。到1945年左右,预应力开始取得了一些重要地位,而当时各国的工程师也在探索另外一些可供选择的预应力方法。

三、现代预应力混凝土施工工艺的发展

预应力混凝土技术的重大进步和革命性成就往往是由于施工工艺的进步和设备的改进所促成。现代预应力混凝土发展过程中在施工工艺方面的重要进步有:

1. 1920年弗莱西奈(Freyssinet)提出了混凝土振捣工艺,提高了混凝土的强度,为在预应力混凝土构件中使用高强度混凝土作出了贡献。

2. 1928年弗莱西奈(Freyssinet)和美国的狄尔(Dill)确定了混凝土徐变的影响,在结构中建立了永存预应力。考虑到混凝土的收缩徐变对钢筋预应力产生的影响,弗莱西奈于1928年提出预应力混凝土必须采用高强钢材和高强混凝土,使预应力混凝土在理论上得以突破,也使在混凝土中建立永存的预压应力成为可能,从而奠定了现代预应力混凝土的实用基础。从此,

预应力混凝土技术进入实用阶段。

3. 1938 年德国的霍约(E. Hoyer)研究成功了依靠高强细钢丝和混凝土之间的粘结力而不是锚头传力的先张法。

4. 1939 年弗莱西奈研究成功能够把具有极大拉力的高强度钢丝锚固在混凝土构件两端的 F 式锥形锚具和专门张拉和锚固钢丝的双作用千斤顶,使传统的后张法进入实用阶段,为预应力混凝土的推广应用创造了条件。同时,比利时首创了 Magnel 体系。

5. 1939 年,德国的狄辛格(Dischinger)发展了混凝土收缩、徐变的数学分析方法,同年,弗莱西奈提出圆锥形锚具及其张拉体系,首先建立了后张法预应力混凝土的施工工艺,为后张法预应力混凝土桥梁的发展奠定了基础。至此,预应力混凝土技术有了先张法和后张法两种主要的施工工艺。

第三节 各种主要预应力混凝土技术及其特点

预应力混凝土有很多不同的分类标准和方法,传统预应力混凝土结构根据其工艺、预应力度、体系及构造特点等可划分为如下几种类型(表 1-1)。

传统预应力混凝土的分类

表 1-1

分类原则	主要类别	
按预应力施工工艺分类	先张法	
	后张法	
按预应力度分类	全预应力	
	部分预应力	A 类
		B 类
按预应力体系分类	体内预应力	有粘结预应力
		无粘结预应力
	体外预应力	
按预应力的性质分类	预拉预应力	
	预弯预应力	
	预压预应力	

以下将简要介绍各种主要预应力混凝土技术及其优缺点和适用范围。

一、先张法

先张法即先张拉预应力钢筋,再浇筑构件混凝土,待混凝土达到一定强

度后放松钢筋,混凝土构件借助钢筋的弹性回缩而获得预压应力。施工工艺如图 1-2。首先在张拉台座上将预应力筋张拉至指定位置,之后在台座上浇筑混凝土梁体,待混凝土达到强度后,将混凝土与台座间预应力筋截断,力筋在拉力下回弹,从而在混凝土上施加了预加应力。

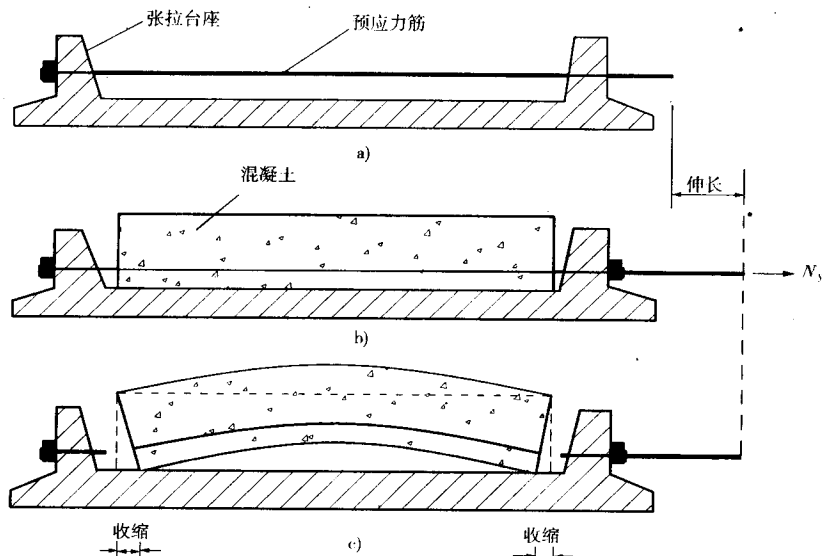


图 1-2 先张法张拉工艺流程示意图

a) 筋束就位, 准备张拉; b) 张拉并锚固, 浇筑构件混凝土; c) 松锚, 筋束回缩, 形成预应力混凝土构件

张拉钢筋的方法有:

1. 借助张拉台座用千斤顶对钢筋预加应力, 此法工艺简单, 施工方便, 但需专用预制场和构件就位的吊运设备, 通常适用于批量生产的中、小型构件。

2. 在特制刚性模具上张拉预应力钢筋, 即以刚性模具本身作为张拉预应力钢筋的反力座, 此法可不受场地限制, 亦可实现折线型布置预应力筋, 但这种刚性模具成本十分高昂, 故国内外均很少采用。

先张法所用的预应力钢筋, 一般可用高强钢丝、钢绞线和直径较小的冷拉钢筋等, 不专设永久锚具, 借助与混凝土的粘结力, 以获得较好的自锚性能。

先张法施工工序简单, 筋束靠粘结力自锚, 不必耗费特制的锚具, 临时固定所用的锚具可以重复使用, 一般称为工具式锚具或夹具。在大批量生

产时,先张法构件比较经济,质量比较稳定。但由先张法的张拉工艺可知,先张法一般仅宜生产直线配筋的小型构件,大中型构件要求配合弯矩与剪力、沿梁长度的分布而采用曲线配筋,这对先张法而言将使施工设备和工艺复杂化,且需配备庞大的张拉台座,同时构件尺寸大,起重、运输也不方便,因此先张法在工程实践中只用于小跨径的板和梁。

二、常规后张法

常规后张法,是先浇筑构件混凝土,待混凝土达到预期强度后,再张拉预应力钢束。如图 1-3 所示,先浇筑构件混凝土,并在其中预留穿束孔道(或设套管),待混凝土达到要求强度后,将筋束穿入预留孔道内,以混凝土构件端部为反力承压面通过千斤顶张拉预应力束,在预应力钢束受拉伸长的同时,构件也获得压应力;待张拉到控制拉力后,用专用锚具将筋束锚固于混凝土构件上,使混凝土获得并保持其预压应力;往预留孔道内压注水泥浆,使筋束与梁体混凝土粘结成为整体,并保护筋束不致锈蚀。通常称之为后张有粘结预应力混凝土。

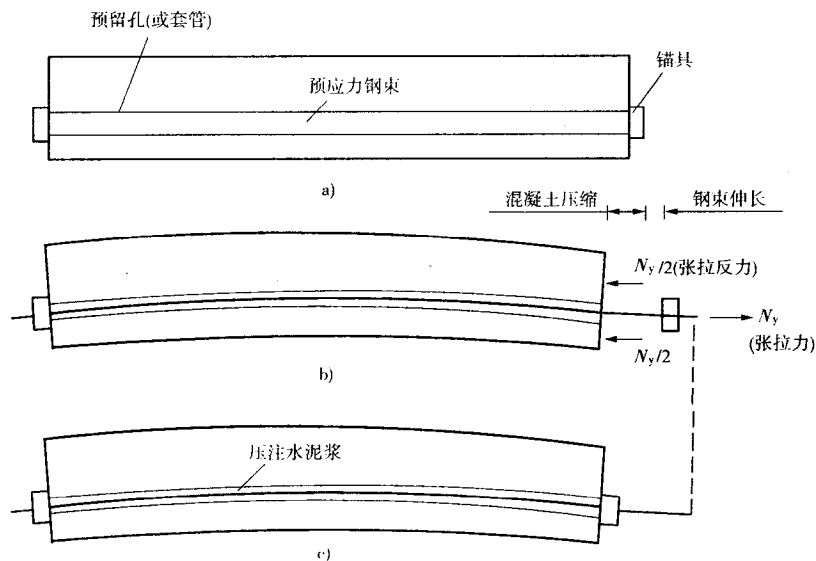


图 1-3 后张法工艺流程示意图

a) 浇筑构件混凝土,预留孔道,穿入筋束;b) 千斤顶支于混凝土构件上,张拉筋束;c) 锚固筋束,灌浆

常规后张法是靠工作锚具来传递和保持预加应力的,其主要预应力工序为:设置预留孔道—浇筑混凝土—穿入钢束—张拉预应力钢束—锚固—

灌浆一封端,该法布筋灵活,适用于现浇或预制大、中型构件,在桥梁工程中得到广泛的应用,其缺点是工序繁多,工艺复杂,且因管道压浆质量的不定性,存在工程隐患。

近十余年来,原本认为的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:预应力孔道内(特别是曲线段内)往往由于压浆无法彻底填密而致使孔道内存在空洞;密集的预应力孔道也往往导致混凝土灌注上的困难,使混凝土易产生蜂窝现象。这些问题使工程师们对体内后张预应力混凝土结构的施工质量难以把握,而深埋在混凝土体内的预应力筋在现有技术下根本无法进行检测和调换。对许多被更换下来的旧梁的检查和事故的调查都证实了这一点。更严重的事例是在 1985 年 12 月 4 日早上,英国西格林摩根的英斯瓦斯桥突然倒塌,破坏发生在跨中断面。倒塌的原因是由于压浆不成功,氯化物渗入了孔道,致使拼装接缝附近预应力筋发生严重的腐蚀。正是这一事故的发生引起了英国运输部的重视,并在 1992 年颁布一份备忘录,指出:在新标准颁布以前,不得再采用孔道压浆的后张预应力混凝土桥梁。虽然在 1996 年英国又同意恢复使用,但对此一直持不支持的态度。

三、无粘结预应力混凝土

无粘结预应力混凝土通常是指配有无粘结预应力钢筋的后张法预应力混凝土。无粘结预应力钢筋是指沿其全长涂刷有防锈蚀材料,并以塑料套管或油纸包裹,使之与周围混凝土不发生粘结,而在张拉时可以沿纵向发生相对滑动的后张预应力钢筋。它由单根或多根高强钢丝、钢绞线或高强粗钢筋组成。无粘结预应力钢筋在施工时,和普通钢筋一样,可以直接放入模板中,然后浇筑混凝土,待混凝土达到强度要求后即可张拉。它不需要预留孔道,也不必灌浆。

早在 20 世纪 20 年代,德国的 R. Farber 就提出了无粘结预应力的概念并取得了专利。但当时并未推广,直到 40 年代后期才开始用于桥梁结构。50 年代初美国开始将其作为大跨度双向平板的预应力配筋,用于房屋建筑的楼盖与屋盖。由于工艺简便、造价较低,应用日渐广泛。目前,美国新建的现浇预应力平板,几乎都采用无粘结筋。在我国,无粘结预应力混凝土结构也日益得到推广应用。

无粘结预应力混凝土受弯构件的性能与有粘结预应力混凝土受弯构件有所不同的。不附加粘结钢筋的纯无粘结预应力混凝土梁或板受荷开裂

时,在最大弯矩区段内,将只出现一条裂缝。随着荷载的少量增加,裂缝的宽度、高度及构件挠度均迅速增加,梁很快发生破坏。开裂后梁的受力性能接近于带拉杆的扁拱。

在受弯构件中,无粘结预应力筋的应力增量总是低于有粘结预应力筋,随着荷载的增大,这个差距也越大。当结构进入极限状态时,无粘结预应力筋的极限应力不会达到材料的屈服强度。原因在于:当有粘结预应力混凝土受弯构件承受荷载时,任何截面处预应力筋的应变变化都与周围混凝土应变的变化相等,所以有粘结预应力筋的最大应力发生在最大弯矩的截面内;而无粘结预应力混凝土受弯构件承受荷载后,由于无粘结预应力筋能发生纵向相对滑动,整个无粘结预应力筋的应变几乎是一样的,如忽略摩擦力的影响,则可以认为无粘结筋中的应力沿全长是相等的,其应变的改变等于沿预应力筋全长周围混凝土应变变化的平均值。有粘结预应力混凝土受弯构件消压后,随着荷载的增加,由于预应力筋与混凝土之间的粘结作用,预应力筋的应力同步增加,最终达到比消压荷载大许多的极限承载能力;无粘结预应力混凝土受弯构件,由于预应力筋应力的增加仅与锚固端之间构件的整体变形有关,所以预应力筋应力的增量非常小,最终达到的极限强度与消压荷载相差不大。这样,当构件弯曲破坏、截面受压区混凝土达到极限应变时,无粘结预应力筋的极限拉应力将明显低于最大弯矩截面处有粘结预应力筋的极限拉应力,所以无粘结梁的极限抗弯强度低于有粘结梁。实验表明,无粘结预应力梁的抗弯强度比相同配筋的有粘结预应力梁一般要低10%~30%。

后张无粘结梁具有裂缝条数少、裂缝和挠度发展快以及具有脆性破坏形态等的不利性质,这些缺陷可以用混合配筋的方法予以弥补。当非预应力有粘结钢筋的配筋率大于0.4%时,上述不利性质将不明显。对配置一定数量非预应力粘结钢筋的无粘结后张梁(总配筋量在适筋范围内),其荷载-挠度曲线均呈明显的三直段折线形状。第一段直线反映开裂前梁处于线弹性工作阶段,挠度与荷载成比例增长。截面开裂后出现第二段直线,其斜率与长度视粘结钢筋的多少而定。粘结钢筋多则该直线段较长、斜度较陡;反之则该线段较短、斜度较平缓。在这一阶段(即开裂弹性阶段),梁的裂缝宽度和挠度的发展以及有粘结、无粘结筋应力的增长都比较缓慢,表明非预应力粘结钢筋对改善使用阶段梁的工作性能十分有效。当有粘结普通钢筋到达屈服强度,进入屈服台阶以后,则第二段直线随荷载的增加而逐渐转折,出现第三段,近似于直线的曲线。在这一阶段(即塑性阶段),直线斜

度小而线段长,增加很小荷载,挠度和无粘结筋的应力都有较大的增长,裂缝宽度也急剧开展,破坏前有比较显著的预兆,破坏时受压区混凝土由于裂缝向上伸展而被压碎,无粘结筋与有粘结普通钢筋都不会出现拉断的现象。大量的实验研究证实,无粘结预应力混凝土受弯构件在消压前的力学性能与有粘结预应力混凝土受弯构件基本相同,而两者在开裂以后的发展则有较大的差异。

无粘结预应力结构较常规后张法预应力混凝土减少了孔道成型、穿束和灌浆等工序,施工较简单,但构件的极限强度及使用性能均有所降低,同时对锚具要求较高,用钢量较大,目前多用于无突出抗剪问题的预应力混凝土板式结构。

四、体外预应力混凝土

体外预应力的概念及方法产生于法国,由 Eugene Freyssinet 完成了体外预应力的首次应用。体外预应力简称外预应力,是后张预应力体系的重要分支。与外预应力相对应的内预应力即为传统的布置于混凝土构件内部的有粘结或无粘结预应力。Antoine E. Naaman 将体外预应力定义为:在结构混凝土构件截面之外采用的无粘结预应力束产生的预应力。P. Jartoux 和 R. Lacroix 的定义为:由布置于承载结构主跨本体之外的预应力筋产生的预应力,预应力筋仅在锚固区域设置于结构本体内,折角块可设在结构内或体外。

体外预应力束的具体设置方式一般为:预应力筋设于混凝土构件的外侧,穿过设在构件端部的挡块和中部适当位置的转向块进行张拉,从而使混凝土构件获得预压应力。体外预应力结构与体内预应力结构最本质的区别是体外预应力结构的预应力筋布置在主体结构之外。因体外预应力筋通常为由多根钢绞线组合成的集中钢索,故称为体外预应力索。从力学特征上来说,体外预应力索与周围主体结构在同一截面上的变形是不协调的。

当体外预应力索应用于混凝土结构时,称为体外预应力混凝土结构;而当体外预应力索应用于钢结构时,则称为预应力钢结构。图 1-4 为体外预应力混凝土结构的立体透视图。

体外预应力混凝土结构的基本组成部分见图 1-5 所示。

在现代结构工程中,体外预应力的运用先于体内预应力,而体外预应力混凝土结构的典型代表则是桥梁结构。1934 年,德国工程师 Franz Dischinger 获取了向结构施加体外预应力的专利,他选择体外预应力的主要