

文章编号:1003-4722(2001)01-0052-05

浅论我国预应力混凝土梁桥的技术与发展

吕志涛,刘 钊,孟少平

(东南大学预应力工程研究所,江苏 南京 210018)

摘 要: 回顾了我国现代预应力混凝土梁桥的发展现状、结构特点和技术水平,并对预应力技术的应用与发展作一简述,探讨了当前设计施工中亟待改进的若干问题,最后对提高我国预应力混凝土梁桥的整体技术水平以及今后面临的新发展作了评述。

关键词: 预应力混凝土桥;发展;综述

中图分类号: U448.35

文献标识码: A

A Brief Review on the Technology and Development of Prestressed Concrete Beam Bridges in China

L U Zhi-tao, LIU Zhao, MENG Shao-ping

(Prestressed Engineering Research Institute, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: A general summary is given to the state of the art and the essential features of the modern PC beam bridges in China, including the current application of the prestressing systems and techniques. Some problems that need to be solved in the engineering practice are discussed and investigated. In the end, suggestions and comments for improving our technology on PC beam bridges as a whole and the trends for future development are pointed out.

Key words: prestressed concrete bridge; development; review

1 概 述

在量大面广的中小跨径及一般大跨径桥梁中,各种形式的预应力混凝土梁桥一直占有主导地位,而且有着广阔的发展前景。

近 20 年来,随着我国交通运输业的蓬勃发展,预应力混凝土梁桥的建设取得了很大的成就,其技术进步主要表现在以下几方面:

在结构材料方面,高强、早强混凝土,高性能混凝土,以及在特殊使用要求下的特种混凝土正在得到推广应用,商品混凝土和泵送混凝土正在取代传统的施工方法;在预应力技术上,高强钢绞线、大吨位群锚技术日益普及,目前 1 860 MPa 级的高强钢绞线,几乎包揽了新建大跨度预应力混凝土桥梁的天下;各种预应力管道材料及成孔技术不断完善;大吨位的新型支座,大位移量的伸缩缝也在推陈出新。

在结构设计方面,计算结构力学的发展和计算机的普及应用,使得大型复杂桥梁的计算和绘图工作效率大大提高;同时,一些复杂的力学分析,诸如温度、徐变收缩、剪滞效应、非线性、抗震等棘手的问题,可以通过电算来求出较为符合实际的结果。

在施工技术方面,以悬拼、悬灌为代表的各种无支架施工方法走向成熟,施工机具的现代化水平正在提高,施工管理的水平也上了新台阶。

随着结构材料、设计水平及施工技术的提高,在工程实践上,各类桥梁的跨度记录不断刷新,建桥综合技术已经达到国际先进水平。

表 1 列出了我国目前有代表性的预应力混凝土梁桥。

2 预应力混凝土梁式桥的结构特点

收稿日期:2000-05-21

作者简介:吕志涛(1937-),男,教授,中国工程院院士,1965 年南京工学院研究生毕业。

表 1 我国有代表性的大跨度预应力混凝土梁桥

结构形式		桥 名	主 跨/ m	建成时间
连续梁	公路桥	南京长江二桥北汊桥	90 + 3 × 165 + 90	在建
		云南六库怒江桥	85 + 154 + 85	1995
	铁路桥	长江湘江桥(石长线)	61.65 + 5 × 96 + 61.65	1997
连续刚构	公路桥	湖北黄石长江大桥	162.5 + 3 × 245 + 162.5	1995
		广东虎门大桥辅航桥	150 + 270 + 150	1997
	铁路桥	四川攀枝花金沙江大桥	100.8 + 168 + 100.8	1995
刚构 - 连续组合	公路桥	山东东明黄河公路大桥	75 + 2 × 120(连续梁) + 5 × 120(刚构) + 2 × 120(连续梁) + 75	1993
V 型墩刚构	公路桥	广西桂林雉山漓江桥	67.5 + 90 + 67.5	1987
	铁路桥	八渡南盘江大桥(南昆线)	54.7 + 2 × 90 + 54.7	1996

注：目前世界最大跨度预应力混凝土连续刚构桥是挪威的斯托尔马桥，主跨 301 m，1998 年建成。

按结构体系划分一般有：简支梁、连续梁、T 形刚构、连续刚构、刚构连续组合梁桥以及 V 型墩刚构等。按截面形式划分，简支梁桥的截面形式变化较多，有 I 形梁、T 形梁、形梁、槽形梁、箱形梁等；大跨度超静定梁桥绝大多数采用箱形截面。

预应力混凝土简支梁桥由于其结构简单、受力明确、施工方便，仍将是我国量大面广的中小跨径桥

梁的首选结构。一般认为，简支梁桥的合理跨径在 50 m 以下，超出这一范围，梁高急剧加大，失去其经济合理性。

与简支梁相比，其它超静定梁则具有较大的跨越能力。预应力混凝土连续梁与连续刚构同为大跨度梁式桥，但在受力上存在着一定的差异，其特点比较见表 2。

表 2 连续梁与连续刚构的受力特点比较

荷载	结构	跨中截面			中间支座截面			墩柱			竖向位移
		M	N	Q	M	N	Q	M	N	Q	
恒 + 活	连续梁	大	很小	大	稍大	很小	相近				大
	连续刚构	小	大	小	大	大	相近				小
恒 + 温变	连续梁	小	很小	小	小	很小	相近				小
	连续刚构	大	大	大	大	大	相近				大

与连续梁相比，连续刚构由于在墩顶处的墩梁固结，对梁跨形成附加约束，因而能够增加顺桥向的抗弯刚度和横桥向的抗扭刚度，从而提高桥梁的跨越能力；同时由于墩柱的约束，温度变化、收缩徐变等对连续刚构造成的内力影响，也比连续梁大得多；尽管在高墩桥位，经常采用柔性墩结构，但桥墩的材料用量、设计难度均要比连续梁大得多。

与连续刚构相比，连续梁桥在支座处仅提供竖向约束，所以在正常“恒载 + 活载”作用下的跨中截面弯矩要比连续刚构大，但由温度变化所产生的各种内力要比连续刚构小很多；大跨度连续梁对支座的承载力要求很高，甚至需要特别设计（如南京长江二桥北汊桥连续梁的支座吨位达到 65 000 kN）。但它要求桥墩只承受竖向反力，在深水基础的情况下允许采用高桩承台，能够大大简化基础及桥墩的设计与施工。

刚构 - 连续组合梁桥的受力特点则介于连续梁和连续刚构之间；V 型墩刚构则具有增加桥梁刚度的特点。总之，在大跨度桥梁的桥式方案中，应当结合具体的技术经济条件，权衡抉择。例如，南京长江二桥北汊桥，结合桥位处温差大，桥墩高的具体情

况，采用大跨度连续梁桥的方案，不失为因地制宜的优化选择，同时创造了我国大跨度连续梁桥的新记录。

3 预应力技术的应用与发展

3.1 预应力材料与锚固体系

目前桥梁上常用的预应力材料有高强钢丝、高强钢绞线和高强钢筋三大类，基本上都采用后张预应力体系，现分述如下。

3.1.1 高强钢丝体系

近年常用的高强钢丝直径有 $\phi 5$ 、 $\phi 7$ 两种，标准强度一般在 1 570 MPa 以上。

早期应用较广的弗氏锚（或称锥形锚），从现代技术来看，其锚固工艺落后、预应力损失较大、锚固效率低，预加力布束有时控制截面尺寸的选择，已趋于淘汰；镦头锚由于需对高强钢丝进行现场梳理、精确下料、现场镦头等操作，在桥梁工程中的应用也趋于减少；冷铸镦头锚配合工厂化生产的带有热挤 PE 护套的高强钢丝束，具有极好的疲劳性能，常用作斜拉桥的拉索或下承式拱桥的吊杆。

3.1.2 高强钢绞线体系

高强钢绞线群锚体系是目前桥梁预应力应用与发展的主流,近年钢绞线材料的主导产品是符合美国现行 ASTM 标准的 1 860 MPa 级的高强低松弛钢绞线。

与高强钢绞线对应的夹片式群锚,在我国品种繁多,较著名的品牌有 OVM、XM、YM、QM、XYM、TM 等。预应力扁锚也属夹片式群锚体系,可一次锚固 1~5 根钢绞线,主要用作箱形梁桥的横向预应力、连续梁局部加强预应力,或用在断面尺寸受到限制的地方。

用于接长钢绞线的连接器,可实现桥梁预应力束的分段张拉与接长。在多道弯曲预应力束的情况下,分段张拉能够减少预应力损失。

固定端锚具有 H 形锚具、P 形锚具、U 形锚具等。这些锚具主要用作一端张拉的预应力索的固定端,预先埋在混凝土中。

3.1.3 高强钢筋体系

多采用标准强度 750 MPa 精轧螺纹钢,直径有 25、32 mm 两种。一般采用单根钢筋,现已出现多根群锚体系。粗钢筋体系主要用在箱梁腹板中,作为竖向预应力。

3.2 管道成孔

70 年代普遍采用的抽拔橡胶管成孔技术,目前已被预埋金属波纹管取代,薄壁钢管也有所采用,塑料管道成孔在特别需要减少摩阻损失的大曲率束束场合已获得应用,而且从国外的应用情况来看,在我国也有进一步推广的可能。

3.3 灌浆技术

目前惯常的做法是在预应力筋张拉完成后,用普通压浆机(活塞式砂浆泵或挤压式砂浆泵)压入搅拌好的水泥浆。为改善水泥浆体的性能,有时会掺入外加剂,将浆体水灰比降到 0.35 左右,以提高水泥浆的强度,降低其泌水率。

真空辅助压浆工艺是国外近几年发展起来的一种预应力孔道压浆新技术。其基本原理是:首先采用真空泵抽吸预应力孔道中的空气,使孔道达到负压 0.1 MPa 左右的真空度,然后在孔道的另一端再用压浆机以大于 0.7 MPa 的正压力将水泥浆压入预应力孔道,以提高孔道压浆的密实度。这一技术在南京长江第二大桥斜拉桥索塔环形预应力管道施工中得到了成功应用。

4 预应力混凝土梁桥设计施工中的若干问题

4.1 裂缝开展

无庸讳言,我国有不少预应力混凝土梁桥,在施工或使用过程中,都曾不同程度地出现裂缝。裂缝产生的机理很复杂,有各种因素的影响。按其主要成因可分为:受力裂缝(由受力因素引起)和非受力裂缝(比如由拆模、养护、混凝土收缩、意外碰撞等因素引起)。裂缝的出现必将对结构的刚度和耐久性产生不利的影响。

从某些工程实例来看,预应力混凝土箱形梁桥较典型的受力裂缝有:箱梁顶板和底板的纵向裂缝,箱梁腹板的斜向裂缝,特别是靠近端支座范围的腹板斜裂缝。

要正确分析裂缝产生的成因,一般应结合裂缝产生的位置、方向、长度、宽度、深度、间距等情况,从设计、施工和材料质量等方面进行分析。

结构设计方面可能的原因有:桥跨结构布局、截面尺寸拟定的不尽合理;截面抗弯、抗剪能力不足,局部承压能力不够;对温度应力、收缩徐变等次生内力欠考虑。比如,端支座附近的腹板抗剪设计不能过分依赖竖向预应力的作用,应当重视纵向预应力的弯起效果,必要时可增加腹板厚度和箍筋用量。

施工工艺方面可能的原因有:混凝土的浇注、养生与拆模工艺不当;支架的变形过大或拆除偏早;预应力的张拉控制不好,导致有效预应力偏低;保护层厚度不符合要求;过分追求工期,施加预应力时混凝土的龄期偏短,也容易造成混凝土结构的内部损伤;还有一些是由于施工管理不严造成的质量事故,比如,实际施工时的混凝土配合比失控,外加剂掺量随意,桥面铺装严重超厚等。

4.2 预应力的张拉技术管理

4.2.1 张拉力和延伸量的双控

现行桥梁施工规范,要求预应力张拉以张拉力和延伸量进行双控,以张拉力为主,若延伸量低于 -5% 和超过 +10% 时,应停止张拉,分析检查出原因并处理完后,方可继续张拉。当发生张拉实际伸长量与理论伸长量相比超出限值时,一般应检查:锚口摩阻损失是否太大;油表或千斤顶是否需要重新标定;钢绞线弹性模量是否偏低。实际上,发生伸长量不足的大部分原因是孔道不平顺,摩阻太大,不能均匀传递预应力的缘故。

4.2.2 预应力损失和施工控制

(1) 摩阻损失是在张拉过程中同时发生的损失项,规范给出的计算公式如下:

$$s_1 = k[1 - e^{-(\mu + kx)}]$$

其中 k 值反映的是直线管道定位的平顺度, μ

值反映的是预应力筋与曲线管道之间的摩阻系数。1985 年的设计规范(JTJ023-85)没有给出钢绞线与金属波纹管间的推荐值。1989 年的施工规范(JTJ041-89)给出的钢绞线与波纹管间的值为 $k = 0.0006 \sim 0.001$, $\mu = 0.16 \sim 0.19$ 。实践表明,在管道曲率较大或有多道弯曲的情况下,工程上的实测值一般都较此值大,实际张拉伸长值超出理论计算值界限的情况时有发生。因此,现行规范推荐值所依据的试验条件可能比较单一,如果盲目根据规范值计算伸长量,作为张拉控制的依据,势必会给预应力张拉控制管理带来困难,在有条件的情况下,可进行现场 k 、 μ 值的测定。在相同的预应力布置下,如果张拉伸长值离散性大,则反映预应力施工管理上的随意性较大。

(2) 锚固损失包括锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩引起的预应力损失,计算式如下:

$$\sigma_2 = E_g L / L$$

由此可以看出,在 L 与钢筋弹性模量 E_g 一定时,钢筋的长度与锚固损失成反比,因此在钢筋特别短的情况下,锚固损失就会非常显著。例如,当采用精轧螺纹钢筋作为箱梁竖向预应力时,由于梁高一般不会很大,如果对锚固回缩量(L)控制不严,则有效预应力会丧失殆尽。实际工程中常会发现,在有些梁高较小的边支座附近,虽然布置了竖向预应力,仍然不能抑制腹板斜裂缝的开展。

(3) 松弛损失系由预应力钢筋本身的材料特性决定的,近年桥梁所用的预应力钢绞线均为低松弛钢绞线,其松弛率比 1985 年设计规范中所指钢绞线的松弛率要小很多。1989 年施工规范要求的“超张拉 1.05 k ,持荷 5 min,再锚固到 k ”的施工工艺,曾被广泛解释为减少松弛损失的措施。在目前使用的大吨位钢绞线群锚体系下,由于千斤顶的限位板作用,虽然难以做到持荷后再锚固到 k (可不强求持荷),但超张拉能够抵消松弛损失的意义总是有的。

(4) 收缩徐变损失在很大程度上取决于张拉时混凝土的龄期、强度及养护湿度。为加快施工进度,施工中常在混凝土中加入早强剂,以便早强尽快张拉,但加入早强剂后,混凝土的强度增长与弹性模量增长不一定同步,在龄期较短时施加预应力,后期预应力的损失总会较大,悬臂施工的挠度控制对徐变变形也应有充分的考虑。

4.3 经济合理性

高强混凝土和高强预应力材料的使用,使得混凝土梁桥向轻型、大跨方向迈进了许多。但同时要

承认,某些桥梁设计还比较粗放。比较结构布局类似的两座桥梁,有时会发现单位面积材料用量指标会相差很大,特别是在市政桥梁建设中,经常由于工程仓促上马,设计来不及细化,只得加大截面尺寸和材料用量以求保险,造成很多不必要的浪费。

5 结 语

5.1 进一步提高预应力混凝土桥的整体技术水平

近年来,我国预应力梁桥的建设虽然取得了很大的进步,但在设计、施工和新材料应用方面的整体技术水平还有待进一步提高,面对现实亟需改进的方面有:

5.1.1 规范修订周期太长,不能及时指导迅速发展的工程实践

现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023-85)、《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)都是 10 年前颁布的,许多内容明显滞后于当前的工程实践,有些条款实际是基于简支梁桥制定的,在新材料、新工艺方面则落后得更多,诸如,目前普遍采用的 1860 MPa 级钢绞线的抗拉设计强度在设计规范中查不到;预应力张拉作业中要求的“超张拉—持荷—退压锚固”的程序,就不太符合目前大吨位钢绞线群锚千斤顶的作业情况。规范的修定应当及时吸纳新的设计理论、科研成果和新的工艺方法,否则会给经济建设带来一定的损失。

5.1.2 预应力梁桥结构设计软件有待完善与普及

目前的预应力梁桥计算软件多数按平面杆系单元编制,也有按梁格理论考虑空间弯梁计算的。真正能够一体化完成施工图设计的、成熟的、权威性高的 CAD 软件则不多,尤其在中小设计院还没普及。复杂部位和局部应力分析,还要依赖 SAP、ADINA 等国际通用软件。

5.1.3 桥梁建设是一个系统工程,应排除人为干预,科学决策

桥梁建设不单纯是一个技术问题,还要满足经济、社会等多重现实条件,由于桥梁工程的直观性,还经常受到长官意志的制约。

5.2 放眼未来,迎接预应力梁桥技术的新飞跃

可以预见,21 世纪预应力混凝土梁桥的发展,主要会体现在以下几个方面。

5.2.1 新材料的革命

新材料的革命将促使预应力混凝土梁桥进一步向大跨度、轻型化方向发展。

C50~C100 级高强混凝土不再成为设计施工的

警戒区;高性能混凝土(新拌混凝土的高强度,硬化后混凝土的强度和耐久性等性能优异)将会得到广泛应用。

以碳纤维(CFRP)为代表的高级复合材料与钢材相比,具有自重轻、比强度高、抗疲劳性能好、减振性能好和工艺性能好等优点,目前碳纤维布、碳纤维板、碳纤维力筋和预应力索在桥梁加固和建造上的研究和应用,使桥梁技术的新一轮发展又见曙光。

混凝土废旧骨料的回收与再利用、粉煤灰高性能混凝土的应用将受到广泛的关注,绿色环保材料和可持续发展的观念将在桥梁工程中进一步深化。

5.2.2 结构耐久性评估与加固技术

既有预应力混凝土梁桥的耐久性评估与加固,是未来桥梁工作者的一项重要任务,其理论与实践都会有重要的突破。

5.2.3 防灾抗灾设计

随着预应力梁桥向大跨度轻型化方向发展,其防灾抗灾设计将进一步得到加强。

5.2.4 勘测、设计、施工和监测的智能化

多媒体计算机辅助技术面临新的发展机遇,“数字地球”技术将用于桥梁的勘测设计,人工智能化的桥梁专家系统将集结构分析、优化设计、工程制图、

工程数据库以及桥梁的环境景观评价为一体,网络技术使各种桥梁资源充分共享;桥梁的施工技术管理和施工中的计算机模拟和控制技术,必将使施工质量、效率、安全性以及可靠性得以提高;桥梁的计算机监测技术也将达到前所未有的境界。

参 考 文 献:

- [1] 吕志涛. 现代土木工程的新发展[M]. 东南大学出版社, 1998.
- [2] 王文涛. 刚构—连续组合梁桥[M]. 人民交通出版社, 1997.
- [3] 李 坚. 我国预应力混凝土连续梁桥的发展与工程实践[A]. 上海市公路学会第四届年会学术论文集[C]. 1999:77 - 84.
- [4] 刘 钊. 南京长江第二大桥北汊桥预应力混凝土连续箱梁桥的结构特点及预应力施工技术[R]. 南京长江二桥指挥部预应力技术培训班讲义, 1999:1 - 10.
- [5] 周军生, 楼庄鸿. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J]. 中国公路学报, 2000(1):31 - 37.
- [6] 胡崇武. 桥梁用预应力系统的应用与发展[J]. OVM 通讯, 2000(2):6 - 12.
- [7] 吴炜煜, 任爱珠. 多媒体计算机辅助技术在土木工程领域的新进展[J]. 土木工程学报, 2000(1):1 - 4.

《桥梁建设》1999 年度的影响因子 及其在全国科技期刊中的位置

据中国科技信息研究所 2000 年 11 月出版的《1999 年度中国科技期刊引证报告》中公布的信息表明:《桥梁建设》杂志在 1999 年继续入选为该所当年的 1372 种统计源期刊。其影响因子值为 0.154,名列全国科技期刊第 683 位,而在 34 种“交通运输”类专业的统计源期刊中名列第 5 位。

这一影响因子值是由该所将 1997 和 1998 两年中被其统计源期刊上收录的 136 篇论文数去除这些论文被 1999 年的 1372 种统计源期刊引用的 21 次而得,由于它是一个相对的统计量,其值越大,表明刊物的学术影响力和作用也越大,因此是最能公平地评价各类期刊学术质量和学术水平的一项重要指标。

(范文田)