

YUYINGLI HUNNINGTU LIANXUXIANGLIANGQIAO FANGLIESHEJI

预应力混凝土连续 箱梁桥防裂设计

彭卫 著



地震出版社

预应力混凝土连续箱梁桥防裂设计

彭 卫 著



地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

预应力混凝土连续箱梁桥防裂设计/彭卫著. —北京:地震出版社, 2006.1

ISBN 7-5028-2785-4

I. 预… II. 彭… III. 预应力混凝土桥—防裂—设计 IV. U448.352.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 124376 号

地震版 XT200400372

内容提要 本书针对已建的预应力混凝土连续箱梁桥普遍存在裂缝的现状, 根据最新桥梁结构理论和有关新规范, 从设计、施工以及维修加固等方面, 系统地阐述了预应力混凝土连续箱梁桥裂缝型式与产生原因, 分析了引起混凝土箱梁桥开裂的敏感性因素, 提出了该类桥梁防裂设计建议与施工养护措施, 并针对不同部位、不同性质的裂缝提出了多种加固措施。本书可供土木、交通、市政、水利等行业从事桥梁工程专业的技术人员、高等院校高年级本科生和研究生学习参考。

预应力混凝土连续箱梁桥防裂设计

彭 卫 著

责任编辑: 陈晏群

责任校对: 郭京平

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版 (印) 次: 2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 237 千字

印张: 9.25

印数: 0001 ~ 1500

书号: ISBN 7-5028-2785-4/TU·201 (3420)

定价: 28.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

预应力混凝土连续箱梁桥具有变形小，结构刚度好，行车平顺舒适，养护简易，以及抗震能力强等特点而被广泛采用。随着预应力混凝土连续箱梁桥所用建筑材料、锚具、支座及伸缩装置等的发展，施工机具和施工技术的不断改进和更新，特别是悬臂浇筑法的广泛应用，使得当桥梁跨径在 200m 以下时预应力混凝土连续箱梁桥成为我国桥梁建设的主要桥型。

然而，在国内外所建的预应力混凝土连续箱梁桥中，经常出现各种裂缝。根据结构设计原理和目前实桥调查的情况看，在已建成的预应力混凝土连续箱梁桥中主要存在着纵向弯曲裂缝、弯曲剪应力裂缝和主拉应力裂缝。裂缝产生的位置和型式具有一定的共性，影响了桥梁使用的耐久性和营运的安全性。为了解决这一普遍性的难题，很多科研机构、高等院校和桥梁建设单位对此进行了专题调查和研究。在浙江省交通厅、浙江省公路管理局的资助下，作者参与了“预应力混凝土连续箱梁桥裂缝防治与研究”、“混凝土箱梁桥加固措施研究”等课题的研究，主持其中关键技术的研究工作。本书的内容主要是这些研究成果的总结，并结合最新桥涵设计、施工、养护规范，提出了预应力混凝土连续箱梁桥的防裂设计建议与修复措施，并用工程实例对各种加固措施与加固工艺进行阐释，总结得出若干结论，以供设计、施工、监理、管理、维修等部门参考。

全书共分五章。第一章介绍了现代预应力混凝土连续箱梁桥中所用的预应力钢材和混凝土材料，主要介绍了几种常用的国内外预应力

锚固体系以及箱梁的三向预应力体系；第二章简要说明了预应力混凝土连续箱梁桥的设计程序与计算软件；第三章先分析了主要结构裂缝型式，然后通过两座带典型裂缝箱梁桥的平面有限元与空间有限元计算，探求了引起箱梁开裂的一些敏感性因素；第四章在前面裂缝分析的基础上，针对性地提出了混凝土箱梁桥的各种加固维修措施与加固工艺要求，并结合工程实例阐明了几种加固方案的特点与实施效果；第五章在总结前面几章的基础上，系统地阐述了预应力混凝土连续箱梁桥的防裂设计思路、构造措施以及施工控制与养护策略。

本书成果也是集体智慧的结晶。两个课题组成员的通力协作，使我们在预应力混凝土连续箱梁桥裂缝问题的研究上取得了有益的进展。感谢全体课题组成员的辛勤劳动，他们是邢鸿燕副教授、张新军博士、施颖高工、孙文智高工、李海光工程师。金华市公路管理处还提供了箱梁桥加固的工程实例资料。封面照片由蒋云昕工程师提供。在研究工作中，王振民教授级高工、汪银华教授级高工、朱汉华教授级高工、潘仁泉高工、项新里教授级高工等给予了许多启发性的指导，在此表示感谢；感谢林晨老师、李丽琴老师在编辑工作中的无私帮助。程显风老师，吴育萍老师打印了部分文稿。还有一些没有提及的单位、朋友也为本书的出版给予了热心的关注，并提供了诸多帮助。本书的出版得到了金华职业技术学院专著出版基金的资助。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有遗漏、疏忽之处，错误也在所难免，殷切期望广大读者批评指正。

作 者

2005年9月

目 录

第一章 材料与预应力体系	(1)
第一节 混凝土	(1)
一、混凝土的强度与弹性模量	(1)
二、高强混凝土	(2)
三、泵送混凝土	(4)
第二节 钢筋	(4)
一、钢筋的强度与弹性模量	(4)
二、预应力钢材	(6)
第三节 国外主要预应力锚固体系	(8)
一、法国弗莱西奈 (FREYSSINET) 体系	(8)
二、瑞士 VSL 体系	(10)
三、德国地伟达 (DYWIDAG) 体系	(10)
第四节 国内主要预应力锚固体系	(11)
一、预应力粗钢筋张拉锚固体系	(11)
二、预应力高强精轧螺纹钢筋张拉锚固体系	(13)
三、DM 型预应力张拉锚固体系	(14)
四、LM 型预应力张拉锚固体系	(15)
五、OVM 型预应力张拉锚固体系	(17)
六、YM 型预应力张拉锚固体系	(25)
第五节 箱梁三向预应力体系	(25)
一、纵向预应力钢筋	(25)
二、横向预应力钢筋	(32)
三、竖向预应力钢筋	(33)
第二章 预应力混凝土连续箱梁桥的设计	(34)
第一节 设计思路与计算软件	(34)
一、设计思路	(34)
二、计算软件	(35)
第二节 基本尺寸拟定	(37)
一、分跨与跨径组合	(37)
二、主梁高度的拟定	(37)
三、箱梁截面的细部尺寸	(37)
第三节 内力计算	(39)
一、恒载内力计算	(39)

二、活载内力计算	(40)
三、次内力计算	(40)
四、内力组合	(42)
第四节 预应力钢束的估算及布置	(44)
一、预应力钢束的估算	(44)
二、预应力筋束的布置原则	(47)
第五节 结构验算	(47)
一、承载能力极限状态计算	(47)
二、正常使用极限状态计算	(51)
三、其他计算与验算	(54)
第三章 裂缝存在型式与成因分析	(55)
第一节 主要结构裂缝型式	(55)
一、按成因分类	(55)
二、按外在表现形式分类	(57)
第二节 带典型裂缝箱梁桥的有限元分析	(60)
一、桥例一:有限元分析	(60)
二、桥例二:有限元分析	(69)
第三节 引起箱梁开裂的敏感性因素分析	(76)
一、预应力因素	(76)
二、箱梁的剪力滞效应与畸变应力	(79)
三、混凝土的收缩徐变效应	(81)
四、混凝土箱梁桥的温差应力	(86)
五、箱梁桥的构造因素	(86)
第四章 混凝土箱梁桥加固措施研究	(88)
第一节 桥梁检测的目的与内容	(88)
一、检测目的	(88)
二、检测内容	(88)
第二节 挠曲裂缝与剪切裂缝的修复	(90)
一、挠曲裂缝的修复	(90)
二、剪切裂缝的修复	(93)
第三节 加固维修方案	(94)
一、日常养护与维修	(95)
二、加固方法与适用范围	(95)
第四节 加固工艺要求	(102)
一、裂缝封闭处置	(102)
二、混凝土表面缺陷处置	(103)
三、FRP 补强加固	(106)
四、粘贴钢板加固	(108)
五、增设加劲钢架	(109)

六、新增腹板混凝土·····	(110)
第五节 工程实例·····	(111)
一、工程概况·····	(111)
二、加固维修方案·····	(111)
三、加固后荷载试验结果·····	(119)
第五章 防裂设计思路与构造措施 ·····	(120)
第一节 预应力钢筋的设置·····	(120)
一、腹板预应力束的布置·····	(120)
二、顶板预应力束的布置·····	(121)
三、布置曲线型力筋注意事项·····	(121)
第二节 箱梁翼板的有效宽度与内力增大系数·····	(121)
一、美国《规范》(94 版) ·····	(122)
二、英国《规范》(BS5400) ·····	(122)
三、德国《规范》(DIN1075) ·····	(122)
四、我国《规范》(JTG D62-2004) ·····	(125)
第三节 箱梁桥各部分尺寸的合理设计·····	(125)
一、目前的箱梁桥结构尺寸设计中存在的主要问题 ·····	(125)
二、边跨与中跨的比例及高跨比 ·····	(125)
三、箱梁断面各组成部分的最小构造尺寸 ·····	(125)
第四节 温度梯度模式·····	(126)
一、英国 BS5400·····	(127)
二、美国荷载规范(94 版) ·····	(127)
三、新西兰桥规 ·····	(128)
第五节 非预应力钢筋的配置·····	(129)
一、普通钢筋的布置 ·····	(129)
二、其他国家规范相关规定·····	(133)
第六节 施工控制与养护策略·····	(135)
一、预应力筋张拉工艺 ·····	(135)
二、混凝土浇筑与养护·····	(136)
参考文献 ·····	(138)
参考资料 ·····	(138)

第一章 材料与预应力体系

第一节 混凝土

一、混凝土的强度与弹性模量

1. 混凝土强度等级

混凝土强度等级应按边长为 150mm 立方体试件的抗压强度标准值确定。抗压强度标准值系指试件用标准方法制作、养护至 28d 龄期，以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度（以 MPa 计）。

混凝土强度等级用 150mm×150mm×150mm 立方体抗压强度标准值并冠以 C 表示，如 C30 表示 30 级混凝土。

公路桥涵受力构件的混凝土强度等级应按下列规定采用：

- (1) 钢筋混凝土构件不应低于 C20，当用 HRB400、KL400 级钢筋配筋时，不应低于 C25。
- (2) 预应力混凝土构件不应低于 C40。悬臂浇筑的大跨径预应力混凝土连续箱梁桥一般为 C50~C60 混凝土。

2. 混凝土强度标准值与设计值

- (1) 混凝土轴心抗压强度标准 f_{ck} 和轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 应按表 1-1-1 采用。
- (2) 混凝土轴心抗压强度设计值 f_{cd} 和轴心抗拉强度设计值 f_{td} 应按表 1-1-2 采用。

表 1-1-1 混凝土强度标准值 (MPa)

强度等级 强度种类	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.40	2.51	2.65	2.74	2.85	2.93	3.00	3.05	3.10

表 1-1-2 混凝土强度设计值 (MPa)

强度等级 强度种类	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{cd}	6.9	9.2	11.5	13.8	16.1	18.4	20.5	22.4	24.4	26.5	28.5	30.5	32.4	34.6
f_{td}	0.88	1.06	1.23	1.39	1.52	1.65	1.74	1.83	1.89	1.96	2.02	2.07	2.10	2.14

(3) 计算现浇钢筋混凝土轴心受压和偏心受压构件时, 如截面的长边或直径 $<300\text{mm}$, 表中数值应乘以系数 0.8; 当构件质量(混凝土成型、截面和轴线尺寸等)确有保证时, 可不受此限。

3. 混凝土的弹性模量与剪变模量

(1) 混凝土受压或受拉时的弹性模量 E_c 应按表 1-1-3 采用。

表 1-1-3 混凝土的弹性模量 (MPa)

混凝土 强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
$E_c (\times 10^4)$	2.20	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.60	3.65	3.70	3.75	3.80

(2) 当采用引气剂及较高砂率的泵送混凝土且无实测数据时, 表中 C50~C80 的 E_c 值应乘以折减系数 0.95。

(3) 混凝土的剪变模量 G_c 可按表 1-1-3 数值的 0.4 倍采用, 混凝土的泊松比 ν_c 可采用 0.2。

二、高强混凝土

1. 高强混凝土材料组成

组成普通水泥混凝土的原材料包括五种: 水泥、水、粗集料(石子)、细集料(砂)和外加剂; 必要时, 高强混凝土配制中还可加入矿物掺合料。目前悬臂浇筑预应力混凝土连续梁桥一般采用 C50~C60 混凝土, 属于高强度混凝土。配制高强混凝土的水泥一般采用标号不低于 525 号的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥; 对于 C50 混凝土必要时也可以采用 425 号硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。立窑生产的水泥由于其存在质量稳定性问题, 不推荐使用。水泥用量应根据强度要求、混凝土工作度要求以及收缩、水化热等因素决定, 一般用量控制在 $400\sim 500\text{kg/m}^3$, 不宜超过 500kg/m^3 。水泥含量过低造成胶凝物质含量过低, 不利于强度提高与混凝土工作度, 水泥用量过大会产生水化放热量大和过大收缩等问题, 同时水泥用量达到一定程度后, 继续增大用量对混凝土强度的提高作用减弱。

配置高强混凝土的粗骨料的性能对混凝土的抗压强度及弹性模量起到决定性的制约作用, 粗骨料宜选用坚硬密实的石灰岩或辉绿岩、花岗岩、正长岩、辉长岩等深层火成岩碎石, 其抗压强度应比所配制的混凝土强度高 50% 以上, 含泥量应 $<1\%$ 。粗骨料针片状颗粒含量越多, 空隙率越大, 导致所需浆体和单位用水量越多, 从而导致混凝土强度降低, 因此针片状颗粒含量应 $<5\%$ 。通常情况下, 级配良好的粗骨料最大粒径越大, 所有骨料堆积后的表面积就越小。因而能够减少浆体用量, 对强度、变形、工作度都有利, 但是粗骨料粒径愈大, 骨料本身强度也愈低, 同时混凝土的抗渗性也愈差。配置高强度混凝土应采用立方形的碎石, 不宜采用天然砾石, 要求粗集料表面干净无粉尘。同时, 粗骨料还必须严格控制有害物质含量。

桥涵混凝土的细集料应采用级配良好、质地坚硬、颗粒洁净、粒径 $<5\text{mm}$ 的河砂, 特殊情况下也可选用山砂或用硬质岩加工的机制砂, 不宜选用海砂。高强混凝土宜使用细度模数较大的中粗砂, 以减少拌和物需水量。因此配置高强混凝土的细集料应选用级配良好的中粗砂, 细度模数不小于 2.6 为宜; 对于泵送高强混凝土宜选用中砂, 细度模数在 2.6~2.9 之间

为宜。细集料中的黏土以及云母含量应尽可能低,其含泥量应 $<2\%$ 。为了提高混凝土拌和物的流动性,便于泵送,同时尽可能降低水胶比(水与胶结料的重量比,后者包括水泥及混合材料的重量),减少用水量。

拌制混凝土的水不得含有影响水泥正常凝结与硬化的有害物质,也不得包含有糖类、油脂以及游离酸类等。一般可不经试验即采用供饮用的水作为拌和用水,但是不得采用海水、污水、 pH 值 <5 的酸性水以及含硫酸盐量按 SO_4^{2-} 计超过水的质量 $0.27\text{mg}/\text{cm}^3$ 的水不得使用。所配置的混凝土强度等级愈高,用水量愈应减到最低限度,高强混凝土水胶比宜控制在 $0.24\sim 0.38$ 范围内。

由于混凝土外加剂能够比较好地解决高强混凝土低水灰比和高坍落度之间的矛盾,所以在高强混凝土配合比中大多有采用,外加剂主要有高效减水剂和缓凝剂以及复合高效减水剂等。

2. 高强混凝土配合比设计

高强混凝土的配合比除了满足拌和物的工作性和结构时间强度外,还应有利于减少温度收缩、干燥收缩、自生收缩引起的体积变形,避免早期开裂。目前,设计基准强度超过C50的高强混凝土,其配合比还没有一个标准的方法,但在配合比设计时应遵循低水灰比(或水胶比)、低砂率、高骨灰比(或骨胶比)的原则进行。

高强混凝土的用水量低,水灰比一般 <0.35 ;所配置的混凝土强度愈高,水灰比相应愈低;所用水胶比宜控制在 $0.24\sim 0.38$ 范围内。

混凝土配合比设计的步骤可以概括为:按照工程要求,挑选合适的混凝土基本材料,运用新拌混凝土和硬化混凝土的工作性及受力性能的规律,权衡混凝土性能的得失和经济效益的影响,通过合理的估算和试验验证、调整,最终确定混凝土各种成分的最佳组合。确定混凝土的配合比一般按照以下程序进行。

首先应确定混凝土的性能要求,对于硬化混凝土来说,主要是确定强度和耐久性。当无可靠的强度统计数据以及标准差数值时,C50~C60混凝土的施工配制强度(平均值)应不低于强度等级的1.15倍;对于新拌混凝土则主要是其工作性,包括流动性、黏聚性和保水性;对于高强混凝土来说,强度尤为重要,还须根据结构形式、构件形状、构造物所处环境以及混凝土的施工期、施工方法等来确定所需要的混凝土特性。

其次,根据混凝土的性能要求,选择混凝土原材料,特别是集料以及混合料的选择尤为重要。其选择原则可参考前面所述。

根据第一步确定的新拌混凝土的工作性(或坍落度)以及硬化混凝土的强度和耐久性,合理估算配合比后,求出水灰比、单位用水量、水泥用量、粗细集料用量和混合料的用量。根据所确定的单位体积混凝土材料,进行试拌。

以试拌的配合比进行混凝土试验,测定坍落度以及坍塌损失;测定成型试块在标准养护条件下3d、7d、28d的试块抗压强度;根据测试结果调整配合比,再重新试拌测定相关性能,大体满足后确定设计的配合比。

最后,在设计配合比的基础上,根据集料的含水量,调整集料及用水量得到施工配合比,计算出每拌下料量,至此完成混凝土的配合比设计。

三、泵送混凝土

泵送混凝土是指从搅拌运输车或储料斗中卸入混凝土泵的料斗，利用泵的压力将混凝土沿管道直接水平或垂直输送到浇筑地点的施工工艺。

泵送混凝土的原材料与配合比比常规混凝土的要求更高，更严格。不但要满足混凝土的设计强度和耐久性的要求，还应满足可泵性要求。即在泵压作用下，混凝土能在输送管道中连续稳定地通过而不产生离析的性能，它取决于拌合物本身的和易性。在实际应用中和易性往往根据坍落度来判断，坍落度越小，和易性也越小，但坍落度太大又会影响混凝土的强度。因此，一般认为 10~20cm 较合适，具体值要根据泵送距离、气温来决定。

连续梁主梁泵送混凝土强度等级高，因此要求混凝土有较低的水灰比，同时具有较大的流动性，保持良好的泵送性能。因此这种混凝土是一种低水灰比而混凝土坍落度大且经时损失小的大流动性混凝土，所以必须掺用高效外加剂（改性的减水剂）来满足这两方面的需要。高效外加剂（泵送剂）的选用主要考虑减水率以及与所选用水泥的相容性。一般选用属胺基、萘系磺酸盐系列的高效外加剂，其品种和掺量通过试验确定，并要求符合现行国家标准《混凝土泵送剂》的规定。

泵送混凝土掺合料一般选用具有比表面积较大的磨细矿物微粉，它一方面参与部分水化作用，另一方面作为微骨料，填充混凝土内部微隙增加密实性，并能调节和易性，提高混凝土整体密实度，加强混凝土界面结合，促使混凝土强度和耐久性的提高。一般选用优质粉煤灰作为掺合料，实践证明，掺入粉煤灰不但具有上述性能，而且可显著提高混凝土的流动性。掺粉煤灰的泵送混凝土配合比设计，必须经过试配来确定，并应符合国家现行标准《粉煤灰在混凝土和砂浆中应用技术规程》、《混凝土外加剂应用技术规范》、《普通混凝土配合比设计规程》等有关规定。

第二节 钢 筋

一、钢筋的强度与弹性模量

1. 公路混凝土桥涵的钢筋选用

(1) 钢筋混凝土及预应力混凝土构件中的普通钢筋宜选用热轧 R235、HRB335、HRB400 及 KL400 钢筋，预应力混凝土构件中的箍筋应选用其中的带肋钢筋；按构造要求配置的钢筋网可采用冷轧带肋钢筋。

(2) 预应力混凝土构件中的预应力钢筋应选用钢绞线、钢丝；中、小型构件或竖、横向预应力钢筋，也可选用精轧螺纹钢。

(3) R235 钢筋系指国家标准《钢筋混凝土用热轧光圆钢筋》(GB 13013-1991) 中的 I 级钢筋；HRB335、HRB400 钢筋摘自国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499-1998)、相当于原国家标准 GB 1499-91 中的 II 级钢筋、III 级钢筋；KL400 钢筋系指国家标准《钢筋混凝土用余热处理钢筋》(GB 13014-1991) 中的 III 级钢筋；冷轧带肋钢筋取自国家标准《冷轧带肋钢筋》(GB 13788-1992)；

(4) 预应力钢丝系指国家标准《预应力混凝土用钢丝》(GB/T 5223-1995) 及其第一号修

改单中消除应力的三面刻痕钢丝、螺旋肋钢丝和光面钢丝。

2. 钢筋强度标准值与设计值

(1) 钢筋的抗拉强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。普通钢筋的抗拉强度标准值 f_{sk} 和预应力钢筋的抗拉强度标准值 f_{pk} ，应分别按表 1-2-1 和表 1-2-2 采用。

表 1-2-1 普通钢筋抗拉强度标准值 (MPa)

钢筋种类	符号	f_{sk}	钢筋种类	符号	f_{sk}
R235 $d=8\sim 20$	ϕ	235	HRB400 $d=6\sim 50$	Φ	400
HRB335 $d=6\sim 50$	ϕ	335	KL400 $d=8\sim 40$	Φ^k	400

注：表中 d 系指国家标准中的钢筋公称直径，单位 mm。

表 1-2-2 预应力钢筋抗拉强度标准值 (MPa)

钢筋种类			符号	f_{pk}
钢 纹 线	1×2 (二股)	$d=8.0、10.0$ $d=12.0$	ϕ^s	1470、1570、1720、1860 1470、1570、1720
	1×3 (三股)	$d=8.6、10.8$ $d=12.9$		1470、1570、1720、1860 1470、1570、1720
	1×7 (七股)	$d=9.5、11.1、12.7$ $d=15.2$		1860 1720、1860
消 除 应 力 钢 丝	光面	$d=4.5$ $d=6$	ϕ^p	1470、1570、1670、1770 1570、1670
	螺旋肋	$d=7、8、9$	ϕ^H	1470、1570
	刻痕	$d=5、7$	ϕ^j	1470、1570
精轧螺纹钢		$d=40$	JL	540
		$d=18、25、32$		540、785、930

注：表中 d 系指国家标准中钢绞线、钢丝和精轧螺纹钢的公称直径，单位 mm。

(2) 普通钢筋的抗拉强度设计值 f_{sd} 和抗压强度设计值 f'_{sd} 应按表 1-2-3 采用；预应力钢筋的抗拉强度设计值 f_{pd} 和抗压强度设计值 f'_{pd} 应按表 1-2-4 采用。

表 1-2-3 普通钢筋抗拉、抗压强度设计值 (MPa)

钢筋种类	f_{sd}	f'_{sd}	钢筋种类	f_{sd}	f'_{sd}
R235 $d=8\sim 20$	195	195	HRB400 $d=6\sim 50$	330	330
HRB335 $d=6\sim 50$	280	280	KL400 $d=8\sim 40$	330	330

注：(1) 钢筋混凝土轴心受拉和小偏心受拉构件的钢筋抗拉强度设计值 $>330\text{MPa}$ 时，仍应按 330 MPa 取用；

(2) 构件中配有不同种类的钢筋时，每种钢筋应采用各自的强度设计值。

表 1-2-4 预应力钢筋抗拉、抗压强度设计值 (MPa)

钢 筋 种 类	f_{pk}	f_{pd}	f'_{pd}
钢绞线	1470	1000	390
1×2 (二股)	1570	1070	
1×3 (三股)	1720	1170	
1×7 (七股)	1860	1260	
消除应力光面钢丝 和螺旋肋钢丝	1470	1000	410
	1570	1070	
	1670	1140	
	1770	1200	
消除应力刻痕钢丝	1470	1000	410
	1570	1070	
精轧螺纹钢	540	450	400
	785	650	
	930	770	

3. 钢筋的弹性模量

普通钢筋的弹性模量 E_s 和预应力钢筋的弹性模量 E_p 应按表 1-2-5 采用。

表 1-2-5 钢筋的弹性模量 (MPa)

钢 筋 种 类	E_s	钢 筋 种 类	E_p
R235	2.1×10^5	消除应力光面钢丝、 螺旋肋钢丝、刻痕钢丝	2.05×10^5
HRB335、HRB400、 KL400、精轧螺纹钢	2.0×10^5	钢绞线	1.95×10^5

二、预应力钢材

1. 高强度钢丝

预应力混凝土结构常用的高强度钢丝，又称碳素钢丝，是用含碳量为 0.7%~1.4% 的优质碳素钢盘条加热至 850~950℃，并经过铅浴淬火，然后酸洗冷拔而成。钢丝经过矫直回火处理后，可消除钢丝冷拔中产生的残余应力，提高钢丝的比例极限、屈服强度和弹性模量，并改善塑性，称为消除应力钢丝。因此，钢丝按交货状态分为冷拉钢丝及消除应力钢丝两种；为了提高钢丝与混凝土的黏结力，可将钢丝表面刻痕，所以钢丝按外形分为光面钢丝及刻痕钢丝两种；按松弛等级分为两级，即 I 级松弛和 II 级松弛。我国国家标准《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223-1995 按光面钢丝、刻痕钢丝、消除应力钢丝、冷拉钢丝相应规定了其规格尺寸标准以及力学性能。

2. 钢绞线

预应力混凝土用钢绞线系用冷拔钢丝制造，是在绞线机上以一根稍粗的直钢丝作为中心丝，其余钢丝围绕中心丝进行螺旋状绞合，再经过低温回火而成的。其一般规格有 2 股、3 股、7 股等，桥梁一般采用 7 股钢绞线（结构为 1×7 ）。

钢绞线按应力松弛分为二级：I 级松弛、II 级松弛；按是否模拔可分为标准型和模拔型；按捻向可分为左捻（代号 S）和右捻（代号 Z）。

模拔钢绞线就是在普通钢绞线绞制成型时通过一个模子拔制，并对其进行低温回火处理而成。模拔型钢绞线由于每根钢丝在挤压接触时被压扁，使钢绞线内部空隙和外径减少，同等尺寸时有效面积更大；同时绞线周边面积增大，有利于锚固。

钢绞线作为预应力钢筋具有以下优点：一根钢绞线代替多根钢丝，工艺简化，锚固简单；钢绞线比钢丝柔软，盘弯后运输方便，也减少了钢丝成束工序；钢绞线的表面呈螺旋状，与混凝土的黏结较好。但是，由于其绞制后成螺旋状，降低了其弹性模量与强度，应力松弛也稍大。因此，我国桥梁采用高强度、低松弛钢绞线作为预应力钢材是主要趋势。

我国桥梁工程所用钢绞线多为符合国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224-1995 或符合美国 ASTM A416-94 标准（或 A416/A416M-98 标准）的 7 股钢绞线；国内厂家根据美国 ASTM A416 标准制定了企业标准，并在此基础上增加了 2000MPa 级的钢绞线。

3. 高强度粗钢筋

在公路桥梁工程中，最常用的高强度粗钢筋是冷拉 IV 级钢筋（直径 $\phi 25\text{mm}$ 、 $\phi 32\text{mm}$ 两种）与精轧螺纹钢（直径 $\phi 25\text{mm}$ 、 $\phi 32\text{mm}$ 两种）。

冷拉钢筋是指经过冷拉后提高了抗拉强度的热轧低合金钢筋。鉴于目前生产的低合金钢的屈服强度都较低，而屈服强度与极限强度的比值却较大，为了充分挖掘钢材强度的潜力，钢材在使用前，常温条件下用卷扬机或千斤顶等设备将热轧钢筋进行拉伸，使其拉伸控制应力 σ_k 超过屈服强度 σ_s ，但小于抗拉极限强度 σ_b ，停留一段时间后钢材发生时效硬化，从而提高了其抗拉强度，而且弹性模量也可以恢复到冷拉前的数值。冷拉时效与温度相关，过高温度（700℃）时钢筋的冷拉时效会全部消失，恢复到冷拉前的力学性能。因此，需要焊接接长的钢筋必须在冷拉前焊接，然后再冷拉。

根据《混凝土结构工程施工和验收规范》（GB 50204-92）以及《公路桥涵施工技术规范》（JTJ041-2000）的规定，钢筋的冷拉工艺已经改变了过去的“双控”和“单控”的方法，而采用控制应力或控制冷拉率的方法。但是不能分清炉批号的热轧钢筋不应采用控制冷拉率的办法。

由于冷拉钢筋中含碳量和所加的合金元素对低合金钢的焊接性能有一定的影响，造成钢筋的接长较为困难，为了解决这一矛盾，可以在钢筋端部的冷轧螺纹采用套筒接长，或者是钢厂用热轧方法直接生产一种无纵肋的精轧螺纹钢，在端部用螺纹套筒进行连接接长。

精轧螺纹钢在桥梁工程中大量应用，交通部公路规划设计院曾编写了《预应力高强精轧螺纹钢设计施工暂行规定》（简称《暂行规定》），目前设计与施工大多参照此规定执行；《公路桥涵施工技术规范》（JTJ041-2000）根据有关企业的标准也做出了相应的规定。

《暂行规定》的松弛值作为设计值参考价值较大，因而设计时精轧螺纹钢的松弛率可取 3%，实施时根据产品品质保证书提供的值进行复核校算为妥；精轧螺纹钢的级别宜参考《桥涵施工规范》，理由是其数据来源于企业标准，不用担心产品供应量。

第三节 国外主要预应力锚固体系*

在国外,预应力技术经过多年的发展,应用技术已比较完善。世界上从事预应力的一些著名公司大多都是综合性的工程公司,除生产和销售预应力锚夹具和设备外,还承包工程。每家这样的预应力公司都有自己的一套完整的预应力张拉锚固体系。但由于钢绞线预应力体系的特有优点,随着钢绞线群锚体系的发展及在整个预应力体系中所占的比重迅速增大,各家公司也都补充研制了自己的钢绞线群锚体系。下面简要介绍几种国外具有代表性的预应力张拉锚固体系。

一、法国弗莱西奈(FREYSSINET)体系

1. 概况

弗莱西奈国际公司(Freyssinet International)是世界上最著名的预应力公司之一。20世纪30年代末在世界上首先使用高强度的钢筋给混凝土施加预应力,并将这一先进的技术应用于工业领域。弗莱西奈的施工法现在世界各地普遍使用。该公司目前有多种系列产品,如锚固12根钢丝和12根钢绞线的锥形锚系列,锚固12根钢绞线的V系列、锚固多根钢绞线的群锚系列(K系列)以及锚固单根钢绞线的F.K.K单索锚系列。

弗莱西奈施工法早期主要是研制“锥形锚塞”式锚具,称为多线系列,用以锚固每12根为一束的高强钢丝或钢绞线。最初用于锚固高强钢丝锚具的锚环及锚塞都是采用由螺旋筋加强的混凝土块制成的;锚固钢绞线的锥形锚具是钢制的。锚固钢绞线锚具的锚环有两种:一种是中间有平锥孔的用以锚固12T12.4mm和12T12.7mm的钢绞线;另一种是中间锥形孔表面有凹槽的用以锚固12T15.2mm的钢绞线。钢制的锚塞同钢筋混凝土制的相同。

后来该公司经过改进,采用了效率较高的V系列。V系列锚具由夹片、锚杯及锚座组成,夹片为直立三片式;锚杯在外圆有12个圆锥形的锚孔,同样用以锚固12根一束的钢绞线。

该公司后又对V系列作进一步的改进,并突破了每12根为一束的传统,研制成功群锚系列(K系列)。与V系列不同的是群锚系列锚杯是由若干个同心圆排列的并向心倾斜的锚孔组成的,结构较紧凑,而且还可根据需要,锚固不同根数的钢绞线。

F.K.K单索锚系列主要用于锚固各种直径的单根钢绞线,既可作为锚具单独使用,也可作为夹具使用,或用在连接器上。

弗莱西奈预应力张拉锚固体系的部分锚夹具的分类及主要结构见表1-3-1。

2. 主要特点

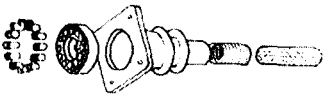
(1) 多线系列具有以下特点:

- ① 预应力钢筋可以采用盘圆运送到现场,便于运输、堆放;
- ② 预应力钢筋无需作预加工,而且切割长度要求也不严,可在施工现场很容易地组装成钢束;
- ③ 钢束的曲线布置简便,可以满足不同线形的需要;
- ④ 对钢束的穿入、张拉、锚固等,弗莱西奈张拉锚固体系均有专用的设备,操作简便;
- ⑤ 多线系列是多根平行钢丝或钢绞线同时张拉,并用一个锚塞同时锚定,容易造成各线

* 刘效尧、朱新实,预应力技术及材料设备,北京:人民交通出版社,1998。

之间张拉力不均匀, 锚固效果不好。

表 1-3-1 锚夹具的分类及主要结构

系列		类别	预应力束的组成/mm	断面积/mm ²	单位长度质量/(kg/m)	拉伸荷载/t	屈服荷载/t	波纹管标准内径/mm	备 注
弗莱西奈多线系列	多股钢丝系列	12φ5	12φ5	236	1.85	41.4	36.6	35	钢束的质量不含波纹管
		12φ7	12φ7	462	3.63	76.2	67.2	45	
		12φ8	12φ8	603	4.74	96.6	84.6	50	
	多股钢绞线系列	12T13	12T12.4	1115	8.75	195.6	166.8	参照弗莱西奈施工标准	钢束的质量不含波纹管
		12T13	12T12.7	1185	9.29	224.4	190.8		
		12T15	12T15.2	1664	13.21	319.2	271.2		
弗莱西奈 V 系列	12V13	12T12.4	1115	8.75	195.6	166.8	参照弗莱西奈施工标准	表中仅表示代表性的组合, 也可以使用少于该数目的钢绞线束	
	12V13	12T12.7	1185	9.29	224.4	190.8			
	12V15	12T15.2	1664	13.21	319.2	271.2			
弗莱西奈群锚系列	27K13 19K15	27T12.4	2508	19.7	440.1	375.3	95	表中表示代表性的组合, 其他场合可由 F.K.K 组合使用	
		27T12.7	2665	20.9	504.9	429.3			
		19T15.2	2635	20.9	505.4	429.4			
	37K13 27K15	37T12.4	3437	27.0	603.1	514.3	105		
		37T12.7	3652	28.6	691.0	588.3			
		27T15.2	3745	29.7	718.2	610.2			
	55K13 37K15	55T12.4	5110	40.1	896.5	764.5	130		
		55T12.7	5429	42.6	1028.5	874.5			
		37T15.2	5132	40.7	984.2	836.2			
F.K.K 单索锚系列	1T13	1T12.7	98.7	0.774	18.7	15.9	参照弗莱西奈施工标准	用于无黏结预应力钢绞线, 其施工法详见有关技术资料	
	1T15	1T15.2	138.7	1.101	26.6	22.6			
	1T18	1T17.8	208.4	1.652	39.5	33.6			
	1T19	1T19.3	243.7	1.931	46.0	39.5			
	1T20	1T20.3	270.9	2.149	50.5	43.0			
	1T22	1T21.8	312.9	2.482	58.4	50.5			
其他	8T15	8T15.2	1110	8.81	212.8	180.8	75	预管法施工用	
	15T15	15T15.2	2081	16.52	399.0	339.0	85		

(2) V 系列、群锚系列及 F.K.K 系列除具有多线系列的特点外, 还具有以下优点:

① 预应力筋由于采用楔片单个锚固, 锚固时的回缩较小, 前两种回缩量 4~5mm, 后一种回缩量仅 2~3mm;