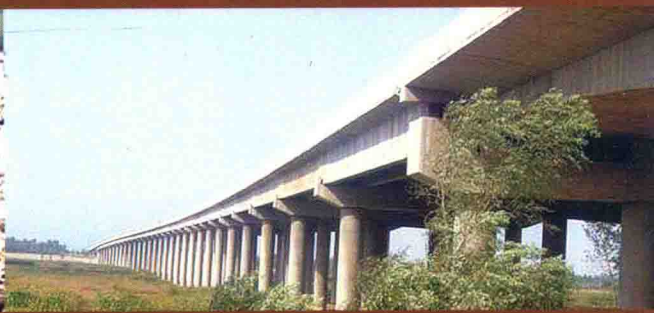


GAOXIAO YUYINGLI HUNNINGTU KONGXIN BANQIAO
YANJIU YU SHIJIAN

高效预应力混凝土空心板桥 研究与实践

李长永 王慧 任甲蕴 赵顺波 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

GAOXIAO YUYINGLI HUNNINGTU KONGXIN BANQIAO
YANJIU YU SHIJIAN

高效预应力混凝土空心板桥

研究与实践

李长永 王慧 任甲蕴 赵顺波 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书所述高效预应力混凝土空心板的主体材料为 C80 高强混凝土和高强低松弛 1860 级预应力钢绞线, 内容共分 4 章, 介绍了高效预应力混凝土空心板桥的研究背景以及高性能混凝土和高强低松弛预应力钢绞线的发展趋势, 总结了 C80 高强混凝土配制技术、跨径 13~25m 高效预应力混凝土空心板的标准化设计、跨径 16m 高效预应力混凝土空心板的静载受力性能试验、跨径 16m 和 20m 高效预应力混凝土空心板桥建造及跨径 20m 实桥静动载检测成果。

本书可作为土木工程桥梁专业技术人员的参考用书, 也可供相关专业在校学生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高效预应力混凝土空心板桥研究与实践 / 李长永等著. —北京: 中国电力出版社, 2017.9
ISBN 978-7-5198-1125-9

I. ①高… II. ①李… III. ①预应力混凝土-混凝土空心板-桥面板-研究 IV. ①U443.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 219458 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 王晓蕾

责任校对: 李 楠

装帧设计: 张俊霞

责任印制: 杨晓东

印 刷: 北京天宇星印刷厂

版 次: 2017 年 9 月第一版

印 次: 2017 年 9 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 9.75

字 数: 224 千字

定 价: 48.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

预应力混凝土空心板具有上部结构建筑高度低、预制施工简单、易实现标准化和工厂化施工、产品质量可靠、造价低、施工吊装设备容易解决等优点,是公路桥梁工程中被广泛采用的一种结构形式。但在我国长期的工程实践中,预应力混凝土空心板的制作存在混凝土强度等级和预应力钢筋级别较低、预应力张拉施工效率较差等缺点,导致了空心板混凝土耐久性差、预应力钢筋易产生锈蚀等问题。随着混凝土配制技术和预应力钢筋性能的提升,研究采用高强/高性能混凝土和高均匀延伸率、高强低松弛钢绞线,对改善预应力混凝土空心板延性、提高桥梁可靠度具有明显效果,对提升预应力混凝土的发展水平也具有重要意义。

1998年5月,河南海威工程咨询有限公司董事长、河南省交通规划勘察设计院原院长、中国工程设计大师王用中先生向河南省人民政府提出书面建议:在河南省高速公路建设中应用高强混凝土取代现行通用的普通混凝土制作桥梁空心板,以提高预应力工程技术水平,节约公路建设投资。这一建议得到了省政府领导的高度重视和批示。在王用中先生带领下,河南海威工程咨询有限公司联合华北水利水电学院、焦作市公路管理局成立了专题科研组,成功申报了河南省科技攻关项目《高强混凝土在桥梁工程中的应用》(991150126),开展了C80高强混凝土配制技术研究,在华北水利水电学院结构试验大厅内成型了采用C80高强混凝土和270级(相当于现行标准1860级)7 ϕ 5预应力钢绞线的16m跨径高效预应力混凝土空心板,并进行了加载试验研究。该项研究成果取得了C80高强混凝土配制技术突破,解答了当时工程界关于高强混凝土受压脆性大、是否适于桥梁结构延性变形的疑问;通过空心板断面的优化设计,得到了较大挖空率,显著减轻了桥梁自重,按当时工程概预算标准核算可节约成本20%以上。在此基础上,焦作市公路管理局结合2001年河南省重点建设项目《焦作至巩义黄河公路大桥》(豫计投资〔2001〕637号),自筹经费进一步开展了《高效预应力混凝土空心板梁桥研究与工程应用》课题研究,委托华北水利水电学院完成了13~25m跨径高效预应力混凝土空心板的优化设计,在焦作至巩义黄河公路大桥连接线上进行了16m跨径和20m跨径高效预应力混凝土空心板桥的示范工程建设,对20m跨径高效预应力混凝土空心板桥进行了静载、动载试验检测,验证了设计成果的可靠性和合理性。两项研究成果先后获得2000年、2005年河南省科技进步三等奖。

自2003年建设部科技司将“开发高耐久性、高性能混凝土住宅结构体系”列入年度工作要点以来,高性能混凝土技术的推广应用逐步上升至建设领域节能减排的战略地位。建筑业发展“十二五”规划明确,建筑节能目标之一是C60以上的混凝土用量达到总用量10%。2014年8月,住房和城乡建设部、工业和信息化部联合下发通知,要求充分认识推广应用高性能混凝土的重要性,加快推广应用高性能混凝土。以“政府引导,市场推动;全面推进,突出重点;因地制宜,分类指导;试点示范,标准先行”为基本原则,通过完善高性能混凝土推

广应用政策和相关标准,建立高性能混凝土推广应用工作机制,优化混凝土产品结构,到“十三五”末,高性能混凝土得到普遍应用,C35及以上强度等级的混凝土占预拌混凝土总量50%以上。在超高层建筑和大跨度结构以及预制混凝土构件、预应力混凝土、钢管混凝土中推广应用C60及以上强度等级的混凝土。有鉴于此,尽管本课题的核心研究成果已在国内期刊发表,但对其进行系统总结并发表更加详尽的研究成果仍具有时代先进性。同时,本课题从立项、可研、基础研究、应用研究到工程示范,体现了工程技术创新研究课题的全过程,不失为一个“产学研用”有机结合的科技创新典型实例。

本书由华北水利水电大学科技处处长、教授(二级)、博士研究生导师、河南省生态建材工程国际联合实验室主任、郑州市工程结构检测与性能提升工程技术研究中心主任赵顺波博士策划,由华北水利水电大学土木工程学科硕士研究生导师李长永副教授(博士)、王慧副教授和焦作市公路管理局任甲蕴高级工程师共同执笔完成。在本书付诸出版之际,特别要感谢王用中先生,他对科学技术发展的预见、对专业学术知识的渴求及对工程科技创新的执着,集中体现了老一辈工程技术专家勇于担当、敢于担当的科学奉献精神,是值得我们永远学习的榜样。参加课题研究工作的还有华北水利水电大学刘祚秋、李凤兰、靳彩、胡志远、盖占方、陈爱玖和水工结构工程硕士研究生张利梅、孙晓燕、勾彦敏,河南海威工程咨询有限公司王健、褚冰、赵卓,焦作市公路管理局张习贤、赵永义、张正方、闫东升、胡增团、李培安、卢来运、刘春杰、张宏森等同志,在此一并表示衷心感谢。本书出版得到了河南省高校生态建筑材料与结构工程科技创新团队(13IRTSTHN002)、河南省新型城镇建筑技术协同创新中心(河南省教育厅教科技〔2013〕638号)建设经费支持。

本书所述高效预应力混凝土空心板优化设计成果,仍以当时实施的国家相关规范标准为依据。鉴于著者水平所限,本书不足之处,尚祈读者不吝赐教。

著者

2017年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 高强/高性能混凝土	1
1.1.2 高效预应力混凝土	2
1.1.3 国内外桥梁工程应用状况	2
1.2 发展趋势	4
1.2.1 高性能混凝土的发展与应用	4
1.2.2 高强低松弛预应力钢绞线的发展与应用	6
1.2.3 高效预应力混凝土结构延性性能研究	8
1.3 研究内容	9
第 2 章 高效预应力混凝土空心板设计与试验研究	12
2.1 概述	12
2.2 基本设计资料	12
2.3 高效预应力混凝土空心板截面选择	13
2.3.1 截面形式	13
2.3.2 截面宽度	17
2.4 跨径 16m 空心板设计研究	18
2.4.1 截面几何特性	18
2.4.2 恒载内力计算	19
2.4.3 活载内力计算	20
2.4.4 正截面承载力计算	27
2.4.5 斜截面承载力计算	28
2.4.6 有效预应力计算	29
2.4.7 截面抗裂度验算	30
2.4.8 变形验算	35
2.5 高效预应力混凝土空心板试验研究	40
2.5.1 高强混凝土配制与力学性能试验	40
2.5.2 跨径 16m 空心板试验研究	44

第3章 高效预应力混凝土空心板系列设计	61
3.1 概述	61
3.2 基本资料	61
3.2.1 设计要求	61
3.2.2 施工要点	62
3.3 设计方法	63
3.4 空心板截面选型	63
3.5 跨径 13m 空心板设计主要成果	64
3.6 跨径 16m、高度 55cm 空心板设计主要成果	73
3.7 跨径 20m 空心板设计主要成果	82
3.7.1 高度 65cm 空心板	82
3.7.2 高度 75cm 空心板	87
3.8 跨径 25m 空心板设计主要成果	100
3.8.1 高度 90cm 空心板	100
3.8.2 高度 105cm 空心板	104
第4章 高效预应力混凝土空心板桥工程实践	118
4.1 工程概况	118
4.2 高效预应力混凝土空心板预制	120
4.2.1 施工技术	120
4.2.2 实桥空心板混凝土强度评定	124
4.2.3 实桥空心板抽样静载检验	127
4.3 高效预应力混凝土空心板桥整桥试验研究	129
4.3.1 试验目的及内容	129
4.3.2 实桥静载试验研究	129
4.3.3 实桥动载试验研究	144
参考文献	146

第1章

绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 高强/高性能混凝土

根据中国土木工程学会高强与高性能混凝土委员会的定义^[1,2]: 高强混凝土为等于或超过 C50 的混凝土, 高性能混凝土为以耐久性和可持续发展为基本要求并适合工业化生产和施工的混凝土。与传统的混凝土相比, 这种高性能混凝土在配合比上的特点是低用水量(水与胶结材料总量之比低于 0.4, 或至多不超过 0.45)、较低的水泥用量, 并以化学外加剂和矿物掺和料作为水泥、水、砂、石之外的必需组分^[3-5]。

现代高强混凝土技术的开发, 开始是以混凝土的高强度和拌和物的高工作性能作为目标的, 而其致密的结构通常又使这一混凝土兼具其他的优良性能, 因此与高性能混凝土又是密切相关的, 具有优良综合性能的现代高强混凝土当然是高性能混凝土^[6,7]。本课题的研究对象即具有高性能混凝土特征的高强混凝土, 配制方法为采用常规的水泥和砂石作原材料, 使用常规的制作工艺, 主要依靠外加高效减水剂或同时外加一定数量的活性矿物材料, 使拌和料具有良好的工作度, 并在硬化后具有高强度、高耐久性、抗渗性、抗碳化等性能, 故记作高强/高性能混凝土。

高强/高性能混凝土的重要特点是强度高, 变形小, 具有很高的抗渗性、抗碳化及抗氯离子侵蚀性能, 能适应现代工程结构向大跨、重载、高耸发展和承受海洋性等恶劣环境条件的需要。用高效减水剂配制的高强混凝土一般具有坍落度大和早强的性能, 因而便于浇筑和加快模板周转速度。

高强/高性能混凝土的抗压强度高, 应用于钢筋混凝土受弯构件时能够带来很大好处。尽管单纯提高混凝土强度并不能明显增加构件的抗弯能力, 但是能降低受弯构件截面的受压区混凝土高度, 故能提高构件的延性, 允许有较高的配筋率。因此, 可以通过提高配筋率来增加构件的抗弯能力或降低构件的截面高度。同时, 高强混凝土弹性模量较大, 也可以提高构件的刚度。减小截面尺寸意味着降低结构自重, 对结构自重占全部荷载比例很大的公路桥梁, 应用高强混凝土就有着特殊的意义: 一是能够减轻下部结构和地基基础的负担, 同时提高了预制构件运输和吊装工作效率; 二是增大适用跨度, 提高了结构的跨越能力; 三是确保桥下

净空,降低桥梁与道路引线的连接路基高度,节约引线道路工程造价;四是由于混凝土耐久性好,增加桥梁使用寿命,降低了平时维护管理费用^[6]。

自 20 世纪 90 年代初以来,随着混凝土材料科学研究的深入发展,高强/高性能混凝土在我国已发展成为比较成熟的技术,将其应用于桥梁结构,对有效地降低结构自重和结构高度、增大结构刚度和桥梁跨度、增加结构耐久性并降低维修费用起到了重要作用。

高强/高性能混凝土也有其不利条件和不足之处。首先是对各种原材料有严格的要求。高强/高性能混凝土的质量特别容易受到生产、运输、浇筑和养护过程中环境因素的影响。在材料的性能上,随着强度的增加,高强/高性能混凝土的脆性增加而塑性变形能力降低,同时其抗拉强度与抗压强度的比值也会降低;材料的脆性会影响结构的延性,尤其对受压构件,会出现发挥高强混凝土抗压性能与保证构件延性之间的矛盾^[7,8]。但是,材料的脆性与配筋构件的延性并不等同,通过适当的配筋构造措施,用高强/高性能混凝土制作的构件延性一样可以满足设计要求。

1.1.2 高效预应力混凝土

高效预应力混凝土是以采用高强低松弛、高均匀延伸率钢绞线和高强/高性能混凝土为标志,并获得结构性能优化组合增强效应的高新预应力混凝土技术。区别于普通预应力混凝土,其特点是:

- (1) 在同样钢材用量的前提下,因混凝土强度高可使混凝土建立起较高的预压应力;
- (2) 在同样的混凝土预压应力要求下,钢材用量可节约 20%~40%;
- (3) 在同样的截面尺寸情况下,可使结构具备较高的抗裂能力;
- (4) 在同样跨度情况下减轻结构自重,在同样自重情况下增加结构跨越能力。

同时,由于高强钢材的低松弛、高强混凝土的低收缩徐变(仅为普通强度混凝土的 70% 左右)特性,减小了结构长期使用过程中的变形,增强了结构的适用性能^[6,9]。由于高强/高性能混凝土的特性,使结构建造工期缩短,混凝土原材料节省,结构寿命延长,维护费用降低,符合可持续性发展的混凝土技术方向。

1.1.3 国内外桥梁工程应用状况

我国高强/高性能混凝土的研究和应用始于 20 世纪 80 年代,期间建造的湘江桂铁路红水河大桥、广东东莞中堂大桥、广东洛溪大桥、天津西青道立交桥均采用了 C60、C65 混凝土。1988 年建成的浙江飞云江公路大桥,为多跨简支 T 形梁,最大跨径 62m,梁高 2.85m,采用 C60 混凝土;黄石长江公路大桥,是一座连续刚构桥,主孔达 245m,采用 C55 混凝土。1992 年,河南三门峡黄河公路大桥采用了 C60 混凝土,实测已达 C70。1997 年建成的万县长江大桥,钢管混凝土主拱跨度 420m,芯部和外包混凝土均采用了 C60 混凝土^[9]。在高速公路和城市立交桥中也有不少采用泵送高强混凝土的实例,如京津塘高速公路和首都机场高速公路上的一些桥梁主要为了早强而采用 C60 级混凝土。相对而言,高强混凝土在建筑结构中得到了

比较广泛的应用,据统计有数十座高层建筑采用了 C80 高强混凝土,混凝土强度等级最高达到 C90,这些工程经验为桥梁结构中进一步提高混凝土强度等级提供了有益的参考^[7, 10, 11]。

在日本,1970~1984年建成的数座预应力混凝土桥梁中采用了 C60~C80 高强混凝土^[12]。在前期尚未使用高性能减水剂时,现场施工的高强混凝土的黏度极高,且坍落度损失很快,给施工带来了很大困难。1970 年建成 Kaminoshima 公路桥,最大跨度 86m,采用了 C70 混凝土;1973 年建成岩鼻铁路桥,为跨度 45m 简支预应力混凝土下承式桁架结构,主桁架和节点采用 C80 混凝土,面板采用 C50 混凝土;1973 年建成大田名部铁路桥,为跨度 24m 简支预应力混凝土上承式桁架结构,主桁架采用 C80 混凝土,节点采用 C60 混凝土,面板采用 C40 混凝土;1974 年建成番月铁路桥和第二绫罗木川铁路桥,均为跨度 49m 简支预应力混凝土工形梁,采用 C60 混凝土;1974 年建成 Fukaimitsu 公路桥,跨度 26m,采用 C80 混凝土;1975 年建成安家川铁路桥,为跨度 $6 \times 45 + 27$ m 简支预应力混凝土上承式桁架结构,主桁架采用 C80 混凝土,节点采用 C60 混凝土,面板采用 C40 混凝土;1975 年建成茂市川铁路桥,为跨度 15.8m 简支预应力混凝土工形梁,采用 C80 混凝土;1976 年建成 Akkagawa 铁路桥,跨度 46m 简支预应力混凝土 T 形梁,采用 C90 混凝土;1979 年建成歧关公路大桥,为跨度 48m 简支预应力混凝土 T 形梁,采用 C60 混凝土;1984 年建成户田铁路桥,为跨度 49m 简支预应力混凝土工形梁,采用 C60 混凝土;1984 年建成第二武藏野线铁路桥,为跨度 $25\text{m} + 25.3\text{m} + 26.8\text{m} + 22.6\text{m}$ 连续预应力混凝土 T 形梁,采用 C60 混凝土。到了 20 世纪 80 年代后期,外加剂有了显著的进步,开发了坍落度损失很小的高性能 AE 减水剂。20 世纪 90 年代采用高流动性和良好施工性能的高强混凝土修建了几座桥梁,开创了高强混凝土新的发展阶段。1992 年建成的青森跨海公路大桥,为 $128\text{m} + 240\text{m} + 128\text{m}$ 连续预应力混凝土斜拉桥,桥的主塔形状呈倒 Y 形,从地面算起到最上部高度约 80m,从减轻自重及美观考虑,采用 C60 高强混凝土,实际混凝土强度达到了 C75。1997 年建成的大芝公路大桥,为 $98.9\text{m} + 210\text{m} + 98.9\text{m}$ 连续预应力混凝土斜拉桥,为减轻主梁自重和斜拉材料重量,并提高抗震性和施工性,将主梁做成梁高 1m 的超细长边缘梁,并采用 C60 混凝土。

在丹麦,1997 年建成的大贝尔特海峡工程(The Great Belt Fixed Link)是将各占丹麦人口 1/2 的 Storebelt 和 Kattegat 联系起来的著名海上建筑物,分东西两部分,中间是一岛屿(Sprogø),东侧铁路由长 8km 的隧道相连,公路由长 7km 的悬索桥和引桥相连;西侧是长 6.5km 平行的两座桥,一条铁路专用,另一条公路专用,整个项目共浇筑混凝土 106 万 m^3 ,工程按使用寿命 100 年设计,采用了掺加硅粉和粉煤灰、28d 抗压强度为 63MPa 的高性能混凝土^[13, 14]。

在法国,1994 年建成 Elron 公路大桥,为主跨 400m 的斜拉桥,采用 C80 混凝土,实际强度 95.7MPa,混凝土配合比设计掺加 $36\text{kg}/\text{m}^3$ 的硅粉^[15]。

在美国,1984 年建成的从西弗吉尼亚至俄亥俄的 East Huntington 公路桥,包括一个主跨为 274m 的不对称斜拉梁结构,混凝土强度相当于 C65;而后在华盛顿州跨越 Turtle 河的一座预应力混凝土公路桥(Tower Road),大梁高 1.5m,主跨 49m,总长 86m,采用强度接近于 C75 的混凝土和连续后张预应力,使桥梁大梁结构的跨高比达到了 30:1。路易斯安那州对美国各州公路和运输工作者协会(AASHTO)制订的《美国公路桥梁设计规范》(1995 年版)

预制公路桥梁采用高强混凝土进行对比分析（在同样荷载下）的结论为：① 高强混凝土可增大梁的跨度。当强度等级由 C40 提高到 C70 时，IV 形梁（梁高 1.37m，间距 2.4m）的跨度可由 31.7m 增加到 39.9m。② 高强混凝土可增大梁的间距。当强度等级由 C40 增加到 C55 时，对 30.5m 跨的梁，截面高度可由 1.37m 降到 1.02m，亦即包括 0.2m 现浇桥面板在内梁的跨高比可做到 25。梁高低了，有利于桥墩、支座、引桥造价的降低。从 1987 年开始的战略公路研究项目（简称 SHRP），致力研究和推动应用高性能混凝土建造公路桥梁，预期将钢筋混凝土桥梁寿命从 40~45a 提高到 75~100a。其大量的研究与实践证明，高耐久性混凝土同时具有较高的强度，在设计中充分利用强度，则可以减小结构构件的截面、增大桥梁跨度和减少桥梁下部结构，因此使用高性能混凝土建造桥梁的费用就不会增加甚至可能降低，而桥梁的寿命将大大延长，桥梁需要的养护维修费用会大幅度减少。德克萨斯州的 Louetta 公路南北线的两座跨线桥，预制预应力 U 形大梁使用抗压强度 90MPa 的高强混凝土，大梁跨度长达 41m，南线桥的造价为 248 美元/m²，北线桥的造价为 269 美元/m²。当地同时期建造的 12 座同类型普通混凝土桥梁，造价在 226~290 美元/m²。可见，高强混凝土公路桥梁的建设成本并没有增大，而桥梁寿命则可以成倍提高。因此，科学合理地设计与应用高强混凝土是能创造效益的^[15]。

1.2 发 展 趋 势

1.2.1 高性能混凝土的发展与应用

20 世纪 90 年代中期，吴中伟院士结合国家可持续发展战略开始研究水泥与混凝土生产带来的环境问题，提出了绿色高性能混凝土的概念^[6, 16]。他综合提出了高性能混凝土的含义：高性能混凝土是一种新型高技术混凝土，是在大幅度提高常规混凝土性能的基础上，采用现代混凝土技术，选用优质原材料，在妥善的质量管理的条件下制成的。除了水泥、水、骨料以外，高性能混凝土必须采用低水胶比和掺加足够的细掺料与高效外加剂，并应同时保证其耐久性、工作性、各种力学性能、适用性、体积稳定性和经济合理性。绿色高性能混凝土是在高性能混凝土基础上，增加绿色内涵：节约资源、能源；不破坏环境，更应有利于环境；可持续发展，既满足当代人的需求，又不危及后代人满足其需要的能力。

绿色高性能混凝土的特征为：① 更多地掺加以工业废渣为主的活性细掺料，更多地节约熟料水泥，减少环境污染。用大量工业废渣作为活性细掺料代替大量熟料，最多可达 60%~80%。在绿色高性能混凝土中，磨细水淬矿渣和分级优质粉煤灰、硅灰等，或它们的组合，成为胶凝材料的主要组分，从而大大减少熟料水泥生产的 CO₂ 排放，节约能源资源。② 更大地发挥高性能优势，减少水泥和混凝土的用量。利用高性能混凝土的高强早强来减少截面，降低自重，节约模板与工时，在高层建筑和大跨桥梁中已收到很大效益。减少材料生产与运输能耗，保证和延长安全使用期经济效益更大。减少水泥和混凝土用量是从根本上减少环境

负担。③ 应用范围适宜扩大。对于大体积混凝土结构和基础等强度要求不高,但对耐久性、工作性、均匀性、体积稳定性、低水化热等有很高要求的,绿色高性能混凝土的强度下限可从 C50~C60 降低到 C30 左右。对于强度要求很高的混凝土结构,可突出绿色高性能混凝土的强度和耐久性优势,能够减轻结构自重 $1/2 \sim 2/3$ 。

随着我国在高强/高性能混凝土制备技术和各项性能及其结构性能研究成果的积累,相关结构设计规定的混凝土强度等级也从规范 GB 10—1989, JTJ 023—1985 的 C60 提高至了规范 GB 50010—2002, GB 50010—2010, JTG D60—2004 的 C80,使得高强/高性能混凝土的结构设计有了规范依据,工程应用得以全面铺开^[17-21]。为了树立和落实科学发展观,促进经济增长方式的转变,建设部科技司将“开发高耐久性、高性能混凝土住宅结构体系”作为 2003 年工作要点之一,高性能混凝土技术作为建筑业 10 项新技术之一被列为建设部 2005 年重点推广的新技术,以期带动全行业整体技术水平的提高;随后也成为住房和城乡建设部 2008 年建设领域节能减排工作的重点技术。住房和城乡建设部标准定额司提出的 2010 年工作思路:以建筑工程用量较大水泥为重点,节约资源,提高建设工程结构的安全性、耐久性和可靠性;突出引导混凝土消费结构升级,积极采用高性能混凝土。建筑业发展“十二五”规划的建筑节能目标之一是 C60 以上的混凝土用量达到总用量 10%。2014 年 8 月,住房和城乡建设部、工业和信息化部联合下发通知,要求充分认识推广应用高性能混凝土的重要性,加快推广应用高性能混凝土。以“政府引导,市场推动;全面推进,突出重点;因地制宜,分类指导;试点示范,标准先行”为基本原则,通过完善高性能混凝土推广应用政策和相关标准,建立高性能混凝土推广应用工作机制,优化混凝土产品结构,到“十三五”末,高性能混凝土得到普遍应用,C35 及以上强度等级的混凝土占预拌混凝土总量 50%以上;在超高层建筑和大跨度结构以及预制混凝土构件、预应力混凝土、钢管混凝土中推广应用 C60 及以上强度等级的混凝土。

在绿色高性能混凝土发展历程中,其“不破坏环境,更应有利于环境”的内涵也进一步扩大,其研发和工程应用面临着新的课题:

(1) 矿物掺和料的活性效应需要深入研究并定量确定。目前的高强混凝土配合比设计方法仍停留在根据经验通过试验确定的阶段,矿物掺和料的影响难以通过计算确定^[22]。主要原因是掺和料的活性作用没有得到深入研究,用其替代熟料水泥后的活性效应尚没有得到定量确定^[23,24]。

(2) 骨料供应状况发生了根本性变化。随着国家对河道健康运行和农田保护力度的加大,天然砂的供应日益紧缺,其替代品—机制砂的工程应用已成为必然趋势^[25]。以机制砂代替天然砂配制高强混凝土的配合比设计、拌和物工作性能和硬化混凝土的各种性能需要进一步研究确定^[26]。随着我国城市建设和新型城镇化进程的发展,建筑垃圾排放量逐年增大并成为城市环境治理的最大难题。将废弃混凝土通过破碎、筛分等程序生产的再生骨料,可用于代替天然骨料制备混凝土^[27-29]。国务院关于印发“十二五”节能环保产业发展规划的通知(国发〔2012〕19号)明确建筑废物分选及资源化技术为资源循环利用产业关键技术,推广建筑废物分类设备及生产道路结构层材料、人行道透水材料、市政设施复合材料等技术。《河南省人民政府关于加强城市建筑垃圾管理促进资源化利用的意见》(豫政〔2015〕39号)指出:到

2020年,省辖市建筑垃圾资源化利用率达到70%以上,县(市、区)建成建筑垃圾资源化利用设施,建筑垃圾资源化利用率达到50%以上。因此,利用再生骨料的绿色高性能混凝土也是研发和工程应用的关键课题。

(3) 高强混凝土由于用水量小,硬化后混凝土内部的湿度低,其后期强度增长一般不及普通混凝土,这是高强混凝土发展历程中始终备受关注的一个问题^[7, 30]。尽管已有比较充分的依据证明硅酸盐水泥配制的高强混凝土虽不至于发生强度回缩,但强度增长值差别较大。据挪威的试验,掺加硅粉高强混凝土在水中10a强度提高30%~50%,在空气中提高0~20%,而不掺硅粉的高强混凝土则相应地提高70%和30%。美国在1975年建造芝加哥Water Tower Place时留取标准试件进行了长达18a的检测,这些相当于C60和C70的混凝土试件,在标准养护28d后置于相对湿度为50%的空气中,发现18a后的强度与28d及1a、2a的强度几乎相等;但同样的试件如果处在长期受载的条件下,则18a后的强度增长约为10%;如果试件始终处于密封状态,增长可达33%~46%。在当前发展绿色高性能混凝土背景下,关注并深入研究高强混凝土的后期强度与弹性模量、收缩与徐变等长期性能,是保证混凝土结构工程安全的重要举措^[31-36]。

1.2.2 高强低松弛预应力钢绞线的发展与应用

高效预应力混凝土是以采用高强/高性能混凝土和高强低松弛、高均匀延伸率钢绞线为标志,并获得结构性能优化组合增强效应的高新预应力混凝土技术。因此,高强低松弛预应力钢绞线的发展水平,在很大程度上决定了高效预应力混凝土技术水平。

我国预应力钢绞线的生产应用起始于20世纪60年代,在《预应力混凝土结构用钢绞线》(YB256—1964)中规定的钢绞线断面结构为1×7,直径为7.5~15.0mm,公称抗拉强度为1470~1770MPa。由于当时各方面条件的限制,预应力钢绞线的公称抗拉强度是用钢绞线内各根钢丝的破断负荷的总和求得的。由于捻损等因素的影响,整根钢绞线的破断负荷比钢绞线内各根钢丝的破断负荷的总和约小8%,因此钢绞线的实际抗拉强度要小于公称抗拉强度^[37]。至20世纪80年代,我国通过引进意大利低松弛预应力钢绞线生产线,根据当时原材料供应条件和生产状况,参照英国、美国和日本等国家标准,制订了《预应力混凝土用钢绞线》(GB 5224—1985)^[38],规定钢绞线断面结构为1×7,直径为9.0mm(7φ3)、12.0mm(7φ4)和15.0mm(7φ5),公称抗拉强度依次对应1670MPa、1570MPa和1470MPa;按松弛性能分为2级:I级松弛为普通松弛级,II级松弛为低松弛级,并使钢绞线的公称抗拉强度与整根钢绞线的破断负荷相一致,屈强比($\sigma_{0.2}/\sigma_b$)不低于85%。

1995年颁布的《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—1995)^[39],增加了1×2结构、公称直径10.0mm和12.0mm以及1×3结构、公称直径10.8mm和12.9mm的预应力钢绞线,强度级别均为1720MPa;1×7结构的预应力钢绞线划分为标准型(由冷拉光圆钢丝捻制而成)和模拔型(捻制后再经冷拔而成),公称直径允许偏差缩小,强度级别大幅度提高。标准型公称直径9.50mm、11.10mm、12.70mm钢绞线强度级别均为1860MPa,标准型公称直径15.20mm钢绞线强度级别为1860MPa和1720MPa;模拔型公称直径12.70mm、15.20mm钢绞线的强

度级别分别为 1860MPa 和 1820MPa。松弛性能仍划分为 2 级: I 级松弛为普通松弛级, II 级松弛为低松弛级。屈强比 ($\sigma_{0.2}/\sigma_b$) 仍为不低于 85%。增加了弹性模量为 (195±10) GPa, 规定了钢绞线标距不小于 500mm (1×7 结构钢绞线) 和 400mm (1×2 和 1×3 结构钢绞线) 的均匀伸长率不小于 3.5%。

2003 年颁布的《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2003) [40], 增加了钢绞线品种——刻痕钢绞线 (由刻痕钢丝捻制而成), 增加了钢绞线规格和强度级别: 1×2 结构钢绞线公称直径为 5.00mm、5.80mm 时抗拉强度为 1570MPa、1720MPa、1860MPa 和 1960MPa, 公称直径为 8.00mm、10.00mm 时抗拉强度为 1470MPa、1570MPa、1720MPa、1860MPa 和 1960MPa, 公称直径为 12.00mm 时抗拉强度为 1470MPa、1570MPa、1720MPa 和 1860MPa; 1×3 结构钢绞线公称直径为 6.20mm、6.50mm 时抗拉强度为 1570MPa、1720MPa、1860MPa 和 1960MPa, 公称直径为 8.60mm、10.80mm、12.90mm 时抗拉强度为 1470MPa、1570MPa、1720MPa、1860MPa 和 1960MPa, 公称直径为 8.74mm (标准型或刻痕钢绞线) 时抗拉强度为 1570MPa、1670MPa 和 1860MPa; 1×7 结构标准型钢绞线公称直径为 9.50mm、11.10mm、12.70mm 时抗拉强度为 1720MPa、1860MPa 和 1960MPa, 公称直径为 15.20mm 时抗拉强度为 1470MPa、1570MPa、1670MPa、1720MPa、1860MPa 和 1960MPa, 公称直径为 15.70mm 时抗拉强度为 1770MPa 和 1860MPa, 公称直径为 17.80mm 时抗拉强度为 1720MPa 和 1860MPa; 1×7 结构模拔型钢绞线公称直径为 12.70mm 时抗拉强度为 1860MPa, 公称直径为 15.20mm 时抗拉强度为 1820MPa, 公称直径为 18.00mm 时抗拉强度为 1720MPa。取消了 I 级松弛钢绞线和 10h 试验的规定, 统一规定初始负荷相当于公称最大力为 60%、70%和 80%时, 1000h 后应力松弛率依次不大于 1.0%、2.5%和 4.5%。屈强比提高至 90%, 增加了钢绞线的疲劳和偏斜拉伸试验规定。

2014 年颁布的《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2014), 增加了 19 丝钢绞线类别、规格、强度等级, 增加了 7 丝钢绞线的规格; 规定了最大力的最大值, 取消“供方每一交货批钢绞线的实际强度不能高于其抗拉强度级别 200MPa”; 将松弛试验初始力由“特征最大力百分比”改为“实际最大力百分比”, 增加“如无特殊要求只进行初始力为 70%实际最大力的松弛试验”, 取消“初始力为 60%最大力”的要求; 0.2%屈服力由不小于整根钢绞线公称最大力的 90%改为应在整根钢绞线实际最大力的 88%~95%范围内; 增大了部分规格钢绞线的盘径, 增加重量偏差要求; 增加了特征值检验和交货检验型式试验要求[41]。此规范集中体现了我国当前在预应力钢绞线研发、生产和工程应用的全貌, 也可看出预应力混凝土技术发展进入了繁荣阶段。

表 1-1 为《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2014) 规定的各强度等级钢绞线结构和公称直径。

表 1-1 预应力钢绞线强度等级、结构和公称直径

公称抗拉强度 (MPa)	钢绞线结构	钢绞线公称直径 (mm)
1470	1×2	8.00、10.00、12.00
	1×3	8.60、10.80、12.90
	1×7	15.20 (15.24)

续表

公称抗拉强度 (MPa)	钢绞线结构	钢绞线公称直径 (mm)
1570	1×2	5.00、5.80、8.00、10.00、12.00
	1×3	6.20、6.50、8.60、8.74、10.80、12.90
	1×3I (刻痕钢绞线)	8.70
	1×7	15.20 (15.24)
1670	1×3	8.74
	1×7	15.20 (15.24)
1720	1×2	5.00、5.80、8.00、10.00、12.00
	1×3	6.20、6.50、8.60、10.80、12.90
	1×3I (刻痕钢绞线)	8.70
	1×7	9.50 (9.53)、11.10 (11.11)、12.70、15.20 (15.24)、17.80 (17.78)
	1×7C (模拔型)	18.00
	1×19S (西鲁式)	28.6
	1×19W (瓦林吞式)	28.6
1770	1×7	15.70、21.60
	1×19S (西鲁式)	17.8、19.3、20.3、21.8、28.6
	1×19W (瓦林吞式)	28.6
1810	1×19S (西鲁式)	20.3、21.8
1820	1×7	18.90
	1×7C (模拔型)	15.20 (15.24)
1860	1×2	5.00、5.80、8.00、10.00、12.00
	1×3	6.20、6.50、8.60、8.74、10.80、12.90
	1×3I (刻痕钢绞线)	8.70
	1×7	9.50 (9.53)、11.10 (11.11)、12.70、15.20 (15.24)、15.70、17.80 (17.78)、18.90、21.60
	1×7I (刻痕钢绞线)	12.70、15.20 (15.24)
	1×7C (模拔型)	12.70
	1×19S (西鲁式)	17.8、19.3、20.3、21.8
	1×19W (瓦林吞式)	28.6
1960	1×2	5.00、5.80、8.00、10.00
	1×3	6.20、6.50、8.60、10.80、12.90
	1×7	9.50 (9.53)、11.10 (11.11)、12.70、15.20 (15.24)

1.2.3 高效预应力混凝土结构延性性能研究

我国是多地震国家，高效预应力混凝土结构在地震区桥梁结构中应用必须注重其延性和

耗能性能。结构的延性是在极限承载力没有明显退化情况下的非弹性变形能力,并利用其滞回特性吸收能量^[42]。在利用延性特性设计抗震结构时,最常用的延性量化指标为曲率延性系数(曲率延性比)和位移延性系数(位移延性比)。曲率延性系数为截面屈服后的曲率与屈服曲率之比,位移延性系数为构件截面屈服后的位移与屈服位移之比。《公路桥梁抗震设计细则》(JTJ/T B02-01-2008)^[43]和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)^[44]均对桥梁延性抗震给出了具体计算规定,且后者明确桥墩延性抗震设计的延性系数在一般情况下可取 3.0。在本书作者所在团队结合工程实际开展的 V 形墩连续刚构桥、预应力混凝土连续梁桥和独塔部分斜拉桥的设计过程中,延性抗震计算分析已成为必要内容^[45-47]。

高效预应力混凝土结构的延性一直是研究的热点问题,本书作者所在团队对高效预应力混凝土梁进行了系列试验研究和有限元分析^[48-56]。结果表明:混凝土强度、钢绞线延伸率、预应力比率、配筋指数等因素均对高效预应力混凝土的位移延性具有较大影响。混凝土强度较低时,梁的延性与钢绞线延伸率关系较小。随着混凝土强度的增大、钢绞线延伸率提高,梁的延性将随之提高。预应力比率和配筋指数提高,梁的延性随之降低。对于仅配置钢绞线的高效预应力混凝土梁,钢绞线延伸率是影响其延性的主要因素。现行《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224-2014)规定的钢绞线延伸率不低于 3.5%有可能导致高效预应力混凝土结构抗震的延性不足。钢绞线的延伸率大小对预应力混凝土梁的破坏形态具有显著影响。研究同时提出了高效预应力混凝土梁的正常使用极限状态抗裂度、裂缝宽度、挠度和极限承载力计算方法。

1.3 研 究 内 容

本书针对高效预应力混凝土在空心板桥中的应用,特别注重钢绞线的高均匀延伸率,并将其作为混凝土结构受拉区仅配置预应力钢筋时保证结构延性性能、提高桥梁结构抗震能力的重要指标。

1. 研究适合于河南省实际情况的高强混凝土配制技术

高强混凝土已有较多的工程应用实例,但由于使混凝土达到高强的途径较多,且与原材料性能关系密切,高强混凝土的推广应用仍需结合工程实际开展科学试验研究才能得以实现。采用外加矿物掺和料(优质粉煤灰、磨细沸石粉、硅灰等),以改善混凝土的拌和性能和硬化混凝土性能已成为较普遍的高强混凝土配制方法。但是,在某些地区,由于矿物掺和料的获取代价较高,从经济实用的角度探讨通过优选砂石料外加高效减水剂等措施配制高强混凝土的方法是非常必要的。本研究在调查河南省境内的混凝土原材料实际分布状况基础上,通过系统的试验研究取得了适合于野外现场施工的 C60~C80 混凝土配制技术,为实际工程应用提供了科研基础。

2. 开展高效预应力混凝土空心板梁桥设计研究工作

按《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021-1989, JTJ D60-2004)规定^[57, 58],单孔跨径 $l_0 \geq 40\text{m}$ 者为大桥。因此,中小跨桥梁在桥梁工程中占有较大比例和重要地位。在高速公路工

程中，中小跨桥梁占公路工程造价的 30%~70%。在独立特大桥和大桥中，作为引桥形式出现的中小跨桥梁长度也占了桥梁总长的 50%以上（表 1-2）。

表 1-2 国内几座特大桥的中小跨引桥占全桥总长比例

序号	桥 名	桥长 (m)	主孔桥型及桥跨 (m)	引桥桥型及桥跨	引桥长度占全 桥总长比例
1	苏州南通长江大桥	6770	混合梁斜拉桥 375+850+375	PC 连续刚构 连续梁、简支梁	76%
2	江阴长江大桥	3071	主跨 1385m 钢悬索桥	连续刚构桥、 PC 简支梁桥	55%
3	厦门海沧大桥	3141	三跨钢悬索桥 230+648+230	PC 连续箱梁（跨径 42m）	52%
4	南京长江二桥南叉桥	2915	钢斜拉桥 260+618+260	PC 连续箱梁 （跨径 30~50m）	61%
5	虎门珠江大桥	4578	主跨 888m 钢悬索桥，副跨 150+270+150PC 刚构	PC 连续梁及 连续刚构简支梁	68%
6	铜陵长江大桥	2592	PC 斜拉桥 80+90+190+432+190+90+80	PC 简支梁	55%
7	黄石长江公路大桥	2580	PC 刚构 162.5+3×245+162.5	PC 简支梁	59%
8	岳阳洞庭湖大桥	5784.5	PC 斜拉桥 130+2×310+130	PC 简支梁 20m、50m 跨	85%
9	武汉长江二桥	3227	PC 斜拉桥 180+400+180	PC 连续梁	75%
10	广东洛溪大桥	1916.04	PC 连续刚构 65+125+180+110	PC 简支梁	42%

对于大桥和特大桥的设计，相关方（建设、设计、审查）在一般情况下均对主桥（或主孔）予以高度重视，对占大桥一半以上造价的引桥则很少关注。设计和研究投入的力量与中小跨桥梁在工程中所占比重明显地不相应。曾有一个桥梁工程界共同认可的设计原则：“主桥先进、引桥经济”，尽管有些弊病，却为我国特大桥的建设带来巨大的投资节约。但在强调整体性、行车舒适的背景下，则出现了大量的支架立模现浇钢筋混凝土、预应力混凝土连续梁桥，而在滩地、深谷、闹市，或高达几十近百米的高墩，这种施工技术的可行性、经济性都是成问题的^[59-62]。在公路建设高潮中，在数千万公里的高速公路建设中，作为工程建设者、设计者对中小跨桥梁的设计与施工投入更多的关注很有必要。

预应力混凝土空心板具有上部结构建筑高度低、预制施工简单、易实现标准化和工厂化施工、产品质量可靠、造价低、施工吊装设备容易解决等优点，是公路桥梁工程中被广泛采用的一种结构形式^[63]。美国统计资料表明^[64]，预应力混凝土板梁占预应力桥梁总数的 8%。国内成渝高速公路的成都至简阳 C 合同段有桥梁 18 座，其中 12 座为不同跨径的预应力空心板梁桥。在跨径 10~20m 范围内与同跨径的简支钢筋混凝土 T 梁相比，预应力混凝土空心板桥高度降低 0.40~0.55m，平均低 40%左右；但预应力混凝土空心板梁的混凝土强度等级多采用 C30~C40。随着高强混凝土在我国的逐步推广应用，公路桥梁中广泛使用的预应力混凝土空心板也迫切需提高混凝土强度等级，采用高强混凝土以提高经济效益，现有的空心板截面形式和配筋设计也需修改并优化^[65]。本课题组采用 C80 高强混凝土和高均匀延伸率低松