

东南土木
青年教师
科研论丛

大跨径预应力混凝土 箱架桥的时效变形

潘钻峰 著

Time-Dependent Deformation
of Long-Span Prestressed
Concrete Box Girder Bridge

东南大学出版社

东南土木·青年教师·科研论丛

大跨径预应力混凝土箱梁桥 的时效变形

潘钻峰 著

项目基金资助:

江苏省交通科学研究计划项目(05Y02)

东南大学出版社
· 南京 ·

内 容 提 要

本书主要结合江苏省交通科学研究计划项目(05Y02)“苏通大桥辅桥连续刚构收缩徐变及其影响研究”的研究工作,针对大跨径预应力混凝土箱梁桥普遍存在的跨中下挠病害,从混凝土结构的时效变形和剪切变形两方面着手研究。

本书共分8章,内容包括:大跨径预应力混凝土箱梁桥的典型病害及研究现状,高强高性能混凝土收缩徐变三层次试验方法,收缩徐变三层次试验分析及实桥应用,基于试验数据库的收缩徐变模型研究,大跨径预应力混凝土箱梁桥时变效应的不确定性和敏感性分析,钢筋混凝土梁的剪切变形影响研究,大跨径预应力混凝土箱梁桥设计关键问题探讨,研究总结及展望。

本书可供混凝土及预应力混凝土结构领域的科学研究人员、工程师、高等院校教师、研究生与本科生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大跨径预应力混凝土箱梁桥的时效变形/潘钻峰著.

—南京:东南大学出版社,2013.12

(东南土木青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-4657-3

I. ①大… II. ①潘… III. ①长跨桥—预应力混凝土
桥—箱梁桥—变形—研究 IV. ①U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 278826 号

大跨径预应力混凝土箱梁桥的时效变形

著 者 潘钻峰

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d.d.00@163.com

出版发行 东南大学出版社

出 版 人 江建中

社 址 南京市四牌楼2号(邮编:210096)

网 址 <http://www.seupress.com>

经 销 全国各地新华书店

发行热线 025—83790519 83791830

印 刷 兴化印刷有限责任公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 12.25

字 数 305 千

版 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-4657-3

定 价 48.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830)

序

作为社会经济发展的支柱性产业,土木工程是我国提升人居环境、改善交通条件、发展公共事业、扩大生产规模、促进商业发展、提升城市竞争力、开发和改造自然的基础性行业。随着社会的发展和科技的进步,基础设施的规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化,对土木工程结构设计理论与建造技术提出了新的挑战。尤其经过三十多年的改革开放和创新发展,在土木工程基础理论、设计方法、建造技术及工程应用方面,均取得了卓越成就,特别是进入 21 世纪以来,在高层、大跨、超长、重载等建筑结构方面成绩尤其惊人,国家体育场馆、人民日报社新楼以及京沪高铁、东海大桥、珠港澳桥隧工程等高难度项目的建设更把技术革新推到了科研工作的前沿。未来,土木工程领域中仍将有许多课题和难题出现,需要我们探讨和攻克。

另一方面,环境问题特别是气候变异的影响将越来越受到重视,全球性的人口增长以及城镇化建设要求广泛采用可持续发展理念来实现节能减排。在可持续发展的国际大背景下,“高能耗”、“短寿命”的行业性弊病成为国内土木界面临的最严峻的问题,土木工程行业的技术进步已成为建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需求。以利用预应力技术来实现节能减排为例,预应力的实现是以使用高强高性能材料为基础的,其中,高强预应力钢筋的强度是建筑用普通钢筋的 3~4 倍以上,而单位能耗只是略有增加;高性能混凝土比普通混凝土的强度高 1 倍以上甚至更多,而单位能耗相差不大;使用预应力技术,则可以节省混凝土和钢材 20%~30%,随着高强钢筋、高强等级混凝土使用比例的增加,碳排放量将相应减少。

东南大学土木工程学科于 1923 年由时任国立东南大学首任工科主任的茅以升先生等人首倡成立。在茅以升、金宝楨、徐百川、梁治明、刘树勋、方福森、胡乾善、唐念慈、鲍恩湛、丁大钧、蒋永生等著名专家学者为代表的历代东大土木人的不懈努力下,土木工程系迅速壮大。如今,东南大学的土木工程学科以土木工程学院为主,交通学院、材料科学与工程学院以及能源与环境学院参与共同建设,目前拥有 4 位院士、6 位国家千人计划特聘专家和 4 位国家青年千人计划入选者、7 位长江学者和国家杰出青年基金获得者、2 位国家级教学名师;科研成果

获国家技术发明奖 4 项,国家科技进步奖 20 余项,在教育部学位与研究生教育发展中心主持的 2012 年全国学科评估排名中,土木工程位列全国第三。

近年来,东南大学土木工程学院特别注重青年教师的培养和发展,吸引了一批海外知名大学博士毕业青年才俊的加入,8 人入选教育部新世纪优秀人才,8 人在 35 岁前晋升教授或博导,有 12 位 40 岁以下年轻教师在近 5 年内留学海外 1 年以上。不久的将来,这些青年学者们将会成为我国土木工程行业的中坚力量。

时逢东南大学土木工程学科创建暨土木工程系(学院)成立 90 周年,东南大学土木工程学院组织出版《东南土木青年教师科研论丛》,将本学院青年教师在工程结构基本理论、新材料、新型结构体系、结构防灾减灾性能、工程管理等方面的最新研究成果及时整理出版。本丛书的出版,得益于东南大学出版社的大力支持,尤其是丁丁编辑的帮助,我们很感谢他们对出版年轻学者学术著作的热心扶持。最后,我们希望本丛书的出版对我国土木工程行业的发展与技术进步起到一定的推动作用,同时,希望丛书的编写者们继续努力,并挑起东大土木未来发展的重担。

东南大学土木工程学院领导让我为本丛书作序,我在《东南土木青年教师科研论丛》中写了上面这些话,算作序。

中国工程院院士: 吕志涛

2013.12.23.

前 言

预应力混凝土箱梁桥(连续梁和连续刚构)具有结构刚度大、变形小、伸缩缝少、行车平顺舒适、抗风、抗震能力强以及后期养护方便等优点,且其合理跨度范围为 30~350 m,因此,在公路桥梁和轨道交通中,均是首选的方案之一。但是近 20 年来,不少大跨径预应力混凝土箱梁桥在运营一段时间后,出现以跨中下挠过大及箱梁开裂为主要特征的病害。据交通部不完全统计,跨径在 100~160 m 的预应力混凝土梁桥,跨中年平均下挠 0.5~1 cm;跨径在 160~220 m 范围,跨中年平均下挠 1~2 cm;跨径在 220~270 m 的,跨中年平均下挠 2~3 cm,而且长时间难以稳定。大跨径箱梁桥的下挠过大和箱梁开裂常常是“并发症”,而且下挠和裂缝均随时间延续而不断发展,直接影响着结构的正常使用性能与耐久性,这些问题一直困扰着桥梁设计工程师和工程管理人员。甚至有人提出预应力混凝土箱梁对于大跨径桥梁的适用性问题。诚然,预应力混凝土箱梁桥在跨径 300 m 之内的桥型方案选择上,均具有很强的竞争力,且国内外有许多大跨径混凝土梁桥设计的成功实例。国内缺乏对这些病害的系统调查,在材料的时变特性、箱梁抗裂设计和变形计算理论等方面的研究还不够完善,这些都给大跨径预应力混凝土梁桥的设计、施工和运营带来了技术困难。为此,交通部西部课题及许多省市都曾立项资助了相关研究,凸显了解决该类问题对大跨径桥梁建设的重要性。本书主要结合江苏省交通科学研究计划项目(05Y02)“苏通大桥辅桥连续刚构收缩徐变及其影响研究”的研究工作,针对大跨径预应力混凝土箱梁桥普遍存在的跨中下挠病害,从混凝土结构的时效变形和剪切变形两方面着手研究。

鉴于目前常用的收缩徐变模型大都基于以往的普通混凝土试验统计回归得到,它们对高强高性能混凝土的适用性值得研究。本书提出两种确定收缩徐变模型的方法:① 针对特定的混凝土,开展混凝土收缩徐变三层次试验,得到并验证提出的修正模型;② 对于没有开展短期试验的混凝土结构,建立合理强度范围的收缩徐变试验数据库,对常用模型进行评估修正,可以提高计算结构时变效应的精度。基于数据库对模型评估结果,考虑收缩徐变模型的不确定性系数、预

应力损失等因素的随机性,对大跨径预应力混凝土箱梁桥的时变效应的不确定性和敏感性展开了分析,得到了桥梁跨中具有 95%置信率的长期变形区间。

鉴于目前大跨径箱梁桥的跨中下挠和腹板斜裂缝病害常常是“并发症”,本书研究认为,薄腹箱梁斜向开裂后的剪切变形是跨中下挠过大的主要原因之一。开展了钢筋混凝土梁斜向开裂后的剪切变形影响试验,发现薄腹 T 梁在出现斜裂缝之后的剪切变形不容忽视。提出基于 B 区和 D 区划分的受剪性能分析方法,推导了斜裂缝出现之后梁的剪切刚度计算公式,瞬时与长期剪切变形的计算结果与试验结果吻合较好。按混凝土结构设计规范及桥规计算的变形存在低估斜向开裂梁变形的危险。最后根据参数分析结果,给出了需要考虑剪切变形影响的梁跨高比和剪跨比范围。

在上述研究工作的基础上,对已出现病害的大跨径箱梁桥结构特性进行调研分析,从高跨比、腹板及配筋设计、纵向预应力束设计、下挠原因推演等方面对箱梁桥进行了研究分析。针对上述质量通病,可通过设置后期备用束得以改善,本书提出预应力备用束的量化设计方法,可根据长期变形置信区间下限值与确定性计算值的差异来确定。

最后,本书对进一步研究的方向进行了简要的讨论。本书研究涉及的关键词有:大跨径箱梁桥;高强高性能混凝土;收缩徐变;剪切变形;多层次试验;修正模型;收缩徐变数据库;不确定性;敏感性;备用束。

限于作者水平,书中错误与疏漏之处难免,敬请专家、学者不吝批评指正。

潘钻峰

2013 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 大跨径预应力混凝土箱梁桥的典型病害及研究现状	(2)
1.2.1 典型病害	(2)
1.2.2 病害的研究现状	(2)
1.3 混凝土结构收缩徐变效应的研究现状	(7)
1.3.1 混凝土收缩徐变特性描述	(8)
1.3.2 混凝土收缩徐变效应的分析方法	(9)
1.3.3 高强高性能混凝土收缩徐变特性	(11)
1.4 钢筋混凝土结构剪切变形研究现状	(13)
1.4.1 腹板斜裂缝和跨中下挠——“并发症”	(14)
1.4.2 剪切变形	(15)
1.5 需要进一步研究完善的问题	(16)
1.5.1 时效变形	(16)
1.5.2 剪切变形	(16)
1.6 研究背景、技术路线及主要研究内容	(17)
1.6.1 研究背景	(17)
1.6.2 技术路线及主要研究内容	(17)
本章参考文献	(20)
第二章 高强高性能混凝土收缩徐变三层次试验	(28)
2.1 引言	(28)
2.2 高强高性能混凝土三层次试验概述	(29)
2.2.1 试验内容概述	(29)
2.2.2 混凝土材料及配合比	(30)
2.2.3 C60 高强高性能混凝土的力学性能	(30)
2.2.4 材料层次试验	(31)
2.2.5 构件层次试验	(32)
2.2.6 结构层次试验	(32)
2.3 材料层次试验	(33)
2.3.1 混凝土自收缩试验	(33)
2.3.2 混凝土干燥收缩试验	(34)
2.3.3 混凝土徐变试验	(37)

2.4 构件层次试验	(40)
2.4.1 配筋混凝土收缩试验	(40)
2.4.2 配筋混凝土徐变试验	(41)
2.4.3 预应力长期损失试验	(48)
2.5 结构层次试验	(50)
2.5.1 T 构试验设计	(50)
2.5.2 加载与测试	(51)
2.5.3 T 构试验结果	(52)
2.6 本章小结	(56)
本章参考文献	(58)
第三章 收缩徐变三层次试验分析及实桥应用	(60)
3.1 引言	(60)
3.2 配筋对收缩徐变的影响研究	(60)
3.2.1 配筋对混凝土收缩徐变约束的影响系数计算	(61)
3.2.2 实用计算公式	(63)
3.3 材料层次——修正收缩徐变模型	(64)
3.3.1 几种常用收缩徐变模型介绍	(64)
3.3.2 常用收缩徐变模型比较	(68)
3.3.3 修正收缩模型	(71)
3.3.4 修正徐变模型	(72)
3.3.5 收缩模型预测值与试验值比较	(73)
3.3.6 徐变模型预测值与试验值比较	(77)
3.4 构件层次——配筋混凝土收缩徐变试验分析	(78)
3.4.1 配筋收缩试验结果与理论值的对比	(78)
3.4.2 配筋试件徐变试验结果与理论值的对比	(80)
3.5 考虑收缩、徐变和松弛相互影响的预应力长期损失计算	(82)
3.5.1 预应力长期损失计算公式的推导	(82)
3.5.2 试验验证	(83)
3.5.3 构件层次——预应力损失试验分析	(84)
3.6 结构层次试验分析	(85)
3.6.1 预应力长期损失结果比较	(85)
3.6.2 变形结果比较	(86)
3.7 基于修正收缩徐变模型的苏通大桥连续刚构时效分析	(87)
3.7.1 苏通大桥连续刚构的工程概况	(87)
3.7.2 计算模型概况及计算主要参数	(88)
3.7.3 计算结果与实测结果的比较	(91)
3.7.4 箱梁长期行为的预测	(95)
3.8 本章小结	(98)

本章参考文献	(101)
第四章 基于试验数据库的收缩徐变模型研究	(104)
4.1 引言	(104)
4.2 收缩徐变试验数据库	(105)
4.2.1 收缩试验数据库	(105)
4.2.2 徐变试验数据库	(105)
4.3 CEB-FIP90 模型评估	(106)
4.3.1 评估方法介绍	(107)
4.3.2 收缩模型评估	(108)
4.3.3 徐变模型评估	(110)
4.4 修正收缩徐变模型及评估	(112)
4.4.1 修正收缩模型及评估	(112)
4.1.1 修正徐变模型及评估	(115)
4.2 本章小结	(118)
本章参考文献	(119)
第五章 大跨径预应力混凝土箱梁桥时变效应的不 确定性和敏感性分析	(121)
5.1 引言	(121)
5.2 收缩徐变计算模型的不确定性研究	(122)
5.2.1 收缩徐变模型预测值的变异系数	(122)
5.2.2 收缩徐变模型的不完善导致的不确定系数	(123)
5.2.3 收缩徐变不确定性分析方法	(123)
5.3 苏通大桥连续刚构时变效应的不确定性分析	(125)
5.3.1 随机变量的选取	(125)
5.3.2 苏通大桥连续刚构时变效应的不确定性分析	(126)
5.4 苏通大桥连续刚构时变效应的敏感性分析	(129)
5.4.1 时变效应的敏感性分析	(129)
5.4.2 苏通大桥连续刚构时变效应的敏感性分析	(130)
5.5 本章小结	(132)
本章参考文献	(133)
第六章 钢筋混凝土梁的剪切变形影响研究	(135)
6.1 引言	(135)
6.2 钢筋混凝土梁剪切变形的理论研究	(137)
6.2.1 混凝土梁基于 B 区和 D 区划分的受剪性能分析	(137)
6.2.2 两种剪切刚度	(138)
6.2.3 定角桁架模型(CATM)	(138)
6.2.4 变角桁架模型(VATM)	(139)
6.2.5 最小斜裂缝角度 θ 的确定	(143)

6.2.6 定角桁架模型的斜裂缝角度 θ_0	(147)
6.2.7 剪切变形计算	(149)
6.3 试验方案设计及结果分析	(151)
6.3.1 试验目的	(151)
6.3.2 试件设计	(151)
6.3.3 材料的力学性能	(153)
6.3.4 加载装置及加载制度	(153)
6.3.5 试验结果及分析	(154)
6.4 其他试验验证	(157)
6.5 长期剪切变形的计算及试验验证	(159)
6.5.1 基于定角桁架模型方法的长期剪切变形计算	(159)
6.5.2 基于变角桁架模型方法的长期剪切变形计算	(159)
6.5.3 试验验证	(160)
6.6 剪切变形主要影响因素	(160)
6.7 本章小结	(162)
本章参考文献	(163)
第七章 大跨径预应力混凝土箱梁桥设计关键问题探讨	(165)
7.1 引言	(165)
7.2 箱梁构造及箍筋的合理设置	(165)
7.2.1 高跨比的设计	(165)
7.2.2 腹板厚度及箍筋的合理设置	(167)
7.3 腹板下弯束的设计	(168)
7.3.1 腹板下弯束的设计	(168)
7.3.2 竖向预应力束存在的问题	(170)
7.3.3 竖向预应力损失对箱梁结构的影响	(171)
7.4 斜裂缝出现后箱梁剪切变形对跨中下挠的影响	(172)
7.5 基于不确定性分析的体外备用束量化设计	(173)
7.6 箱梁结构材料的选择	(175)
7.7 本章小结	(175)
本章参考文献	(177)
第八章 总结与展望	(179)
8.1 主要研究成果	(179)
8.2 研究展望	(181)
后记	(183)

第一章 绪 论

1.1 引言

钢筋混凝土结构从 19 世纪中叶开始应用,至今已有 160 多年的历史。混凝土结构的应用范围十分广泛,无论从地上到地下,乃至海洋的工程构筑物,很多均采用混凝土建造。近年来国家大力发展基础设施建设,2009 年我国水泥产量 16.5 亿吨,2010 年我国水泥产量或达 18 亿吨^[1-1]。采用预应力混凝土结构,能避免钢筋混凝土结构过早开裂,并能有效地利用高强材料,在我国经历了三个阶段^[1-2]的发展之后,目前其应用越来越广泛。钢筋混凝土及预应力混凝土结构应用最广泛的领域之一就是桥梁结构,在现代社会中,桥梁作为社会的固定资产是一笔巨大的财富,其中混凝土桥梁又占据了绝大多数,欧洲占 70%,美国占 62%,而我国占 90%以上^[1-3]。

近三十年来,我国预应力混凝土桥梁的建设取得了重要成就,主要表现在材料(高强、早强混凝土,高性能混凝土,商品混凝土,泵送混凝土;高强钢绞线,大吨位群锚技术,预应力管道材料及成孔技术;大吨位的新型支座,大位移量的伸缩缝等)、结构设计(温度、收缩徐变、剪力滞、抗震、抗风、非线性等结构计算理论,计算机仿真技术等)及施工技术(悬臂浇筑、悬臂拼装及顶推施工,现代化的施工机具及高水平的施工管理等)等方面^{[1-4][1-5]}。其中,预应力混凝土箱梁桥(连续梁和连续刚构)具有结构刚度大,变形小,伸缩缝少,行车平顺舒适,抗风、抗震能力强及后期养护简单等优点,在跨度 30~300 m 均具有较强的竞争力。特别是在大跨径预应力混凝土箱梁桥的建设上,我国取得的成就举足轻重。据不完全统计,目前世界范围内跨径超过 240 m 的大跨径预应力混凝土连续刚构桥有 22 座^{[1-6][1-7][1-8]},其中 16 座在中国,占 73%,而且这个比例还会增大。世界上跨度最大的预应力混凝土连续刚构,是我国 2006 年建成的重庆石板坡长江大桥,主跨 330 m,采用钢-混凝土组合连续刚构方案,其主跨构成为 111 m 混凝土梁+108 m 钢箱梁+111 m 混凝土梁^[1-9]。目前世界上跨径最大的预应力混凝土连续梁桥,为挪威 1994 年建成的瓦罗德 2 号桥(Varodd-2)连续梁桥,主跨达 260 m。我国跨径最大的预应力混凝土连续梁桥主跨跨度达到 165 m,分别是南京长江二桥北汊大桥(跨径布置 90 m+3×165 m+90 m)^[1-10]和江苏宿淮高速京杭运河大桥(跨径布置 93 m+165 m+93 m)^[1-11]。

但是近二十年来,不少大跨径预应力混凝土箱梁桥在运营一段时间后,出现以跨中下挠过大及箱梁开裂为主要特征的病害^{[1-8][1-12]~[1-14]}。据交通部不完全统计,跨径在 100~160 m 的预应力混凝土梁桥,跨中年平均下挠 0.5~1 cm;跨径在 160~220 m 范围,跨中年平均下挠 1~2 cm;跨径在 220~270 m 的,跨中年平均下挠 2~3 cm,而且长时间难以稳定。

大跨径箱梁桥的下挠过大和箱梁开裂常常是“并发症”，而且下挠和裂缝均随时间延续而不断发展，直接影响着结构的正常使用性能与耐久性，这些问题一直困扰着桥梁设计工程师和工程管理人员，甚至有人提出预应力混凝土箱梁对于大跨径桥梁的适用性问题。诚然，预应力混凝土箱梁桥在跨径 300 m 之内的桥型方案选择上，均具有很强的竞争力，且国内外有许多大跨径混凝土梁桥设计的成功实例。箱梁斜向开裂及跨中下挠过大问题在大跨径预应力混凝土箱梁桥中具有相当的普遍性，成为制约该类桥梁应用于发展的主要障碍，是工程界和学术界亟待解决的问题之一。

1.2 大跨径预应力混凝土箱梁桥的典型病害及研究现状

1.2.1 典型病害

大跨径预应力混凝土箱梁桥主梁长期下挠问题是一个世界性的难题，近年来得到了广泛关注。主梁下挠的特点表现为^[1-12]：① 挠度长期增长，增长率随时间可能呈加速、降低或保持匀速变化的趋势；② 结构的长期挠度远大于设计计算的预计值。CEB 调查^[1-15]了 27 座混凝土悬臂桥（大约半数连续跨，其他跨中带铰）的变形资料，跨度从 53~195 m，有些桥梁在建造完成 8~10 年后挠度仍有明显增长趋势，甚至有两座桥的挠度从建成起到最后报告测量时间（分别是建成后的 16 年和 20 年）一直在以相同的变形速度增加。如果轻视这类病害，或者对病害的评估和处理不当，不仅影响结构的正常使用性能，甚至会危害桥梁的安全。1977 年建成的帕劳共和国 Koror-Babeldaob 桥，主跨 241 m，保持着建桥时同类桥梁的跨径世界纪录，但在建成后挠度不断加大，18 年后，主跨跨中下挠达到 1.39 m^[1-16]，1996 年加固修补 3 个月后桥梁倒塌^[1-17]。

预应力混凝土箱梁桥另一个典型的病害就是箱梁开裂，文献^[1-13]调查发现，在预应力混凝土箱梁桥中主要存在 7 类箱梁裂缝：① 腹板斜向、竖向、水平向裂缝；② 顶板纵向、斜向和横向裂缝；③ 底板纵向、斜向和横向裂缝；④ 横隔板竖向、横向、斜向和过人孔周围辐射状裂缝；⑤ 锚下劈裂裂缝；⑥ 沿纵向预应力束孔道的裂缝及层间裂缝；⑦ 齿板局部区域裂缝。而在大跨径预应力混凝土箱梁桥中，腹板斜裂缝病害最为典型。表 1.1 列出了出现典型病害的预应力混凝土箱梁桥^{[1-18]~[1-46]}。

1.2.2 病害的研究现状

如前所述，大跨径预应力混凝土箱梁桥的箱梁开裂和跨中下挠过大质量通病引起了工程界和学术界的广泛关注，国内外许多专家学者从桥梁的设计、施工和管理等多种角度，对此开展了大量、广泛的研究，并且在这些方面取得了较大的进展，但从根本上解决大跨径桥梁开裂和下挠问题，仍任重道远。本书也针对腹板斜向开裂和跨中下挠病害，从箱梁纵向预应力设计、竖向预应力设计、腹板斜裂缝对下挠的影响、结构构造设计、箍筋配置、混凝土材料选择等方面对箱梁桥进行了研究分析^[1-47]。目前对桥梁病害的研究主要集中在以下几个方面：设计方法及箱梁构造、收缩徐变效应、预应力损失、箱梁的空间效应、温度效应、计算模型考虑不周全、施工质量及控制等。

表 1.1 国内外部分桥梁出现典型病害的调查情况

跨径组合(m) 名称	国家和 地区	桥型	悬臂束	高跨比		腹板斜 裂缝	下挠 (cm)	测量时成 桥年数(年)
				根部	跨中			
140+240+140 江津长江大桥	中国	连续刚构	直线束	1/17.8	1/60	有	31.7	10
162+3×245+162 黄石大桥	中国	连续刚构	直线束	1/18.9	1/59.8	有	30.5	7
150+270+150 虎门大桥	中国	连续刚构	直线束	1/18.2	1/54	有	26	7
65+125+180+110 洛溪大桥	中国	连续刚构	直线束	1/18	1/60	有	6.4	3
105+4×160+105 三门峡大桥	中国	连续刚构	直线束	1/20	1/53.3	有	22	10
99+195+99 (Parrotts Ferry)	美国	连续刚构 (轻骨料混凝土)	—	1/20	1/80	有	63.5	12
主跨 150 Yuan-Shan	中国 台北	跨中带铰连续刚构					60	16
39.6+181.4+39.6 Grand-mere	加拿 大	连续梁	直线束	1/18.6	1/62	有	30	9
100+150+100 大河铺大桥	中国	连续刚构	—	1/25	1/62.5	有	27	5
66+120+66 广东南海金沙大桥	中国	连续刚构	—	1/20	1/48	有	22	6
86+160+86 广东丫髻沙大桥辅桥	中国	连续刚构	—	1/17.8	1/64	—	23	—
85+140+85+42 沅陵沅水大桥	中国	连续刚构	—	1/17.5	1/50	有	12.5	—
75+7×120+75 东明黄河大桥	中国	连续刚构	直线束	1/18.5	1/46.2	有	9	6
62.5+143.3+62.5 Kingston	英国	跨中带铰连续刚构	—	—	—	—	30	28
72+241+72 Koror-Babeldaob	帕劳	跨中带铰连续刚构	直线束	1/17	1/65.8	有	139	18
100+220+100 (Stovset)	挪威	连续刚构(中跨部分 轻质混凝土)	—	1/18.3	1/73.3	—	20	8
94+301+72 (Stolma)	挪威	连续刚构(中跨部分 轻质混凝土)	—	1/20.1	1/86	—	9.2	3
主跨 260 (Getway)	澳大利 亚	连续刚构	—	1/16.6	1/50.0	—	—	—

注:1. “—”表示调查文献未提及。

2. 表中悬臂束指悬臂施工阶段的纵向预应力束的类型,悬臂施工阶段的悬臂束一般有顶板直线束和腹板下弯束,表中直线束表示该桥悬臂束主要以顶板直线束为主,本书第八章对该因素影响进行了讨论。

3. 本章也考察了出现病害桥梁主梁根部截面及跨中截面的高跨比,本书第八章对该参数进行了讨论。

1) 理论设计方法

在刘效尧、赵立成主编的公路桥涵设计手册《梁桥》(下册)中^[1-48],指出预应力配索的体系选择依据:预应力束应根据最不利荷载组合下的弯矩、轴力、剪力包络图(不含预应力及相关内力)进行预应力筋的合理配束。传统预应力混凝土箱梁桥的设计参数的确定,经验所占比重较大,设计过程通常是不断试算、不断调整,以使桥梁应力和变形达到规范要求的过程。近年来,很多学者根据林同炎教授的荷载平衡理念提出了“恒载零弯矩”的设计思想,即在成桥的时候,桥梁的弯矩接近零,在混凝土收缩徐变效应下,只有轴向变形,弯曲变形很小,从而限制主梁下挠。上官兴、郭圣栋^[1-49]等剖析了箱梁桥两大病害的成因,提出按施工步骤进行分阶段预应力设计,以恒载“零挠度”为目标的理念来消除两大病害。同济大学、华东交通大学、江西省交通设计院等单位合作,对此立项开展了以大跨径 PC 梁桥防止跨中持续下挠课题研究^{[1-50]~[1-54]}。

同济大学的王法武和石雪飞^{[1-50][1-51]}研究了影响大跨径预应力混凝土梁桥跨中挠度的主要因素,基于恒载零弯矩的思想,研究通过增加顶板束、增加底板束和临时斜拉索辅助合龙三种方法控制跨中长期下挠。研究表明,根据最大悬臂状态预应力弯矩与自重弯矩大致相等配置顶板束及临时斜拉索辅助合龙方案控制跨中长期下挠效率较高,可以做到跨中不下挠,而增加底板束及采用底板后期束控制跨中长期下挠效率相对较低,只能作为控制长期下挠的辅助措施以及后备措施。

鄢玉胜^[1-55]讨论了预应力、混凝土徐变、箱梁抗弯刚度等对桥梁结构下挠的影响。比较了目前通用的设计理论与“零弯矩”设计理论两者的不同,通过实例阐述了“零弯矩”设计理论的特点。

刘亚军^[1-56]比较介绍了解决跨中下挠的两种方法:预拱度法和零弯矩法,建立了模型以验证零弯矩法较为合理的观点,并分析了竖向接缝和预应力有效预应力不足对预应力混凝土箱梁桥跨中下挠的影响。

姚强^[1-57]通过对跨中下挠主要影响因素分析,将荷载平衡法应用于挠度控制,研究了桥梁内力状态与长期变形之间的关系。

近年来也有学者提出采用最小弯曲能量来对桥梁进行设计,对悬臂和合龙阶段的纵向预应力进行优化设计,使主梁受弯和变形均较小。方志、何建梅等^{[1-58][1-59]}基于最小弯曲能量法提出了悬臂施工连续钢构预应力优化设计方法,通过选择施工控制截面并以离散截面的弯曲能量之和最小为目标函数,以各截面在各施工阶段的应力为约束条件,优化得到各阶段张拉的预应力筋数量。

东南大学刘钊^{[1-60][1-61]}基于效应平衡的合理成桥状态概念,提出相应的预应力配筋设计方法。通过合理的纵向预应力配置去适度平衡多种作用效应,使桥梁处于合理的成桥状态,以便控制下挠病害。杨俊^[1-62]、吕忠达、周绪红等^[1-63],于昆、郝宪武^[1-64]等也对桥梁合理成桥状态开展了研究。

同济大学徐栋、柳磊^[1-65]采用空间网格法,对大跨径预应力混凝土箱梁桥进行空间分析,得到了箱梁在各种复杂空间效应下的受力状态,并模拟了箱梁开裂后的性能。

同济大学李建中、张文学^[1-66]针对箱梁腹板及锚固区的裂缝,采用实体单元剪力箱梁空间模型,对箱梁的应力分布规律进行了分析,并与梁单元计算结果进行对比,进而将预应力

混凝土箱梁分为应力规则区(B区)和应力非规则区(D区),提出采用拉压杆模型法对预应力混凝土箱梁应力非规则区域进行设计。

朱汉华、陈孟冲等^[1-67]在大量对箱梁病害调研的基础上,详细阐述了各类裂缝的成因,特别是对纵、竖向预应力的设计问题的讨论,指出平面杆系模型不适用于宽跨比较大的箱梁计算,只适用于其初步设计。并从构造、非预应力筋的配置、施工质量管理等多方面,提出了裂缝控制措施。

湖南大学的邵旭东、王华^[1-68]结合空间有限元分析,对腹板斜裂缝成因进行了研究,指出常规设计计算汇总没有完全把握箱梁应力分布特征,主拉应力安全储备不足,是腹板斜向开裂的可能原因之一。而竖向预应力各项损失估计不足是腹板开裂的另一主要原因。

2) 时效变形

箱梁桥裂缝和挠度均随时间延续而不断发展,加剧桥梁工作状况的劣化,显然,时变效应是产生这类病害的主要原因之一。时变效应包括材料、结构和荷载的时变性。目前时变效应对桥梁影响的研究主要集中在混凝土收缩徐变、预应力长期损失等方面。收缩徐变预测模型及时效计算方法的研究现状将在 1.3 章节中详细阐述,这里主要介绍了部分专家学者研究收缩徐变及预应力长期损失对桥梁结构影响的研究现状。

Bazant、Vrablik 等^{[1-16][1-69]}对帕劳共和国 Koror-Babeldaob 桥病害的研究指出,混凝土收缩徐变模式的选择不当、预应力损失估计不足、模型计算考虑不周全是造成大跨径预应力混凝土箱梁桥病害的主要原因。

同济大学薛伟辰^{[1-70][1-71]}以具有高精度变形要求的准高速客运专线、城市轻轨和磁悬浮轨道交通梁长期变形控制为研究背景,对预应力混凝土梁的长期性能开展了较为系统的试验和理论研究。指出混凝土材料的选择、保证有效预应力、减小截面上下缘的应力差等是控制长期变形的有效措施。

陈政清、胡狄^[1-72]以高速铁路轨道预应力混凝土桥梁徐变变形控制为研究背景,制作了低徐变普通混凝土和低徐变高性能混凝土预应力混凝土梁,系统分析了混凝土徐变对梁变形的影响,给出了具有较高精度的计算公式。

湖南大学方志、汪剑^[1-73]依托湖南省交通厅项目“混凝土薄壁箱梁桥的非荷载效应研究”,对大跨径预应力混凝土箱梁桥进行了一系列的现场测试与分析,包括混凝土收缩徐变效应、预应力损失及温度效应等。对两座大跨预应力混凝土箱梁桥进行了 5 年的跟踪观测,取得了大量翔实可靠的实测数据,其结果能够反映混凝土收缩徐变在自然环境下的一些特性。采用 MIDAS 及他们的收缩应变和徐变系数计算方法,对箱梁桥进行了收缩徐变效应分析,推荐采用 GL2000 模型进行收缩徐变效应计算。

罗志佳^[1-74]以葫芦鼎大桥为工程背景,运用 MIDAS 软件,对该桥施工和运营阶段的收缩徐变影响进行了详细分析,并与施工现场采集的数据进行了对比分析。此外,建立了空间有限元模型,结果表明当纵、竖向预应力损失达 20% 左右时,加上收缩徐变效应、温度效应等因素,腹板就会出现斜裂缝,并就此提出了一些防治建议。

孙海林、叶列平等^[1-75]对某城市轨道交通中一段三跨预应力混凝土连续梁桥(3×25m)的收缩和徐变变形进行了为期 120 天左右的现场实测,并基于 ANSYS 程序采用三维有限元方法进行分析,得到变形值和应变值与实测值基本吻合。

Bazant^[1-16]、Kristek^[1-76]、黄海东、向中富^[1-77]、黄海等^[1-78]，许航、谭景文等^[1-79]研究了截面不均匀收缩对结构长期变形的影响。

影响混凝土收缩徐变的因素众多，变化规律复杂，具有时变性，收缩和徐变是混凝土的最不确定的特性之一。以往研究通过输入这些影响因素的确定性参数来获得输出响应，Madsen 和 Bazant^[1-80]指出在混凝土结构收缩徐变效应分析时，要考虑不确定性，近年来，混凝土收缩徐变的不确定性分析受到了关注。作者在 2006 年^{[1-81][1-82]}介绍了结构收缩徐变效应的不确定性分析方法，在数值模拟中采用了拉丁超立方抽样方法，减少了抽样次数。基于修正的收缩徐变模型，对苏通大桥连续刚构收缩徐变效应进行了不确定性分析，应用于苏通大桥连续刚构的施工阶段计算，并预测了苏通大桥连续刚构带有一定置信水平的长期变形区间。张建仁、汪维安^[1-83]分析了高墩大跨连续刚构在变形预测方面的不确定性，以 B3 收缩徐变模式为基础，对广西龙滩布柳河大桥进行了不确定性分析。此外，In Hwan Yang^{[1-84][1-85]}对预应力混凝土桥梁也进行了收缩徐变效应的不确定性分析。

国外有很多学者基于对实桥的变形观测，对跨中下挠进行了预测。Peter F. Takacs^[1-40]对挪威的三座大跨径预应力混凝土梁桥：Norddalsfjord 桥、Stovset 桥和 Stolma 桥分别进行了长达 14 年、8 年和 3 年的观测，基于 CEB-FIP90、NS 3473 和 B3 收缩徐变预测模型对三座桥进行了收缩徐变效应分析，并对影响桥梁长期变形的主要因素进行了敏感性分析。Li Xianping 等^[1-86]对夏威夷 North Halawa 山谷中的预应力混凝土高架桥（多跨预应力混凝土曲线箱梁桥，最大跨 109.7m）进行了长达 8 年的观测，并将实测值与 SFRAME 计算出的理论值进行了比较，其结果显示采用 CEB-FIP90 收缩徐变模型计算出的变形理论值偏小。此外文中还提出，对于桥梁的长期变形，由于混凝土收缩徐变模型中某些关键参数的影响，设计者应该给出变形值的一个范围，而不仅仅是一个值。

3) 温度效应

桥梁是暴露在大气环境中的结构，直接受季节性温差和局部温差影响，根据温度对桥梁结构的作用及其效应，可将温度变化划分为体系温差和日照温差两方面进行分析。混凝土箱梁温度场的分布、温度效应下的结构性能和计算方法等已成为目前箱梁结构中重要的研究方向之一。

Fritz Leonhardt^[1-87]对德国几座预应力箱梁桥发生严重裂缝的情况进行了分析，提出了横向温差应力估计值，定量地讨论了厚壁箱梁的温差应力问题，认为温差是预应力箱梁发生裂缝的主要原因。

德国的 Jagst 箱梁桥通车第五年就发生严重裂缝，经估算温度拉应力高达 2.6MPa；美国 Champigny 箱梁桥的日照温差拉应力达到 3.92MPa；新西兰 Auckland 一座预应力混凝土箱梁高架桥因环境温度和日照作用产生严重开裂现象，不得不耗资 30 万美元进行修复^[1-88]。

国内对混凝土结构温度分布与温度应力的试验研究起步于 20 世纪 50 年代末期，在 80 年代，刘兴法^{[1-88]~[1-90]}等从箱形梁的已知温度分布条件出发，根据伯努利的平截面假定，运用静力学的基本平衡方程，求解箱形梁的日照温度应力和位移，对红水河铁路斜拉桥和九江长江大桥引桥进行了温度场的现场实测，基于试验和实测及理论分析，建立了预应力混凝土箱梁的控制温度作用与相应的温度应力的计算方法。