

预应力混凝土斜拉桥 长期荷载作用下时变效应分析



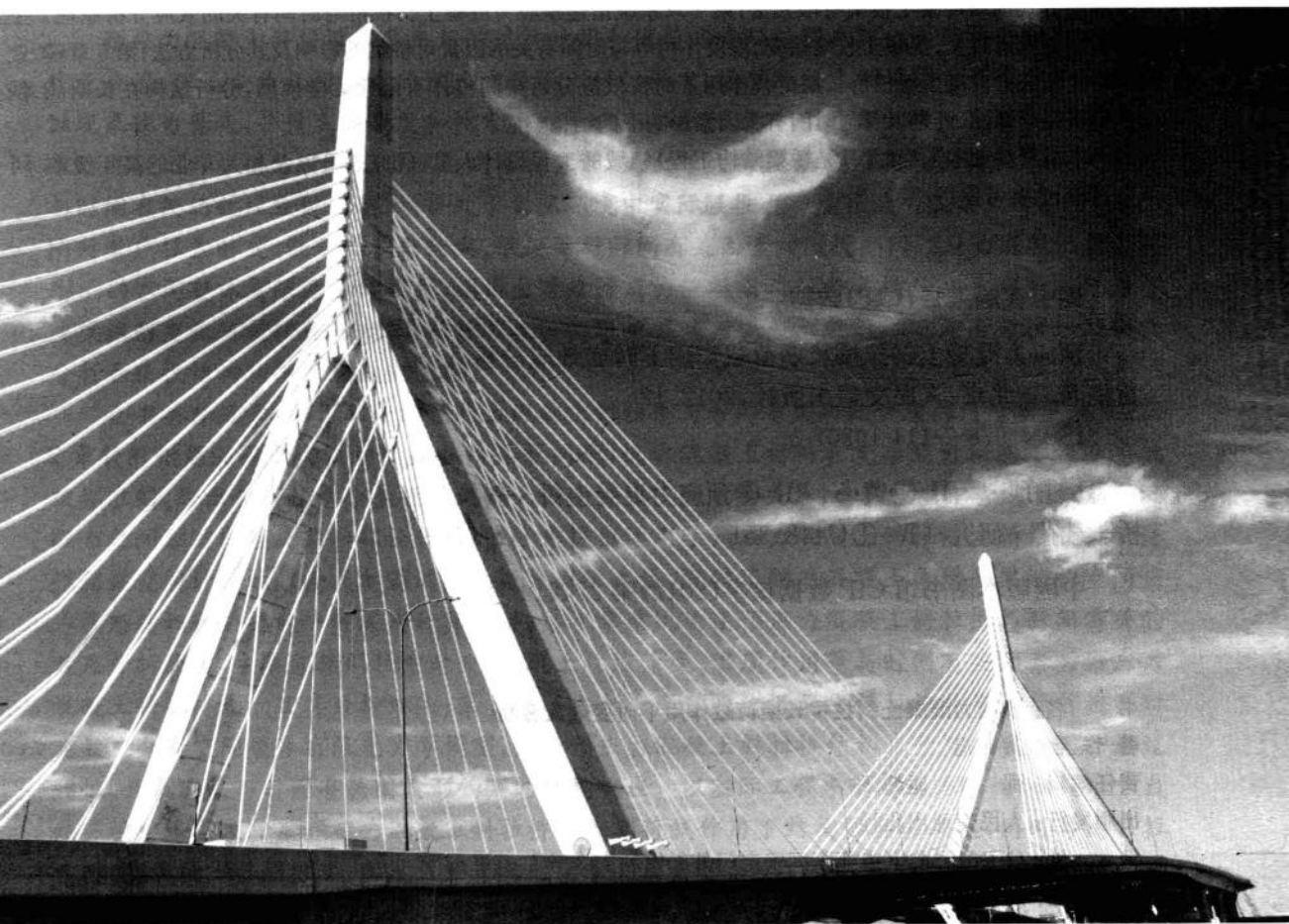
*Analysis of Time-dependent Effects on PC
Cable-stayed Bridge under Long-term Load*

黄娟 著



人民交通出版社
China Communications Press

预应力混凝土斜拉桥 长期荷载作用下时变效应分析



*Analysis of Time-dependent Effects on PC
Cable-stayed Bridge under Long-term Load*

黄娟 著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

全书共分五章:第1章介绍了预应力混凝土斜拉桥与时间有关的效应及国内外研究现状;第2章针对钢筋混凝土桥梁结构存在的开裂问题,选取混凝土材料在复杂应力状态下的三参数破坏准则,给出含有任意个裂缝带混凝土三向应力下的本构关系;第3章提出适用于预应力混凝土斜拉桥主箱梁分析的薄壁箱梁空间计算的组合式加筋混凝土板梁有限元法;第4章系统论述预应力混凝土斜拉桥与时间有关的效应分析原理,主要包括斜拉索时变、混凝土收缩徐变、温度作用等与时间有关的因素对桥梁的影响及其分析方法;第5章建立大跨度预应力混凝土斜拉桥长期荷载作用下时变效应分析空间整体有限元力学模型,分析结构在长期荷载作用下经过弹性、开裂以及与时间有关因素影响下的结构响应。

本书可供土木工程(尤其是桥梁结构工程)领域的工程设计人员、研究人员以及相关专业的高年级本科生、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

预应力混凝土斜拉桥长期荷载作用下时变效应分析/
黄娟著. --北京:人民交通出版社,2012.12
ISBN 978-7-114-10207-3

I. ①预… II. ①黄… III. ①预应力混凝土桥—斜拉
桥—载荷—研究 IV. ①U448.351

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 274214 号

书 名: 预应力混凝土斜拉桥长期荷载作用下时变效应分析

著 作 者: 黄 娟

责任编辑: 邵 江 温鹏飞

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.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 7.5

字 数: 174 千

版 次: 2012 年 12 月 第 1 版

印 次: 2012 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10207-3

定 价: 32.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

预应力混凝土斜拉桥以其良好的结构性能和优美的景观造型在现代大跨桥梁结构中得到广泛应用,但迄今为止所修建的预应力混凝土斜拉桥中,运营阶段主箱梁梁体开裂及斜拉索锈蚀现象较为普遍,导致主梁挠度和拉索索力等状态参数随服役时间发生较大变迁。本书以预应力混凝土斜拉桥运营期间出现的病害为背景,提出了大跨度预应力混凝土斜拉桥运营期间与时间有关的效应分析问题,结合处于自然环境中实际服役大跨度预应力混凝土斜拉桥,建立同时考虑拉索时变、混凝土收缩徐变、温度等与时间有关因素对服役期间预应力混凝土斜拉桥影响的空间整体有限元力学模型,揭示大跨度预应力混凝土斜拉桥成桥后在长期荷载作用下主梁线形变化与裂纹分布规律,为运营期间大跨度预应力混凝土斜拉桥空间应力状态精细化分析和服役结构状态评定提供依据。

全书共分五章:第1章介绍预应力混凝土斜拉桥与时间有关的效应及国内外研究现状;第2章针对钢筋混凝土桥梁结构存在的开裂问题,选取混凝土材料在复杂应力状态下的三参数破坏准则,给出含有任意个裂缝带混凝土三向应力下的本构关系,本构模型中考虑了钢筋和混凝土之间黏结滑移关系和销栓作用;第3章提出适用于预应力混凝土斜拉桥主箱梁分析的薄壁箱梁空间计算的组合式加筋混凝土板梁有限元法,提供了钢筋混凝土薄壁箱梁结构空间应力状态精细化分析的一种实用计算方法;第4章系统论述预应力混凝土斜拉桥与时间有关的效应分析原理,主要包括斜拉索时变、混凝土收缩徐变、温度作用等与时间有关因素对预应力混凝土斜拉桥影响及其分析方法;第5章建立大跨度预应力混凝土斜拉桥长期荷载作用下时变效应分析空间整体有限元力学模型,分析预应力混凝土斜拉桥结构在长期荷载作用下经过弹性、开裂以及与时间有关因素影响下的结构响应。以实际工程中的桥梁为依托,研究处于自然环境中服役大跨度预应力混凝土斜拉桥在长期荷载作用下结构的真实反映,同时考虑斜拉索时变、混凝土收缩徐变、温度作用等与时间有关因素对服役期间预应力混凝土斜拉桥结构状态的影响,揭示大跨度预应力混凝土斜拉桥成桥后主梁线形变化与裂纹分布规律。

本书得到华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究基金和广东工业大学省级创新训练项目资助,同时得到广东工业大学土木与交通工程学院各位老师的大力支持,特此表示感谢。

本书取材于作者近年来的工作成果。在撰写过程中,力求理论性与实用性相结合,注重从工程结构受力特点来研讨一些计算理论与方法,有利于读者加深理解,并更好地掌握运用。由于作者学识水平有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏与不妥之处,尚请读者批评指正。

黄娟于广州大学城

2012年9月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 预应力混凝土斜拉桥长期荷载作用下的时变效应	1
1.2 既有预应力混凝土斜拉桥时变效应分析的必要性	2
1.3 预应力混凝土斜拉桥时变因素的研究现状	3
1.3.1 拉索时变效应分析现状	3
1.3.2 混凝土收缩徐变研究现状	4
1.3.3 温度效应研究现状	8
1.4 薄壁箱梁结构研究现状	11
1.5 本书的主要工作	13
第2章 大型钢筋混凝土结构本构模型	15
2.1 概述	15
2.2 复杂应力状态下混凝土破坏准则	15
2.3 混凝土等效单轴应力—应变本构模型	17
2.3.1 模型描述	18
2.3.2 加载面函数	19
2.3.3 单轴应力—应变状态	20
2.3.4 等效单轴应力—应变关系	21
2.4 开裂混凝土的有限元模拟	22
2.4.1 柱状骨料咬合模型	22
2.4.2 混凝土开裂后的有限元模拟	23
2.4.3 积分点区域特征尺寸	25
2.5 裂缝处钢筋轴向效应及销栓作用	26
2.5.1 黏结滑移的钢筋轴向效应	26
2.5.2 钢筋的销栓作用	28
2.6 模式校核	33
2.7 小结	35
第3章 钢筋混凝土薄壁箱梁空间计算的组合式加筋混凝土板梁有限单元法	36
3.1 概述	36
3.2 箱梁组合式加筋混凝土板梁有限元法分析思路	36
3.3 薄壁箱梁混凝土板梁有限元模式	37
3.3.1 基本假定	37

3.3.2	箱梁的整体位移模式	37
3.3.3	箱梁的板梁子单元分析	39
3.3.4	箱梁截面自由度与其板梁子单元自由度的转换矩阵	45
3.3.5	薄壁箱梁梁段单元混凝土的总体刚度矩阵	49
3.4	箱梁组合式加筋混凝土有限元模式	50
3.4.1	模式的基本特征	51
3.4.2	计入钢筋贡献的单元刚度矩阵及内力等效结点荷载向量	52
3.5	斜拉桥塔柱及拉索位移	55
3.5.1	塔位移	55
3.5.2	拉索位移	56
3.6	算例分析	56
3.7	小结	58
第4章	预应力混凝土斜拉桥与时间有关的效应分析	59
4.1	概述	59
4.2	斜拉索时变效应分析	59
4.2.1	拉索锈蚀的表征	60
4.2.2	拉索等效弹性模量法	61
4.2.3	Ernst 公式的局限性	61
4.2.4	计入锈蚀和索力松弛影响的悬链线索单元	62
4.3	预应力混凝土斜拉桥混凝土收缩徐变分析	65
4.3.1	共轭斜量法在 BP2 模式 Dirichlet 级数参数辨识中应用	65
4.3.2	初应变法在预应力混凝土斜拉桥收缩徐变分析中的程序实现	71
4.3.3	算例分析	78
4.4	预应力混凝土斜拉桥温度效应分析	79
4.4.1	温度场的影响因素和特点	80
4.4.2	确定结构温度场分布	81
4.4.3	温度应力分析	84
4.4.4	程序实现	85
4.4.5	算例分析	86
4.5	小结	88
第5章	大跨度预应力混凝土斜拉桥长期荷载作用下时变效应工程实例分析	90
5.1	概述	90
5.2	工程背景	90
5.3	预应力混凝土斜拉桥时变效应现场测试及结果分析	92
5.3.1	时变效应现场测试	92
5.3.2	索力测试结果及分析	92

5.3.3 应变测试结果及分析..... 93

5.3.4 挠度测试结果及分析..... 95

5.4 运营期间预应力混凝土斜拉桥时变效应理论分析及工程应用..... 96

5.4.1 计算模型及增量平衡方程..... 96

5.4.2 主箱梁挠度变形分析 100

5.4.3 主箱梁空间应力分析 103

5.5 小结 103

第 6 章 结论与展望..... 105

6.1 主要结论 105

6.2 工作展望 107

参考文献..... 108

第1章 绪 论

1.1 预应力混凝土斜拉桥长期荷载作用下的时变效应

内部参数(包括几何形状、物理特性、边界状态等)随时间变异的结构称为时变结构。由于时变,结构的物理、几何或边界等因素随时间变化历程会影响应力(应变、位移)历史,进而影响结构物所处状态,大跨度预应力混凝土斜拉桥的时变贯穿于桥梁建造至整个服役期。在长期荷载作用下,预应力混凝土斜拉桥运营期间的时变及其效应主要体现在以下几个方面:

(1)混凝土收缩徐变的物理力学性质随时间而变化

混凝土变形随着时间的增长而增加的现象是混凝土收缩徐变的材料特性。在长期荷载作用下,混凝土的收缩徐变使得预应力混凝土斜拉桥的受力和变形依时而变。由于混凝土材料本身存在着许多随机因素,混凝土结构所处的环境又存在着相当大的随机性,而且收缩徐变对混凝土桥梁的影响时间跨度长,因此准确预测混凝土的收缩徐变对结构状态的影响是一个十分复杂的技术难题。

(2)环境温度对预应力混凝土斜拉桥结构的影响随时间而变化

对于非定常热传导形成温度场的时间历程,即会产生非定常时间因素和结构物几何参数的时变耦联,形成复杂变化的温度场与应力场。预应力混凝土斜拉桥长期暴露于大气中,大气环境温度对结构的影响主要体现于长期(年)温差作用和短期(日)温差作用。分析环境温度场与预应力混凝土斜拉桥结构温度场的关系,并确定由此产生的温度应力是相当复杂的问题。

(3)斜拉索钢丝锈蚀进程及其力学性能随时间而变化

斜拉桥拉索长期处于恶劣环境和张紧的高应力状态,对锈蚀具有敏感性,钢材的锈蚀和疲劳会引起拉索内钢丝断裂和断索。斜拉索时变退化分析中,要考虑拉索钢丝的锈蚀进程以及发生锈蚀后拉索力学性能的演化历程。

(4)预应力混凝土斜拉桥结构的挠度或几何线形随时间而变化

主梁线形及挠度变化是反映主梁工作状态的重要参数。预应力混凝土斜拉桥结构建成通车以后,随着时间推移,在车辆荷载、温度和其他环境因素作用及材料本身某些随时间变化特性的影响下,桥梁的几何线形和内力状态在长期的服役期间发生缓慢的变化,体系内部出现内力重分布,预应力混凝土斜拉桥结构体系会自动地改变本身形状以适应环境的干扰和影响。桥梁运营多年后,预应力混凝土斜拉桥结构的几何线形较成桥之初已发生变化。

(5)预应力混凝土斜拉桥的拉索索力随时间而变化

在恒活载及环境的共同作用下,伴随着自然腐蚀、材料老化、裂缝扩展、损伤积累、塔梁变位,斜拉索的索力已经发生变迁。

(6)时变影响预应力混凝土斜拉桥主梁梁体混凝土的开裂进程

在预应力混凝土梁体的应力集中处或高应力区域,混凝土收缩徐变等时变因素可促使梁



体提前出现裂缝或加速已有裂缝的扩展。文献[32]试验结果显示:在长期荷载作用下的偏心受压带缺口混凝土试件,混凝土收缩徐变大大加快了缺口处开裂槽位移的增长,加速了试件的破坏。

(7)在长期荷载作用下,时变降低了预应力混凝土斜拉桥主梁的梁体刚度

众所周知,外加变形所产生的约束力是与结构刚度成正比的,而收缩徐变对于混凝土结构几乎毫无例外地会降低其刚度,从而能够降低这种约束力的作用。在持续恒载作用下,混凝土的应变随着时间的增长而增加,而混凝土的应力与应变之比值(可称为“有效弹性模量”)随着时间的增长而降低,“梁体有效刚度”亦随着时间的增长而逐渐降低,从而导致梁体的时变下挠。对于超静定体系桥梁,“刚度降低”使外加强迫位移(如支座沉降、梁体的调高等)所产生的约束力逐渐释放。

1.2 既有预应力混凝土斜拉桥时变效应分析的必要性

斜拉桥主要由桥面系、拉索、塔和墩组成,用斜拉的索支承桥梁的概念可以追溯到17世纪,但现代斜拉桥的兴起却是以1956年瑞典建成的Stromsund钢斜拉桥、1962年委内瑞拉建成的Maracaibo混凝土斜拉桥为起点。因其跨越能力强、结构形式简洁、受力明确和优美的造型景观再度受到人们的青睐,到20世纪90年代中期,全球已建成各类斜拉桥300多座,遍布30多个国家和地区。在跨径200~600m范围内,预应力混凝土斜拉桥以其良好的结构整体性能、经济和美观等方面的优点而有着很强的竞争力。

我国从20世纪80年代起,为适应交通功能现代化的要求,公路桥梁建设进入了高速发展期,用预应力混凝土作为梁、塔的建造材料特别适合我国国情,因此在短短的二十几年间,预应力混凝土斜拉桥得到了广泛的应用和发展。自1975年重庆市云阳第一座混凝土斜拉桥建成以来,斜拉桥在我国得到了迅速推广,在已建成的100多座斜拉桥中,除少数钢斜拉桥与结合梁斜拉桥外,大多是预应力混凝土斜拉桥。1977—1987年,我国共修建了16座斜拉桥,其中15座是预应力混凝土斜拉桥。80年代中后期至今,是我国预应力混凝土斜拉桥大规模兴建时期,已建有40多座预应力混凝土斜拉桥,跨径从200m到600m不等。400m以上预应力混凝土斜拉桥的成功建设,标志着我国斜拉桥设计与施工技术跻身国际先进水平行列。这些桥梁的建成通车为我国交通运输和经济发展起到了重要作用。

然而,随着越来越多预应力混凝土斜拉桥的建成通车,该类桥梁在运营期间逐渐暴露出一些病害问题,突出表现在:一是预应力混凝土斜拉桥主梁梁体混凝土的开裂问题,继而出现主梁下挠、桥面线形不平顺、拉索索力在高应力状态下松弛、索力分布不合理等一系列病害;二是斜拉索钢丝锈蚀问题,甚至出现断丝、断索现象。这些病害的出现,对既有预应力混凝土斜拉桥承载性能造成严重影响,直接威胁桥梁的安全运营。面临当前公路超载及超限运输不断加剧的情况,国内外已有多座预应力混凝土斜拉桥因发生病害而实施梁体加固及斜拉索换索修复工程。调研发现,由于预应力混凝土斜拉桥发展历史太短,成桥后整体特性、退化机理以及发展变化规律均无系统、可靠的理论和经验,无法确定合理的整治措施,导致桥梁整治后仍达不到预期的修复效果,一些桥梁不得不提前更换,造成很大的经济损失,工程界对预应力混凝土斜拉桥的应用前景产生了一些顾虑,迫切需要对此类桥型在运营阶段出现的病害问题给出



确定性的解答。

实际上,预应力混凝土斜拉桥经过多年运营后,随着环境和使用功能的变化,结构内部参数已经发生了变异,导致服役结构实际受力状态与成桥之初状态有较大差异。以1989年建成通车的安徽蚌埠淮河公路桥为例,在1992年初发现索塔向河心倾斜;法国主跨为320m的Broutonne桥,运营三年后主跨跨中下挠24cm,塔顶向跨中侧移10cm。那么,针对已暴露的问题如何用科学可靠的方法和手段,找出引起结构内部参数变异的时变因素,对预应力混凝土斜拉桥在服役期间出现的病害做出正确的分析和判断,确定合理的修复加固方法和合适的换索时间,以及桥梁修复之后的安全性能评定等问题,是当前预应力混凝土斜拉桥养护管理所面临的重大难题,也是今后此类型桥梁在应用和发展过程中亟待解决的一系列技术热点问题。而对预应力混凝土主箱梁梁体开裂及斜拉索锈蚀病害成因及其对运营期间结构性能影响的分析和判断,是解决预应力混凝土斜拉桥病害问题的关键和前提,有必要进行深入的分析。

本书以大跨度预应力混凝土斜拉桥运营期间出现的上述典型病害为背景,展开了预应力混凝土斜拉桥建成通车后结构内部参数偏离成桥之初状态的时变效应研究,以期对大跨度预应力混凝土斜拉桥在服役期间出现的病害做出正确的分析和判断。

1.3 预应力混凝土斜拉桥时变因素的研究现状

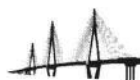
大跨度预应力混凝土斜拉桥长期荷载作用下时变效应分析,需首先考虑并找出引起结构内部参数变异的各主要时变因素,同时考虑引起预应力混凝土主箱梁体开裂、塔梁变形、斜拉索锈蚀及索力松弛各因素对预应力混凝土斜拉桥体系的影响,结构的物理非线性、几何非线性使得问题极其复杂化。

国内外大跨度预应力混凝土斜拉桥维护和管理经验表明,预应力混凝土斜拉桥建成以后,随着使用年限的增加,使得桥梁的许多结构性能参数偏离了成桥之初的设计值,其原因主要有:斜拉索锈蚀和松弛的影响;混凝土收缩徐变的影响;年温差和局部温差的影响。本书以引起预应力混凝土斜拉桥服役期间时变的各主要因素为主线,在以下几个方面的研究成果基础上,形成研究的思路,并展开了进一步深入研究。

1.3.1 拉索时变效应分析现状

拉索是由高强钢丝构成的柔性结构,是斜拉桥的重要受力构件。其在服役期间,经常处于张紧的高应力状态,斜拉桥桥跨结构的重量和桥上荷载,绝大部分通过拉索传递到塔柱上。拉索在服役期间表现出的两个最显著的特点为:一是拉索的几何非线性问题;二是拉索锈蚀问题。其中拉索的几何非线性行为是柔性结构的固有力学特征,而拉索锈蚀是该类桥梁运营期间所面临的病害。因此,拉索时变效应分析,应同时考虑这两个方面的因素。

拉索的几何非线性源于拉索是柔性结构,柔性索具有一定垂度,索呈曲线状,索内力与位移之间呈现出明显的几何非线性,国内外不少学者研究了索的几何非线性行为。Ernst将索视为一直杆,用含有索截面上拉应力的等效弹性模量来模拟因素重度、垂度引起的几何非线性,Leonard、Gimsing、Tung、Poddny等也采用了相似的观点。Vilnay、Kwan、Mitsugi、Stefanou等将索离散为一系列的铰接直链杆,这种方法当杆单元的数量达到很多时,能保证计算



结果有足够的精度。Ahmadi-Kashani、Gambhir、金问鲁、余学进、袁行飞等采用基于抛物线理论的计算方法。Jayarama 等、Andreu 等、沈世钊等、杨孟刚等、王春江等用悬链线单元来分析索的非线性。

目前国内外采用基于抛物线理论的计算公式,实际上是取自重沿索长均匀分布下形成的“悬链曲线”方程级数展开式二阶以下项,并对其修正后得到的近似理论。它在物理上隐含了两条相互对立的近似假设:一是视索的自重沿水平轴均匀分布;二是视索的自重沿曲线均匀分布。故“抛物线”理论的适应范围十分有限,仅适用于小垂度、矢跨比小于 8% 的情形。“悬索曲线”计算方法,即取“悬链曲线”方程级数展开式四阶以下项,并修正四阶项后所推导的近似公式,扩大了设计范围,但也包含了两条相互对立的基本假设:一是视索自重沿水平方向递增分布,而递增梯度为一常数;二是视索自重沿曲线均匀分布,因此限制了其应用范围。为了消除这些矛盾,文献[30]提出了“悬链段”分析法,该方法以两等高支座之间的“水平悬链线”的办法,利用了水平悬链线的精确解,数值比较结果表明“悬链段”方法具有较高的精度。

然而,上述各计算模式,都是建立在拉索材料完好状态下,没有考虑拉索服役期间出现的锈蚀等退化因素。当将现有分析拉索的计算方法直接应用于服役期间拉索计算时,其结果往往与拉索实际受力状态有较大误差,有时甚至产生谬误。

拉索服役期间容易锈蚀,且处于高应力状态,对锈蚀就更具敏感性,而且一经锈蚀,其静力强度以及疲劳抗力大大降低,已不能按照规范值或原来试验的疲劳极限对拉索进行分析。尽管斜拉桥是超静定结构体系,设计时已经考虑到体系能经受某单根拉索的突然破坏,然而如果破坏是由于锈蚀引起的,则内力重分布可能引起更多拉索破坏,剩余拉索结构的整体性也遭到损害,结构体系有可能渐次崩溃。

关于拉索钢丝锈蚀的退化机理及拉索力学性能随时间变化的分析与研究,国内外学者展开了相关研究工作。文献资料表明:钢丝存在多种退化诱因和退化模式,如锈蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳等,但目前对拉索的退化机理还不十分清楚,尚未建立考虑拉索力学性能退化的合理有效的分析模型。

综上所述,目前广泛应用的索的各种计算模式,无论是“抛物线”理论,还是“悬链线”理论,都是在拉索材料完好状态下的分析模型,没有考虑拉索钢丝锈蚀退化等时变因素及其对拉索承载力的影响。因此,寻找适宜的计算方法来准确模拟服役期间拉索的时变力学行为,仍是一件很有意义的事。

1.3.2 混凝土收缩徐变研究现状

从发现混凝土收缩徐变现象至今的一个世纪内,研究混凝土收缩徐变机理,提高预测混凝土结构物收缩徐变效应的精度,始终是极具挑战性和诱惑力的课题。在过去的二十年间,基于大量的收缩徐变试验数据的采集、计算机数据库的建立、计算统计程序的开发以及对收缩徐变的物理进程的逐渐认识,为进一步认识、分析和预测收缩徐变提供了依据。

混凝土的收缩徐变机理十分复杂,迄今为止没有一种被广泛接收。一般认为,混凝土收缩的产生是由于内部毛细水分的扩散消失所致。影响混凝土收缩的因素主要有:混凝土的材料特性,如水灰比、强度、水泥类型等;构件特性,如构件尺寸、构件横截面的形状等;环境因素,如循环作用的温度、湿度、养护条件等;龄期,如计算龄期、加载龄期、干燥龄期等。而混凝土徐变



源于硬化的水泥胶体以及高应力下水泥胶体与集料间的黏结破坏。徐变的产生与混凝土中凝胶体、水分的迁移,集料的延迟弹性变形有关。影响混凝土徐变的因素可分为内部因素和外部因素,内部因素包括混凝土的组成材料及其用量比例、混凝土构件尺寸及其制作养护;外部因素包括混凝土构件受力特征及受力后的工作环境。由于发生收缩和徐变的机理及影响因素有极大相似性,除了“应力因素”之外,几乎所有影响徐变的因素也就是影响收缩的因素,普遍认为它们是相互联系的现象(通常同时发生),分析中常将它们放在一起考虑。而实际上两者发展的速度是有差异的,考虑这种差异的精确计算,可采用逐步计算方法。

1) 徐变计算的基本理论

徐变计算的基本理论主要分为:老化理论、先天理论(又称继效理论)和混合理论(又称弹性徐变理论)。

(1) 老化理论

老化理论由 Glanville W. H. 于 1930 年创立。Glanville 从早期混凝土的试验中得出结论:不同加载龄期 τ 的徐变曲线在任意时刻 t ($t > \tau$) 的徐变增长率都相同,且随加载龄期的增大,徐变将愈来愈小,在增大到一定值之后,混凝土将不会产生徐变。这意味着若已知加载龄期 τ_0 的混凝土徐变基本曲线 $C_0(t, \tau_0)$,通过坐标系上的垂直平移(沿 ϵ 轴平移),即可得到任意加载龄期 τ 的混凝土徐变曲线,即

$$C(t, \tau) = C_0(t, \tau_0) - C_0(\tau - \tau_0) \quad (1-1)$$

按老化理论,徐变随龄期的增长很快减小,老期混凝土(3~5 年)的徐变几乎为零,这与实际不符合;同时,老化理论把可恢复变形缩小为零,忽略了卸载后的滞后弹性恢复,反映不了早期加载时徐变迅速发展特点,这也不符合实际。因此,按照老化理论,因未考虑滞后弹性恢复,当计算后期加载的长期效应时,将低估徐变变形,当计算递减荷载的长期效应时,则高估了徐变变形。同时,老化理论将低估松弛后的应力。

(2) 先天理论

先天理论是 Thomas F. G. 于 1933 年从徐变速率角度上提出的徐变特性的指数函数表达式,1943 年 D. Mc. Henry 又发展了这一理论。先天理论认为,不同加载龄期 τ 的混凝土徐变增长规律都是一样的,加载后任一时刻的徐变率与剩余的或将会产生的徐变量成正比。若已知加载龄期 τ_0 的徐变曲线 $C_0(t, \tau_0)$,通过坐标系上的水平平移(沿时间轴 t 平移),即可得到任意加载龄期 τ 的徐变曲线,即

$$C(t, \tau) = C_0(\tau - \tau_0) \quad (1-2)$$

根据先天理论,不同加载龄期的徐变终值都是相同的,它忽略了混凝土的老化影响,突出了其遗传性。按先天理论,徐变不取决于加载时混凝土的龄期,即先天理论不能反映加载龄期的影响,通常情况下,该理论对徐变的估计过高。此外,先天理论假定徐变是全部可恢复的,即卸载后变形全部恢复,这与实际不符合,只能近似地适用于后期加载的情况。

(3) 混合理论

老化理论考虑了混凝土老化对徐变变形的影响,而先天理论强调了徐变变形的遗传性。实际上,混凝土在前期老化特征十分明显,而后期则主要表现为遗传性,这一点也已被大量实验所证明。作为一种合理的推论,可以把老化理论与先天理论相结合,形成一种混合理论。根据混合理论的特点,构造任意加荷时刻 τ 的徐变度 $C(t, \tau)$,一般有以下三种形式的徐变表



达式:

①表达成一系列系数的乘积,每一系数代表一影响徐变的重要因素。

一般是将徐变度 $C(t, \tau)$ 表达成龄期函数与时间发展函数的乘积:

$$C(t, \tau) = \Phi(\tau) \cdot f(t - \tau) \quad (1-3)$$

式中: $\Phi(\tau)$ ——龄期函数;

$f(t - \tau)$ ——时间发展函数。

目前,采用这种系数乘积表达式的有英国桥梁规范 BS5400(1984 年版第四部分)、美国 ACI209 委员会的建议(1982 年版),1990 年版的 CEB-FIB 模式规范也类似于这种形式,以及我国现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ D62—2004)。

②表达成若干性质互异的函数之和。

CEB-FIB 模式规范(1978 年版)采用下面的徐变度表达式:

$$C(t, \tau) = f_a(\tau) + f_d(t - \tau) + f_i(t, \tau) \quad (1-4)$$

式中: $f_a(\tau)$ ——不可恢复的瞬时流动变形;

$f_d(t - \tau)$ ——可恢复的滞后弹性变形;

$f_i(t, \tau)$ ——不可恢复的流塑性变形。

采用这种多系数和形式的还有我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)。

③混合模式。

1978 年美国 Bazant 指出,国际标准规范中,对有关徐变的影响因素考虑不周,只是以范围十分有限的试验为依据,尤其不适宜于一周以内或一年以上的徐变。Bazant 根据计算机分析和来自不同实验室对各种强度混凝土的 80 组试验数据,将徐变表达成基本徐变和干燥徐变之和,提出了著名的 BP 模式。在 BP 模式的徐变度表达式中,既有和的表示形式,又有乘积的表示形式,是典型的混合模式,其数学表达式为:

$$C(t, \tau) = C_0(t, \tau) + C_d(t, \tau, \tau_0) \quad (1-5)$$

式中: $C_0(t, \tau)$ ——基本徐变;

$C_d(t, \tau, \tau_0)$ ——干燥徐变,并有:

$$\begin{cases} C_0(t, \tau) = \varphi_1(\tau^{-m} + 0.05)(t - \tau)^n \\ C_d(t, \tau, \tau_0) = \bar{\varphi}_d k_h \tau^{-m/2} \left(1 + \frac{3\tau_{sh}}{t - \tau}\right)^{-0.35} \end{cases} \quad (1-6)$$

2) 桥梁结构徐变效应计算方法

国内外不同时期对各种强度混凝土的大量试验研究表明,当混凝土中应力 $\sigma_c < (0.4 \sim 0.5)f_c$ 时,除递减的应变,混凝土可以近似地看成线性黏弹性的时效材料,徐变行为基本上为线性。某一时刻荷载增量引起的徐变基本上与先前荷载引起的徐变无关,叠加原理有效。由于桥梁服役期间其工作应力满足 $\sigma_c < (0.4 \sim 0.5)f_c$,因此现在桥梁徐变效应分析基本上采用线性徐变理论,且通常情况其计算精度能满足工程要求。

目前,分析桥梁徐变的方法主要有 Dishinger 法及修正的 Dishinger 法、龄期调整的有效模量法、中值系数法、逐步计算法、增量形式递推法。



(1) Dishinger 法及修正的 Dishinger 法

Dishinger 法又称徐变率法、老化理论(RCM)。该法的基础由 Glanville(1930)创立,其数学表达式由 Whitney(1932)提出,1937 年 Dishinger 将之用于复杂结构的计算。在 Dishinger 法中,没有考虑滞后的弹性变形,会低估徐变值,因此此法适用于早龄期混凝土,而对晚龄期混凝土,计算结果与实际情况有较大出入,甚至超过精确值的 50%。为此,Nielsen(1970)和 Rusch 等(1973)建议把徐变变形 ϵ_{cr} 分为滞后弹性变形 ϵ_d 和瞬时流变 ϵ_f ,并把 ϵ_d 加到瞬时弹性变形 ϵ_e 中去,形成修正的 Dishinger 法(Improved Dischinger Method,简称 IDM)。IDM 极大地提高了结构徐变分析的精度,但与试验获得的不同龄期加载的长期徐变曲线仍吻合得不好,尤其对基本徐变预测误差很大。

(2)按龄期调整的有效弹性模量法

RCM 和 IDM 的缺点在于为便于求解微分方程,引入了较多假定,与实际情况偏差较大。1967 年 Trost 引入了老化系数(当时称为松弛参数)概念,建立了考虑徐变的混凝土应力、应变的代数方程表达式。1972 年 Bazant 对 Trost 公式进行了严格论证,提出了按龄期调整的有效弹性模量法,也称为 T-B 方法,该方法既简化了计算又提高了精度,混凝土的有效模量为:

$$\bar{E}_c(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi(t, t_0)\phi(t, t_0)} \quad (1-7)$$

式中: $\chi(t, t_0)$ ——老化系数,取决于初始加载龄期 t_0 、持续时间 $(t - t_0)$ 、构件尺寸等。

按龄期调整的有效弹性模量法(AEMM)求解时关键问题是如何准确确定 $\chi(t, t_0)$,为此许多学者进行了深入研究。AEMM 是目前徐变分析的主流方法,它的物理概念明确,已能满足工程要求。但在进行有限元分析时,AEMM 需要在求解过程中不断修正其刚度矩阵,总体刚度矩阵的不断修正和分解,使得分析效率受到了影响。同时,由于徐变收缩的计算和单元刚度矩阵的计算耦合在一起,为扩充发展有限元分析核心带来了不便。

(3)中值系数法

1981 年,中国建筑科学研究院陈永春等将混凝土的应力—应变关系的积分方程用中值定理转化为全量形式的代数方程,提出了中值系数法,1987 年又作了改进,1991 年又通过数值法直接求解积分方程,求得中值系数,可用于分析满足积分中值定理条件的混凝土徐变问题。

$$\epsilon(t, t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E_c(t_0)} + \sigma(t_0) \cdot C(t, t_0) + [\sigma(t) - \sigma(t_0)] \left[k_1(t, t_0) \cdot C(t, t_0) + \frac{k_2(t, t_0)}{E_c(t_0)} \right] \quad (1-8)$$

式中: $k_1(t, t_0), k_2(t, t_0)$ ——中值系数;

$k_1(t, t_0)$ ——徐变系数的变化;

$k_2(t, t_0)$ ——弹性模量的变化。

根据中值定理,高政国等构造了混凝土结构徐变应力分析的全量方法,以应力冲量的形式推导了混凝土徐变应变增量的递推公式。

同济大学范立础等基于应力、应变关系的积分方程,用中值定理推导出了增量形式的代数方程:



$$\begin{aligned} \varepsilon(t, t_0) = & \frac{\sigma(t_0)}{E_c} [\varphi(t + \Delta t, t_0) - \varphi(t, t_0)] + \frac{\sigma_s(t + \Delta t) - \sigma_s(t)}{E_c} [1 + \rho_2 \varphi(t + \Delta t, t)] + \\ & \rho_1 \frac{\sigma_s(t)}{E_c} [\varphi(t + \Delta t, t_0) - \varphi(t, t_0)] \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中:下标“s”——徐变引起的变化量;

ρ_1, ρ_2 ——中值系数。

利用此方法可以计算各种施工情况的徐变效应。

(4) 逐步计算法

逐步计算法是把整个时间过程($t-t_0$)分成若干段,在每段范围内假定应力分布为已知的,先求出第一时间段的应力应变增量,然后求出第二时间段的应力应变增量,也即第 n 阶段的计算必须建立在第 $n-1$ 阶段的计算结果之上。

$$\varepsilon(t, t_0) = \sigma(t_0) \cdot J(t, t_0) + \sum_{i=1}^n \Delta \sigma(t_i) \cdot J(t, t_i) \quad (1-10)$$

Ghali 最早提出了徐变效应的逐步计算法。逐步计算法以线性徐变理论和叠加原理为基础,在应力递增的徐变分析中给出了相当高的精度;由于徐变有滞后变形的性质,在应力递减的徐变分析中逐步计算法将高估徐变恢复的影响。

(5) 增量形式递推法

利用指数函数“记忆”的特点,用指数函数表示徐变特性时能给徐变问题的解答带来很大方便;同时,当把计及徐变的混凝土应力、应变关系写成增量形式时,由于指数函数可提出公因子,可以使增量形式方程中只包含当前状态的变量,不必存储应力历史。

文献[45]讨论了混凝土 Dirichlet 级数表示的徐变函数。基于指数函数形式及 Dirichlet 级数表示的徐变度, Zienkiewicz 和 Waston、Taylor 曾提出了等步长的显式解法,中国水利水电科学研究院朱伯芳改进了此算法,使之能适用于变步长的情形,文献[42]给出了隐式解法。

基于指数函数形式的徐变函数所建立的增量形式的递推公式,其主要优点是可压缩存储量。对于徐变函数的拟合,可以通过实验数据或规范模型数据来进行,利用现行的 MATLAB 工具可以方便地实现。高郑国等利用混凝土徐变恢复函数与徐变度函数建立了基于等效历史应力假定的双功能徐变函数表达式。李国平对我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)进行了拟合。但是,在没有混凝土结构相应素混凝土徐变资料情况下进行徐变分析时,现行规范公式及 BP 和 B3 模式等较流行徐变模型大都为非指数函数形式,如何将它们转化为指数形式将是困难的,尤其当 Dirichlet 级数中包括可恢复徐变项时,可恢复徐变项的系数获得将更困难。因此,基于指数函数表示的增量形式递推法的使用受到了很大的限制。

1.3.3 温度效应研究现状

20 世纪 50 年代初,前联邦德国学者从混凝土桥墩裂缝的现场调查中认识到温度应力对混凝土结构的重要性,我国铁道部大桥局曾在 20 世纪 50 年代末对实体混凝土桥墩的温差应力做了调研工作。在温度应力研究的起步阶段,国内外都以年温变化产生的均匀温度分布为依据。直到 20 世纪 60 年代初英国 Stephenson D. A. 的研究成果,才使对温度应力的研究从考虑一般的气温作用进入到考虑日照作用的新阶段。



混凝土桥梁服役期间,受太阳辐射、气温等外界环境影响,由于混凝土的导热系数小,在遇外界温度急变的情况下,混凝土表面与内部温度不一致,内部温度的变化存在明显的滞后现象,形成不均匀的温度场,这种温度场具有非线性、瞬时性以及空间上不均匀性的特点。在结构内外存在约束时,会产生相当大的温差应力,国内外都发生过由于温度应力导致混凝土桥梁严重裂损的事故。

随着大跨度预应力混凝土箱梁桥结构的发展,温度应力对混凝土结构的影响和危害已经越来越引起工程界的重视。为此,国内外学者已对混凝土桥梁结构的温度场和温度效应展开了现场测试、模型试验和理论研究。

1) 温度场的影响因素及特征

桥梁暴露在大气中,大气环境温度对桥梁结构温度场的影响一般可分为日照、骤然降温、年温度变化三种类型,体现在桥梁结构受长期温差(年温度变化)和短期温差(日照、骤然降温)形式的作用上。

长期温差影响下,环境温度随季节发生周期性变化,它对桥梁结构温度场的影响是缓慢的、均匀的、整体的,即结构温度场仅与时间有关。长期温差只引起结构的均匀伸缩,当这种轴向变形受到约束时,会在结构中产生约束应力,相应的计算方法较为简单,在温度对结构影响研究的初期,国内外都以年温差变化产生的均匀温度分布为依据,并在工程设计中给予考虑。

短期温度影响下,环境温度随日照或寒流发生变化,对结构所产生的影响因日辐射强度、寒流程度、影响时间、桥梁方位、地理位置、地形地貌等随机因素而不同,将产生非均匀分布的、急变的、局部的结构温度场,即桥梁结构温度场不仅与时间有关,而且与结构的三维坐标有关。

短期温度(日照、骤然降温)对混凝土桥梁的影响远远大于长期温差。20世纪70年代和80年代,英国和新西兰等国家对混凝土桥梁的温度梯度展开了大规模的实测研究,取得了第一手资料,将温度场简化为沿桥梁横向或截面高度方向的温度梯度曲线,制定了相应的温度分布曲线,分别纳入英国规范 BS5400 和新西兰桥梁设计规范中。

2) 温度场的分析方法

混凝土结构的温度场是确定温度荷载的关键,根据固体传热学理论的 Fourier 定律,可得均质无内热源三维非稳态热传导方程:

$$a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1-11)$$

式中: a ——导热系数。

由初始条件和边界条件,导热问题的偏微分方程是可求解的,其途径有三种:解析法、数值解法、半理论半经验公式法。

(1) 解析法

热传导偏微分方程在数学上称为抛物型方程,理论上讲,在已知结构物初始温度(初始条件)以及与周围介质热交换(边界条件)的情况下,就可以通过解析法得到热传导微分方程的解答,确定出结构温度场的精确分布。但是,在工程实际中能用解析法求出的理论解,只是少数几何形状规则、边界条件简单的情况。对于大多数问题,由于求解区域几何形状的不规则性,要得到精确解是不可能的。通常情况下,需引入简化假设,将微分方程和几何边界简化为在数学上能够处理的情形,从而得到问题在简化状态下的解答。但这种处理也极其有限,因为引入



过多假设,可能导致简化模型与实际情况出入较大,甚至得出错误的解答。因此,能用解析法解决的问题十分有限,一般只适用少数简单的情况,目前很少采用。

(2)数值解法

鉴于直接求解带定解条件的热传导微分方程在数学上遇到的困难,随着计算机的飞速发展和广泛应用,数值解法已成为求解该类工程问题的重要手段。温度场分析中常用的数值解法分为差分法和有限元法。

差分法是一种古典的近似计算方法。它从微分方程出发,经区域离散化处理后,在结点近似地用差分、差商代替微分、微商,这样微分方程和边界条件的求解就归结为求解一个线性方程组。当采用较多结点时,有限差分法的计算精度可以得到改进。但对于几何形状较复杂问题,比如计算箱梁的转角处的温度分布,有限差分法精度较低。

有限元法不局限于网格的划分,具有很强的灵活性和适应性,对于一些大型复杂结构的温度场问题,有限元法是普遍采用的分析方法。

(3)半理论半经验公式法

半理论半经验公式法是从现场实测数据出发,用数理统计来考虑影响温度分布的主要因素,根据结构物实际温度分布的特点,给出简化的温度场分布计算公式。用这种方法建立的温度场计算公式是半理论半经验公式。该方法的优点在于可以给出最不利的温度分布函数,在此基础上计算的温度应力偏于安全。半理论半经验公式是各国规范普遍采用的方法。

3)温度效应的计算

温度效应的计算一般采用以下假定:沿梁长方向的温度分布是均匀的,并略去断面局部变化引起的温差分布的微小差别;混凝土是均质、各向同性的;变形符合平截面假定;按单向温度场计算温差效应(应力或位移),然后叠加组合多向温差作用下的温差效应。

澳大利亚 Churchward 等根据温度场非线性分布的特点,将温度场分解为均匀分布的基准温度和非线性分布的温度,并由基准温度和温差推导出计算平均温度的公式,还得到最大温差随太阳辐射变化的规律及基准温度极值与环境温度的关系。德国 Kehlbeck 在博士论文中指出:如果结构构件内一维不稳定温度分布可用数学形式描述,则不稳定温度分布产生的应力就可用弹性薄板理论来计算。他在论文中详细论述了太阳辐射、大气逆辐射等因素对桥梁结构的影响,分析了辐射强度、外界气温对确定桥梁温度场计算各参数的影响,求得了以矩阵形式表示的温度函数,并按一维不稳定导热理论计算出厚板的自约束应力和桥梁的体系约束应力。Rahman 等研究了连续斜板桥在非线性温度荷载下的温度效应,编制了相应的有限元程序计算斜板桥在不同斜角情况下的温度应力和位移。Dilger 等讨论了截面几何形状、材料参数、环境参数(日温差、风速、空气浑浊度、季节变化等)对箱梁截面温差的影响,分析了影响最不利温度荷载的情况,提出了相应的处理办法,编制了一维有限差分法的计算程序。Mamdouh 等研究了温度非线性分布在简支梁和连续梁中引起的纵向自约束应力和外约束应力,通过比较不同的截面形式、几何特征、地理位置、材料属性及有无覆盖物等对结构纵向自约束应力、温度弯矩及外约束应力的影响,定性指出了最不利温度荷载状态,并编制了计算温度场及相应的纵向应力的有限元计算程序。Mirambell 等采用二维有限差分法研究了混凝土箱梁桥截面几何性质(包括上翼板厚度与腹板厚度之比,翼缘悬臂长度与腹板高度之比,上部结构高度沿桥纵向的变化,加腋的顶板和底板及单室和多室的区別)对其温度效应的影响。Roeder