



YIJIAN DAKUAJING PC LIANGQIAO

GUOLIANG XIANAO JI KAILIE CHUZHI JISHU

已建大跨径PC梁桥

过量下挠及开裂处治技术

石雪飞 杨琪 阮欣 著



人民交通出版社
China Communications Press

已建大跨径 PC 梁桥过量 下挠及开裂处治技术

石雪飞 杨 琪 阮 欣 著

国家高技术研究发展计划(863 计划)

广东交通科技计划

联合资助



NLIC 2970693374

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为国家高科技研究发展计划(863 计划)和广东交通科技计划联合资助的科研项目,共分五章,内容包括绪论、大跨径梁桥长期下挠过量的成因分析、大跨径梁桥下挠及开裂后的性能评估方法、大跨径梁桥下挠及开裂后的控制和加固方法、K3+048 大桥状态评估及加固设计。

本书可供桥梁工程试验检测人员以及桥梁专业在校生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

已建大跨径 PC 梁桥过量下挠及开裂处治技术/石雪飞, 杨琪, 阮欣著. —北京: 人民交通出版社, 2010.10
ISBN 978-7-114-08599-4

I. ①已… II. ①石… ②杨… ③阮… III. ①长跨桥: 梁桥-加固 IV. ①U448.435.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 198883 号

书 名: 已建大跨径 PC 梁桥过量下挠及开裂处治技术
著 作 者: 石雪飞 杨 琪 阮 欣
责任编辑: 曲 乐
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.ccpres.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: 北京鑫正大印刷有限公司
开 本: 787×960 1/16
印 张: 9.5
字 数: 152 千
版 次: 2010 年 11 月 第 1 版
印 次: 2010 年 11 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-08599-4
定 价: 25.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

悬臂施工法是推动梁桥跨径提升的重大技术创新。1950年,联邦德国首次将悬臂浇筑施工法用于建造预应力混凝土桥梁,建成了跨径为62m的兰河(Lain)桥;至1964年,又建成了主跨为208m的本道尔夫(Bendorf)桥,再一次成功地显示出悬臂施工方法的优越性。从此,悬臂施工法迅速推广和应用,大跨径预应力混凝土梁桥成为许多国家广泛采用的桥型之一。我国在20世纪60年代首次采用先进的悬臂施工方法,建成了第一座T型刚构桥—广西柳州柳江大桥。此后,我国采用悬臂施工法建造了众多的T型刚构桥、连续梁桥以及连续刚构桥等三种形式的大跨径预应力混凝土梁式桥。大跨径预应力混凝土梁桥以其建设造价低、适应性好等特点,在60~200m范围内具有极强的竞争性,也因此成为这个跨径范围的主力桥型。

在大跨径预应力混凝土连续梁、连续刚构桥迅速发展的同时,其在运营过程中病害也不断出现,尤其是跨中长期过量下挠、开裂等病害在国内外类似桥梁中普遍出现。英国、美国等欧美国家也出现了同类桥梁运营过程中主跨大量下挠及开裂的工程实例;帕劳共和国的科罗尔·巴岛桥(Koror-Babeldaob Bridge)甚至出现了下挠后加固、加固后倒塌的情况。在国内,这一问题也在同类桥梁中广泛出现,甚至可以说比较普遍,从而引起了政府部门、业主、设计和研究单位等多方的关注。对此类问题从不同的角度,对病害原因进行了探索,取得了一些研究成果,但一直未形成在业内广泛认可的研究成果。开展系统的研究工作,揭示大跨径预应力混凝土梁桥中跨过量下挠的机理,同时给出科学合理的控制对策是一项非常迫切的研究任务。

本书的几位作者在国家高技术研究发展计划(863计划)和广东交通科技计划的资助下,结合广东省佛开高速公路两座桥梁实例,从大跨径梁桥主梁长期过量下挠和开裂成因、状态识别以及加固方案等几个方面,经历多年的潜心研究,取得了大量有价值的研究成果。研究成果在两座实桥中进行了全面的应用,收到了良好的效果。

本书成果的特色之一是对下挠和开裂机理的解释基于现有的设计理论,对目前认识到的各种可能影响因素进行了全面的分析,从而使得研究成果可

以直接用于指导设计和施工。同时,研究中将解决具体桥梁的工程问题,与现成通用的评估技术结合起来,研究开发了一批可以在类似桥梁中应用和推广的桥梁状态识别和评估技术。研究形成的加固对策对此类桥梁的加固问题也具有重要的指导意义。因此,本研究成果具有显著的创新性和应用推广价值。

大跨径预应力混凝土梁桥量大面广,此类桥梁典型病害问题的解决将产生巨大的社会和经济效益。感谢本书作者对此作出的努力,也希望桥梁工程界同仁共同关注这一问题,早日对此问题形成更加圆满的答案。

黄建跃

广东省交通集团有限公司总工程师

2010. 7

前 言

近年来,大跨径预应力混凝土梁桥在运营过程中出现的中跨过量下挠,及伴随发生的开裂问题引起了桥梁工程界的广泛关注。有很多研究者从不同的方面,对这一问题的原因进行了分析和研究;但一直以来,得到业内广泛认可或是普遍应用的研究成果并不多见。对该问题研究是极具难度和挑战性的研究工作。

针对这一问题,自2005年起我们的研究团队就开始了对该问题的前期研究,并先后获得了国家高技术研究发展计划(863计划)和广东交通科技计划的专项研究经费支持,结合广东省佛开高速公路K3+048大桥等桥梁,对大跨径预应力混凝土连续梁和连续刚构桥过量下挠和开裂问题开展了系统的研究工作。

基于前期调研,我们认为大跨径预应力混凝土梁桥中跨过量下挠及开裂的问题仍可以基于目前的设计理论框架解释,在探究问题机理的同时,还必须形成解决下挠和开裂问题的对策,并开发相关技术。在这样的总体研究思路和各方的大力支持下,经过三年的努力,终于形成了一套包括此类桥梁病害机理、病害桥梁状态识别方法和加固对策的研究成果,并在两座大桥上成功地系统应用。

本书是对本研究成果的总结。全书包括5个章节,各章节的主要内容

为:
第一章对大跨径连续梁(刚构)桥的发展历程、病害现状、相关下挠控制和加固的工程实践等进行了综述。

第二章对大跨径梁桥主梁长期过量下挠成因进行了分析,对自重变化、预应力、混凝土徐变收缩特性、梁体开裂、温度荷载、合龙误差等因素对长期变形的影响进行了阐述;并介绍了预应力混凝土简支梁、连续梁的长期变形性能试验;在此基础上给出了大跨径梁桥长期下挠与开裂机理。

第三章中重点介绍了在役病害桥梁的状态识别技术,包括基于应力释放的实桥应力状态识别、基于位移测试的在役桥梁刚度识别方法、在役桥梁运营车辆活载调查和评估方法,以及开裂桥梁裂缝模拟有损结构的性能分析方

法等。这些方法都是将现场试验或调查数据与理论模型或计算方法结合起来,从而形成对有损桥梁运营实际状态的评估,对于后续的下挠控制和加固策略制订具有重要意义。

第四章提出了下挠及开裂后大跨径预应力混凝土桥梁的加固策略和原则;对箱内体外预应力加固、箱外体外预应力加固、斜拉索加固、跨中主梁更换钢梁和体外预应力相结合加固、轻质混凝土减载结合体外预应力加固等对策进行了深入对比。

第五章以 K3+048 大桥为例,说明针对在役过量下挠和开裂的大跨径预应力混凝土连续梁(刚构)进行下挠原因分析、运营状态识别以及最终加固策略和方案制订的过程。

在本书研究成果的研究过程中,从策划到实施都得到了广东省交通集团有限公司黄建跃总工程师、广东省高速公路有限公司李卫民总工程师的大力支持和指导;广东省佛开高速公路有限公司作为课题研究主要承担单位,从立项、实施、成果鉴定、成果推广、成果报奖,提供了鼎力支持。

感谢广东省高速公路发展股份有限公司周余明、李希元、王甲辰、王萍;广东省高速公路有限公司罗应生、李晋峰、林益恭、冯育才、周岳华、钟丽萍等领导的关心和指导。

广东省佛开高速公路有限公司辛镜坤、马扬前、王茜茜、李晓翔、魏汉峰等参与了大量的配合工作,同济大学桥梁工程系牛艳伟、冯电视、王晓明、应天益、单婷婷等研究生参加了大量的数据分析工作。

特别感谢中国铁道科学研究院铁道建筑研究所高岩研究员、梁志广副研究员提供了广东省佛开高速公路 K3+048 大桥的现场检测数据。

同时还要感谢广东省交通集团有限公司有关领导在课题研究过程中给与的关注,提出了宝贵的参考意见,在此表示衷心的感谢。

希望本书可以对我国大跨径预应力混凝土连续梁桥长期过量下挠和开裂病害控制有所裨益。限于作者水平,书中疏漏甚至不当之处在所难免,谨请读者不吝指正!

石雪飞 杨 琪 阮 欣

2010.7 于同济园

广东省佛开高速公路有限公司

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大跨径 PC 梁桥的发展	1
1.2 长期过量下挠及开裂病害的成因分析	4
1.3 长期过量下挠及开裂的控制技术现状	6
1.4 有待研究的问题.....	10
第 2 章 大跨径梁桥长期下挠过量成因分析	12
2.1 大跨径预应力梁桥长期变形的影响因素.....	12
2.2 自重变化对长期变形的影响分析.....	15
2.3 预应力对长期挠度的影响.....	19
2.4 混凝土徐变收缩特性对长期挠度的影响.....	22
2.5 梁体开裂对长期下挠的影响.....	26
2.6 温度荷载对长期下挠的影响.....	34
2.7 合龙误差的影响.....	36
2.8 混凝土梁长期性能试验研究.....	37
2.9 大跨径梁桥长期过量下挠与开裂机理.....	47
第 3 章 大跨径梁桥下挠及开裂后的性能评估方法	49
3.1 基于应力释放的实桥应力状态识别.....	49
3.2 基于位移测试的在役桥梁刚度识别方法.....	51
3.3 在役桥梁运营车辆活载调查和评估方法.....	58
3.4 桥梁结构裂缝模拟及有损结构性能分析方法.....	66
第 4 章 大跨径梁桥下挠及开裂后的控制和加固方法	74
4.1 下挠及开裂的预应力混凝土桥梁加固策略和原则.....	74
4.2 箱内体外预应力加固方案.....	77
4.3 箱外体外预应力加固方案.....	84
4.4 增加索塔和斜拉索加固方案.....	89
4.5 跨中主梁更换钢梁加固方案.....	91
4.6 轻质混凝土减载结合体外预应力加固.....	94

第 5 章 K3+048 大桥状态评估及加固设计	96
5.1 K3+048 大桥概况	96
5.2 K3+048 大桥运营状态识别	97
5.3 K3+048 大桥长期挠度成因分析	105
5.4 K3+048 大桥基于设计规范的完好结构验算	108
5.5 K3+048 大桥基于应力释放法的应力状态测试	110
5.6 K3+048 大桥实桥刚度识别及其影响分析	112
5.7 K3+048 大桥承载能力的概率安全评估	120
5.8 K3+048 大桥加固对策和加固设计	127
5.9 K3+048 大桥加固后荷载试验评估	133
参考文献.....	137

第1章 绪论

1.1 大跨径 PC 梁桥的发展

1950年,联邦德国首次将悬臂浇筑施工法用于建造 PC 桥梁,即在巴尔杜茵斯坦(Balduinstein)修建的兰河(Lain)桥,该桥跨度为 62m。1953 年和 1954 年又用此法分别建成主跨 114.2m 的胡尔姆斯(Worms)和科布伦茨(Koblenz)两座大跨径 T 型刚构桥。1962~1964 年法国工程师根据悬臂浇筑法的原理,利用悬臂拼装法建成了跨径布置为 34.8m+61.4m+34.8m 的塞纳(Seine)河桥。1964 年联邦德国建成了主跨为 208m 的本道尔夫(Bendorf)桥,再一次成功地显示出悬臂施工方法的优越性,并且在结构体系上又有了创新,薄型的主墩与上部连续梁固结,形成带铰的连续—刚构体系。悬臂施工法提高了梁桥的经济跨径,从此,悬臂施工法迅速推广和应用,大跨径 PC 梁桥成为许多国家广泛采用的桥型之一。我国 60 年代首次采用先进的悬臂施工方法,建成了第一座 T 型刚构桥,为我国修建大跨径 PC 桥梁提供了成功的经验,开拓了发展的前景。从此以后,我国采用悬臂施工法建造了众多的大跨径 PC 梁式桥。

从目前常用的结构形式看,大跨径 PC 梁式桥主要包括 T 型刚构桥、连续梁桥以及连续刚构桥三种类型。

T 型刚构桥可分为有跨中带剪力铰和跨中带挂梁两种形式。剪力铰是一种只能传递竖向剪力,但不能传递水平推力和弯矩的连接构造。带铰的、对称的 T 型刚构在恒载作用下是静定结构,但是在活载作用下是超静定结构。国外建造的 T 型刚构跨中较多采用带铰的形式。然而,由于跨中带铰,而且对混凝土的收缩徐变变形估计不足,又因温度影响等因素使结构在铰处形成明显折线变形状态,对行车不利。跨中带挂梁的 T 型刚构桥是静定结构,与带铰的 T 型刚构桥相比,增加了牛腿构造,桥面上伸缩缝多,不利于高速行驶。国内的 T 型刚构桥主要采用跨中带挂梁的形式。这种桥型在我国始建于 20 世纪 60 年代,基本采用 T 型刚构的形式。1980 年建成的重庆长江大桥,主跨达 174m,是目前我国最大跨径的 T 型刚构桥;而世界上最大跨径的 PC T 型刚构桥为阿根廷的 Paraguay River 桥,主跨 270m。T 型刚构桥跨中需设剪力铰或者挂孔,接缝较多,运

营中发现剪力铰或者挂孔下挠过大,形成折线,行车不顺适,冲击作用较大,容易造成牛腿处的破坏。由于这些缺点,目前国内已经很少采用 T 型刚构,而较多采用连续梁和连续刚构。

PC 连续梁桥在我国始建于 20 世纪 60 年代,当时仅限于中小跨径。1985 年建成的主跨 111m 的湖北沙洋汉江大桥,是我国第一座主跨突破 100m 的连续梁桥;1996 年建成的广湛高速公路九江大桥,主跨达 160m;2005 年建成的东海大桥辅航道连续梁桥跨径布置为 90m+160m+160m+90m;2001 年建成的南京长江二桥北汊桥,主跨达 165m,是我国目前最大跨径的 PC 连续梁桥。目前世界上最大跨径的 PC 连续梁桥为 1994 年建成的挪威的新瓦洛德(New Varodd)桥,跨径达 260m。比较著名的 PC 连续梁桥还有 1974 年建成的主跨 192m 的瑞士摩塞尔(Mosel)桥和 1982 年建成的跨径布置为 106m+190m+106m 的英国奥维尔(Orwell)桥。PC 连续梁桥具有变形小、结构刚度大、行车平顺舒适、伸缩缝少、养护容易、抗震能力强等优点。但是,大跨径 PC 连续梁桥要用大吨位支座及合龙后的体系转换,给施工与养护带来许多不便,使连续梁向更大跨径发展受到了限制。

PC 连续刚构桥在我国首次采用为 1988 年建成的广东番禺洛溪大桥,该桥跨径布置为 65m+125m+180m+110m。在此以前,国内预应力桥梁仅限于设计和建造 T 构和连续梁,它的成功使得连续刚构这种既经济又合理的桥型在我国全面推广应用;1997 年建成的广东虎门大桥辅航道桥,主跨达 270m,为当时世界上最大跨度的 PC 连续刚构桥。2004 年开工建设的重庆石板坡长江大桥复线桥,由于通航要求以及和旧桥相协调,采用主跨达 330m 的 7 跨连续箱梁桥,超过了主跨 301m 的挪威 Stolma 海峡桥,成为目前世界上在建的最大跨度的连续刚构桥。该桥主跨中部 108m 采用钢结构,减轻了上部结构重量,使得该桥在技术上和经济上变得可行。国外,1998 年挪威建成了 Stolma 海峡桥,主跨达 301m,超过虎门大桥辅航道桥成为目前已经建成的最大跨径 PC 连续刚构桥,其跨径布置为 94m+301m+72m。另一座大跨径的 PC 连续刚构桥梁是 1998 年挪威建成的 Raftsundet 桥,跨径布置为 86m+202m+298m+125m。这两座桥的中跨都采用了轻质混凝土。

T 型刚构墩、梁固结,不设支座,但是由于结构不是一个整体,不连续,纵向线形有折角,而且在长期荷载的持续作用下,下挠厉害,这些大大影响了结构的安全性、耐久性以及行车的舒适性、高速要求;连续梁桥克服了 T 型刚构结构不连续的缺点,但是对于大跨度的连续梁桥需要大吨位的支座,因此连续梁桥的跨度受到支座吨位的限制,另外由于支座容易破坏,对于大跨度的连续梁桥,更换

支座比较困难;连续刚构桥同时具有连续梁和 T 型刚构的优点,墩、梁固结,无需大吨位支座,结构连续,满足车辆高速行驶的要求。连续刚构桥由于是墩、梁固结的超静定结构体系,由温度、支座不均匀沉降以及收缩徐变引起的次内力较大,因此它适于建造在地质条件比较好的地区。

20 世纪 90 年代以来连续刚构桥在我国得到了迅速发展,至今方兴未艾。据不完全统计,目前我国已建和在建跨径在 200m 以上连续刚构桥近 20 余座,跨径在 100~200m 之间的连续梁桥和连续刚构桥 100 余座。表 1-1 列出了目前世界上跨径在 240m 以上的 PC 连续刚构桥,从表中可以看出,在目前世界 240m 以上的 PC 连续刚构桥中,我国占了很大比例,而且这些连续刚构桥大多是在我国西南山区地址条件较好的地区。

240m 以上连续刚构桥一览表

表 1-1

桥 名	国家	主桥跨径组合(m)	建成年份	截面形式	备 注
重庆石板坡长江大桥	中国	86.5+4×138+330+132.5	2008	单室箱	部分主跨采用钢结构
斯托尔马(Stolma)桥	挪威	94+301+72	1998	单室箱	部分主跨采用轻质混凝土
拉夫特通道(Raftundet)桥	挪威	86+202+298+125	1998	单室箱	部分主跨采用轻质混凝土
虎门大桥辅航道桥	中国	150+270+150	1997	双单室箱	
苏通大桥辅航道桥	中国	140+268+140	2008	双单室箱	跨中设体外索
云南元江大桥	中国	58+182+265+194+70	2003	单室箱	
门道(Gateway)桥	澳大利亚	145+260+145	1985	单室箱	
宁德下白石大桥	中国	145+2×260+145	2003	双单室箱	
泸州长江二桥	中国	150+252+55	2002	单室箱	
斯考顿(Schottwien)桥	奥地利	250	1989	单室箱	
道特(Doutor)桥	葡萄牙	250	1991	单室箱	双线铁路
重庆黄花园嘉陵江大桥	中国	137+3×250+137	1999	双单室箱	
重庆马鞍山嘉陵江大桥	中国	146+3×250+146	2001	双单室箱	
宜水路金沙江大桥	中国	140+249+140	2005	单室箱	
黄石长江大桥	中国	162.5+3×245+162.5	1995	单室箱	
江津长江大桥	中国	140+240+140	1997	单室箱	
重庆高家花园嘉陵江大桥	中国	140+240+140	1997	双单室箱	
重庆龙溪河大桥	中国	140+240+140	1999	双单室箱	
贵州六广河大桥	中国	145+240+145	2002	双单室箱	桥墩高 73m 和 90m

1.2 长期过量下挠及开裂病害的成因分析

1.2.1 长期过量下挠及开裂病害现象

在大跨径 PC 连续梁、连续刚构桥迅速发展的同时,其在运营过程中病害也不断出现,尤其是跨中长期过量下挠、开裂等病害在国内外类似桥梁中普遍出现。

英国的 Kingston 桥是一座跨度为 62.5m+143.3m+62.5mPC 箱梁桥,主跨中央带铰。1970 年建成后跨中挠度缓慢加大,至 1998 年已经超过 30cm。帕劳共和国的科罗尔·巴岛桥(Koror-Babeldaob Bridge)是一座跨中带铰的 3 跨 PC 连续刚构桥,其跨径组合为 72m+241m+72m,建成时是当时世界上同类桥梁中跨径最大者。1978 年建成通车,通车后不久就产生了较大的挠度,到 1990 年,其挠度达到了 1.2m。于 1990 年采用体外索施加预应力,以减小主跨中央挠度,加固结束后不到 3 个月就发生了倒塌事故,如图 1-1 所示。



图 1-1 帕劳共和国 Koror-Babeldaob 桥在加固后倒塌

大跨径 PC 梁桥跨中持续下挠的现象更加普遍。从实测结果可以发现,跨径在 100~160m 的 PC 梁桥,跨中年平均下挠 0.5~1cm;跨径在 160~220m 范围的,跨中年平均下挠 1~2cm;跨径在 220~270m 的,跨中年平均下挠 2~3cm。其中广东虎门大桥辅航道桥最为典型。本桥于 1997 年底建成通车,连续 7 年的观测表明,主跨跨中挠度逐年增长,而且尚未停止。2003 年 11 月测量数据表明,与成桥时相比,左线桥跨中累计下挠达 22.2cm,右线桥跨中累计下挠达 20.7cm,并发现了裂缝,下挠速率如图 1-2 所示。国内外几座主跨跨中下挠过大的典型桥梁实例见表 1-2 所列。

国内外典型连续刚构桥长期变形

表 1-2

桥 名	属国	竣工年	使用时间(年)	主跨(m)	下挠量(mm)
斯托尔马桥(Stolma)	挪威	1998	3	301	92
斯托维特 Stovset	挪威	1993	8	220	200
鹦鹉渡口桥(Parrotts)	美国	1973	12	195	635
广东省南海金沙大桥	中国	1994	6	120	220
三门峡黄河公路大桥	中国	1992	10	140	220
广东虎门大桥辅航道桥	中国	1997	7	270	223

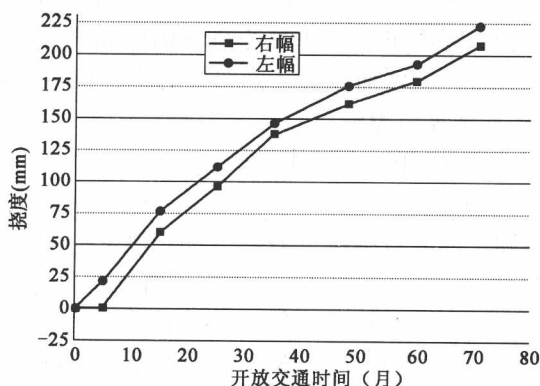


图 1-2 广东虎门大桥辅航道桥 1997~2003 年跨中下挠历程

1.2.2 病害成因及机理分析研究综述

长期下挠是大跨径连续刚构桥病害研究的核心问题。针对大跨度箱梁的长期下挠产生原因,国内外学者开展了很多研究工作,但对其发生的原因、下挠机理和发展历程仍未形成共识。以下几方面都曾有过专家提出认为是产生长期下挠的主要原因。

1. 混凝土收缩徐变对长期挠度的影响研究

混凝土的收缩徐变有较大的不确定性,可能是影响大跨径 PC 箱梁桥长期挠度预测准确性的最大障碍。目前对徐变效应的研究主要还是针对混凝土自身徐变特性,即徐变系数进行,且研究对象仍然停留在单一构件上,对结构层面的徐变特性研究由于困难太大,基本没有开展。有研究表明,混凝土的收缩远较目前理论的估计值大且持续时间相当长,特别是对大体积的高强混凝土。在施工方式、交通和温度变化造成的反复荷载对混凝土弹性模量长期变化及对收缩徐变性能的影响也可能影响对徐变预测的准确性;根据 Bazant 的试验资料和 Piotr Gwoz dziewicz 的研究,周期反复荷载对混凝土的徐变率有影响,随周期性应力振幅的增大,徐变明显增加。可以推断当根据叠加原理计算在可变应力作用下的徐变时,会低估周期性加载下的徐变。

2. 预应力对长期挠度的影响分析

预应力体系作用效应对长期挠度的影响方面,主要存在有效预应力的准确估计问题和预应力的合理布置问题。实际上,有效预应力具有时变特性,有实测结果表明 8 年内预应力的长期损失较成桥时的有效预应力可达 16%,除了混凝土收缩徐变造成预应力损失外,桥梁承受的长期动载等其他方面对有效预应力

的影响,目前也仍然不清楚。还有学者认为,预应力的布置实际上对梁桥的长期挠度也是有较大影响的,国内布束设计时往往考虑控制的是施工和正常使用状态下的结构应力状态是否安全,而没有考虑布束对结构长期挠度影响的问题。

3. 箱梁开裂对长期挠度的影响研究

梁体开裂导致主梁刚度降低也可能是持续下挠的原因之一。开裂引发预应力与混凝土收缩徐变的强烈耦合效应,混凝土的开裂改变断面应力状态和开裂断面形心,徐变规律和预应力对结构的效应也随之变化,造成结构内力重分布,反过来又影响结构开裂;活载、温度的反复作用也将使桥梁的裂缝宽度和长度不断扩展;严重的开裂可以导致结构受力体系的变化,整体刚度受到削弱,甚至影响承载能力。为了解决这一问题,很多学者对腹板厚度、腹板束起弯和三向预应力的应用等影响抗剪承载力的因素进行讨论,并从设计方法、施工工艺及箱梁的构造设计等方面提出了改进建议,得出了不少能够有效控制梁体主拉应力、提高腹板抗剪能力的设计施工经验。但是,主梁下挠与梁体裂缝的机理仍未完全弄清楚,对其的认识仍有待提高。

4. 桥梁设计计算方面的不足

国内现有主流的平面计算手段在处理箱形截面混凝土箱梁桥的空间效应及长期变形特性方面存在理论上的不足。同时,在基本设计理念方面,对于跨径大于 100m 的此类桥梁,由于自重弯矩与跨度 3 次方成正比,自重弯矩增加较快,很难做到用预应力弯矩来平衡施工中大悬臂状态下的自重弯矩,从而使得最大悬臂状态悬臂端部较大的初始转角和下挠,为后期的徐变下挠埋下隐患。

5. 桥梁混凝土施工质量的影响

由于多采用悬臂浇筑施工方法,施工中混凝土性能的稳定性、张拉龄期、预应力束的损失、混凝土超方、铺装层超厚等问题都可能影响桥梁的长期性能。

上述所作的研究分析虽然都取得了一定的成果,但均未能彻底解释大跨径混凝土梁桥长期下挠问题。

1.3 长期过量下挠及开裂的控制技术现状

通过对长期下挠原因的研究,国内外的专家学者针对长期下挠这一大跨度连续刚构桥的主要病害,从新桥的设计、施工以及老桥的维修加固等各个方面作了对应的改进,在实践中取得了一定的成果。

1.3.1 新桥设计对策

考虑到此类病害成因复杂,很多设计者在新桥设计中,通过优化设计、结构体系调整等方法,尽量避免运营过程中的过量下挠问题。

结构体系方面,在结构上,轻质混凝土新材料、组合体系的应用相继出现。目前仍是已建大跨径混凝土梁桥中主跨跨径世界第一和第二的斯托尔马桥(Stolma)和拉夫特通道桥(RaftSundet),均在主跨部分范围内采用了一种从美国进口的特殊石料制成的轻质混凝土材料。我国的重庆石板坡大桥采用了钢—PC混合形式,不仅大大减轻了结构自重,同时跨中部分采用钢结构避免了底板出现裂缝的影响,如图 1-3 所示。

配束原则方面,有学者提出了新的挠度控制思想:当构造条件允许时,用预应力弯矩平衡在悬臂施工阶段一期恒载弯矩;设置体外束平衡合龙后二期恒载及活载中的平均荷载;用预先张拉的预应力束和事先压重、逐年卸载的方式置换长期变形。这种实现以所谓“零弯矩”为原则的设计方法,与施工过程相结合,配束目的明确,分阶段实现零

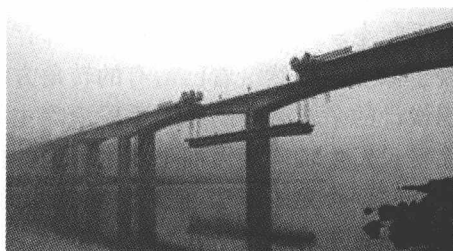


图 1-3 重庆石板坡长江大桥采用混合体系解决跨中下挠问题

弯矩。新观点以挠度为目标控制,其特点是用预应力的设计手段来消除初始挠度和初始转角。这样当混凝土徐变发生时,梁体仅有轴向位移而不产生挠度,因此极大地减少合龙后的持续下挠绝对值。这种设计思路已在国内几座实桥上得到应用,均取得较好的效果。

在跨中梁高提高方面,有学者提出,在弯矩值一定的情况下,控制梁体下挠的关键因素是主梁抗弯刚度。主梁抗弯刚度可表达为混凝土弹性模量和截面惯性矩的乘积,其中截面惯性矩与截面高度成正比。如果在保证跨中有一定的梁高的前提下增大惯性矩,那么后期挠度值就会急剧减小,这比其他方法见效得多,表 1-3 中试算了主跨 270m 连续刚构在梁高变化后的挠度情况。有学者建议,如果将跨中 0.4L 部分梁高采用直线形,对减小后期挠度值有显著的效果。但这个想法因为造成主梁线形不太符合常规审美要求而不被大众接受。

跨中不同梁高后期挠度 f 比较

表 1-3

梁高 D (m)	惯性矩 I (m^4)	抗弯刚度 EI $10^6 \times (\text{t} \cdot \text{m}^2)$	270m 连续刚构挠度 f	
			cm	比较
4.5	37	131	12.5	100%
5.0	53	188	12.1	97%
6.0	96	337	10.5	84%
7.0	157	550	9.2	74%
8.0	213	746	8.3	66%

1.3.2 施工控制及施工质量管理

延续设计中平衡自重弯矩,减小初始转角的基本思路,在施工控制中,可以通过改进合龙方法来达到同样的效果,常见的控制方法包括合龙压重、合龙张拉临时束、跨中对顶、预压重置换等。

1. 临时斜拉索辅助合龙

混凝土徐变的方向与结构的初始状态有关。如果悬臂施工结束主梁合龙后自重状态就存在不平衡弯矩 M_g (即存在初始转角),这样在若干年后所发生的混凝土徐变也必然沿着已留有的转角方向发生应变(即产生徐变挠度)。如果有意识设计的采取必要的施工手段消除主梁初始转角,那么若干年所产生的混凝土徐变仅发生轴向缩短而不产生下挠。据此有研究者提出了在施工中设置临时斜拉索辅助合龙的方法,但具体实施的尚未见报道。

2. 跨中对顶

对于混凝土徐变的轴向缩短问题,多年实践表明:在合龙前跨中设置千斤顶,将连续刚构合龙段两端适当地顶开,产生一个与将来混凝土徐变收缩相反的水平位移,就能大大地消除箱梁混凝土徐变的轴向缩短,如图 1-4 所示。

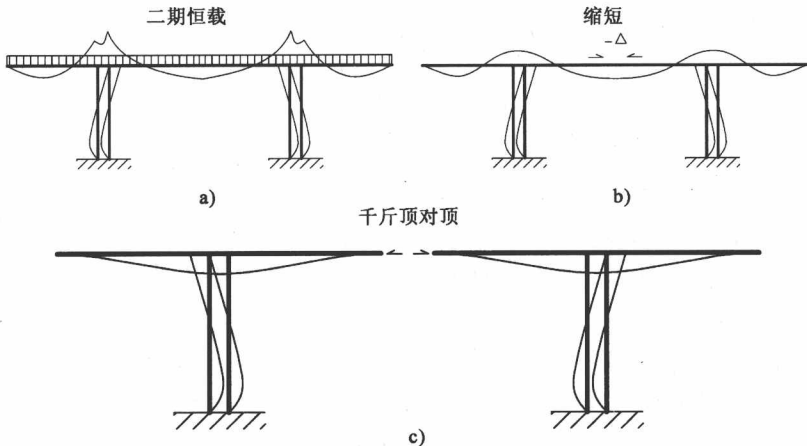


图 1-4 跨中对顶合龙的力学原理

a)二期恒载梁;b)降温、混凝土收缩、徐变;c)跨中对顶

3. 预压重置换

理论上,只要严格按照前述的恒载用预应力设计来平衡,就能够使运营后混凝土的徐变引起的次内力大幅度地减少,成桥后长期挠度将很小。但是由于设计误差、施工水平及混凝土龄期等诸多不确定的因素,要完全控制跨中不产生