



CRACK PREVENTION TECHNIQUE

OF BOX GIRDER DURING CONSTRUCTION, EVALUATION THEORY AFTER CRACKING
AND ENGINEERING APPLICATION

箱梁施工期防裂技术 和裂后评估理论及工程应用

[第二版]

张 峰 林新元 李树忱 成剑波 / 著

叶见曙 / 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



CRACK PREVENTION TECHNIQUE

OF BOX GIRDER DURING CONSTRUCTION, EVALUATION THEORY AFTER CRACKING
AND ENGINEERING APPLICATION

箱梁施工期防裂技术 和裂后评估理论及工程应用

[第二版]

张 峰 林新元 李树忱 成剑波 / 著

叶见曙 / 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书理论联系实际工程,详细介绍了预应力混凝土箱梁施工期的防裂技术以及裂缝发生后的评估理论。主要内容包括:绪论,箱梁零号块温度裂缝控制,箱梁节段施工期防裂,箱梁裂后承载性能评估以及箱梁裂后承载性能评估应用等。

本书可供从事桥梁施工、设计、检测等的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

箱梁施工期防裂技术和裂后评估理论及工程应用 /
张峰等著. — 2 版. — 北京:人民交通出版社股份有限
公司, 2017. 6

ISBN 978-7-114-13812-6

I. ①箱… II. ①张… III. ①箱梁桥—桥梁施工—防
裂—研究 IV. ①U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 079485 号

书 名: 箱梁施工期防裂技术和裂后评估理论及工程应用(第二版)

著 作 者: 张 峰 林新元 李树忱 成剑波

责任编辑: 卢俊丽 王景景

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

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: 22.75

字 数: 560 千

版 次: 2012 年 11 月 第 1 版 2017 年 5 月 第 2 版

印 次: 2017 年 5 月 第 2 版 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13812-6

定 价: 90.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

第二版前言

大跨径预应力混凝土箱梁桥无论在经济合理性、工艺成熟性上,都是具有强劲可比性的桥型。但随着这些大跨径桥梁逐步投入运营,经历荷载及时间的考验,设计和施工中的问题也在逐步地暴露,尤其是各种不同性质裂缝的出现较为普遍。结构一旦出现裂缝,就势必引起人们对工程质量的怀疑,这又以桥梁在施工及使用过程中出现的受力裂缝为甚。因此,研究带裂缝工作的箱梁服役状态评估的方法和技术手段已经成为当务之急。

该书第一版以箱梁温度场和应力场实时动态监测、精轧螺纹钢筋竖向预应力室内模型试验、大比例尺箱梁室内极限承载力模型试验、箱梁典型病害调查等为研究手段,重点开展了四个方面的研究:箱梁零号块施工期水化热研究;箱梁节段施工期防裂技术;箱梁开裂后的承载性能评估方法;箱梁服役状态评估理论。

该书第二版汇总了以下各方面进一步深入研究的成果。包括:改进了竖向预应力精轧螺纹钢筋的动力计算模型;揭示了预应力混凝土箱梁合龙段底板崩裂机理,并提出了工程设计方法;开展了预应力混凝土连续刚构桥徐变的精细数值有限元模型,研究了预应力混凝土箱梁的空间徐变效应;研发了拉脱法的硬件设备,揭示了拉脱法的测试原理,提出了拉脱法的判别标准,分析了锚下有效预应力的影响因素;增加了一座实际桥梁的破坏性试验和数值模拟分析的结果,开展了基于最优化理论的箱梁裂后节段刚度损伤评估方法研究。

该书的研究成果有效降低了箱梁施工期的开裂风险,提高了新建桥梁的质量。建立的箱梁合理拆模计算方法能有效指导箱梁施工,降低了水化热应力过大导致箱梁开裂的风险;提出的竖向预应力无损检测方法彻底改变了我国箱梁施工期竖向预应力无法有效检测的难题,提高了箱梁腹板的应力安全储备;研究的拉脱法测试技术,有效改善了预应力混凝土箱梁纵向及横向的预应力张拉施工质量,建立的预应力混凝土箱梁底板合龙段防崩设计方法可对规范相应部分进行有益补充;从空间徐变角度,总结了既有预应力混凝土箱梁过量开裂、下挠的成因;箱梁裂后刚度损伤计算方法改变了裂缝对桥梁服役性能的影响仅局限于定性评估的现状;研究了预应力混凝土连续箱梁开裂后的裂缝扩展、应力重分布特性。该书的研究成果对预应力混凝土箱梁结构的设计、施工及运营具有较高的应用价值。

齐鲁交通发展集团有限公司的周勇研究员参与了本书第4章中预应力混凝土

土单箱双室变截面箱梁破坏性试验部分的试验和数值模拟计算的撰写。总结了箱梁开裂后的受力性能,提出了基于最优化理论的刚度反演计算方法。

中交第四公路工程局有限公司的林新元教授级高工参与编写了本书中的单箱双室箱梁破坏性试验及计算部分章节。

北京交通大学的杜进生教授参与了本书第3章中的预应力混凝土箱梁徐变精细化计算分析的撰写。

四川升拓检测技术股份有限公司的吴佳晔教授参与了本书第5章箱梁裂后承载性能评估应用部分的内容撰写。

上海应用技术大学的郭智刚老师参与了本书第3章中的预应力钢绞线检测评估技术的撰写。

河海大学的雷笑老师参与了本书第2章中混凝土水化热温度应力及裂缝控制章节的撰写。

东南大学桥梁研究所的叶见曙教授对本书提出了许多学术修改意见,在预应力混凝土箱梁开裂、下挠专题研究方面给予了作者细心指导。

感谢长沙理工大学的刘小燕教授,在预应力新型检测技术推广应用过程中给予作者无私的帮助和支持。

感谢山东大学的李术才教授,让作者领悟到学术和工程的关系,两者只有相互促进才能做出具有价值的研究成果。本书能够付诸出版,离不开李教授对作者的全面支持和帮助!

感谢山东大学岩土与结构工程研究中心所有给予作者智慧的学者们和老师。感谢学术生涯中山东大学给予作者充满挑战的工作环境、真诚的帮助和启发,以及值得回忆和自省的人和事。

感谢山东大学桥梁组的李守凯、齐广志、孙家龙、曹原、陆小蕊、姚晨、高磊、韩福洲、刘冠之及刘佳琪等同学撰写了本书第二版中相关章节。交通运输部公路科学研究院的程寿山研究员提供了本书中的广济2号桥相关资料,在此一并表示感谢!

限于作者的知识视野和学术水平,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。如有问题,请联系山东大学桥梁所副教授张峰(zhangfeng2008@sdu.edu.cn)。

作者
2016.12.6

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 裂缝的危害性	4
1.2 箱梁开裂原因	6
1.3 研究内容	6
本章参考文献	7
第 2 章 箱梁零号块温度裂缝控制	8
2.1 混凝土水化热及其温度效应的研究	9
2.2 浊峪河特大桥箱梁零号块水化热观测	11
2.3 赵氏河特大桥箱梁零号块水化热观测	18
2.4 渭河连续箱梁零号块水化热观测	24
2.5 水化热分析理论	26
2.6 赵氏河及浊峪河特大桥箱梁零号块有限元分析	33
2.7 渭河连续箱梁零号块有限元分析	40
2.8 聚丙烯纤维混凝土在混凝土防裂工程中的应用	50
本章参考文献	54
第 3 章 箱梁节段施工期防裂	56
3.1 竖向预应力研究现状	57
3.2 箱梁施工期竖向预应力损失对箱梁腹板应力影响分析	60
3.3 预应力损失	61
3.4 考虑腹板竖向预应力损失后的箱梁腹板应力分析	68
3.5 锚垫板倾斜对锚具回缩变形的影响分析	69
3.6 基于测试的箱梁施工期竖向预应力损失模型	84
3.7 预应力损失无损检测方法研究	97
3.8 箱梁腹板应力测试	108
3.9 箱梁顶板和底板正应力测试结果	113
3.10 箱梁合龙段底板防崩裂研究	115
3.11 基于 ANSYS 二次开发的预应力混凝土箱梁徐变精细化数值分析	130
3.12 基于 MIDAS FEA 的精细化徐变分析	136
3.13 基于拉脱法的预应力混凝土梁锚下有效预应力分析	141
3.14 合龙段内置劲性骨架对刚构桥受力性能的影响	158
本章参考文献	166
第 4 章 箱梁裂后承载性能评估	168
4.1 国内外的研究现状	168
4.2 反复加载作用下预应力混凝土变截面箱梁试验研究	177

4.3	预应力混凝土箱梁非线性分析理论	202
4.4	预应力混凝土变截面连续箱梁开裂后的剪力滞效应	251
4.5	预应力混凝土变截面连续箱梁开裂后的抗弯刚度分析	266
4.6	实桥破坏性试验的测试结果及精细化数值模拟	291
4.7	结论与建议	308
	本章参考文献	310
第5章	箱梁裂后承载性能评估应用	317
5.1	国内外研究现状	317
5.2	现场检测、评估的目的、意义和依据	319
5.3	工作流程	319
5.4	仪器和设备	320
5.5	检测内容	321
5.6	检测方法	322
5.7	六座旧桥桥梁线形检测结果	332
5.8	六座旧桥材料特性检测结果	336
5.9	六座旧桥箱梁裂缝调查结果	344
5.10	裂缝对箱梁服役性能影响评估	349
	本章参考文献	353

第1章 绪 论

我国公路桥梁在近 20 年得到飞速发展,桥梁的设计和施工技术也达到了相当高的水平。由于大跨径预应力混凝土连续箱梁桥无论是在经济合理性还是工艺成熟性上都具有优势,因此得到广泛应用。

大跨径预应力混凝土梁桥通常采用箱形截面,这是因为箱形截面具有以下其他截面所不具有的优点^[1]:

- (1) 整体性好、刚度大、抗扭性能好,具有良好的稳定性,截面形式多样化;
- (2) 偏心荷载作用下,箱梁的整体受力性能比 T 梁、工字梁更加有利,且省料;
- (3) 箱梁顶板和底板都具有较大的混凝土面积,能有效地抵抗正负弯矩并满足配筋要求,适用于多种施工方法,如悬臂施工、顶推施工等;
- (4) 适合预应力混凝土结构空间布束,当跨度增大时,采用多向预应力具有良好的经济性;
- (5) 桥型简洁美观,行车舒适,设计理论和施工工艺比较成熟;
- (6) 跨度变化大,适用于多种结构形式,如连续刚构、T 形刚构等。

1) 连续梁桥

目前国内外已建和在建的主跨径大于 200m 以上的大跨径预应力混凝土箱梁桥已超过了 30 座。连续梁桥方面:1960 年,中国最初建成的钢筋混凝土箱形薄壁连续梁桥——山东济宁跃进桥是我国第一座混凝土箱形梁桥^[2],跨径为 $(37 + 53 + 37)$ m。1964 年,又建成广西邕江悬臂箱梁桥,主跨 55m。由于钢筋混凝土结构存在用钢多、自重大、易裂等特点,因此,要向更大跨径发展,就必须使用预应力混凝土结构。进入 20 世纪 80 年代,对称平衡悬臂法施工的大跨径预应力混凝土箱形截面连续梁得到了迅速的发展^[3],1991 年建成的云南六库怒江大桥(图 1.1),主桥跨径为 $(85 + 154 + 85)$ m 预应力混凝土连续梁桥,2001 年 3 月建成通车的南京长江第二大桥北汊桥,其主桥跨径为 $(90 + 3 \times 165 + 90)$ m,是我国目前跨度最大的预应力混凝土连续梁桥(图 1.2)。

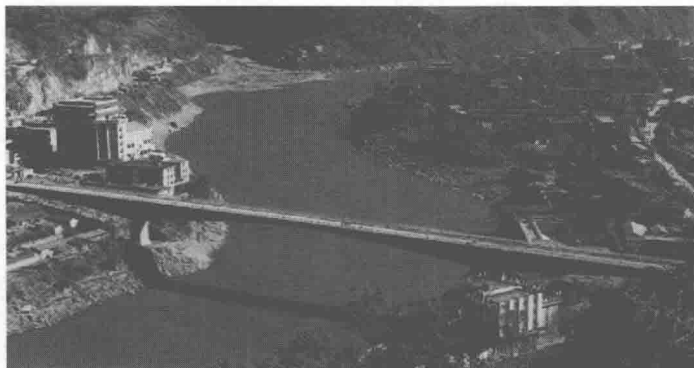


图 1.1 云南六库怒江大桥



图 1.2 南京长江第二大桥北汉桥

2) 连续刚构桥

连续刚构桥结构既具有整体性能好、抗震能力强和抗矩能力大的优点,也具有桥体简明、维护方便的长处。连续刚构桥体连续、梁墩固结,具有连续梁桥无伸缩缝和行车平顺舒适的优点,兼具不设支座、便于悬臂施工的优点。连续刚构桥纵向与横向都具有比较大的刚度,适合于悬臂施工,有利于跨越大河、深谷等障碍物,并且能够满足横向抗风要求,同时造价又低,因此常为大跨径桥梁优选的方案之一^[2,4-7]。

1988年建成的广东番禺洛溪大桥是我国第一座大跨径连续刚构桥(图 1.3),跨径组合为 $(65+125+180+110)\text{m}$ 。采用双肢箱形薄壁墩,墩顶处箱梁高 10m ,跨中处 3m 。1995年建成的湖北黄石长江大桥,主跨为 245m ,主桥连续长达 $1\,060\text{m}$ 。特别是1997年建成的广东虎门辅航道桥(图 1.4),跨径组合为 $(50+270+150)\text{m}$,主桥位于 $R=7\,000\text{m}$ 的平曲线上,建成时跨径居同类桥世界首位,并将预应力混凝土连续刚构体系的跨越能力体现到极致^[3,4]。这个纪录又很快被挪威主跨为 301m 的Stolma桥(跨中为钢箱梁,如图 1.5所示)和主跨为 298m 的Raftsundet桥打破(图 1.6),可见大跨径预应力混凝土连续刚构桥有着很好的发展前途。



图 1.3 广东番禺洛溪大桥



图 1.4 广东虎门辅航道桥

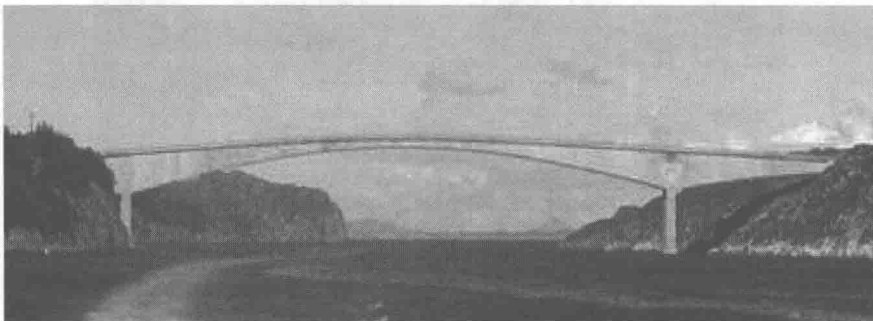


图 1.5 挪威 Stolma 桥



图 1.6 挪威 Raftsundet 桥

国内外部分大跨径连续刚构桥如表 1.1 所示。

国内外部分主跨 $\geq 240\text{m}$ 混凝土连续刚构桥

表 1.1

序 号	桥 名	国 家	最大主跨 (m)	建成年份 (年)
1	Stolma 桥	挪威	301	1998
2	Raftsundet 桥	挪威	298	1998
3	虎门辅航道桥	中国	270	1997
4	云南元江大桥	中国	265	2003
5	Gateway 桥	澳大利亚	260	1986
6	宁德下白石大桥	中国	260	2003
7	泸州长江二桥	中国	252	2000
8	Schottwien 桥	奥地利	250	1989
9	Doutor River 桥	葡萄牙	250	1990
10	重庆黄花园大桥	中国	250	1999
11	马鞍山嘉陵江大桥	中国	250	2001
12	宜水路金沙江大桥	中国	249	2005
13	黄石长江大桥	中国	245	1995
14	重庆嘉陵江大桥	中国	240	1997
15	贵州六广河大桥	中国	240	2002
16	江津长江大桥	中国	240	1997

随着大跨径桥梁逐步地投入运营、经历荷载及时间的考验,设计和施工中的问题也在逐步地暴露,尤其是各种不同性质的裂缝较为普遍地出现。结构一旦出现裂缝,就势必引起人们对工程质量的怀疑,这又以结构在使用中出现的受力裂缝为甚。湖南省交通厅 1998 年年底对 20 世纪 80 年代末期在湘江所建的几座连续箱梁进行检查时,发现混凝土箱梁腹板大面积开裂,最大裂缝宽度达 1.6mm ,长度最长达 $14\,000\text{mm}$ 。预应力混凝土连续箱梁桥在国内其他地区均存在不同程度的开裂现象^[1-2]。郑步全^[10]以某钢筋混凝土连续曲线梁匝道桥在施工过程



中出现的过宽裂缝成因的研究为实例,介绍钢筋混凝土桥梁非正常开裂事故原因的分析方法。在事故调查分析中运用结构的对称性质,考虑基础不均匀沉降对结构内力的影响及剪力滞效应对箱梁截面正应力分布的影响,并对原设计进行了修正。最后给出了钢筋混凝土桥梁裂缝控制的若干建议。文献[4]结合某主跨 245m 的连续刚构桥存在主梁跨中下挠和箱梁裂缝等病害,提出对大桥现有状况进行模拟计算的思路和方法,对大跨度连续刚构桥主梁下挠及箱梁裂缝成因进行分析,并在此基础上提出了有效的改造措施。国内的桥梁在使用过程中常常发现箱梁腹板出现与梁轴线呈大约 45° 的角、不同程度的斜裂缝。以下重点介绍国内几座特大跨箱梁的开裂案例。

[案例 1] 黄石长江大桥

跨径布置: $162.5\text{m} + 3 \times 245\text{m} + 162.5\text{m}$ 。

桥型:连续刚构。

竣工日期:1995 年。

病害:运营 7 年后,箱梁裂缝共 6 638 条,其中 5 328 条在腹板内表面,1 073 条在腹板外表面,237 条在底板上。主梁跨中下挠 21.2cm。

[案例 2] 东明黄河大桥

跨径布置: $75\text{m} + 7 \times 120\text{m} + 75\text{m}$ 。

桥型:连续刚构组合结构体系。

竣工日期:1993 年。

病害:运营 6 年后,箱梁内部两腹板共发现斜向裂缝 620 道,最宽为 0.78mm,最长为 4.6m。裂缝宽度大多介于 0.2 ~ 0.54mm 之间,与顶板大致呈 $20^\circ \sim 50^\circ$ 的夹角,主梁跨中下挠 14.6cm。

[案例 3] 三门峡黄河大桥

跨径布置: $105\text{m} + 4 \times 140\text{m} + 105\text{m}$ 。

桥型:连续刚构。

竣工日期:1992 年。

病害:运营 6 年后,跨中下挠最大达到 22cm,梁体出现大量裂缝。

从以上描述可以看出:箱梁开裂是国内普遍存在的现象。为了对箱梁进行维修加固,我国每年耗费大量人力和财力,因此通过合理的施工和设计防止箱梁开裂,对已开裂的箱梁进行有效的受力评估具有明显的经济效益。该研究能够有效缩减我国在箱梁开裂这一传统通病上的花费,对我国桥梁建设事业具有重大意义。

1.1 裂缝的危害性

通过国内外的调查分析研究,箱梁的裂缝位置大体可分为图 1.7 所示的几种情况。

除了上述裂缝形式外,工程中还有一种会引起严重工程事故的箱梁施工期工程病害,即跨中合龙段底板崩裂。

文献[12]介绍了箱梁底板崩裂事故。某预应力混凝土连续刚构箱梁桥,其箱梁采用单箱单室截面。在中跨合龙钢束张拉完成后发现中跨跨中的 3 个节段范围内腹板底部及底板底面

纵向开裂严重,底板束以下的普通混凝土与上层混凝土崩离开,形成“两张皮”,如图 1.8 所示。

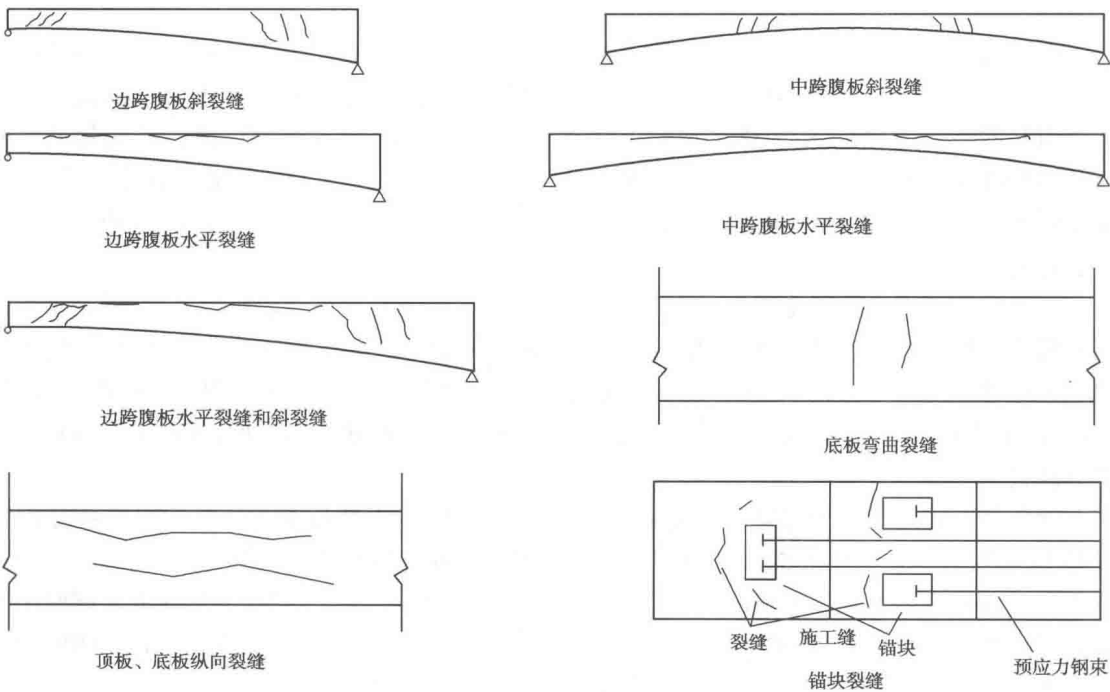


图 1.7 裂缝发生位置调查结果

裂缝的存在对预应力混凝土结构的安全性、耐久性和正常使用效果都会产生不利影响,主要表现如下。

(1) 开裂使结构受力混凝土有效截面减小,降低了桥梁的安全度,有的甚至造成了桥梁结构的破坏。目前公路管理部门对于出现大量裂缝的桥梁一般都采取了限载限速的措施,影响了桥梁的使用功能。

(2) 裂缝的存在,使钢筋受到空气中有害气体的侵蚀,加快了钢筋的锈蚀速度,削弱了桥梁的耐久性,缩短了结构的使用寿命,特别是预应力钢束(筋)的腐蚀属“高应力腐蚀”,其锈蚀速度远快于普通钢筋,并且其断裂属脆性断裂,无明显征兆,危害性极大。

(3) 裂缝会削弱混凝土箱梁的刚度,使梁跨中挠度增大。国内某大桥混凝土箱梁由于出现了大量裂缝,跨中严重下挠,最大达 320mm。过大的挠度不仅影响行车的舒适,也可能改变受力体系和内力分配,使裂缝进一步扩展,从而形成恶性循环。

综上所述,在施工中,应充分认识到裂缝出现的危害性,采取各种有效的措施和合理的处理方法来预防裂缝的出现和发展,不断提高混凝土浇筑质量,满足桥梁安全、稳定、耐久的要求。

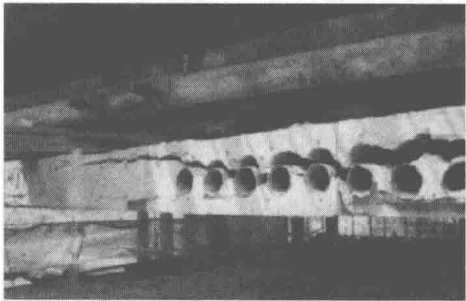


图 1.8 崩裂的底板



1.2 箱梁开裂原因

引起混凝土开裂的原因众多,大概分为以下几种:荷载作用产生的裂缝;混凝土塑性收缩引起的裂缝(混凝土表面水分蒸发速度超过本身的泌水速度,造成混凝土开裂);混凝土塑性沉降引起的裂缝(混凝土中的集料塑性下沉过程中受到顶部钢筋的阻碍,使得钢筋处的沉降与两侧的沉降相差过大,就会在钢筋上方出现顺筋的表面裂缝);水泥水化热引起的裂缝;温度和湿度变化引起的裂缝;碱集料化学反应引起的裂缝;钢筋锈蚀引起的裂缝;地基不均匀沉降引起的裂缝等。

箱梁腹板开裂的原因是相当复杂的,前边描述的各种因素都会引起腹板开裂,但是本书内容的研究前提是施工质量不存在缺陷的情况下箱梁腹板的受力裂缝,所以箱梁腹板开裂的问题又可以进一步归纳为:①车辆荷载严重超载;②施工中对质量要求不严,纵向、竖向预应力损失过大,未达到设计要求;③设计时对结构构造、主拉应力等问题考虑不周;④箱梁零号块温度应力过大。

随着箱形截面预应力混凝土连续梁式桥的大量应用,在少数桥梁上也出现了一些预应力混凝土的开裂问题,其中竖向预应力是一个重要因素。在一些桥梁的实际调查中,常有竖向预应力筋永存预应力不到位的情况,甚至在施工完成以后,有的预应力筋内无预应力。同时由于箱梁桥高度有限,对施工要求较高,稍有不慎,竖向预应力可能会损失过半。这对箱体的受力是极为不利的,因为竖向预应力对箱梁桥截面主拉应力的贡献是相当大的。

理论和实践表明:竖向预应力是抵抗剪应力和主拉应力的关键;混凝土的破坏面与最大拉应力方向正交,由拉伸劈裂造成。没有设置竖向预应力筋的箱梁腹板,其开裂更为严重。因此,在箱梁结构的施工过程中,通过施工监测工作,一方面可保证结构有足够的竖向预应力;另一方面通过实际测量的纵向预应力大小,合理配置和调整竖向预应力,以提高结构的抗裂能力。

1.3 研究内容

本书重点探讨箱梁腹板的受力裂缝防治及箱梁裂后承载性能评估方法,主要研究内容及技术路线描述如下。

1) 零号块浇筑期温度场和应力场研究

针对箱梁零号块由于温度应力过大引起箱梁开裂的工程病害,以3座特大跨连续刚构桥箱梁零号块为研究对象,基于工程现场测试和理论分析,提出箱梁零号块温度裂缝防治措施。

2) 箱梁节段施工期抗裂研究

针对箱梁节段施工过程中存在腹板开裂的工程病害,以3座特大跨连续刚构箱梁桥为研究对象,基于现场测试、理论分析,重点研究以下四部分内容:竖向预应力损失对箱梁腹板应力的影响;箱梁施工期顶板、底板和腹板应力测试研究;箱梁施工过程的精细化有限元模拟技术;箱梁合龙段底板防崩裂研究。

3) 箱梁裂后承载性能评估方法研究

针对箱梁开裂现状,以大比例尺模型为研究对象,基于破坏性试验、有限元数值模拟、最优反演理论,研究箱梁裂后应力、挠度的变化规律,进而提出箱梁裂后的局部刚度折减系数,为后续的现场旧桥研究提供理论基础。

4) 既有箱梁裂缝检测与承载性能评估

基于现场测试旧桥的挠度、混凝土和钢筋材质、裂缝分布,基于3)的研究成果,对带裂缝服役的箱梁受力性能进行评估。

以上四部分内容中,1)和2)重点解决箱梁施工期的裂缝防治理论及工程对策,3)和4)重点探讨箱梁裂后的服役性能评估和工程应用。

本章参考文献

- [1] 郭金琼. 箱形梁设计理论[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
- [2] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,1988.
- [3] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
- [4] 马宝林. 高墩大跨连续刚构桥[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [5] 周军生,楼庄鸿. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J]. 中国公路学报, 2000(1).
- [6] 王钧利,贺拴海. 大跨径连续刚构桥主墩类型及设计尺寸的优化[C]//中国公路学会桥梁与结构工程分会 2006 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2006.
- [7] 范立础. 桥梁工程(上册)[M]. 北京:人民交通出版社,1980.
- [8] 钟新谷. 预应力混凝土连续箱梁桥裂缝分析、防治及钢箱—混凝土组合梁研究[R]. 湖南大学博士后研究报告,2002.
- [9] 浙江省交通厅公路管理局. 预应力混凝土连续梁桥裂缝调查分析及防治研究报告[R]. 2005-5.
- [10] 郑步全,吴培峰. 某钢筋混凝土连续曲线梁桥裂缝事故分析与设计修正[J]. 公路交通科技, 2004, 21(11): 36-38.
- [11] 詹建辉. 特大跨度连续刚构主梁下挠及箱梁裂缝成因分析[J]. 中外公路, 2005, 25(1): 56-58.
- [12] 冯鹏程,吴游宇,杨耀栓,等. 连续刚构底板崩裂事故的评价[J]. 世界桥梁, 2006(1): 66-69.

第2章 箱梁零号块温度裂缝控制

桥梁大体积混凝土水化热过程属于瞬态有内热源的温度效应,主要的热传递方式为热传导和热对流,热辐射影响较小,可忽略不计^[1];初始影响已完全消失的运行期温度场完全取决于边界温度,与初始温度无关^[2],即在水化热过程结束后,以日照温度变化、骤然降温、年温度变化的自然环境条件变化、混凝土后期收缩徐变及预应力的施加对箱梁线形、温度和应力的影响为关注重点。工程结构尺寸的不断增大、高强混凝土的广泛采用、单位体积水泥量的增加、桥梁结构处于温度不断变化的环境中,因此,大体积混凝土早期水化热效应到运营阶段自然温度效应对结构的影响不断引起人们的关注。

土建结构物在混凝土早期水化热的高温条件下,会发生较大的温度变化和温度梯度变化。造成大体积混凝土开裂的因素非常多,而因水泥的水化热和混凝土的低热传导性而导致内外温差过大无疑是混凝土开裂的最主要的原因之一^[3]。水化热产生的裂缝将降低甚至破坏结构的承载能力,影响混凝土结构的安全性、耐久性和稳定性。江苏省扬溧高速公路上的某匝道桥^[4],采用单箱双室截面, $(62 \times 5 + 4 \times 25 + 7 \times 25)$ m 预应力混凝土连续梁桥,箱梁顶板宽 12.5 m,底板宽 6.7 m,梁体高 1.4 m,为减少混凝土的水化热,采用“两次浇筑”的施工措施,在拆除悬臂翼缘板模板时发现第二联 8 号墩顶翼缘板底面有横向贯穿裂缝,经过全面检查发现第二联箱梁共有 64 条裂缝。另有某三跨一联预应力混凝土变截面单箱单室连续箱梁桥^[5],分为左右分离的两幅桥,跨径布置为 $(93 + 150 + 93)$ m,墩顶处梁高 8 m,也采用“两次浇筑”的施工措施,拆模后也发现在顶板及腹板上有 7 条裂缝。

零号块箱梁结构形式复杂、钢筋多而密集、施工工序环节多、条件差,在浇注零号块梁段时,水泥的水化热会引起混凝土内部温度和温度应力的急剧变化,尤其是在寒冷季节施工,在一定条件下对混凝土会产生相当大的拉应力。值得注意的是,冬季施工的大体积混凝土结构,水化热温升和自然环境的温差可达 50℃ 以上,两倍于工程界普遍要求的 25℃ 的温差控制要求,如此之大的温差会导致拆模时在表面形成很大的拉应力,出现由于骤冷产生的“温度冲击”现象^[6],极易导致温度裂缝。

高强混凝土相比普通混凝土水泥等级要求高、用量大,水泥水化放热速率快,放热量明显增多。有研究表明,高强混凝土的水化热引起的高温对混凝土早期强度发展有利,但最终有可能降低 28d 强度,并使后期强度遭受更大损失。在工程实践中,为了减小水化热温度效应对结构的不利影响,一般采用低温拌和、水管冷却、蓄水保温等措施来控制大体积混凝土的施工质量。但是如果对这些措施缺乏定量的认识,仅仅以一定范围的温差控制为标准,不仅在养护措施上难以有效的实施,在养护效果方面也缺乏定量的判断,给新建桥梁的安全使用造成隐患,在产生可见裂缝后进行修补更令工程质量大打折扣。大体积混凝土水化热温度场的大小和分布跟工程所在地的气候条件、工程施工和养护方案、混凝土自身的热学性质有关,而应力场的大小和分布还跟混凝土的力学性质及约束条件等有关。由于这些因素的影响,大体积混凝土

的水化热问题就更突出了。幸运的是,这种人为因素造成的温度荷载,往往可以通过工艺措施予以控制。

2.1 混凝土水化热及其温度效应的研究

大体积混凝土结构温度场和应力场问题的研究最早是从20世纪30年代中期美国修建高211m的胡佛大坝开始的。美国垦务局针对有关大体积混凝土结构温度场及应力场问题专门开展了冷却水管、宽槽低温空气冷却及装配式预制块等新的施工工艺的研究,最后选定了分缝分块浇筑和水管冷却的温控防裂措施,取得较满意的成果,胡佛大坝所采用的大体积混凝土技术很多至今仍在沿用。世界上最早把有限元时间过程分析法^[7]引入混凝土温度应力分析的是美国加州大学的威尔逊教授。在1968年,他曾为美国陆军工程师团研制出可模拟大体积混凝土结构分期施工温度场的二维有限元程序,并用于德沃歇克坝温度场的计算。另外,他还和其他人合作研制了考虑混凝土徐变的应力分析程序。

2.1.1 大体积混凝土水化热温度效应研究现状

在混凝土水化热温度场的试验研究方面,王解军等^[8]对承台混凝土水化热过程进行分析,提出在冬季施工条件下,混凝土表面及中心温度测点最大温差有可能出现在混凝土达到最高温度之前的结论。

上述水化热效应研究只停留于温度场,通过控制混凝土的内表温差及表面和环境的温差在25℃以内,即得出了满足施工控制要求的结论。这对于实际工程来说,无疑是一种实施简便的控制大体积混凝土水化热效应的粗略标准,只有进一步分析了在考虑了约束、混凝土强度发展和收缩徐变影响条件下的水化热应力场,才能对混凝土的状态比较准确地把握,提出更有针对性的工程措施。

为此,有学者在混凝土水化热温度应力方面进行研究。1990年,Francis A. Oluokun, Edwin G. Burdette, J. Harold Deatherag研究了用波特兰水泥配置的混凝土早期强度随时间变化的规律^[9],随后又研究了混凝土的弹性模量、抗压强度、泊松比与时间的关系^[10]。1994年,Emborg和Bernander^[11]对混凝土的早期温度应力和温度裂缝进行了徐变试验、混凝土热体积自由膨胀试验、松弛试验,指出,在有限元分析模型中,不仅要考虑混凝土早期温度变化,还要考虑热传导以及混凝土配筋因素。1999年,Cervera^[12]混凝土的力学形态通过黏弹性力学模型模拟,并通过准确模拟早期混凝土形态,在多孔介质的理论上建立了一种热学—化学—力学模型,不仅可模拟混凝土的水化、养护、徐变和破坏全过程,混凝土的水化程度及水化热的变化过程也可以通过此模型来预测。2002年,西班牙的M. Cervera、R. Faria^[13]建立的有限元数值分析模型考虑了早期混凝土养护过程中混凝土的龄期问题,能够准确预测混凝土水化热的变化过程以及混凝土抗压强度随龄期的发展情况,最后结合Oresund Link高架桥桥面板的水化热温度场实测数据进行对比分析,结果显示,实测和理论情况吻合较好。在国内,余亚南等人^[14]针对不同的浇筑温度、环境温度、保温层对流系数、位移约束条件对承台混凝土早期表面裂缝的影响进行了研究,得出如下对一般的水化热温度应力研究较有指导性的结论:混凝土



浇筑温度与结构混凝土表面拉应力呈正比,而环境温度与结构表面拉应力呈反比;保温养护对表面中心部位和边缘部位的影响程度不一,中心比边缘大;模板约束条件的模拟能够降低表面拉应力,但具体约束强度数据得通过试验来得到,在有限元模拟中一般采用不考虑模板约束影响的偏安全做法。

上述水化热应力场的研究内容基本涵盖了混凝土水化热温度应力分析所需要考虑的浇筑、养护和混凝土强度发展、收缩徐变和龄期等因素,然而,分层浇筑和水管冷却是大体积混凝土不可缺少的养护措施,在这两方面也有学者做了进一步的工作。

2.1.2 大体积混凝土水化热温度控制措施研究现状

有关混凝土分层浇筑的研究方向,张岗等^[15]在综合考虑了混凝土的热学和力学特性、早期抗拉强度和在水化热的发展、对流边界条件的时变效应及滞后浇筑的基础上,针对混凝土箱梁零号块混凝土在“两次浇筑”的施工过程中出现早期裂缝的现象,给出了水化热的温度和应力时程曲线,总结了温度场和应力场的变化规律,这篇文章给出了以下混凝土的应力、位移和温度关系的结论:箱梁最大主拉应力发生时间与内外温差有关;各点的位移与温度峰值有关;温差峰值和混凝土的浇筑厚度有关。要尽可能减小新老混凝土之间的温差和浇筑的时间间隔:上层混凝土浇筑前在下层混凝土中通热水,减小两者的温度梯度;缩短时间间隔可防止后浇筑混凝土对先浇筑混凝土的“基岩约束效应”。张明雷等^[16]以崇启大桥主墩承台大体积混凝土冬季施工为背景,对温度裂缝控制技术的效果进行评价,调整了承台混凝土的分层高度,以降低水化热效应。

大体积混凝土的水管冷却是温度控制中较为关键的方面。在理论研究中,朱伯芳 1991 年在文献[17]中,把冷却水管看成负热源,建立水化热作用的等效热传导方程,用平均的思想考虑冷却水管的效果,采用普通网格计算混凝土的温度场和应力场,可以容易地计算水管冷却和混凝土表面散热作用;1998 年,文献[18]在此基础上提出考虑水管冷却作用的混凝土空间温度场的近似算法,它的特点是忽略了平行于水管方向的水化热温度梯度,在水管长度方向上取一系列垂直截面,利用平面有限单元法求出各个截面的混凝土温度场、水化热温度增量及通过各截面的冷却水温度,在此基础上求得空间温度场的近似解。然而,朱岳明等^[19]经过研究发现,可以不忽略水管方向的混凝土温度梯度也不必按平面有限单元法粗略计算冷却水管各个截面的混凝土温度场,而采用按完全符合任何实际工程情况的一般三维问题,依据水管与混凝土之间的热量平衡提出一种在数学理论上严格的有限单元法数值计算新方法。在实际应用中,刘有志等^[20]提出冷却水温的高低和混凝土浇筑后通水开始时间是导致坝体出现“管壁裂缝”的主要原因。蒋红伟等^[21]分析了冷却水管的层数、冷却水流量、水温对承台温度场和应力场的影响,提出降低混凝土内部温度和应力可以通过增加冷却水管层数和流量来实现,但水温的大小仅对混凝土的温度有影响,而对混凝土的应力影响无明显规律可循。

到目前为止,国内外的学者在大体积混凝土水化热效应温控方面的研究主要针对水工结构的大坝、桥梁结构承台的温度场和应力场,而连续箱梁墩顶大体积混凝土的温控效应研究则少见报道。综合已有的理论和结论,运用有限元软件进行计算分析,可以使有关理论和研究得到进一步发展。