

在役空心板桥梁检测 评估与实例分析

刘世明 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

在役空心板桥梁检测 评估与实例分析

刘世明 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书介绍了在役空心板桥梁现状、特点及桥梁检测评估的现状、目的与意义；阐述了在役空心板桥梁的病害类型及机理、常用的检测评估方法；详细分析了静、动载试验准备，试验过程及程序，数据的分析及处理方法，同时也总结了检测评估的依据及评估报告的编制内容；以某空心板桥检测为例介绍了该桥外观评定、静载、动载试验评定方法与试验结果，并根据试验数据对桥梁的技术状况进行评定。

本书可作为桥梁工程相关专业在校学生的学习和教师教学用书，也适合于桥梁技术人员的参考借鉴。

图书在版编目（C I P）数据

在役空心板桥梁检测评估与实例分析 / 刘世明著

— 北京：中国水利水电出版社，2016.8

ISBN 978-7-5170-4734-6

I. ①在… II. ①刘… III. ①预应力混凝土桥—混凝土空心板—检测—研究 IV. ①U448.35

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第216878号

书 名	在役空心板桥梁检测评估与实例分析 ZAIYI KONGXINBAN QIAOLIANG JIANCE PINGGU YU SHILI FENXI
作 者	刘世明 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.5印张 202千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
定 价	40.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

因空心板桥经济性好、受力简单、建筑高度低、方便施工等优点，新中国成立以来，我国修建了大量的空心板桥梁。随着交通流量的不断增加，经过几十年运营的空心板桥梁，均存在不同程度的老化、损伤，承载能力降低，为了解在役空心板桥梁的实际工作性能，有必要开展相关检测评定研究工作，本书结合某空心板桥的检测评估工作，对该类桥梁的检测评估进行了概括总结。希望借此提供这一桥型的详细检测评估资料，为该桥型的检测评估起到借鉴与推动作用。

本书由华北水利水电大学刘世明撰写，共分为5章。第1章主要阐述了国内外在役空心板桥梁现状、检测评估研究状况及检测评估的目的与意义；第2章介绍了混凝土裂缝、碳化、钢筋锈蚀、铰缝破坏、碱—骨料反应等常见的空心板桥病害类型、影响因素及相关机理；第3章阐述了基于外观调查法、桥梁材质状况与状态参数检测评定法、荷载试验法、设计规范法、专家经验法及可靠度理论方法，总结了各种检测评估方法的原理、特点及使用方法；第4章进行了空心板桥梁荷载试验研究，重点介绍了静、动载试验的准备工作、试验程序及加载流程、试验数据的处理及报告的编制内容；第5章通过某在役空心板桥梁检测评估工作，对该类桥型外观、几何形态、材质状况及状态参数检测评定方法进行研究，同时，对桥梁的静、动载试验方案、组织、试验数据的处理与桥梁技术状况进行总体评定。最后，根据检测具体情况，对在役空心板桥梁的图纸进行了恢复。

由于著者水平所限，本书不足之处，尚祈读者批评指正。

刘世明
2016年3月

目 录 /

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 在役桥梁现状	1
1.1.1 国内在役桥梁的现状	1
1.1.2 国外在役桥梁的现状	2
1.2 在役桥梁检测评估研究现状	3
1.2.1 国内在役桥梁检测评估研究现状	3
1.2.2 国外在役桥梁检测评估研究现状	4
1.3 在役桥梁检测评估目的与意义	5
第 2 章 在役空心板桥梁的病害类型及机理研究	7
2.1 混凝土裂缝	7
2.1.1 结构性裂缝	7
2.1.2 非结构性裂缝	8
2.2 混凝土碳化	9
2.2.1 碳化原理	10
2.2.2 碳化影响因素	10
2.3 钢筋锈蚀	10
2.3.1 钢筋锈蚀机理	10
2.3.2 钢筋锈蚀影响因素	11
2.3.3 对结构的危害	12
2.4 铰缝破坏	12
2.4.1 铰缝破坏类型	12
2.4.2 铰缝破坏原因	13
2.5 混凝土腐蚀	14
2.5.1 碱—骨料反应	14
2.5.2 盐腐蚀	15
2.5.3 混凝土冻融破坏	15
2.6 桥面不平整	15

2.7 护坡及锥坡破损	16
第3章 在役空心板桥梁常用的检测评估方法	17
3.1 基于外观调查的方法	17
3.1.1 评分系统	18
3.1.2 桥梁技术状况等级分类	20
3.1.3 空心板桥梁部件分类及权重值	21
3.2 桥梁材质状况与状态参数检测评定	21
3.2.1 混凝土抗压强度及碳化深度的检测评定	21
3.2.2 钢筋锈蚀的检测评定	24
3.2.3 混凝土中钢筋分布及保护层厚度的检测评定	25
3.3 基于荷载试验的方法	27
3.3.1 校验系数	27
3.3.2 静力荷载试验评定法	27
3.4 基于设计规范的方法	29
3.5 基于专家经验的方法	31
3.5.1 桥梁评估专家系统	31
3.5.2 专家意见调查	31
3.6 基于结构可靠度理论的方法	32
第4章 在役空心板桥梁的荷载试验	34
4.1 荷载试验概述	34
4.1.1 静载试验的目的和程序	34
4.1.2 动载试验的目的和程序	37
4.1.3 现场清理	39
4.2 静载试验	39
4.2.1 试验方案设计	39
4.2.2 静载试验准备工作	47
4.2.3 加载试验	48
4.2.4 试验资料的整理	50
4.2.5 数据整理与结构性能评定	52
4.3 动载试验	53
4.3.1 试验方案的设计	54
4.3.2 动载试验准备工作	55
4.3.3 加载试验	55
4.3.4 数据整理	56
4.3.5 试验结果的评定	59

4.3.6 试验报告	60
4.4 基于 Midas/Civil 荷载试验有限元分析	60
4.4.1 Midas Civil 有限元软件简介	60
4.4.2 静载试验有限元分析	63
4.4.3 动载试验有限元分析	71
第 5 章 在役空心板桥梁检测评估实例	73
5.1 工程概况	73
5.2 外观检测评定	74
5.2.1 检测目的	74
5.2.2 检测依据	74
5.2.3 主要检测仪器设备	75
5.2.4 大桥几何形态参数评定	76
5.2.5 桥梁材质状况与状态参数检测评定	78
5.2.6 外观检测桥梁状况等级评定	79
5.3 静载评定和试验结果	91
5.3.1 试验目的及主要内容	91
5.3.2 主要测试仪器设备	92
5.3.3 测试截面	92
5.3.4 测点布置	92
5.3.5 静力试验荷载	93
5.3.6 试验成果	96
5.4 动载评定和试验结果	104
5.5 桥梁技术状况评定	121
5.6 桥梁图纸恢复	122
参考文献	126

第 1 章 绪 论

1.1 在役桥梁现状

1.1.1 国内在役桥梁的现状

因钢筋混凝土简支梁桥为静定结构、受力明确、构造简单、方便施工等优点，新中国成立以来，我国修建了大量的钢筋混凝土简支体系桥梁，其数量占到我国桥梁总数量的一半以上，特别是在我国广大的山区及农村地区的低等级公路上，简支体系桥梁更是桥梁设计的首选形式，在简支体系桥梁中，空心板梁桥占有很大一部分。根据交通部的数据，截至 2014 年年底，全国约 75.71 万座公路桥梁，共计 42579km，其中除了大桥以外，中、小桥的数量约占 90% 左右，而中、小桥的上部结构，大部为梁式结构的板梁、T 梁、钢筋混凝土箱梁和组合箱梁等，可见空心板简支梁桥数量很大，仍然是一个未来我国桥梁建设发展的大趋势。据 2012 年 10 月 18 日《广州日报》报道，由于目前东莞大部分桥梁修建于 20 世纪 80—90 年代，这些桥梁设计标准低，施工工艺落后，质量监管手段落后，桥梁质量安全隐患严重。目前东莞市共有公路桥梁 1211 座，其中三类桥梁 169 座，四类桥梁 22 座，五类桥梁 3 座，191 座三四类公路桥梁中，已检查、加固或已有整治计划的共 65 座，需要检查的有 126 座，为消除行车安全隐患，估算耗费 2680 万元。

近年来建立的公路大桥高频率出现过早病害，结构性破坏，甚至崩溃的现象，也暴露了我国道路标准规范和桥梁工程设计、施工、管理和维护的许多问题。当前桥梁设计理论通常是从安全使用的角度出发，更多的为了建设初期的运行而忽视整个桥梁建成后的运行，导致许多桥梁在没有达到使用年限前已经出现严重的缺陷病害，影响桥梁的耐久性和正常功能，后来不得不把大量的人力、物力和财力用在桥梁检测和维修加固，造成许多不必要的浪费。

1.1.2 国外在役桥梁的现状

美国的高速公路网是世界上规模最大、效率最高的公路网,根据联邦高速公路管理局的统计,在美国,有 57.5 万座桥梁,其中约 20 万座不符合要求,12.5 万座都被记录有结构缺陷,每年需替换的桥梁在 0.5 万~0.8 万座,美国联邦公路管理局计划为桥梁维修和更换方案估计耗资约 900 亿美元,美国土木工程师学会估计 21 世纪前 20 年美国有 1/3 的国家 A 级桥梁不能满足要求。由于桥梁的陈旧老化,管理养护不到位,桥梁倒塌事故不断发生,给美国经济发展和人民生活带来极其不良的影响。

原联邦德国曾在 20 世纪 70 年代末对一个州的 1500 座钢筋混凝土和预应力混凝土公路桥梁做了全面检查。结果发现,具有 50~60 年桥龄的钢筋混凝土桥中,有 27% 的桥梁至少有一处严重损伤,64% 至少有一处重要损伤,77% 至少有一处中等损伤;具有 30~35 年桥龄的钢筋混凝土桥中,有 13% 的桥梁上部结构至少有一处严重损伤,37% 至少有一处重要损伤,53% 至少有一处中等损伤;具有 20~30 年桥龄的钢筋混凝土桥中,有 8% 的上部结构至少有一处严重损伤,24% 至少有一处重要损伤,46% 至少有一处中等程度损伤。预应力混凝土桥的损伤情况比钢筋混凝土桥更严重,20~30 年桥龄的预应力混凝土桥,有将近 50% 的桥梁上部构造至少有一处重要损伤,其中 2/3 至少有一处中等损伤。

在日本,20 世纪 70—80 年代,汽车运输急剧发展,汽车日益大型化、重型化,交通量逐年增加,给现有公路桥梁造成了越来越大的压力。1956 年以前按旧标准设计施工的桥梁,承载力显然不足。据统计这类桥梁约有 5500 座,其中普通混凝土桥约 4500 座。

在英国,运输部在 1990 年抽样调查了 200 座混凝土公路桥梁,调查结果表明:大约 30% 的桥梁的运营条件不良,预计对英国运输部拥有的约 6000 座桥的 10 年修复费用为 6200 万英镑。另外,91.5% 的在役桥梁修建于 1955 年以后,设计寿命为 120 年,然而在不到 1/4 设计寿命的使用年限后,就发现大部分桥梁需要维修,二次重建费用高达 8.3 亿英镑。

在澳大利亚,仅加固或更换新南威尔士州的有损伤桥梁就需要 3.5 亿美元。

在南斯拉夫,大约有 19% 的桥梁运营状况不佳。在印度,大约 10% 的公路桥梁需要替换,另有 10% 的桥梁运营状况不良,有损伤迹象。尤其是混凝土结构和混凝土构件经常出现不同程度的裂缝,在桥上造成一些损害,影响桥梁耐久性和正常功能,甚至对桥梁安全性和可靠性有很大的威胁。

三、四、五类桥梁的维修加固,以及如何检测现有桥梁的承载能力和安全度,正确地评估桥梁结构的损伤程度,合理地对桥梁进行加固维修,提高桥梁的可靠性,已经引起世界的关注。

1.2 在役桥梁检测评估研究现状

1.2.1 国内在役桥梁检测评估研究现状

20 世纪 80 年代中期,国内开始研究桥梁评估管理系统,由四川公路研究所、广东省公路研究所、交通部公路研究所等单位,在国外已开发桥梁评估系统的基础上,结合我国国情,先后开发了四川省桥梁数据库系统、广东省桥梁管理系统、北京市桥梁管理系统等。交通部在 20 世纪 90 年代对公路桥梁承载能力开展了系列的研究工作,主要侧重于桥梁检测与加固技术的研究,通过理论分析来挖掘在役桥梁的承载潜力。在 1988 年、1993 年分别颁发了用于交通行业内的《公路旧桥承载力鉴定方法(试行)》和《桥梁可靠性鉴定规程》,并在 2011 年、2015 年分别颁发了《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)和《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233—2015),使桥梁评估工作逐步走上了正轨。

目前存在多种桥梁安全性评估方法,所采用的理论主要集中在可靠度理论、层析分析法、模糊理论、神经网络以及专家系统等。

王永平等提出用损伤来度量桥梁结构或构件的损伤程度,使用模糊数学原理,建立了桥梁使用性能的模糊综合评价体系和桥梁评价的专家系统。系统知识库通过对众多专家的咨询和对专家经验的分析整理获得,具有一定的机器学习功能。

刘沐宇等根据层次分析法的基本思想,建立了完整的大跨度钢管混凝土拱桥安全性评价模型及指标体系,引入模糊理论建立大跨度钢管混凝土拱桥安全性模糊综合评价方法。

陆亚兴等根据桥梁结构的特点及缺损特征,指出了桥梁构件缺损状况的监测内容及构件的五级评定标准,将桥梁缺损状况指数 BCI (Bridge Condition Index) 作为桥梁缺损状况评价指标,建立其计算模型,通过主客观相结合的方法标定了模型的各项参数,并探讨了 BCI 与桥梁养护维修对策之间的对应关系。

潘黎明采用层次分析法、模糊数学理论和人工神经网络方法对斜拉桥的安全性、耐久性评价进行了深入研究,开发了大型桥梁安全性和耐久性评价的神经网络专家系统,把大型桥梁看作一个复杂的系统,引入层次分析法将影响桥梁状态的各因素条理化、层次化,建立起多层的层次关系结构模型。采用两两比较判断矩阵,通过专家调查的方式确定各指标的权重,采用模糊综合评估的方法进行加权综合,得到整座桥梁的状态。同时在评估中引入人工神经网络的方法,利用神经网络所特有的功能进行综合评估。

赵国藩和李云贵讨论了在役结构与拟建结构的不同之处,提出了在役结构可靠性分析的方法和程序,并对可靠性评定及模糊数学在该领域的应用进行了讨论。

1990年,王光远提出了在役结构在使用中的动态可靠度的概念,论述了在役结构动态可靠度分析的特点以及新建结构的可靠度、不维修结构的动态可靠度、结构的维修和拆除准则以及维修方案的优化等相关问题。

1.2.2 国外在役桥梁检测评估研究现状

20世纪80年代,一些发达国家,桥梁工作的重点逐步转移到在役桥梁的养护维修、检测评估和加固两个方面,并取得了长足的进展。

美国联邦公路研究组织主持开展了关于“在役桥梁的承载力评定”的研究课题,1988年开发了世界上第一个桥梁管理系统“国家桥梁档案数据库”,美国的桥梁状况等级评价包括桥面、上部结构、下部结构、水道及水道保护等四个构件组,它们涵盖了桥梁结构和水道及水道保护的所有构件,其中评估包括下部结构、上部结构、水道及水道保护等四个构件组,它们涵盖了桥梁结构和水道及水道保护的所有构件,其中评价用的状态级别,各构件的状况等级用0~9的自然数表示,其中9表示最佳的状况。

1994年J. de Brito等采用FORM(First-order Reliability Methods)方法针对混凝土桥梁开发了桥梁管理专家系统。系统功能分为两大模块:检测模块(进行桥梁现场信息定期采集,基于知识的交互式系统作为补充)和桥梁管理策略优化模块(包括检测策略、养护和维修三个子模块)。

H. G Melhem和Senaka Aturaliya采用专家系统工具CLIPS(C Language Intergrated Production System)建立了桥梁总体评价程序,提出了采用模糊加权向量方法,得到相应各评价子集的模糊加权向量,提高了最终评价结果的稳定性,支持检测评价结果的分散性,克服了对部分监测可能不精确检测结果的敏感性。系统对桥梁结构的最终评价价值分为1~9级,并按照各级指标的权重及评价结果进行检测和维修策略的制订。

1996年,Hitoshi、Furuta等采用遗传算法(Genetic Algorithms)与神经网络(Neural Networks)相结合的方法开发了桥梁损伤模糊评价专家系统。

英国自1960年发生了一起桥梁在使用过程中垮塌的严重事件后,国家开始投入大量人力物力对旧桥能否满足现代交通承载要求的问题进行研究。1967年正式提出了桥梁防护规则,1978年将该规则加入了BS 5400。1980年,英国工程师协会发表了《在役结构的评估》。1984年提出了专用的桥梁评估规范,给出了评定桥梁承载力的一般原则。对于旧桥或已有损伤的桥梁,英国主要采用荷载试验的方法确定其承载能力。

1994年德国的Natke对已建结构损伤检测及可靠性评价作了深入研究,并编制了桥梁状况评价方法。该方法对桥梁结构的评价考虑交通安全性、稳定性和耐久性,但对单个病害和缺陷的详细记录和评价,没有把病害的评价和状况等级的评价没有唯一的联系,缺乏统一的评定模型,最终的分析结果是基于检查者的经验得到的,且对桥梁检测工程师的专业水平要求比较高,进行具体技术状况评定的花费也相对较高。目前,德国桥梁病害和

状况评价是基于单独病害细节进行评价,在结构检查中检测到的病害均应根据交通安全性、稳定性和耐久性的准则单独进行评价。每个病害发生的范围必须用定性的文字如“少量、中等、大量”来标示。新的技术病害和桥梁状况评价体系中,把结构物划分为13个构件组,每个构件组可再分为更细的结构构件。对每个构件组病害的评价,均有标准的病害评价等级分类,并有对病害的简单描述和对一些特征病害的再细分。把桥梁结构状况共定义了6个等级。

前苏联对已建结构的可靠性也进行了大量研究,并对荷载、抗力分布的确定都提出了明确的原则;加拿大的桥梁评定是以结构各部分性能、状况为主要内容进行量级评价,排出优劣次序。

日本 Kusida M, Miyamoto A 等认为桥梁管理系统应该具有桥梁状态评估功能,并利用机器学习建立了混凝土桥梁等级评估专家系统(BREX),其目标就是评估桥梁结构在诸多因素下的状态功能,如承载能力、耐久性能等。

丹麦的桥梁状况等级评价,首先评价桥梁结构的15个标准构件的状况,确定每个构件的病害类型。病害的范围一般在现场确定,若有可能,应根据调查得到的几何数据辅助确定。完成所有桥梁构件的状况评价后,根据这些数据进行整座桥梁的状况评价。构件中的最不利的状况等级并不一定是全新的状况等级,最终的结构评价应能反映有病害的构件、类型、病害的范围、病害的预期发展和病害对交通安全性的影响等。总体原则是全桥的状况等级不能高于构件中的最高的状况等级,也不能低于任何主要构件(如主梁、桥墩、桥台、支座、桥面板等)的状况。

A. Emin Aktan, Daniel N. Fathey 等总结了利用综合分析和试验分析来进行桥梁状态的综合评估。通过对7座实际桥梁的非破坏性、破坏性检测以及结构识别,阐述了桥梁状态评估和可靠性评估技术。

1.3 在役桥梁检测评估目的与意义

通过桥梁结构的检测和评价来确定实际承载能力和必要的统计分析数据,对现有桥梁在使用过程中的安全性、可靠性和病害所产生的维修和加固方案选择提供有效的参考。统计数据可以用现代信息手段为桥梁结构于建立一个数据库,所以,对现有桥梁检测和评估和新结构设计理论可以推进和发展。我国的公路桥梁基本上是新中国成立以后修建的,尤其是进入20世纪80年代经济迅猛发展,桥梁建设也进入了高潮,所以大部分桥梁的桥龄一般在30年以上,病害问题将大量暴露,致使当前已有一定数量的桥梁发生老化、损伤现象,承载能力明显降低,危桥数量逐年增多,事故频发。对在役桥梁结构进行检测评估的目的和意义如下:

(1) 由于很多在役空心板桥梁修建的时间久远, 普遍存在原设计图纸遗失、不全等情况, 为该类桥梁的检测评估工作增加了额外的难度, 有必要开展此类桥梁的检测评估研究工作。

(2) 对于运营使用多年的桥梁结构, 主要部位出现缺陷, 例如裂缝、错位、沉降等, 通过检测桥梁损伤的程度, 从而评估桥梁结构的实际承载能力。

(3) 由于社会经济的发展, 交通量的增加和超载现象的日益普及, 对于现有桥梁的承载能力的要求也越来越高, 通过开展桥梁的检测评估工作, 可以确定原有桥梁的荷载等级, 从而确定是否需要加固来提高桥梁结构的荷载等级。

(4) 随着我国现代工业建筑的发展, 特大型工业设备、集装箱运输变得越来越频繁, 超重型车辆和大型整体设备或结构过桥经常发生, 通过检测评估可以定量确定超重车辆能否安全通过, 若不能安全通过, 为临时加固方案提供技术支撑。

(5) 桥梁结构在遭受自然灾害时, 如泥石流、地震、洪水等而受到损坏, 或在建造、运营过程中发生严重缺陷(严重质量事故、过度变形和意外撞击等)时, 通过进行检查和评估, 及时反映桥梁状况, 为桥梁结构的处理提供资料。

(6) 历史悠久或桥梁设计和施工数据缺失不全的桥梁, 通过检测评估, 划分桥梁所在等级, 整理和积累桥梁使用过程的资料, 对桥梁进行标准化的管理和维护, 确保良好的工作条件和必要条件, 但同时也建立或积累桥梁技术文件信息的基本方法。指导未来的桥梁养护, 在未来可以更好的保护和管理桥梁。

(7) 使用计算机技术和检测得到的桥梁数据, 进行分析和计算, 建立相应的数据库, 可以更有效的提高数据的可靠性, 并能降低检测时间和检测人员的工作量。

(8) 对于新建重要大桥或特大桥、经过加固维修后桥梁结构进行检测评估, 可以确定桥梁的设计的合理性和施工的质量, 确保工程可靠度。

(9) 对于新型桥梁结构, 可以通过结构的检测和评估, 验证设计理论可靠性, 并对结构发现的问题进行了综述和分析, 寻求改进方法和改进途径, 在未来的应用过程中不断完善。

第2章 在役空心板桥梁的病害类型及机理研究

在役空心板桥梁结构,由于设计考虑不周、施工控制不严、养护管理不到位以及混凝土本身老化等原因。导致空心板产生裂缝、碳化、蜂窝、麻面、露筋、掉角、剥落、钢筋锈蚀和铰缝破坏等不同程度的病害。这些病害降低了混凝土的强度,影响了结构的安全使用性能,有必要开展病害类型调查及机理研究工作。

2.1 混凝土裂缝

混凝土是一种由粗骨料、细骨料、水泥、水及外加剂,经拌和硬化后形成的具有堆聚结构的复合材料,为材质非均匀的脆性材料。在温度、湿度变化及硬化过程中,混凝土体积会发生微变。混凝土硬化之后,当混凝土中拉应力大于混凝土抗拉强度值时即产生裂缝。钢筋布置不适当及钢筋锈蚀也会产生裂缝。

混凝土梁结构的裂缝是有内部材料的初始缺陷、微小裂缝逐渐扩展而引起的结果。引起裂缝的原因很多,可以归为两大类。

(1) 结构性裂缝也可称为受力裂缝。主要由外荷载引起,其裂缝分布及宽度、深度与外荷载相对应。这种裂缝的出现,表明结构承载力可能不足或存在其他严重问题。

(2) 非结构性裂缝。通常由变形引起,如环境温度变化、混凝土的收缩徐变、地基的不均匀沉降等因素引起混凝土变形受到限制时,在结构内部产生自应力,当自应力值大于混凝土的抗拉强度极限值时,就会产生混凝土裂缝。

2.1.1 结构性裂缝

在混凝土即将开裂的瞬间,钢筋应力远小于使用阶段钢筋应力,因此在使用阶段钢筋混凝土结构出现裂缝是不可避免的,称为正常裂缝。实践证明,在正常使用条件下,裂缝宽度小于0.3mm时,钢筋不致生锈。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD 62—2004)规定:钢筋混凝土构件和B类预应力混凝土构件,其计算的最大裂缝宽度不应超过下列规定的限值:钢筋混凝土构件或采用精轧螺纹钢筋的预应力混凝土构件对于Ⅰ类及Ⅱ类环境为0.2mm,对于Ⅲ类及Ⅳ类环境为0.15mm;采用钢丝或钢绞线的预

应力混凝土构件,对于Ⅰ类及Ⅱ类环境为0.10mm,对于Ⅲ类及Ⅳ类环境中不得进行裂缝的B类构件设计。Ⅰ类环境指温暖或寒冷地区的大气环境,与无侵蚀性的水或土接触的环境。Ⅱ类环境指严寒地区的大气环境;使用除冰盐环境;滨海环境。Ⅲ类环境指海水环境。Ⅳ类环境指受侵蚀性物质影响的环境。

结构性裂缝除正常裂缝外,主要包括以下几种:

(1) 荷载裂缝。

1) 受弯裂缝。当空心板主梁受拉区拉应力超过混凝土抗拉强度时出现弯曲开裂。随荷载的增大,裂缝宽度、深度增大,长度延伸缝数增多,裂缝区域逐渐向两侧发展,这种类型的裂缝主要发生在简支梁空心板跨中下缘或连续梁空心板支座上缘。产生这种裂缝的原因包括设计截面尺寸不合理、混凝土标号过低、主筋配置过少、荷载过大等。

2) 受剪裂缝。发生在剪应力最大的部位。对空心板主梁,往往发生在支座附近,由下部开始,沿着与轴线 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 左右的角度开裂。随着荷载增大,裂缝深度、宽度不断增大,裂缝长度不断增长并向受压区发展,裂缝数量增加且逐渐向跨中方向扩大。产生这种裂缝的原因包括设计截面尺寸不合理、混凝土标号过低、箍筋配置过少或间距太大、荷载过大等。

3) 受压裂缝。在承压应力大的部位,对于空心板梁往往发生在预应力张拉端附近或出现局部拉应力导致产生与压力方向平行的多条局部受压裂缝,甚至导致局部混凝土压碎。产生这种裂缝的原因包括混凝土标号过低、锚下配筋不合理、荷载过大等。

(2) 施工裂缝。

在混凝土结构浇筑、构件支座、起膜、运输、堆放、拼装及吊装的过程中,由于各种原因而产生裂缝。主要有以下情况:

1) 混凝土搅拌、运输时间过长,使水分蒸发,引起混凝土浇筑坍落度过低,使混凝土出现不规则的网状裂缝。

2) 在混凝土初期养护时,由于浇水不足或不及时或遇大风天气施工,混凝土表面急剧干燥,出现塑性收缩状态,会在混凝土表面产生不规则裂缝,一般深度较浅。

3) 混凝土骨料中的土过多,会使混凝土随着干燥而产生不规则网状裂缝,并使混凝土强度降低。

4) 混凝土浇筑后振捣不密实,出现蜂窝,形成各种荷载裂缝的起点。

(3) 不均匀沉降引起的裂缝。

这类裂缝宽度较大,往往在节点处易产生,常见于双柱或多柱式盖梁墩台。盖梁两端发生的裂缝方向相反,下沉柱上的盖梁与柱接头处可能发生水平裂缝。

2.1.2 非结构性裂缝

(1) 混凝土收缩裂缝。

在混凝土凝固过程中,水分由表及里逐步蒸发,截面上温度不等,内外干缩量不一

样,当混凝土表面收缩变形受到混凝土内部约束或其他约束限制时,即在混凝土中产生拉应力,引起混凝土开裂。

收缩裂缝发生在混凝土面层,裂缝浅而细,宽度多在 $0.05\sim 0.2\text{mm}$ 之间。多沿空心板梁短边方向,均匀分布于相邻两钢筋间,方向与钢筋平行。对高度较大的钢筋混凝土梁,由于腰部水平钢筋间距过大,在腹板产生竖向收缩裂缝,但多集中在构件中部,中间宽两头细,至梁的上、下缘附近逐渐消失,梁底一般没有裂缝。

(2) 温度裂缝。

钢筋混凝土结构随着温度变化将产生热胀冷缩变形,当受到约束时,在混凝土内部会产生拉应力,当此拉应力达到混凝土的抗拉强度极限值时,就会引起混凝土开裂。按结构的温度场不同、温度变形、温度应力不同,温度裂缝可分为三种类型:

1) 主梁截面均匀温差裂缝,一般桥梁结构为杆件体系长细结构,当温度变化时构件截面受到均匀温差的作用,可忽略截面两个方向的变形,只考虑沿梁长方向的温度变形,当这种变形受到约束时,在混凝土内部就会产生拉应力,出现裂缝。

2) 主梁截面上、下温差裂缝,当外界温度骤然变化时,会造成空心板内外的温度差,考虑梁为长细结构,可简化为沿梁的竖向温度梯度来处理,假设梁的截面高度方向呈线性变化。在这种温差作用下,梁不但有轴向变形,还伴有弯曲变形。梁的弯曲变形在超静定结构中不但引起结构位移,且因多余约束存在还要产生结构内部温度应力。当上、下温差变形产生的应力达到混凝土抗拉强度极限值时,混凝土开裂。

3) 截面内外温差裂缝,大体积混凝土产生大量水化热不易散发,内部温度不断上升,而混凝土表层散热较快,使截面内部产生非线性温差。另外,预制构件采用蒸气养护时,由于混凝土升温或降温过快,致使混凝土表面剧烈升温或降温,使截面内部产生非线性温差。在温差作用下,结构产生弯曲变形,且符合平截面假定,截面纵向纤维因温差的伸长而受到约束,产生温度自应力,易造成混凝土开裂。

混凝土温度裂缝有以下特点:①裂缝发生在板上时多为贯穿裂缝,在梁上时多为表面裂缝。②梁板式结构或长度较大的结构,裂缝多是平行于短边。③大面积结构裂缝多是纵横交错,没有明显的规律性。④裂缝宽度一般在 0.5mm 以下,且沿结构全长没有多大变化。

2.2 混凝土碳化

混凝土的碳化是混凝土所受到的一种化学腐蚀。空气中 CO_2 气渗透到混凝土内,与其碱性物质起化学反应后生成碳酸盐和水,使混凝土碱度降低的过程称为混凝土碳化,又称为中性化。

2.2.1 碳化原理

混凝土的碳化的化学反应为： $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 。水泥在水化过程中生成大量的氢氧化钙，使混凝土空隙中充满了饱和氢氧化钙溶液，其碱性介质对钢筋有良好的保护作用，使钢筋表面生成难溶的 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ，称为钝化膜。碳化后使混凝土的碱度降低，当碳化超过混凝土的保护层时，在水与空气存在的条件下，就会使混凝土失去对钢筋的保护作用，钢筋开始生锈。可见，混凝土碳化作用一般不会直接引起其性能的劣化，对于素混凝土，碳化还有提高混凝土耐久性的效果，但对于钢筋混凝土来说，碳化会使混凝土的碱度降低，同时，增加混凝土孔溶液中氢离子数量，因而会使混凝土对钢筋的保护作用减弱。

2.2.2 碳化影响因素

影响混凝土碳化速度的因素是多方面的。首先，影响较大的是水泥品种，因不同的水泥中所含硅酸钙和铝酸钙盐基性高低不同；其次，影响混凝土碳化主要还与周围介质中 CO_2 的浓度高低及湿度大小有关，在干燥和饱和水条件下，碳化反应几乎终止，所以这是除水泥品种影响因素以外的一个非常重要的原因；再次，在渗透水经过的混凝土时，石灰的溶出速度还将决定于水中是否存在影响 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解度的物质，如水中含有 Na_2SO_4 及少量 Mg^{2+} 时，石灰的溶解度就会增加，如水中含有 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 对抵抗溶出侵蚀则十分有利。因为它们在混凝土表面形成一种碳化保护层；另外，混凝土的渗透系数、透水量、混凝土的过度振捣、混凝土附近水的更新速度、水流速度、结构尺寸、水压力及养护方法与混凝土的碳化都有密切的关系。

2.3 钢筋锈蚀

2.3.1 钢筋锈蚀机理

混凝土结构中的钢筋同时满足以下三个条件时就会产生锈蚀：①钢筋表面存在电位差，不同电位的区段之间形成阳极和阴极；②阳极区段的钢筋表面处于活化状态，在阳极发生反应， $\text{Fe} - 2\text{e} = \text{Fe}^{2+}$ ；③存在水分和溶解氧，在阴极发生反应， $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e} = 4(\text{OH})^-$ 。