

混凝土梁桥病害 与设计施工偏差分析

Analysis on concrete beam bridges defects due to design & construction deviations

周志祥 吴海军 沈小俊 赵文秀 编著



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

Analysis on concrete beam bridges defects due to design & construction deviations

混凝土梁桥病害与设计施工偏差分析

周志祥 吴海军 沈小俊 赵文秀 编著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书主要从设计偏差、施工偏差、设计与施工的偏差、使用偏差等四类偏差来分析混凝土梁桥的病害及其发生原因。阐述了这四类偏差的基本概念,通过试验研究、理论计算,并结合大量的工程实例,对预应力空心板梁、空心板桥、连续箱梁桥及连续刚构桥等多种病害形成的原因、发展趋势以及危害程度等进行了分析,提出了避免出现这些问题的建议和相应措施。

本书可供从事桥梁工程设计、施工、养护的研究人员、技术人员、管理人员参考借鉴,也可作为相关专业教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土梁桥病害与设计施工偏差分析 / 周志祥等编

著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.9

ISBN 978-7-114-12496-9

I. ①混… II. ①周… III. ①钢筋混凝土桥—病害—
诊断②钢筋混凝土桥—桥梁设计③钢筋混凝土桥—桥梁施
工 IV. ①U448.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 219341 号

书 名:混凝土梁桥病害与设计施工偏差分析

著 作 者:周志祥 吴海军 沈小俊 赵文秀

责任编辑:刘永芬

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.ccpress.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:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:14.25

字 数:333 千

版 次:2015 年 11 月 第 1 版

印 次:2015 年 11 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12496-9

定 价:35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



前 言

Foreword

20 世纪 90 年代以来,随着高等级公路的大量修建,混凝土梁桥因构造简单、施工方便、受力明确而得到迅猛发展和广泛应用,迄今混凝土梁桥已达公路桥梁总数的 80% 左右。混凝土梁桥正常使用寿命本应在 50 年以上,然而为数不少的桥梁实际投入使用十余年甚至一两年后就相继出现了不同程度的病害甚至垮塌事故,问题究竟出在哪里?这是值得所有参与桥梁设计、建设、管养及研究人员反思的。笔者自 20 世纪 80 年代以来直接或间接参与桥梁设计、建设、管养及研究达 30 余年,对混凝土梁桥部分病害及产生的原因有深刻的认识,在与其余三位作者共同研讨后形成了本书,期望对今后混凝土梁桥的设计、建设、管养及研究有一些借鉴意义和参考价值。

笔者将混凝土梁桥产生病害的主要原因划分为四类,即设计偏差、施工偏差、设计与施工的偏差、使用偏差。一般而言,单纯因设计错误导致混凝土梁桥后期病害所占比例相对较小,即混凝土梁桥的大多数病害是与施工相关联的,这一点在我国尤为突出。在发达国家,桥梁施工由受过专业教育并经过业务培训的技术工人完成,使实际施工完成的桥梁与设计理想的桥梁结构相对吻合,故桥梁的使用寿命相对较长。在我国过去 30 年里,常规混凝土梁桥的直接施工者主要是未受专业教育和系统业务训练的民工,由于缺乏对桥梁结构内涵的理解,加之施工监管不到位,使实际施工完成的桥梁与设计理想的桥梁结构存在差异,这种差异的程度越大,出现病害的可能性越大,病害出现的时间越早,危害越大。在此现实情况下,原本精细化施工才能完成的结构或一些刚通过试验室验证的新技术,当通过主要由农民工组成的直接施工者应用到实际桥梁工程中时,就会出现诸多意料之外的问题,这是设计者需要考虑的因素。遗憾的是,不少设计者所完成的部分施工图忽视了施工人员在通常条件下达到设计要求的可行性,使实际施工完成的结构难以达到设计者对桥梁结构的内在要求;可见,问题的原因也并非仅是施工单方面的。

本书共分为六章,首先阐述了几种偏差的基本概念,然后通过试验研究、理

论计算,结合大量的工程实例,对预应力混凝土空心板梁、空心板桥、连续箱形梁桥及连续刚构桥的多种病害,从四类偏差的角度对其成因、影响、发展等进行了分析,对如何避免这些问题的出现提出了一些建议。从已有的桥梁工程实践及收集的病害资料来看,单纯的重大设计错误或单纯的重大施工错误均相对容易避免。为数不少的桥梁病害源于“正常的设计”由现实施工人员按“通常方式”建造,导致实际桥梁结构与“设计理想结构”存在明显偏差,这种偏差常常是内在的、不易察觉和不易避免的,且其影响较大。本书对这类设计与施工的偏差作了较多的讨论。笔者倡导,设计方在设计时宜站在施工方的角度、考虑按通常方式施工易于到达设计要求,施工方也应充分理解设计意图,使桥梁的主体结构及关键构造能够达到设计理想结构的内在要求;鼓励并奖励施工方、监理方对设计图纸提出问题及改进方案;对采纳的设计图纸优化变更方案并取得明显实效的提出者予以奖励。

本研究得到国家 973 计划项目(2012CB723300)和重庆市重点自然科学基金(cstc2012jjB0118)的支持,还先后得到交通运输部、重庆市交通委员会、重庆市交通委员会工程质量安全监督局、重庆高速公路集团有限公司、重庆市公路局、涪陵市交通委员会、彭水县交通委员会、巫溪县交通局、雅安市交通局、绵阳市建委、遂宁市建委、深圳高速公路股份有限公司等单位相关专家和支持和帮助,重庆交通大学的周建庭、范亮、张江涛、徐勇、高艳梅老师和王邵锐、李永久、丁小戈、周胜怡、许华东、贺鹏、李庆桐、李键等研究生参与了其中的一些研究工作,在此谨向所有参与本书工作及给予支持、指导、关心和帮助的单位领导、专家和个人致以真诚的感谢,同时感谢人民交通出版社对本书撰写和出版所作的大量工作。

诚然,本书是集长期以来桥梁建设、运营及研究资料撰写而成,但限于时间和水平,谬误之处在所难免,真诚恳请读者批评指正。

周士禛

2014 年 7 月于重庆交通大学

目 录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 混凝土梁式桥的发展概况	1
1.2 混凝土梁式桥常见病害与事故	3
1.3 混凝土梁式桥的4类偏差	6
第2章 30m 跨径预应力混凝土空心板梁试验研究	10
2.1 工程背景	10
2.2 预应力空心板的设计与制作	11
2.3 测点布置	12
2.4 施工阶段的力学性能及偏差分析	14
2.5 静载试验过程及偏差分析	24
2.6 设计施工偏差对空心板梁静力性能的影响	42
2.7 预应力混凝土空心板梁的长期受力性能探讨	49
2.8 研究结论及建议	55
第3章 空心板桥病害与设计施工偏差	58
3.1 空心板桥支座偏差及其对结构的影响	58
3.2 空心板桥铰缝病害的偏差分析	63
3.3 无盖梁连续板桥的病害与偏差分析	86
第4章 连续箱梁桥病害与设计施工偏差	95
4.1 连续箱梁桥病害实例	95
4.2 连续箱梁桥传统受力分析	96
4.3 薄壁箱形梁桥的空间行为分析	100
4.4 桥梁的荷载试验	113
4.5 各类偏差与病害表现	125
第5章 连续刚构桥病害与设计施工偏差	130
5.1 截面尺寸及材料方面的偏差	130
5.2 连续刚构桥(连续梁桥)的开裂病害	133
5.3 主跨跨中挠度过大的设计施工偏差	154

5.4	预应力束开槽疏管施工偏差对顶板性能的影响	167
5.5	主梁合拢顶推的设计施工偏差	176
5.6	底板预应力束张拉崩裂的设计施工偏差	182
第6章	混凝土梁桥其他常见偏差分析	190
6.1	尺寸偏差对结构性能的影响	190
6.2	预应力钢束保护层厚度偏差分析	194
6.3	预应力钢束附近混凝土局部缺陷的影响分析	201
6.4	先简支后连续梁桥桥墩偏位成因分析	205
6.5	独柱墩桥梁侧倾坍塌问题讨论	214
参考文献		219

第1章 绪 论

1.1 混凝土梁式桥的发展概况

梁式桥(图 1-1)是桥梁大家族中最古老、最基本的成员。在桥梁发展过程中,梁式桥一直占有重要的地位。梁式桥由于其构形简洁、施工方便,自古以来应用便十分广泛。梁式桥是以梁作为跨越结构的桥梁,其受力特性以受弯为主。在竖向荷载作用下,梁端支点处只产生竖向反力,不产生水平反力。梁一般平直安放,所以在古代,相对于拱桥和索桥而言,人们又将其称之为平桥。

20 世纪以来的梁桥多采用抗压性能好的混凝土和抗拉能力强的钢筋结合在一起,它主要包括钢筋混凝土梁桥、部分预应力混凝土梁桥和全预应力混凝土梁桥。梁桥按静力特性分为简支梁、悬臂梁、连续梁、T 形刚构、连续刚构 5 种体系;梁桥按断面形式可分为实心板、空心板、T 形梁、工字形梁、箱形梁等不同截面形式。

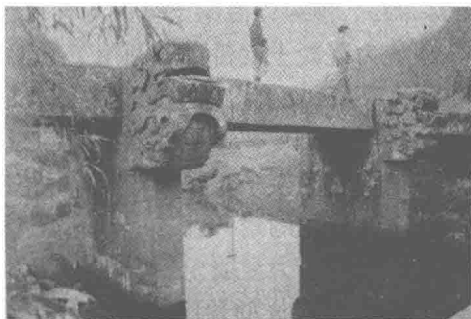


图 1-1 我国古代的梁桥

1.1.1 钢筋混凝土梁式桥的发展概况

钢筋混凝土梁桥已经具有百余年的历史。在我国,将钢筋混凝土应用在桥梁上,始于 20 世纪 20 年代。1921 年建成的河南洛阳的天津桥,由 21 孔简支 T 形梁组成,每孔跨度 9.2m,全长 206m;20 世纪 30 年代,日本在其侵占的我国东北地区修建铁路时,采用了为数不多的小跨度钢筋混凝土桥梁。直到 20 世纪 50 年代,随着我国交通建设事业的迅速发展,钢筋混凝土在各类桥梁工程中才得以大规模应用。目前,我国铁路和公路桥梁中的钢筋混凝土简支梁式结构最大跨度均达到 20m。

经过长期的实践和理论研究,对钢筋混凝土梁桥结构的设计理论在认识上已经日渐成熟,其施工技术也日趋完善。钢筋混凝土梁桥作为钢筋混凝土结构的一种,必然具有它本身的优点,即混凝土集料可以就地取材,成本较低;耐久性好,维修养护费用少;材料可模性强,可以按照设计意图做成各种形状的结构,例如为适应道路线形可以做成曲线桥;可采用装配式结构,工业化程度高,既提高工程质量又加快工程进度;整体性好,结构的刚度较大,变形小等。

1.1.2 预应力混凝土梁式桥的发展概况

1886 年和 1888 年,美国人杰克逊和德国人多林先后获得了在楼板上预加应力的专利。但都由于技术或经济上的原因,预应力技术未能立即得到推广和应用。直到 1928 年,法国人弗莱西奈(Freyssinet)将高强度钢丝用于预应力混凝土,使在混凝土中建立永存的预压应

力成为可能,这才奠定了现代预应力混凝土的实用基础。11年后,他又发明了能够将具有极大拉力高强度钢丝牢牢地锚固在混凝土构件两端的锥形锚具,以及专门用于张拉和锚固钢丝的双作用千斤顶。这一发明为预应力混凝土的推广和应用创造了条件。在此之前,德国人霍耶(E·Hoyer)还首先实现了依靠钢和混凝土间的直接黏结而建立预应力的工艺方案。但是,预应力混凝土的迅猛发展是在第二次世界大战后,是从迫切要求恢复战争创伤的西欧迅速发展起来的,半个多世纪以来,从理论、材料、工艺到土木工程的各种应用,都取得了极其巨大的发展与成就。在20世纪50年代,联邦德国的胡尔姆斯(Worms)桥的跨径已达到114.2m,其类型为T形刚构桥。

预应力混凝土将高强混凝土和高强钢材“能动”地结合在一起,这种结合靠张紧预应力钢筋并将其锚固于混凝土上,从而使混凝土受压。这种能动地结合使两种材料都能发挥其性能优势:预应力钢筋是延性材料,用预加应力的办法使其能在高拉应力下工作;混凝土是脆性材料在抗拉能力上不足,由于受到预压其性能得以改善,同时其抗压能力并未受到真正削弱。因此,预应力混凝土可谓两种现代高强度材料的理想结合。

预应力混凝土梁桥充分利用了上述优点,使构件的截面尺寸显著减小,由自重产生的内力也大大下降,这使得桥梁的跨越能力得到了显著的提高。同时,由于预应力混凝土梁桥在使用阶段不出现裂缝或者能有效地减小裂缝宽度,所以预应力钢筋混凝土梁桥的刚度通常较普通钢筋混凝土梁桥大,这样能显著减小建筑高度,使大跨径桥梁做得轻柔美观,同时进一步提高结构的耐久性。

我国的预应力混凝土梁桥,是从20世纪50年代才开始研究。1955年,我国铁路部门顺利完成了跨度为12m的预应力混凝土梁的试制和试验工作。1956年,在东陇海线跨越新沂河时,成功修建了一座28孔、跨径为23.8m的预应力混凝土铁路桥(新沂河大桥);1957年,公路部门在北京到周口店的卢沟桥附近建成了一座采用后张法施工的20m跨径试验性简支T梁桥,这是我国公路预应力混凝土桥的开端。1959年在兰州建成的7孔主跨37.5m的悬臂梁桥——七里河黄河桥,以及新城黄河桥等,奠定了我国建造预应力混凝土桥的基础。但是,在当时预应力混凝土只是用于中小跨的简支梁桥,其最大跨径为32m。随着我国交通建



图1-2 虎门大桥辅航道桥

设事业的快速发展,目前预应力不仅用于中小跨径桥梁,而且越来越多地应用于大跨度桥梁中。1997年建成的虎门大桥辅航道桥,主跨达270m(图1-2),是当时我国跨度最大的混凝土梁桥,也是目前跨度最大的纯混凝土梁桥。

在我国公路桥梁中,预应力混凝土梁桥不但在跨径上已跻身于大跨径桥的行列,而且在数量上已遥遥领先。在量大面广的中小跨径及

一般大跨径桥梁中,各种形式的预应力混凝土梁桥一直占据主导地位,并且有着广阔的发展前景。根据有关统计数字,截至2013年底,全国公路桥梁达73.53万座、3977.80万延米,桥梁数量居世界第一。其中混凝土桥梁占90%,配筋混凝土桥梁占85%,按照桥梁结构形式分,梁式桥占74%。

经过几十年的发展,随着大量预应力混凝土梁桥的修建与使用,预应力混凝土梁桥的设

计理论与实践也得到进一步发展和完善。无论在结构设计计算上,还是在施工技术上,预应力混凝土梁桥都已经相对成熟。近年来,在预应力混凝土梁桥的建设方面所取得的技术进步主要表现在以下几方面:

在结构材料方面,高强、早强、高性能混凝土,以及在特殊使用条件下的特种混凝土正在得到进一步推广和应用,商品混凝土和泵送混凝土应用日益广泛;在预应力技术上,高强低松弛钢绞线、大吨位群锚技术日益普及,目前 1860MPa 级的高强钢绞线几乎应用于所有新建大跨度预应力混凝土桥梁;各种预应力管道材料及成孔技术也日臻完善,真空辅助压浆及智能张拉技术逐渐推广;大吨位的新型支座,大位移量的伸缩缝也在不断推陈出新。

在结构设计方面,计算结构力学的发展和计算机的广泛应用,使得大型复杂桥梁的计算和绘图工作效率大大提高;同时,一些复杂的力学分析,诸如温度变化、混凝土徐变收缩、剪力滞效应、非线性、抗震等众多棘手的问题,可以通过电算求解出较为符合实际的结果。

在施工技术方面,以悬拼、悬浇为代表的各种无支架施工方法逐渐走向成熟,施工机具的现代化水平也不断提高,施工管理的水平也上了新的台阶。

随着结构材料、结构设计及施工技术的提高,我国的混凝土梁桥建设已取得了长足的发展和进步,获得了良好的社会效益和经济效益。

1.2 混凝土梁式桥常见病害与事故

近 40 年来,随着我国道路交通的迅速发展,一方面我国各类混凝土梁桥的跨度记录不断刷新,建桥综合技术已经达到国际先进水平。另一方面,在已建成的混凝土梁桥中,一些使用时间不长的混凝土梁桥却频繁出现不同程度的各类问题,甚至一些桥梁在修建过程中就出现严重质量问题,归纳起来,常规混凝土梁桥的主要问题表现有以下 3 种。

1. 开裂

众多预应力混凝土梁桥在施工或使用过程中,都曾不同程度地出现裂缝。裂缝产生的机理很复杂,按其成因可分为受力裂缝(由受力因素引起)和非受力裂缝(比如有拆模、养护、混凝土收缩、意外碰撞等因素引起)两大类。裂缝的出现将对结构的刚度和耐久性产生不利的影响。例如,预应力混凝土箱形梁桥较典型的受力裂缝有:箱梁顶板和底板的纵向裂缝,箱梁腹板的斜向裂缝,特别是靠近端支座范围的腹板斜裂缝。

要正确分析混凝土梁桥裂缝产生的成因,一般应结合裂缝产生的位置、方向、长度、宽度、深度、间距等情况,从设计、施工和材料质量等方面进行分析。引起开裂的结构设计方面可能的原因有:桥跨结构布局、截面尺寸拟定的不尽合理;截面抗弯、抗剪、抗扭能力不足,局部承压能力不够;对温度应力、收缩徐变等次生内力考虑不足;对混凝土薄壁箱形、T 形或 π 形截面梁的畸变次内力考虑不足。引起开裂的施工工艺方面可能的原因有:混凝土的浇筑、养护与拆模工艺不当;支架的变形过大或拆除过早;预应力的张拉控制不当,导致有效预应力偏低;保护层厚度不符合要求;过分追求工期,施加预应力时混凝土的龄期偏短,造成混凝土结构的内部损伤;还有一些是由于施工管理不当造成的质量事故,比如,实际施工时的混凝土配合比失控,外加剂掺量随意,桥面铺装严重超厚等。

2. 后期变形过大

20 世纪 70 年代后,我国修建了大量跨越江河和线路的预应力混凝土梁桥。其中,预应

力混凝土连续刚构桥由于具有结构受力合理、施工方便、行车平顺、维护费用低等优点而被广泛采用。

然而随着连续刚构桥数量的增加及运营时间的增长,工程病害也随之而来,主要表现为:成桥后期主跨跨中挠度过大,有些甚至严重地影响到桥梁的正常使用,这在近年来修建的大跨度预应力混凝土连续刚构桥中已成为一个较普遍的问题。

目前,国内外大跨径连续刚构桥均存在不同程度的主跨跨中挠度过大的问题,笔者将世界范围内典型的 10 座连续刚构桥主跨跨中挠度观测值整理,如表 1-1 所示。

国内外典型大跨径连续刚构桥主跨跨中下挠观测值

表 1-1

桥 梁 名 称	跨径组合(m)	竣工年份(年)	观测年份(年)	主跨跨中 挠度值(cm)
广东虎门大桥辅航道桥	150+270+150	1997	2003	22.2
湖北黄石长江公路大桥	162.5+245×3+162.5	1995	2001	30.5
美国 Koror Babeldaob 桥	72+241+72	1978	1990 (1996 年倒塌)	120
重庆江津长江公路大桥	140+240+140	1997	2007	31.7
挪威 Stivest 桥	100+220+100	1993	2001	20
美国 Parrots Ferry 桥	99+195+99	1978	1990	63.5
广东洛溪大桥	65+125+180+110	1988	1991	6
英国 Kingston 桥	62.5+143.3+62.5	1970	1998	30
三门峡黄河公路大桥	105+140×4+105	1992	2002	22
广东南海金沙大桥	66+120+66	1994	2001	22

连续刚构桥主跨跨中挠度过大的主要特征为:(1)挠度持续增长,增长率随时间可能呈减速、加速或匀速变化的趋势;(2)结构的长期挠度远远大于设计计算的预计值^[7]。连续刚构桥跨中挠度过大不仅影响到桥梁线形美观和行车舒适性,影响到结构的安全,还会加速桥面铺装层破坏,降低桥梁的耐久性。同时跨中挠度过大会使箱梁梁体产生较大的主拉应力,从而加剧箱梁梁体开裂,而箱梁梁体裂缝的增多又会使结构的刚度降低,进一步加剧跨中下挠,两者形成恶性循环,逐渐使结构承载能力下降。这已成为连续刚构桥运营过程中一个重大的安全隐患。

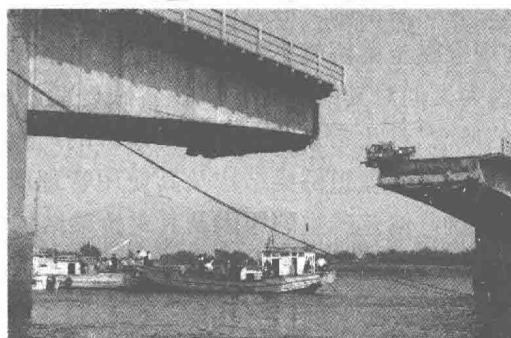
3. 桥梁坍塌事故

由于以往的桥梁设计往往注重对经济指标的追求,安全储备相对较低。桥梁建设之初的设计标准与后期实际荷载条件不匹配,随之带来了桥梁承载能力不足、桥面宽度不能适应

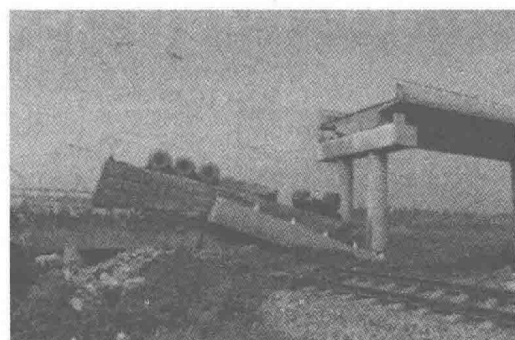
社会经济发展后的行车要求等。更为严峻的是施工队伍的素质良莠不齐,致使桥梁普遍存在不同程度的病害问题,加之桥梁的后期维护检测又未能得到足够的重视,造成我国相当数量的已建桥梁早期劣化比发达国家桥梁更加严重,甚至发生多起在建桥梁的垮塌事故。再者,超期超载使用的各种危桥、旧桥也不在少数。近些年发生的造成较大危害的典型混凝土梁桥事故包括(图 1-3):



a) 台湾高屏大桥



b) 辽宁盘锦市辽河大桥



c) 京津高速公路匝道桥



d) 吉林长春市荣光大桥



e) 浙江杭州钱江三桥辅桥

图 1-3 近年来典型的混凝土梁桥坍塌事故

(1) 2000 年 8 月,台湾省高屏大桥突然断裂,导致 17 辆汽车坠落高屏溪,22 人受伤。

(2) 2004 年 6 月,辽宁省盘锦辽河大桥中孔突然倒塌。

(3) 2009 年 7 月 15 日凌晨 1 时 33 分,京津高速公路港塘收费站 800m 外匝道桥坍塌,5 辆载货车坠落,造成 6 人死亡,4 人受伤。

(4)2011年5月,吉林省长春荣光大桥桥面突然坍塌,坍塌面积有 70m^2 ,一辆正在驶过的货车坠入河中,致使车上2人不同程度受伤。

(5)2011年7月,浙江省杭州钱江三桥辅桥主桥面右侧车道部分桥面突然塌落,使得一辆重型半挂车从桥面坠落。

对常规混凝土梁桥而言,由于其设计、施工及使用管理规范是在数十年理论研究和工程实践经验积累基础上形成的,若设计、到施工、投入使用三个阶段都严格按照相应规范执行,则常规混凝土梁桥就不应该如此普遍地出现上述三类问题(对新型大跨混凝土梁桥可以例外,因为人们对其的理性认识及实践经验积累都需要有足够的时间)。为此,笔者提出“偏差”的概念,认为常规混凝土梁桥病害的产生都可归结为设计、施工及使用管理执行过程中与设计之初的理想桥梁结构及其使用管理产生的偏差,本书针对几种常用混凝土梁桥着重讨论了这些偏差产生的原因及其对桥梁结构性能的影响。

1.3 混凝土梁式桥的4类偏差

笔者历经了30余年中国公路交通的高速发展时期,亲自参与了数百起混凝土梁桥病害事故的分析与处理,对其间设计、施工及管理中的问题有较深刻的体会和认识;为从根源上尽量减少这些病害事故的发生,特将混凝土梁桥发生病害事故的原因归结为4种偏差,即设计偏差、施工偏差、设计与施工的偏差、使用偏差。

1. 设计偏差

设计偏差的实质是设计错误。设计人员由于缺乏工程经验、或认知水平不足、或粗心大意,对桥梁结构的计算理论、简化图式、作用效应、细部构造等类似问题把握不准或者考虑不周,导致错误的设计结果而给桥梁结构带来先天的缺陷。在长达30余年的中国公路交通高速发展过程中,桥梁设计人员的数量远不能满足公路交通高速发展建设的需要,有一定经验和水平的桥梁设计工程师更为稀少,加之设计任务重,设计周期短,使设计人员没有足够的时间和精力投入桥梁设计,由此导致的设计偏差并非罕见。举例说明如下:

(1)桥梁结构设计规范中的计算公式均有适用条件的限制,如正截面抗弯强度计算公式有受压区高度(最大配筋率)和最小配筋率的限制,斜截面抗剪强度计算公式有截面最小尺寸(最大配箍率)和最小配箍率的限制。有些缺乏经验的设计者注重了按计算公式进行抗弯或抗剪钢筋的配置,忽视了该类计算公式的适用条件,导致表面上实际配筋满足了所谓的计算结果,但实际结构却因强度不足或过低配筋而出现结构性病害。

(2)重庆市内某立交桥,下部结构为无盖梁的双立柱桥墩,上部结构为整体现浇的两跨连续空心板桥,建成后不到一年主梁即发现大量超标裂缝。后查明设计者将该桥梁结构按平面杆系计算简化为两跨连续梁桥,但实际上该连续空心板桥在中间墩处仅有双立柱桥墩对应的两点为刚性支承,中间墩处的其余各点均为刚度不同的弹性支承,致使按平面杆系得到的正弯矩分布区段长度和峰值的计算结果明显小于实际连续空心板桥,从而导致主梁裂缝大量超标现象的发生。

(3)20世纪90年代设计建造的某地高速公路桥梁,上部结构为预应力混凝土T形梁桥,下部结构为双立柱+盖梁的桥墩,运行一年后发现立柱处盖梁上部裂缝宽度达到 0.6mm 。后经查明,设计使用了数年前设计荷载等级较低的盖梁配筋设计,使盖梁钢筋用量

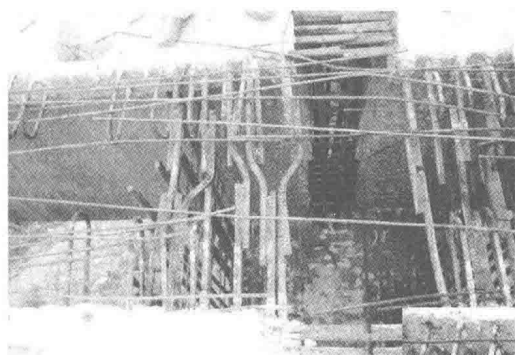
较正常计算需要的钢筋用量减少了约 1/3,致使盖梁上部裂缝显著超宽,幸亏检查发现病害相对及时,避免了灾难性后果发生。

2. 施工偏差

施工偏差是指实际施工的结构尺寸、钢筋位置、混凝土品质、建造缺陷、工艺控制等明显偏离设计期望值和施工规范相关误差的控制标准,由此导致引发桥梁结构病害问题的施工缺陷。在长达 30 余年的中国公路交通高速发展过程中,桥梁建造的技术工人十分匮乏,常规混凝土梁桥的直接施工者主要是未受专业教育和系统业务训练的民工,这些人员缺乏对桥梁结构内涵的理解,加之通常施工任务重,施工工期短,使施工及管理人员难有足够的时间和精力按设计图纸及施工规范要求中规中矩地完成施工,由此导致的施工偏差较为多见。举例说明如下:

(1) 由于模板制作和固定不佳,浇筑混凝土发生胀模的现象时有发生,对受拉或受弯构件钢筋位置不变则构件承载力无增加,但钢筋外围混凝土因胀模而使结构自重增加;施工完成的桥面板凹凸不平,致使不得不通过增加桥面铺装层厚度来调节,也会使桥梁恒载明显增大。

(2) 钢筋安装或定位不佳,使钢筋位置发生明显偏差,将会降低钢筋混凝土结构的承载力和使用性能[图 1-4a)]。



a) T梁湿接缝钢筋扭曲及位置偏差



b) 钢筋及波纹管下的混凝土空洞缺陷

图 1-4 钢筋偏差

(3) 混凝土施工是桥梁施工最易发生问题的环节,主要有原材料品质、现场拌和配比及控制、浇筑振捣、后期养护等,每一环节出现问题均会对混凝土品质造成不利影响。如即使原材料进场质量符合要求,但现场分类堆料管理不到位,会使原材料受到污染;通过质量检验的混凝土配合比,当应用于工地现场时,若直接操作人员忽视了对各组分材料量的严格控制,则会使混凝土的品质明显降低,具体表现为强度降低、收缩徐变增大等;对雨后沙、石材料的含水率发生变化,在具体拌和时,其加水量需相应减少,能根据现场情况做出相应正确调整的直接操作人员可谓少见;按规范要求对混凝土的浇筑振捣,不漏振也不过振,对未经严格培训的民工来说并非易事;浇筑混凝土后的养护是保证混凝土质量的重要环节,但现场施工中常常被忽视或淡化;这些欠规范的施工行为尤其在约 2000 年前后六七年表现更甚。如 1994 年在四川建造的一座桥梁,某 30m 跨径 T 形梁,在浇筑混凝土一周后尚未终凝,后查明原因是减水剂多掺加了正常值的 10 倍,最终该 T 形梁被报废拆除。

(4)如钢筋数量不够、位置严重偏离、制作缺隔或安装反向、混凝土局部空洞[图 1-4b)]等明显违背设计施工图的错误均属建造缺陷,这些缺陷的存在将使桥梁结构承载力降低,或影响使用功能及使用寿命。

预应力混凝土桥梁中的预应力束的张拉及控制是最容易出现問題并引起结构病害的施工环节,主要有预应力束安装质量、张拉方式、控制方法及直接操作人员的认知水平和工作态度。若预应力束管道线形安装波浪扭曲将增大张拉时管道与钢束间的摩阻力;管道接头质量不良导致混凝土浇筑时浆液渗入填充管道,严重阻碍预应力束的张拉传力;不符合规范或设计要求的张拉方式和张拉顺序,会增大由分批张拉产生弹性压缩引起的预应力损失或致混凝土结构产生意外的裂缝损伤;预应力束预张拉、张拉速度、超张拉、张拉吨位、伸长变形、持荷时间等控制不当均可能使有效预应力降低或致混凝土破损;由于每一环节都需人工操作,故直接操作人员的认知水平和工作态度对预应力施工质量起着至关重要的作用。

3. 设计与施工的偏差

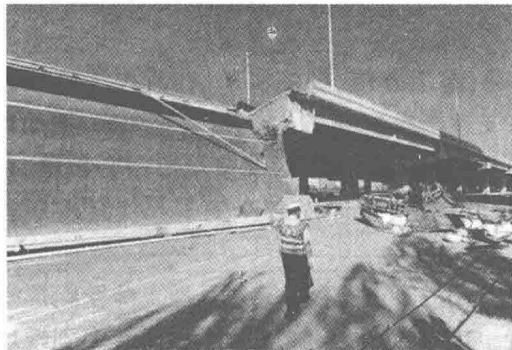
设计与施工的偏差是指设计者根据现有的认知水平和传统观念做出符合当时一般认知的正常设计(不存在明显的设计错误);施工人员也是按照设计图纸进行正常施工,其施工质量也基本符合当时大环境(直接施工者主要是未受专业教育和系统业务训练的民工)下的正常控制水平,但最终施工得到的实际桥梁结构与设计理想结构之间存在较明显的差异。产生设计与施工的偏差的主要原因是设计者忽视了完成该桥梁施工的人员能够达到的正常水平,将实际操作性很强的桥梁设计理想化,如欲使未受专业教育和系统业务训练的民工去从事需精工细作的桥梁结构施工,实际上是很难达到设计者的理想意图;另一方面,由于多数直接施工人员缺乏对桥梁结构内涵的理解并在施工中加以注意,使实际施工完成的桥梁结构有其外形,但内部结构品质与设计理想的桥梁结构存在明显差异。

例如,分节段悬臂浇筑施工的预应力混凝土连续刚构桥,相邻节段之间必然存在竖向接缝,通常设计者都将有多条竖向接缝的预应力混凝土连续刚构桥按整体匀质结构计算,但事实上竖向接缝局部区域内的混凝土在正常施工条件下为品质明显低于节段内混凝土的低质混凝土;其剪切弹性模量(剪切徐变)会明显降低(增大),在匀质结构的变形计算中通常可忽略的由剪力和轴力引起的变形,在存在多条竖向接缝的预应力混凝土连续刚构桥的变形计算中,则由低质混凝土竖向接缝引起的剪切变形和徐变可能成为主梁长期挠度增量的一个不可忽视的重要因素;接缝混凝土的局部薄弱也可能是裂缝发源点,这类因素在常规设计中均未考虑。

4. 使用偏差

使用偏差是指桥梁建成后运营交通量及荷载等级明显超过设计预期状况,桥梁的检测及养护维修工作明显低于相应规范要求的标准,导致桥梁产生结构性或耐久性病害,使桥梁承载力或使用性能降低。近 30 年来,随着社会经济的高速发展,公路交通量和车辆载重不断攀升,超重货车的数量也居高不下,使得为数不少的桥梁出现了超负荷运营,导致产生正常使用条件下不会产生的一些结构病害甚至垮塌事故。如 2011 年 11 月建成通车的哈尔滨阳明滩大桥,系中间墩为独柱墩的连续梁桥,于 2012 年 8 月 24 日在 4 辆超载车同靠桥梁一侧行驶过程中发生主梁侧翻倾覆垮塌,致 3 死 5 伤 4 辆车坠落[图 1-5a)]。若严格按照桥梁

设计荷载标准运营管理:即超过 55t 的车辆为超载车,超载车过桥须事先向桥梁管理部门提出申请,桥梁管理部门安排专门时间让该超载车单车一居中—缓慢过桥,据此可望完全杜绝该类主梁侧翻倾覆垮塌事故发生。然而超载车管理又谈何容易,致使近年来国内类似的主梁侧翻倾覆垮塌事故已发生了多起。另外,超限车辆对上跨桥梁的撞击致使桥梁严重受损的情况也时有发生[图 1-5b)]。一些经济或技术条件较差的地方公路桥梁,由于养护措施不当或者长期缺乏必要的检查维修,导致桥梁技术状况处于不确定或者严重损伤的状况,使桥梁在正常运营荷载作用下也存在明显的结构安全或耐久性问题。



a) 哈尔滨阳明滩大桥侧翻倾覆



b) 使用期间车辆超高导致主梁严重损伤

图 1-5 超载、超高事故

对于以上 4 种偏差,本书着重讨论前 3 种偏差,即设计偏差、施工偏差、设计与施工的偏差。换言之,本书主要讨论从技术层面采取措施就可能解决的桥梁病害问题,暂不涉及后期运营管理等相关政策层面的问题。

第2章 30m 跨径预应力混凝土空心板梁试验研究

2.1 工程背景

预应力混凝土空心板桥,构造简单、受力明确、施工方便、经济实用,在我国得到较为广泛的应用。其早期的常用跨径为13~20m,后来又逐渐发展到22m、25m直至30m;截面挖空形式也从早期的圆孔→椭圆孔→大倒角矩形孔,发展至大挖空率的薄壁箱形空心板梁,在一定程度上满足了当时人们对经济指标的追求,与此同时,也伴随着产生了一些结构病害和隐患。

2001年某高速公路的在建桥梁,主体结构为7孔30m跨径预应力混凝土薄壁箱形空心板桥,因其中一空心板梁在预应力张拉过程中发生钢绞线断裂,施工单位邀请专家到现场处理该钢绞线断裂事故。笔者查阅了该空心板梁设计图纸,发现该空心板即为大挖空率的薄壁箱形空心板梁:在10cm厚的底板中布置了4束预应力钢绞线平扁束,在11cm厚的腹板中布置了2束预应力钢绞线竖扁束,据此预言该类空心板日后会产生难以避免的裂缝,并将此担忧知会了相关部门,但因使用该类空心板设计图的同批次20余座桥梁已进入深度实施阶段,难以进行完善改进,相关设计技术人员也抱有不至于发生普遍开裂的侥幸心理。2002年实施了高速公路建成通车前的桥梁验收检查,在同批次建造的20余座30m跨径预应力混凝土薄壁箱形空心板桥中,无一例外的发现各桥均存在程度不同的沿预应力钢束底板的纵向裂缝,有的裂缝竟然沿空心板梁长贯通,此现象受到了相关部门和领导的高度重视,特委托笔者开展对30m跨径预应力混凝土薄壁箱形空心板的足尺构件施工、受载至破坏全过程的进行试验研究。

事实上,国内同时期修建的一些空心板桥在竣工不久后就出现不同程度的病害,一些桥梁在修建过程中即出现了质量问题。究其原因可以归纳为4个方面:

一是现行桥梁的设计理论和构造要求尚不完善,有待在实践中进一步总结、补充和修改,同时设计人员在设计时考虑不全面,对受力性能分析不周全,即产生了设计偏差;

二是施工过程中钢筋定位不准确,错误的操作顺序,机具设备的老化,施工人员的人为因素等导致产生了施工偏差;

三是设计时虽然满足各项要求,但未给施工操作留有一定的活动余地,不便于施工,而造成设计与施工的偏差;

四是运营过程交通量及荷载超过设计预期,加上检测和维护达不到规范要求,因而造成使用偏差。

笔者的课题组针对30m跨径空心板桥出现纵向裂缝这一情况,申请并承担了“30m跨径预应力混凝土空心板设计与施工偏差及其对结构性能的影响”的课题,期望通过对已建预应