

桥梁病害诊断 与改造加固设计

张树仁
王宗林

【编著】

QIAOLIANG BINGHAI ZHENDUAN YU
GAIZAO JIAGU SHEJI



人民交通出版社
China Communications Press

要 容 内

桥梁病害诊断 与改造加固设计

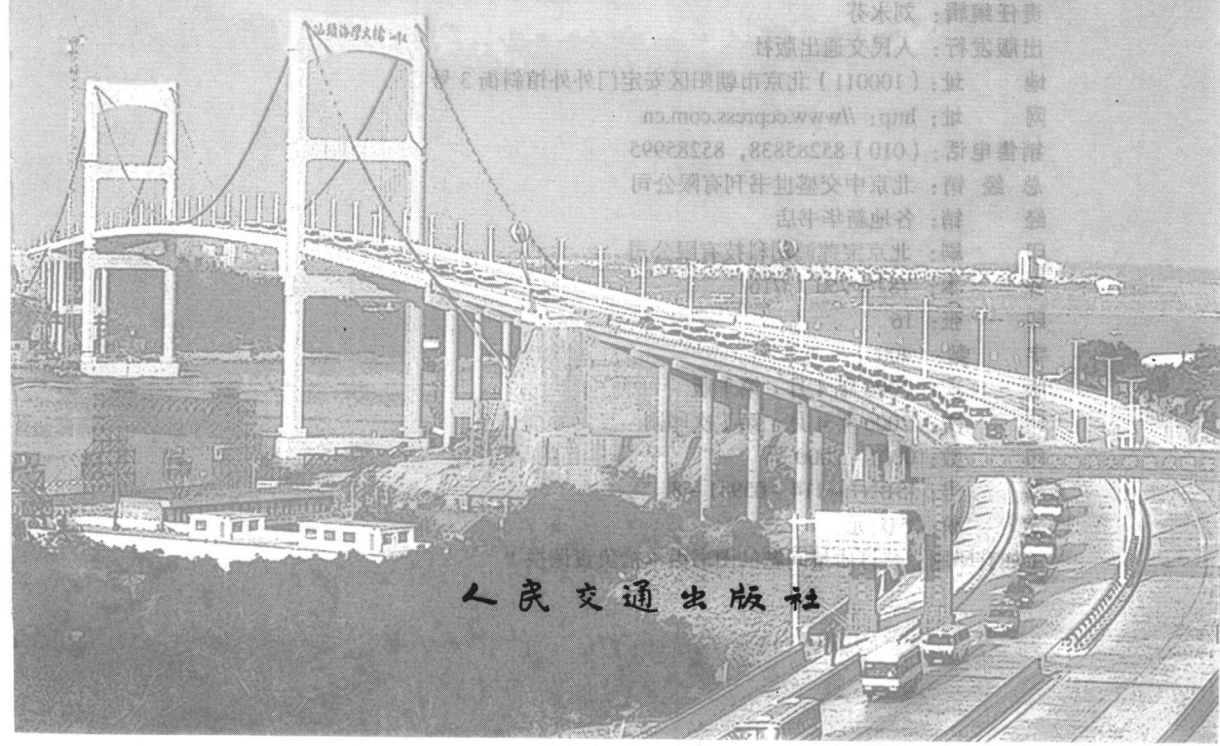
张树仁

王宗林

【编著】

QIAOLIANG BINGHAI ZHENDUAN YU
GAIZAO JIAGU SHEJI

人民交通出版社



内 容 提 要

本书从桥梁加固设计的实际需要出发,对混凝土桥梁结构的病害诊断分析、考虑结构损伤影响的承载力评估和桥梁改造加固总体方案设计做了较为系统的介绍。书中坚持“桥梁带载加固,必须考虑分阶段受力特点”的基本观点,倡导“主动加固”的设计思想,提出了考虑分阶段受力影响的桥梁加固构件设计计算方法,书中附有大量典型设计方案和计算例题的评述分析,可供设计者参考。

本书对从事桥梁改造加固设计和科研人员有指导意义和实用价值,对从事桥梁施工、监理及管理工作人员亦有参考价值。本书亦可作为桥梁工程专业研究生和本科生的教学辅导材料。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁病害诊断与改造加固设计/张树仁,王宗林编著.
北京:人民交通出版社,2006.3
ISBN 7-114-05941-8

I.桥… II.①张… ②王… III.①钢筋混凝土桥-
病害-诊断②钢筋混凝土桥-加固 IV.U448.337

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第012382号

书 名:桥梁病害诊断与改造加固设计

著 作 者:张树仁 王宗林

责任编辑:刘永芬

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)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京宝莲鸿图科技有限公司

开 本:787×960 1/16

印 张:16

字 数:400千

版 次:2006年4月 第1版

印 次:2006年4月 第1次印刷

印 数:0001~3000册

书 号:ISBN7-114-05941-8

定 价:35.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言

近年来,我国桥梁工程建设取得了举世瞩目的进步,然而随着交通事业的发展和在役桥梁使用年限的增加,桥梁结构的病害问题日益突出,桥梁改造维修加固任务十分繁重。

提高桥梁改造加固设计质量是确保加固工程质量的前提和基础。桥梁改造加固设计是比新建桥梁更为复杂的系统工程,它涉及病害诊断、改造决策分析、改造加固总体方案设计、加固材料与方法选择、加固构件设计与计算和养护、管理与施工等多学科问题。本书从设计工作的实际需要出发,对加固设计中所涉及的技术问题做了较为系统的介绍。

桥梁病害诊断是进行桥梁加固设计的前提,混凝土结构裂缝是反映病害的晴雨表。书中对混凝土结构的主要病害机理、表现特征及危害进行了较为系统的分析。期望能对基层工作人员提高桥梁病害诊断与分析能力有所帮助。

考虑结构损伤影响的结构评估是桥梁改造决策分析的基础,书中提出了考虑钢筋腐蚀和混凝土裂缝影响的桥梁结构承载能力评估方法,可供桥梁改造决策分析参考。

桥梁改造加固总体方案设计是影响加固工程全局的战略性问题。书中提出了分清加固性质、明确加固目的、注意多种加固技术综合利用的桥梁改造加固方案设计原则。并选取若干具有代表性的加固设计方案进行评述分析。

桥梁加固薄弱构件的设计与计算是加固设计的核心内容。作者坚持“桥梁带载加固,必须考虑分阶段受力特点”的基本观点,倡导“主动加固”的设计思想,对常用桥梁加固方法进行了分类分析。在试验研究的基础上,建立了考虑分阶段受力影响的直接加筋类(加焊钢筋、粘贴钢板及其他高强复合纤维材料)加固构件正截面抗弯和斜截面抗剪承载力计算公式;首次提出了直接加筋类构件正截面抗弯承载力应以

混凝土压应变达到极限值和原梁钢筋的拉应变达到极限值两种极限状态控制设计的概念。从解决后加补强材料“应变滞后”,提高后加补强材料利用效果出发,对预应力加固体系的设计方法做了较为详细的介绍。首次提出了采用锚固于被加固梁体上的预应力钢筋对梁体施加预应力,然后喷注高性能抗拉复合砂浆的有粘结预应力加固体系,建立了与我国现行桥梁设计规范相适应的加固设计方法。书中附有大量的计算例题,并对计算结果进行评述分析,可供设计者参考。

最后,书中对桥梁加固常用的加固构造原理和施工做了补充介绍。对各种加固技术的应用进行对比分析,为设计者合理选择加固方法提供参考。

全书由张树仁、王宗林合作编写,张树仁主编,其中第五章和第三、四章部分章节由王宗林编写。第一章部分照片由同济大学刘仲训教授提供。哈尔滨工业大学研究生杨明、孙筠、李彦滨、杨帆、陈维生和张娜等参加了文稿审阅、绘图及打字工作。本书在编写过程中得到了哈尔滨工业大学交通科学与工程学院领导的关心和支持,人民交通出版社刘永芬编辑付出了辛勤劳动,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

张树仁

2006年1月于哈尔滨

从被动加固到主动加固的思考

(代序)

——访桥梁专家 哈尔滨工业大学教授张树仁

《桥梁》杂志编辑部. 2006 年第 1 期

目前,我国桥梁改造加固任务繁重。据交通部统计,至 2004 年底,全国公路网中尚有危桥 13303 座,46887 延米。然而,长期以来,我国桥梁加固事业在加固市场、设计方案等方面却存在着系列亟待解决的问题。

我国桥梁专家、哈尔滨工业大学教授张树仁长期从事桥梁结构工程的教学、科研和设计工作,开展桥梁加固设计理论研究,并主持完成多座桥梁的加固设计、施工及方案评审。张教授在长期的研究和工作中,针对我国桥梁事业存在的问题,形成了一套“桥梁带载加固应考虑分阶段受力特点和从被动加固到主动加固”的设计思想,并受到同行专家的广泛关注。日前,本刊记者就这一问题对张教授进行了专访。

一、我国现代桥梁加固存在的问题

《桥梁》杂志:目前我国桥梁加固市场十分活跃,您认为我国桥梁加固市场的现状如何?

张教授:近年来,我国桥梁建设取得了举世公认的成绩,但是,随着桥梁病害问题的日益突出,我国的桥梁建设已进入新建和改造维修并重的过渡期,桥梁改造加固任务日益繁重。

中国桥梁改造加固市场的巨大潜力,吸引了国内外众多有远见卓识的工程技术人员和企业家把注意力转移到这方面来,国外的先进加固技术大量涌进中国加固市场,各种加固公司像雨后春笋应运而生,成功地创建了一批桥梁改造加固的优秀范例,推进了我国桥梁改造工作的发展。

我国目前桥梁加固市场的状况是“有实力的大设计院无暇顾及,不愿意干;技术力量较差的小型设计单位又干不了”,桥梁改造加固设计基本上由科研单位、高等院校和各类专业公司来承担。各类专业公司的技术水平差异大,有些专业公司以销售加固材料为主,业务单一,对桥梁加固设计不熟悉。桥梁改造加固设计审核制度不规范,没有明确的加固设计

资质要求,桥梁加固设计市场管理混乱。提高桥梁改造加固设计质量,是确保加固工程质量的前提和基础。桥梁改造加固设计是比新建桥梁设计复杂得多的系统工程。

《桥梁》杂志:您认为我国目前桥梁加固设计在技术上存在什么问题?

张教授:从技术角度分析,目前我国桥梁改造加固设计主要存在以下几个问题:

一是基层养护、管理和设计部门桥梁病害诊断技术力量薄弱,桥梁检测手段落后。桥梁病害诊断是进行桥梁加固设计的前提和基础,只有诊断清楚,才能对症下药。桥梁检测是桥梁病害诊断与分析的重要手段,检测应重在分析,并应与桥梁加固设计相结合。

二是考虑结构损伤影响的承载力评估方法还不够完善。

三是桥梁改造加固方案设计思路比较狭窄,应用技术单一,设计深度不够。

四是个别桥梁加固设计生搬硬套国外或国内其他行业一般结构的设计方法,忽略了桥梁带载加固分阶段受力的特点。有些加固设计只做宏观的定性分析,缺少科学地定量分析,设计带有很大的随意性。

针对我国目前桥梁加固市场的混乱局面,加强桥梁养护、管理及设计与施工技术队伍建设,普及桥梁病害诊断和加固设计知识是十分重要的。

《桥梁》杂志:您前面提到桥梁加固总体方案设计存在一些问题,针对这些问题应注意什么?

张教授:桥梁加固总体方案设计是关系桥梁加固工程质量的全局性问题。应在对桥梁病害诊断分析和鉴定评估的基础上,根据技术、经济条件和使用要求,有针对性地制定桥梁改造加固方案。

首先,制定桥梁加固方案应先分清加固性质、明确加固目的。根据桥梁病害诊断分析和鉴定评估结果,桥梁加固应分为承载力加固(强度加固)、使用功能加固、耐久性加固和抗震加固等四种情况。

承载力加固是确保结构安全工作的基础,是桥梁加固设计的核心内容,其内容包括正截面抗弯承载力和斜截面抗剪承载力两部分。承载力加固通常是采用加大截面尺寸和配筋的方法,补充承载力的不足;使用功能加固是确保桥梁正常工作的需要,主要是对活载变形或振动过大的构件,加大截面尺寸,增加截面刚度,以满足结构使用功能要求;耐久性加固是指对结构损伤部位进行修复和补强,以阻止结构性能继续恶化,消除损伤隐患,提高结构的耐久性,延长结构使用寿命;抗震加固是指对遭受地

震破坏的结构或结构节点进行加固补强,提高结构的抗震能力。

只有分清加固性质,明确加固目的和预期达到的加固效果,才能有针对性地选取合适的加固方法。

其次,应注意各种加固方法的综合利用。桥梁加固补强的方法很多,基本上可以划分为两大类:

第一类为改变结构体系,调整结构内力,减轻原梁负担。

第二类为加大截面尺寸和配筋,加固薄弱构件。对薄弱构件进行加固补强的方法很多,从加固部位上可划分为拉区加筋类和压区加混凝土类两种。

拉区加筋类是指采用直接粘贴钢筋(或其他高强复合纤维材料)或采用预应力钢筋对受拉区进行加固补强。压区加混凝土类是指采用加厚桥面板的方法,对混凝土受压区进行补强,加厚桥面板使梁的有效高度增加,亦可达到提高构件承载能力的目的。

通过调整结构内力,尽量减轻原梁的负担,将加固补强工作量压缩到最少。薄弱构件加固补强方法的选择,应考虑各种加固补强方法的综合利用,采取综合加固补强措施,提高加固补强效率,确保加固工程质量。例如,加固设计中经常遇到桥梁设计荷载标准提高幅度较大的情况,若原梁截面高度较小,单纯采用在受拉区加固的措施,有可能仍不满足新的设计荷载标准的要求。对于这种情况,若采用受拉区加固补强和加厚桥面板考虑桥面铺装层参与主梁工作,增加梁的有效高度的双重加固措施,结构承载力将会大幅度提高,从而满足新的设计荷载标准的要求。

二、从被动加固到主动加固

《桥梁》杂志:您多次强调桥梁加固的特点。那么与其他行业的结构加固相比,桥梁加固的最大特点是什么?

张教授:桥梁结构自重大,结构自重及恒载引起的内力占所承受的总内力的比值,随着梁的跨度的增大而提高。例如,20m 跨径的钢筋混凝土简支梁,构件自重及恒载引起的内力约占总内力的 49%;30m 跨径的预应力混凝土简支梁构件自重及恒载引起的内力,约占总内力的 69%。桥梁加固一般均采用带载加固。换句话说,桥梁结构是在承受如此大的构件自重及恒载的情况下进行加固补强的。构件自重及先期恒载产生的内力由原梁承担;活载(车辆荷载)及后加恒载由加固后的组合截面承担。桥梁加固设计计算必须考虑分阶段受力的特点,这是桥梁加固设计区别于一般结构设计的最大特点。

《桥梁》杂志:被动加固和主动加固的含义分别是什么?您极力倡导的主动加固设计思想要解决的最大问题是什么?

张教授:加固薄弱构件的方法从工作原理上可划分为被动加固和主动加固两大类。在受拉区直接粘贴钢板或其他高强复合纤维加固,属于被动加固范畴,后加补强材料被动受力,只承担活载和后加恒载引起的内力;预应力加固属于主动加固范畴,后加预应力筋主动受力,依靠预加力产生的反向弯矩,改善原梁的应力状态,达到加固补强的目的。

加固桥梁薄弱构件的承载力计算,必须考虑分阶段受力特点,被动加固的后加补强材料只承担活载及后加恒载引起的内力,与原梁的钢筋相比,其应变(应力)相对滞后,一般情况下,在极限状态时其应力是达不到抗拉强度设计值,特别是采用直接粘贴高强复合纤维加固时,复合纤维的高抗拉性能很难充分发挥作用。被动加固的后加高强复合纤维,由于受分阶段受力造成的“应变(应力)滞后”的影响,在极限状态下根本无法充分发挥材料的高抗拉性能,“大马拉小车”是一种极大的浪费。特别是在倡导建设节约型社会的环境下,这种盲目的浪费是值得我们深思的。

解决后加补强材料应变(应力)滞后,提高后加补强材料利用效率的根本途径是变被动加固为主动加固,对后加补强材料施加预应力,做成预应力加固体系。主动加固设计思想的核心是提高后加补强材料的利用率,以最少的成本,创造最佳的加固效果。加固设计中,要充分发挥预应力筋主动受力的作用,正截面加固要加预应力,斜截面加固也要加预应力。

《桥梁》杂志:您一再强调预应力在桥梁加固中的作用,那么预应力技术在桥梁加固工程中主要有哪些应用形式?

张教授:预应力技术是20世纪最具有革命性的结构构思,已广泛应用于土木工程。预应力技术在桥梁加固工程中的应用主要有以下三种形式:

第一种是体外预应力加固体系。采用布置在梁体外部(或箱内)具有防腐蚀保护的预应力筋(钢绞线或高强度粗钢筋),对梁体施加预应力,构成体外预应力加固体系。体外预应力加固是成熟技术,特别适用于大跨径预应力混凝土连续箱梁桥的加固。

第二种是高强复合纤维预应力加固体系。采用锚固、粘贴在梁体外部(或箱内)的高强复合纤维布条(或板条),对梁体施加预应力。这种加固体系目前尚处于试验研究阶段,其关键技术是解决适用于桥梁加固现场施工的预应力纤维布(板)的张拉和锚固问题。

第三种是有粘结预应力加固体系。采用锚固于梁体上的2~3股钢绞线或小直径粗钢筋,对梁施加预应力,然后喷注具有一定抗拉性能的复合砂浆(HTCM),将预应力钢筋与被加固梁体粘结为一体,构成有粘结预应力加固体系。

有粘结预应力加固体系,依靠喷注的高性能复合砂浆,将预应力筋与被加固梁体粘结为一体,复合砂浆的高粘结强度是保证两者共同工作的基础,复合砂浆的高抗拉性能是控制结构抗裂性,保护后加预应力钢筋免于锈蚀的前提。

有粘结预应力加固体系以其预应力筋张拉方便,锚固构造简单和结构耐久性高的技术优势受到工程界的重视。这种加固方法特别适于中小跨径桥梁,尤其是公路和城市立交工程中大量采用的中等跨径的钢筋混凝土及预应力混凝土连续箱梁桥。由于箱梁高度较矮,在箱内布置体外预应力筋施工困难,采用在梁底增设小直径预应力筋,然后喷注高性能抗拉复合砂浆(MTCM)的有粘结预应力加固方案是较为理想的方案之一。

《桥梁》杂志:您认为推广“主动加固”设计思想的关键是什么?

张教授:推广“主动加固”设计思想的关键是提高工程技术人员和领导决策层对桥梁加固设计特殊性的认识。实际上“桥梁带载加固应考虑分阶段受力特点”是桥梁加固设计的一个常识性核心问题。“常识性”说明问题简单,“核心”说明问题重要。但是,就是这样的简单问题,却被一些人忽略了,再加上个别厂家的商业炒作,把简单的问题复杂化了。相信随着人们对桥梁加固问题认识的提高,主动加固的设计思想会逐渐得到大家的认同。

目 录

第一章 混凝土结构损伤与耐久性	1
§ 1-1 混凝土结构耐久性	1
§ 1-2 影响混凝土结构耐久性的因素	3
§ 1-3 混凝土碳化	4
§ 1-4 氯离子对混凝土结构的侵蚀	12
§ 1-5 混凝土碱集料反应	14
§ 1-6 混凝土集料膨胀反应	18
§ 1-7 混凝土的冻害	20
§ 1-8 钢筋的腐蚀	24
§ 1-9 混凝土的裂缝分析	29
参考文献	35
第二章 混凝土结构的承载能力及耐久性评估	37
§ 2-1 在役混凝土结构的承载能力与耐久性评估 的基本概念	37
§ 2-2 考虑钢筋腐蚀影响的承载能力评估方法	46
§ 2-3 混凝土中钢筋腐蚀量估算和腐蚀特征 时间预测	50
§ 2-4 混凝土结构使用寿命评估	56
参考文献	63
第三章 桥梁改造加固方案设计	64
§ 3-1 桥梁改造加固方案设计的原则	64
§ 3-2 桥梁加固与加宽综合设计案例分析	66
§ 3-3 体外预应力加固设计案例分析	69
§ 3-4 用斜拉结构改造旧桥的案例分析	83
§ 3-5 双曲拱桥加固设计案例分析	86
§ 3-6 大跨径预应力混凝土连续梁检测及加固 设计案例分析	92

§ 3-7 大跨径钢管混凝土拱桥检测与加固案例分析	108
参考文献	114
第四章 桥梁加固薄弱构件设计与计算	116
§ 4-1 桥梁加固薄弱构件分阶段受力特点	116
§ 4-2 直接加筋类加固钢筋混凝土受弯构件正截面抗弯 承载力计算	117
§ 4-3 以混凝土压应变控制设计的正截面抗弯承载力加固 设计例题分析	121
§ 4-4 以原梁钢筋拉应变控制设计正截面抗弯承载力加固 设计例题分析	128
§ 4-5 压区加混凝土类加固钢筋混凝土受弯构件正截面抗弯 承载力计算	133
§ 4-6 桥梁加固薄弱构件斜截面抗剪承载力计算	135
§ 4-7 桥梁加固薄弱构件弹性分析容许应力设计法	138
§ 4-8 体外预应力加固受弯构件设计与计算	142
§ 4-9 有粘结预应力加固受弯构件正截面设计与计算	158
§ 4-10 有粘结预应力加固设计例题分析	167
§ 4-11 有粘结预应力加固受弯构件斜截面设计与计算	179
§ 4-12 桥梁加固钢筋混凝土偏心受压构件承载力计算	183
参考文献	190
第五章 桥梁加固技术	191
§ 5-1 粘贴钢板加固法	191
§ 5-2 粘贴高强复合纤维加固法	193
§ 5-3 预应力加固技术	197
§ 5-4 采用有粘结预应力加固设计案例分析	203
§ 5-5 桥面铺装维修加固技术	214
§ 5-6 铰接板梁桥单板受力加固法	216
§ 5-7 锚喷混凝土加固技术	219
§ 5-8 纤维混凝土在桥梁加固中的应用	221
§ 5-9 混凝土结构后锚固技术	228
参考文献	241

第一章 混凝土结构损伤与耐久性

§ 1-1 混凝土结构耐久性

混凝土结构的耐久性是指结构对气候作用、化学侵蚀、物理作用或任何其他破坏过程的抵抗能力。在役桥梁结构随着使用时间的延续,受结构使用条件及环境侵蚀等因素的影响,加之设计和施工的不当,将发生材料老化与结构损伤,这是一个不可逆的过程,这种损伤的累积将导致结构性能劣化,承载力下降和耐久性降低。

长期以来,人们受混凝土是一种耐久性能良好的建筑材料的影响,忽视了钢筋混凝土结构的耐久性问题,造成了混凝土结构耐久性研究的相对滞后,并为此付出了巨大的代价。由于耐久性不足导致结构破坏的事故时有发生,其中因混凝土碳化和钢筋腐蚀需要处理的工程具有普遍性,造成的损失也是难以估量的。因此,混凝土结构的耐久性问题已受到国内外土木工程界的高度重视。

国内外的统计资料表明^[1-1],由于混凝土结构的耐久性病害而导致的经济损失是巨大的,并且问题会越来越严重。据调查,美国 1975 年由于钢筋腐蚀引起的损失达 700 亿美元,1985 年则达 1680 亿美元,目前整个混凝土工程的价值约 6 万亿美元,而今后每年用于维修或重建的费用预计将高达 3000 亿美元。英国英格兰岛中部环形快车道上 11 座混凝土高架桥,当初建造费用为 2800 万英镑,到 1989 年因维修耗资 4500 万英镑,是当初造价的 1.6 倍,估计以后 15 年还要耗资 1.2 亿英镑,累计接近当初造价的 6 倍,这反映了混凝土结构耐久性造成的损失大大超过了人们的估计。国外学者曾用“五倍定律”形象地描述了混凝土结构耐久性设计的重要性,即设计阶段对钢筋防护节省 1 美元,那么意味着:发现钢筋腐蚀时采取措施将追加维修费 5 美元;混凝土表面出现顺筋裂缝时采取措施将追加维修费 25 美元;严重破坏时采取措施将追加维修费 125 美元。

我国混凝土结构耐久性问题也十分严重。相对于房屋建筑而言,处于露天环境下的桥梁结构耐久性与病害状况则更为严重。在役的混凝土

桥梁出现钢筋腐蚀、混凝土开裂的现象十分普遍。结构劣化的主要原因是混凝土的密实性太差,钢筋的保护层太薄,北方地区混凝土抗冻性能差。近年来使用除冰盐融化道路积雪,更使北方地区公路桥梁中的钢筋迅速腐蚀。公路车辆超载也是促使桥梁提前老化和破坏的重要原因之一。

据全国公路普查资料^[1-2],截止到 2004 年底,我国公路共有桥梁 321612 座,总长 13376415 延米,互通式立交桥 2338 座,总长 444980 延米。不同等级公路上的桥梁分布情况示于表 1.1-1 和表 1.1-2。

不同等级公路上的桥梁分布情况(按跨径分) 表 1.1-1

公路类别	特大桥		大桥		中桥		小桥	
	座数	长度 (延米)	座数	长度 (延米)	座数	长度 (延米)	座数	长度 (延米)
国道	362	655049	6931	1715297	15565	913719	37235	671142
国道主干线	259	485111	3724	969511	8128	476773	16103	289186
省道	268	434574	6407	1511293	15946	907392	45640	820532
县道	67	73346	4486	819887	17472	941843	67659	119859
乡道	13	8262	2573	364982	16314	817526	77549	1320538
专用公路	7	4349	275	45190	1135	60094	5722	92805
总计	717	1175580	20672	4456649	66432	3640574	233805	4103612

不同等级公路上的桥梁分布情况(按使用年限分) 表 1.1-2

公路类别	永久性桥梁		半永久性桥梁		临时性桥梁		危桥	
	座数	长度 (延米)	座数	长度 (延米)	座数	长度 (延米)	座数	长度 (延米)
国道	59978	3952397	84	2390	31	420	920	54185
国道主干线	2812	2220427	2	154	-	-	52	2015
省道	68042	3667963	110	4336	109	1493	1653	83421
县道	88761	3010440	392	11296	531	11936	4243	155233
乡道	94836	2474068	1165	27728	448	9512	5755	161738
专用公路	6322	188400	172	3255	645	10783	732	14310
总计	317939	13293268	1923	49005	1764	34144	13033	468887

从表 1.1-1 可以看出,总长 13376415 延米的公路桥梁,其中 57.9% 为中、小跨径桥梁,它们中间 55.2% 分布在技术标准低、通行能力差的县乡级公路上,设计荷载偏低。由于交通量与日俱增,车辆载重不断提升,加之缺乏维修,多处于带病超负荷工作状态。从表 1.1-2 可以看出,我国

公路共有危桥 13303 座总长度为 468887 延米,其中 62.7% 分布县乡级公路上。此外,尚有 1923 座总长为 49005 延米的半永久性桥梁和 1764 座 30722 延米的临时性桥梁需要改造。据测算,若将目前的 133003 座 (468887 延米)的危桥全部改造需投入资金 112 亿元。

北京地区的立交桥由于冻融循环和除冰盐腐蚀破损严重。国内最早建成的北京西直门立交桥,使用期限不到 19 年,就被迫拆除重建^[1-3]。北京东直门桥,大北窑桥等二十几座立交桥已不得不提前进行大修加固。天津中环路上的众多立交桥,在运行十余年后,也因钢筋腐蚀和混凝土冻蚀,陆续进行大修或部分更换。山东潍坊白浪河大桥按交通部公路桥梁通用标准图建造,因位于盐渍地区,受盐、冻侵蚀,仅使用八年已成危桥,现已部分拆除或加固。我国有不少盐渍地区,包括滨海盐渍地和西北靠内陆盐湖、盐田的盐渍地,近年来土建基础设施工程建设已逐渐延伸到这些地方,但工程设计标准仍套用一般地区的要求,结果许多建筑物建成后仅 7~8 年即遭强腐蚀破坏。天津滨海的三座混凝土桥,使用 8~10 年后,墩柱钢筋严重腐蚀,使混凝土保护层普遍剥落。这些地区的混凝土电杆在安装后几年即遭强腐蚀,有些已倒塌,埋于地下的混凝土排水管道,不到半年就发现混凝土表面开裂和起皮现象。

混凝土结构的过早劣化在当今世界上具有普遍性。我国现在面临的耐久性问题是发达国家早在二三十年前就曾经遇到过的,如果说存在差异,则在于这些问题对我们来说要更为严峻,尤其是直到现在尚未引起我国政府部门和广大设计、施工及管理人员的足够重视。因此,加强混凝土结构耐久性研究和基础知识的普及工作,提高决策者及广大工程技术人员对结构耐久性的认识是十分重要的。

§ 1-2 影响混凝土结构耐久性的因素

影响混凝土结构耐久性的因素十分复杂,主要取决于以下四方面因素:

- ①混凝土材料的自身特性。
- ②混凝土结构的设计与施工质量。
- ③混凝土结构所处的环境。
- ④混凝土结构的使用条件与防护措施。

混凝土材料的自身特性和混凝土结构的设计与施工质量是决定混凝土结构耐久性的内因。混凝土是由水泥、水、粗细集料和某些外加剂,经

搅拌、浇注、振捣和养护硬化等过程而形成的人工复合材料。混凝土的材料组成,如灰水比(水胶比)、水泥品种和用量、集料的种类与级配等都直接影响混凝土结构的耐久性。混凝土的缺陷(例如裂缝、气泡、孔穴等)都会造成水分和侵蚀性物质渗入混凝土内部,与混凝土发生物理化学作用,影响混凝土结构的耐久性。

混凝土结构所处的环境条件和防护措施是影响混凝土结构耐久性的外因。外界环境因素对混凝土结构的破坏是环境因素对混凝土结构物理化学作用的结果。环境因素引起的混凝土结构损伤或破坏主要有:

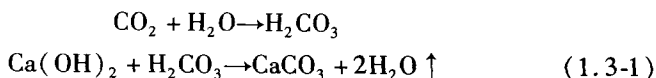
- ①混凝土碳化。
- ②氯离子侵蚀。
- ③碱—集料反应。
- ④冻融循环破坏。
- ⑤钢筋腐蚀。

值得注意的是,几乎所有侵蚀混凝土和钢筋的作用都需要有水作介质。另一方面,几乎所有的侵蚀作用对混凝土结构的破坏,都与侵蚀作用引起的混凝土膨胀、并最终导致混凝土结构开裂有关,而且当混凝土结构开裂后,侵蚀速度将大大加快,混凝土结构的耐久性将进一步恶化。在影响混凝土结构耐久性的诸多因素中,钢筋腐蚀的危害最大。钢筋腐蚀与混凝土的碳化、氯盐的侵蚀以及水分、氧气的存在等条件是分不开的。

§1-3 混凝土碳化

一、混凝土碳化的作用机理

混凝土碳化是指混凝土中的氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)与渗透进混凝土中的二氧化碳(CO_2)或其他酸性气体发生化学反应的过程。混凝土碳化可用下列化学式表示:



碳化的实质是混凝土的中性化。水泥在水化过程中生成大量的氢氧化钙,使混凝土内部的孔隙中充满了饱和氢氧化钙溶液,其 pH 值为 12 ~ 13。在这样高的碱性环境中埋置的钢筋容易发生钝化作用,使钢筋表面生成一层难溶的三氧化二铁(Fe_2O_3)和四氧化三铁(Fe_3O_4),通常称为钝化膜,能够阻止混凝土中钢筋的腐蚀。当有二氧化碳和水气从表面

通过孔隙进入混凝土内部时,和混凝土中的碱性物质中和,会导致混凝土的 pH 值降低。当 pH 值小于 9 时,埋置于混凝土中的钢筋表面的钝化膜被逐渐破坏,在水分和其他有害介质侵入的情况下,钢筋就会发生腐蚀。

二、混凝土碳化试验

混凝土的碳化速度取决于二氧化碳气体的扩散速度及二氧化碳与混凝土成分的反应速度。由于空气中二氧化碳的浓度很低(一般情况下,其体积浓度约为 0.03%),因而,混凝土碳化的发展是一个非常缓慢而又漫长的过程。为了研究混凝土的碳化,除建立自然曝晒场,在大气中实测混凝土的碳化情况,即进行自然碳化试验外,还可在实验室内用人工快速碳化的方法来研究,使之能在较短的时间内得到所需要的结果。

混凝土快速碳化的试验方法很多。但多数国家的学者都倾向于采用常压、低浓度二氧化碳的快速碳化方法,即在正常的气压条件下,采用二氧化碳的体积浓度为 10% 左右的方法来模拟混凝土的碳化。

我国国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》(GBJ 83—85)规定的标准碳化试验方法是:二氧化碳浓度应控制在 $20\% \pm 3\%$,相对湿度控制在 $70\% \pm 5\%$,温度控制在 $20 \pm 5^\circ\text{C}$,试件采用棱柱体,龄期为 28d。碳化到 3、7、14、28d 时,分别测试碳化深度。碳化深度采用在混凝土表面点滴 1% 的酚酞溶液的方法测试,未碳化的混凝土与酚酞液反应呈粉红色。

混凝土快速碳化与自然碳化的关系,可以根据空气的二氧化碳浓度进行换算。二氧化碳浓度与混凝土碳化深度的关系早就被国内外有关资料所肯定。一般认为,混凝土的碳化深度(D)与二氧化碳浓度(C)的平方根成正比。

$$\frac{D}{D_1} = \frac{\sqrt{Ct}}{\sqrt{C_1 t_1}} \quad (1.3-2)$$

式中: D 、 C 、 t ——分别为自然碳化深度、空气中的二氧化碳浓度(一般取 0.03%)和碳化时间;

D_1 、 C_1 、 t_1 ——分别为快速碳化深度、二氧化碳浓度和碳化时间。

由公式(1.3-2)可以求得,采用二氧化碳浓度为 20% 的快速碳化试验,其 28d 的碳化深度,相当于空气中二氧化碳浓度为 0.03% 的自然碳

化的龄期为 $t = \frac{0.2 \times 28}{0.0003 \times 365} = 51 \approx 50$ 年。