

国内外混凝土桥梁寿命与耐久性设计进展

阮静¹, 左新黛², 张德龙¹, 陈军¹

(1.江苏省交通工程建设局, 江苏 南京, 210004; 2.交通运输部公路科学研究所, 北京市, 100088)

摘要:针对国内外混凝土桥梁实际使用寿命不满足设计使用寿命要求的热点问题,围绕桥梁使用寿命和耐久性设计展开调查研究。从而,指出了桥梁寿命不满足与耐久性问题的相关性,阐述了国内外混凝土桥梁耐久性设计方法的发展历程,分析了国内外相关规范或指南对设计方法和耐久性极限状态定义的差异性,最后给出了混凝土桥梁耐久性设计流程框架。研究表明:大多数国家规范中耐久性设计采用的是经验设计法,定量设计法重视耐久性验算,是更为科学的设计方法,四种定量设计法中以分项系数法最为实用;我国桥梁耐久性规范仅采用经验设计法和条文分析法,未给出具体的计算模型和方法,与国外规范存在一定差距,有待进一步完善以适应我国桥梁设计的需求,保障桥梁设计使用寿命。

关键词:混凝土桥梁;使用寿命;耐久性设计;耐久极限状态;经验设计法;定量设计法

中图分类号: U448.34

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0001-04

0 引言

桥梁老化不仅是中国桥梁面临的挑战,也是一项世界难题。很多国家在规范中规定了桥梁的设计使用寿命,但实际寿命往往难以满足,主要由于桥梁结构面临着环境侵蚀、超载、耐久病害显著等问题^[1],规范中并未充分考虑桥梁的耐久性设计,由此造成了设计寿命和实际寿命间的差异。目前各国已从桥梁建设期转入管养期,桥梁短寿问题造成安全性和经济性问题突出^[2-3],各国逐渐意识到该问题的重要性,在规范或指南中纷纷纳入了耐久性设计的内容。

本文围绕国内外混凝土桥梁使用寿命与耐久性设计方法展开调查研究,分析耐久性问题对使用寿命的影响,阐述国内外耐久性设计方法发展历程,分析国内外相关规范或指南的共性和差异性,提出混凝土桥梁耐久性设计流程框架。

1 桥梁使用寿命现状分析

1.1 设计使用寿命

桥梁设计使用年限是指结构或结构的一部分,在预期维护条件下,不需要进行必要的大修,即可按照其预定目的使用的给定期限。设计使用年限由以下要求组成^[4]:(1)相关极限状态的定义;(2)具体年限要求;(3)在这个年限内没有达到极限状态的

可靠性水平。欧洲规范^[5]规定了桥梁等主要结构物的设计使用年限(Design working life)为100年,美国规范^[6]规定桥梁的设计基准期(Design life)为75年。中国规范^[7]规定设计基准期为100年,并给出不同等级的公路桥梁主体结构及可更换部件的设计使用年限表。

1.2 实际使用寿命

桥梁的实际使用年限很难满足设计使用年限的要求,例如美国联邦公路管理局(FHWA)网站资料统计,62万座桥梁实际使用寿命平均桥龄43.2年,桥龄超过50年的桥梁有23.3万座,超过100年的桥梁有1.2万座。大部分桥龄未达到规范规定的75年设计基准期,如图1所示。

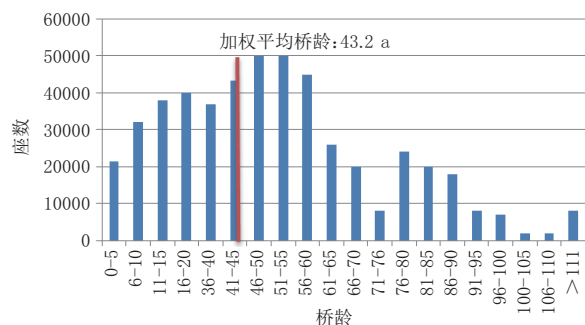


图1 美国公路桥的桥龄分布图

我国2011年各省市区上报的危桥改造有9746座五类桥,统计得出平均使用寿命为30.23年^[8],如图2所示,远未达到我国规范规定的设计年限要求。

1.3 短寿成因分析

影响桥梁寿命长短的主要因素包括^[9]:(1)设计

收稿日期: 2021-12-23

作者简介: 阮静(1975—),女,工学硕士,研究员级高级工程师,从事桥梁工程建设工作。

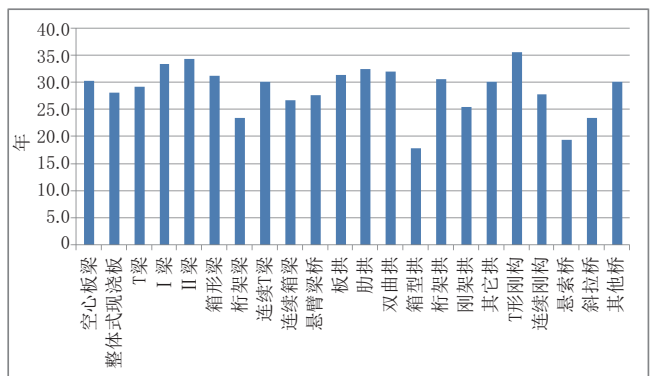


图2 我国各类桥梁平均使用寿命分布图(2011年统计)

和施工阶段确定的材料耐久性水平和结构安全性水平;(2)服役过程中各种自然环境因素的负面影响;(3)服役过程中各种人为的影响。桥梁结构处于复杂的环境中,环境具有侵蚀作用,使桥梁材料、构件及结构性能出现不同程度的退化^[1]。

以我国为例,桥梁在大气环境和海洋环境下会造成钢筋锈蚀,从而造成钢筋与混凝土粘结力减小、混凝土表层开裂;冻融损伤造成混凝土表层剥蚀;硫酸盐侵蚀导致材料强度降低,造成混凝土从材料到构件再到结构一系列的失效表现,最终结构使用性能、刚度及承载力下降,实际使用年限减少。图3列出了我国混凝土桥梁在环境作用下耐久性失效的过程及成因。

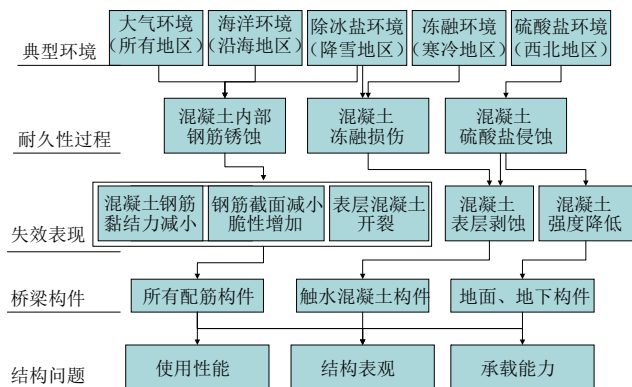


图3 我国公路桥梁主要耐久性失效的成因图示

2 桥梁耐久性设计方法

2.1 经验设计法和定量设计法

从上世纪八九十年代开始,各国逐渐意识到桥梁耐久性与寿命间的相关性,学者们对耐久性设计方法开展了大量的研究,并将研究成果体现在各国规范或指南中。表1列出了主要国家的现行混凝土桥梁(结构)耐久性设计规范。

日本土木学会(JSCE)在1989年提出了累计评分方法(指数法),并于1990编制了《混凝土结构耐

表1 国内外现行混凝土桥梁(结构)耐久性设计规范一览表

国家	类型	名称	特点
欧盟	混凝土桥梁设计规范	BS EN 1992-2-2005 Design of Concrete Structures.	经验设计法
	混凝土耐久性设计指南	CEB-FIP Model Code 2010	定量设计法,提出四种耐久验算方法
美国	混凝土桥梁设计规范	AASHTO Sec05: Concrete Structures SI	经验设计法
	混凝土耐久性设计指南	ACI 201.2R-08: Guide to Durable Concrete	条文说明法 经验设计法
日本	混凝土桥梁设计规范	日本道路桥示方书 III 编	经验设计法
	混凝土耐久性设计指南	JSCE Guidelines for Concrete	分项系数法
中国	混凝土结构耐久性设计与施工指南	CCES 01-2004	经验设计法
	混凝土耐久性设计规范	GB/T 50476-2019	条文说明法 经验设计法

久性设计指南》^[10]。该指南采用了与结构设计相同的思路,要求耐久性指数大于或等于环境指数,并为各耐久指数特征值制定了详尽的打分规则。

1989年欧洲CEB也提出了耐久性设计方法,1995年欧盟资助了一项名为Duracrete的研究项目^[11],旨在发展以性能和可靠度分析为基础的混凝土结构耐久性设计方法,并在2010年出版了《混凝土结构耐久性设计指南》^[12]。

美国ACI 201委员会1992年提出了“混凝土耐久性设计指南”,2000年又对该指南进行了修改^[13]。我国2004年颁布了《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004)^[14],2008年颁布了国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)^[15],2019年该规范修订为GB/T 50476—2019^[16]。

总结国内外现行耐久性设计规范中的设计方法,主要可分为两种,一种为经验设计法,另一种为定量设计法。从表1中可看出,大部分规范对耐久性设计采用经验方法,即将耐久性设计作为常规设计的补充,对于不同环境作用等级下的混凝土构件,直接规定混凝土材料的耐久性质量要求和钢筋保护层厚度等构造要求,以满足结构的耐久性需要。它们的体系框架大致相同,条文规定的具体数值有所差异。

随着对混凝土耐久性机理的进一步认识,一些国家提出了耐久性极限状态的概念,认为耐久性设计存在着一个“设计—验算—设计”的循环过程,这是定量设计法。定量设计法重视耐久性验算,CEB-FIP 2010规范中建议了四种方法进行耐久性验算,包括全概率法、分项安全系数法、条文说明法

和避免退化方法。

全概率法在目前的设计阶段中还处于理论研究阶段,尚未有规范实际采用,仅有 CEB-FIP 2010 规范中概括性地提出了用于耐久性设计的全概率法。在全概率方法下,必须保证混凝土碳化作用引起的耐久性失效概率小于目标值。

分项安全系数法对混凝土碳化过程的设计,CEB-FIP 2010 规范中提出了相应的分项安全系数法的验算公式。日本的 JSCE 设计指南中也采用了分项安全系数法,验算过程中涉及到的时间点均采用设计使用寿命。

条文说明法是在编写规范或指南时事先为设计人员制定了可依据的标准,美国的 AASHTO 规范、我国的《混凝土结构耐久性设计规范》均采用了条文说明法。避免退化方法是在耐久性设计时,采取必要措施避免钢筋的去钝化,这样就不用进行耐久极限状态的验算。

以上耐久性验算的四种方法各具特点,也有各自的适用范围和局限性:全概率方法具备最全面的设计能力,可以全面表达结构耐久性设计状态,但对基础研究要求较高,目前研究水平完全无法达到;分项安全系数法不仅可以充分表达基于性能的设计思想,而且在当前研究条件下也是可实现的;条文说明法和避免退化方法则具备简洁易用的特点,但其无法有效区分结构和构件在耐久性设计过程中的性能差异,达不到结构设计日益增长的精细化需求。

2.2 耐久极限状态

桥梁结构耐久性定量设计应明确结构和构件的耐久性极限状态。CEB-FIP 2010 规范所考虑的耐久性极限状态的类别分为正常使用极限状态、承载能力极限状态;日本 JSCE 指南与我国《混凝土结构耐久性设计规范》中仅考虑正常使用极限状态。

三种规范规定的耐久性极限状态汇总于表 2。从中可看出,CEB-FIP 2010 规范规定了与耐久性有关的极限状态验算可使用全概率法、分项安全系数法,给出了碳化、氯离子侵蚀、冻融环境下的耐久极限状态,定义了 5 种极限状态;JSCE 指南中使用分项安全系数法验算,规定了碳化、氯离子侵蚀、冻融环境下的 3 种耐久极限状态;《混凝土结构耐久性设计规范》对定量计算方法给出了指导性建议,并未给出计算方法或计算模型,规定了碳化、氯离子侵蚀、冻融环境下的耐久极限状态,定义了 3 种耐久极限状态。

表 2 耐久极限状态及验算方法比较表

比较项目	CEB-FIP 2010 模式规范	JSCE 指南	混凝土结构耐久性设计规范
考虑的耐久性极限状态的类别	正常使用极限状态、承载能力极限状态	均为正常使用极限状态	正常使用极限状态
碳化相关耐久性极限状态	极限状态 a:钢筋去钝化; 极限状态 b:锈蚀引发的开裂、剥落和倒塌	碳化发展到可能引发钢筋锈蚀的深度	极限状态 a:钢筋开始锈蚀; 极限状态 b:钢筋适量锈蚀
氯离子侵蚀相关耐久性极限状态	同碳化,分极限状态 a 和 b	钢筋表面氯离子达到极限浓度	同碳化,分极限状态 a 和 b
冻融循环相关耐久性极限状态	极限状态 c:冻融引起力学性能局部损失; 极限状态 d:冻融引起变位和倒塌; 极限状态 e:达到设计的冻融循环次数	寿命期内相对动弹性模量降低至保证结构具有满意性能的最小值	极限状态 c:混凝土表面轻微损伤

3 耐久性设计基本流程

对国内外混凝土结构耐久性设计方法的调研结果显示,大部分规范都选择了类似的设计流程,总结为如图 4 所示的耐久性设计流程图。具体步骤如下:

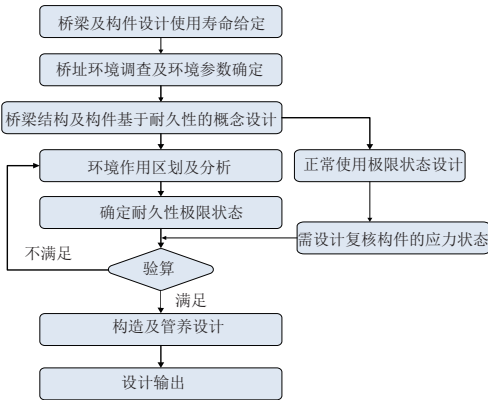


图 4 桥梁耐久性设计流程图

- (1)首先确定桥梁及构件的设计使用寿命,以及所在区域的耐久性环境参数。
- (2)根据给定的环境区划形式对结构所受环境影响情况做出判断,确定耐久性极限状态,在满足正常使用极限状态设计前提下进行耐久性验算。
- (3)根据各规范和指南中明确提出的强制性规定和指导性建议,结合设计人员自身的经验,从结构受力性能和耐久性能角度出发,对结构形式、构件尺寸、材料、施工等提出初步的设计要求。
- (4)最后根据一定的耐久性验算准则和方法对混凝土结构的耐久性能进行验算。如满足验算通过,则

进行构造及管养设计;如不通过,则重新选定耐久性设计参数,直至通过验算。

4 结 语

本文围绕混凝土桥梁使用寿命和耐久性设计方法开展研究,主要得出以下结论:

(1)典型环境作用于混凝土桥梁,导致从材料到构件再到结构一系列的失效表现,最终结构使用性能、刚度及承载力下降,影响桥梁使用寿命。耐久性问题是造成桥梁实际使用寿命不满足设计使用寿命的主要原因。

(2)桥梁耐久性设计方法分为经验设计法和定量设计法。定量设计法重视耐久性验算,是更为科学的设计方法。四种定量设计法中目前以分项系数法最为实用。未来规范中耐久性设计方法的发展趋势,是由经验设计方法向定量设计方法的转变。而定量设计法是由条文分析法和避免退化方法向分项系数法和全概率分析法转变。

(3)我国桥梁耐久性规范仅采用经验设计法和条文分析法,未给出具体的计算模型和方法,与欧盟规范有一定差距,仍有待进一步完善以适应我国桥梁设计需求,保障桥梁设计使用寿命。

(4)本文给出了给定寿命的混凝土桥梁耐久性设计流程,将耐久性能设计与力学性能设计有机结合起来,为桥梁耐久性设计提供了一个整体系统的

思路。

参考文献:

- [1] 陈肇元.混凝土结构安全性耐久性及裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 李亚东,王崇交.中外桥梁长寿命化研究进展及其思考[J],桥梁建设,2019,49(2):17-23
- [3] 周建庭,郑丹.保障我国桥梁安全的战略思考[J],中国工程科学,2017,19(6):27-37
- [4] CEB-FIP. Model code for service life design[S].Lausanne: CEB-FIP, 2006.
- [5] BS EN 1992-2-2005 Design of Concrete Structures[S]. Concrete bridges. design and detailing rules, 2005
- [6] AASHTO. AASHTO LRFD_S12007[S]. Washington DC: AASHTO Publications Staff, 2007.
- [7] JTG D62—2004,公路桥涵设计通用规范[S].
- [8] 李亚东.桥梁寿命有多长[A],亚东桥话 22,西南交大桥梁,2017.
- [9] 桥梁耐久性关键技术研究[R],交通部西部交通建设科技项目,2013.
- [10] Proposed Recommendation on Durability Design for Concrete Structures[M],JSCE 日本土木学会,1990.
- [11] General Guidelines for Durability Design and Redesign[R],The European Union-Brite Euram,2000.
- [12] CEB-FIP Model Code 2010 [R]: Chapter 5 Design of durable concrete structures, 2010.
- [13] ACI 201.2R-08: Guide to Durable Concrete[S],美国混凝土协会规范,2000.
- [14] CCES01—2004,混凝土结构耐久性设计与施工指南[S].
- [15] GB 50476—2008,混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [16] GB 50476—2019,混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [17] CEB-FIP Fib Model Code for Concrete Structures[S].2010.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com