

文章编号:1673-2049(2016)03-0093-11

# 混凝土结构全寿命等耐久性设计的理论框架

陈琳, 屈文俊, 朱鹏

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:**为延长混凝土结构的寿命,实现混凝土结构可持续发展,节约成本和资源,提高结构在寿命周期内的经济效益,基于等耐久性设计和全寿命设计理念,提出了全寿命等耐久性设计方法,指出了其核心研究内容,并对设计方法的基本思路、理论框架、设计过程进行了研究。结果表明:全寿命等耐久性设计方法具有均衡结构耐久能力、延长使用寿命、减小全寿命成本的优点,可在结构设计的初步设计阶段发挥作用;将全寿命等耐久性设计方法应用于成本投入高、使用周期长的混凝土结构(如桥梁结构),有望带来可观的经济效益。

**关键词:**混凝土结构;全寿命等耐久性设计;理论框架;设计过程

**中图分类号:**TU318.1

**文献标志码:**A

## Theoretical Framework of Life Cycle Equal Durability Design Method in Concrete Structure

CHEN Lin, QU Wen-jun, ZHU Peng

(Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to extend service life of concrete structures, realize the sustainable development of concrete structures, save cost and resource, and improve economic benefit during the life cycle, life cycle equal durability design method (LC-EDDM) was proposed based on equal durability design method and life cycle design method, and the core research contents were presented. The basic principle, framework, design process of LC-EDDM were studied. The results show that LC-EDDM is helpful to balance the durability ability, extend the service life and save life cycle cost. The method plays an efficient role in the preliminary design stage in the structural design. Economic benefits can be got if LC-EDDM is applied to concrete structures with high costs and long service lives, such as bridges.

**Key words:** concrete structure; life cycle equal durability design; theoretical framework; design process

## 0 引言

早期修建的钢筋混凝土结构在未达到服役年限时即出现了严重的耐久性破坏,为了修复这些结构,投入了大量的人力物力,这些后期费用远远超出了结构的初建费用。造成这种现象的关键原因之一是

传统的结构设计理念和管理体制,传统的结构设计只关注结构初建时刻的性能和费用,缺乏服役期性能预见性<sup>[1-3]</sup>,存在后期维护成本过高、资源分配不合理等不足,不能满足结构可持续发展的需求,调整结构设计理念是解决这一问题比较合理的措施。

自 20 世纪 50 年代开始,世界各国的研究组织

收稿日期:2015-11-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51208373);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011KJ044)

作者简介:陈琳(1989-),女,河南濮阳人,工学博士研究生,E-mail:chenlinpy@126.com。

开始成立特定的工作委员会来指导和协调混凝土耐久性方面的研究,有关材料和结构耐久性的国际会议开始召开,耐久性也开始作为新增的内容编入相关的设计规范。经验表明,在结构设计初期就考虑到结构的耐久性问题,并提前采取措施,可有效地减少后期的修复费用,较大程度地减少资源的浪费。考虑结构耐久性问题的设计方法也成了学者的研究重点。

为了达到提高钢筋混凝土结构耐久性能、延长结构的实际使用寿命的目的,一些优化设计方法和理念逐渐得到重视,例如等耐久性设计方法和全寿命设计方法。等耐久性设计和全寿命设计的理念顺应可持续发展的需求,对提高结构的耐久性能、使用性能和降低全寿命成本具有积极意义。将全寿命设计和等耐久性设计相结合,提出全寿命等耐久性设计方法(Life Cycle Equal Durability Design Method, LC-EDDM)有助于提高混凝土结构的性能和延长结构的使用寿命。本文对该方法的设计理念、理论框架和设计过程进行了分析,重点指出了该方法的主要研究内容,提出了该方法的核心内容——通过调整和规划结构模块与构件的耐久性寿命,使得结构中的多个模块或构件在同一时刻发生失效,以节省由于耐久能力参差不齐而必须采取多次维修措施带来的固定成本浪费。

## 1 混凝土结构等耐久性设计理念

### 1.1 构件层次

混凝土结构等耐久性设计理念的提出源于混凝土桥梁结构的耐久性调查结果,实际调查的混凝土桥梁结构构件中,混凝土因钢筋锈蚀引起的胀裂多发生在构件的角部,耐久性不足首先表现在混凝土截面的角区。某一角部混凝土的胀裂宣告了该构件必须进行维修或报废,由于多次维修或报废产生了较大的维修费用及隐性的用户成本,而此时混凝土构件的其他部位尚未发生耐久性失效,这显然是不经济的。屈文俊等<sup>[4-5]</sup>提出了混凝土截面的等耐久性设计,即构件层次的等耐久性设计,其基本思想是采取措施保护混凝土构件受拉区角部钢筋,延缓角部混凝土因锈胀裂,使混凝土截面各边、角部混凝土因锈胀裂时间的均值相等。

构件层次的等耐久性设计建议采取的方法有:在混凝土受拉区角部设置涂覆材料<sup>[6]</sup>、将受拉区角部钢筋置换成不锈钢的 FRP 筋<sup>[7]</sup>、受拉区混凝土采用耐久性良好的 RPC 混凝土<sup>[8]</sup>等。这样做虽然增加

了初始建设成本,但其意义在于延长构件的使用寿命,减少结构维修次数,节约维修成本。

### 1.2 结构层次

将混凝土截面等耐久性设计的理念扩展到混凝土结构层次,就是混凝土结构的等耐久性设计。混凝土结构由不同的构件组成,不同构件所处的外界环境不同,受力情况不同,耐久性寿命也不同。结构层次的设计手段主要指采取适当的措施使结构各组成部分的耐久性寿命保持基本一致,以达到推迟结构整体耐久性失效时间和减小结构全寿命成本的目的。

使耐久能力均衡可以实现经济性的原因在于:结构的某一部分发生破坏时就要进行维修或更换,维修或更换的成本中有一部分是与维修规模无关的,即 1 个构件破坏或者 3 个构件同时破坏都必须支付的一部分成本(如运输成本、机械使用费、环境用户成本等),称这部分成本为固定成本,基于这一点的考虑,如果不同构件破坏时间参差不齐,则每次维修或更换都需要支付一次固定成本,如果构件都在同一时刻发生破坏,则可节约一部分的固定成本,实现经济性。

混凝土结构等耐久性设计理念的基本原则为:

(1)耐久寿命分析是基于单独构件进行的,不考虑结构整体的可靠性,因为混凝土构件耐久性失效后的维修是针对于单独构件进行的。

(2)不拒绝对构件采取大修措施。

(3)优先对耐久寿命短的构件采取预防性维护措施,延长其耐久寿命,使其寿命与长寿命构件的耐久寿命保持基本一致。

(4)对于多个达到耐久寿命的构件一同采取大修措施,以降低由于交通耽误带来的用户成本。

## 2 混凝土结构全寿命设计方法

近年来,全寿命设计理论与方法的研究已成为各国研究的热点。全寿命设计是从设计、管理、建设和运营各个环节来寻求恰当方法和措施来满足结构全寿命周期的总体性能(安全、适用、耐久、经济、美观、生态等)最优的设计理念和方法<sup>[9]</sup>。它将结构在寿命期内的性能和与之相关的所有行为(检测、维修加固等)都考虑在内,其设计理念不同于传统结构设计理念,对于提高结构的耐久性和使用性能、降低全寿命成本具有现实意义<sup>[10]</sup>。

为了把握和应用全寿命设计理念和方

究。Sarja<sup>[11]</sup>针对建筑结构全寿命综合设计进行了系统研究;马军海等<sup>[12]</sup>研究了桥梁结构全寿命设计的总体框架;金伟良等<sup>[13]</sup>研究了工程结构全寿命设计的目标体系,并建立了工程结构全寿命设计理论的研究框架;钟小平等<sup>[14]</sup>以混凝土结构的耐久性能为基础,建立了混凝土结构全寿命性能设计的性能体系模型;彭建新等<sup>[3,15]</sup>建立了基于全寿命成本和性能的混凝土桥梁全寿命设计方法;Frangopol 等<sup>[16-18]</sup>、Kong 等<sup>[19]</sup>、Van Noortwijk 等<sup>[20-22]</sup>、Furuta 等<sup>[23]</sup>、Val 等<sup>[24-25]</sup>针对退化结构的生命成本分析、养护管理优化做了理论研究。

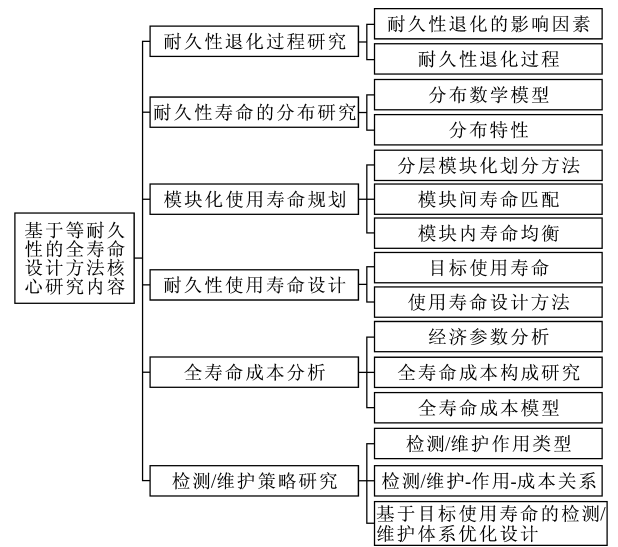
### 3 等耐久性设计与全寿命设计理念相结合

#### 3.1 基本思路

等耐久性设计与全寿命设计理念相结合的基本思路是:首先在等耐久性理念的基础上对组成结构各部分的目标使用寿命进行规划;然后对组成结构的构件设计参数(材料、尺寸等)和维护体系参数(检测作用类型和时间、维护作用类型和时间)进行设计,使构件的使用寿命可以达到目标使用寿命的要求。

#### 3.2 核心研究内容

将等耐久性设计与全寿命设计理念相结合研究的核心内容包括耐久性退化过程研究、基于可靠性的耐久性寿命的分布研究、结构模块化使用寿命规划、耐久性使用寿命设计、全寿命成本分析、检测/维护策略研究,如图 1 所示。



结构的性能在寿命周期内会发生退化的根本原因是耐久性问题的存在<sup>[26]</sup>,构件使用寿命的终结也是由于耐久性问题造成的,结构或构件维护的检测和维护行为主要是针对耐久性退化而进行的。可见,耐久性的退化过程是该项研究最基本的内容。

影响结构耐久性能的因素包括设计、施工、材料、环境等,使得结构耐久性的退化过程具有很大的不确定性,耐久性使用寿命也不是一个确定的量,而是一个随机变量。耐久性使用寿命的分布在一定程度上反映了耐久性的一些特性,会对结构的耐久性设计及运营过程中的维护决策带来一定的影响。耐久性使用寿命的分布是该项研究的一个核心内容。

由于结构的各组成部分受到的环境作用不同,各部分的受力状态、结构材料也存在差异性,因此,各部分的实际耐久性寿命也不同。为了减少由于多次维修带来的相应固定成本,对结构耐久能力进行均衡化处理是有必要的。由于结构构件的性质不同,将所有构件的耐久性能进行均衡设计是不现实的,可行的方案是将同一类型的构件(同一模块)耐久性能进行均衡设计,对不同类型的构件(不同模块间)耐久性寿命进行匹配设计。结构模块化目标使用寿命规划是该项研究的重要内容。

耐久性使用寿命设计是该项研究的另一个核心内容,其目的是使混凝土构件的耐久性寿命能够达到模块化寿命规划的目标值,且具有一定的保证率。

为了保证结构或构件能达到规划的使用寿命,需要对结构或构件采取适当的维护措施,维护措施的实施又会对全寿命成本产生直接的影响,全寿命成本的分析和结构维护策略的研究是另外 2 个核心内容,全寿命成本分析的作用是帮助决策者选择最优的耐久性寿命规划方案及相应的维护方案。

下面对每一个核心研究内容和方法进行较详细的论述。

#### 3.3 耐久性退化过程和寿命分布研究

影响混凝土结构耐久性能的因素主要来源于 4 个方面:结构设计、材料性质、施工质量、环境条件<sup>[27]</sup>。混凝土结构由于耐久能力下降会发生安全性、使用性和外观完整性的退化,无论什么因素引发的混凝土耐久性退化,其退化表现均是从外观退化(表面裂缝、表面磨损等)开始,进而产生更严重的使用性能退化或承载能力下降;当外观完整性退化严重时,会给人带来严重的不安全感,运营管理部门会对其进行修补和加固。因此,混凝土结构由于各种因素引起的外观退化是耐久性能下降的主要表现形

Fig. 1 Core Content of Theoretical Research

式,有必要进行基于外观退化的耐久性寿命分析。

混凝土结构耐久性退化的影响因素的不确定性决定了耐久性寿命不是一个可以确定的量,不能用确定性的理论来进行耐久性寿命的分析,需要采用基于随机理论的方法来进行耐久性使用寿命的分析<sup>[28-29]</sup>。耐久性使用寿命分布研究的主要工作和步骤为:

(1)环境效应分析。包括气候条件(温度、湿度变化、空气污染、冰冻、太阳辐射)和地质条件(地表水组成、氯离子分布情况)以及人为因素(桥面撒盐、车辆磨损等)。

(2)耐久性劣化因素和机理的确定。选择对结构或构件有主要影响的几个劣化因素,研究结构或构件在这些因素作用下的退化过程。

(3)耐久性指标及耐久性极限状态的确定。结合耐久性退化过程的分析选择适合的耐久性指标及相应的极限状态。

(4)耐久性模型的选取。目前对于多因素共同作用下的耐久性退化规律的研究不充分,因此,需要确定具有决定性作用的退化因素,选取相应的耐久性模型。

(5)建立耐久性寿命随机模型。明确耐久性模型中各不确定变量的概率特性,建立耐久性寿命的随机模型。

(6)耐久性寿命分析。在随机模型下对耐久性寿命分布进行分析。

3.4 模块化使用寿命规划

为了实现等耐久性设计及结构全寿命周期内经济性,需要对各模块的设计耐久性寿命进行规划。通过改变各模块的目标耐久性寿命值,对结构使用寿命期内各构件建设、养护、更换等成本进行比较优化,使结构整体在功能、技术、经济等方面均优于未经寿命规划的结构。

3.4.1 结构模块化分割

混凝土结构是由相互作用、相互依赖的若干部分组成的有机整体,结构合理的模块化分割是进行结构模块化耐久性寿命规划的前提。

由于组成混凝土结构的构件数量众多,功能和重要性各不相同,构件类型的划分具有明显的层次性,可对结构进行多层次的模块化分割,形成结构-模块-构件层次模型,有助于对同一类型构件的退化过程进行统一分析,对构件的耐久性寿命进行规划和设计。

首先,结构构件按空间、材料、功能等可以划分

为若干个相对独立的一级模块,对于建筑结构和桥梁结构的典型模块分割方法如表 1 所示<sup>[11]</sup>(暂不考虑设备等附属设施)。

表 1 建筑结构和桥梁结构典型一级模块分割方法  
Tab. 1 Level One Module Partition Method of Typical Building Structure and Bridge Structure

结构类型	建筑结构	桥梁结构
一级模块	承重框架,围护结构,屋面体系,隔墙	基础,垂直支承系统(墩、柱等),盖梁,水平支承系统(梁),支座,板,路面,栏杆

对于尺寸比较大的结构,如桥梁结构,同一模块构件所受到的局部环境作用是不同的,例如,上部结构的内梁由于受到桥面的良好遮蔽,一般不会受到雨水的侵蚀,边梁则时常受到风吹雨淋以及日照辐射的作用,边梁和内梁的耐久性退化过程会有所不同。根据不同的局部环境条件可将同一模块内的构件划分为不同的二级模块。以梁板桥为例,模块划分示意如图 2 所示。

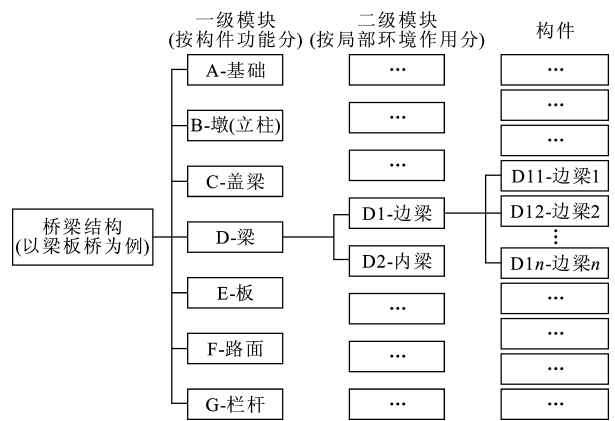


图 2 梁板桥模块划分示意

Fig. 2 Sketch of Module Partition of Beam-slab Bridge

3.4.2 模块化耐久性寿命规划

由于模块功能、受力状态不同,不同模块的目标使用寿命是不同的。以桥梁结构为例,一般来说,基础、墩、主梁等的使用寿命被认为应当与结构整体的使用寿命相同,板、路面等被认为在使用期内可以维修和更换的,其使用寿命可以短于结构整体使用寿命。结构构件的每一次维修或更换,都会产生一部分固定成本,多次维修不便于实现降低全寿命成本的目标,因此,从降低多次维修带来的固定成本的角度上看,实现模块间的使用寿命规划变得比较重要。

寿命规划的宗旨是使多个构件或模块在同一时刻发生失效,一次性对多个构件或模块进行维修,降低由于失效时间参差不齐而必须进行多次维修产生的固定成本。具体的可执行的寿命规划方法为(以

图 2 的模块划分为例):使一级模块的寿命值为倍数关系[式(1),(2)],使隶属于同一一级模块的二级模块的寿命值相等[式(3)]。

$$L_A=L_B=mL_D \tag{1}$$

$$L_D=L_E=nL_F \tag{2}$$

$$L_{D1}=L_{D2} \tag{3}$$

式中: $L$  为模块寿命值; $m,n$  为正整数。

在模块化的寿命规划过程中,需考虑到现今的技术水平(设计水平、维护水平等),使寿命规划方案具备可行性。寿命规划后,得到若干可行的寿命规划方案,可通过全寿命成本分析方法来对寿命规划方案进行比选和优化。图 3 为一级模块寿命规划示意图。

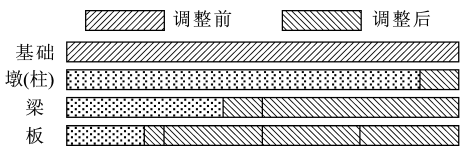


图 3 一级模块寿命规划示意图

Fig. 3 Sketch of Level One Module Lifetime Planning

3.5 耐久性使用寿命设计

耐久性使用寿命设计的目标是在一定的概率保证下实现模块化寿命规划的目标。

3.5.1 使用寿命设计过程

在全寿命设计时,构件的设计使用寿命需要满足目标使用寿命的要求,如公式(4)所示<sup>[30]</sup>

$$t_d \geq t_g \tag{4}$$

式中: $t_g$  为模块化寿命规划的使用寿命目标值; $t_d$  为设计使用寿命值。

设计使用寿命  $t_d$  需要具有足够的保证率,而非使用寿命的平均值<sup>[31]</sup>,平均值与设计使用寿命值之间存在如下对应关系

$$t_d = \mu(t_s) / \gamma_t \tag{5}$$

式中: $t_s$  为预期使用寿命; $\mu(t_s)$  为预期使用寿命均值; $\gamma_t$  为寿命安全系数。

寿命安全系数与设计使用寿命的保证率有关,保证率与构件重要性程度、耐久性水平、破坏后修复的难易程度等因素有关。为了便于构件使用寿命分析和设计,可以引入寿命安全系数,将对设计使用寿命的要求转化为对预期平均使用寿命的要求,如公式(6)所示

$$\mu(t_s) \geq \gamma_t t_g \tag{6}$$

混凝土构件耐久性使用寿命设计的主要过程与步骤为:

(1)通过结构整体的模块化分析,确定各构件的

目标使用寿命。

(2)根据构件重要性程度、修复难易程度、耐久性水平等因素确定寿命安全系数。

(3)对构件进行耐久性设计(包括尺寸参数及维护参数),使构件的预期使用寿命均值满足目标使用寿命的要求。

3.5.2 耐久性水平

针对所设计的结构,耐久性水平为其在可能遇到的各种作用下容许破坏的最大程度,是在进行结构设计前应该明确的一个内容。

现行的结构设计规范中,有对结构安全性水平和使用性水平的描述,如根据结构失效可能产生后果的严重程度将结构划分为 3 个安全等级,根据使用要求将裂缝分为 3 级裂缝控制等级,不同的安全等级、裂缝控制等级体现了对结构安全性和使用性的可接受程度。然而,现行规范对于耐久性水平没有明确的规定。根据混凝土结构耐久性能的影响因素和机理的分析、性能演变过程的分析 and 目前结构耐久性研究成果,本文建议将混凝土结构耐久性水平划分为 3 级,见表 2。

表 2 混凝土结构耐久性水平划分

Tab. 2 Durability Level Division of Concrete Structure

耐久性水平	耐久性要求
一级	要求不发生表面损伤(如不允许发生锈胀裂缝)
二级	允许发生一定的表面损伤(如一定宽度的锈胀裂缝)
三级	要求不发生由于耐久性退化引起的承载能力不足

确定结构的耐久性水平应该综合考虑多个因素,包括业主和用户的要求、结构的重要性程度、风险水平、环境作用类型、结构耐久性退化机理等。类似于结构安全等级的要求,同一结构内的各构件宜与结构整体采用相同的耐久性等级,但允许对部分结构构件进行调整。对耐久性水平的调整应遵循以下原则:

(1)对于重要性程度高(主要受力构件)、损坏后可能造成较大的人员伤亡或经济损失的模块或构件,应当适当调高其耐久性水平。

(2)对于受环境作用比较恶劣的模块或构件,可适当调高其耐久性水平。

(3)对于不可更换的模块或构件、维修时难以到达要求的模块或构件,应当适当调高其耐久性水平。

当结构和构件的耐久性水平确定后,就对耐久性设计提出了相应的耐久性要求,设计者可根据该要求进行量化分析和设计。

3.5.3 耐久性可靠指标标准

由于可靠指标和失效概率之间具有一一对应的关系,所以耐久性可靠指标标准也就反映了构件设计时耐久性寿命保证率标准。目前结构设计规范中尚未纳入耐久性极限状态设计的内容,缺少目标耐久性可靠度的标准。目标耐久性可靠指标的选取应当同时考虑失效的不利后果(人员伤亡、环境影响等)及失效后维修成本的高低。

对于耐久性失效的极限状态也可分为承载能力极限状态和正常使用极限状态 2 种,分别对应于由于耐久性能不足而导致结构使用情况不良和安全性能下降,相应的可靠指标标准如表 3 所示<sup>[32-33]</sup>。

表 3 耐久性极限状态可靠指标标准

Tab. 3 Reliability Indexes of Durability Limit States

极限状态	现象	可靠指标
正常使用极限状态	钢筋锈蚀开始	1.5~1.8
	钢筋锈蚀引起混凝土开裂	2.0~3.0
承载能力极限状态	承载力不足	3.6~3.8

3.5.4 寿命安全系数

使用寿命安全系数和允许失效概率(或目标可靠指标)有关,同时与使用寿命的分布类型和变异系数有关。使用寿命的变异系数通常在 0.15~0.3 之间<sup>[34]</sup>,当环境荷载的变异性较大时,引起的使用寿命变异系数也会增大。TC 130 CSL 委员会建议在正常使用极限状态下寿命安全系数取 1.9~2.5,在承载能力极限状态下取 2.9~3.3。考虑到环境荷载对使用寿命影响的变异性较大,当使用寿命变异系数为 0.3~0.4 时,不同耐久性水平的寿命安全系数取值见表 4,具体取值应综合考虑结构的重要性、结构耐久性失效带来的损失及耐久性修复的难易程度综合确定。

表 4 使用寿命安全系数建议取值

Tab. 4 Recommended Values of Life Safety Factors

耐久性水平	使用寿命安全系数
一级	1.2~1.7
二级	1.7~3.0
三级	2.6~4.5

3.6 基于目标使用寿命的检测/维护体系设计

结构使用周期内检测、维护行为的作用主要是:①及时发现结构的损伤;②将结构的性能维持在一一定的水平上;③预防结构的失效;④延长结构的使用寿命。当结构在荷载、环境等因素作用下的实际使用寿命达不到预期值时,检测/维护体系就会对结构使用寿命的延长起到重要的作用。

3.6.1 结构检测/维护作用类型

混凝土结构的维护体系包含检测(Inspection)和维护(Maintenance)两大部分。

结构的检测行为包括日常检查和专项检测。日常检查是在结构设计初期就预先设定的对结构的使用情况进行检查的一种行为,主要以目测为主;专项检测的内容主要包括结构材料的物理或化学性能退化程度及原因的测定,结构或构件开裂状态的检测和评定,结构或构件强度、刚度和稳定性的测定和验算等,技术要求较高,检测工作承担者需要有相应的仪器设备、试验和分析手段,且具有较深厚的专业知识和判断结构工作状态的丰富经验。

检测是结构状态评估和维护的前提,对结构的检测行为进行合理的规划和设计有助于提高结构的性能和减少结构的全寿命费用<sup>[35]</sup>。

结构维护措施类型分为预防性维护措施(Preventive Maintenance, PM)和维修加固措施(Essential Maintenance, EM)两大类<sup>[36]</sup>。预防性维护措施是指对混凝土性能退化具有预防性保护作用的一类措施,如混凝土表面涂层、硅烷浸渍、阴极保护等,预防性维护的作用主要为延缓结构损伤的发生或降低结构性能的退化速度。维修加固措施是指对即将失效的混凝土结构进行的大修,如混凝土结构表面修补、构件加固、构件更换等。

3.6.2 检测/维护体系优化设计

当构件的初始设计参数不能满足目标使用寿命要求的时候,需要对检测/维护体系进行有针对性的设计。由于结构的实际使用寿命不是一个可预测的确定值,所以需要进行基于目标使用寿命的检测/维护体系优化设计<sup>[37]</sup>。

维护体系的优化设计首先依赖于检测/维护与寿命-成本关系的研究。合理的规划检测行为包括确定检测行为的频率(检测时间间隔)和检测行为的精度。检测间隔过短会增加检测成本,间隔过长会增加结构失效的概率;检测精度越高能更及时发现结构的损伤,但是会增加检测成本,精度越低会降低检测成本,但是会增加结构失效的概率。同时,检测与维护行为息息相关,维护措施的选择和检测结果关系十分密切。维护作用可延长寿命,维护效果越好,维护成本越高;维护效果越低,维护成本越低。检测/维护作用、寿命、成本三者关系的研究有利于帮助设计者和决策者进行合理的维护体系设计。

检测/维护体系优化设计的内容包括全寿命过程中检测作用时间、检测作用精度、维护作用类型、

维护作用的选择等<sup>[38]</sup>。

检测/维护体系的优化设计一般是多目标、多约束的规划问题,设计目标包括成本最小化、使用寿命最大化等,性能目标和成本目标之间存在矛盾和竞争关系,性能和成本的综合优化是一个必然的发展趋势。多目标维护优化设计依赖于多目标优化算法的研究和应用。

### 3.7 全寿命成本分析

全寿命成本分析是全寿命设计的一项基础性工作,是设计决策的重要依据<sup>[26]</sup>,用来帮助决策者选择最优的设计方案、检测/维护方案。

#### 3.7.1 固定成本和变动成本

全寿命成本可以按照全寿命阶段划分为建设前期成本、建设期成本、运营期成本和结构拆除成本;按成本承担主体划分为业主成本、用户成本和社会成本<sup>[38]</sup>。不论按哪种方式划分的成本,都包含固定成本和变动成本。固定成本是与作用措施规模无关的成本,一旦采取措施就必须投入,若同时对 2 个或多个对象一同采取措施也不会增加的成本;非固定成本是与作用规模和作用效果有关的成本,随着作用规模和效果的增减而发生增减的各项费用,一般来说与作用规模成比例关系。全寿命成本计算公式为

$$C = C^F + C^V \quad (7)$$

式中: $C$  为总费用; $C^F$  为固定成本部分; $C^V$  为变动成本部分。

以桥梁结构的一次性维修作用来说明固定成本和变动成本的概念和组成。对于单次维修作用,假定维修实际天数与维修规模无关,即使要维修多个构件,其维修总天数与维修 1 根构件是相同的。固定成本中最典型的是运输费及封闭道路带来的用户成本、社会成本等,因为无论维修 1 根构件和维修多个构件,均需对道路进行相同天数的封闭或者限行,在这 2 种情况下,由此产生的用户成本、社会成本是相同的,可见,一次性维修多个构件是有利的。非固定成本与维护作用的规模(如维修构件数量等)有关,如材料费用、机械使用费、人工费等,因为假定总维修时间相同,那么在维修多个构件时必须同时使用更多的机械和人工才能完成维修工作。

固定成本在结构维护时是必然存在的,它的存在体现了等耐久性设计理念对减小全寿命成本的贡献,等耐久性设计通过目标使用寿命的规划设计来减小全寿命成本中固定成本的部分,然而,它也相应带来了其他成本的增加,等耐久性设计能否带来整

个寿命周期内的经济性还需对结构进行全寿命周期内的成本分析。

#### 3.7.2 全寿命成本模型

结构全寿命成本是在全寿命周期内所发生的一切与建设、维护、管理、拆除等有关费用<sup>[39]</sup>。根据全寿命成本的概念和构成分析,建立结构全寿命成本计算模型<sup>[40]</sup>,即

$$L_{CC} = C_1 + C_{IN}(T) + C_{RM}(T) + C_{IN,D}(T) + C_M(T) + C_F(T) \quad (8)$$

式中: $L_{CC}$  为结构全寿命成本; $C_1$  为结构初始成本; $C_{IN}(T)$  为结构整个寿命周期内的日常检查成本总和; $C_{RM}(T)$  为结构整个寿命周期内的日常养护成本总和; $C_{IN,D}(T)$  为结构整个寿命周期内的专项检测成本总和; $C_M(T)$  为结构整个寿命周期内的维护成本总和; $C_F(T)$  为结构的失效成本; $T$  为分析周期。

全寿命成本分析的合理与否依赖于各项成本的合理建模和估计。

#### 3.7.3 全寿命成本分析过程

全寿命成本分析的过程主要有以下 5 个步骤:

(1)明确分析对象、比选方案。分析对象可以是一个结构整体,或者结构的一个部分,如只针对桥梁结构的上部结构;比选方案指可供选择的耐久性寿命规划方案,这些方案必须是在现有的技术条件下可以实现的。

(2)确定基本的分析参数。分析参数包括分析方法(如净现值法或净年值法等)、分析周期和折现率等。

(3)确定全寿命成本组成和成本基础数据。全寿命成本分析的关键步骤、全寿命成本组成和成本数据的合理与否直接关系到全寿命成本分析的结果。对于各方案中相同的成本可以适当忽略不计,因为全寿命成本分析的目的是选择最优的方案,而不是确定确切的财务数据。

(4)计算每种比选方案的全寿命成本现值。全寿命成本中的各项成本必须通过折现转化为现值,以便可以对不同方案做比较。

(5)比较各方案的全寿命成本,选取最优的方案。

## 4 全寿命等耐久性设计方法

### 4.1 定义

全寿命等耐久性设计方法在全寿命设计方法的某一个或几个环节上引入等耐久性设计的理念,是对全寿命设计方法的一个创新。全寿命等耐久性设计方法的基本宗旨是均衡优化结构整体的耐久性

能,延长结构的使用寿命,同时实现结构在生命周期内的经济性。它可定义为在结构的使用寿命周期内寻求恰当的措施,均衡优化结构整体的耐久性能,延长结构的使用寿命,同时实现经济性的方法。

4.2 LC-EDDM 在结构设计过程中的应用

结构设计的过程是将业主、使用者和社会对结构的需要转化为技术性能要求,并建立结构设计方

案以满足这些需求的过程,设计的目的是满足安全、正常使用、耐久、美观、经济等各项要求。

传统的结构设计过程主要包括工程可行性研究、初步设计、施工图设计 3 个阶段<sup>[41-45]</sup>。工程可行性研究是要对拟建结构的业主、使用需求进行调查分析,并根据其需求的发展趋势,合理确定结构需要满足的安全性、使用性能、使用寿命、经济性目标;初步设计是根据可行性研究确定的目标,对结构的设计方案进行初步设计,包括结构选型、结构布置、材料选择、构件截面初步设计等;施工图设计是在确定结构设计方案后,对构件以及细部构造进行设计,形成具备可行性的结构设计。

全寿命等耐久性设计方法主要在结构初步设计阶段发挥作用(图 4)。在初步设计时,首先按照传统设计过程对结构整体进行初步设计,获得初步设计方案;然后对结构进行模块化分析,对组成结构的各组成部分的目标使用寿命进行规划;最后对初步设计方案下各构件使用寿命进行分析,在目标使用寿命下对初步设计方案进行必要的调整,当使用寿命预期值不能达到目标使用寿命值时,对构件的检测/维护体系进行优化设计。

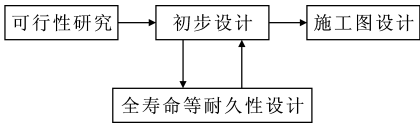


图 4 LC-EDDM 在结构设计过程中的应用

Fig. 4 Application of LC-EDDM in Structural Design Process

4.3 设计过程

根据核心研究内容,提出考虑了 LC-EDDM 的结构初步设计的设计过程,如图 5 所示。

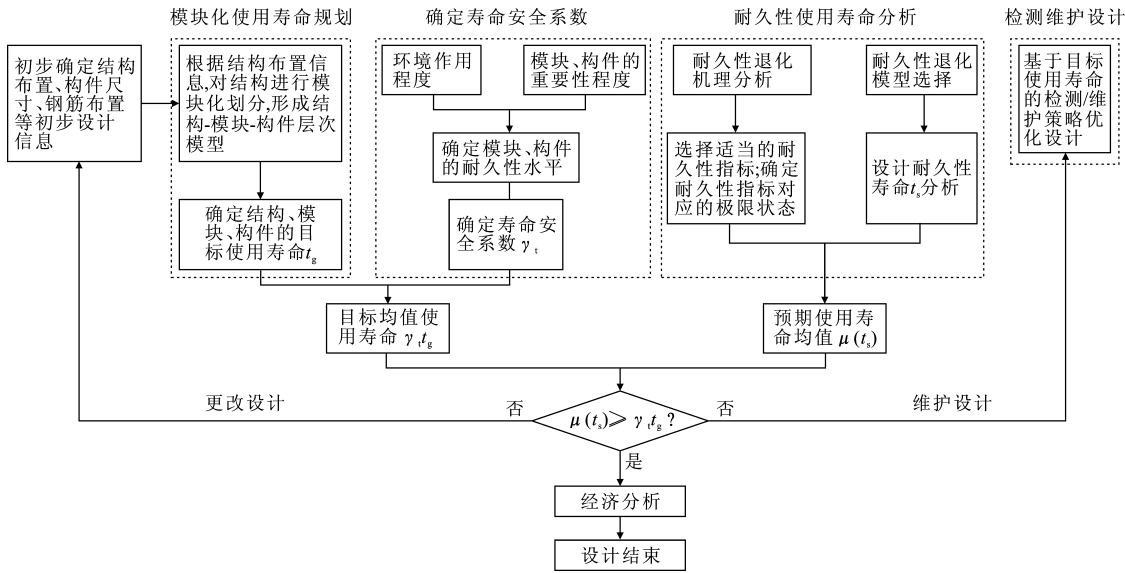


图 5 考虑了 LC-EDDM 的结构初步设计的设计过程

Fig. 5 Structural Preliminary Design Process Considering LC-EDDM

4.4 未来研究关键问题

全寿命等耐久性设计方法的研究过程中需要解决的关键问题及解决方法主要包括以下几点：

(1) 构件目标使用寿命设计及寿命安全系数的确定。构件目标使用寿命需根据现行技术条件及等耐久性原则确定;寿命安全系数需根据构件重要性程度、耐久性水平、失效后果综合确定。

(2) 基于目标使用寿命的检测/维护策略优化设计方法的建立。分析检测精度与检测成本关系、维

护作用与使用寿命关系、维护作用与维护成本关系,建立检测/维护-寿命-成本综合关系模型,为建立基于目标使用寿命的检测/维护策略优化设计方法提供基础;确定设计变量与目标函数,建立基于目标使用寿命的检测/维护策略优化设计方法的基本框架;分析多目标优化设计算法,解决检测/维护策略优化设计的计算问题。

(3) 全寿命成本分析理论的完善。在固定成本和变动成本概念的基础上,明确 2 项成本的组成及



估计方法;由于构件或结构的使用寿命是不确定的,需要建立基于不确定性的全寿命成本分析方法。

## 5 结 语

(1)全寿命等耐久性设计方法的基本宗旨是均衡优化结构整体的耐久性能,延长结构的使用寿命,同时实现结构在生命周期内的经济性,其理论研究的核​​心内容包括耐久性退化过程研究,耐久性寿命的分布研究,结构模块化使用寿命规划,耐久性使用寿命设计,全寿命成本分析,检测/维护策略研究。

(2)全寿命等耐久性设计方法的基本思路为:首先在等耐久性理念的基础上对结构各组成部分的目标使用寿命进行规划;然后对组成结构的构件设计参数和维护体系参数进行设计,使构件的使用寿命可以达到目标使用寿命的要求。

(3)对 LC-EDDM 在结构设计过程中的应用进行了探讨,根据核心研究内容,提出了考虑 LC-EDDM 的结构初步设计过程。

(4)全寿命等耐久性设计方法是对等耐久性设计和全寿命设计相结合理论研究的一种探索,其具体的应用尚需更多的理论研究作支持。

## 参考文献:

## References:

- [1] 刘 军, 邬晓光, 张彦飞. 基于可靠度的桥梁使用寿命分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 54-58.  
LIU Jun, WU Xiao-guang, ZHANG Yan-fei. Bridge Structure's Service Life Based on Reliability[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 54-58.
- [2] 徐 岳, 武同乐. 桥梁加固工程生命周期成本横向对比分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(3): 30-34.  
XU Yue, WU Tong-le. Comparative Analysis of Life-cycle Cost for Bridges Strengthening[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3): 30-34.
- [3] 彭建新, 邵旭东, 张建仁. 混凝土桥梁全寿命设计方法和例证[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 101-109.  
PENG Jian-xin, SHAO Xu-dong, ZHANG Jian-ren. Whole-life Design Method and Illustration for Concrete Bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 101-109.
- [4] 屈文俊. 既有混凝土桥梁的耐久性评估及寿命预测[D]. 成都: 西南交通大学, 1995.

- QU Wen-jun. Durability Evaluating and Life Predicting on Existing Concrete Bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1995.
- [5] 屈文俊, 车惠民. 混凝土桥梁的优化等耐久性设计[J]. 土木工程学报, 1998, 31(4): 23-30.  
QU Wen-jun, CHE Hui-min. Design of Optimum Equal Durability About Concrete Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(4): 23-30.
- [6] 屈文俊, 张 誉. 混凝土桥梁的耐久性维护方法[J]. 铁道学报, 2001, 23(1): 98-102.  
QU Wen-jun, ZHANG Yu. Method for Durability Maintenance of Concrete Bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(1): 98-102.
- [7] 屈文俊, 陈道普, 黄海群. 钢-GFRP 混合配筋混凝土梁抗弯承载力计算[J]. 建筑结构, 2006, 36(12): 22-24.  
QU Wen-jun, CHEN Dao-pu, HUANG Hai-qun. Bending Moment Resistance Calculation of Steel-GFRP Reinforced Concrete Beam [J]. Building Structure, 2006, 36(12): 22-24.
- [8] 屈文俊, 顾俊颀, 秦宇航. RPC-NC 组合截面梁的耐久性试验研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(1): 106-108, 118.  
QU Wen-jun, GU Jun-jie, QIN Yu-hang. Experimental Study on the Durability of PRC-NC Combined Section Beams [J]. Structural Engineers, 2009, 25(1): 106-108, 118.
- [9] 叶文亚, 李国平, 范立础. 桥梁全寿命成本初步分析[J]. 公路, 2006(6): 101-104.  
YE Wen-ya, LI Guo-ping, FAN Li-chu. Preliminary Analysis of Bridge Life Cycle Cost [J]. Highway, 2006(6): 101-104.
- [10] 金伟良, 牛荻涛. 工程结构耐久性与全寿命设计理论[J]. 工程力学, 2011, 28(增 2): 31-37.  
JIN Wei-liang, NIU Di-tao. The State-of-the-art on Durability and Life-cycle Design Theory of Engineering Structures [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S2): 31-37.
- [11] SARJA A. Integrated Life Cycle Design of Structures [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2005.
- [12] 马军海, 陈艾荣, 贺 君. 桥梁全寿命设计总体框架研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 1003-1007.  
MA Jun-hai, CHEN Ai-rong, HE Jun. General Framework of Bridge Whole Life Design [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(8): 1003-1007.
- [13] 金伟良, 钟小平, 胡琦忠. 可持续发展工程结构全寿命

- 周期设计理论体系研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增): 401-406.
- JIN Wei-liang, ZHONG Xiao-ping, HU Qi-zhong. The Study of Theoretical System of Life Cycle Design of Sustainable Developed Structure[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(S): 401-406.
- [14] 钟小平, 金伟良. 混凝土结构全寿命性能设计理论框架研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(8): 1-9.
- ZHONG Xiao-ping, JIN Wei-liang. Framework of Design Theory of Whole Life-cycle Performance in Concrete Structure[J]. Industrial Construction, 2013, 43(8): 1-9.
- [15] 彭建新, 张建仁. 考虑全寿命性能和成本的碳化腐蚀下 RC 梁桥耐久性参数确定方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 69-75.
- PENG Jian-xin, ZHANG Jian-ren. Determination Method of Durability Parameters for RC Bridges Subjected to Carbonation-induced Corrosion Considering Whole-life Performance and Costs[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1): 69-75.
- [16] FRANGOPOL D M, LIN K Y, ESTES A C. Life-cycle Cost Design of Deteriorating Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(10): 1390-1401.
- [17] FRANGOPOL D M, KALLEN M, VAN-NOORTWIJK J M. Probabilistic Models for Life-cycle Performance of Deteriorating Structures: Review and Future Directions[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2004, 6(4): 197-212.
- [18] FRANGOPOL D M, LIU M. Maintenance and Management of Civil Infrastructure Based on Condition, Safety, Optimization, and Life-cycle Cost[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2007, 3(1): 29-41.
- [19] KONG J S, FRANGOPOL D M. Life-cycle Reliability-based Maintenance Cost Optimization of Deteriorating Structures with Emphasis on Bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(6): 818-828.
- [20] VAN NOORTWIJK J M. Optimal Replacement Decisions for Structures Under Stochastic Deterioration [C]//FRANGOPOL D M, COROTIS R B, RACKWITZ R. Proceedings of the Eighth IFIP WG7. 5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems. Krakow: IFIP, 1998: 270-280.
- [21] VAN NOORTWIJK J M, KLATTER H E. The Use of Lifetime Distributions in Bridge Maintenance and Replacement Modelling[J]. Computers & Structures, 2004, 82(13/14): 1091-1099.
- [22] VAN NOORTWIJK J M. A Survey of the Application of Gamma Processes in Maintenance[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(1): 2-21.
- [23] FURUTA H, FRANGOPOL D M, SAITO M. Life-cycle Cost Design of Deteriorating Bridges Using Genetic Algorithm[C]//AVENT R R, ALAWADY M, AVENT R. Proceedings of the 1999 Structures Congress. New Orleans: ASCE, 1999: 243-246.
- [24] VAL D V, STEWART M G. Life-cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Structures in Marine Environments[J]. Structural Safety, 2003, 25(4): 343-362.
- [25] STEWART M G, VAL D V. Multiple Limit States and Expected Failure Costs for Deteriorating Reinforced Concrete Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(6): 405-415.
- [26] 钟小平, 金伟良. 工程结构全寿命周期设计框架研究 [C]//第十一届中国科协年会组委会. 自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(2). 重庆: 重庆出版社, 2009: 1138-1144.
- ZHONG Xiao-ping, JIN Wei-liang. Research on Design Framework of Engineering Structure in Whole Life-cycle[C]//Organizing Committee of the Eleventh Annual Meeting of China Association for Science and Technology. Proceedings of the Eleventh Annual Meeting of China Association for Science and Technology (2). Chongqing: Chongqing Press, 2009: 1138-1144.
- [27] 张 誉, 蒋利学, 张伟平, 等. 混凝土结构耐久性概论 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- ZHANG Yu, JIANG Li-xue, ZHANG Wei-ping, et al. Durability of Concrete Structures [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003.
- [28] 邸小坛, 周 燕. 混凝土结构的耐久性设计方法[J]. 建筑科学, 1997(1): 16-20.
- DI Xiao-tan, ZHOU Yan. Durability Design Method of Concrete Structure[J]. Building Science, 1997(1): 16-20.
- [29] 牛荻涛, 陈亦奇, 于 澍. 混凝土结构的碳化模式与碳化寿命分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 1995, 27(4): 365-369.
- NIU Di-tao, CHEN Yi-qi, YU Shu. Model and Reliability Analysis for Carbonation of Concrete Structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1995, 27(4): 365-369.
- [30] 林 迟. 基于结构全寿命设计需求的环境作用与结构性能退化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LIN Chi. Study on Environmental Actions and Per-

- formance Degradation of Structures for the Needs of Structural Life-cycle Design[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [31] 胡琦忠. 工程结构全寿命周期设计理论的核心指标研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- HU Qi-zhong. Key Indicators of Design Theory on Engineering Structures in the Whole Life-cycle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [32] SIEMES T, ROSTAM S. Durable Safety and Serviceability: A Performance Based Design Format[R]. Zurich: IABSE, 1996.
- [33] 马亚丽, 张爱林. 基于规定可靠指标的混凝土结构氯离子侵蚀耐久寿命预测[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 36-41.
- MA Ya-li, ZHANG Ai-lin. Durability Life Prediction of Concrete Structure Based on the Regulated Reliability Index Under Chloride Environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 36-41.
- [34] SARJA A. Reliability Principles, Methodology and Methods for Lifetime Design[J]. Materials and Structures, 2010, 43(1/2): 261-271.
- [35] VAN NOORTWIJK J M, KLATTER H E. Optimal Inspection Decisions for the Block Mats of the Eastern-Scheldt Barrier[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 65(3): 203-211.
- [36] YANG S, FRANGOPOL D M, NEVES L C. Optimum Maintenance Strategy for Deteriorating Bridge Structures Based on Lifetime Functions[J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 196-206.
- [37] FRANGOPOL D M. Life-cycle Performance, Management, and Optimisation of Structural Systems Under Uncertainty: Accomplishments and Challenges[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(6): 389-413.
- [38] 刘伯奇. 基于性能-寿命-成本优化的混凝土梁桥设计方法及系统开发[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- LIU Bo-qi. Study on the Performance-life-cost Based Design Method and System Development for RC Girder Bridges[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [39] 曹明兰, 黄 侨, 任 远. 混凝土桥面维修决策中的全寿命成本分析法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1621-1624.
- CAO Ming-lan, HUANG Qiao, REN Yuan. Life Cycle Cost Analysis Method in Maintenance Decision for Concrete Bridge Decks[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1621-1624.
- [40] JAWAD D J. Life Cycle Cost Optimization for Infrastructure Facilities[D]. New Brunswick: Rutgers University, 2003.
- [41] 武文杰. 基于不确定性的钢筋混凝土桥梁量化可持续性评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- WU Wen-jie. Sustainability Quantitative Assessment of Reinforced Concrete Bridges Based on Uncertainties[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [42] 彭建新. 基于寿命周期成本的桥梁全寿命设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- PENG Jian-xin. Life Cycle Cost Based Bridge Whole Life Design Method[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [43] 董建军, 陈 光, 陆 彦, 等. 工程项目全寿命周期费用结构体系研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 138-142.
- DONG Jian-jun, CHEN Guang, LU Yan, et al. A Study on Project Life Cycle Cost Structure System[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 138-142.
- [44] KIM S, FRANGOPOL D M, ZHU B. Probabilistic Optimum Inspection/Repair Planning to Extend Lifetime of Deteriorating Structures[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, 25(6): 534-544.
- [45] KIM S, FRANGOPOL D M, SOLIMAN M. Generalized Probabilistic Framework for Optimum Inspection and Maintenance Planning[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(3): 435-447.