

文章编号: 0451-0712(2004)12-0034-05

中图分类号: F224.5:U44

文献标识码: B

寿命周期成本分析方法在桥梁工程中的应用

吴海军^{1,2}, 陈艾荣¹

(1. 同济大学 上海市 200092; 2. 重庆交通学院 重庆市 400074)

摘 要: 桥梁耐久性低、服务寿命短的问题已经严重影响了结构正常服务功能的发挥, 并给社会造成了巨大的经济负担。文中介绍了寿命周期成本分析的概念及其应用于桥梁工程的发展历程, 阐述了它的基本原理, 探讨了桥梁寿命周期成本的构成, 并给出了进行分析时的计算公式。利用国外的两个例子说明了桥梁全寿命成本分析对于桥梁设计和维护管理的重要性。

关键词: 桥梁; 寿命周期成本分析; 机构成本; 使用者成本; 风险与易损性成本

1 概述与问题

近年来, 世界各国普遍认识到, 桥梁使用性能差、耐久性低、服务寿命短、全寿命经济性指标差等问题(与人们最初的设计和规划预期有很大差异)已经严重影响了其正常服务功能的发挥, 并且给养护、维修等后期运营管理工作带来难以承受的巨额经济和社会负担, 也使桥梁的建设管理面临着极大的系统风险。

经过长期的探索, 人们认识到除了设计合理、施工得当、维护及时外, 要从根本上解决以上问题还需要改变桥梁建设管理的一些理念和习惯做法。实际上, 我国当前桥梁建设中的某些惯例和办法在很大程度上导致或加剧了桥梁使用寿命短、耐久性差的问题, 相关的典型问题如下。

(1) 在桥梁规划和设计阶段, 对多个方案进行比选时, 只注重建设初期(包括设计与施工)的成本, 而忽视桥梁从规划、建设到运营、破坏整个寿命周期的总成本。而合理的经济性应当体现为使桥梁的建造与在整个使用期内检查、养护及维修费用之和达到最低。各国桥梁使用实践证明, 如果片面追求较低的建造费用而忽视了对结构耐久性的改善, 不仅影响结构的安全、减少结构使用寿命, 同时投入的养护维修费用将十分可观, 甚至远远超过建造中节省的费用。

(2) 国内桥梁工程招投标中经常是报价越低, 得分越高, 中标的希望越大。由于公路桥梁建设市场的

收稿日期: 2004-06-23

下任何固定模板的痕迹, 也就是说, 取消所有穿过混凝土的对拉螺杆, 就像竖直滑模施工墩塔一样, 进行悬浇水平滑模施工, 它不仅能简化施工程序, 加快悬浇速度, 还能够提高混凝土的浇注质量, 增加桥跨的外形美感。

5 结语

高桥墩悬浇桥梁一般位于高山峡谷之中, 其明显的施工技术难度就是生产要素的升降, 0 号块的支撑托架在高空的架设, 以及悬浇挂篮在高空的安装、就位。利用挂篮完成全桥竖直及水平连续滑模施

工, 不仅使整体施工程序简化, 加快进度, 提高建桥质量, 增加了桥梁的美观。更重要的是, 挂篮连续滑模法施工高桥墩悬浇桥梁, 可以从根本上取消传统施工方法为施工平台及模板提升、挂篮就位所必须架设的耗资巨大的缆索吊装系统; 也取消了为 0 号块浇注, 或横系梁浇注专门架设的高空支撑托架。它集缆索吊装系统、0 号块施工的专用托架、悬浇施工的移动挂篮, 三位为一体。它在跨越深山、峡谷的铁路桥梁、公路桥梁施工中的推广意义是不言而喻的。它所带来的技术创新意义和经济价值应该是显而易见的。

竞争非常激烈,导致一些工程报价被压得过低,施工企业的合理利润得不到保证。这在客观上助长了桥梁建设中层层分包这种不良运作方式的存在。工程的实际建设者往往是资质差、技术力量薄弱、管理松散的队伍,这将对桥梁的建设质量十分不利。

(3) 还有一些工程(如一些政绩工程、献礼工程),因为种种原因过分缩短建设周期,一味追求施工进度,难免出现违背科学规律的做法,也在一定程度上增加了桥梁的病害,减少了桥梁的寿命。

(4) 以往的工程移交方式不够合理。桥梁一般在竣工后一年进行验收,期间出现的问题由施工方负责,验收合格即移交给建设方或管理方。工程验收后,设计和工程承包方一般不再承担使用期间工程损坏、修复、重建等的义务和责任,而工程即使存在质量问题,也往往在短期内不会明显暴露出来。这就造成了大量工程因建设原因导致的耐久性不足,却由国家承担经济损失,给桥梁后期的养护维修带来了隐患,这是制度上存在的缺陷。

我国正处于桥梁建设的高峰时期,大量的在役与待建桥梁都面临着如何保证其全寿命期间的安全、耐久及维护管理的经济性问题。因此关于桥梁全寿命周期有关问题的研究有十分紧迫和现实的意义。本文将主要探讨桥梁全寿命周期成本分析的原理及其应用。

2 桥梁寿命周期成本分析方法的发展历程及基本原理

寿命周期成本(Life Cycle Cost, 简写成 LCC)及全寿命经济性概念首先由美国军方于 20 世纪 60 年代提出,应用于军用器材采办,并迅速推广到民用企业。从开始提出到 70 年代,是酝酿和探索阶段;到 20 世纪 80 年代,寿命周期成本方法已在国际上得到公认,相关规定已较为完善,在航空、航天、舰船、车辆、建筑,及小型机械等各方面都有一定的研究与应用,是进行投资决策的重要依据。

从 20 世纪 80 年代开始,LCC 方法逐渐应用到道路交通行业,人们开始研究建设项目的全寿命成本优化问题,从成本的角度提出全寿命管理的观念,综合考虑建设成本,选择全寿命成本最优的方案。鉴于以往教训(对基础设施的耐久性认识不足或重视不够,经济损失严重),以美国为首的一些国家,率先针对道路、桥梁等基础设施项目提出了“寿命期成本分析”的概念,即“全寿命经济分析”(Total Life Cycle Cost Analyze, 简号或 LCCA)。分析时,必须要

确定桥梁从建成到其寿命期结束的总费用,有时也表示为 WLCA(Whole-life Costing Analysis)。简单地讲,它是为了回答桥梁在其整个寿命过程中要使用多少“今天的钱”(净现值,Net Present Value)。全寿命经济分析法的本质是要求在设计施工阶段,不论是事先采取防护措施还是以后“坏了再修”,都要做出经济预算和比较,承建者要对工程的“全寿命”负责到底,这样可避免“短期行为”给后人带来的麻烦与巨大经济损失。

采用 LCCA 法对项目评估的目的与标准是在保证工程寿命期的前提下,使综合花费成本最少,实现技术可靠、经济合理。鉴于美国已经有用 4 座桥的费用维持 1 座桥的深刻教训,故特别强调适当增加初始投入以减少后期的巨大开支。美国 LCCA 委员会指出,实行 LCCA 法的目的就是减少后期投资、提高项目质量与性能。这是一个使长期效益最大化的有效方法。

在 20 世纪 90 年代,LCCA 方法在交通基础设施建设中的应用产生了一些阶段性成果,其中有代表性的是 1998 年美国联邦公路局颁布的“道路设计中的全寿命费用分析”(Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design)。关于全寿命的设计理论和原理也已经写入了美国和英国桥梁设计的有关规范和手册,例如英国的 BD36(1992)以及 BA28(1992)等。近年来,美国和英国对于桥梁全寿命问题也开展了更为系统的研究。这些研究成果对于在役桥梁的维护管理策略优化和新建工程的耐久性设计及经济性评估都将起到非常积极的作用。

尽管如此,LCCA 方法在桥梁工程中的应用尚没有形成一套得到公认的计算方法和模型,加之在分析和比较的过程中存在着较多的不确定因素,所以,还有很多问题有待进一步研究。

3 桥梁寿命周期成本的基本构成与计算、分析模型

3.1 基本构成

桥梁寿命周期成本由“机构成本”和“使用者成本”两部分组成。“机构”一般指桥梁的建设者和拥有者,政府实体是典型的“机构”。由于我国以往桥梁的投资方、建设方与桥梁运营期间的管理者往往不是同一个实体,经常是政府部门(如各省交通厅)投资,然后授权某个机构(如各省的高速发展有限公司或者建设指挥部)负责建设,建成后再交给另外的部门进行运营养护管理,因此要明确“机构”的含义是复杂的。

现在我国日益推广执行投资管理一体化的建设模式,因此“机构”的概念也明确了。“机构成本”指桥梁规划、设计、施工以及建成后的运营、维护等的成本的总和。具体地讲,“机构成本”包括以下内容:(1)桥梁的规划、设计等相关成本;(2)桥梁的施工和建设成本;(3)桥梁的常规维护成本;(4)构件的修复费用;(5)桥梁构件更换成本;(6)桥梁更新的成本。

“使用者”是一个广义的概念,包括使用桥梁的车辆,以及附近区域可能依靠桥梁进出的商业和居民。“使用者成本”一般是由于桥梁的功能缺陷(例如桥梁限载、封闭或由于桥梁清扫、维修、修复和更换而限制通行)所引起的额外费用,这些功能缺陷将可能导致车辆绕行,时间延误和浪费,事故率提高,从而引起车辆的运营费用提高。

“机构成本”和“使用者成本”的具体构成要视桥梁的具体情况进行分析。一般情况下,桥梁全寿命周期成本可以定义为——在桥梁整个寿命周期内所发生的一切与桥梁的建设、维护、管理等有关的费用。

3.2 风险与易损性成本

风险与易损性成本是“机构成本”和“使用者成本”的组成部分,是由于桥梁具有抵抗意外和偶然事件的易损性缺陷所产生的。与其他成本相比,这是较容易被人们忽视的部分,主要是因为该项成本的发生与否存在偶然性和随机性。但是,这部分成本在很多时候是不可忽视的,例如桥梁会由于地震而产生巨大的损失。工程的风险和不确定性通常是由于桥梁和环境因素相互作用而产生的部分或全部功能丧失所决定。其中,最常见的工程风险和易损性的诱因如下。

(1)与桥梁状态相关的桥梁在承载力和寿命方面性能的降低。

重复荷载作用下,随着桥梁性能随着时间退化,使用者面临的风险及潜在的不方便也逐渐增大。桥梁的部分或全部失效会产生极大的麻烦,失效风险的增大将意味着失效导致的成本增大,因此失效风险的变化也应计入成本中。这些直接和间接的成本将包括桥梁的更换、交通绕行、交通堵塞、生命丧失引起的费用。

(2)地震易损性,主要针对处于地震区的桥梁,由于地震导致的人员、结构和财物等损失。

(3)风振易损性,主要指产生如龙卷风、飓风等意外风现象所导致的损失。

(4)桥梁冲刷和洪水引起的损失(这方面的例子也很多,例如 2003 年陇海铁路灞河桥由于人为挖砂

导致洪水冲垮桥墩,引起列车停开或绕道等严重问题,经济损失巨大)。

(5)超载和疲劳,超载现象在我国公路运输中较为普遍。超载会使桥梁疲劳应力幅度加大,损伤加剧,甚至会出现超载引发的结构破坏事故。另一方面,由于超载造成的桥梁内部损伤不能恢复,将使得桥梁在正常荷载下的工作状态发生变化,从而可能危害桥梁的安全性和耐久性。

(6)桥梁服务功能过时或落后的风险。

(7)其他风险。

3.3 桥梁全寿命成本分析的计算模型

上述项目是桥梁全寿命成本分析的输入项,具体地,桥梁全寿命成本分析模型可以写成:

$$LCC = DC + CC + MC + RC + UC + SV \quad (1)$$

式中: DC 为设计成本; CC 为建设成本; MC 为维修成本; RC 为修复成本; UC 为使用者成本; SV 为剩余价值(可以为正,也可以为负)。

这里需要指出的是:在使用寿命终止时,桥梁具有的一定价值必须计入到寿命周期成本分析中。这些价值可称之为“剩余价值”(SV)或“终点价值”,它可能为正(+) (例如如果建材可以回收利用),也可能为负(-) (如果拆除的费用超过转售剩余资源所得)。

由于桥梁寿命周期的各项费用是在不同时间发生的,一般利用贴现率将未来成本折算成现值,以便于比较,未来成本与现值之间的换算关系为:

$$PV = \frac{FV_N}{(1+r)^N} \quad (2)$$

式中: PV 为净现值费用; FV_N 为未来成本发生的年份; r 为分析时的贴现率。

为便于理解和使用,考虑到其他各项成本与费用,桥梁全寿命周期成本分析的计算公式也可以更为具体地写成如下形式:

$$NPV = CC + \sum_{i=N_1, N_2, \dots} \frac{OMC_i + TDC_i}{(1+r)^i} + \frac{CL}{(1+r)^n}$$

式中: NPV 为净现值费用; CL 为评估期结束时的资金损失; OMC_i 为第 i 年的维护费用; TDC_i 为第 i 年的交通阻隔等引起的费用; N_1, N_2, \dots 为进行维护时的年份。

4 基于 LCCA 分析的桥梁工程示例

为了揭示 LCCA 方法对于桥梁设计和维护的重要决策价值,下面通过两个例子来进行说明。

4.1 实桥示例之一——美国某桥梁桥面

表 1 给出了一则利用 LCCA 法对美国华盛顿郡 46 号公路的一座混凝土桥梁的桥面进行 75 年寿命期总成本评定结果的相对比较值。其中混凝土未采取防护措施(空白)的总成本相对值为 100。可以看出,采用防护措施后虽然初始成本会增加一些,但在寿命期内的后期花费(修复费等)可大大降低。其中最好的防护措施是硅粉加钢筋阻锈剂。采用该措施,在满足寿命期要求的前提下,与未采取防护措施者相比,总花费节约达 67%。

表 1 不同防护方案总花费的比较

防护措施	总费用 (相对值)
空白	100
环氧树脂涂层钢筋	75
镀锌钢筋	86
耐腐蚀钢筋	83
钢筋阻锈剂	65
硅粉(高性能混凝土)	67
硅粉+钢筋阻锈剂	33
环氧树脂涂层钢筋+钢筋阻锈剂	51

从寿命的角度来看,如果该桥面以当时的普遍做法建造,13 年后将发生钢筋锈蚀;如果使用环氧涂层钢筋,腐蚀则被推迟到 25 年时;如果采用高性能混凝土,腐蚀开始的时间则被延后到 50 年;如果这两种措施同时被采用,那么进行第一次较大维修的时间将延长至 75 年时,桥梁的寿命也得到明显的延长。

4.2 实桥示例之二——不同设计策略下某码头桥梁的分析示例

该例是针对大西洋北部海岸(温湿的环境下)的某座码头桥梁,设计要求为 50 年内钢筋受氯离子侵蚀而锈蚀的概率不超过 5%。

图 1 示意了钢筋混凝土结构耐久性退化的过程,其中点 1 和点 2 代表了结构的正常使用状态,点 3 是正常使用状态与承载能力极限状态的分界限,点 4 则代表着结构的毁坏。点 1 是钢筋开始脱钝化,点 2 是混凝土保护层开裂,点 3 代表混凝土保护层剥落,点 4 则代表结构毁坏。为保证设计目标,比较了结构耐久性设计的 4 种策略。

策略 1:采用普通的混凝土、普通的设计及一般的施工方法。容许结构发生腐蚀,当发现严重腐蚀的
万方数据

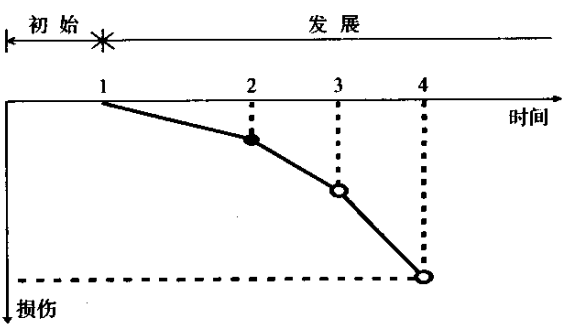


图 1 混凝土桥梁寿命期的重要阶段

迹象超过混凝土表面积 5% 时,则进行维修。维修时替换遭到腐蚀的保护层,表面重新处理的费用是 800 美元/m²,涉及的面积是 3 400 m²。这种策略依赖于视觉检查,其检查周期为 5 年,每次的检查费用为 3 000 美元。

策略 2:与策略 1 相比,保护层厚度增加、混凝土质量提高,于是在结构寿命期钢筋发生锈蚀的机率小,不需要进行大的维修。与高性能混凝土相关的设计,保护层增加,高标准养护以及增加的质量控制措施引起的相关费用为 11 500 美元,对应的结构检查周期也为 5 年,每次的检查费用为 6 000 美元。为了减少施工期可能缺陷的不利影响,每 5 年要进行一次小的维修,费用假定为方案 1 中大修费用的 2.5%。

策略 3:在水下为每个立柱安装一个牺牲阳极,水上的立柱及梁底面准备实施阴极保护。当 5% 的混凝土表面表现出轻微腐蚀时,该防护系统启用。每个牺牲阳极的费用是 100 美元,每 10 年更换一次。阴极保护的准备工作的费用是 10 美元/m²,总面积为 3 400 m²。阴极保护的总费用是 150 美元/m²,电器设备的费用是 10 000 美元/m²,每 20 年更换一次。其检查周期为 5 年,每次的检查费用为 3 000 美元。

策略 4:50% 的钢筋选用不锈钢筋(假定使用在结构最暴露的部分),这样可以避免在使用期内钢筋出现锈蚀。结构含筋量为 100 kg/m³,设桥面板平均厚度为 40 cm,于是结构混凝土的体积为 1 400 m³,钢筋用量为 140 t。设每公斤不锈钢筋较普通钢筋贵 2 美元。检查周期为 5 年,每次的检查费用为 3 000 美元。

图 2 是依照上述 4 个不同的设计策略,考虑不同贴现率的情况下的全寿命经济性比较。由图可以得出不同设计策略下的两个分析结论。

(1)最常用的方法(即策略 1)与较少采用的阴极防护方法(策略 3),在利率较低的情况下,全寿命周

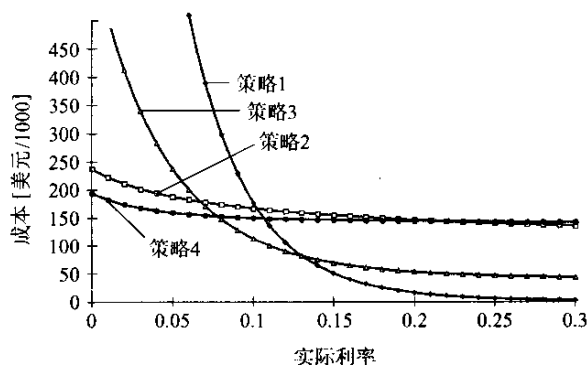


图 2 4 种不同的设计策略及其全寿命期成本

期累计成本非常高。但是在利率很高的情况下,随着利率的增加将越来越有优势。

(2)当采用特殊的设计、混凝土质量及施工措施后(策略 2)或采用不锈钢筋解决了关键的锈蚀问题(策略 4),在正常的低利率情况下,全寿命周期的成本将很小。在策略 2 的实施中,合格材料及工艺的取得具有一定的不确定性,而从耐久性的观点来看,策略 4 的方法从工艺和材料质量的标准方面较易实施。

5 结语

实施 LCCA 法对于处理桥梁建设中短期效益与

长期效益的关系,有很好的现实指导意义;也是在基础设施建设方面,逐渐提高我国的技术水平和管理能力,与国际接轨的重要方面。

桥梁的全寿命分析理论不但可以用于新建桥梁的设计决策中,也适合与在役桥梁的维护管理策略的选择方面。然而真正推广实施仍需要有大量的基础工作和可靠的依据。

参考文献:

- [1] 陈艾荣,吴海军. 关注桥梁设计中的安全性和耐久性[J]. 中国公路,2002,(23).
- [2] 洪乃丰. 钢筋混凝土基础设施的腐蚀与全寿命经济分析[J]. 建筑技术,2002,(4).
- [3] M J Ryall. Bridge Management, Butterworth Heinemann, 309. 2002.
- [4] Use of Non-corrodible Reinforcement in Concrete Bridges.
- [5] Brad Violetta. Life-365 Service Life Predication Model. Concrete International, 2002, (11).
- [6] Rostam Steen. Performance-Based Design of Structures for the Future. Proceedings of the IABSE Symposium Structures for the Future-the Search for Quality. Rio de Janeiro, Brazil. 1999.

Application of Life Cycle Cost Analysis Method to Bridge Structures

WU Hai-jun^{1,2} CHEN Ai-rong¹

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Civil Engineering College, Chongqing 400074, China)

Abstract: Normal service performance of bridges is suffered from poor durability and short lifetime which have brought great economic burden for society. The concept of life cycle cost analysis and its application history in bridges are introduced. The compose of life cycle cost is discussed and calculation equation presented. And importance of LCCA for bridges design and maintenance is explained by two examples in foreign countries.

Key words: bridges; life cycle cost analysis; agency cost; user cost; risk and vulnerability cost