

全寿命周期成本分析在不同材料桥梁方案比选中的应用

胡铁山, 王勇, 夏俊波

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要: 随着中国桥梁工程的发展, 桥梁老化现象对桥梁经济指标的影响越来越得到重视, 从设计阶段就开始考虑桥梁的全寿命周期成本的经济性具有重要社会经济意义。文中结合实体工程, 细化桥梁全寿命周期成本构成模型, 提出预应力砼和钢结构两种材料的桥梁设计方案, 对比分析两种材料桥梁方案的全寿命周期成本, 探讨全寿命周期成本在不同材料桥梁方案比选中的应用。

关键词: 工程经济; 桥梁; 全寿命周期成本; 方案比选

中图分类号: U415.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)01-0147-04

预应力砼和钢结构是现当代桥梁两大主要建造材料, 预应力砼能就地取材、施工方便、建设成本相对较低, 被广泛应用于中国公路桥梁建设中; 钢结构的自重轻、各向性能均匀、易于工厂化制造和吊装施工、质量好控制且方便加固改造和回收利用, 在国外桥梁中应用较多, 美、日、法等国家的钢结构桥梁占比分别为 35%、41% 和 85%。由于钢结构桥梁前期建造成本较高, 在中国主要用于特大跨径桥梁及跨线桥。对于不同结构材料的桥梁方案, 通常从技术先进性和经济合理性两方面进行比选论证, 其中技术先进性侧重于施工工艺、结构安全及材料性能, 经济合理性主要从工程费用的角度进行比较。传统的桥梁设计理念偏重桥梁建设期成本的经济性, 而忽视了桥梁结构在运营过程中的成本支出。全寿命周期成本分析从设计阶段就开始考虑桥梁的设计、施工、运营管理到寿命终结拆除等全过程的成本即桥梁全寿命周期成本, 具有重要的社会意义。该文以某高速公路通航桥梁为依托, 对预应力砼、钢结构两种材料的桥梁方案进行经济比选, 通过预测设计、施工、营运到拆除阶段两桥梁方案的全寿命周期成本, 确定满足桥梁正常使用功能需求与经济费用最低的最佳方案。

1 桥梁全寿命周期成本分析理论

从本质上说, 单纯地只考虑桥梁建设期成本而忽视后期运营管理费用是片面的。为全面考虑桥梁全过程经济成本, 在设计阶段便全面考虑桥梁建设期成本及运营期的管理、养护、维修和拆除回收等费

用, 综合预测桥梁建造成本、用户成本和社会成本。从全寿命性能设计的角度, 综合考虑桥梁设计、施工、维护和管理, 可有效控制桥梁全寿命期的服务水平和长期投资。

1.1 桥梁全寿命周期成本分析方法

桥梁全寿命周期成本分析(LCCA)是指在设计阶段综合考虑未来桥梁设计、施工、运营阶段全过程的总成本。考虑时间价值的经济费用分析方法有现值法、年费用法、收益率法、效益-费用比法等, 该桥采用净现值分析法, 将未来成本费用折现为净现值 NPV, 用于设计方案评估。桥梁全寿命周期成本计算模型为:

$$NVP = \sum_{t=0}^T \frac{\left[\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \text{cost}(k, j, t) \right]}{(1+r_t)^t} \cdot p_c(k, j, t) \quad (1)$$

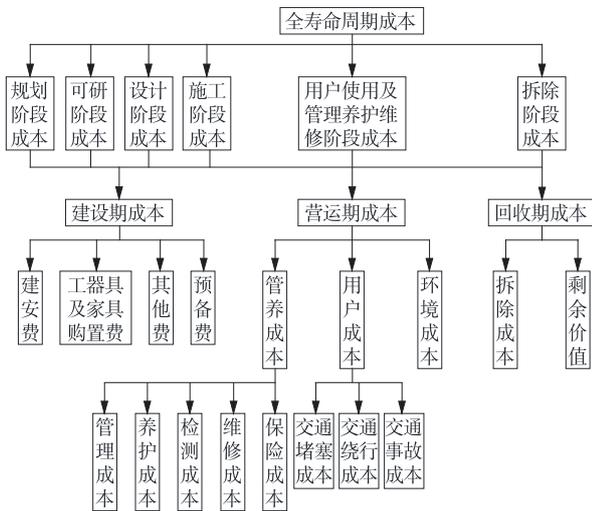
式中: NVP 为全寿命周期成本总和的净现值; t 为成本发生时间; T 为分析周期; k 为成本种类; j 为成本种类项目; r_t 为该年的基准折现率; $p_c(k, j, t)$ 为各项成本发生的概率。

1.2 桥梁全寿命周期成本构成

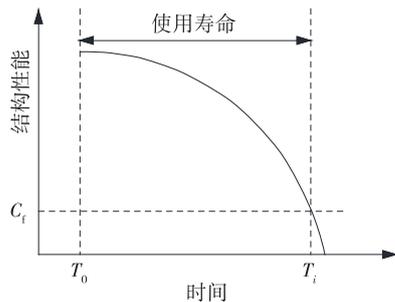
中国桥梁全寿命设计与管理理念起步较晚, 对桥梁运营期的统计资料很少, 各项成本计算参数值取定少有可参考的资料。为此, 采用专家问卷调查法对国内桥梁设计、管理养护、检测维修等进行调查, 得出具有代表性的全寿命周期成本分析的基本参数值。桥梁全寿命周期成本构成见图 1。

1.3 桥梁结构的全寿命周期

桥梁在全寿命周期内, 随着使用时间的增长, 其



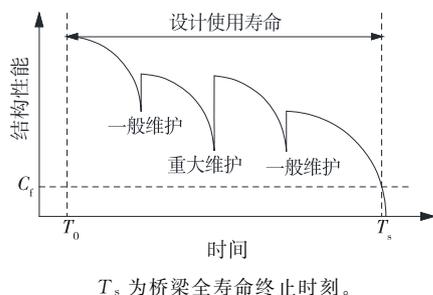
材料性能逐渐下降,常出现疲劳、病害及损伤,导致其性能状态逐渐退化,且退化速率越来越快(见图2)。因此,一般桥梁的正常使用年限很难满足设计基准期。



C_f 为桥梁正常使用的最低性能状态; T_0 为桥梁建成初始时刻; T_i 为桥梁使用寿命终止时刻。

图2 桥梁性能退化模型

为尽可能地延长桥梁的正常使用年限,满足设计基准期要求,通常桥梁使用过程中会进行构件维修、替换甚至整体加固改造,提高桥梁性能状态,其中预防性养护维修(一般维护)可在较低程度上提高桥梁的性能,重大维修(重大维护)可较大程度提高甚至恢复桥梁的整体性能(见图3)。



T_s 为桥梁全寿命终止时刻。

图3 养护维修状态下桥梁性能退化模型

2 桥梁方案拟定

2.1 设计标准

公路等级:高速公路;路基全宽 26 m;设计速度 100 km/h。

桥面净宽:2×净-11.75 m。

设计荷载:公路 I 级。

设计洪水频率:1/300。

通航标准:通航等级为 IV 级;通航净空为梯形,其中 $B=90$ m, $H=8$ m, $b=81$ m, $h=5$ m;最高通航水位为 29.18 m。

2.2 设计构思

(1) 预应力砼桥梁主要应用分类及适应范围。预应力砼桥梁前期建设成本低,可就地取材、适应性强、整体性好,结合砼的高抗压强度及预应力钢筋的抗拉性能,使预应力砼桥梁的结构性能、使用寿命大幅提高。由于预应力砼材料灵活的适应性,其在梁桥、拱桥、斜拉桥及悬索桥上都有很好的应用。但由于其自重大、易开裂等缺陷,在高墩大跨度桥梁等领域的应用受到一定限制。

(2) 钢结构桥梁主要应用分类及适应范围。钢结构桥梁包括钢箱梁、钢桁架梁及钢砼结合梁,以钢箱梁为代表进行分析。钢箱梁又叫钢板箱形梁,主要适用于有下限净空要求的市政桥梁、有保通要求的跨线(公路、铁路、通航河流)桥梁、大跨度斜拉桥、悬索桥及拱桥加劲梁等。其外形设计可多样化,适合于景观桥梁。采用预制吊装施工,可缩短工期,减小对现有交通或通航的压力,且因其自重小、安装方便、抗扭刚度好,可避免砼梁开裂,抗震性能高,在大跨径桥梁中应用较广泛。但其前期建设成本较高,在中小跨径桥梁中应用较少。

2.3 方案拟定

根据通航要求,该梁主跨应大于通航净宽 90 m。根据工程经验,对于百米级的公路桥梁,无论是从结构安全、施工工艺,还是工程造价等因素考虑,应首选变截面连续梁桥。结合桥墩结构自身安全,桥梁跨径采用 60 m + 100 m + 60 m(见图4)。

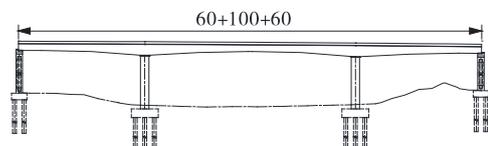


图4 桥型立面示意图(单位:m)

采用不同结构材料拟定以下两种方案:

方案一为钢结构变截面连续箱梁。桥梁分为左右两幅,上部构造采用全钢结构变截面连续箱梁、单箱单室箱形截面,墩顶梁高 5.0 m,跨中梁高 2.5 m,箱梁顶板全宽 2×12.75 m;下部构造采用空心薄壁墩、桩基础(见图 5)。

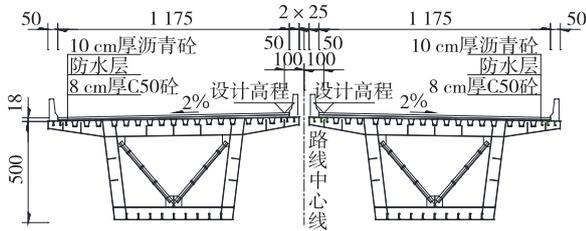


图 5 钢桥标准横断面示意图(单位:cm)

方案二为预应力砼变截面连续箱梁。桥梁分为左右两幅,上部构造采用预应力砼变截面连续箱梁、单箱单室箱形截面,墩顶梁高 6.0 m,跨中梁高 3.0 m,箱梁顶板全宽 2×12.75 m;下部构造采用空心薄壁墩、桩基础(见图 6)。

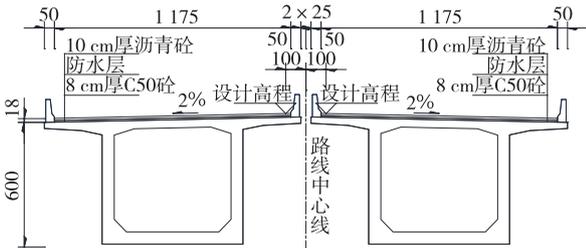


图 6 预应力砼桥梁标准横断面示意图(单位:cm)

3 全寿命周期成本分析

3.1 计算基本参数

(1) 计算基年。计算基年即全寿命周期成本折算成现值的基准时间、货币时间价值折算基点。该桥以其所在高速公路项目竣工年为计算基年。

(2) 折现率。折现率是桥梁全寿命周期成本计算的重要参数,考虑时间价值折现,其取值对计算未来成本现值具有直接影响。其值不应低于资金的机会成本或最低回收率,一般采用国家公布的行业基准收益率。该桥折现率取 6%。

(3) 分析期。根据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》,公路桥涵结构的设计基准期为 100 年。该桥结构的分析期按 100 年计算。

3.2 桥梁建设期成本

桥梁建设期成本包括桥梁规划、设计、施工等发生的费用。根据该桥设计总说明、施工图预算等文件计算,其建设期成本为竣工年成本即基年成本,不

进行折现(见表 1)。

表 1 不同桥梁方案的建设期成本

桥梁方案	上部结构	工期/月	建设期成本/万元
方案一	钢结构变截面连续箱梁	18	11 189.8
方案二	预应力砼变截面连续箱梁	24	7 992.7

3.3 桥梁运营期成本

(1) 管养成本。桥梁的管理、养护、维修一方面跟结构材料及施工质量有关,另一方面与桥型结构、管理模式、环境条件有关。该桥属于高速公路的一部分,其日常管理及养护依托高速公路整体日常管理养护体系,不同材料桥梁的日常管养费用区别不大。为简化计算,不考虑桥梁的日常性管理养护费用,根据国内类似工程经验,将两种桥梁方案上部结构的预防性养护与维修费用进行简化分析。钢桥预防性养护维修费用包括钢箱梁涂装、桥面铺装、伸缩装置、支座、防撞护栏维修或更换成本,按照每 15 年一次计算;预应力砼桥梁预防性养护维修费用包括砼构件病害处理、桥面铺装、伸缩装置、支座、防撞护栏维修和更换成本,按照每 10 年一次小修、30 年一次大修计算。根据《桥梁全寿命设计指南》、该桥分项工程预算表、调查及评估结果,结合国内其他桥梁维修情况,计算确定该桥维修成本现值见表 2。

表 2 不同桥梁方案的管养成本

桥梁方案	成本项目	周期/(年·次 ⁻¹)	成本现值/万元
方案一	一般养护维修	15	1 243
	重大养护维修	30	3 122
方案二	一般养护维修	10	621
	重大养护维修	30	3 122

(2) 用户成本。由于桥面铺装等维修中均进行合理的保通方案设计,且两种桥梁方案的保通模式和费用均相当,不影响比选结论,为简化计算,不考虑用户成本。

(3) 环境影响成本。桥梁环境影响成本主要包括桥梁运营、维修、养护和拆除中的噪音、土地临时占用、水土流失、空气污染等生态破坏而发生的成本。通过调查分析、专家商讨,环境影响成本按照建设及管养成本的 30% 来估算。

3.4 桥梁回收期成本

桥梁回收期成本包括拆除成本和剩余价值两部分,其中拆除成本主要包括拆除时的人、机、料成本和废弃物处理成本,剩余价值为回收利用负成本。

拆除方法不同,拆除成本及回收再利用成本可能相差较大,鉴于桥梁拆除成本与桥梁建设期成本密切相关,采用拆除成本占建设期成本的百分比来估算拆除成本。根据《桥梁全寿命设计指南》、调查及评估结果,结合国内其他桥梁的拆除经验,计算确定该桥维修成本现值,钢结构桥梁按建设期成本的20%、预应力砼桥梁按建设期成本的30%计算;剩余价值,预应力砼桥梁计为零,钢结构按照同类型钢材市场价计算。

3.5 桥梁全寿命周期成本计算

综上,桥梁方案一全寿命周期成本为16 204.96万元,其中:建设期成本为11 189.8万元,占69.1%;营运期成本为4 972.84万元,占30.7%;回收期成本为42.32万元,占0.3%。桥梁方案二全寿命周期成本为17 654.22万元,其中:建设期成本为7 992.7万元,占45.3%;营运期成本为7 263.71万元,占41.1%;回收期成本为2 397.81万元,占13.6%(见表3)。

表3 不同桥梁方案的全寿命周期成本现值

成本分类	成本构成	方案一			方案二		
		成本/万元	阶段成本/万元	阶段成本占比/%	成本/万元	阶段成本/万元	阶段成本占比/%
建设期成本		11 189.80	11 189.80	69.1	7 992.70	7 992.70	45.3
营运期成本	管养成本	1 243.00			3 743.00		
	用户成本	—	4 972.84	30.7	—	7 263.71	41.1
	环境成本	3 729.84			3 520.71		
回收期成本	拆除成本	2 237.96	42.32	0.3	2 397.81	2 397.81	13.6
	剩余价值	2 195.64			0.00		
全寿命周期成本		16 204.96	16 204.96	100.0	17 654.22	17 654.22	100.0

4 结论

(1) 考虑100年设计基准期,钢结构桥梁方案的全寿命周期成本比预应力砼桥梁方案的低,钢结构方案更合理。

(2) 在不同桥梁方案比选中,可根据工程实际情况适当简化全寿命周期成本构成,弱化类似的影响较小的构成项,强化有区别的影响较大的构成项,合理分析计算其全寿命周期成本。

参考文献:

[1] 中交公路规划设计院有限公司.桥梁全寿命设计指南

(上接第146页)

[13] 舒欢,郑胜强.基于绝对贡献率的投标联合体经济收益分配研究[J].项目管理技术,2012,10(9).

[14] 杨翠云,章恒全.考虑隐性收益的EPC联合体收益分配研究[J].工程管理学报,2015,29(5).

[15] 王志强,张樵民,崔金海.基于修正Shapley值的EPC联合体收益分配优化分析[J].人民长江,2019,50(2).

[16] 陈利,尤峰.基于AHP和云重心方法的装甲兵指挥信息系统效能评估[J].指挥控制与仿真,2008(4).

[17] 廖良才,范林军,王鹏.一种基于云理论的组织绩效评价

[Z].北京:中交公路规范设计院有限公司,2008.

[2] 胡江碧,刘妍,高玲玲.桥梁全寿命周期成本模型研究[R].北京:北京工业大学建工学院,2009.

[3] 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).

[4] 吴培峰.基于全寿命设计方法的梁式桥概念设计研究[D].上海:同济大学,2007.

[5] 张晓华.某山区高速汉江特大桥方案比选研究[J].公路与汽运,2014(2).

[6] 高玲玲.桥梁全寿命周期成本分析[D].北京:北京工业大学,2008.

收稿日期:2019-06-03

估方法[J].系统工程,2010,28(1).

[18] 高更君,黄芳.基于云重心Shapley值的供应链融资联盟收益分配研究[J].工业技术经济,2017,36(2).

[19] Zhao Chunxiao, Zhang Ruizhi, Wang Jianping. Analysis of dynamic alliance profit distribution model based on Shapley value [A]. Proceedings of International Conference on Engineering and Business Management (EBM2010)[C].2010.

收稿日期:2019-07-17