

文章编号: 1005 - 0523(2009)05 - 0135 - 05

既有桥梁加固方案的经济性分析

张 丹

(江西财经大学 旅游与城市管理学院, 江西 南昌 330032)

摘要:在既定资金约束条件下,应根据桥梁全寿命期内不同方案的经济净效益来选择合适方案。文章在考虑桥梁蜕化的基础上,提出基于抗力衰减的加固度概念,并在年收益既定假设条件下分别建立加固方案和重建方案的全寿命期费用模型以及两种方案的全寿命期比较费用及其年值模型。该模型为加固或重建方案的经济性选择提供了理论依据,就加固方案而言,还有利于确定资金约束条件下的最优加固度。

关键词:既有桥梁;加固方案;费用模型;经济分析
中图分类号:F294;TU-9 **文献标识码:**A

既有桥梁出现结构损伤已不能维持正常运营时,一般都采用加固的方法进行处理。通常认为,与拆除重建方案相比,加固方案可以节省一大笔资金,而且加固方案的施工时间比新建桥梁要少很多,甚至某些条件下加固施工不需要完全中断交通,这就更加突显出加固方案的优点。但如果坚持认为加固一定优越于重建,则有失偏颇,因为这没有考虑到长期的收益与成本。不可否认,在资金不足的情况下,加固方案有利于缓解资金压力,保证桥梁在一定时期内的正常运营。但从长远来看,这种方法并不一定是最科学、经济的。因为既有桥梁出现损伤以后,即使加固后能改善它的功能,但其抗力衰减的趋势是不会改变的,而且加固后的结构受力更加复杂,这就意味着,较之新建桥梁,加固以后的桥梁在检测维护上需要花费更多的人力和物力。旧桥和新桥在相同时间内的损伤是不同的,这就意味着旧桥会更快地走向承载极限。所以,从长远利益着眼,加固方案并不一定比重建新桥的经济效益好。因此,在选择最优的加固方案之前,首先需要对加固方案与新建方案进行充分的比较,以利于决策部门作出符合长期利益的理性决策。

1 结构蜕化程度的判断

由于设计、施工、材料、环境等各种因素的影响,桥梁建成时的初始承载能力就可能与设计承载能力不同,随着经济的发展及相应交通运输量的增加,其承载能力一定呈衰减趋势。因此,我们可以把桥梁建成后任一时刻的抗力 $R(t)$ 表示为^[1]

$$R(t) = r(t)R_0(t) \quad (1)$$

式中: $r(t)$ 为一确定性函数,可称为抗力衰减系数; $R_0(t)$ 为平稳随机过程。可将 $R_0(t)$ 取为结构的初始抗力(既 $t=0$ 时刻的抗力),记为 R_0 ,严格的说 R_0 是一个随机变量。于是有

$$R(t) = r(t)R_0 \quad (2)$$

对于钢筋混凝土桥梁,抗力衰减系数 $r(t)$ 可取为^[2,3]

$$r(t) = 1 - r_1 t + r_2 t^2 \quad (3)$$

钢筋混凝土桥梁按抗力退化速率分为低退化、中退化及高退化 3 种情况。低退化情况时,取 $r_1 = 0.0005, r_2 = 0$; 中退化情况时,取 $r_1 = 0.005, r_2 = 0$; 高退化情况时,取 $r_1 = 0.01, r_2 = 0.00005$ 。

当仅有荷载效应和结构抗力两个基本变量时,结构的功能函数可以表示为^[4]

$$Z(t) = R(t) - S(t) \quad (4)$$

显然,当 $Z(t) > 0$ 时,桥梁结构满足功能要求,处于可靠状态;当 $Z(t) = 0$ 时,桥梁结构恰好满足功能

收稿日期: 2009 - 05 - 20

作者简介: 张 丹(1981 -),女,江西景德镇人,硕士,助理工程师,研究方向为工程经济与工程造价。

要求,处于极限状态;当 $Z(t) < 0$ 时,桥梁结构不满足功能要求,处于失效状态。

2 方案的经济性分析

当桥梁出现蜕化,且经检测分析不能满足继续工作的功能要求,也就是说桥梁结构的功能函数处于或即将处于极限状态,就需要考虑对桥梁采取相应的措施进行及时处理,否则可能酿成诸如 2009 年 5 月湖南株洲高架桥坍塌等严重事故。大家在方案选择的时候,常常是比较各个加固方案的优劣,而忽视了另一个重要的方案——让旧桥退役,重建新的桥梁。从长远利益角度,并不是所有加固方案都比重建方案更加经济,即便比重建方案经济的加固方案也不一定在当前费用预算之内。所以,当桥梁需要采取措施进行处理时,首先要做的工作是建立各种可能方案的经济模型,为各种方案的经济性选择提供理论依据。由于各种方案所针对的是同一座桥梁,而服务等级差异所带来效益的不同难以度量,研究方便起见,本文假设所有方案所产生的经济效益是相同的,这并不影响本文所要说明问题的本质。据此,下文所建立的经济模型为全寿命期费用模型。

2.1 全寿命费用模型

在桥梁运营的过程中会产生不同的费用,为全面统计所有费用,桥梁的费用模型应该采用桥梁全寿命期费用模型。桥梁全寿命期费用 C_T 由初始投资 C_0 、检测费用 C_{INS} 、维修加固费用 C_{REP} 和失效损失 C_F 组成^[5],即

$$C_T = C_0 + C_{INS} + C_{REP} + C_F \quad (5)$$

对于现有结构构件而言,其安全性鉴定标准是依据承载能力评定时等级,即直接用构件的抗力与荷载效应的比值进行判定^[6]。为研究方便,首先我们定义维修加固度为桥梁维修加固前后抗力提高的程度。 R 、 R' 分别为桥梁加固前后的抗力均值,则维修加固度 a 为

$$a = (R' - R) / R \quad (6)$$

显然,维修加固度越大,加固所需要的费用越高,即常规加固费用 C_{rep} 是维修加固度的函数,可表示为

$$C_{rep} = k_1 k_2 S F(a) \quad (7)$$

式中: k_1 为与桥型有关的系数; k_2 为与环境有关的系数; $F(a)$ 是与所采取加固技术相关单位工程量的维修加固费用函数; S 为加固工程量。

由于常规检测费 C_{ins} 取决于检测项目、检测方法、检测精度、桥梁所处环境等众多因素,所以每座桥的检测费用都有很大的不同,目前还没有形成一个统一的准确的公式,大致可以根据具体桥梁和历史经验取平均值。故本文把每次的检测费用视为外生变量,依桥梁的不同而不同,具体由专家或管理部门根据实际情况而定。

桥梁失效损失值为

$$C_F = C_f A(t) \quad (8)$$

式中: C_f 为桥梁结构破坏所造成的损失期望值; $A(t)$ 为桥梁结构动态抗力减少度。

$$A(t) = \frac{R_0 - R(t)}{R_0} \quad (9)$$

式中: R_0 为桥梁结构设计初始抗力。

$$C_f = K C_0 \quad (10)$$

式中: K 是桥梁对当地经济影响重要程度的系数。

对于一个特定的桥梁,初始投资是一个定值。则桥梁全寿命期费用可表示为

$$\begin{aligned} C_T &= C_0 + C_{INS} + C_{REP} + C_F \\ &= C_0 + \sum_{i=1}^n C_{ins,i} + \sum_{j=1}^m C_{rep,j} + C_f \sum_{i=1}^n A(t_i) \end{aligned}$$

$$= C_0 + \sum_{i=1}^n C_{\text{ins},i} + k_1 k_2 \sum_{j=1}^m S_j F_j(a_j) + KC_0 \sum_{i=1}^n \frac{R_0 - R(t_i)}{R_0} \quad (11)$$

式中: n 为全寿命期内桥梁检测次数, m 为全寿命期内桥梁加固次数, 且 $m < n$ 。

2.2 加固方案全寿命期费用模型

如果桥梁结构的设计初始抗力为 R_0 , 检测时刻的抗力为 R_1 , 加固后桥梁的抗力提高到 R'_1 , 则本次加固方案的加固度为

$$a_1 = \frac{R_1 - R'_1}{R_1} \quad (12)$$

本次加固完成时刻桥梁的失效损失为

$$C_F = KC_0 \frac{R_0 - R'_1}{R_0} \quad (13)$$

假设桥梁的设计寿命为 T 年, 至今已经运营了 N 年, 加固前每 t 年检测一次, 且没有加固过(如果曾经加固过费用记入初始投资)。本次加固后, 只进行常规检测, 每 t'_j 年检测一次, 不再进行加固, 至桥梁结构自然蜕化至安全极限。这时桥梁的全寿命期费用表示为

$$\begin{aligned} C_T &= C_0 + C_{\text{INS}} + C_{\text{REP}} + C_F \\ &= C_0 + \left(\frac{N}{t} + \frac{N'_j}{t'_j} \right) C_{\text{ins}} + k_1 k_2 SF(a_1) + KC_0 \frac{R_0 - R'_1}{R_0} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: N'_j 为加固后桥梁的使用年限, 可以根据加固后抗力 R'_1 由(12)、(13)式反算得到。

2.3 重建方案全寿命期费用模型

和加固方案的假设相同, 在同一时间检测。如果采取重建方案, 在这之前的初始投资费用(包括曾经的加固费用)和检测费用都相等, 在此之后没有对旧桥的投资, 但要开始投资于新建桥梁。假设新建桥梁的投资费用为 C'_0 、检测费用为 C'_{INS} 、失效损失为 C'_F 。由于拆除旧桥, 旧桥抗力可以视为零; 新桥刚刚建成, 可以看作抗力没有蜕化, 取失效 C'_F 为零。同样新桥按自然蜕化考虑只计算常规检测养护(常规养护费用涵盖在检测费用内), 不进行加固, 直到可靠度降低到规定的可靠度退役。重建方案的全寿命期费用由旧桥全寿命期费用和新桥的全寿命期费用组成, 即

$$\begin{aligned} C_{\text{TOL}} &= C_T + C'_T = C_0 + C_{\text{INS}} + C_F + C'_0 + C'_{\text{INS}} + C'_F \\ &= C_0 + \left(\frac{N}{t} \right) C_{\text{ins}} + KC_0 + C'_0 + \left(\frac{N'_c}{t'_c} \right) C'_{\text{ins}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: N'_c 为考虑结构蜕化且不进行加固的新桥服务年限。 C'_{ins} 为新建桥梁的一次常规检测费用(包括日常养护费用); t 、 t' 分别为旧桥和新桥的常规检测间隔时间。

3 方案比较

由于方案比较之前的桥梁费用相同, 而加固方案的全寿命期费用和重建方案全寿命期的费用所包含的具体项目及发生年限不同, 难以对其进行直接比较。这里我们取它们不同部分的费用进行比较, 即建立比较费用模型。

加固方案比较费用

$$C_J = \frac{N'_j}{t'_j} C_{\text{ins}} + k_1 k_2 SF(a_1) + KC_0 \frac{R_0 - R'}{R_0} \quad (16)$$

重建方案比较费用

$$C_C = KC_0 + C'_0 + \left(\frac{N'_c}{t'_c} \right) C'_{\text{ins}} \quad (17)$$

由于施工过程中资金是逐步到位的, 而且每个方案的施工工期不尽相同, 理论上应该根据每笔资金的

到位情况和施工工期考虑资金的时间价值。为简化模型考虑,我们把施工期间的经济损失,包括由于贴现率造成的资金价值的改变都计算在失效损失内,假设从检测完成到方案的完成之间没有时间间隔,那么所有费用都可以看成是在方案完成瞬间的值,则模型中的各种费用都是在考虑时间价值以后的各方案在完成瞬间的可比较费用。

加固或重建方案下的桥梁使用寿命不同,所以在对方案的费用进行比较时应当考虑资金的时间价值,这里取各方案的年值作比较。假设折现率为 i ,根据复利分析原理中的等额资金回收公式,加固方案和重建方案的比较费用的年值可以表示为

$$A_J = (A/P, i, n) C_J \quad (18)$$

$$A_C = (A/P, i, n) C_C \quad (19)$$

式中: $(A/P, i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ 为资金回收因子^[7]。

4 算例

一旦确定研究对象,比较费用模型中的所有参数 k_1 、 k_2 、 K 就可以确定。根据历史检测数据和专家经验,桥梁结构的抗力衰减系数 $r(t)$ 也可以确定。根据加固方案抗力提高的程度和重建方案的设计抗力值,可以分别计算出加固后桥梁的使用年限 N'_J 和新桥使用年限 N'_C 。加固方案的技术设计参数一旦确定,维修加固费用函数 $F(a)$ 、加固工程量 S 、加固后常规检测费用 C_{ins} 及时间间隔 t'_J 就可以确定。同样,重建方案的技术设计参数一经确定,新桥的初始投资费用 C'_0 、次常规检测费用 C'_{ins} 及时间间隔 t' 等指标也可以确定。

假设某既有钢筋混凝土桥梁的初始投资费用 $C_0 = 5\,000\,000$;设计初始抗力为荷载效应的 1.2 倍,即 $R_0 = 1.2S$,且荷载效应的平均值不随时间变化。检测时刻的结构抗力 $R = 0.83R_0$,经济影响系数 $K = 1$ 。

重建方案:重建方案的设计抗力初始值 $R'_0 = 1.2R_0$,假设初始投资费用 $C'_0 = 1.2C_0$,常规检测费用 $C'_{ins} = 10\,000$,间隔时间 $t' = 2$ 年。新建桥梁的退化按中退化考虑,即抗力衰减系数可以取为 $r'(t) = 1 - 0.005t$ 。

加固方案:加固费用 $S_1 F(a_1) = 5C_0 a_1^2$,加固后常规检测费用 $C_{ins} = 10\,000$,检测间隔时间 $t'_J = 1$ 年。加固后抗力衰减按高退化考虑,即抗力衰减系数 $r(t) = 1 - 0.01t + 0.000\,05t^2$ 。

由于社会折现率的取值应该是分梯段递减的,近年来还呈现出下降的趋势^[8],其取值弹性较大,这里为避免随意性取值而导致研究结论可信性的下降,姑且不考虑资金的时间价值(社会折现率递减规律为本研究的进一步完善提供了一个方向),取加固方案和重建方案的比较费用的年值分别为: $A_J = C_J/N'_J$; $A_C = C_C/N'_C$ 。在 Matlab 软件里编制程序,输出结果见图 1。当加固后检测费用较高 $C_{ins} = 50\,000$ 的时候(检测间隔时间仍为 1 年),其结果见图 2。

从图 1 中可以看出,加固方案全寿命期总费用最小时的加固度并不一定等于其年平均费用最小的加固度,即 $a_1 \neq a_2$;换言之,全寿命期总费用最小时的经济效益并不一定最好。反之,年平均费用最小,则其经济效益最好,但此时全寿命期总费用并不是最少的。若加固后常规检测养护费用的太大,则会对总费用和年平均费用产生很大的影响,如图 2 所示,总费用随加固度的提高而处于不断上升趋势,与图 1 相比,其年平均费用显著增加。

我们所定义的经济效益最优指的是全寿命期内年平均费用最低。从算例中可以看出,全寿命期内年平均费用最低时的加固度下所对应的总费用不一定为最低,加固费用也不一定在资金预算约束以内。当加固费用和失效损失与加固度的关系一定时,加固后常规检测和养护费用的增加对全寿命期内的总费用和年平均费用影响很大,当加固后常规检测和养护费用增加到一定临界值后,年平均费用可能会小于所有加固度下所对应的年平均费用,在该种情况下,显然不适合选择加固方案。

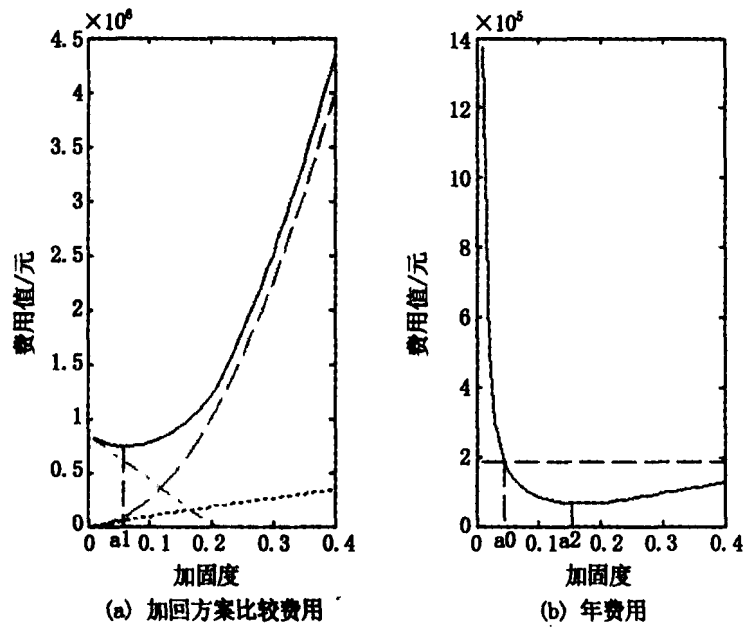


图 1 $C_m = 10\ 000$ 时的方案比较图

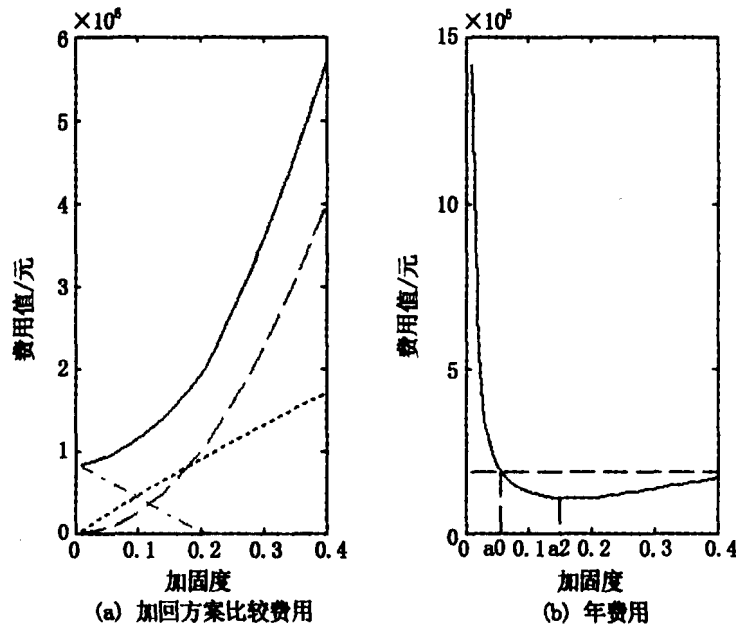


图 2 $C_m = 50\ 000$ 时的方案比较图

图注：“加固方案比较费用”图中，直线“——”表示比较费用的总费用，虚线“-----”表示加固费用，点划线“-.-.-”表示失效损失，点线“.....”表示常规检测养护费用。“年费用”图中，直线“——”表示加固方案平均年费用，虚线“-----”表示重建方案平均年费用。

5 结论

在对既有桥梁进行加固或重建方案的选择时，人们会潜意识地选择加固方案，而忽略重建方案；在选择加固方案时，一般只单纯地考虑加固费用一项。本文通过加固方案和重建方案的全寿命期费用模型分析表明，桥梁的经济效益应该从全寿命期角度考虑。桥梁建成后要检测、养护，当抗力不足时还要进行加固；加固后的桥梁同样也需要检测、养护。当桥梁失效时会对交通产生影响，严重时甚至会出现桥毁人亡事故。所以桥梁失效可能会对社会经济产生较大影响，这部分损失也应该记入桥梁全寿命期的费用。由

于施工引起的直接社会效益是很难准确描述和度量的,但其引起的间接经济损失如车辆通行绕道等是可以估算一并计入失效损失内。

由于各种费用不是同时发生的,对同一座桥梁采取加固或重建方案,其后续的使用寿命是不同的,且不同方案的初次投资费用、全寿命期总费用以及年平均费用也不相同。在对桥梁各方案进行经济性分析和比较时,最有价值的度量指标是平均年费用。但由于资金的限制,平均年费用最低时的全寿命期费用并不一定为最低,更不会为加固费为最低。因此,在选用加固方案时,可供参考的最低标准是平均年费用低于重建年费用,在资金约束条件下,尽可能选取使全寿命期平均年费用最低的方案。如果所有加固方案的全寿命期年平均费用都远远高于重建方案的全寿命期年平均费用,则理性的选择应该是重建方案。

参考文献:

- [1] 禹智涛.考虑抗力随时间变化的既有钢筋混凝土桥梁承载能力可靠度评估方法[J].中南公路工程,2004,29(2):28-31.
- [2] Michael P. Enright, Dan M. Frangopol. Service-life prediction of deteriorating concrete bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(3):309-317.
- [3] M. G. Stewart, Sankaran Mahadevan. Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridges[J]. Structural Safety, Amsterdam, 1998, 20(4):91-109.
- [4] 姚继涛,马永欣,等.建筑物可靠性鉴定和加固——基本原理和方法[M].北京:科学出版社,2003.10-15.
- [5] 秦权.基于时变可靠度的桥梁检测与维修方案优化[J].公路,2002,(9):17-25
- [6] 肖南,张俊芝.基于计算可靠度的现有RC结构构件的安全等级划分研究[J].浙江工业大学学报,2006,34(3):331-335.
- [7] 邵颖红,黄渝祥.工程经济学概论[M].北京:电子工业出版社,2003.53-74.
- [8] 徐金泉.建设项目经济评价参数研究[M].北京:中国计划出版社,2004.1-29.

Economic Analysis of strengthening Schemes for Existing Bridge

ZHANG Dan

(School of Tourism and Urban Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China)

Abstract: With restriction of fund, choosing suitable scheme should be based on the net benefits of different schemes in entire life-span time of the bridge. Considering the decaying of bridges, this paper gives a concept of strengthening degree. With the assumption of established yearly earnings, it attempts to set up respectively entire-life-span - cost models and the comparative cost and annual magnitude of the two schemes. These models provide theoretical tool for strengthening or reestablishing the scheme. As far as strengthening the scheme is concerned, these models may help to decide the economically suitable strengthening degree with limited fund.

Key words: existing bridge; strengthening scheme; model of expenses; economic analysis

(责任编辑:王建华 李萍)