

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.06.011

# 基于路径概率的桥梁全寿命成本计算方法及例证

王崇交<sup>1</sup>, 姚昌荣<sup>\*2</sup>, 赵思光<sup>2</sup>, 徐川<sup>2</sup>, 李亚东<sup>2</sup>

(1. 四川路桥建设集团股份有限公司, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为解决传统桥梁全寿命设计方法在工程实践中遇到的设计概念模糊、计算方法不明确及与相关规范脱节的不足, 以提高公共安全与交通舒适度, 降低建造和运营综合成本, 提出了基于路径概率并与可靠度结合的混凝土桥梁全寿命成本计算方法。首先, 在深入研究桥梁全寿命设计的基础上, 依据调研所得桥梁管养投入实际数据, 拟合了不同服役地区不同桥梁等级的检测成本计算公式, 以及不同公路等级不同养修成本的养修成本取值区间, 以此构建了桥梁全寿命成本计算基准。其次, 以钢筋在氯离子侵蚀和碳化耦合作用下的锈胀开裂模型为基础, 采用路径概率方法构建了桥梁全寿命养修概率模型。然后, 通过蒙特卡洛法进行求解, 并将养修方案、养修成本通过可靠度指标联系起来, 结合规范中关于正常使用极限状态指标的相关规定, 提出基于可靠度的全寿命成本计算方法。最后, 采用所提方法计算了不同桥梁设计方案在设计使用寿命期内的养修概率, 综合建造成本、检测成本和养修成本估算全寿命成本及其对应的可靠度。结果表明: 不同可靠度指标的取值对设计方案的全寿命成本有显著影响, 随着可靠度指标的提高不同设计方案的经济性均出现先上升后下降的趋势。因此, 设计过程目标可靠度的取值不宜过大, 可通过一个较低的可靠度指标, 适当放宽耐久性设计准入, 以允许桥梁在使用过程出现一定的耐久性问题, 并通过后续养修进行矫正, 这样对于全寿命成本而言, 更具有经济性。

**关键词:** 桥梁工程; 全寿命成本计算方法; 路径概率模型; 全寿命设计方法; 全寿命成本分析; 可靠度

中图分类号: U446

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 06-0101-08

## Calculation Method and Illustration for Bridge Life-cycle Cost Based on Path Probability

WANG Chong-jiao<sup>1</sup>, YAO Chang-rong<sup>\*2</sup>, ZHAO Si-guang<sup>2</sup>, XU Chuan<sup>2</sup>, LI Ya-dong<sup>2</sup>

(1. Sichuan Road & Bridge Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of fuzzy design concepts, unclear calculation methods and disconnection with relevant specifications in the engineering practice of traditional bridge life-cycle design methods, to improve public safety and traffic comfort, and to reduce the comprehensive cost of construction and operation, a life-cycle cost calculation method for concrete bridges is proposed based on path probability and combined with reliability. Firstly, based on in-depth research on the life-cycle design of bridges and the actual data on bridge maintenance investment obtained from the survey, a formula for calculating the inspection cost of different bridge grades in different service areas is fitted, as well as the value range of maintenance costs for different highway grades and different maintenance costs. Based on this, a benchmark for calculating the life-cycle cost of bridges is established. Secondly, based on the model of rust expansion and cracking of steel bars under the coupling effect of chloride ion erosion and carbonation, a path probability

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0802202)

作者简介: 王崇交 (1995-), 男, 四川兴文人, 博士. (2017310053@my.swjtu.edu.cn)

\* 通讯作者: 姚昌荣 (1974-), 男, 四川蓬溪人, 博士, 副教授. (chryao-1016@163.com)

method is used to construct a bridge life-cycle maintenance probability model. Then, by using the Monte Carlo method to solve the problem, linking the maintenance plan and maintenance costs with reliability indicators, and combining the relevant provisions of the code regarding the normal service limit state indicators, a reliability-based life-cycle cost calculation method is proposed. Finally, the proposed method is used to calculate the maintenance probability of different bridge design schemes during the design service life, and the comprehensive construction cost, inspection cost, maintenance cost and total life-cycle cost are estimated based on the corresponding reliability. The result shows that the value of different reliability indicators has a significant impact on the life-cycle cost of design schemes, as the reliability indicator increases, the economic efficiency of the design scheme shows a trend of first rising and then declining. Therefore, the target reliability value in the design process should not be too large. By using a lower reliability indicator, the threshold for durability design can be appropriately relaxed to allow certain durability problems to occur during the use of the bridge, which can be corrected through subsequent maintenance and repair, that is more economical for life-cycle cost.

**Key words:** bridge engineering; life-cycle cost calculation method; path probability model; life-cycle design method; life-cycle cost analysis; reliability

## 0 引言

钢筋混凝土桥梁在服役过程中同时受到车辆荷载和外部环境的作用,其抗力和可靠度随时间逐渐降低<sup>[1-2]</sup>,而传统桥梁设计方法重点考虑桥梁建造初期性能和初始建造成本,这种方法后期的养修成本较高且造成了部分桥梁的使用问题和经济损失。因此,为了提高公共安全与交通舒适度,降低建造和运营综合成本,采用考虑桥梁长期使用性能的全寿命设计方法至关重要。

钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土桥梁抗力和可靠度退化的主要原因之一,国内外学者针对钢筋混凝土桥梁全寿命设计已开展了一些研究。Vu等<sup>[3]</sup>为了更好地描述钢筋锈蚀对桥梁使用性能及可靠度的影响,通过研究劣化诱发因素在混凝土内的扩散规律以及锈蚀产物膨胀引起的内部径向压力与钢筋质量损失之间的关系,利用法拉第定律预测钢筋混凝土桥梁从锈蚀开始到锈胀开裂的理论时间。Mullard等<sup>[4]</sup>通过一系列以混凝土质量、保护层厚度、钢筋直径为主要变量的加速劣化试验与长期暴露试验,得到了钢筋混凝土结构钢筋锈蚀导致混凝土开裂的经验模型。彭建新等<sup>[5]</sup>从结构应力、几何参数和材料参数角度出发构造约束条件,构建服役期劣化桥梁性能与维护对策的关系模型。Frangopol等<sup>[6]</sup>为了比较直观地反映分析期内建造、养修、更换等各项费用的影响程度,研究并提出净现值计算模型,为混凝土桥梁全寿命优化模型与设计流程的研究提供理论基础。Munoz等<sup>[7]</sup>建立了桥梁管理自动化排序系统,

使用者输入相关参数和设计标准,通过给定约束条件如所在区域、桥梁类型及设计寿命等,计算结构的有效使用寿命、管养频率和管养成本。Kong等<sup>[8]</sup>基于公路工程造价计算理论,对桥梁全寿命成本进行分析,提出了桥梁全寿命经济分析方法,并建立了桥梁全寿命各阶段的费用计算模型。

目前的研究大多集中在材料层次,缺乏钢筋锈蚀对桥梁结构整体性能及可靠度影响层面的研究。在考虑性能退化时通常仅反映桥梁在自然状态下的变化过程,没有考虑其长期使用过程中性能的动态变化以及养修等人为因素对其造成的影响,与工程实际脱节,研究结果较难回应工程有关各方对于桥梁综合经济效益的关注。

本研究在深入研究桥梁全寿命设计的基础上,以实地调研所得我国桥梁检测、养修成本数据及统计规律为基础,构建全寿命成本计算基准。以钢筋在氯离子侵蚀和混凝土碳化耦合作用下的锈胀开裂模型为基础,采用路径概率方法建立全寿命劣化概率模型,并通过蒙特卡洛法进行求解。计算桥梁不同设计方案在设计使用寿命期内的养修概率,综合建造成本、检测成本和养修成本估算全寿命成本及其对应的可靠度。通过对实际钢筋混凝土桥多个耐久性设计方案的参数优化分析,验证其合理性。

## 1 检测与养修成本基准

全寿命成本分析需要考虑桥梁整个生命周期的设计、建造、检测、养修等多项成本。本研究涉及的全寿命成本为:

$$LCC(T) = C_D + C_C + C_{ins}(T) + C_m(T), \quad (1)$$

式中,  $C_D$  为设计成本;  $C_C$  为建造成本;  $C_{ins}(T)$  为检测成本;  $C_m(T)$  为养修成本;  $T$  为该变量与时间有关。

### 1.1 检测成本

桥梁需要在一定的时间间隔内进行检测, 以确保其实际性能满足使用要求, 检测成本采用式 (2) 计算:

$$C_{ins}(T) = \sum_{i=1}^K C_{i, ins}(T),$$

$$C_{i, ins}(T) = C_{i-1, ins}(T) \times (1 + \alpha), \quad (2)$$

式中,  $K$  为寿命周期检测总次数;  $\alpha$  为检测费用比例;  $C_{i, ins}(T)$  为第  $i$  次检测时的费用。根据调研所得国内 386 座桥梁, 718 份检测成本历史数据, 桥梁的单个检测费用逐年增加, 由桥梁所在区域、桥梁等级与检测时间确定, 统计结果见图 1, 并对历史费用进行了函数拟合, 其中  $T$  为检测时间, 拟合公式见表 1。

表 1 桥梁检测成本计算公式 (单位: 元/m<sup>2</sup>)

Tab. 1 Calculation formula for cost of bridge detection (unit: Yuan/m<sup>2</sup>)

桥梁类型	拟合函数	公式	决定系数
内地小桥	指数函数	$C_{ins}(T) = 176.64e(-1.23/T)$	0.911
内地中桥		$C_{ins}(T) = 103.95e(-1.46/T)$	0.870
内地大桥		$C_{ins}(T) = 67.96e(-1.15/T)$	0.897
内地特大桥		$C_{ins}(T) = 75.37e(-0.89/T)$	0.883
沿海小桥		$C_{ins}(T) = 155.11e(-1.2/T)$	0.913
沿海中桥		$C_{ins}(T) = 248e(-1.14/T)$	0.947
沿海大桥		$C_{ins}(T) = 84.32e(-0.83/T)$	0.918
沿海特大桥		$C_{ins}(T) = 116.49e(-0.93/T)$	0.948

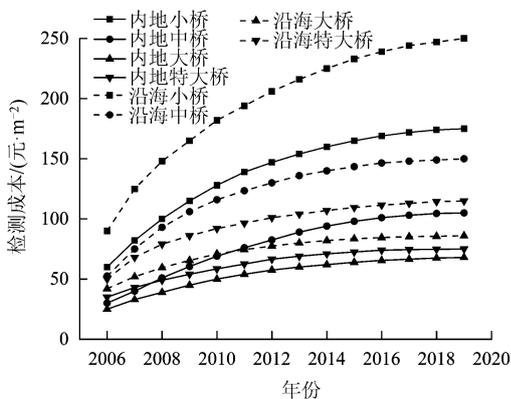


图 1 桥梁历史检测成本均值

Fig. 1 Average historical detection cost of bridges

### 1.2 养修成本

对于相对复杂的养修成本计算, 本研究提出了

基于可靠度的养修概率和成本计算方法, 其概率表达式如下:

$$C_m(T) = \sum C_{m,i}[T, C_D, C_C, t_{p1}, t_p] \cdot P_{d,i}[T, C_D, C_C, t_{p1}, t_p], \quad (3)$$

式中,  $C_{m,i}$  为桥梁寿命周期内第  $i$  次养修成本;  $P_{d,i}$  为桥梁第  $i$  次可靠度下降到的目标可靠度指标的概率;  $t_{p1}, t_p$  分别为初始养修时间和养修时间间隔。以上参数均为设计变量的隐函数, 取决于桥梁建造时的设计施工, 如混凝土保护层厚度、混凝土等级、钢筋直径等。根据调研所得国内 278 座桥梁, 399 份养修成本历史数据, 桥梁的单个养修费用与桥梁所在公路等级与养修性质相关, 统计结果见表 2 和图 2。

表 2 桥梁历史养修成本均值区间 (单位: 元/m<sup>2</sup>)

Tab. 2 Average historical maintenance cost range of bridges (unit: Yuan/m<sup>2</sup>)

项目	预防性养修	中修	大修
一级公路	[38, 60]	[115, 150]	[230, 300]
二级公路	[30, 50]	[75, 130]	[150, 215]
三级公路	[23, 25]	[68, 115]	[120, 170]

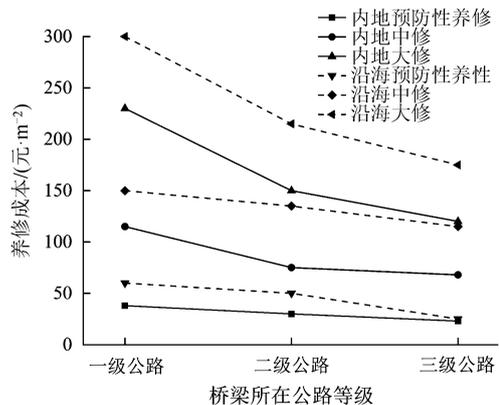


图 2 桥梁历史养修成本均值区间

Fig. 2 Average historical maintenance cost range of bridges

从图 1 中可以看出, 桥梁的单位检测成本随着时间有逐渐增长的趋势但增长速率逐渐趋缓; 从图 2 中可以看出, 桥梁的单位养修成本随着养修程度的加深和桥梁所在公路等级的提升有逐渐增长的趋势。本研究基于实际调研结果建立的桥梁检测与养修成本计算基准可为国内普通钢筋混凝土公路桥梁的全寿命周期成本分析提供参考。

## 2 钢筋锈蚀导致混凝土开裂时间模型

钢筋混凝土桥在使用过程中混凝土保护层会出现开裂、剥落等现象, 如果不进行修复, 可能会导致更严重后果甚至强度问题<sup>[9]</sup>。Liu 和 Weyers<sup>[10]</sup>根

据有限元模拟以及试验数据,提出了混凝土裂缝宽度预测模型,以预测混凝土结构由于钢筋锈蚀导致的开裂,见式(4):

$$t_{\text{ser}} = A(C/wc)^B, \quad (4)$$

式中,  $t_{\text{ser}}$  为开裂时间;  $A, B$  为与钢筋和混凝土等级相关的参数;  $C$  为保护层厚度;  $wc$  为水胶比。开裂时间受钢筋锈蚀速率、保护层厚度、混凝土质量的影响。Stewart 等<sup>[11]</sup>通过钢筋混凝土梁加速腐蚀试验的结果证实 Liu 和 Weyers 模型合理地预测了开裂的时间。

由于 Liu 和 Weyers 模型是在假定钢筋锈蚀速率不随时间改变的基础上建立的,虽然在预测首次开裂时具有可靠的精度,却难以反映桥梁全寿命性能随时间劣化越来越快的问题。为了建立适用于长期性能劣化研究的开裂预测模型, Alonso 等<sup>[12]</sup>将裂缝扩展与锈蚀电流密度函数联系起来,对 Liu 和 Weyers 模型进行修正,建立了劣化速率随时间变化的裂缝预测模型,见式(5)。

$$t_{\text{sp}} \approx k_R \times 0.0114 i_{\text{corr}(\text{real})} [A(C/wc)^B]. \quad (5)$$

与时间相关的锈蚀电流密度可由式(6)计算:

$$i_{\text{corr}}(t_p) = i_{\text{corr}}(1) \times \alpha t_p^\beta \quad t_p \geq 1, \quad (6)$$

式中,  $t_{\text{sp}}$  为修正后的首次开裂时间;  $k_R$  为与钢筋类别有关的常数;  $t_p$  为混凝土结构实际使用寿命;  $\alpha$  和  $\beta$  是常数。如果锈蚀速率是时不变的,则  $\alpha=1$  且  $\beta=0$ 。

对于时变锈蚀速率, Vu 和 Stewart<sup>[13]</sup> 的试验研究表明,钢筋混凝土结构随着锈蚀产物在钢筋表面的堆积,会加速引发锈蚀的物质在临近钢筋区域的积累,降低混凝土的保护作用,导致锈蚀速率随时间增加。并根据试验结果回归分析,提出  $\alpha=0.85$  和  $\beta=0.3$ 。Val 等<sup>[14]</sup>通过钢筋混凝土板长期暴露试验数据研究结果验证了该参数的合理性。本研究根据 Stewart 提出的锈蚀电流密度估算方法,计算与混凝土耐久性设计参数相关的初始锈蚀率<sup>[11]</sup>:

$$i_{\text{corr}} = \frac{0.378(1-w/c)}{\text{cover}}, \quad (7)$$

式中,  $w/c$  为水胶比;  $\text{cover}$  为保护层厚度以厘米为单位,并假设锈蚀会导致钢筋直径均匀减小。在这种情况下,利用法拉第电化学等效定律可以将锈蚀电流密度直接转化为钢筋的损耗。一般认为,当裂纹宽度超过 0.3 mm 时,如果没有进行养修,结构的使用寿命就会显著降低<sup>[15]</sup>。在本研究中,选择必须进行养修的极限裂缝宽度为 0.3 mm,并定义在固定检测时间  $t_p$  之前裂缝超限的概率  $P_r(t)$  为:

$$P_r(t) = P_r(t_{\text{sp}} < t_p), \quad (8)$$

式中,  $t_p$  为检测时间;  $t_{\text{sp}}$  为预测开裂时间;  $P_r(x)$  为判别式  $x$  的发生概率。

### 3 基于路径概率的全寿命成本计算

#### 3.1 养修概率计算

对于寿命周期的每一个时间节点,都有养修和不养修两种可能,这样的随机性会给养修方案的制订带来困难。本研究采用路径概率模型来计算养修方案的概率分布,路径概率模型由宋志刚等<sup>[16]</sup>提出,最初用以计算钢筋初锈时间的概率分布。本研究对其使用方法和使用范围进行了扩展,在同时考虑锈蚀裂缝扩展及养修工作的不确定性后,将钢筋锈蚀的发展划分为一系列路径,通过概率求和的方法来获得养修方案的概率分布,将锈蚀裂缝扩展及养修工作的概率特征进行了有效的结合,并考虑了碳化及氯离子作用的共同影响,参数取值见前文,路径概率模型的基本思路见图3。

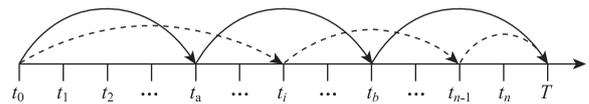


图3 养修方案路径概率

Fig. 3 Maintenance path probability

图3中,  $t_0$  为桥梁投入运营的时间;  $T$  为桥梁设计使用年限;  $t_1$  到  $t_n$  为桥梁检测时间。从图中可以看出,对于桥梁是否需要养修的检测结果是随机的,例如  $\{t_0, t_a, t_b, T\}$  就是一条全寿命期内的随机路径,桥梁在  $t_b$  时刻需要进行养修的概率  $\lambda_b$  的条件概率密度函数为:

$$f(\lambda_b, t_b) = f[\lambda_a | t_a] p(t_b) dt, \quad (9)$$

式中,  $f[\lambda_a | t_a]$  为桥梁在  $t_a$  时刻进行养修的条件概率密度函数;  $p(t_b)$  为桥梁经过  $t_a$  时刻养修过后,在  $t_b$  时刻进行养修的概率密度函数。虽然桥梁在某一时刻是否需要养修是不确定的,但在定义了  $n$  个养修路径后,只要  $n$  的数量是有限的,那么养修路径的数量就是有限的,且所有这些路径是互斥的,根据概率求和公式可得所有养修路径的无条件概率密度函数为:

$$f(\lambda) = \sum_{i,j=1}^n f[\lambda_i | t_i] p(t_j) dt = \sum_{i,j=1}^n f[\lambda_i | t_i] [F(t_i) \times F(t_j)], \quad (10)$$

式中,  $p(t_j)$  为桥梁经过  $t_i$  时刻的养修过后,在  $t_j$  时刻进行养修的概率密度函数;  $F(t_i)$  为  $t_i$  时刻养修的概率;  $F(t_j)$  为  $t_j$  时刻养修的概率,公式中隐

含的条件为  $i$  是大于  $(j-i)$  的, 因为桥梁的劣化速率会随着时间逐渐增加。

选择合适的桥梁检测方案后, 根据桥梁全寿命期各参数在锈蚀开裂模型中生成的随机数应用蒙特卡洛法进行概率分析, 只需根据随机抽取的样本值计算开裂时间, 并与检测时间进行比较, 计算每一种养修方案的概率, 但计算量较大。采用蒙特卡洛方法<sup>[17]</sup>求养修方案概率的具体步骤:

- (1) 根据各变量的概率分布, 随机生成每一个变量的样本值  $X(1, 2, \dots, n)$ 。
- (2) 根据生成的样本值计算开裂时间  $t_{sp}$ , 并与检测时间序列  $T_w$  进行比较, 计算养修路径发生概率。
- (3) 重复上述步骤  $N$  次, 得出不同养修次数的概率为:

$$P_n(t) \approx \frac{n \left[ \sum_{i=1}^D (t_{sc}^i < t_d^i | i \in T_w) \right]}{N}, \quad (11)$$

式中,  $n$  为检测时间序列里面不同养修次数的个数;  $T_w$  为检测时间序列;  $t_{sc}^i$  为第  $i$  次开裂时间;  $t_d^i$  为第  $i$  次检测时间;  $D$  为相同检测次数在检测序列中的出现次数。

本研究提出的基于路径概率养修概率计算方法的实现流程见图 4。

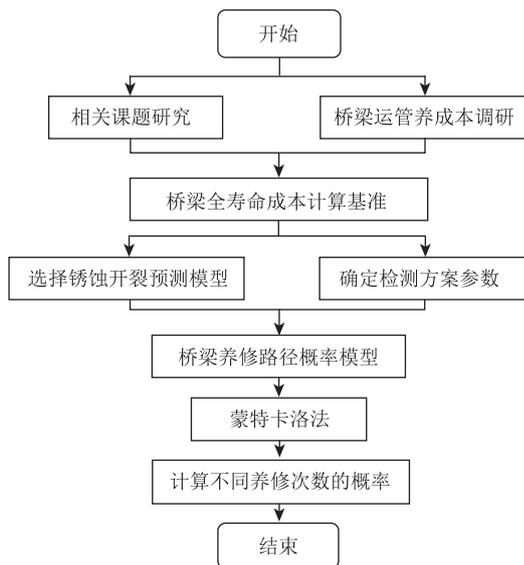


图 4 养修频率概率分布计算流程

Fig. 4 Calculation process of probability distribution of maintenance frequency

### 3.2 基于可靠度的全寿命成本计算

为了方便地描述耐久性优化设计方案的优劣, 本研究通过概率计算结合全寿命成本模型, 提出基于可靠度的全寿命成本计算方法。成本优化过程参

考文献 [18] 的优化经验, 既可以计算同一设计方案在不同可靠度下的成本变化, 也可以计算不同设计方案在相同可靠度下的成本以及不同设计方案在固定全寿命成本下的可靠度。该方法假定养修成本不随贴现率变化且养修效果相同, 计算公式如下所示:

$$P_{f_n} = \sum_{i=0}^n P_n(t)$$

$$P_r = 1 - P_{f_n} = 1 - \Phi(-\beta) = \Phi(\beta)$$

$$LCC(T_n) = C_D + C_C + C_{ins}(T) + C_m(T_n), \quad (12)$$

式中,  $P_{f_n}$  为最多养修  $n$  次的概率;  $P_n(t)$  为养修  $n$  次的概率;  $P_r$  为养修  $n$  次的可靠度。

## 4 案例与分析

### 4.1 桥梁概况

为验证所提方法的合理性, 以经济发达的广东省某近海城市桥梁为例进行计算分析, 桥梁总长 200 m, 桥面全宽 10.7 m, 行车道宽 10 m, 双向 2 车道, 采用钢筋混凝土简支 T 梁, 桥梁跨径组合为:  $6 \times 16 \text{ m} + 2 \times 20 \text{ m} + 4 \times 16 \text{ m}$ , 共 12 跨。该桥于 1997 年建成通车, 设计使用寿命为 100 a, T 梁侧面保护层厚度为 25 mm, 底部保护层厚度为 35 mm, 该桥尺寸见图 5, 图 6。

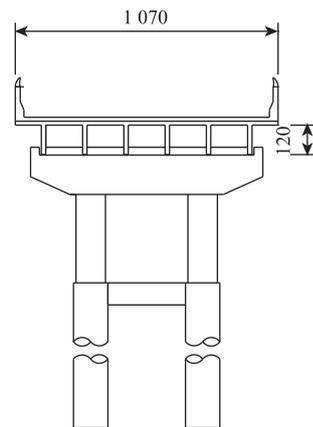


图 5 横断面尺寸示意 (单位: cm)

Fig. 5 Schematic diagram of cross-section dimensions (unit: cm)

该桥自投入使用以来耐久性问题严重, 2009 年桥梁技术状况评定中被评为三类, 于 2010 年和 2017 年经历两次大规模养修, 将于 2022 年进行第 3 次养修。本研究利用建立的全寿命成本计算方法, 对原设计进行优化分析, 结合蒙特卡洛法分析不同优化设计方案对混凝土桥养修过程、全寿命周期成本及性能的影响。

### 4.2 初始成本计算

根据桥梁设计图及工程概预算计算方法, 可以估算该桥建造总成本为 4 508 万元, 其中钢筋混凝土

材料成本为 973.7 万元, 占总成本的 21.6%。全桥主梁混凝土用量  $688.2 \text{ m}^3$ , 钢筋的用量为 575.7 t, 材料成本为 356.2 万元, 占全桥钢筋混凝土材料成

本的 36.6%, 占全桥总建造成本的 7.9%, 本研究在优化分析中仅考主梁的建造费用, 对于 4 组优化方案, 计算方法同原设计, 初始成本见表 3。

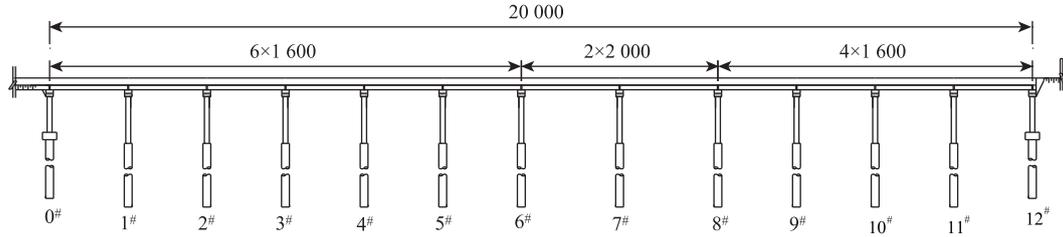


图 6 纵断面尺寸示意 (单位: cm)

Fig. 6 Schematic diagram of vertical-section dimensions (unit: cm)

表 3 不同耐久性设计方案养修成本、社会成本计算结果

Tab. 3 Calculation Results of maintenance cost and social cost of different durability design schemes

设计参数	原方案	耐久性优化方案			
		A 组	B 组	C 组	D 组
主梁高度/cm	120	120	125	125	128
顶板板厚/cm	16	16	18	18	20
底板板厚/cm	18	18	20	20	22
混凝土等级	C30	C40	C40	C50	C50
保护层厚度/mm	25	25	35	35	45
钢筋质量/t	575.7	575.7	604.6	604.6	627.1
混凝土体积/ $\text{m}^3$	1 145	1 145	1 187	1 187	1 242
主梁材料成本/万元	356.2	367.5	384.8	399.6	415.8
检测成本/万元			1 475		
单次养修成本/万元			12.51		

#### 4.3 检测成本与养修成本计算

桥梁需要在一定的时间间隔内进行检测, 根据住建部发布的《城市桥梁养护技术标准》(CJJ99—2017) 相关规定, 城市主干路上的桥梁其常规定期检测时间间隔应为 1~3 a, 本案例检测时间间隔为 3 a, 检测成本计算公式见表 1, 计算结果见表 3。

采用之前提出的养修概率计算方法, 通过蒙特卡洛法预测桥梁不同耐久性设计方案, 在 100 a 设计使用寿命期内的养修策略和全寿命成本, 案例中养修方法为对裂缝进行灌浆处理和表面修复, 根据调研所得历史养修数据, 对全桥进行一次裂缝处理和混凝土表面修复的成本约为 12.51 万元, 不考虑贴现率影响, 近似认为养修次数与全寿命成本呈线性关系, 通过公式 (3) 计算, 计算结果见表 3。

#### 4.4 全寿命优化分析

经过蒙特卡洛法计算的结果如图 7 所示, 可以得到不同设计方案下养修次数所对应的概率密度及全寿命成本。从图 7 (a) ~ (d) 的对比中可以看

出保护层厚度的增加能显著提高结构耐久性, 减少养修次数并降低养修的离散性。从图 7 (a) ~ (c) 和 7 (e) 的对比中可以看出, 混凝土等级的提高在一定程度上能提高结构耐久性、减少后期养修次数, 但会增加养修活动的离散性。

如果从桥梁全寿命总成本最优的角度出发, 通过计算不同设计方案在不同可靠度下的全寿命成本, 但不考虑折现率的影响, 计算结果如图 8 所示。从图中可以看出在不同可靠度下所有修改设计的全寿命成本均低于原设计, 其中 D 方案为全寿命成本原则下的最优方案。若仅考虑初始建造成本, 则原设计成本最低, D 方案成本最高, 比原设计多出 32.8 万元。

从全寿命成本分析中可以看出, 刚好满足规范耐久性要求的原方案, 在设计寿命取 100 a 且可靠度指标取 1.0 的情况下, 综合成本将达到初始成本的 2.3 倍。而进行耐久性优化后的 D 方案, 虽然初始成本比原设计高出 32.8 万元 (8.6%), 但综合成本比原设计节约 112.2 万元 (12.8%), 表 4 中给出了不同可靠度下优化方案相对于原设计方案所节约的全寿命成本。

从表 4 中可以看出, 不同可靠度指标的取值对设计方案的全寿命成本有显著影响, 随着可靠度指标的提高优化方案的经济性均出现先上升后下降的趋势。当可靠度指标  $\beta=1$  时, 各组优化方案所节约总成本最多, 当可靠度指标继续增加, 各方案节约总成本则开始下降。这个现象说明, 对于耐久性极限状态目标可靠度的取值不宜过大, 可以考虑在设计的时候通过一个较低的可靠度指标, 有意放宽对于耐久性条款的设计准入, 允许桥梁在使用过程中出现一定的耐久性问题, 并通过后续养修进行矫正, 这样对于全寿命成本而言, 更具有经济性。

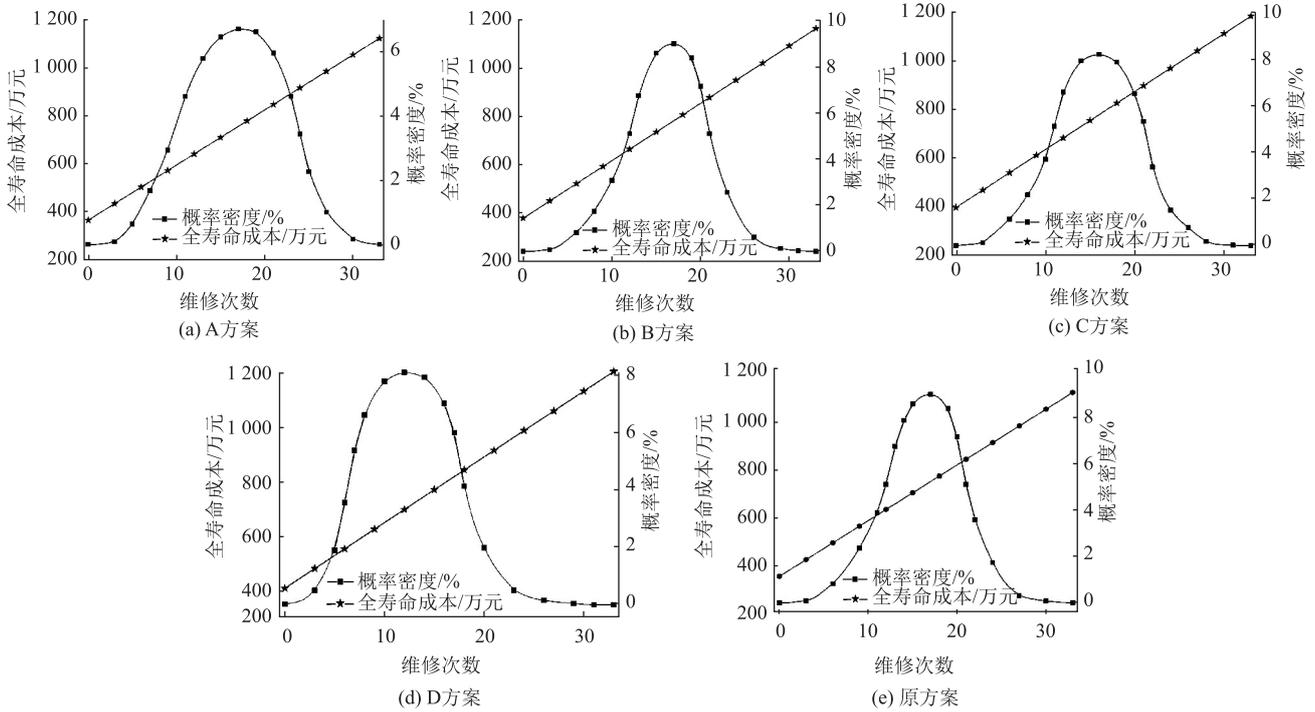


图 7 同方案养修次数所对应的概率密度及全寿命成本

Fig. 7 Probability density and life-cycle cost corresponding to maintenance times for different schemes

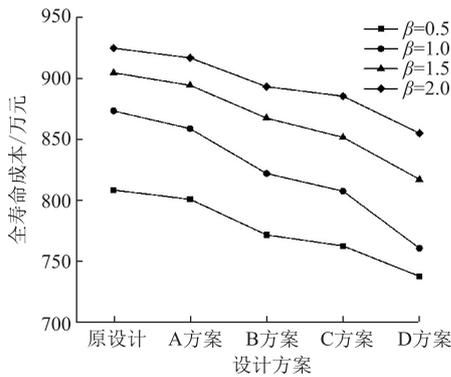


图 8 不同设计方案在不同可靠度下的全寿命成本

Fig. 8 Life-cycle cost of different design schemes with different reliabilities

表 4 不同可靠度下优化方案比原设计方案节约的全寿命成本

Tab. 4 Life-cycle cost savings of optimized schemes compared to original design scheme with different reliabilities

可靠度指标 $\beta$	节约总成本/万元			
	A 方案	B 方案	C 方案	D 方案
0.5	7.5	36.6	45.6	70.4
1.0	13.5	51.1	61.5	112.2
1.5	10.2	37	52.7	87
2.0	7.9	31.4	39.2	69.4

### 5 结论

(1) 通过对我国公路桥梁运营及管养情况的调

研发现, 设计寿命 100 a 的桥梁, 在投入使用 30 a 不到的时间内便进行多次大规模养修的案例并不少见。本研究提出的养修概率及全寿命成本计算方法, 可以在设计阶段比较不同耐久性设计方案的优劣, 以较为直观的方式平衡建造成本与养修成本, 可有效降低频繁养修的概率。

(2) 本研究将复杂的桥梁养修问题通过路径概率方法进行简化, 依据国内公路桥梁管养实际情况提出“先检后修”的分析思路, 采用蒙特卡洛法求解, 将养修方案、养修成本通过可靠度指标联系起来, 结合规范中关于正常使用极限状态指标的相关规定, 在实际工程中有更广泛的实用价值。

(3) 本研究依据调研所得桥梁管养投入实际数据, 拟合了不同服役地区不同桥梁等级的检测成本计算公式, 以及不同公路等级不同养修成本的取值区间, 以此构建了桥梁全寿命成本计算基准, 可为以后的桥梁全寿命成本分析提供参考。

(4) 本研究采用路径概率方法构建了考虑可靠度指标的桥梁全寿命成本计算方法, 进一步的研究可在此计算方法的基础上平衡初始建造成本与后续养修成本, 以寻找全寿命周期成本最低为目标函数, 开展结构耐久性优化设计研究。在工程实践中可以通过调整极限裂缝宽度的设置以及裂缝超限概率的定义来考虑不同的桥梁等级、不同的部件重要性对桥梁全寿命成

本分析带来的影响。使用者也可以根据实际需要选择不同于钢筋锈蚀导致混凝土开裂时间模型的其他劣化模型,仅需要调整结构劣化极限的概率表达式即可。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 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.
- [2] 李鹏飞, 毛燕, 许乐欣, 等. 不同应力幅下锈蚀疲劳耦合钢筋混凝土梁性能退化试验 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (8): 119-126.  
LI Peng-fei, MAO Yan, XU Le-xin, et al. Performance Degradation Test of Corrosion-fatigue Coupled RC Beams under Different Stress Amplitudes [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (8): 119-126.
- [3] VU K, STEWART M G, MULLARD J. Corrosion-induced Cracking: Experimental Data and Predictive Models [J]. Aci Structural Journal, 2005, 102 (5): 719-726.
- [4] MULLARD J A, STEWART M G. Corrosion-induced Cover Cracking: New Test Data and Predictive Models [J]. Aci Structural Journal, 2011, 108 (1): 71-79.
- [5] 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.
- [6] FRANGOPOLO D M, KONG J S. Evaluation of Expected Life-cycle Maintenance Cost of Deteriorating Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129 (5): 682-691.
- [7] MUNOZ J V, PETERSSON L, SUNDQUIST H, et al. Life-cycle Cost Analysis as a Tool in the Developing Process for New Bridge Edge Beam Solutions [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12 (9): 1185-1201.
- [8] KONG J S, FRANGOPOLO D M. Prediction of Reliability and Cost Profiles of Deteriorating Bridges under Time and Performance Controlled Maintenance [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130 (12): 1865-1874.
- [9] MOHAMMED A, ALMANSOUR H, MARTIN P B. A Semi-quantitative Structural Evaluation Framework for Corrosion-damage Reinforced Concrete Bridge Columns [J]. Engineering Structures, 2021, 238 (9): 112185.
- [10] LIU Y, WEYERS R E. Time to Cracking for Chloride-induced Corrosion in Reinforced Concrete [J]. Special Publications of the Royal Society of Chemistry, 1996, 183: 88-104.
- [11] STEWART M G. Reliability-based Assessment of Ageing Bridges Using Risk Ranking and Life Cycle Cost Decision Analyses [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 74 (3): 263-273.
- [12] ALONSO C, ANDRADE C, RODRIGUEZ J, et al. Factors Controlling Cracking of Concrete Affected by Reinforcement Corrosion [J]. Materials and Structures, 1998, 31 (7): 435-441.
- [13] VU K T, STEWART M G. Structural Reliability of Concrete Bridges Including Improved Chloride Induced Corrosion Models [J]. Structural Safety, 2000, 22 (4): 313-333.
- [14] VAL D V, CHERNIN L, STEWART M G. Experimental and Numerical Investigation of Corrosion-induced Cover Cracking in Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135 (4): 376-385.
- [15] KIM C, LEE E B, HARVEY J T, et al. Automated Sequence Selection and Cost Calculation for Maintenance and Rehabilitation in Highway Life Cycle Cost Analysis [J]. International Journal of Transportation and Technology, 2015, 4 (1): 61-75.
- [16] 宋志刚, 金伟良, 刘芳, 等. 钢筋锈蚀率概率分布的动态演进模拟 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2006, 40 (10): 1749-1754.  
SONG Zhi-gang, JIN Wei-liang, LIU Fang, et al. Dynamic Simulation Method for Probability Evolution of Reinforcement Steel Corrosion [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40 (10): 1749-1754.
- [17] 邵孜科, 李文权, 孙春洋, 等. 基于蒙特卡罗模拟的平行式加速车道长度模型 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (1): 137-142.  
SHAO Zi-ke, LI Wen-quan, SUN Chun-yang, et al. A Model of Parallel Type Acceleration Lane Length Based on Monte Carlo Simulation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (1): 137-142.
- [18] 赵璐, 路新瀛. 基于随机预测的青岛海湾大桥桥墩防腐维修措施成本优化 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (8): 120-124.  
ZHAO Lu, LU Xin-ying. Cost Optimization of Corrosion Maintenance Measures for Qingdao Bay Bridge Piers Based on Stochastic Prediction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (8): 120-124.