



基于耐久性理论和限载政策的某城市桥梁可靠性评估

黄海云 张俊平 吕金浩

RELIABILITY EVALUATION OF AN URBAN BRIDGE BASED ON DURABILITY THEORY AND LOAD LIMIT POLICY

HUANG Hai-yun, ZHANG Jun-ping, L. Jin-hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.S009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展

RESEARCH PROGRESS ON DURABILITY OF STRESSED CONCRETE UNDER ENVIRONMENTAL ACTIONS

工程力学. 2019, 36(1): 1-14,43 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.08.ST11>

基于车桥耦合随机振动分析的钢桥疲劳可靠度评估

FATIGUE RELIABILITY EVALUATION OF STEEL BRIDGES BASED ON COUPLING RANDOM VIBRATION ANALYSIS OF TRAIN AND BRIDGE

工程力学. 2017, 34(2): 69-77 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2015.04.0334>

考虑非平稳因素的混凝土桥梁概率极限状态评估

PROBABILISTIC LIMIT STATE ASSESSMENT OF CONCRETE BRIDGES CONSIDERING NON-STATIONARY FACTORS

工程力学. 2020, 37(8): 167-178 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0561>

基于监测数据的钢箱梁U肋细节疲劳可靠性分析

FATIGUE RELIABILITY ANALYSIS OF U-RIB DETAIL OF STEEL BOX GIRDER BASED ON MONITORING DATA

工程力学. 2020, 37(2): 111-123 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.03.0114>

基于可靠度理论的中小跨径桥梁卡车载重限值研究

RELIABILITY BASED RESEARCH ON TRUCK-LOAD LIMITATION OF MEDIUM-SMALL-SPAN BRIDGES

工程力学. 2017, 34(8): 161-170 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.0323>

碳化环境下混凝土结构耐久性模型的更新方法

UPDATING METHOD FOR DURABILITY MODELS OF CONCRETE STRUCTURES IN CARBONATION ENVIRONMENT

工程力学. 2021, 38(5): 113-121 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.06.0361>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2022)Suppl-0058-06

基于耐久性理论和限载政策的 某城市桥梁可靠性评估

黄海云¹, 张俊平¹, 吕金浩²

(1. 广州大学土木工程学院, 广东, 广州 510006; 2. 安徽省公路桥梁工程有限公司, 安徽, 合肥 230031)

摘 要: 城市桥梁在户外各种不利环境因素的影响下, 结构材料的耐久性性能会发生退化, 以致出现混凝土强度降低、钢筋锈蚀等耐久性病害, 导致桥梁结构的安全性和可靠性逐渐下降。以某典型城市高架桥为例, 基于混凝土结构耐久性理论和城市的限载政策, 结合现场检测、实地交通调查结果, 分析了桥梁结构的时变抗力和荷载效应的变化规律, 最后, 推算了桥梁控制截面抗弯承载能力可靠性功能函数的失效概率, 并对其可靠度进行了评估。该研究方法为各地城市桥梁的可靠性评估、维修养护、交通荷载限载政策等提供借鉴和参考。

关键词: 桥梁工程; 可靠性评估; 混凝土耐久性; 限载政策; 抗弯承载力

中图分类号: U441 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.S009

RELIABILITY EVALUATION OF AN URBAN BRIDGE BASED ON DURABILITY THEORY AND LOAD LIMIT POLICY

HUANG Hai-yun¹, ZHANG Jun-ping¹, LÜ Jin-hao²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

2. Anhui Highway and Bridge Engineering Co., Ltd., Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Under the attack of various aggressive environmental factors, the durability of material degrades, which leads to the reduction of concrete strength, steel bar corrosion and other durability diseases, resulting in the gradual decline of the safety and reliability of urban bridges. A typical city viaduct was taken as an example, based on the durability theory of concrete structures and the load limit policy of city, combined with the results of in-situ inspection and traffic survey, the time-varying load bearing capacity and load effect of the bridge structure were analyzed, and the failure probability was calculated by referring to the reliability function of the bridge's control sections, and then the reliability was evaluated. The research method provides reference for the reliability assessment & maintenance of urban bridges and the formulation of traffic load limit policy.

Key words: bridge engineering; reliability assessment; concrete durability; load limit policy; bending-resisting bearing capacity

我国以城市高架桥和立交为主的城市桥梁建设主要开始于 20 世纪 80 年代—90 年代, 通常采用钢筋混凝土或预应力混凝土的梁式桥桥型结构, 设计荷载标准偏低。进入 21 世纪后, 随着城市现代化进程的加速、汽车工业的发展, 客货运输交通需求日益增长, 城市桥梁面临车辆拥堵和

货车超限超载的现象, 运营车辆荷载效应接近甚至超过设计荷载效应。对于既有桥梁而言, 由于设计时对结构材料的耐久性、结构抗力的变化并没有充分地考虑, 以致不少桥梁虽然未达到设计使用年限, 已出现了混凝土开裂、钢筋锈蚀等耐久性病害, 显著影响了桥梁结构的安全性和可靠性。

收稿日期: 2021-05-30; 修改日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278280); 国家自然科学基金青年项目(51808148)

通讯作者: 黄海云 (1972—), 女, 广州人, 副教授, 硕士, 主要从事桥梁工程研究 (E-mail: 1500488039@qq.com).

作者简介: 张俊平 (1968—), 男, 庆阳人, 教授, 博士, 主要从事桥梁工程研究 (E-mail: Zhang-jp@139.com);

吕金浩 (1993—), 男, 阜阳人, 助工, 硕士, 主要从事土木建筑工程研究 (E-mail: 289061006@qq.com).

混凝土结构的耐久性问题已引起国内外学者的关注。主要相关研究包括 Ho、Lewis^[1]研究了水灰比、水泥品种对混凝土碳化深度的影响,建立混凝土碳化公式。谷慧等^[2]基于贝叶斯理论,提出碳化环境下的耐久性模型更新方法。潘洪科等^[3]运用损伤力学理论对因钢筋锈蚀膨胀而对混凝土产生的作用效应进行数值模拟,并对结构的耐久性使用寿命进行评价和预测。牛荻涛^[4]基于腐蚀电化学原理,建立了混凝土开裂前后的锈蚀量预测模型,分析了锈蚀钢筋混凝土构件的结构性能退化对承载力的影响。张建仁、王磊等^[5]通过试验建立了混凝土抗压强度、锈蚀钢筋强度退化模型,提出了腐蚀钢筋混凝土梁承载力计算方法。吕金浩^[6]推导了钢筋局部锈蚀后的时变面积公式,统计了城市典型车型轴重尺寸的数字特征,构建了基于材料概率模型的城市桥梁时变抗力模型。此外,为了保证既有混凝土结构在目标使用年限内的安全和正常使用,我国于 2019 年颁布了《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)^[7]。

为了缓解城市交通拥堵问题,城市内通常实施限制货车通行的交通管制政策和措施。以广州市区为例,曾先后多次调整货车限载限行政策,自 2018 年以来,政策规定:上下班高峰期时段禁止货车通行;每日 7:00—22:00(下称限载时段),禁止核定载重质量为 5 t(广州市籍号牌)、0.6 t(外地号牌)以上的货车通行。此限载政策是否能有效地保障城市桥梁的安全运营?

本文以广州市某典型城市高架桥为例,基于混凝土结构耐久性理论和既有混凝土结构耐久性评定标准,结合现场检测、实地交通调查的结果,分析了桥梁结构后续服役期的抗力和车辆荷

载效应变化,计算了桥梁控制截面的抗弯承载力可靠度,最后对该桥的可靠性进行了评估。

1 工程概况

某城市高架桥为广州市城区某立交工程的匝道桥梁,上部结构采用变高单箱单室钢筋混凝土连续结构,跨径组合 29.20 m+33.00 m+29.00 m+23.60 m+19.40 m=134.20 m,桥面宽 8.50 m、单向双车道。上部结构及桥面铺装采用现浇 C35 混凝土,主钢筋型号为 HRB335。设计荷载为:汽-超 20、挂-120,并于 1998 年建成通车。2007 年该桥进行了桥跨结构的混凝土抗压强度和钢筋保护层厚度检测,且在外观检查时发现多数箱梁底板和腹板普遍存在微裂缝。2018 年底,该桥进行了实地交通荷载调查。桥梁上部结构布置简图如图 1 所示。

2 混凝土结构耐久性的时变模型

2.1 混凝土抗压强度时变模型

参考张建仁等基于混凝土碳化腐蚀理论以及实桥混凝土强度统计回归模型^[5],认为混凝土的时变抗压强度 $f_c(t)$ 服从正态分布,某 t 年该强度分布的平均值和标准差分别为:

$$\mu_c(t) = \mu_{c0}[q \times 1.3781e^{-0.0246(\ln t - 1.7154)^2}] \quad (1)$$

$$\sigma_c(t) = \sigma_{c0}[q' \times (0.0347t + 0.9772)] \quad (2)$$

式中: q 和 q' 为模拟参数,对应的值分别为 1.156 和 0.981;现浇 C35 对应的初始平均值 μ_{c0} 和标准差 σ_{c0} 分别为 32、5.2554。服役期第 9 年(2007 年),利用式(1)、式(2)可得到 $t=9$ 年的混凝土强度分布(先验分布)的平均值和标准差;而由该年度(2007 年)桥跨结构的混凝土抗压强度检测结果可知,实际强度分布的平均值为 54.30 和标准差 4.64,

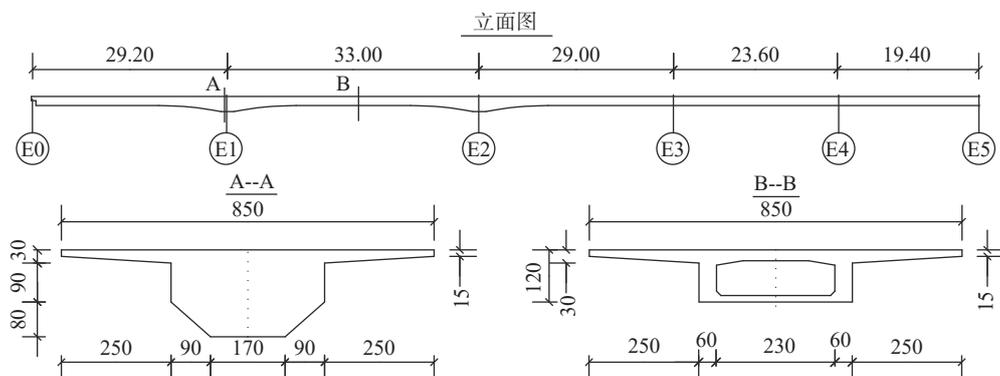


图 1 某典型桥梁的桥跨布置简图(立面图/m, 截面图/cm)

Fig. 1 The layout drawing of a typical bridge span

并以此作为混凝土强度后验分布的特征值,按贝叶斯修正理论得到更新后混凝土强度分布模型的平均值 53.10 和标准差 3.80,以及更新后模拟参数 q 和 q' 的值为 1.275 和 0.561。所得到混凝土强度均值的时变模型计算结果如图 2 所示,呈现服役期前 6 年迅速增长而后缓慢下降的趋势。

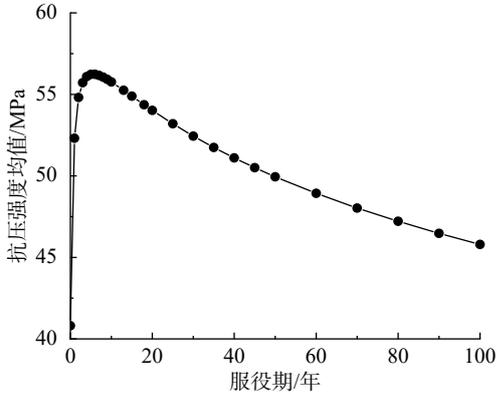


图 2 混凝土抗压强度均值的变化曲线
Fig. 2 Variation of the mean compressive strength of the concrete

2.2 钢筋初始锈蚀时间

参考既有混凝土结构耐久性评定标准 (GB/T 51355—2019)^[7]5.2 节的公式,按一般环境考虑,钢筋初始锈蚀时间 T_i 与碳化系数、保护层厚度和局部环境的影响系数的乘积相关。其中,在碳化系数的影响系数 K_k 按环境温度、相对湿度取地区均值计算;二氧化碳浓度影响按大中城市市区的工业建筑室外环境取值 (1.40);酸雨影响程度影响取中值计算 (1.35),保护层厚度影响系数 K_c 参考 2007 年混凝土保护层厚度实测结果 (均值 18.50 mm, 标准差 3.92 mm) 插值计算;局部环境的影响系数 K_m 按室外淋雨、酸雨环境取局部环境系数 $m=4$ 插值计算。最后得到混凝土结构钢筋开始锈蚀时间 T_i 为 18 年,如表 1 所示。

表 1 钢筋初始锈蚀时间的计算

Table 1 Calculation of the initial corrosion time of the reinforcement

K_k	K_c	K_m	$T_i=15.2 K_k K_c K_m$
1.45	1.20	0.68	18.05

2.3 钢筋局部锈蚀深度和锈蚀面积

假设钢筋沿最靠近大气的方向发生局部锈蚀,且局部锈蚀坑呈半圆形,参考文献 [5],当桥梁建成服役期 t 年后,对于钢筋开始锈蚀时间 T_i ,钢筋局部锈蚀深度 $p(t)$ 公式计算为:

$$p(t) = 0.3727R \left(\frac{f_c + 13.5}{f_c - 13.5} \right)^{1.64} \frac{(t - T_i)^{0.71}}{C} \quad (3)$$

式中: R 为锈蚀不均匀系数,在 4~8 间取中值为 6; f_c/MPa 为钢筋开始锈蚀时混凝土对应的抗压强度,按 2.1 节混凝土抗压强度时变模型取值; C/mm 为混凝土保护层厚度。

当钢筋局部锈蚀深度 $p(t)$ 不大于钢筋半径 r 时,由几何关系可推导出钢筋损失的总面积 $\Delta A_p(t)$ 和钢筋剩余面积 $A_s(t)$ 的计算公式^[6]:

$$\Delta A_p(t) = A_1 + A_2 + A_3 = \pi p(t)^2 \frac{\theta_2}{360} + \pi r^2 \frac{\theta_1}{360} - p(t)r \sin \frac{\theta_2}{2} \quad (4)$$

$$A_s(t) = A_0 - \Delta A_p(t) = \pi r^2 - \Delta A_p(t) \quad (5)$$

式中: A_0 为钢筋原面积; A_1 为扇形 MPKN 的面积; A_2 为弦 PM 与圆弧 PM 所围面积; A_3 为弦 MN 与圆弧 MN 所围面积; $\theta_1 = \angle PON$, $\theta_2 = \angle PMN$, 如图 3 所示。

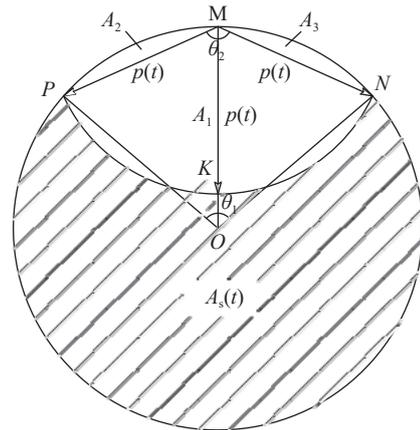


图 3 钢筋面积局部锈蚀模型

Fig. 3 Local corrosion model of the reinforcement area

2.4 锈蚀钢筋屈服强度时变模型

根据相关学者研究的研究结果^[8-9],钢筋的时变屈服强度 $f_y(t)$ 与钢筋的锈蚀损失面积 $\Delta A_p(t)$ 以及钢筋初始的面积 A_0 的比值线性相关,相关系数参考文献 [10] 的取值 0.005,可得相对于原钢筋屈服强度 f_{y0} 的时变模型:

$$f_y(t) = \left(1 - 0.005 \frac{\Delta A_p(t)}{A_0} \times 100 \right) f_{y0} \quad (6)$$

2.5 桥梁主梁截面时变抗弯承载力

按一般环境混凝土结构材料耐久性变化规律,考虑混凝土抗压强度和钢筋的锈蚀面积及其抗拉强度随时间的变化,据桥梁设计规范可得到桥梁上部结构抗弯承载力的时变计算公式:

$$R(t) = \sum A_s(t)f_y(t) \left[h_0 - \frac{\sum A_s(t)f_y(t)}{2f_c(t)b} \right] \quad (7)$$

经计算该桥第 1 跨、第 2 跨的支点截面 (简称支点截面)、第 2 跨跨中截面 (简称跨中截面) 在设计荷载下有最大负、正弯矩值, 故分别将混凝土抗压强度、钢筋屈服强度、钢筋剩余面积的时变模型代入式 (7), 据配筋情况计算不同服役期的抗弯承载能力, 计算结果如表 2、图 4 所示。图 4 显示, 在混凝土强度改变和钢筋锈蚀的影响下, 跨中和支点截面的抗弯承载力分别从第 18 年、第 20 年开始下降、至第 100 年均约减少了 29%。

表 2 两控制截面抗弯承载能力的变化
Table 2 Changes of the bending bearing capacity of two control sections

服役期/年	承载力/(×10 ⁴ kN·m)		变化率/(%)	
	跨中	支点	跨中	支点
0	1.112	-2.559	0.0	0.0
10	1.116	-2.579	-0.4	-0.9
18	1.113	-2.573	-0.3	-0.8
20	1.103	-2.548	0.1	-0.6
25	1.089	-2.516	0.8	0.4
30	1.056	-2.437	2.0	1.7
40	1.017	-2.346	5.0	4.8
60	0.929	-2.140	12.4	12.2
80	0.834	-1.918	20.7	20.6
100	1.112	-2.559	29.4	29.5

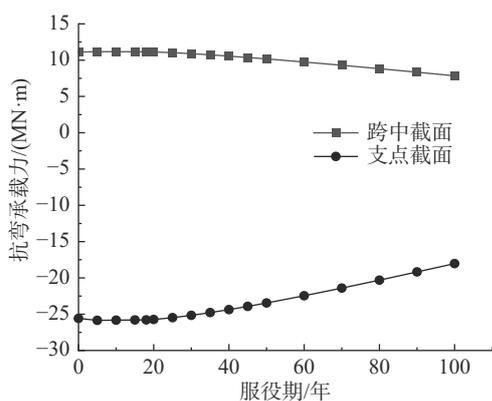


图 4 两控制截面抗弯承载力变化曲线
Fig. 4 Variations of bending bearing capacity of two control sections

3 城市交通车辆荷载效应模型

结合广州市城区货车的限载政策以及 2018 年该桥的实地交通调查, 得到限载和非限载时段代表性交通小时的通行车辆数据。表 3 显示了各不同时段运营交通荷载车型比例, 限载时段与非

限载时段货客车占比分别为 0.01 和 0.39, 可见, 限载政策能显著影响城区交通车型的出行分布。

表 3 运营交通荷载车型分布占比 / (%)
Table 3 Distribution proportion of operating traffic load types

客/货车	轴数	类型	时段	
			限载	非限载
客车	二轴	小	85.4	52.8
		中	5.6	2.7
		大	8.1	5.1
	三轴	11	0.3	1.2
		12	0.7	8.7
		15	0.0	5.6
货车	四轴	112	0.0	4.0
		125	0.0	0.9
	五轴	129	0.0	3.9
		155	0.0	0.1
	六轴	1129	0.0	0.2
		159	0.0	7.6

根据城市中常见车辆的参数及国家对运营车辆总质量的限值 [1], 其中车重按最大重量的 95% 且不超过规范限值, 统计出城市运营典型客、货车车轴重、轴距以及前后悬的基本参数 [6]。车辆间距经现场调研按拥堵状态确定, 得到塞车拥堵状态下的车辆间距不拒绝服从 $N(1.25, 0.25^2)$ 的正态分布。通过控制截面内力影响线, 再利用 MATLAB 软件和蒙特卡洛法根据车重和车型分布模型形成随机车流, 进行控制截面内力影响线动态加载, 得到随机车辆对桥梁控制截面产生的荷载效应。应用 GEV 极值分布, 对调查时段随机车流下两控制截面的弯矩效应进行了模型拟合, 计算结果如表 4。

表 4 车辆荷载效应 GEV 分布的拟合参数
Table 4 Fitting parameters for the vehicle load effect GEV distribution

截面位置	时段	模型参数		
		k	σ	μ
支点	限载	-0.1714	522.11	1846.52
	非限载	-0.2371	1601.00	5171.23
跨中	限载	-0.0116	283.20	340.47
	非限载	-0.2011	940.68	1028.72

4 可靠性评估

桥梁结构可靠度分析主要分为解析法和随机

模拟法, 本文采用随机模拟法中的蒙特卡洛法(简称 MC 法), 对抗力、效应模型进行随机抽样, 通过统计功能函数的失效概率, 求得可靠指标。按控制截面的抗弯承载能力极限状态构建功能函数: $Z=R(t)-(S_{恒}+S_{活})$ 。

功能函数中, 参考文献 [12] 对结构抗力和恒载分布模型的规定, 将已求得的时变抗力值和恒载值作为模型的均值, 经查表可得到模型的标准差, 即得相应时变抗力、恒载效应分布模型。

基于交通调查时段的随机车流荷载效应的分布模型, 鉴于车辆的车轴重均按最大车重 95% 保证率计入, 以调查时段荷载效应分布模型代表 1 个月的荷载效应最大值分布模型, 假设车型分布在后续服役期基本保持不变, 则利用极值理论, 可推算 1 年车辆荷载效应最大值分布 $F_1(x)$ 和后续服役年间的车辆荷载效应最大值分布 $F_n(x)$, 且 $F_n(x)=[F_1(x)]^n$ 。

最后, 利用 MC 法编制 MATLAB 程序, 自 2018 年对于不同剩余服役期 ($t=0$ 年~80 年), 生成随机数代入各抗力和效应的分布模型, 计算相应的抗力和效应, 通过功能函数运算求失效概率求得可靠指标 β , 如表 5、图 5 所示。

表 5 抗弯可靠指标的计算结果
Table 5 Calculation results of reliability index of bending resistance

剩余服役期/年	支点截面		跨中截面	
	限载	非限载	限载	非限载
0	6.9	2.9	7.3	4.9
10	6.4	1.9	6.8	3.8
20	6.2	1.2	6.5	3.4
30	5.8	0.5	6.3	3.0
40	5.5	<0.0	6.0	2.5
50	5.0	<0.0	5.8	1.9
60	4.4	<0.0	5.4	1.4
70	3.6	<0.0	5.0	0.5
80	2.4	<0.0	4.5	<0.0

参考与该桥建成年份相近的《公路工程结构可靠度设计统一标准》[12], 该桥属于二级安全等级, 对应原延性破坏的目标可靠指标 $[\beta]$ 为 4.2; 对于既有桥梁, 参考文献 [13] 的处理方法, 目标可靠指标 $[\beta]$ 调整为 3.2(下降两级差), 即当可靠指标 $\beta < [\beta]=3.2$ 时, 认为该结构构件处于破损状态, 不能满足设计基准期 100 年的可靠性使用要求[13]。

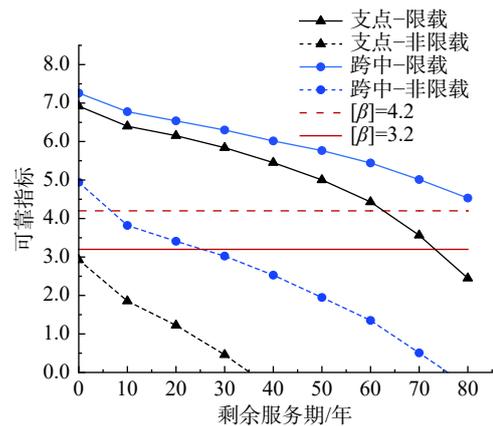


图 5 剩余服役期可靠指标变化曲线

Fig. 5 Variations of reliability index in remaining service period

图 5 可见, 按照现行的城市城区货车限行政策, 考虑桥梁结构耐久性的承载能力退化后, 如果按限载时段的交通荷载通行, 则支点截面在第 73 年后将不满足现目标可靠指标 3.2 的要求; 如果按当下的限载政策、存在货车自由通行的非限载时段, 则在当下最不利交通荷载下, 支点截面已经不能满足要求, 跨中截面在第 6 年后不能满足要求。

5 结论

通过对某既有典型城市桥梁的可靠性评估, 可以得到以下结论:

(1) 考虑结构材料耐久性变化后, 某典型桥梁在服役 100 年后控制截面的抗弯承载能力减少了 29%; 基于当前城市桥梁的限载政策, 在货车自由通行的非限载时段最不利车辆荷载作用下, 支点截面在当年的可靠性不能满足目标可靠指标 3.2 的要求, 存在一定的安全隐患。

(2) 建议在非限载时段, 管理部门应严格控制通行货车的总重, 加强定期检查和维护, 以延长城市桥梁的使用寿命。

(3) 基于混凝土结构耐久性, 结合混凝土抗压强度现场检测结果、实地运营交通车辆荷载调查的可靠性评估方法能有效地评估各地既有城市桥梁的结构可靠性。

参考文献:

- [1] Ho D W S, Lewis R K. Carbonation of concrete and its prediction. cement and concrete research [J]. Cement and Concrete Research, 1987, 17(3): 489 - 504.

- [2] 谷慧, 李全旺, 侯冠杰. 碳化环境下混凝土结构耐久性模型的更新方法[J]. *工程力学*, 2021, 38(5): 113 – 121.
Gu Hui, Li Quanwang, Hou Guanjie. Updating method for durability models of concrete structures in carbonation environment [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(5): 113 – 121. (in Chinese)
- [3] 潘洪科, 王穗平, 祝彦知, 杨林德. 钢筋混凝土结构锈胀开裂的耐久性寿命评判与预测研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(7): 111 – 116.
Pan Hongke, Wang Suiping, Zhu Yanzhi, Yang Linde. The judgment and prediction on reinforced concrete structures' durability based on steel rustiness and concrete cracking [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(7): 111 – 116. (in Chinese)
- [4] 牛荻涛. 混凝土结构的耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Niu Ditao. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 张建仁, 王磊, 彭建新等. 服役钢筋混凝土桥梁时变可靠度评估与剩余寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Zhang Jianren, Wang Lei, Peng Jianxin, et al. Evaluation of time-variable reliability and residual life prediction for in-service reinforced concrete bridge [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [6] 吕金浩. 考虑限载政策的广州城市既有混凝土梁式桥的时变可靠度分析研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.
Lü Jinhao. Time-dependent reliability analysis of existing concrete beam bridge in Guangzhou city considering load limit policy [D]. Guangzhou, Guangzhou University, 2020.
- [7] GB/T 51355—2019, 既有混凝土结构耐久性评定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GB/T 51355—2019, Code for durability assessment of existing concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019. (in Chinese)
- [8] Stewart M G. Mechanical behaviour of pitting corrosion of flexural and shear reinforcement and its effect on structural reliability of corroding RC beams [J]. *Structural Safety*, 2009, 31(1): 19 – 30.
- [9] Ma Yafei, Zhang Jianren, Wang Lei, et al. Probabilistic Prediction with Bayesian Updating for Strength Degradation of RC Bridge Beams [J]. *Structural Safety*, 2013, 44(2334): 102 – 109.
- [10] Du Y G, Clark L A, Chan A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars [J]. *Mag Concrete Res*, 2005, 57(3): 135 – 147.
- [11] GB 1589—2016, 汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
GB 1589—2016, Limits of dimensions, axle load and masses for motor vehicles, trailers and combination vehicles [S]. Beijing: China Standard Press, 2016. (in Chinese)
- [12] GB/T 50283—1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
GB/T 50283—1999, Unified standard for reliability design of highway engineering structures [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [13] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
Zhao Guofan. Reliability theory and its applications for engineering structures [M]. Dalian: Dalian University of Technology Publishing House, 1996. (in Chinese)