

文章编号:1001-7372(2020)05-0092-09

车辆轴限对钢筋混凝土桥梁可靠度和加固费用的影响

邓露^{*1,2}, 王涛², 何钰龙², 孔焯², 淡丹辉³, 毕涛⁴

(1. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 4. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘要:为了分析车辆限载对钢筋混凝土桥梁可靠度和加固费用的影响,基于实测车辆动态称重数据和可靠度理论,研究了桥梁可靠度及其年均加固费用与车辆轴限值的关系。首先根据车辆动态称重数据统计得到交通荷载资料,在保持车货运输总重不变的前提下,采用蒙特卡罗法模拟不同轴限值约束下的随机车流。然后,计算桥梁在不同轴限值下的时变可靠度,结合不同加固方案所引起的可靠指标变化确定桥梁剩余使用寿命及其年均加固费用,并拟合确定轴限值与年均加固费用的关系曲线。最后,以湖南某地区的实测车辆动态称重数据及一座典型的钢筋混凝土简支T梁桥为例进行分析说明。研究结果表明:对桥梁进行限载可以减缓桥梁可靠指标的下降速率;在车货运输总重保持不变的条件下,轴限值越大,桥梁的可靠指标下降越快,桥梁使用寿命越短;当轴限值不超过10 t时,桥梁使用寿命可以达到设计使用年限,而当轴限值超过16 t后,桥梁结构的可靠指标随时间下降明显,在达到设计使用年限之前需要采取加固措施;采用3种常见的方案对桥梁进行加固后,桥梁剩余使用寿命随轴限值的增加均呈明显的下降趋势;随着轴限值继续增大,3种加固方案对桥梁剩余使用寿命的影响越来越小,而桥梁年均加固费用却随轴限值的增大呈指数型增长。

关键词:桥梁工程;桥梁限载;时变可靠度;加固费用;车辆动态称重数据

中图分类号:U445.72 **文献标志码:**A

Impact of Vehicle Axle Load Limit on Reliability and Strengthening Cost of Reinforced Concrete Bridges

DENG Lu^{*1,2}, WANG Tao², HE Yu-long², KONG Xuan², DAN Dan-hui³, BI Tao⁴

(1. Hunan Provincial Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Sichuan Electric Power Design and Consulting Co., Ltd., Chengdu 610016, Sichuan, China)

Abstract: To analyze the impact of vehicle load limit on the reliability and strengthening cost of reinforced concrete bridges, the relationship among the axle load limit, reliability, and annual strengthening cost of the bridge structure was studied, based on the measured weigh-in-motion data and the reliability theory. First, traffic load information was collected based on the weigh-in-motion data. Under the assumption that the total freight weight was constant, random traffic flow was simulated using the Monte-Carlo method under different axle load limits. Then, the

收稿日期:2020-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51778222);湖南省重点研发计划项目(2017SK2224);湖南省研究生科研创新项目(CX2018B159)

* 作者简介:邓露(1984-),男,湖南双峰人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dengl@hnu.edu.cn.

time-dependent reliability index of the bridge was calculated for different axle load limits, and the remaining service life of the bridge and the annual strengthening cost were determined by considering the time-dependent reliability after adoption of different strengthening methods. The fitted curve between the axle load limit and annual strengthening cost was obtained accordingly. Finally, the measured weigh-in-motion data of a specific area in the Hunan province and a typical simply-supported T-beam reinforced concrete bridge were considered as examples for the purposes of illustration. The results show that limiting the vehicle load can slow down the reduction of the reliability index of the bridge. Under the assumption of a constant total freight weight, a higher axle load limit can result in a faster reduction of the reliability index and a shorter service life of the bridge. When the axle load limit is no greater than 10 t, the bridge service life can satisfy the design service life. However, if the axle load limit is higher than 16 t, the reliability index of the bridge demonstrates significant reduction, and the bridge structure is required to be strengthened to satisfy the design service life. After the bridge is strengthened using three types of common strengthening methods, the remaining service life of the bridge shows a clear downward trend with the increase in the axle load limit. More specifically, if the axle load limit continues to increase, the difference between the remaining service life using different strengthening methods becomes smaller, while the annual strengthening cost is found to increase exponentially with the increase of the axle load limit.

Keywords: bridge engineering; vehicle load limit; time-dependent reliability; strengthening cost; weigh-in-motion data

Received 13 Jan. 2020

Funding: National Natural Science Foundation of China (51778222); Key Research Project of Hunan Province (2017SK2224); Hunan Provincial Innovation Foundation For Postgraduate (CX2018B159)

* Corresponding author. *E-mail address:* denglu@hnu.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.05.008>

0 引言

近年来随着中国公路运输市场竞争的日益激烈,在利润最大化目标的驱使下,各地车辆超载超限现象愈发普遍^[1]。过桥重车可能对桥梁结构造成严重的损伤^[2],降低桥梁的可靠度,缩短其使用寿命,导致桥梁维修加固费用增加。因此,确定合理的桥梁限载值对于提高桥梁安全性能及经济效益都具有重要意义。

国内外学者针对桥梁限载问题开展了广泛的研究。李松辉等^[3]以中小跨径简支梁桥为分析对象,建立了一种适用于不同设计荷载等级的桥梁限载分析模型。袁阳光等^[4]基于结构可靠度理论和实测车辆动态称重数据,探讨了桥梁目标可靠指标及区域荷载特性对卡车载重限值的影响,并结合现行国家治超标准给出了中小跨径桥梁限载取值的建议。Cha等^[5]运用有限元分析方法,探究了车重限值的

提高及环境变化对桥梁使用寿命的影响,并提出了一种评估车辆荷载及环境因素对钢结构桥梁耐久性影响程度的计算方法。Wang等^[6]运用 Miner 累积损伤理论分析了一座典型简支钢梁桥在不同工况下的疲劳可靠度,提出了一种基于疲劳可靠度理论的车辆限载取值方法。Ghosn^[7]结合桥梁承载能力极限状态方程,提出了一种基于结构可靠度理论的车辆限载取值分析方法,并给出了满足美国 AASH-TO 规范设计可靠指标的限载取值公式。

上述研究分析了限载对桥梁安全性的影响,但均未从经济性的角度考虑限载的影响。为保证桥梁在服役期间的正常使用,往往需要耗费高额的维修加固费用^[8]。通常,提高轴限可以降低货物运输成本,但同时也会加剧桥梁结构的损伤,降低桥梁的可靠度并提高其维修加固费用。考虑到中国越来越多的桥梁已经进入到需要维修加固的阶段^[9],超载车辆的通行无疑会增加公路桥梁的维修和管理成本。

因此,确定合理的桥梁限载值时需同时考虑其对桥梁结构维修加固费用的影响。

目前,已有学者研究了桥梁维修加固费用的计算方法。孙晓燕等^[10]分析了在车辆荷载等级提高后,不同加固措施对桥梁后续服役期内动态可靠度的影响。胡建林等^[11]基于在役桥梁构件的时变可靠度,优化了不同加固方案下的桥梁使用性能与维修加固收益之间的平衡关系。庞博^[12]建立了预应力混凝土桥梁承载能力动态可靠度模型,考虑环境变化对桥梁加固效果及经济成本的影响,提出了桥梁维修加固策略的优化方法。Yanaka等^[13]考虑钢筋锈蚀引起的预应力混凝土桥梁抗力衰减,基于结构可靠度理论及全寿命周期成本,给出了腐蚀环境下满足桥梁结构耐久性和经济性需求的设计建议。

综合以上研究可知,从时变可靠度出发研究桥梁加固费用已有理论可依。车辆荷载的反复作用会导致桥梁结构可靠度降低,而限载能够改变桥梁的车辆荷载效应并引起桥梁结构可靠度的变化。因此,可通过建立限载值与桥梁结构时变可靠度的联系,进一步探讨车辆限载与桥梁加固费用之间的关系。

本文以公路桥梁占比最大的中小跨径钢筋混凝土简支梁桥为例,首先基于实测车辆动态称重数据生成随机车流,并计算不同轴限值下桥梁的时变可靠度。然后将计算结果与需要对桥梁进行维修加固所对应的临界可靠指标进行对比,当结果低于桥梁加固临界可靠指标时,即对桥梁进行加固,并计算了加固后桥梁剩余使用寿命期内的年均加固费用。最后分析了车辆轴限值对桥梁时变可靠度和剩余使用寿命的影响,并分析了经过3种常见的加固方案处理后,车辆轴限值对桥梁年均加固费用的影响。

1 限载条件下的桥梁时变可靠度

1.1 车辆限载模型

车辆超限通常包含3种情况:几何尺寸超限、轴重超限和总重超限。研究表明,从公路基础设施设计角度出发,对车辆轴重的限制相比对车辆总重的限制更能保障结构安全^[14],因此本文仅考虑对车辆轴重的限制。

车辆动态称重(Weigh-in-Motion, WIM)技术采集的车辆轴重、轴距和车速等数据可用于桥梁累积损伤的估算并为桥梁加固决策提供参考^[15]。采集WIM数据后,不同车型的轴重分配情况可选定具有代表性的车辆模型轴重比和轴距进行描述。当

车辆出现轴重超限时,可采用下列约束模型进行限载处理,即

$$\left. \begin{aligned} W_k^O &= w_1 + w_2 + \dots + w_i + \dots + w_n \\ W_k^N &= (w_1 + w_2 + \dots + w_i + \dots + w_n) X_L / w_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: X_L 为轴重限值; W_k^O, W_k^N 分别为单辆超限车限载前和限载后的总重; $k(k$ 为正整数)为超限车辆序号; $w_\varphi(\varphi=1, 2, \dots, n)$ 为轴数为 n 的车辆各轴重值,其中, $\max w_\varphi = w_i$,且 $w_i > X_L$ 。

为了满足区域内的物流总运输量不受限载影响,交通运输网络中的车货总质量在限载前后需要保持不变,车辆限载后的超限质量由限载标准车运输。每种车型的限载标准车设定如下:其轴重比和轴距与对应车型的车型模型一致,且选定轴限值作为其最重轴的轴重取值,其余轴重根据统计轴重比按比例进行分配。约束模型如下

$$\begin{aligned} \sum W_s &= (\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n) X_L p \\ \sum W_k^O &= \sum W_k^N + \sum W_s \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\alpha_\varphi(\varphi=1, 2, \dots, n)$ 为轴数为 n 的车型的统计轴重比,且 $\max \alpha_\varphi = 1$; $\sum W_s$ 为轴数为 n 的车型所有超限质量累积值; p 为该车型所需限载标准车数量。

1.2 桥梁时变可靠度模型

在外部环境及荷载因素的作用下,桥梁结构在服役期内任意时刻的功能函数为

$$Z(t) = R(t) - S_G - S_Q(t) \quad t \in [t_0, T_s] \quad (3)$$

式中: $R(t), S_Q(t)$ 分别为桥梁结构在 t 时刻的抗力及车辆荷载效应; S_G 为桥梁恒载效应,基本不随时间变化; t_0 为桥梁结构服役开始时刻; T_s 为桥梁继续使用期,取100年。

桥梁结构安全的概率为

$$P_s(t) = P\{Z(t) \geq 0\} \quad (4)$$

式中: $Z(t)$ 为桥梁结构在 t 时刻的功能函数。

桥梁结构的时变可靠指标可表示为

$$\beta(t) = \Phi^{-1}(P_s(t)) \quad (5)$$

式中: Φ^{-1} 为标准正态分布函数的反函数。

桥梁结构的安全性能可用可靠指标进行衡量。桥梁设计时,不同安全等级的桥梁结构目标可靠指标 β_T 可依据《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)选取,如表1所示。借鉴中国《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—2015)规定,当在役结构的可靠指标 β 低于 $0.85\beta_T$ 时,表明结构已经处于严重损坏状态,必须及时采取必要的

表 1 公路桥梁结构的目标可靠指标

Table 1 Target Reliability Index of Highway Bridge

Structural Components			
构件破坏 类型	不同结构安全等级下的目标可靠指标		
	1 级	2 级	3 级
延性破坏	4.7	4.2	3.7
脆性破坏	5.2	4.7	4.2

处理措施,进行加固或拆除重建。故本文选取 $[\beta]=0.85\beta_T$ 为对桥梁进行加固的临界可靠指标。当桥梁结构的可靠指标 β 达到这个临界可靠指标 $[\beta]$ 时,即对桥梁进行加固处理。

1.3 桥梁结构抗力衰减时变统计参数

通常情况下,跨中截面弯矩过大引起的结构失效是中小跨径钢筋混凝土简支梁桥的主要破坏形式^[16]。本文综合考虑混凝土碳化、钢筋锈蚀、钢筋和混凝土之间黏结系数下降等因素对桥梁抗弯承载力衰减的影响,且考虑到统计过程中存在误差传递,为了提高计算结果的准确性,最终确定抗力 M_{su} 统计参数的计算式^[17]为

$$\mu_{M_{su}}(t) = k_s \mu_{f_y(t)} \mu_{A_s(t)} \left[h_0 - \frac{\mu_{f_y(t)} \mu_{A_s(t)}}{2a_1 \mu_{f_{cm}(t)} b} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_{M_{su}}(t) = \left\{ \left[k_s \mu_{A_s(t)} h_0 - \frac{k_s \mu_{f_y(t)} \mu_{A_s(t)}}{a_1 \mu_{f_{cm}(t)} b} \right]^2 \sigma_{f_y(t)}^2 + \left[\frac{k_s \mu_{f_y(t)} \mu_{A_s(t)}}{2a_1 b \mu_{f_{cm}(t)}} \right]^2 \sigma_{f_{cm}(t)}^2 + \left[k_s \mu_{f_y(t)} h_0 - \frac{k_s \mu_{f_y(t)} \mu_{A_s(t)}}{a_1 \mu_{f_{cm}(t)} b} \right]^2 \sigma_{A_s(t)}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: $\mu_{f_y(t)}$ 和 $\sigma_{f_y(t)}$ 分别为桥梁服役到第 t 年钢筋屈服强度的平均值与标准差; $\mu_{A_s(t)}$ 和 $\sigma_{A_s(t)}$ 分别为钢筋截面面积的平均值与标准差; $\mu_{f_{cm}(t)}$ 和 $\sigma_{f_{cm}(t)}$ 分别为混凝土弯曲抗压强度的平均值与标准差; h_0 和 b 分别为截面有效高度和截面宽度; k_s 为钢筋与混凝土之间的黏结系数; a_1 为受压区混凝土矩形应力图所取应力与混凝土抗压强度设计值的比值。

1.4 荷载效应统计参数

依据现有研究,桥梁恒载的荷载效应均值与标准差的表达式^[17]为

$$\mu_{S_G} = 1.014 8 S_G \quad (8)$$

$$\sigma_{S_G} = 0.043 7 S_G \quad (9)$$

车辆荷载作用下产生的桥梁活载效应统计参数可根据其概率密度函数确定。统计所得的车辆荷载效应可简化为平稳二项随机过程,并设其截口分布的时段为 1 年,可得基准期 T 年内,钢筋混凝土桥梁跨中截面在车辆荷载作用下产生的荷载效应最大

值的概率密度函数 $f_{QT}(s)$ ^[18] 为

$$f_{QT}(s) = T f_Q(s) [F_Q(s)]^{T-1} \quad (10)$$

式中: $f_Q(s)$, $F_Q(s)$ 分别表示时段为 1 年的车辆荷载效应最大值的概率密度函数和概率分布函数; s 为桥梁跨中截面在车辆荷载作用下产生的弯矩。

2 桥梁加固费用计算

2.1 桥梁结构的危险率

桥梁结构的危险率 $l(t)$ 表示在 t 时刻桥梁正常使用极限状态的功能函数 $Z(t) > 0$,而在随后一段时间 dt 内功能函数 $Z(t) < 0$ 发生的概率,它能够反映不同时期桥梁结构失效的风险,并用于计算因桥梁结构可靠度不足所引起的加固费用期望值,其表达式如下^[10]

$$l(t) = \frac{1}{1 - p_f(t)} \frac{dp_f(t)}{dt} \quad (11)$$

式中: $p_f(t)$ 为桥梁结构的失效概率。

2.2 桥梁年均加固费用值

桥梁加固费用包含了直接成本(桥梁直接加固费用)和间接成本(剩余使用寿命期内日常养护费用及桥梁失效带来的经济损失等)^[10-11,19]。考虑到对桥梁进行单次加固可以显著延长其使用寿命,且为了便于分析不同加固方案的实际效果,故后续分析以单次加固为准。用剩余使用寿命表示桥梁从初始运营时间或某次加固完成时间到破损严重不能继续使用(即需要加固或再次加固)的时间间隔,桥梁剩余使用寿命期内的年均费用值 C_{ij} 的计算式为

$$C_{ij} = Q_{ij} / t_{ij} \quad (12)$$

式中: t_{ij} 和 Q_{ij} 分别为第 i 种轴限值约束下,采用第 j 种方案加固后的桥梁剩余使用寿命和加固费用值。

Q_{ij} 的表达式^[10]为

$$Q_{ij} = C_{RES} + \sum_{t=t_{si}}^{t_{ij}} \left[\frac{D_s l(t)}{(1+r_t)^{(t-t_{si})}} \right] + \sum_{t=t_{si}}^{t_{ij}} \frac{C_{INS}}{(1+r_t)^{(t-t_{si})}} \quad (13)$$

式中: t_{si} 为第 i 种轴限值下桥梁某次加固完成的时间; r_t 为第 t 年的社会折现率; C_{RES} 为直接加固费用; D_s 为桥梁失效造成的损失; C_{INS} 为桥梁定期检测费用。

根据上述流程,不同轴限值下桥梁的加固费用计算步骤为:①统计分析 WIM 数据并对超限车进行限载处理,拟合限载前后的车货总重分布函数;②基于车货总重分布函数模拟随机车流并计算桥梁时变可靠度;③结合不同加固方案对桥梁时变可靠度

的影响,计算桥梁年均加固费用值。具体流程如图 1 所示。

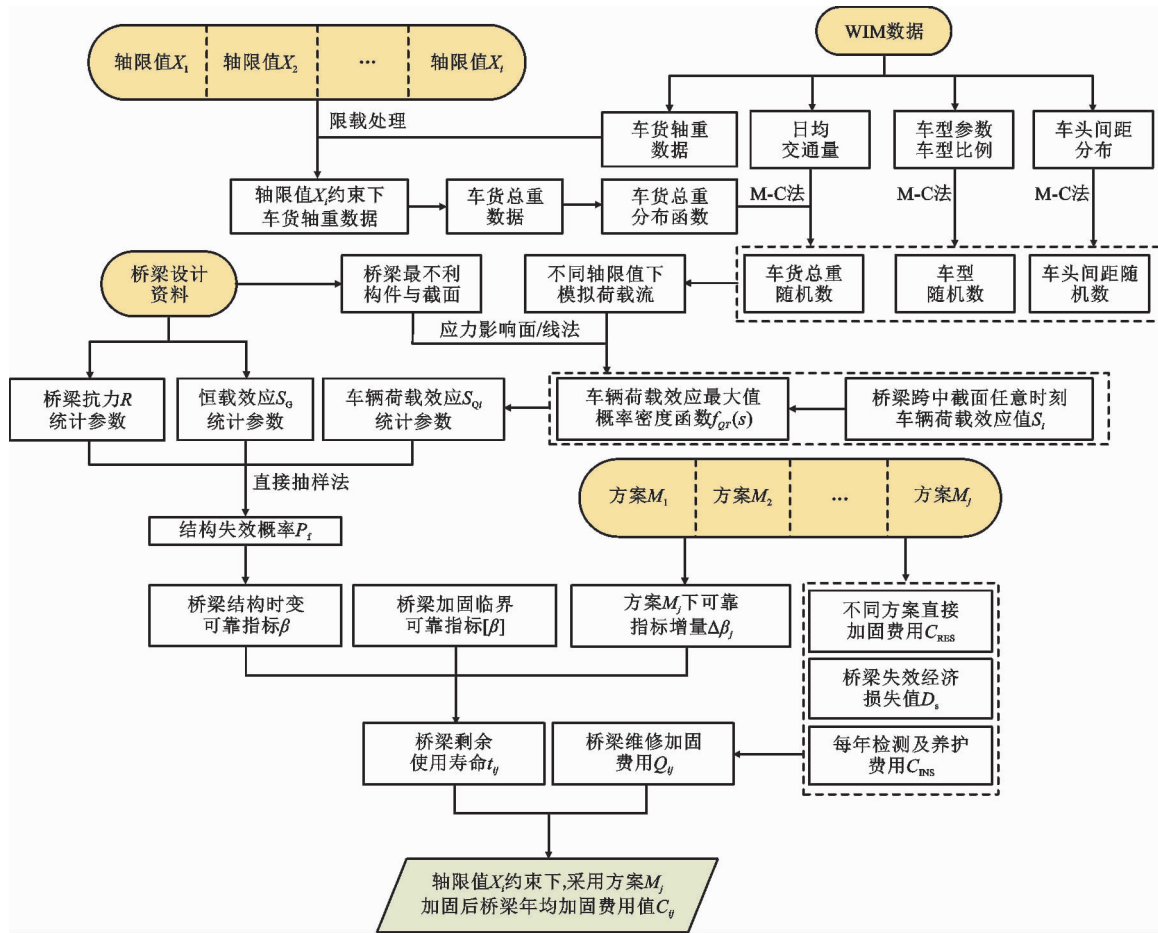


图 1 不同轴限值下桥梁加固费用计算流程

Fig. 1 Calculation Process of Bridge Strengthening Cost Under Different Axle Load Limits

3 实例计算与分析

3.1 车辆荷载模型

根据中国《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589—2016)规定,单轴组车辆非驱动轴的最大限值为 10 t,驱动轴为 11.5 t。本文基于规范轴限值,并考虑其上下水平的影响,选取 8,10,12,14,16,22 t 作为轴限值进行分析。

本文统计了湖南省某高速公路实测 WIM 数据,并做如下处理:①根据轴数将货车车型分为 5 种,并确定每种车型的轴重比;②在运输总重不变的条件下,计算每种车型在不同轴限值下的轴重值;③参考相关研究^[20]确定各类典型车型的轴距;④计算不同轴限值下各车型的数量比;⑤车辆总重及轴重分布采用有限混合函数模型拟合^[6]。由于实测 WIM 数据中获得的最大车辆轴重值为 27.08 t,故不限载的情况设定等同于取轴限值为 28 t 的情况。各车型的车型示意及车数比例结果详见表 2。

3.2 桥梁时变可靠度计算

本文选取某座典型的钢筋混凝土简支 T 梁桥进行分析。桥梁基本设计资料如下^[20]:桥梁标准跨径 20 m,行车道宽度 7 m,主梁采用 C40 混凝土以及 HRB335 钢筋。桥梁的横截面尺寸及配筋如图 2 所示。桥梁设计使用年限为 100 年,设计安全等级为 2 级,且假定桥梁服役 30 年后钢筋出现锈蚀^[21]。

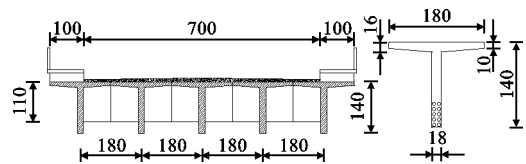


图 2 T 型梁桥横截面尺寸及配筋示意(单位:cm)

Fig. 2 Diagram of Size of T-beam Bridge and Reinforcement of Cross Section (Unit: cm)

根据桥梁设计资料,可得到桥梁恒载效应值,结合式(8)、(9)计算桥梁恒载效应统计参数。根据钢筋锈蚀和混凝土开裂等因素对桥梁结构材料参数

表 2 车型结构及各轴限值下车数占比表

Table 2 Vehicle Structure and Proportion of Vehicles Under Different Axle Load Limits

车型	车型示意(W 为车重, l 为轴距)	车数占比/%						
		8 t	10 t	12 t	14 t	16 t	22 t	不限载
2 轴		61	62	63	63	67	64	64
3 轴		14	14	13	13	14	12	13
4 轴		17	16	16	16	17	16	16
5 轴		1	1	1	1	1	1	1
6 轴		7	7	7	7	1	7	6

表 3 桥梁结构抗力统计参数

Table 3 Statistical Parameters of Resistance of Bridge Structure

服役时间/年	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\mu_{M_{su}}(t)/(kN \cdot m)$	3 073.6	3 073.2	3 072.2	3 071.1	3 070.1	3 069.2	3 044.5	3 042.2	3 038.8	3 034.2
$\sigma_{M_{su}}(t)/(kN \cdot m)$	216.8	216.7	216.6	216.6	216.5	216.5	214.9	214.8	214.7	214.5
服役时间/年	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$\mu_{M_{su}}(t)/(kN \cdot m)$	3 028.2	3 020.3	3 010.1	2 996.9	2 979.6	2 956.7	2 926.3	2 885.4	2 829.7	2 753.2
$\sigma_{M_{su}}(t)/(kN \cdot m)$	214.2	213.8	213.3	212.6	211.6	210.2	208.3	205.7	201.9	196.7

的影响,通过式(6)、(7)计算桥梁抗力的时变统计参数,结果如表 3 所示。

利用受力最不利 T 梁的弯矩影响线进行随机车流加载,得到任意时刻该主梁的车辆荷载效应值^[20],再根据式(10)计算不同基准期 T 内的车辆荷载效应最大值的概率密度函数并计算其统计参数。图 3 给出了不同轴限值下车辆荷载效应均值的时变曲线。由图 3 可以发现,随着桥梁服役时间的增加,车辆荷载效应在早期增长较快,后期趋于平稳。限载对车辆荷载效应的改变具有显著的影响,轴限值越大,车辆荷载效应越大。

本文采用直接抽样法计算不同轴限值下的桥梁结构失效概率和时变可靠指标。根据桥梁设计安全等级选定主梁结构的目标可靠指标 β_T 为 4.2,桥梁加固临界可靠指标 $[\beta]$ 为 3.57。图 4 给出了不同轴限值下,桥梁结构失效概率和可靠指标随时间的变化曲线。

据图 4 可知,当桥梁服役时间达到 5 年时,其可靠指标在轴限值为 8 t 和不限载时分别为 4.8 和

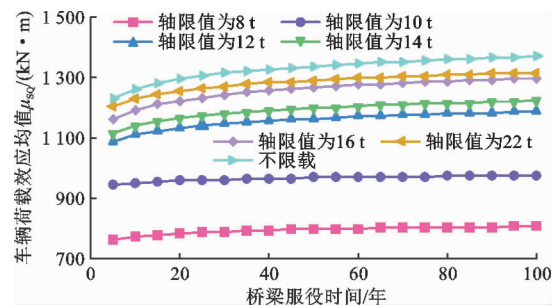


图 3 不同轴限值下的车辆荷载效应均值

Fig. 3 Mean Value of Vehicle Load Effects on Bridge Under Different Axle Load Limits

4.08,说明限载可以有效减缓桥梁结构可靠指标的下降速率。此外,当轴限值为 8 t 和 10 t 时,桥梁结构可靠指标在 100 年的设计使用年限内均满足其正常使用的要求,不需要对桥梁进行大规模的加固处理。当轴限值为 14 t 和 16 t 时,桥梁分别在服役 80 年和 58 年后,其可靠指标达到需要加固的临界值 3.57,桥梁结构的失效概率随时间明显增加,时变可靠指标降低更加显著。

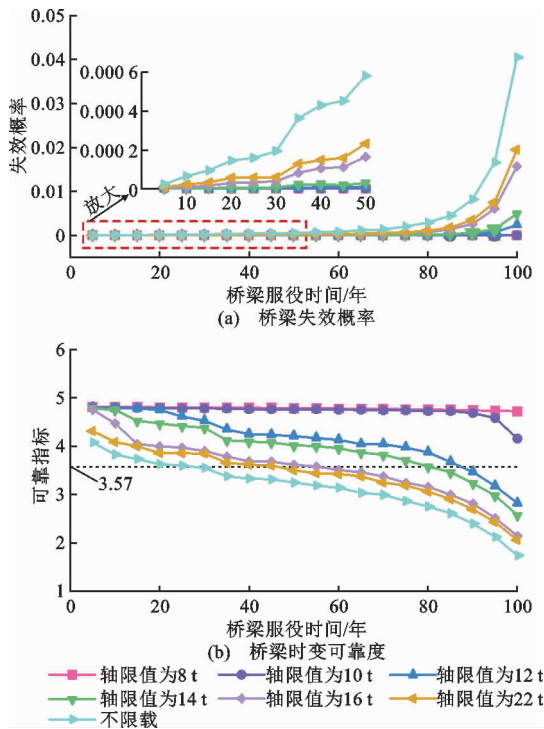


图4 桥梁结构失效概率与可靠指标时变曲线

Fig. 4 Time-varying Curve of Failure Probability and Safety Reliability of Bridge Structure

3.3 桥梁加固费用计算

由于桥梁加固费用的计算较为复杂,不同桥型、跨径的桥梁加固费用均不相同,因此本文参考同类型、同跨径桥梁加固费用的已有研究成果开展计算。

桥梁加固费用的间接成本包括:单座钢筋混凝土简支梁桥每年定期检查以及日常养护费用为4万元^[11];桥梁维修加固期间对当地的经济损失为70万元,社会折现率取定值为8%^[19]。不同方案的加固效果不同,其引起的桥梁结构可靠指标增量以及直接加固费用也不同。本文选取3种常见方案展开分析,内容详见表4^[10-12]。

表4 加固方案介绍

Table 4 Introduction of Strengthening Methods

加固方案	具体措施	可靠指标增量	直接加固费用/万元
化学灌浆法	涂抹环氧树脂等黏结剂修补主梁混凝土表面的裂缝	0.70	97
粘贴钢板法	采用粘贴钢板的方式对桥梁主要受力构件进行加固	0.81	237
换梁法	更换主梁构件	基本恢复到新建水平	594

不同轴限值下,3种加固方案对桥梁剩余使用寿命的影响见图5。

由图5可以看出,3种加固方案均可有效延长

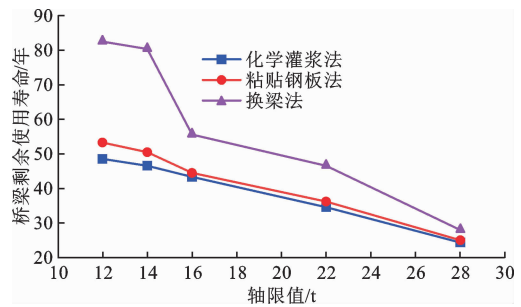


图5 不同加固方案下的桥梁剩余使用寿命

Fig. 5 Remaining Service Life of Bridge After Being Repaired by Different Strengthening Methods

桥梁的剩余使用寿命。由于采用换梁法加固后桥梁几乎相当于新建,因此可以显著延长桥梁剩余使用寿命,化学灌浆法和粘贴钢板法加固效果相近。随着轴限值的不断提高,加固后的桥梁剩余使用寿命不断减短,且3种加固方案所延长的桥梁剩余使用寿命的差值也不断缩小。因此,当轴限值提高后,车辆荷载效应对桥梁结构产生的损伤也随之增大,在桥梁设计使用年限内需要进行多次加固。

图6给出了不同加固方案下,桥梁剩余使用寿命期内的年均加固费用随轴限值的变化趋势,同时对不同轴限值下各加固方案的年均加固费用进行了拟合。

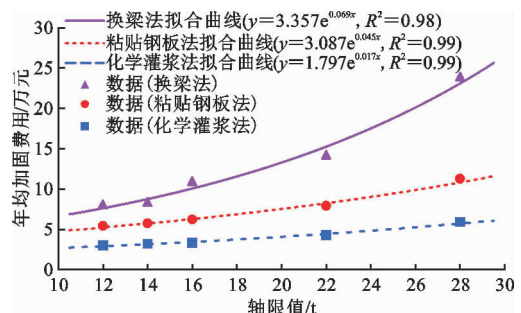


图6 车辆轴限值对桥梁年均加固费用的影响

Fig. 6 Influence of Axle Load Limit on Annual Strengthening Cost of Bridge

图6表明,桥梁剩余使用寿命期内的年均加固费用随轴限值呈指数型变化。当轴限值增大时,桥梁年均加固费用增加趋势明显。综合图5,6可知,当轴限值较小时,上述3种加固方案产生的年均加固费用相差较小,而随着轴限值不断增大,3种加固方案所需的年均加固费用均出现增加,且差别不断增大。值得注意的是,在不限载的情况下,采用换梁法对桥梁进行加固后,桥梁剩余使用寿命相比其他2种方案增大并不明显,而所需的年均加固费用却大幅超出另外2种方案。

综合上述结果,在其他条件不变的情况下,轴限值降低可延长桥梁的使用寿命。当轴限值不超过 10 t 时,桥梁使用寿命可以达到设计使用年限 100 年的要求;当轴限值超过 16 t 时,车辆荷载效应明显增大,在不加固的情况下,桥梁使用寿命将大幅缩短。而从经济性考虑,轴限值增大虽然可以提高运输效率,但相应的年均加固费用也会增加,且轴限值越高,加固费用增长越快。

4 结 语

(1)不同轴限值约束下,桥梁结构时变可靠指标变化显著。轴限值越大,桥梁结构可靠指标随时间下降越快,桥梁使用寿命越短。桥梁年均加固费用随轴限值提高呈指数型增长。轴限值越大,桥梁年均加固费用增加越显著。

(2)对于本文研究的桥梁案例,当车辆轴限值不超过 10 t 时,桥梁结构在设计使用年限内无需进行大规模的加固处理;当轴限值不超过 16 t 时,桥梁结构的年均加固费用随轴限值的增大呈缓慢增长趋势;当轴限值超过 16 t 时,桥梁结构可靠指标下降明显且年均加固费用增速随轴限值的增大不断加快。

(3)综合考虑轴限值对桥梁剩余使用寿命及其年均加固费用的影响,选取合适的加固方案,可以避免不必要的安全储备或投资过高。

(4)本文研究了车辆限载对桥梁可靠度和维修加固费用的影响,但并未考虑其对道路安全及其维护费用以及区域物流运输经济效益的影响。本文的方法和结论可为后续开展综合考虑公路交通基础设施安全和区域综合经济效益的车辆限载研究做铺垫。

参考文献:

References:

- [1] 李松辉. 基于车辆荷载效应截尾分布的桥梁限载分析方法[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 117-124.
LI Song-hui. Analytical Approach for Determining Truck Weight Limits with Truncated Distributions of Live Load Effects on Highway Bridges [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (2): 117-124.
- [2] 邓露,陈雅仙,韩万水,等. 中小跨径公路混凝土简支梁桥冲击系数研究及建议取值[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 69-78.
DENG Lu, CHEN Ya-xian, HAN Wan-shui, et al. Studying Impact Factors for Short-and Medium-span

Simply Supported Concrete Highway Bridges and Its Suggested Values [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (1): 69-78.

- [3] 李松辉,蒋含莞. 不同抗力水平公路桥梁限载分析模型[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 76-83.
LI Song-hui, JIANG Han-wan. Analytical Model for Determining Weight Limits of Highway Bridges with Various Resistance Levels [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (6): 76-83.
- [4] 袁阳光,黄平明,韩万水,等. 基于可靠度理论的中小跨径桥梁卡车载重限值研究[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 161-170.
YUAN Yang-guang, HUANG Ping-ming, HAN Wan-shui, et al. Reliability Based Research on Truck-load Limitation of Medium-small-span Bridges [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (8): 161-170.
- [5] CHA H, LIU B, PRAKASH A, et al. Effect of Local Damage Caused by Overweight Trucks on the Durability of Steel Bridges [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30 (1): 04014183.
- [6] WANG W, DENG L, HE X, et al. Truck Weight Limit for Simply-supported Steel Girder Bridges Based on Bridge Fatigue Reliability [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31 (6): 04018079.
- [7] GHOSN M. Development of Truck Weight Regulations Using Bridge Reliability Model [J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5 (4): 293-303.
- [8] 张宇怡,秦权. 基于可靠度的混凝土桥梁构件最优检测/维修规划[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2001, 41(12): 68-71.
ZHANG Yu-yi, QIN Quan. Reliability-based Concrete Bridge Optimum Inspection and Repairing [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2001, 41 (12): 68-71.
- [9] ZHOU X, ZHANG X. Thoughts on the Development of Bridge Technology in China [J]. Engineering, 2019, 5 (6): 1120-1130.
- [10] 孙晓燕,黄承逵,赵国藩,等. 基于动态可靠度和经济优化相结合的服役桥梁维修加固风险决策[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 5-10.
SUN Xiao-yan, HUANG Cheng-kui, ZHAO Guo-fan, et al. Risk-ranking Decision of Repair and Strengthening of Existing Bridges Based on Time-dependent Reliability and Economic Optimization [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21 (5): 5-10.
- [11] 胡建林,杨小刚,腾起,等. 基于时变可靠度的服役桥梁维修加固经济优化[J]. 公路, 2014, 59(11): 56-

- 61.
- HU Jian-lin, YANG Xiao-gang, TENG Qi, et al. Cost-effectiveness Optimization of Repair and Reinforcement of Bridges in Service Based on Time-dependent Reliability [J]. Highway, 2014, 59 (11): 56-61.
- [12] 庞博. 气候变化背景下PC桥梁生命周期维修加固综合策略优化[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- PANG Bo. Optimization of PC Bridge Life Cycle Comprehensive Maintenance Strategy Considering Climate Change [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [13] YANAKA M, SEYED H G, NOWAK A S. Reliability-based and Life-cycle-cost Oriented Design Recommendations for Prestressed Concrete Bridge Girders [J]. Structural Concrete, 2016, 17 (5): 836-847.
- [14] PAIS J C, FIGUEIRAS H, PEREIRA P, et al. The Pavements Cost Due to Traffic Overloads [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20 (12): 1463-1473.
- [15] NOWAK A S, RAKOCZY P. WIM-based Live Load for Bridges [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17 (3): 568-574.
- [16] 李松辉,蒋含莹. 不同限载等级对公路桥梁安全性的影响规律[J]. 中国公路学报,2016,29(3):82-88.
- LI Song-hui, JIANG Han-wan. Influence Law of Different Weight Limit Levels on Highway Bridge Safety [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29 (3): 82-88.
- [17] 曹永飞. 开裂RC桥梁动态可靠度分析及研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- CAO Yong-fei. Research on Dynamic Reliability of Cracking RC Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [18] 杨晓艳. 公路桥梁车辆荷载及可靠度研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- YANG Xiao-yan. Studies on Vehicle Loads of Highway Bridge and Reliability [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [19] 徐岳,武同乐. 桥梁加固工程生命周期成本横向对比分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(3):30-34.
- XU Yue, WU Tong-le. Comparative Analysis of Life-cycle Cost for Bridges Strengthening [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24 (3): 30-34.
- [20] 邓露,毕涛,何维,等. 基于疲劳寿命的钢筋混凝土桥梁限载取值分析方法[J]. 中国公路学报,2017,30(4):72-78.
- DENG Lu, BI Tao, HE Wei, et al. Vehicle Weight Limit Analysis Method for Reinforced Concrete Bridge Based on Fatigue Life [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (4): 72-78.
- [21] 李杰,陈淮,江莹莹,等. 基于可靠度理论预应力混凝土桥梁使用寿命预测研究[J]. 世界桥梁,2015,43(6):51-57.
- LI Jie, CHEN Huai, JIANG Ying-ying, et al. Study of Service Life Evaluation Based on Probability Theory for Prestressed Concrete Bridge [J]. World Bridges, 2015, 43 (6): 51-57.