

文章编号: 1000-4750(2020)08-0167-12

考虑非平稳因素的混凝土桥梁概率极限状态评估

袁阳光¹, 韩万水², 李光玲², 郭琦¹, 许昕², 孙建鹏¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055; 2. 长安大学公路学院, 陕西, 西安 710064)

摘 要: 为建立混凝土桥梁构件的概率极限状态评估方法, 借助等超概率原则分析我国在役桥梁构件评估周期及评估基准期, 引入个体风险准则、社会风险准则、生命质量指标及成本优化方法确定构件运营阶段目标可靠指标, 分别考虑非平稳及平稳概率模型进行荷载效应及抗力评估值确定, 基于可靠度理论开展运营阶段评估分项系数校准, 并以一座在役桥梁为例进行算例分析。结果发现: 考虑我国在役桥梁运维实际情况, 构件评估周期、评估基准期可分别取为 6 年、10 年; 对于一级、二级、三级延性破坏构件, 评估目标可靠指标分别建议为 3.37、3.13 及 2.85; 采用一般运行状态或密集运行状态下平稳车辆荷载效应模型进行评估时, 评估标准值可分别取为设计汽车荷载效应的 0.705 倍及 0.805 倍, 考虑非平稳车载过程进行评估时, 可在连续非平稳过程离散化的基础上, 引入动态广义极值模型确定评估基准期内荷载效应最大值分布, 并以 0.95 分位值作为评估标准值; 对于重要性等级为一级的延性构件, 恒载效应及抗力评估分项系数分别建议为 1.056 与 1.194, 一般运行状态与密集运行状态汽车荷载效应评估分项系数建议值分别为 1.081 与 1.054, 研究成果可为现行桥梁构件安全评估方法修订提供参考。

关键词: 桥梁工程; 混凝土桥梁; 概率极限状态评估; 两层次安全评估方法; 非平稳因素

中图分类号: U445.7 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0561

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

YUAN Yang-guang¹, HAN Wan-shui², LI Guang-ling², GUO Qi¹, XU Xin², SUN Jian-peng¹

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, College of civil engineering, Xi'an, Shaanxi, 710055, China;

2. Chang'an University, Highway College, Xi'an, Shaanxi, 710064, China)

Abstract: To develop a probabilistic limit state assessment method for concrete bridge components, a probabilistic transformation principle was introduced to analyze the rating period and rating reference period. The individual risk criterion, social risk criterion, life quality index and cost optimization principle were employed to determine the target reliability index in an operation stage. Both non-stationary and stationary probabilistic models were considered to derive the rating values of load effect and resistance. In addition, the reliability theory was adopted to conduct the calibration of partial factors and an existing bridge was used to complete a case study. The results show that the rating period and rating reference period can be taken as 6 years and 10 years, respectively, considering the actual bridge maintenance conditions. For the ductile components with safety level I, II, and III, the target reliability index of safety assessment is suggested as 3.37, 3.13 and 2.85, respectively. When the stationary-probabilistic-vehicle load effect models of a general operating state and an intensive operating state

收稿日期: 2019-09-25; 修改日期: 2020-02-15

基金项目: 国家重点研发计划“综合交通运输与智能交通”重点专项 2019 年度定向项目“港珠澳大桥智能化运维技术集成应用”, 课题二“跨海集群设施服役状态评估及智能维养技术与装备项目(2019YFB1600702)”; 国家自然科学基金面上项目(51878058); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目-青年项目(2020JQ-665); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目-面上项目(2020JM-475)

通讯作者: 孙建鹏(1981—), 男, 山东人, 工学博士, 主要从事桥梁结构振动与稳定研究 (E-mail: sunjianpeng2001@163.com).

作者简介: 袁阳光(1991—), 男, 河南人, 工学博士, 主要从事桥梁结构可靠性评估研究 (E-mail: yuanyg31@163.com);

韩万水(1977—), 男, 河南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事风-车-桥系统研究 (E-mail: hws_freedom@163.com);

李光玲(1987—), 女, 河南人, 博士生, 主要从事大跨结构性能评估研究 (E-mail: ligl0127@163.com);

郭琦(1976—), 男, 陕西人, 副教授, 工学博士, 主要从事旧桥结构性能评估研究 (E-mail: gq8558@126.com);

许昕(1995—), 男, 山东人, 博士生, 主要从事桥梁抗风及结构性能评估研究 (E-mail: xinxbd@163.com).

are employed, the characteristic value of safety assessment can be taken as 0.705 and 0.805 times of design vehicle load effect, respectively. When the non-stationarity of vehicle load process is considered in the safety assessment, the extreme value distribution within a rating reference period can be modeled by a generalized extreme value distribution based on the discretization of continuous stochastic process, and the corresponding 0.95 fractile can be adopted. For the ductile component of safety level I, the partial factors of dead load effect and resistance are proposed as 1.056 and 1.194, respectively, and the partial factors of vehicle load effect corresponding with general operating state and intensive operating state are proposed as 1.081 and 1.054, respectively. The achievements mentioned above can be referenced for the adjustments of the current safety assessment method of existing bridge component specified in the standard.

Key words: bridge engineering; concrete bridges; probabilistic limit state assessment; bi-level safety assessment method; non-stationary factors

公路桥梁结构作为交通线的咽喉节点,其安全性将影响整条交通线的畅通。为确保桥梁结构在服役期内的运营安全性,需要在巡检养护、外观检测的基础上对其进行定期安全性评估,并且当结构状况、材料特性、交通特征等发生明显变化时以及特殊车辆通行时需要桥梁结构进行重新评估^[1]。以可靠度理论为基础的概率极限状态设计理念已逐渐深入至公路桥梁结构设计工作,相比之下,在役桥梁结构运营阶段安全评估实施方法及评估理念相对滞后。我国在过去30年间经历了桥梁基础设施建设高峰期,目前已经进入“建养并重”工作阶段。在役桥梁结构安全性评估方法的合理与否将直接影响到基础设施寿命期运维成本。因此,有必要基于概率极限状态评估理念对在役桥梁结构的安全性评估方法展开深入探究^[2]。

桥梁结构运营阶段的安全性一直以来都是国内外学者的关注点之一,现有研究主要可归纳为三大类。在第一类研究中,国内外研究者联合贝叶斯理论、模糊数学、层次分析法及人工神经网络等对在役桥梁结构的安全性进行评估,例如刘延芳等^[3]将模糊评价理论与层次分析法相结合,建立了梁式桥性能的综合评价方法;胡志坚等^[4]基于模糊神经网络建立了混凝土桥梁状态评估流程;屈兵等^[5]借助基于群决策的改进层次分析法建立了桥梁结构安全评估方法;樊学平等^[6]通过引入动态线性模型构建了在役桥梁结构的承载能力的贝叶斯预测方法;Yu等^[7]在对车辆荷载效应进行极值预测的基础上,借助贝叶斯思想建立了在役桥梁的状态评估方法。该类研究成果在很大程度上丰富了桥梁结构安全评估方法及评估理论。第二类研究立足于评估方法标准化及与设计理念延续性,多以可靠度理论为基本出发点,以

失效概率或可靠度指标对结构的安全性进行评定^[8]。例如Guo等^[9]考虑收缩、徐变及锈蚀等因素,对预应力混凝土箱梁桥的可靠性进行评估;王磊等^[10]以模糊检测数据为基础,对在役钢筋混凝土桥梁进行了动态可靠度评估;Matos等^[11]联合确定性模型及可靠性评估技术建立了评估在役桥梁安全性的方法框架;胡俊亮等^[11]针对目前桥梁结构安全状态评估分级方法主观性较强的问题,以可靠度分析为基础提出了基于可靠度指标的桥梁安全评估分级方法;Wang等^[12]进一步基于结构系统可靠度分析建立了桥梁安全评估方法。上述以可靠度理论为基础所开展的探索实现了对结构安全性及风险的进一步量化。第三类研究以可靠度理论为基础开展分项系数安全评估方法的建立及优化,该评估方法因实施简便性优势业已成为当前各国规范中普遍采用的评估模式,例如美国AASHTO规范LRFR评估方法及我国《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)(下文简称《评定规程》)所给出的评定方法。Bhattacharya等^[13]对评估分项系数的校准方法进行了详细阐述。近期,国内研究者已针对《评定规程》所建议方法的不足开展相关优化研究,侯天宇等^[8]对在役桥梁评估的目标可靠指标取值进行了研究,李文杰等^[14]以及李全旺等^[15]进一步对基于可靠度理论的在役桥梁分项系数安全评估方法进行了探索,上述研究在很大程度上推动了我国桥梁安全评估方法的优化改进。然而,桥梁运营阶段的评估理念、目标可靠指标、评估基准期及评估周期等基本要素有待于进一步深化,且现有第三类研究对结构运营阶段抗力劣化行为的非平稳性以及车辆荷载过程可能存在的非平稳特性尚未进行深入研究。

在此,将以可靠度理论为基础,通过对在役混凝土桥梁构件运营阶段评估周期、评估基准期、评估目标可靠指标的分析确定,构建能够同时考虑平稳车载过程、非平稳车载过程及构件抗力劣化进程非平稳性的概率极限状态评估方法。具体内容如下:首先,对运营阶段桥梁构件的评估理念及方法模式进行讨论;其次,以结构可靠度理论为基础建立两层次安全评估方法;再次,分两种情况阐述基于概率模型的车载效应评估标准值确定方法,即平稳车载过程与非平稳车载过程,构建基于非平稳劣化模型的构件评估抗力标准值取值方法,并以可靠度理论及评估目标可靠指标为基础对荷载效应及抗力评估分项系数进行校准;最后,以一座实桥为例,在现场外观检测的基础上对其一片梁的抗弯性能进行安全评估。

1 运营阶段桥梁构件评估理念与方法模式

在役结构运维阶段安全性评估与新结构的设计工作具有本质上的差异,具体体现在:1)新结构的设计需要保证结构在整个设计使用寿命期内的安全性,而在役结构安全性评估通常仅需要保证结构在未来相对较短养护周期内的安全运营,即时间尺度层面存在设计基准期与评估基准期的差异;2)在结构设计阶段所考虑的诸多不确定性因素可在运营阶段通过观测予以排除或削减;3)在结构设计阶段提升结构承载力所衍生的成本较低,而在结构运营阶段提升相同水平的承载力耗费巨大且可能存在技术上的难点。考虑到上述不同之处,若将结构设计阶段所采用的保守理念沿用至运维阶段,将产生十分巨大的运维成本。因此,欧美现行评估规范中均明确指出:1)在役桥梁结构运营阶段安全性保障不应采用保守评估理念;2)要求在役桥梁与新建桥梁具有相同的安全度水平并不合理,从基准期差异化的角度而言,在役桥梁目标安全度水平略低于新建结构是合理的^[8]。上述建议对于我国桥梁工程实践及安全评估方法的优化同样适用,若结构安全评估方法及相应评估结果过于保守,势必衍生频繁的养护干预措施,从而增加桥梁结构的运维成本。

根据国外及我国结构安全评估规范所采用的评估方法模式,进一步从安全评估方法标准化实

施的要求及与评估规程方法延续性的角度考虑,后续工作将采用基于分项系数模式的安全评估方法。基于工程结构可靠度理论建立在役桥梁构件的两层次安全评估方法,通过两个层次评估工作的逐渐深入与细化,避免过度保守评估情况的出现。

2 基于可靠度理论的两层次安全评估方法

2.1 总体方法流程

两层次安全评估方法中第一层次评估延续现行《评定规程》理念与方法,对桥梁构件进行设计汽车荷载水平下的保守评估,第二层次评估借助工程结构可靠度理论、活载效应概率模型、抗力劣化进程模型进行深入优化,优化对象包括:1)评估周期、评估基准期及评估目标可靠指标;2)活载效应及抗力评估标准值;3)活、恒载效应及抗力分项系数。两个层次安全评估式均为:

$$\eta = \gamma_0 \left[\sum_{i=1}^n \gamma_{G,i} G_{i,k} + \gamma_Q (1 + \mu) Q_k \right] / (g_d R_0 / \gamma_R) \quad (1)$$

式中: η 为承载能力极限状态下的构件安全性指标,借助该指标对构件安全性水平进行量化, $\eta < 1.0$ 时表示构件处于安全运营状态; γ_0 为结构构件重要性系数; $\gamma_{G,i}$ 、 $G_{i,k}$ 为第*i*个永久作用的分项系数以及永久作用效应评估标准值; γ_Q 、 μ 及 Q_k 分别为车辆荷载效应的分项系数、冲击系数以及评估标准值; γ_R 、 g_d 、 R_0 分别表示构件抗力分项系数、抗力劣化系数以及构件的名义抗力值。式(1)根据《评定规程》所给出评估方法变形而来。根据AASHTO规范制定过程中相关研究的建议,常规桥梁运营阶段安全性评估仅需考虑永久作用及汽车荷载,故式(1)中荷载效应组合部分仅考虑了永久作用效应与汽车荷载效应的组合,该评估方法仅适用于常规桥梁结构构件的安全性评估,特殊工况或其他活载效应对安全性起控制作用时,可借助相关理论开展专项评估。

图1给出了所建立的两层次安全评估方法的具体实施流程。由图1,首先对桥梁构件安全性进行第一层次下的保守评估,若评估结果显示 $\eta_1 < 1.0$,则可维持当前养护现状,并可开展特殊重型车辆通行的相关准备工作;若第一层次评估结果显示 $\eta_1 \geq 1.0$,亦不足以说明桥梁构件不满足

运营安全性的要求, 主要由于第一阶段评估工作中采用了较为保守的车辆荷载效应评估标准值以及荷载效应组合方式, 此时进入第二层次安全评估, 在明确评估周期、评估基准期及评估目标可靠指标等关键要素的基础上, 基于可靠度理论进行分项系数优化校准, 并根据评估基准期内的汽车荷载效应最大值分布模型确定相应的评估标准值, 若第二层次评估结果显示 $\eta_{II} < 1.0$, 仍可认为构件能够满足运营安全性的要求, 否则, 应进行现场结构荷载试验评估或采取其他安全性保障措施。

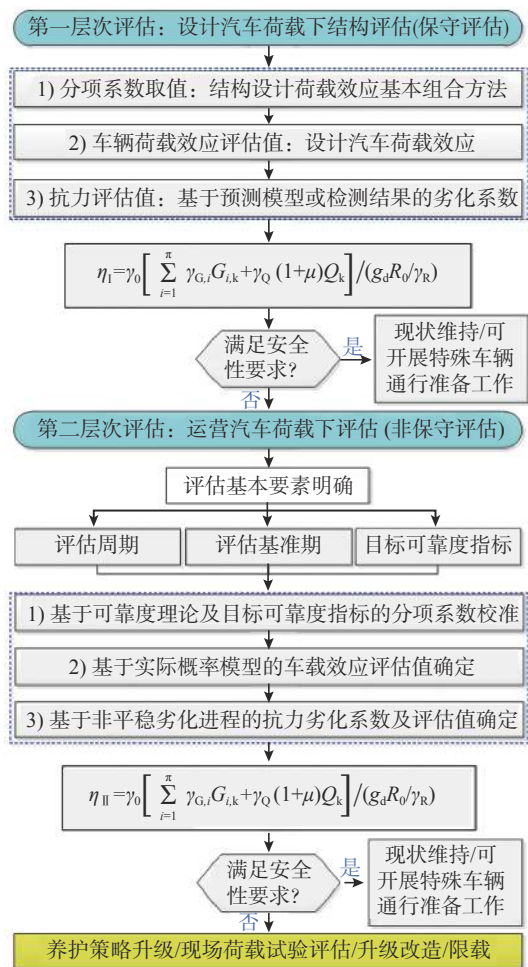


图1 在役桥梁两层次安全评估方法实施流程
Fig. 1 Procedure of the double level safety assessment method of existing bridges

2.2 评估周期与评估基准期

第二层次评估的开展需要首先明确桥梁结构构件的评估周期、评估基准期及评估目标可靠指标。具体分析思路为: 结合我国在役桥梁养护现状确定评估周期, 联合等超概率原则与评估周期确定评估基准期, 基于目标可靠指标与基准期之

间的内在联系以及对不同风险准则的考虑, 确定在役桥梁结构构件安全性评估的目标可靠指标。

《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)中指出, 由于我国交通运输发展迅猛, 结构的适应性评估周期不可间隔太久, 在役桥梁结构的评估周期一般为3年~6年, 此外, 鉴于结构安全评估与外观检测工作需要配合进行且后者的周期最长不得超过3年, 因此, 第二层次评估的评估周期选择为6年。

等超概率原则是在认可结构设计基准期合理性的基础上, 采用类比法确定评估基准期的方法^[16]:

$$\begin{cases} [F_i(x)]^N = [F_i(y)]^M \\ [F_i(x)]^T = [F_i(y)]^{T_A} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_i(x)$ 为随机变量的累积概率密度函数; M 为结构再服役时间, 在评估基准期确定过程中取为评估周期; N 为结构的设计使用期; T 为桥梁结构的设计基准期, 取为100年, 基于式(2), 评估基准期可确定为:

$$T_A = \frac{M}{N} T \quad (3)$$

关于设计使用期 N 的取值, 已有研究中推荐了两种方法: 1) 基于对实桥的调查统计得到; 2) 假定设计使用寿命为100年。第二种方法简便易行, 但容易造成概念上的混淆, 在此采用第一种方法, 根据陈艾荣等^[17]对实际桥梁的调查统计结果, 钢筋混凝土主梁的设计使用期约为60年。代入式(3)得到评估基准期 $T_A = 10$ 年。

2.3 评估目标可靠指标

在役桥梁结构构件安全性评估目标安全度水平的确定主要考虑以下因素的影响: 1) 评估基准期与目标可靠指标的内在关联; 2) 新结构设计目标安全度水平; 3) 不同风险准则对于构件运营期内目标安全水平的要求。

首先, 根据欧洲规范(EN 1990-2002 Eurocode-Basis of structural design)所采用的目标可靠指标分析方法, 任意基准期 t_{ref} 所对应的目标可靠指标 β_{ref} 与年目标可靠指标 β_{1a} 之间的换算关系为:

$$\begin{cases} \beta(t_{ref}) = \Phi^{-1} \{ [\Phi(\beta(1a))]^{t_{ref}} \} \\ \beta(1a) = \Phi^{-1} \{ [\Phi(\beta(t_{ref}))]^{\frac{1}{t_{ref}}} \} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的反函数。

其次, 新结构设计目标可靠水平总体反映了一个国家在基础设施建设工作中能够用于抵御结

构失效风险的经济支付能力,因此,结构设计目标可靠指标是确定服役期内评估目标可靠指标的主要依据之一,比如 AASHTO 规范根据结构设计目标可靠指标确定评估目标可靠指标,二者之间的差值约为 1.0~1.5^[18]。根据我国桥梁工程实际情况,在考虑设计目标可靠指标影响确定评估目标可靠指标时,引入边际救生成本准则下的 ALARP 模式,即考虑结构在运营期内的容许失效概率可较结构设计阶段高出一个数量级。

最后,关于其他风险准则对构件评估目标可靠指标取值的影响方面,根据 ISO 2394—1998 (General principles on reliability for structures) 及 ISO 13822—2010 (Bases for design of structures - Assessment of existing structures) 的建议,主要考虑个体风险准则 (IRC)、社会风险准则 (SRC)、生命质量指标 (LQI) 及经济最优化原则 (COP) 的影响。个体风险准则在目标可靠指标确定过程中侧重于使用者的安全保障,该准则下的结构构件年容许失效概率与使用者死亡的条件概率之间的关系为^[19]:

$$p_{f,1a} \leq 10^{-5} / p_{df} \quad (5)$$

其中, $p_{f,1a}$ 、 p_{df} 分别表示年容许失效概率及使用者死亡的条件概率,对于一级、二级及三级延性破坏构件, p_{df} 可分别取为 0.25、0.025 与 0.0025^[20]。由此确定基于个体风险准则的构件年目标可靠指标为:

$$\begin{cases} \text{一级构件: } p_{f,1a} \leq 4 \times 10^{-5} (\beta \geq 3.944) \\ \text{二级构件: } p_{f,1a} \leq 4 \times 10^{-4} (\beta \geq 3.353) \\ \text{三级构件: } p_{f,1a} \leq 4 \times 10^{-3} (\beta \geq 2.652) \end{cases} \quad (6)$$

若结构失效事件可能导致大量的人员伤亡,政府部门将介入结构运营阶段的风险控制,该准则下 ISO 2394—1998 所建议的结构年容许失效概率为:

$$p_{f,1a} \leq A \cdot N^{-\gamma} \quad (7)$$

其中, A 、 γ 均为常数项,根据 ISO 2394—1998 所提供的取值建议并结合我国实际情况,取 $A=0.01$ 、 $\gamma=2.0$,其中, N 为桥梁结构失效所对应的期望死亡人数,根据 Xu 等^[21]对中国 2000 年—2014 年间桥梁失效事件的伤亡统计, $N=2.324$,由此确定社会风险准则下桥梁结构构件年目标可靠指标为 $\beta \geq 2.9$ 。基于社会风险准则的构件目标可靠指标

根据我国实际桥梁失效统计数据确定,故不再单独确定各级构件所对应的目标可靠指标。

根据已有研究,根据 LQI 及经济最优化原则确定构件评估目标可靠指标时,仅考虑中等安全措施水平及中等失效后果的情况,不再进行分级目标可靠指标确定。根据 ISO 2394—1998 的研究建议,考虑中等安全措施水平 LQI 方法对应的构件年目标可靠指标为 3.7,对于中等失效后果,经济最优化准则下所对应年目标可靠指标为 4.2。

在目标可靠指标确定过程中,不同方法准则具有不同的侧重点,在综合上述分析确定我国在役桥梁构件评估目标可靠指标时,重点考虑评估基准期、设计目标可靠指标及个体风险准则,兼顾社会风险准则、LQI 及经济最优化准则的影响,具体分析结果如图 2(a)~图 2(c) 所示。以评估基准期 10 年所对应的平均水平作为在役桥梁构件评估目标可靠指标建议值,分析结果如图 2(d) 所示。建议对于重要性等级分别为一级、二级、三级的延性桥梁构件,评估目标可靠指标分别为 3.37、3.13 与 2.85。需要指出,当结构或构件评估工作具有特别的指向性或者特定的需求时,亦可通过对比优选确定评估目标可靠指标。

3 基于概率模型的车载效应评估标准值

两层次评估方法第一层次安全评估采用设计汽车荷载效应,车载效应评估标准值可直接按照规定的加载模式予以确定。第二层次评估为运行荷载水平下构件的安全性评估,车载效应评估标准值应根据评估基准期内汽车荷载效应最大值分布予以确定,并以该分布的 0.95 分位值作为评估标准值。已有研究在建立车载效应概率模型时主要基于车载过程的平稳性假定,即不考虑车载效应截口分布随时间的衍变行为。然而,考虑到我国经济增长的迅猛势头以及所采用的相对较短的评估基准期,车载过程在评估周期内的非平稳性不容忽视,截止目前,已有部分学者针对非平稳车载过程极值建模等问题进行了初步探索。在此,分两种情况开展基于概率模型的车载效应评估标准值确定,即平稳车载过程与非平稳车载过程。

3.1 平稳过程下车载效应评估标准值确定

在车辆荷载效应评估标准值确定过程中,以

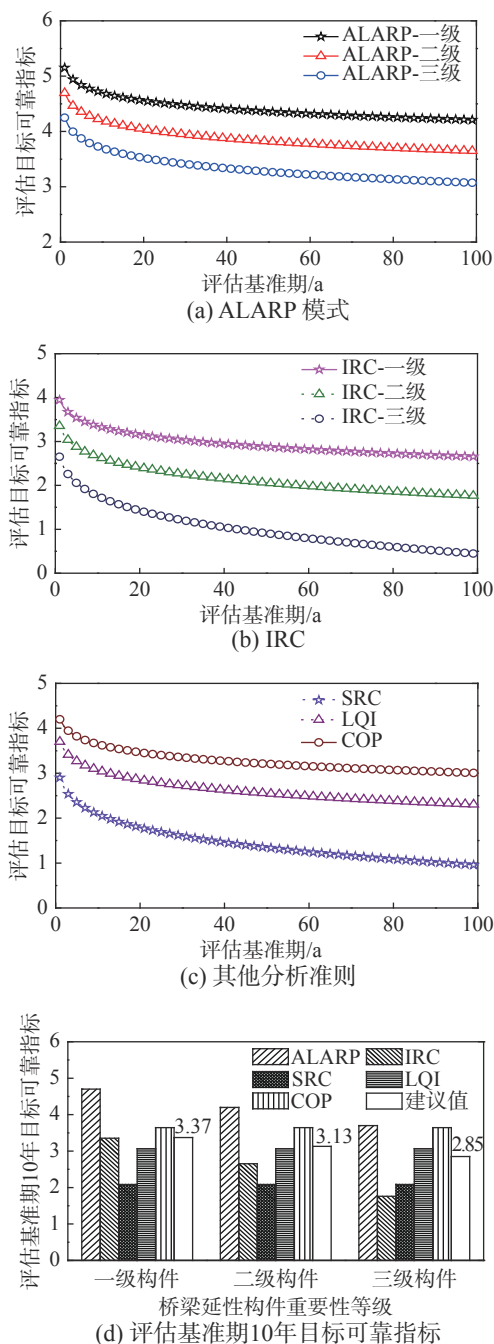


图2 在役桥梁构件评估目标可靠指标

Fig. 2 Target reliability index for the assessment of existing bridge component

1 年为单位时间,对于平稳车辆荷载过程,年最大车辆荷载效应分布 $F_{1a}(x)$ 不随时间发生变化,根据极值理论,任意基准期 t_{ref} 所对应的车辆荷载效应最大值分布可确定为 $[F_{1a}(x)]^{t_{\text{ref}}}$ 。对于区域车辆荷载特性较为显著的情况,应基于实际车辆荷载观测数据对车辆荷载效应概率模型进行分析确定,在作者已开展的一项研究中发现,对于车质量截口分布为多峰长尾形式的情况,年最大车辆荷载效应不拒绝极值-I 型分布^[22]。

在此,为确保研究结论的一般性,采用我国车辆荷载标准值研究过程中所得到的车辆荷载概率模型。李扬海等^[23]通过对国内多个代表路段车辆荷载的调查及加载分析确定了一般运行状态及密集运行状态车辆荷载效应设计基准期最大值分布的概率模型,可由此确定不同运行状态下车辆荷载效应评估基准期最大值分布,二者之间的换算关系为:

$$F_{T_A=10a}(x)=[F_{T=100a}(x)]^{0.1} \quad (8)$$

其中, $F_{T=100a}(x)$ 表示车辆荷载效应设计基准期最大值分布, $F_{T_A=10a}(x)$ 表示车辆荷载效应评估基准期最大值分布。

由于抗剪对结构安全不起控制作用,故着重讨论抗弯性能。以正弯矩效应与设计汽车荷载效应比值为基本变量,设计基准期内一般运行状态与密集运行状态正弯矩效应荷载效应比最大值累积概率密度函数为^[23]:

$$\begin{cases} F_G(x) = \exp\{-\exp[-11.74(x-0.647)]\} \\ F_D(x) = \exp\{-\exp[-18.61(x-0.768)]\} \end{cases} \quad (9)$$

其中,下标 G、D 分别表示一般运行状态与密集运行状态。

尽管式(9)所示车辆荷载效应比值模型源于较早时期的观测分析结果,但该概率模型在当前的桥梁结构分析工作中仍被广泛采用。

根据式(8)~式(9),图3给出了正弯矩效应比的评估基准期最大值分布特性,根据惯例,选择评估基准期最大值分布的0.95分位值作为荷载效应评估标准值。可见,对于一般运行状态,当选择评估基准期为10年时,可采用设计汽车荷载效应的0.705倍作为评估标准值,对于密集运行状态,可采用设计汽车荷载效应的0.805倍。

3.2 非平稳过程下车载效应评估标准值确定

若评估基准期内桥梁结构所在线路的年交通量存在明显的增长行为,则所考虑的车辆荷载过程具有非平稳特性,此时,车辆荷载效应评估标准值的确定应基于对非平稳车载过程的极值建模。评估基准期内非平稳车载过程的极值建模思想为:引入年交通量增长率指标将评估基准期内的非平稳车载过程离散化为多个平稳随机过程序列,在极值理论框架下对单个平稳随机过程进行极值建模,最后根据概率论确定评估基准期内车载效应最大值模型。

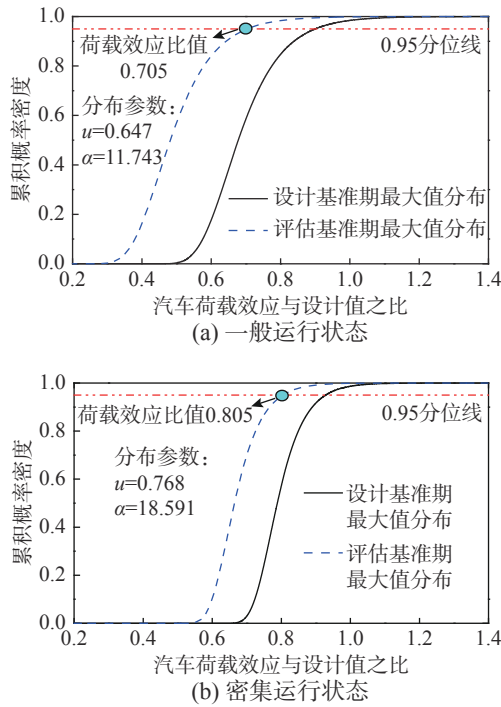


图3 车辆荷载正弯矩效应评估基准期最大值分布

Fig. 3 Extreme Value Distribution of Positive Bending Moment of vehicle load in Rating Reference Period

对于一个评估基准期,以1年为单位时段,不考虑单位时段内部的交通量增长行为,将基准期内的非平稳车载过程离散化为10个平稳荷载过程序列,具体如图4所示。对于单个平稳车载过程,考虑到实际车辆荷载效应分布的复杂性,采用鲁棒性更强的广义极值分布函数对其进行极值建模。广义极值分布累积概率密度函数可表示为:

$$Z_\tau \sim GEV(\mu, \sigma, \xi) = G(x; \theta) = \exp \left\{ - \left[1 - \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]_+^{\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (10)$$

式中: μ 、 σ 、 ξ 分别表示位置参数、尺度参数及形状参数; θ 为参数向量,当形状参数数值趋近于0时对应于极值I型分布,当其数值明显大于0时为极值II型分布,反之为极值III型。

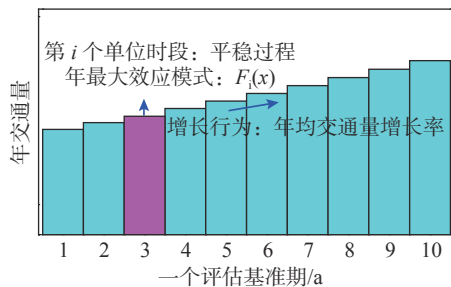


图4 评估基准期内非平稳车载过程离散化处理

Fig. 4 Discretization of non-stationary vehicle load process within a rating reference period

在基于广义极值分布实现单个平稳随机过程极值建模的基础上,根据概率理论,评估基准期车辆荷载效应最大值分布的累积概率密度函数可确定为:

$$F_{T_A=10a}(x) = \prod_{i=1}^{10} F_i(x) \quad (11)$$

式中, $F_i(x)$ 表示评估基准期内第*i*年车辆荷载效应最大值分布,基于式(11)的车辆荷载效应评估标准值确定同图3。

4 基于非平稳劣化进程的抗力评估标准值

受各种不确定性因素的耦合影响,在役混凝土桥梁构件抗力劣化行为本质上属于一种非平稳过程, Li等^[24]在已有研究基础上形成了采用Gamma过程进行非平稳抗力劣化进程模型建立的完整流程, Yuan等^[25]在此基础上进一步引入特定时刻抗力劣化系数评定方法对该劣化模型进行后验更新,提升了抗力劣化数学模型与构件实际劣化特征的匹配性。根据文献[25],基于Gamma过程的构件抗力劣化系数的均值及标准差为:

$$\begin{cases} \mu[G(t_n)] = 1 - k \cdot t_n^{m+1} \cdot \phi \\ \sigma[G(t_n)] = \sqrt{\xi \cdot k \cdot t_n^{m+1} \cdot \phi} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $G(t_n)$ 为评估基准期内第 t_n ($t_n = 1, 2, \dots, 10$)年的构件抗力劣化系数; k 、 m 分别表示Gamma劣化模型的尺度参数与形状参数,算子 $\phi = \sum_{i=1}^{t_n} i^m / t_n^{m+1}$ 。

需要指出,式(12)从全寿命时间尺度对构件抗力劣化过程进行描述,但鉴于在役桥梁构件评估仅需要保证未来一个评估周期内的安全性,而非全寿命周期安全性,故在基于构件抗力非平稳劣化模型进行抗力评估标准值确定时,主要考虑未来一个评估周期的劣化状态。在概率极限状态评估方法建立过程中引入基于Gamma过程的非平稳劣化模型并进行参数后验更新,能够更加直观地辅助抗力评估标准值的确定。抗力评估标准值的确定方法如图5所示,首先,基于式(12)进行构件初始抗弯承载力劣化过程模拟,其次,根据文献[25]所给出的非平稳抗力劣化模型后验更新方法对初始模型进行参数更新,最后,以未来一

个评估周期末端的抗力劣化系数随机变量的统计特性确定评估过程中抗力标准值及其变异性。在具体工程应用过程中, 亦可通过其他代理模型或检测结果推定一个评估周期末端构件抗力劣化系数的均值及标准差信息。

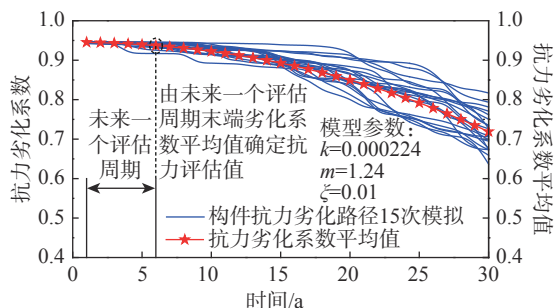


图5 基于非平稳劣化进程的抗力评估标准值

Fig. 5 Rating Value of Resistance Based on Non-stationary Deterioration Process

5 基于可靠度理论的评估分项系数校准

在基于分项系数模式的安全评估方法中, 分项系数取值校准是保证评估结果具有统一的安全度水平的关键。就分项系数校准而言, 新结构的设计与在役结构的评估并无方法层面的本质区别, 不同之处在于, 在役桥梁结构构件的评估将采用与设计阶段不同的评估基准期及评估目标可靠指标, 此外, 在评估阶段所考虑的主要随机变量的变异性可能与设计阶段不同。定义评估分项系数与评估标准值的乘积为评估值。

令 X_1, X_2, \dots, X_n 为结构评估工作中所涉及的主要随机变量, 待评估构件的功能函数写为:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (13)$$

实用表达式为:

$$g(x_{1a}, x_{2a}, \dots, x_{na}) \geq 0 \quad (14)$$

式中, $x_{1a}, x_{2a}, \dots, x_{na}$ 分别为随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 所对应的评估值, 采用随机变量评估标准值对式(14)进行改写, 得到:

$$g(\gamma_{X_1} x_{1k}, \gamma_{X_2} x_{2k}, \dots, \gamma_{X_n} x_{nk}) \geq 0 \quad (15)$$

式中: $\gamma_{X_1}, \gamma_{X_2}, \dots, \gamma_{X_n}$ 分别为随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 在结构构件评估工作中所采用的分项系数; $x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk}$ 为相应的评估标准值, 由工程结构可靠度理论可知, $x_{1a}, x_{2a}, \dots, x_{na}$ 为随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 所对应的验算点值 x_i^* , 则第 i ($i=1, 2, \dots, n$)

个随机变量的评估值为:

$$x_{ia} = x_i^* = F_{X_i}^{-1} [\Phi(\beta_T \alpha_{X_i})] \quad (16)$$

式中: $F_{X_i}^{-1}[\cdot]$ 为第 i 个随机变量概率分布函数的反函数; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; β_T 为构件评估目标可靠指标; α_{X_i} 为 X_i 的一次二阶矩灵敏度系数:

$$\alpha_{X_i} = \cos \theta_{X_i} = - \left[\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{P^*} \cdot \sigma_{X_i} \right] / \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{P^*} \cdot \sigma_{X_i} \right)^2} \quad (17)$$

式中, $\cos \theta_{X_i}$ 为随机变量 X_i 在向量空间中所对应的方向余弦。则构件评估工作中荷载效应与抗力的分项系数为:

$$\begin{cases} \gamma_{X_i} = x_{ia} / x_{ik} = F_{X_i}^{-1} [\Phi(\beta_T \alpha_{X_i})] / x_{ik} \\ \gamma_{X_R} = x_{Rk} / x_{Ra} = x_{Rk} / F_{X_R}^{-1} [\Phi(\beta_T \alpha_{X_R})] \end{cases} \quad (18)$$

对于较为一般的情况, 在混凝土桥梁构件的安全评估中, 考虑汽车荷载效应、恒载效应与抗力三种随机变量分别不拒绝极值-I型分布、正态分布及对数正态分布, 由式(18)可确定三种随机变量评估值一般表达式为:

$$\begin{cases} G_a = \mu_G (1 + \alpha_G \delta_G \beta_T) \\ Q_a = u - \alpha^{-1} \ln [-\ln \Phi(\alpha_Q \beta_T)] \\ R_a = \mu_R \exp(\alpha_R \delta_R \beta_T) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\alpha = \pi / \sqrt{6} \sigma_Q, u = \mu_Q - 0.5772 \alpha^{-1}$; μ_G, μ_Q, μ_R 表示各随机变量的均值; σ_Q 表示汽车荷载效应标准差; δ_G, δ_R 分别表示恒载效应及抗力变异系数; $\alpha_G, \alpha_Q, \alpha_R$ 为各随机变量的一次二阶矩灵敏度系数。需要特别注意, 一次二阶矩灵敏度系数是随着活恒载效应比值的不同而发生变化的, 但为便于应用, ISO 2394—1998 建议将其取为常数, 并建议 $\alpha_G=0.28, \alpha_Q=0.70, \alpha_R=-0.8$ 。进一步根据式(17)~式(19)^[26]:

$$\begin{cases} \gamma_G = \kappa_G (1 + \alpha_G \delta_G \beta_T) \\ \gamma_Q = \kappa_Q \{1 - 0.7797 \delta_Q \{0.5772 + \ln [-\ln \Phi(\alpha_Q \beta_T)]\}\} \\ \gamma_R = 1 / [\kappa_R \exp(\alpha_R \delta_R \beta_T)] \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\kappa_G, \kappa_Q, \kappa_R$ 分别为各随机变量平均值与评估标准值的比值, 对于恒载效应及抗力随机变量, 已有统计分析成果仍具有较好的适用性, 故对于恒载效应取 $\kappa_G=1.0148, \delta_G=0.0431$, 对于受弯构件抗力取 $\kappa_R=1.2262, \delta_R=0.1414$, 而对于车辆荷载效应, 最合理的参数取值方法为根据桥址所在区域的交通荷载分析确定, 若采用 3.1 节车辆

荷载效应模型, 一般运行状态下 $\kappa_Q=0.719$ 、 $\delta_Q=0.157$, 密集运行状态下 $\kappa_Q=0.826$ 、 $\delta_Q=0.086$ ^[23]。

进一步根据式 (20) 及评估目标可靠指标的分析结果, 给出在役桥梁结构构件第二层次安全评估中抗力、汽车荷载效应及恒载效应分项系数分析结果如表 1 所示。

表 1 桥梁构件安全评估分项系数建议值

Table 1 Proposed Partial Factors for the Safety Assessment of Bridge Component

重要性等级	目标可靠指标	抗力	汽车荷载效应		恒载效应
			一般运行状态	密集运行状态	
一级	3.37	1.194	1.081	1.054	1.056
二级	3.13	1.162	1.042	1.029	1.053
三级	2.85	1.126	0.999	1.002	1.050

6 评估实例

6.1 待评估结构信息及现场检测

以一座在役 26 年、安全等级为一级、计算跨径为 30 m 的装配式预应力混凝土简支 T 梁桥 (PCT-30) 为原型桥梁, 对其一片内梁 (3#梁) 的抗弯承载能力进行评估。图 6(a) 给出了 PCT-30 跨中横断面信息, 全桥沿纵向共设置 5 片横隔梁。桥面铺装包括 10 cm 沥青面层与 8 cm 混凝土整体化层。图 6(b) 给出了一片内梁的钢筋布置及主要材料信息。

在开展安全评估工作之前, 于 2017 年对该结构进行现场外观检测, 采集用于 3#梁抗弯承载力劣化模型更新所需的各项物理数据, 具体测试内容包括: 混凝土强度、钢筋锈蚀情况、裂缝分布、混凝土碳化状态等。与此同时, 在桥梁管理部门协助之下, 调取该结构近 3 个检测周期的外观物理数据。

6.2 第一层次安全性评估

借助 ANSYS 14.0 建立 PCT-30 梁格有限元模型, 主梁与横隔梁采用 Beam4 单元模拟, 鉴于 PCT-30 相邻两片 T 梁之间采用现浇混凝土接缝连接, T 梁翼缘留有预埋钢筋以提高接缝连接刚度, 且现场外观检测过程中并未发现混凝土接缝存在影响其连接刚度的明显病害, 因此, 将混凝土接缝处理为主梁翼缘板的一部分, 此外, 混凝土铺装层处理为 T 梁顶板的一部分, 而沥青磨耗层在建模过程中不予考虑。为进一步提升有限元模型

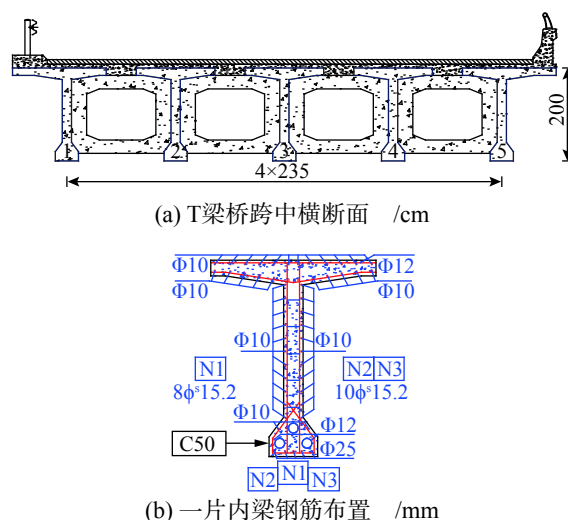


图 6 待评估结构构件断面信息

Fig. 6 Detailed Information of the Cross Section of Target Bridge Component

与实际结构受力特征的匹配性, 根据混凝土抗压强度测试结果对材料参数进行修正, 同时更新抗压强度值及弹性模量^[25]。

根据有限元模型分析结果, 恒载下 3#T 梁跨中正弯矩效应为 3949.9 kN·m, 根据最不利加载原则确定 3#T 梁设计汽车荷载下正弯矩效应为 2864.5 kN·m, 动力放大系数为 1.254, 根据截面钢筋布置信息及相关材料特性确定名义抗力为 $R_0=10738.4$ kN·m, 根据作者已经开展的关于 3#T 梁非平稳抗力劣化模型与后验更新的研究成果, 一个评估周期末端抗力劣化系数平均值为 0.917, 变异系数为 0.1426^[25]。根据上述分析进行第一层次安全评估, 计算得到 3#T 梁抗弯承载力安全指标为 $\eta_1=1.09$ 。尽管第一层次评估结果显示 3#T 梁抗弯承载力安全指标超过 1.0, 但不足以由此直接判定 3#T 梁承载力不足, 需要进一步对其开展第二层次下的安全评估。

6.3 第二层次安全性评估

3#T 梁抗弯承载力第二层次评估考虑三种活载模型: 1) 一般运行状态下评估基准期最大值分布模型; 2) 密集运行状态下评估基准期最大值分布模型; 3) 交通量动态变化情况下的非平稳车载过程在评估基准期内的最大值分布模型。

首先, 根据 3.1 节分析结论, 一般运行状态及密集运行状态下车辆荷载效应评估标准值分别取为设计汽车荷载效应的 0.705 倍及 0.805 倍, 根据表 1 中分项系数校准之后的建议值, 汽车荷载效应评估分项系数分别取为 1.081 与 1.054, 恒载效应及

抗力评估分项系数为采用 1.056、1.194。得到一般运行状态及密集运行状态下 3#梁抗弯承载力安全指标分别为 $\eta_{IG} = 0.921$ 、 $\eta_{ID} = 0.963$ 。

其次,采用待评估结构所在路段的实际交通荷载信息进行移动荷载仿真分析,车质量截口分布及其概率特性分析如图 7 所示,考虑一个评估基准期内年均交通量增长率为 6%,所在路段车辆荷载动态称重数据信息及交通荷载特性已在文献 [22] 详细阐述。具体实施过程中,为获取评估基准期内某一年 3#梁年最大正弯矩效应,在确定概念交通流量的基础上,进行 500 次循环模拟,并借助随机车流-桥梁耦合振动分析系统 (BDANS) 进行加载分析,得到样本量为 500 的年最大正弯矩效应样本,并由此确定该年份所对应的年最大正弯矩效应分布。需要指出,以上实施过程中需要开展海量的车流模拟及加载分析工作,为提升分析效率,仅分析每一次循环模拟中车质量最高的 30 辆卡车所在局部交通流,并取分析结果的最大正弯矩效应。图 8 给出了非平稳车载过程下评估基准期最大正弯矩效应的极值建模分析结果,根据图 8(a)~图 8(b),该车辆荷载模型下 3#梁正弯矩效应评估标准值为 1884.0 kN·m,根据评估基准期最大值概率分布特性校准后的评估分项系数为 1.052。根据以上分析,得到考虑实际车辆荷载特性的 3#T 梁抗弯承载力安全指标为 $\eta_{IA} = 0.899$ 。

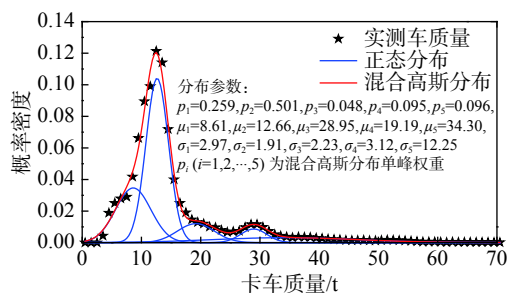
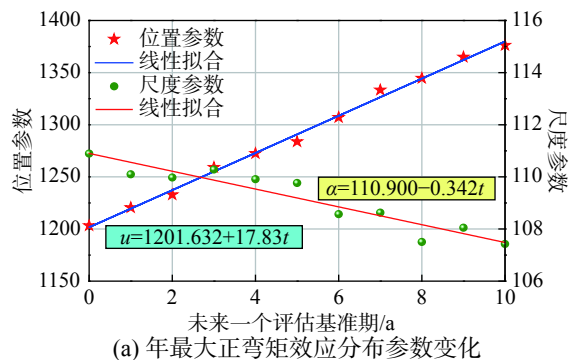


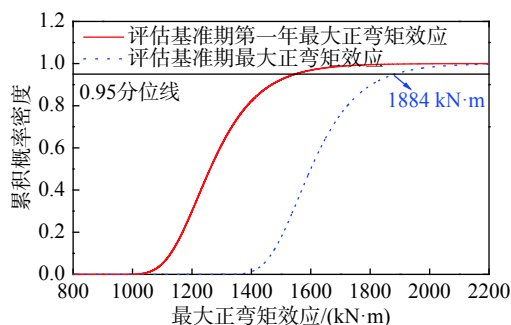
图 7 实测卡车质量分布及概率分布特性

Fig. 7 Measured gross truck weight and probabilistic characteristics

根据以上分析实例可知,在基于车辆荷载实测数据或既有概率模型的基础上,可顺利实现在役桥梁构件概率极限状态评估。根据分析实例中的评估结果,尽管当前状态下 PCT-30 的 3#梁抗弯承载力难以满足设计荷载水平下的运营安全需要,但仍能够满足一个评估基准期所对应运行荷载水平下的承载能力安全性,采用所建立的两层次概率极限状态评估方法,可以降低荷载试验评



(a) 年最大正弯矩效应分布参数变化



(b) 最大正弯矩效应累积概率密度

图 8 非平稳车载过程下最大正弯矩效应极值建模

Fig. 8 Extreme Value Modeling of Bending Moment under Non-stationary Vehicle Load Process

估等工作的开展频率,进而有效缩减桥梁结构寿命期内的运维成本。

7 结论

考虑混凝土桥梁运营阶段的关键非平稳因素,分别探讨构件评估周期、评估基准期、评估目标可靠指标以及荷载抗力评估标准值取值方法,并借助可靠度理论进行评估分项系数校准,建立了概率极限状态评估方法,得到以下主要研究结论:

(1) 建立了在役混凝土桥梁构件的两层次安全评估方法,第一层次沿用现行规范评估方法进行保守评估,第二层次下以可靠度理论为基础,在明确评估周期、评估基准期及评估目标可靠指标的前提下,对荷载效应评估值选取、评估分项系数校准等细节进行优化;

(2) 建议运营阶段构件安全评估周期、评估基准期分别选择为 6 年、10 年,考虑结构设计安全度水平、个体风险准则、社会风险准则、生命质量指标及经济最优化等分析准则,建议重要性等级为一级、二级、三级的延性构件评估目标可靠指标分别选择为 3.37、3.13 及 2.85;

(3) 考虑平稳及非平稳两种车载过程,给出了

第二层次安全评估中汽车荷载效应评估标准值取值方法,对于平稳车载过程的一般运行状态及密集运行状态,车辆荷载效应评估标准值可分别取为设计汽车荷载效应的0.705倍及0.805倍;以构件更新后抗力劣化非平稳模型为基础,明确了两层次评估中抗力评估标准值的取值方法;

(4) 对于重要性等级为一级的延性破坏构件,恒载效应及抗力评估分项系数建议值分别为1.056与1.194,一般运行状态与密集运行状态汽车荷载效应评估分项系数建议值分别为1.081与1.054;以一座预应力混凝土T梁桥为例,对所建立的两层次概率极限状态评估方法的应用进行说明,该方法的建立可为现行规范桥梁构件安全性评估方法的修订提供参考。

参考文献:

- [1] Matos J C, Moreira V N, Valente I B, et al. Probabilistic-based assessment of existing steel-concrete composite bridges-application to Sousa River Bridge [J]. *Engineering Structures*, 2019, 181: 95 — 110.
- [2] 吴子燕, 韩晖, 刘书奎. 基于刚度损伤指数的桥梁整体损伤程度模糊评定研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(12): 92 — 97.
Wu Ziyang, Han Hui, Liu Shukui. Research on fuzzy assessment on the degree of bridge damage using stiffness damage index [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(12): 92 — 97. (in Chinese)
- [3] 刘延芳, 周泳涛, 鲍卫刚. 基于模糊评价理论和层次分析的混凝土梁式桥综合性能评估[J]. *公路交通科技*, 2012, 29(12): 96 — 100.
Liu Yanfang, Zhou Yongtao, Bao Weigang. Comprehensive performance evaluation of concrete beam bridges based on fuzzy evaluation theory and analytic hierarchy process [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 29(12): 96 — 100. (in Chinese)
- [4] 胡志坚, 常英, 乐云祥, 等. 基于模糊神经网络的混凝土桥梁状态评估系统研究[J]. *桥梁建设*, 2009, 1: 19 — 21.
Hu Zhijian, Chang Ying, Yue Yunxiang, et al. Research of a condition state assessment system for concrete bridges based on fuzzy-beural network [J]. *Bridge Construction*, 2009, 1: 19 — 21. (in Chinese)
- [5] 屈兵, 肖汝诚, 仲健, 等. 基于群决策的改进AHP法在桥梁评估中的应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(11): 4204 — 4210.
Qv Bing, Xiao Rucheng, Zhong Jian, et al. Application of improved AHP and group decision theory in bridge assessment [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(11): 4204 — 4210. (in Chinese)
- [6] 樊学平, 吕大刚. 基于DLM的桥梁结构承载力的贝叶斯预测[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(12): 13 — 17.
Fan Xueping, Lv Dagang. Bayesian prediction of structural bearing capacity of aging bridges based on dynamic linear model [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(12): 13 — 17. (in Chinese)
- [7] Yu Y, Cai C S. Prediction of extreme traffic load effects of bridges using Bayesian method and application to bridge condition assessment [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(3): 04019003.
- [8] 侯天宇, 李文杰, 赵君黎, 等. 在役混凝土桥梁安全性评估目标可靠指标研究[J]. *公路*, 2017, 3: 74 — 80.
Hou Tianyu, Li Wenjie, Zhao Junli, et al. Research on target reliability index of safety assessment of existing concrete bridges [J]. *Highway*, 2017, 3: 74 — 80. (in Chinese)
- [9] Guo T, Sause R, Frangopol D M, et al. Time-dependent reliability of PSC box-girder bridge considering creep, shrinkage, and corrosion [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16(1): 29 — 43.
- [10] 王磊, 李林龙, 马亚飞, 等. 模糊检测数据下服役钢筋混凝土桥梁的动态可靠度评估[J]. *防灾减灾工程学报*, 2014, 34(4): 529 — 536.
Wang Lei, Li Linlong, Ma Yafei, et al. Dynamic reliability assessment of existing reinforced concrete bridges based on fuzzy inspection data [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2014, 34(4): 529 — 536. (in Chinese)
- [11] 胡俊亮, 钟继卫, 黄仕平, 等. 基于可靠度指标的桥梁安全评估分级方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(4): 550 — 555.
Hu Junliang, Zhong Jiwei, Huang Shiping, et al. A method for bridge safety assessment based on reliability index [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(4): 550 — 555. (in Chinese)
- [12] Wang N Y, Malley C O, Ellingwood B R, et al. Bridge rating using system reliability assessment. I: Assessment and berification by load testing [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16(6): 854 — 862.
- [13] Bhattacharya B, Li D, Chajes M, et al. Reliability-based load and resistance factor rating using in-service data [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(5): 530 — 543.
- [14] 李文杰, 侯天宇, 赵君黎, 等. 基于可靠度理论的混凝土桥梁安全性评估方法研究[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(4): 87 — 92.
Li Wenjie, Hou Tianyu, Zhao Junli, et al. Study on safety evaluation method for concrete bridges based on reliability theory [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(4): 87 — 92. (in Chinese)
- [15] 李全旺, 李春前, 孙健康. 基于结构可靠性理论的既有桥梁承载能力评估[J]. *工程力学*, 2010, 27(增刊2): 142 — 151.
Li Quanwang, Li Chunqian, Sun Jiankang. Reliability-based capacity assessment of existing bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(Suppl2): 142 — 151. (in Chinese)
- [16] 王晓明, 石雪飞, 阮欣. 基于评估基准期的既有梁桥时变可靠度评估方法[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与*

- 工程版), 2013, 37(4): 671 — 675.
- Wang Xiaoming, Shi Xuefei, Ruan Xin. Time-dependent reliability evaluation method of existing beam bridge based on assessment reference period [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2013, 37(4): 671 — 675. (in Chinese)
- [17] 陈艾荣, 王玉倩, 吴海军, 等. 桥梁结构构件设计使用寿命的确定[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(3): 317 — 322.
- Chen Airong, Wang Yuqian, Wu Haijun, et al. Design service life determination for bridge structural elements [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(3): 317 — 322. (in Chinese)
- [18] Ghosn M, Sivakumar B, Miao F. Development of state-specific load and resistance factor rating method [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(5): 351 — 361.
- [19] Tanner P, Hingorani R. Acceptable risks to persons associated with building structures [J]. *Structural Concrete*, 2015, 16(3): 314 — 322.
- [20] Sykora M, Diamantidis D, Holocky M, et al. Target reliability for existing structures considering economic and societal aspects [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(1): 181 — 194.
- [21] Xu F Y, Zhang M J, Wang L, et al. Recent highway bridge collapses in China: Review and discussion [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(5): 04016030.
- [22] 袁阳光, 郭雷, 裴浩楠, 等. G104国道卡车荷载概率特性分析[J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(11): 1697 — 1705.
- Yuan Yangguang, Guo Lei, Pei Haonan, et al. Truck load probabilistic characteristics of G104 Highway [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(11): 1697 — 1705. (in Chinese)
- [23] 李扬海, 鲍卫刚, 郭修武等. 公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- Li Yanghai, Bao Weigang, Guo Xiuwu, et al. Structural reliability and probabilistic limit state design of highway bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 1997. (in Chinese)
- [24] Li Q W, Wang C, Ellingwood B. Time-dependent reliability of aging structures in the presence of non-stationary loads and degradation [J]. *Structural Safety*, 2015, 52: 132 — 141.
- [25] Yuan Y G, Han W S, Li G L, et al. Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges including non-stationary vehicle load and resistance processes [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109426.
- [26] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- Gong Jinxin, Wei Weiwei. Reliability design principle of engineering structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)

(上接第 133 页)

- [19] 孙其然, 李芮宇, 赵亚运, 等. HJC模型模拟钢筋混凝土侵彻实验的参数研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 248 — 256.
- Sun Qiran, Li Ruiyu, Zhao Yayun, et al. Investigation on parameters of HJC model applied to simulate perforation experiments of reinforce concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 248 — 256. (in Chinese)
- [20] 熊益波, 陈剑杰, 胡永乐, 等. 混凝土 Johnson-Holmquist本构模型关键参数研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(1): 121 — 127.
- Xiong Yibo, Chen Jianjie, Hu Yongle, et al. Study on the key parameters of the Johnson-Holmquist constitutive model for concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(1): 121 — 127. (in Chinese)
- [21] 任根茂, 吴昊, 方秦, 等. 普通混凝土HJC本构模型参数确定[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(18): 9 — 16.
- Ren Genmao, Wu Hao, Fang Qin, et al. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(18): 9 — 16. (in Chinese)
- [22] Li Y, Liang X W, Liu Z J. Behavior of High Performance PVA Fiber Reinforced Cement Composites in Triaxial Compression [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 6(17): 179 — 185.
- [23] 张启灵, 李端有, 李波. 常规面板堆石坝坝前水下防爆距离的确定和影响因素[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(6): 78 — 83.
- Zhang Qiling, Li Duanyou, Li Bo, et al. Underwater explosion protection range of conventional concrete face rockfill dam and its influencing factors [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(6): 78 — 83. (in Chinese)
- [24] 张想柏, 杨秀敏, 陈肇元, 等. 接触爆炸钢筋混凝土板的震塌效应[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, 46(6): 765 — 768.
- Zhang Xiangbai, Yang Xiumin, Chen Zhaoyuan, et al. Explosion spalling of reinforced concrete slabs with contact detonations [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2006, 46(6): 765 — 768. (in Chinese)
- [25] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 47 — 50.
- Wang Lili. Foundation of stress waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 47 — 50. (in Chinese)