

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.041



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



大跨度桥梁钢桥面板跨尺度疲劳损伤评估方法

张宁¹, 余凯², 崔闯¹, 张清华¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 401121)

摘要: 大跨度斜拉桥正交异性钢桥面板的顶板与纵肋焊接构造细节在车辆荷载作用下易产生疲劳损伤进而导致服役性能降低、影响行车安全。为评估大跨度桥梁钢桥面板的疲劳性能, 提出基于细观损伤力学的大跨度钢桥疲劳损伤跨尺度评估方法; 推导了基于细观损伤力学的钢桥面板疲劳损伤演化模型, 在此基础上, 结合实测交通数据, 实现了基于 Monte-Carlo 法的随机车流模拟; 最后, 将提出的方法应用于一座大跨度三塔斜拉桥。研究结果表明, 大跨度斜拉桥钢桥面板体系焊缝周围区域的累积疲劳损伤程度明显高于桥面板体系的其他部位; 顶板与纵肋焊接构造细节的疲劳损伤累积呈现明显的非线性, 预测的疲劳寿命远小于 Miner 线性疲劳损伤累积准则的结果。

关键词: 大跨度桥梁; 钢桥面板; 细观疲劳; 损伤演化; 随机车流; 损伤预测

中图分类号: U448.36 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)03-0161-10

Multiscale fatigue damage assessment method for orthotropic steel deck of long-span bridges

ZHANG Ning¹, YU Kai², CUI Chuang¹, ZHANG Qinghua¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: Orthotropic steel deck (OSD) in a long-span cable-stayed bridge is vulnerable to fatigue damage at the rib-to-deck (RD) joints due to traffic vehicle load. An algorithm for fatigue damage evaluation simulation of long-span bridge based on mesoscale damage model is presented in this paper. Firstly, the fatigue damage evolution model of steel deck based on microscopic damage mechanics is derived. Combined with the measured traffic data, the random traffic flow simulation is realized based on Monte-Carlo method. Finally, it is applied to estimate the damage accumulation of a multi-span cable-stayed bridge. The results indicate that the fatigue

收稿日期: 2021-12-19

基金项目: 国家自然科学基金 (52108176, 51878561, 51978579, 51778533, 51578455); 广东省重点领域研发计划项目 (2019B111106002); 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题 (BHSKL19-06-KF); 四川省科技计划项目 (2021YJ0037)

作者简介: 张宁 (1996-), 男, 主要从事钢结构桥梁研究, E-mail: 953720711@qq.com。

崔闯 (通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: ccui@swjtu.edu.cn。

Received: 2021-12-19

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52108176, 51878561, 51978579, 51778533, 51578455); Research and Development Projects in Key Areas of Guangdong Province (No. 2019B111106002); The Open Key Fund Sponsored Program of State Key Laboratory for Bridge Health and Safety (No. BHSKL19-06-KF); Sichuan Science and Technology Program (No. 2021YJ0037)

Author brief: ZHANG Ning (1996-), main research interest: steel bridge, E-mail: 953720711@qq.com.

CUI Chuang (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: ccui@swjtu.edu.cn.

damage accumulation at the rib-to-deck (RD) joints is greater than other areas of the OSD. The cumulative rate of fatigue damage at the rib-to-deck (RD) joints shows a strong nonlinear trend. The results are also compared with those estimated by the linear Miner's model. The predicted fatigue life is far less than that by the linear Miner's model.

Keywords: large multi-span bridge; steel deck; mesoscale fatigue; damage evolution; stochastic traffic flow; fatigue prediction

正交异性钢桥面板由于其优越的性能被广泛应用于大跨度桥梁。但在车辆局部轮载作用下,钢桥面板的顶板与纵肋焊接细节处疲劳开裂问题突出,严重影响结构服役质量和行车安全。如何准确评估顶板与纵肋(RD)焊接细节疲劳性能是当前桥梁工程研究的热点问题。

学者们根据构造细节类型及焊缝处的局部应力行为特征,基于线性疲劳损伤累积准则,建立多种疲劳性能评估方法^[1-5],包含名义应力法、热点应力法、切口应力法等。上述方法基于半经验的S-N曲线对钢桥面板疲劳性能进行评估,但无法揭示顶板与纵肋焊接细节的疲劳失效机理和疲劳损伤演化。为考虑疲劳损伤累积的非线性,Kachanov^[6]利用连续的损伤变量来描述复杂的材料的性能退化,Chaboche等^[7]发展了基于连续损伤力学的疲劳损伤模型,Xu等^[8-9]开发了基于连续损伤模型的疲劳评估框架。为了描述微孔洞对材料的影响,Gurson^[10]建立了代表微孔洞百分比的损伤变量和韧性损伤本构方程,Gurson发展的表征微孔洞的细观损伤本构模型随后被Tvergaard^[11]进一步拓展。Lemaitre等^[12]和Desmorat等^[13]利用累积塑性应变率描述细观损伤演化规律,提出了连续介质力学框架下的细观尺度损伤模型。

对于钢桥面板而言,其疲劳损伤通常认为起源于晶粒尺度大小的短裂纹,这些发生在微、细观尺度上的局部损伤不断发展累积最终导致宏观尺度上结构整体的失效。为研究跨尺度疲劳损伤,Li等^[14]提出了大跨度钢桥疲劳分析的信息传递多尺度方法,既使用了传统的大尺度整体有限元模型,也使用了小尺度局部有限元模型。Chan等^[15]发现信息传递多尺度方法可以处理简单的线性问题,但无法解决复杂的非线性问题。Li等^[16]提出了土木结构的并行式多尺度有限元模型,但是该模型不能考虑短裂纹成核和扩展。Sun等^[17-18]提出了一种从微观短裂纹成核和扩展到宏观构件损伤直至整体结构失效的并行多尺度疲劳损伤演化模拟方法。对于钢桥而言,疲劳损伤始自局部的应力集中和内部的细观缺陷,在外部循环荷载作用下的损伤累积最终导致结构失效。笔者拟基于细观损伤力学,提出适用于大跨

度桥梁钢桥面板的疲劳损伤演化和评估模型。

在提出疲劳损伤演化模型的基础上,为实现对大跨度钢桥面板疲劳性能的评估,需确定交通荷载。邓扬等^[19-20]、王莹等^[21]、郑蕊等^[22]、Li等^[23]、Kiaee等^[24]、Macdougall等^[25]基于动态称重系统的交通荷载监测数据,研究了随机荷载对于构造细节疲劳寿命的影响,包括车辆总重及轴重特征、车辆几何特征、车流比例分配特性、车辆的空间位置分布特性等。在此基础上采用统计学方法得到主要车辆参数的概率模型^[26-27]。以上述基本参量为随机变量,通过Monte-Carlo随机抽样可模拟得到随机车流和荷载谱,进而可基于此荷载谱进行疲劳损伤评估^[28-29]。

笔者以某大跨度斜拉桥钢桥面板为例,建立大跨度钢桥跨尺度物理模型,在此基础上,采用基于细观损伤力学的疲劳演化模型和建立的随机荷载,对钢桥面板的顶板与纵肋焊接构造细节疲劳损伤进行评估。

1 疲劳损伤演化方程

从材料的细观结构出发,通过细观结构变化的物理和损伤过程,采用体积平均化的方法和Eshelby-Kröner准则,考虑细观尺度下材料塑性与损伤方程的耦合作用^[13],建立跨尺度疲劳损伤演化模型,从细观分析整体结构的宏观损伤。

1.1 跨尺度损伤演化模型

根据连续损伤力学(CDM)理论^[30],材料损伤时伴随着能量的释放

$$W_e = e_{ij}^e \cdot s_{ij} + 3\epsilon_m \sigma_m \quad (1)$$

式中: W_e 为弹性应变能; e_{ij}^e 为弹性应变张量; s_{ij} 为应力偏张量; σ_m 和 ϵ_m 分别为静水压力和静水应变。基于热力学定律可以得到损伤增长时的应变能释放率表达式为

$$Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2 \cdot E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3} (1+\nu) + 3(1-\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Lemaitre损伤演化理论认为耗散势 f^* 仅依赖于应变能释放率 Y 、累积塑性应变率 $\dot{\epsilon}$ 和时间,且假设

为 Y 的二次函数和 \dot{p} 的一次函数,由此得到损伤演化方程

$$\dot{D} = \left(\frac{Y}{S_0} \right)^{s_0} \dot{p} \quad (3)$$

式中: S_0 和 s_0 为材料参数; \dot{p} 为累积塑性应变率。

在局部轮载作用下,钢桥面板的顶板与纵肋焊接构造细节在细观尺度上的代表性体积单元 (RVE) 呈现出弹塑性状态,结合弹塑性本构方程确定损伤演化过程。施加载荷应力大于材料的渐进疲劳极限 σ_f^∞ 时产生损伤。当施加荷载大于渐进疲劳极限 σ_f^∞ 且小于屈服应力 σ_y 时,宏观上不产生塑性应变,而细观尺度的屈服应力 $\sigma_y^\mu = \sigma_f^\infty$,如图 1 所示。

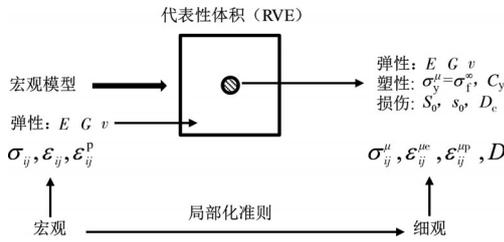


图 1 代表性体积单元与细观单元示意图

Fig. 1 Meso-element embedded in an elastic representative volume element (RVE)

宏观尺度和细观尺度间的转化准则采用 Eshelby-Kröner 准则^[31-33]

$$\epsilon_{ij}^\mu = \epsilon_{ij} + b(\epsilon_{ij}^{\mu p} - \epsilon_{ij}^p) \quad (4)$$

式中: μ 为细观尺度变量; 参数 b 可由式(5)计算。

$$b = \frac{2 \times (4 - 5\nu)}{15 \times (1 - \nu)} \quad (5)$$

式中: ν 为材料泊松比,考虑材料的损伤可进一步写为

$$\epsilon^\mu = \frac{1}{1 - bD} \left\{ \epsilon + \frac{(a - b)D}{3(1 - aD)} \epsilon_{kk} + b[(1 - D)\epsilon^{\mu p} - \epsilon^p] \right\} \quad (6)$$

大部分金属材料的临界损伤值 D_c 为 0.2~0.5,故式(6)可以简化为

$$\tilde{\sigma}^\mu = \frac{\sigma^\mu}{1 - D} \approx \sigma - 2G(1 - b)\epsilon^{\mu p} \quad (7)$$

考虑材料强化影响,屈服条件采用线性随动强化模型 $f^\mu = (\tilde{\sigma}^\mu - X^\mu)_{\text{eq}} - \sigma_f^\infty = |\sigma_\Sigma - X_\Sigma^\mu| - \sigma_f^\infty$ 。线性随动强化可写为 $\dot{X}_\Sigma = C_y(1 - D)\dot{\epsilon}_{p\Sigma}$,可以得到 $\dot{\sigma}_\Sigma^\mu = C_y(1 - D)\dot{\epsilon}_{p\Sigma}$, (一般情况下 $C_y \ll G$), 而 $\epsilon_{p\Sigma}^\mu$ 与细观尺度应力变化率线性相关,所以

$$\dot{\epsilon}_{p\Sigma}^\mu = \frac{\dot{\sigma}_\Sigma}{\eta}, \eta = 3G(1 - b) + C_y(1 - D) \approx 3G(1 - b) \quad (8)$$

式中: 符号 Σ 是归一化的常数张量, $\Sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{3}{2} \Sigma_{ij}^D \Sigma_{ij}^D} = 1$; σ_Σ 是 Mises 等效应力。故一个应力循环内的塑性应变增量表示为

$$\frac{\delta p^\mu}{\delta N} = \frac{2 \cdot (\Delta \sigma_\Sigma - 2\sigma_f^\infty)}{\eta}, \Delta \sigma_\Sigma > 2\sigma_f^\infty \quad (9)$$

在钢桥面板的焊接接头处,由于焊接初始缺陷的存在,疲劳寿命阶段可能会跨越微裂纹萌生阶段直接进入裂纹扩展阶段。然而,随着现代自动焊技术的发展,焊接缺陷的数量在大幅下降。为考虑跨尺度损伤模型的完整性,钢桥面板承受车辆荷载导致的疲劳损伤主要由两部分组成:裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命。所以细观疲劳寿命可认为主要由两部分组成:材料储能达到能量损伤门槛值所经历的循环数 N_0 ,即微裂纹萌生阶段;损伤发生直至达到临界值 D_c 所经历的循环数 N_D ,即微裂纹形成阶段。因此,材料的总寿命 N 为

$$N = N_0 + N_D \quad (10)$$

当细观塑性应变达到损伤临界值 p_D 时,损伤开始。根据式(9),考虑材料的线性随动强化,则循环的塑性应变增量可以写成

$$\Delta \epsilon_{p\Sigma}^\mu = \frac{1}{2} \frac{\delta p^\mu}{\delta N} = \frac{\Delta \sigma - 2\sigma_f^\infty}{\eta} = \frac{\Delta \sigma_\Sigma^\mu - 2\sigma_f^\infty}{C_y(1 - D)} \quad (11)$$

在周期荷载下,当 $N < N_0$ 时认为没有损伤产生

$$N_0 = \frac{p_D}{2|\Delta \epsilon_{p\Sigma}^\mu|}, p_D = \epsilon_{pD} \left(\frac{\eta}{C_y} \right)^m \left(\frac{\sigma_u - \sigma_f^\infty}{\Delta \sigma / 2 - \sigma_f^\infty} \right)^m$$

$$N_0 = \frac{1}{4} \epsilon_{pD} \frac{\eta^{m+1}}{C_y^m} \frac{(\sigma_u - \sigma_f^\infty)^m}{(\Delta \sigma / 2 - \sigma_f^\infty)^{m+1}} \quad (12)$$

根据式(3)在微观尺度下的表达形式,循环荷载作用下的损伤增量可写为

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \int \dot{D} dt = \left[\frac{(\Delta \sigma_\Sigma^\mu / 2)^2}{2ES_0(1 - D)^2} \right]^{s_0} 2\Delta \epsilon_{p\Sigma}^\mu \quad (13)$$

对式(13)进行积分,积分的下限为 0,上限为损伤临界值 D_c ,则微裂纹形成阶段的寿命 N_D 可表示为

$$N_D = \frac{1 - (1 - D_c)^{2s_0+1}}{2(2s_0 + 1)\Delta \epsilon_{p\Sigma}^\mu} \left[\frac{2ES_0}{(\Delta \sigma_\Sigma^\mu / 2)^2} \right]^{s_0} \quad (14)$$

根据式(12)和式(14),结构的总寿命为

$$N = \frac{1}{4} \epsilon_{pD} \frac{\eta^{m+1}}{C_y^m} \frac{(\sigma_u - \sigma_f^\infty)^m}{(\Delta \sigma / 2 - \sigma_f^\infty)^{m+1}} + \frac{1 - (1 - D_c)^{2s_0+1}}{2(2s_0 + 1)D_c \Delta \epsilon_{p\Sigma}^\mu} \left(\frac{\sigma_u}{\Delta \sigma_\Sigma^\mu / 2} \right)^{2s_0} (\epsilon_{pR} - \epsilon_{pD})$$

式中: σ_u 为极限拉伸应力; ϵ_{pD} 为塑性应变阈值; ϵ_{pR} 为

静拉伸断裂时颈缩处局部累积塑性应变。考虑到大多数金属材料真实的微观缺陷在受压时不会完全闭合,因而需对受压情况下的有效应力进行修正。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - hD} \quad (16)$$

此时,循环荷载作用下的损伤变量为

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \int \dot{D} dt = \left[\frac{(\Delta\sigma_{\Sigma}^n/2)^2}{2ES_0(1-D)^2} \right]^{s_0} \Delta\epsilon_p^n + \left[h \frac{(\Delta\sigma_{\Sigma}^n/2)^2}{2ES_0(1-D)^2} \right]^{s_0} \Delta\epsilon_p^n \quad (17)$$

假设初始损伤 $D(0) = 0$, 利用迭代法求解式(17)偏微分方程即可得到疲劳损伤值。

1.2 模型参数的试验确定

细观损伤模型中相关参数:1)弹性参数通过单向拉伸试验获得,包括 E 、 ν 、 σ_y 、 C_y ;2) σ_i^∞ 为 S-N 曲线在疲劳极限循环次数下的渐近线,而与材料损伤的相关参数 S_0 和 s_0 可通过 S-N 曲线回归分析获得;3)对于钢桥面板焊接部位而言,忽略损伤和弹塑性本构方程的耦合,疲劳损伤临界值则取 $D_c = 1.0$ [34-35]。

采用如图 2 所示的 S-N 曲线进行数据拟合, S-N 曲线数据参考文献[36]中的疲劳实验。在 S-N 曲线上均匀选取若干个点,得到互相对应的应力幅值 S 和寿命 n 的数值点。由式(15)可知, N 是参数 m 和 s_0 的函数,通过调节参数 m 和 s_0 使得各选取应力幅对应的计算寿命 N 尽量接近实际寿命 n 。根据最佳平方逼近原则,通过式(18)可得到 m 和 s_0 的最佳取值。确定损伤参数后,利用式(15)计算不同应力幅下的疲劳寿命,计算点基本落在 S-N 曲线 3 个标准差的窄带范围内。最后,确定跨尺度损伤演化模型中参数如表 1 所示。

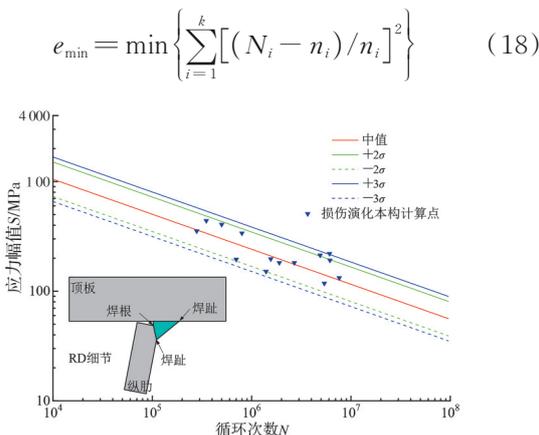


图 2 顶板与纵肋焊接构造细节 S-N 曲线图
Fig. 2 The S-N curve of deck-to-rib welded joint

表 1 跨尺度损伤演化模型参数

Table 1 Model parameters of multiscale damage evolution

E/ GPa	ν	C_y / MPa	σ_i^∞ / MPa	h	D_c	S_0	s_0	m
206	0.3	1740	69	0.2	1.0	0.4	4.5	1.18

2 基于实测数据的疲劳损伤评估

2.1 基于监测数据的疲劳损伤评估方法

基于跨尺度疲劳损伤演化方法,结合交通荷载实际监测数据,可实现大跨度桥梁的正交异性钢桥面板体系疲劳损伤评估:1)首先根据实际监测的车辆荷载数据,采用统计学方法确定交通荷载各关键参数的随机特征,在此基础上结合 Monte-Carlo 法对随机交通荷载进行模拟;2)根据大跨度桥梁受力特性和疲劳损伤特性,建立大跨度桥梁钢桥面板体系跨尺度模型,根据所确定的影响面,计算模拟交通荷载下的应力历程,然后采用雨流计数法确定待研究时间范围内的等效力历程,结合疲劳损伤演化方程对钢桥面板关注构造细节进行损伤评估,具体评估流程如图 3 所示。

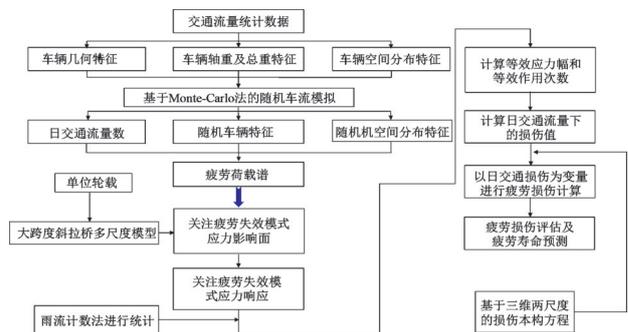


图 3 钢桥面板结构体系疲劳损伤评估流程图

Fig. 3 Flow chart of fatigue damage evaluation for structural system of OSD

2.2 基于实测数据的交通荷载模拟

在车辆轮载作用下,钢桥面板的顶板与纵肋焊接细节处疲劳开裂问题频发,典型移动荷载作用下大跨度斜拉桥疲劳损伤示意如图 4 所示。

为准确评估大跨度钢桥在实际交通荷载作用下重要构造细节的疲劳寿命,需要准确确定桥梁承载的交通荷载模型。基于预测交通量信息并通过已有交通流特征研究成果 [37-39],得到日交通流量、车型、车重及轴重、车辆空间位置等关键随机参数的分布特征。以车辆轴数、用途和载重量等指标为标准,在统计意义上将近似车辆进行归类并结合相关文献 [37-39] 及疲劳荷载规范确定如表 2 所示的 7 类代表车型及轴重比例。其中,各车型的总重是影响大跨度钢桥构造细节疲劳损伤的关键参数,研究发现

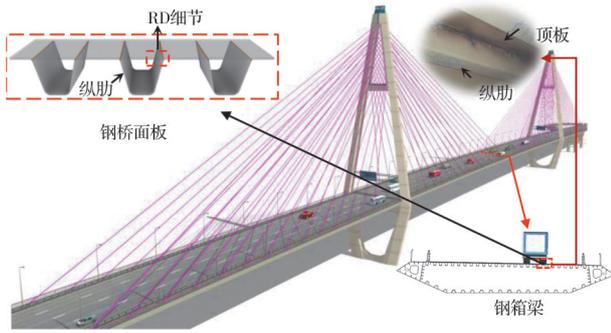


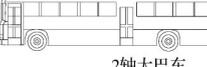
图 4 车辆荷载导致大跨度斜拉桥疲劳损伤示意图

Fig. 4 Sketch of fatigue damage caused by moving vehicle in cable-stayed bridge

各类车型总重分布均非以往情况下的正态分布,而是呈现不太规则的多峰分布形态^[23-25]。因此,可采用由多个正态分布叠加得到的高斯函数来拟合不同车型车重分布曲线

表 2 典型代表车型几何特征及轴重分配比例

Table 2 Typical fatigue load models and ratio of axle load distribution

车型	车辆信息(轴距单位:m)	
A	 2轴大货车	0.40 0.60 4.7
B	 3轴大货车	0.26 0.26 0.48 4.8 1.3
C	 4轴大货车	0.19 0.21 0.29 0.31 3.8 8.6 1.3
D	 5轴大货车	0.16 0.27 0.20 0.18 0.19 3.3 1.3 6.3 1.3
E	 ≥6轴大货车	0.11 0.14 0.20 0.19 0.18 0.18 3.3 1.3 7.3 1.3 1.3
F	 2轴小客车	0.54 0.46 2.6
G	 2轴大巴车	0.35 0.65 6.0

$$f(x) = \sum a_i e^{-[(x-b_i)/c_i]^2} \quad (19)$$

其中: a_i 、 b_i 、 c_i 为分布函数的待定系数,各类车型的具体参数取值参照Cui等^[26-29]的研究成果。

此外,由钢桥面板局部受力特性所决定,车辆

横向位置对钢桥面板应力响应敏感,横向位置分布参照Eurocode 3^[40]和《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD64—2015)中的车辆沿车道横向正态分布模型。根据动态称重系统的实测车辆信息^[26-28],采用正态分布函数拟合其概率密度分布,得到关注车道日均交通流量分布呈现正态分布($\mu=17\ 294$; $\sigma=1\ 607$)^[37]。

通过对大量实测车辆荷载样本的统计分析,可获得反映实际交通车流的车辆荷载模型。以上述基本参量为随机变量,通过Monte-Carlo法抽样可模拟得到随机车流和荷载谱,进而可进行基于实测车流的疲劳损伤评估。为验证所建立的随机交通荷载模型的准确性,选取车流量车型占比数据为指标参数进行验证。图5显示了采用Monte-Carlo模拟(MCS)生成3万个空间样本数据,车型占比模拟值和实测值的对比结果。验证结果表明,实测样本数据与Monte-Carlo模拟结果相对误差较小,所选取的随机车辆荷载模型准确性较高,能反映实际交通荷载的特性,可为大跨度桥梁钢桥面板疲劳损伤评估提供可靠的数据支撑。

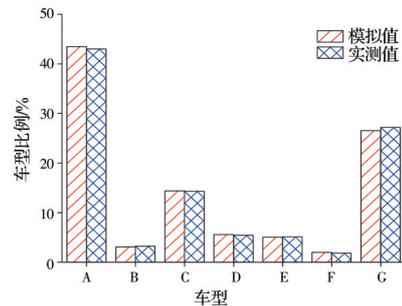


图 5 实测荷载统计与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of actual traffic flow and simulation result

2.3 疲劳损伤累积

在车辆荷载作用下,斜拉桥结构承受变幅荷载,计算累积疲劳损伤需要计算每个应力循环产生的累积损伤。根据疲劳规范的S-N曲线^[41],利用有效应力幅 σ_{re} 表示每日随机交通荷载循环下的等效应力幅,则第k日的有效应力幅为^[8]

$$\sigma_{re,k} = \left[\frac{1}{N_{r,k}} \left(\sum_{i=1}^{N_1} n_i \sigma_{r,i}^q + \frac{1}{\sigma_{r,0}^2} \sum_{i=1}^{N_2} n_i \sigma_{r,i}^{q+2} \right) \right]^{1/q} \quad (20)$$

式中: n_i 为应力幅 $\sigma_{r,i}$ 的作用次数,其值可由雨流计数法从第k日的应力时程中确定; N_1 和 N_2 分别为应力幅大于和小于 $\sigma_{r,0}$ 的循环次数,其中 $\sigma_{r,0}$ 为疲劳极限,可根据BS5400确定^[41]; $N_{r,k}$ 为第k日的应力循环总数; q 是S-N曲线斜率的负倒数,根据疲劳设计规范的两阶段S-N关系曲线确定,取 $q=3.0$ 。利用式(20)可计算日交通量的等效应力幅,利用损伤本构模型和雨流计数法统计的等效作用次数即可计

算每天的损伤量,最后将每天的损伤量代入式(21)即可计算出第 k 日的累积损伤。

$$D(k)=[M]^{s_0} \Delta \epsilon_p'' + [hM]^{s_0} \Delta \epsilon_p'' \quad (21)$$

式中:

$$M = \frac{(\Delta \sigma_s''/2)^2}{2ES_0[1-D(k-1)]^2} \quad (22)$$

3 跨尺度疲劳损伤评估实例

以一座大跨度三塔斜拉桥为研究对象,建立大跨度桥梁跨尺度模型,对其钢桥面板疲劳损伤进行评估,桥梁立面和断面如图6所示。三塔斜拉桥全长2 200 m,主跨720 m。主梁为分体式钢箱梁,梁段的两箱由正交异性钢桥面板制造而成,双箱通过

横向连接箱连接。桥塔采用独柱式桥塔,高度约为260 m,采用桩基础。根据三塔斜拉桥的设计参数,建立的多尺度有限元模型如图7所示。主梁的双箱采用正交异性钢桥面板,其中顶板厚度为18 mm,U肋厚度为8 mm。其中,位于主跨中部的9 m长节段确定为关注节段^[17],通过实体-板壳单元的混合模型对其进行模拟形成整体模型。整体节段模型与三塔斜拉桥使用多点约束方法(MPC)连接形成多尺度模型,桥面板关注区域采用实体单元(SOLID45)建模,其他区域采用壳单元(SHELL63)模拟,板壳和实体之间采用刚域连接。该方法可确保局部钢桥面板细观模型和整体宏观模型之间刚度连续和变形协调,进而可评估关键结构部件的细观疲劳损伤。

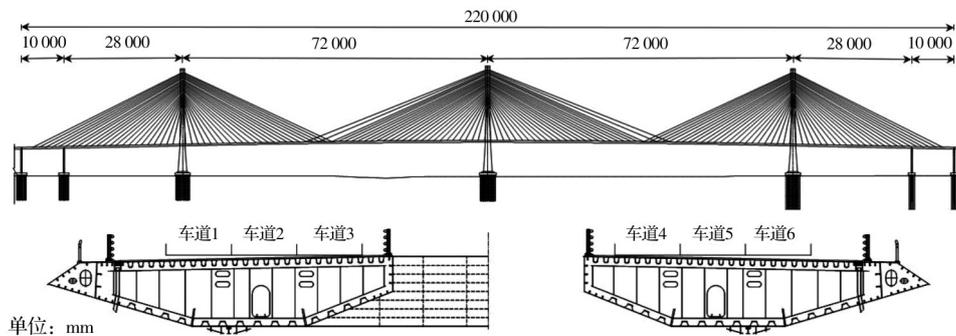


图6 三塔斜拉桥整体和标准横断面图

Fig. 6 Sketch of the cable-stayed bridge

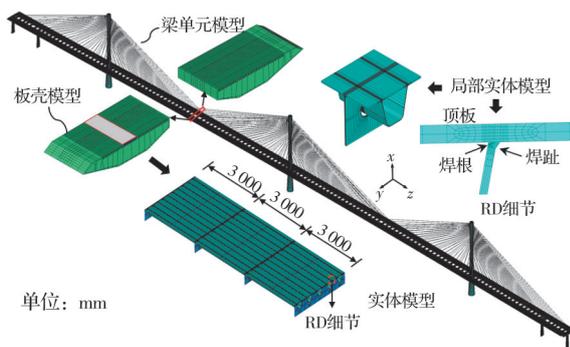


图7 三塔斜拉桥多尺度有限元模型

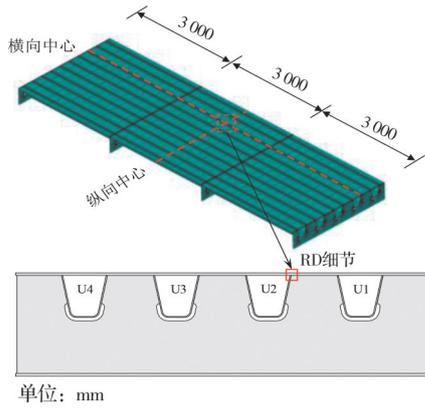
Fig. 7 Multi-scale FEM of the cable-stayed bridge

为考虑荷载作用的最不利情况,不考虑铺装层效应的影响对桥梁实例进行疲劳分析。在实际钢桥面板中,疲劳失效多发生在重车道的轮载区域,此处以桥面重车道为研究对象。如图7分体式钢箱梁左幅重车道所示,对关注区域(横隔板间距为3 000 mm)内的顶板与纵肋焊接构造细节进行研究。为准确分析正交异性钢桥面板结构体系的应力响应,对桥面板体系进行局部实体单元建模,以准确考虑焊缝局部受力状态,局部实体单元桥面板

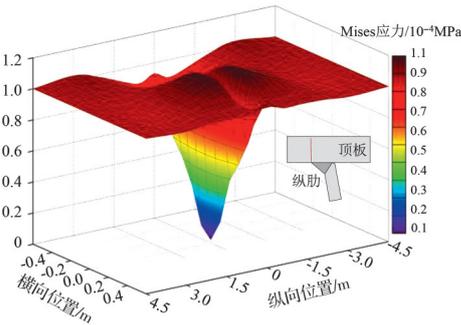
型如图8(a)所示。以图7中左幅车道2的第2个U肋右侧顶板与纵肋焊接构造细节为例,采用单位荷载的轴重进行加载,轮载面积为 $0.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$,轮间距为1.8 m,最终可得单轴作用下的关注部位应力影响面。车道2的第2个U肋右侧跨中部位的顶板与纵肋焊接构造细节应力影响面如图8(b)所示。

确定 Mises 应力影响面后,结合模拟的随机交通荷载,可得到随机荷载作用下关注构造细节处的应力响应。利用雨流计数法统计应力幅和循环次数,可得到等效应力幅和等效作用次数。结合细观损伤演化方程可计算出关注部位的疲劳损伤状态。结合实测交通流统计信息,确定车道2中的第2个U肋右侧跨中部位的顶板与纵肋焊接构造细节应力在一天内的应力响应如图9所示。根据式(17)可知,符号 Σ 表示的是归一化的常量, $\Sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{ij}^D \sum_{ij}^D}$, σ_{Σ} 表示的是 Mises 等效应力历程。图10显示了构造细节的名义应力历程和 Mises 等效应力。

在此基础上,结合图9所示应力历程,采用雨流计数法可确定每天的等效应力幅值和对应的作用



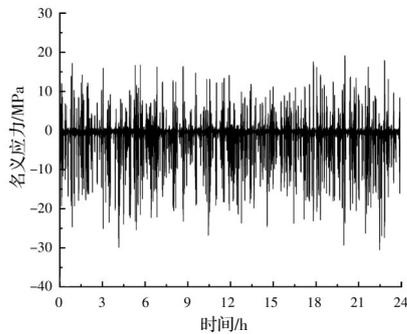
(a) 局部实体模型示意图



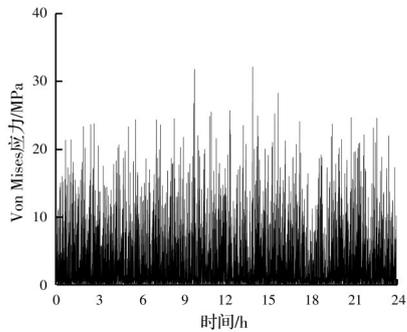
(b) Mises 应力影响面

图 8 顶板与纵肋细节 (RD 细节) Mises 应力影响面

Fig. 8 Influence area of Mises stress at rib-to-deck joint



(a) 顶板与纵肋细节 (RD 细节) 名义应力历程图



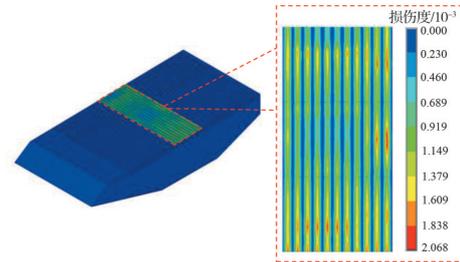
(b) 顶板与纵肋细节 (RD 细节) Mises 应力历程图

图 9 顶板与纵肋细节 (RD 细节) 应力历程

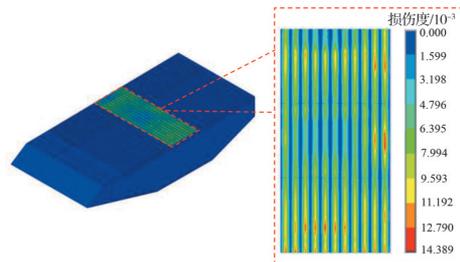
Fig. 9 A sample stress time history at rib-to-deck joint

次数,采用确定的损伤演化方程可得到关注构造细节的损伤状态。同理,车道 2 不同位置的顶板与纵

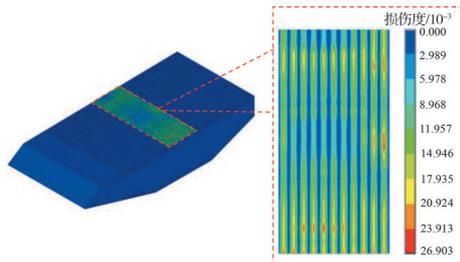
肋焊接构造细节的损伤状态均可采用上述方法得出,钢箱梁左幅车道 2 中顶板与纵肋焊接构造细节疲劳损伤累积到某时刻的损伤分布如图 10 所示。



(a) $T=1\ 000$ d 时的疲劳损伤分布



(b) $T=3\ 000$ d 时的疲劳损伤分布



(c) $T=5\ 000$ d 时的疲劳损伤分布

图 10 顶板和纵肋连接细节 (RD 细节) 疲劳损伤分布

Fig. 10 Fatigue damage distribution at typical rib-to-deck joint

结果表明:1)基于实测数据的车辆荷载导致的钢桥面板的累积疲劳损伤差异较大,顶板与纵肋焊接细节焊缝周围区域的损伤程度明显高于钢桥面板的其他部位;2)车道两侧疲劳损伤高于车道中心疲劳损伤,在轮载横向分布作用下,车道中心承受荷载较小,导致疲劳损伤较小,此现象与实际结构疲劳开裂统计结果一致。

在此基础上,研究长期荷载作用下的钢桥面板疲劳损伤。以图 8 所示车道 2 中的第 2 个 U 肋右侧跨中部位的顶板与纵肋焊接构造为典型关注细节,其在长期荷载作用下的焊趾处疲劳累积损伤如图 11 所示。从图中发现损伤突增现象,经过分析认为其主要原因是:跨尺度损伤演化模型计算的损伤累积通过迭代法数值求解,结果本身就是非线性增长的,且越接近临界值变化越显著。在累积损伤增长初期很慢,后期快速增长,有很强的非线性。在

实际情况下,钢桥面板疲劳裂纹发展初期裂纹扩展很慢,当裂纹扩展到临界失稳长度时会立即扩展到失效长度,与图11所示的损伤发展规律相符。Xu等^[8]也指出:疲劳损伤累积是非线性的,整个疲劳过程可概括为:首先,疲劳裂纹萌生,在该阶段裂纹萌生速度十分缓慢;然后,疲劳裂纹以较快的速度扩展;最后,发生突然性的疲劳失效。疲劳损伤累积结果表明:1)关注细节处的疲劳损伤随服役时间的增加呈非线性增长,且在服役后期损伤急剧增加,损伤增长的变化趋势与Xu等^[8]的研究结果相似。2)前期损伤增长缓慢,表明早期阶段细观尺度的裂纹萌生和扩展寿命占主导地位,与实际桥梁疲劳开裂所观测的损伤现象相符。3)在不考虑交通量增长的情况下,该桥疲劳寿命约27 a,远低于采用规范和传统方法的预测值。

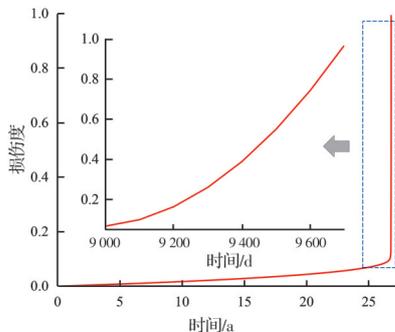


图11 疲劳损伤累积曲线

Fig. 11 Accumulative Fatigue Damage Curve

4 结论

1)考虑细观尺度下材料塑性与损伤方程的耦合作用,建立了跨尺度的疲劳损伤演化方程。采用疲劳试验数据确定了损伤演化参数,所预测的疲劳寿命基本落在S-N曲线范围内,验证了损伤演化方程的正确性。

2)为准确评估构造细节的疲劳损伤,根据实测交通荷载的统计特征,采用Monte-Carlo模拟产生模拟车流荷载,对大跨度钢桥关注节段桥面体系构造细节进行随机车流加载,并基于实测交通荷载数据对所建立的随机车流模型进行了验证。结果表明,随机车流模型与实测交通荷载数据统计值符合较好,建立的随机车流可用于大跨度桥梁疲劳损伤评估。

3)结合所提出的疲劳损伤演化模型和随机车流对大跨度桥梁钢桥面板疲劳损伤进行预测,在不考虑交通流量逐年增长的情况下,所关注焊接细节疲劳寿命约27 a。

4)本文未考虑交通量增长等因素,考虑交通量增长和基于疲劳可靠度的评估是下一阶段的研究重点。

参考文献

- [1] KOLSTEIN M H. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks [D]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [2] CONNOR R J, FISHER J, GATTI W, et al. Manual for design, construction, and maintenance of orthotropic steel deck bridges: Report No. FHWA-IF-12-027 [R]. US Department of Transportation, 2012.
- [3] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-30, 39. ZHANG Q H, BU Y Z, LI Q. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30, 39. (in Chinese)
- [4] 张清华, 崔闯, 卜一之, 等. 钢结构桥梁疲劳2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 147-158. ZHANG Q H, CUI C, BU Y Z, et al. State-of-the-art review of fatigue of steel bridge in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 147-158. (in Chinese)
- [5] 张清华, 李俊, 袁道云, 等. 深圳至中山跨江通道钢桥面板结构疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(11): 102-115. ZHANG Q H, LI J, YUAN D Y, et al. Fatigue model tests of orthotropic steel bridge deck of Shenzhen-Zhongshan Link [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(11): 102-115. (in Chinese)
- [6] KACHANOV L M. Rupture time under creep conditions [J]. International Journal of Fracture, 1999, 97: 11-18.
- [7] CHABOCHE J L, LESNE P M. A non-linear continuous fatigue damage model [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 1988, 11(1): 1-17.
- [8] XU Y L, CHEN Z W, XIA Y. Fatigue assessment of multi-loading suspension bridges using continuum damage model [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 40(7): 27-35.
- [9] XU Y L, LIU T T, ZHANG W S. Buffeting-induced fatigue damage assessment of a long suspension bridge [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(3): 575-586.
- [10] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1975.
- [11] TVERGAARD V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions [J]. International Journal of Fracture, 1981, 17(4): 389-407.
- [12] LEMAITRE J, SERMAGE J P, DESMORAT R. A

- two scale damage concept applied to fatigue [J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 97(1): 67-81.
- [13] DESMORAT R, KANE A, SEYEDI M, et al. Two scale damage model and related numerical issues for thermo-mechanical High Cycle Fatigue [J]. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2007, 26(6): 909-935.
- [14] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data-Part I: methodology and strategy [J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(1): 45-53.
- [15] CHAN T H T, GUO L, LI Z X. Finite element modelling for fatigue stress analysis of large suspension bridges [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 261(3): 443-464.
- [16] LI Z X, CHAN T H T, YU Y, et al. Concurrent multi-scale modeling of civil infrastructures for analyses on structural deterioration-Part I: Modeling methodology and strategy [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2009, 45(11): 782-794.
- [17] SUN B, XU Y L, ZHU Q, et al. Concurrent multi-scale fatigue damage evolution simulation method for long-span steel bridges [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2019, 28(2): 165-182.
- [18] SUN B, XU Y L, WANG F Y, et al. Multi-scale fatigue damage prognosis for long-span steel bridges under vehicle loading [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, 15(4): 524-538.
- [19] 邓扬, 李爱群, 丁幼亮. 钢箱梁桥海量应变监测数据分析与疲劳评估方法研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(7): 69-77.
DENG Y, LI A Q, DING Y L. Analysis of monitored mass strain data and fatigue assessment for steel-box-girder bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(7): 69-77. (in Chinese)
- [20] 邓扬, 丁幼亮, 李爱群. 钢箱梁焊接细节基于长期监测数据的疲劳可靠性评估: 疲劳可靠度指标[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(3): 86-92, 181.
DENG Y, DING Y L, LI A Q. Fatigue reliability assessment for welded details of steel box girders using long-term monitoring data: fatigue reliability indices [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(3): 86-92, 181. (in Chinese)
- [21] 王莹, 李兆霞, 赵丽华. 大跨钢桥钢箱梁损伤时变模型及疲劳可靠性评估[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(5): 1017-1023.
WANG Y, LI Z X, ZHAO L H. Time-varying damage model and fatigue reliability assessment for box-girder of long-span steel bridge [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(5): 1017-1023. (in Chinese)
- [22] 郑蕊, 李兆霞. 基于结构健康监测系统的桥梁疲劳寿命可靠性评估[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2001, 31(6): 71-73.
ZHENG R, LI Z X. Reliable evaluation of bridge fatigue life based on structural health monitoring system [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2001, 31(6): 71-73. (in Chinese)
- [23] LI Z X, CHAN T H T, ZHENG R. Statistical analysis of online strain response and its application in fatigue assessment of a long-span steel bridge [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(14): 1731-1741.
- [24] KIAEE M, Cruden A, Chladek P, et al. Investigation of fatigue performance of welded details in long-span steel bridges using long-term monitoring strain data[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2015, 22(11): 40-50.
- [25] MACDOUGALL C, GREEN M F, SHILLINGLAW S. Fatigue damage of steel bridges due to dynamic vehicle loads [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11(3): 320-328.
- [26] CUI C, BU Y Z, BAO Y, et al. Strain energy-based fatigue life evaluation of deck-to-rib welded joints in OSD considering combined effects of stochastic traffic load and welded residual stress [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(2): 04017127.
- [27] CUI C, ZHANG Q H, LUO Y, et al. Fatigue reliability evaluation of deck-to-rib welded joints in OSD considering stochastic traffic load and welding residual stress [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 111: 151-160.
- [28] 崔闯. 基于应变能的钢桥面板与纵肋连接细节疲劳寿命评估方法及其可靠度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
CUI C. Research on fatigue life evaluation and reliability based on strain energy in deck-to-rib joint of orthotropic steel deck [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [29] CUI C, XU Y L, ZHANG Q H, et al. Vehicle-induced fatigue damage prognosis of orthotropic steel decks of cable-stayed bridges [J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110509.
- [30] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
YU S W, FENG X Q. *Damage mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [31] ESHELBY J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 1957, 241: 376-396.
- [32] KRÖNER E. On the plastic deformation of polycrystals [J]. *Acta Metall*, 1961, 9, 155-161.

- [33] SEYEDI M, DESMORAT R, SERMAGE J P. A two scale model for thermo-mechanical high cycle fatigue failure [C]//European Conference on Fracture ECF 15, Advanced Fracture Mechanics for Life and Safety, Stockholm, Sweden, 2004.
- [34] DESMORAT R, LEMAITRE J. Two scale damage model for quasi-brittle and fatigue damage [M]//Lemaitre J. Handbook of Materials Behavior Models. Academic Press, 2005: 525-535.
- [35] LEMAITRE, J. A course on damage mechanics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [36] 李俊, 张清华, 袁道云, 等. 基于等效结构应力法的正交异性钢桥面板体系疲劳抗力评估[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 134-143.
- LI J, ZHANG Q H, YUAN D Y, et al. Fatigue resistance evaluation for structural system of orthotropic steel bridge deck based on equivalent structural stress [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 134-143. (in Chinese)
- [37] 张清华, 崔闯, 魏川, 等. 钢桥面板疲劳损伤智能监测与评估系统研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 66-77, 112.
- ZHANG Q H, CUI C, WEI C, et al. Research on intelligent monitoring and assessment system for fatigue damage of orthotropic steel deck structural system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 66-77, 112. (in Chinese)
- [38] LU N W, NOORI M, LIU Y. Fatigue reliability assessment of welded steel bridge decks under stochastic truck loads via machine learning [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(1): 04016105.
- [39] GUO T, FRANGOPOL D M, CHEN Y W. Fatigue reliability assessment of steel bridge details integrating weigh-in-motion data and probabilistic finite element analysis [J]. Computers & Structures, 2012, 112/113: 245-257.
- [40] Eurocode 3. Design of steel structure, Part 1-9, Fatigue strength of steel structure: BS EN 1993-1-9 [S]. Brussel: CEN, 2005.
- [41] British Standard Institute (BSI). Steel, concrete and composite bridges, code of practice for fatigue: BS5400: Part 10 [S]. London: BSI, 1980.

(编辑 王秀玲)