

基于马尔可夫链的钢箱梁正交异性板疲劳状态分析

郭 健 杭 达

(浙江工业大学桥梁工程研究所, 浙江杭州 310023)

摘要: 为对正交异性板 U 肋的剩余强度退化规律进行研究, 引入马尔可夫过程理论, 以特大跨径钢箱梁悬索桥——西堠门大桥为工程背景展开研究。首先分析西堠门大桥钢箱梁长期应变监测数据的时频特征, 应用小波分析分离出环境温度变化所引起的桥面板结构应力波动, 再对小波变换系数在不同尺度上选择合适的阈值来消除由环境随机激励和测量噪声引起的低幅值应力变异; 采用雨流计数法对车辆荷载作用下的应变监测数据进行统计分析, 得到疲劳应力范围并设定 6 个疲劳应力区间; 然后由 U 肋对接部位的典型 S-N 曲线计算得到其强度从初始状态至最终状态的转移概率, 并根据 Palmgren-Miner 线性疲劳累积损伤理论构造出连接部位易损点区域强度演变的状态转移概率矩阵; 最后利用初始状态的概率分布向量和状态转移概率矩阵, 得出大桥运营阶段不同时刻对应的剩余强度值, 给出 U 肋连接部位的强度退化轨迹。结果表明: 所建立的疲劳状态分析模型可以考虑构件强度退化过程中各状态的相关性, 能够根据车流量变化来预测正交异性板 U 肋疲劳状态随桥梁服役时间的变化规律, 从而可实现钢箱梁正交异性板 U 肋的服役性能评估。

关键词: 大跨悬索桥; 监测数据分析; 马尔可夫过程; 正交异性板 U 肋; 剩余强度

中图分类号: U441+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)03-0060-07

Fatigue state analysis of orthotropic plates of steel box girder based on Markov chain

Guo Jian Hang Da

(Institute of Bridge Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to study the residual strength degradation rule of the U-ribs of orthotropic plates, the Markov process theory was adopted to assess the state change in the very long-span steel box girder suspension bridge—Xihoumen Bridge. First, the time-frequency characteristics of the long-term strain monitoring data of the steel box girder of Xihoumen Bridge were analyzed. The wavelet analysis was used to separate the stress fluctuation of the bridge deck structure caused by the change of environmental temperature. To eliminate the low amplitude stress variation caused by environmental random excitation and measurement noise, the appropriate threshold was selected for the wavelet transform coefficient at different scales. The rain-flow counting method was used to statistically analyze the monitoring data of strain under vehicle load, so that the fatigue stress range was obtained, and six fatigue stress intervals were set. Furthermore, the transition probability of the strength from the initial state to the final state was calculated from the typical S-N curve of the rib-to-rib connection of U-ribs, and the state transition probability matrix of the strength evolution of the vulnerable portion of the connection was constructed according to the Palmgren-Miner linear fatigue cumulative damage theory. Finally, the probability distribution vector of the initial state and the state transition probability matrix were used to obtain the residual strength values at different service time of the bridge, and the strength degradation trajectory of the connection of U-ribs was fitted. The results show that the established fatigue state analysis model can consider the correlation of different states during the process of component strength degradation, and can predict the variation of the U-rib fatigue state of the orthotropic plate during the service time of the bridge according to the change of traffic flow. Hence, the service performance assessment of orthotropic plates of steel box girder can be realized and completed.

基金项目: 浙江省重点研发计划(2018C03G2021052)、国家自然科学基金

基金(51578506, U1709207)

作者简介: 郭健, 博士, 教授级高级工程师

收稿日期: 2019-08-15

Keywords: long-span suspension bridge; monitoring data analysis; Markov process; U-rib of orthotropic plate; residual strength

E-mail: guoj@zjut.edu.cn

引 言

钢箱梁具有良好的结构受力性能和抗风能力,且重量轻、用钢量小、造价低,在大跨径索承桥梁中得到了广泛的应用。具有正交异性板的钢箱梁在长期车辆荷载作用下,容易引起疲劳损伤累积问题,从而导致破坏。自从 1971 年英国 Severn 桥出现正交异性板疲劳开裂以来,国内外大跨径悬索桥的钢箱梁相继出现了疲劳开裂问题,使得正交异性钢桥面板的疲劳状态评估成为研究热点^[1-8]。

国内外围绕这一问题以试验测试和数值模拟等方法从疲劳的损伤演化过程、破坏模式及可靠度等方面进行了诸多研究分析。Fisher 等^[1,9-10]首先运用断裂力学理论对加拿大及美国因疲劳断裂的钢箱梁桥进行了分析,并结合足尺模型试验和现场实测总结了钢桥面板系统中各构件间的主要疲劳开裂形式、分类和传力路径;Pipinato^[11]给出了欧洲和美国的正交异性钢桥面板中易疲劳开裂的一系列损伤热点位置的分类和统计。邓扬等^[12]基于 Palmgren-Miner 准则和 Eurocode 规范的 $S-N$ 曲线得到了钢桥疲劳极限状态方程,并以此为基础采用 Monte-Carlo 的方法分析了疲劳可靠度指标随时间变化的规律;Maljaars 等^[13]提出了基于概率线弹性断裂力学的疲劳评估模型;郭彤等^[14]根据 $S-N$ 曲线和长期健康监测数据对润扬悬索桥的顶板 U 肋焊缝细节进行了疲劳寿命评估。

上述文献运用各种方法对 U 肋的疲劳问题进行了分析,提升了人们对钢箱梁正交异性板疲劳性能的研究,在工程中也更加重视 U 肋的开裂和长期服役问题。但整体而言,过去的研究在分析疲劳寿命时,将每个时刻的状态视为彼此独立的。实际上,在长达数十年甚至上百年的服役期内,U 肋强度的下降是桥面板所受时变应力连续随机作用的结果,任何时刻构件的强度状态都与前一刻的状态相关。如果把钢箱梁的桥面板作为一个时变的受随机外荷载激励的结构系统,那么根据马尔可夫过程理论,系统演变的后一刻状态与前一刻相关。因此,作为正交异性板的易损构件,U 肋强度的状态演变符合马尔可夫链的状态转移理论。因此,本文基于马尔可夫链,结合特大跨钢箱梁悬索桥的实测数据,重点考虑导致构件剩余强度下降的车辆荷载作用,

结合 Palmgren-Miner 线性疲劳累积损伤理论和 $S-N$ 曲线,来获得正交异性板 U 肋的强度退化过程。

1 马尔可夫过程

在马尔可夫过程中,假定系统有 n 个状态,那么系统在任意时刻 $t(t=0, 1, 2, \dots, k, \dots, m)$ 的系统状态概率分布 $\mathbf{p}(t)=[p_1(t) \ p_2(t) \ \dots \ p_n(t)]$ 由系统的状态转移概率矩阵 $\mathbf{Q}(t)$ 和初始状态概率分布 $\mathbf{p}(0)=[p_1(0) \ p_2(0) \ \dots \ p_n(0)]$ 所决定的,那么当 $t=k$ 时:

$$\mathbf{p}(k)=\mathbf{p}(0)\times\mathbf{Q}(1)\times\dots\times\mathbf{Q}(k) \quad (1)$$

式中状态转移概率矩阵 $\mathbf{Q}(t)$ 是由不同状态相互转换的转移概率 $Q_{ij}(t)$ 所构成,表示系统在 t 时刻由 i 状态转移至 j 状态的概率:

$$\mathbf{Q}(t)=\begin{bmatrix} Q_{11}(t) & Q_{12}(t) & \dots & Q_{1n}(t) \\ Q_{21}(t) & Q_{22}(t) & \dots & Q_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Q_{n1}(t) & Q_{n2}(t) & \dots & Q_{nn}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

对式(1)中 k 时刻的状态概率分布 $\mathbf{p}(k)$ 进行归一化得到

$$\mathbf{p}(k)'=\frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i(k)}\times\mathbf{p}(k) \quad (3)$$

假定系统 n 个状态对应的值为: $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$, 由其构成状态值向量 $\mathbf{E}=[E_1 \ E_2 \ \dots \ E_n]$, 结合式(3), 得到其在 k 时刻的状态均值 $E(t)$ 为:

$$E(t)=\mathbf{p}(k)'\times\mathbf{E} \quad (4)$$

2 强度状态转移概率

在循环荷载的作用下,随着疲劳损伤的出现和发展,U 肋连接部位的微观结构将发生变化,导致其抵抗外部荷载作用的能力下降,这种能力可以用剩余强度来表示^[15]。当疲劳损伤累积时,连接部位剩余强度下降,其对应的疲劳寿命相应减少。随疲劳荷载作用次数增加,U 肋对接部位的强度将逐渐退化。 $S-N$ 曲线表示的是 U 肋连接构件在循环荷载作用下疲劳寿命与应力值的关系,横坐标为荷载循环次数,纵坐标为疲劳应力,表示连接构件的疲劳剩余强度。图 1 中疲劳剩余强度从构件的初始强度 $\Delta\sigma_B$ 到

疲劳截止限值 $\Delta\sigma_L$ 。

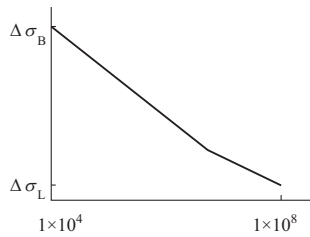


图 1 U 肋与 U 肋对接部位的 S-N 曲线图
Fig. 1 S-N curve of the U-rib connection

在 S-N 曲线中，构件从初始强度 $\Delta\sigma_B$ 退化至疲劳截止限值 $\Delta\sigma_L$ 的过程中，每个疲劳应力对应不同的循环次数。即每个疲劳应力令强度从初始强度退化至疲劳截止限值的能力不同，以概率 $P_c(x)$ 表示。计算过程如下：从 S-N 曲线中获取初始强度 $\Delta\sigma_B$ 和疲劳截止限值 $\Delta\sigma_L$ 所对应的应力循环次数 N_{min} 和 N_{max} ，然后，依据钢箱梁应变长期监测数据得到的车荷载应力循环范围，平均分成 6 个状态区间并以其中值代表其应力幅值；接着在 S-N 曲线上找出与第 x ($x=1, 2, \dots, 6$) 个应力值对应的循环次数 N_x ；最后，得出不同应力使构件从初始强度退化至疲劳截止限值的概率 $P_c(x)$ 为：

$$P_c(x) = \frac{N_{max} - N_x}{N_{max} - N_{min}} \times 100\% \quad (5)$$

式中： N_x 表示第 x 个应力的循环次数。车辆荷载作用下的疲劳应力是随机变量，每个应力出现的概率不同，记第 x ($x=1, 2, \dots, 6$) 个应力对应的概率为 $P_s(x)$ ，由分析大桥实测应力数据得到的车辆荷载作用下的应力循环次数求得各个应力值对应的出现概率。

由 Palmgren-Miner 理论，强度随着应力作用次数增加而减小。由图 1，强度状态划分范围从初始强度 $\Delta\sigma_B$ 到疲劳截止限值 $\Delta\sigma_L$ ，由实桥 U 肋强度退化情况出发，在把整个强度范围分为 5 个状态区间后，每个状态的强度值取区间中值，则在相同应力的作用下，随着状态转移数增加，状态转移的概率下降。结合式(5)，计算在桥梁受不同种车辆荷载作用下的疲劳应力使 U 肋关键部位的疲劳应力状态由状态 i 转移到

状态 j ($i, j=1, 2, \dots, 5$) 的总概率为：

$$Q_{ij}(t) = \sum_{x=1}^6 \frac{5}{|i-j|} \times P_c(x) \times P_s(x) \quad (6)$$

桥梁车流量每年的增加量为：

$$a(t) = \frac{K(t+1) - K(t)}{K(t)} \quad (7)$$

式中： $a(t)$ 为每年车流量的增长率； $K(t+1)$ 为 $t+1$ 年时的车流量； $K(t)$ 为 t 年时的车流量。

考虑随着车流量的增加，连接部位的疲劳状态转移概率随着每年的车荷载应力作用次数的增加而增大，结合式(7)，可得到：

$$Q_{ij}(t) = (1 + a(t)) \times \sum_{x=1}^6 \frac{5}{|i-j|} \times P_c(x) \times P_s(x) \quad (8)$$

3 U 肋状态转移概率分析

3.1 工程背景

西堍门大桥为两跨连续钢箱梁悬索桥，主跨和边跨分别为 1650m 和 578m，如图 2 所示。悬索桥索塔高 233.286m，主缆全长 2882m，主缆矢跨比为 1/10，在北锚、南塔各设有一对双向活动的竖向支座，横向抗风支座分别设置在北锚、北塔以及南塔。全桥加劲梁为扁平流线型分离式双箱断面，封闭钢箱的宽度为 14.5m，两个分离断面之间的距离为 6m，在西堍门大桥中跨主梁距北塔 74.4m 的横断面上布置应变计如图 2 所示，应变计 SG19~24 沿顺桥向安装在正交异性板 U 肋上，如图 3 所示。

钢箱梁正交异性板的构造复杂，在大流量车辆荷载的反复作用下，容易在主要构件连接的不连续位置产生应力集中的问题，如 U 肋与顶板、U 肋与 U 肋连接的区域，一旦由于热点应力出现疲劳开裂，应力集中将进一步加剧，疲劳产生的裂纹在易损部位产生和扩展，最终导致正交异性板局部失效，其典型的 3 个疲劳易损伤部位如图 4 所示。本文选取在正交异性板的 U 肋与 U 肋对接部位所布置的应变计 SG22 所监测的应力数据来进行 U 肋疲劳状态分析及预测。

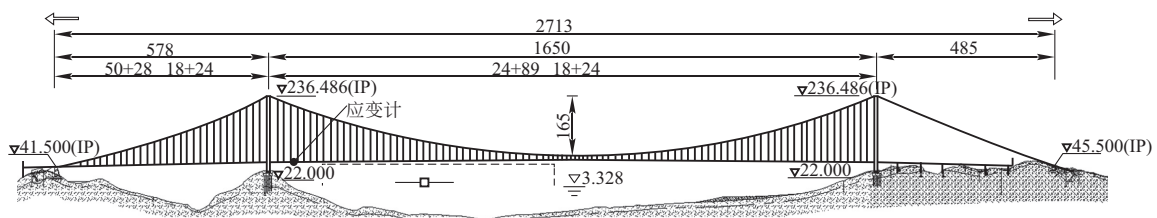


图 2 西堍门大桥应变计立面布置图 (单位: m)

Fig. 2 Layout of strain sensors of the Xihoumen Bridge (unit: m)

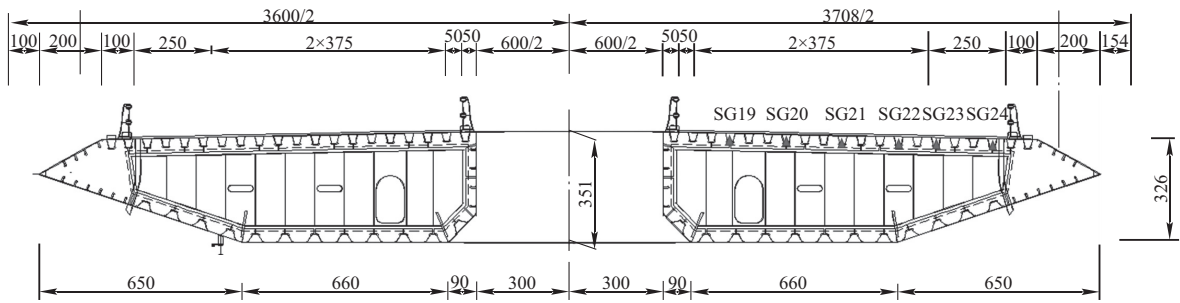


图 3 应变计横断面布置图 (单位: m)

Fig. 3 Strain sensors arranged in the cross-section (unit: m)

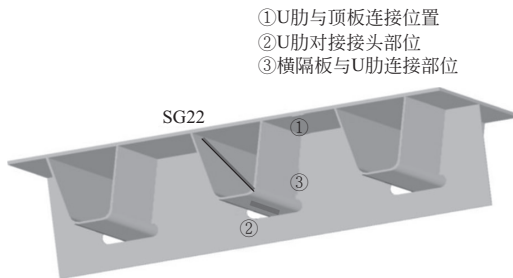


图 4 钢桥面板的典型疲劳裂纹和测点布置

Fig. 4 Typical fatigue crack and measuring point arrangement for steel bridge deck

3.2 应变监测数据的处理分析

这里以西堠门大桥一天的监测数据为例, 图 5 给出了 SG22 测点在 2015 年 7 月 8 日的应力时程原始数据。经长期的统计分析, 认为应力数据包含了三方面因素的影响: ①温度引起的应力变化, 幅度不大, 数据的频率低, 主要影响平均应力的总体幅值; ②随机车辆荷载作用引起的疲劳应力, 幅值变化较大, 是导致结构可能出现损伤的主要原因; ③其他环境随机激励和测量噪声引起的, 数据特征是幅值小, 全过程连续分布, 数量多。

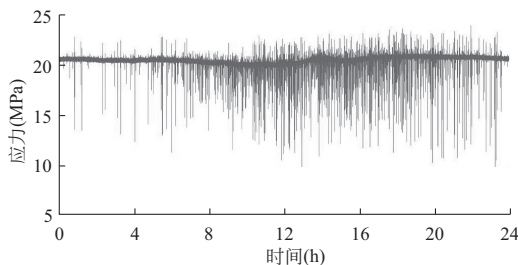


图 5 原始应力时程图

Fig. 5 Time-history diagram of original stress

首先提取温度对疲劳应力的影响。采用小波变换^[16], 对原信号进行多尺度分解并在低频带上重构信号, 可得到温度所引起的平均应力的影响如图 6 所示。

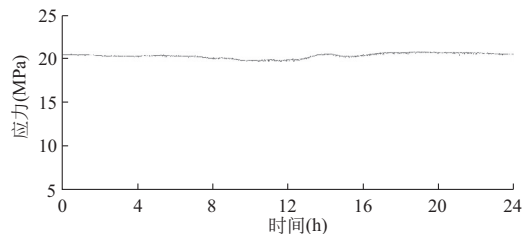


图 6 温度效应引起应力时程变化

Fig. 6 Time-history change of temperature stress

其次分离环境随机激励和测量噪声对疲劳应力的影响。在小波变换中根据环境随机激励和测量噪声的小波变换系数在不同尺度下的特性来选择阈值做数据提取处理。这里通过计算小波系数序列的方差 σ^2 , 得到 σ 之后取阈值为 3σ , 经此阈值提取后对环境随机激励和测量噪声的信号进行重构得到环境随机激励和测量噪声的应力时程如图 7 所示。

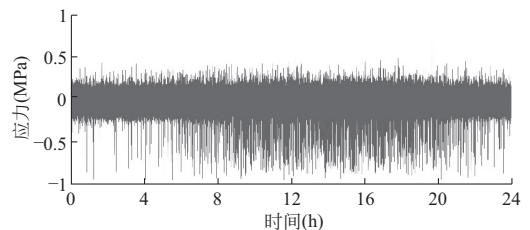


图 7 环境随机激励及和测量噪声引起的应力时程

Fig. 7 Stress time-history of environmental random excitation and measurement noise

图 8 所示为消除其他因素影响后车辆荷载引起的应力时程图, 采用雨流计数法提取应力循环, 得到应力幅值范围为 0~14MPa, 如图 9 所示。

对应变计 SG22 在 2015 年其他时间的应力幅值也采用上述方法进行分析统计, 选取每月同一天的分析数据可知, 一年内应力幅值在 0~14MPa 范围以内, 在 1~6 月中, 应力幅值在幅值范围内的循环次数逐月增加, 7~8 月内, 由于夏季通车量较多, 应

力幅值的循环次数达到最大值, 9~12月内, 通车量下降, 循环次数逐月下降。

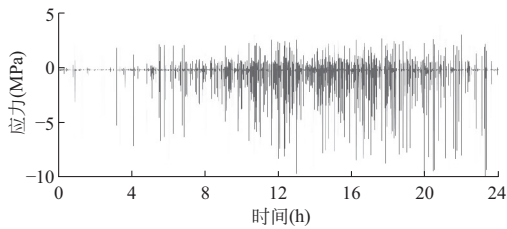


图8 车辆荷载引起的应力时程变化

Fig. 8 Stress time-history change caused by vehicle load

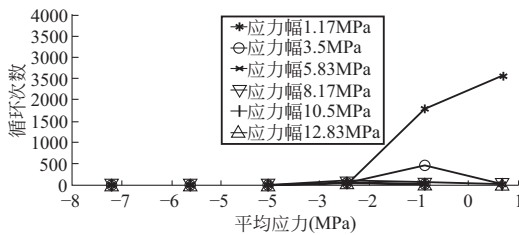


图9 应力循环次数统计

Fig. 9 Statistics of stress cycles

3.3 强度状态划分

从 Eurocode 3 中查询 U 肋对接接头部位的 S-N 曲线^[17], 可知该材料的初始强度 $\Delta\sigma_B = 415.2\text{MPa}$, 疲劳截止限值 $\Delta\sigma_L = 28.6\text{MPa}$, 对其进行状态划分如表 1 所示。

表 1 强度状态划分及强度值

Table 1 Strength state division and strength value

状态	区间 (MPa)	性能值 X (MPa)
1	[415.2, 337.9]	376.54
2	[337.9, 260.6]	299.22
3	[260.6, 183.2]	221.9
4	[183.2, 105.9]	144.58
5	[105.9, 28.6]	67.26

3.4 疲劳应力及概率计算

车辆荷载的重复作用引起的累计损伤是钢桥疲劳损伤的原因。由于运输业的发展, 车辆荷载的种类不断变化, 并且不同地区的车辆荷载也有区别。因此, 文中以西堙门大桥 2010~2018 年实桥动态称重监测系统现场实测的大量数据为研究对象, 分析了每年车流量的变化, 如图 10 所示。

对每年的车流量数进行数值分析, 得到车流量的增长曲线为:

$$K(t) = 171.2 \times 1.097^t \quad (9)$$

由增长曲线计算车流量年增长率 $a(t) = 0.097$ 。

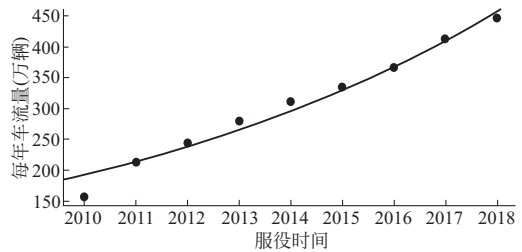


图 10 西堙门大桥每年车流量

Fig. 10 Annual traffic flow of the Xihoumen Bridge

依据实桥在 2015 年一年内的应力监测数据, 排除温度、环境随机激励及和测量噪声对其的影响之后, 应用雨流计数法对其应力幅值范围进行统计分析, 并计算其对应的状态转移概率, 如表 2 所示。

表 2 疲劳应力幅及对应的计算结果

Table 2 Fatigue stress amplitudes and corresponding calculation results

应力幅值范围 (MPa)	发生概率 $P_s(x)$	疲劳应力幅 (MPa)	循环次数 $N_x (\times 10^9)$	转移概率 $P_C(x) \times P_S(x)$
0~2.33	0.844	1.17	879062	0
2.33~4.67	0.092	3.5	3617.5	0
4.67~7	0.033	5.83	281.3	0
7~9.33	0.02	8.17	52.3	0
9.33~11.67	0.009	10.5	14.9	0.0019
11.67~14	0.002	12.83	5.5	0.0014

4 强度退化模型

由式(8)计算状态转移矩阵:

$$Q(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0.008 & 0.006 & 0.004 & 0.003 \\ & 1 & 0.008 & 0.006 & 0.004 \\ & & 1 & 0.008 & 0.006 \\ & & & 1 & 0.008 \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0.0088 & 0.0066 & 0.0044 & 0.0033 \\ & 1 & 0.0088 & 0.0066 & 0.0044 \\ & & 1 & 0.0088 & 0.0066 \\ & & & 1 & 0.0088 \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

取初始时刻 $t = 0$ 时的状态概率分布 $p(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, 由式(1)计算 $t = 1$ 年时的状态概率分布为:

$$p(1) = p(0) \times Q(1) = [1 \ 0.008 \ 0.006 \ 0.004 \ 0.003]$$

$$\begin{aligned}
 p(2) &= p(0) \times Q(1) \times Q(2) \\
 &= [1 \quad 0.0168 \quad 0.0127 \quad 0.0085 \quad 0.0064] \\
 \text{根据式(2)对状态概率 } p(1)、p(2) \text{ 归一化计算:} \\
 p(1)' &= \frac{[1 \quad 0.008 \quad 0.006 \quad 0.004 \quad 0.003]}{1+0.008+0.006+0.004+0.003} \\
 &= [0.979 \quad 0.008 \quad 0.006 \quad 0.004 \quad 0.003] \\
 p(2)' &= \frac{[1 \quad 0.0168 \quad 0.0127 \quad 0.0085 \quad 0.0064]}{1+0.0168+0.0127+0.0085+0.0064} \\
 &= [0.958 \quad 0.016 \quad 0.012 \quad 0.008 \quad 0.006]
 \end{aligned}$$

其余时间状态概率 $p(t)' (t \geq 3)$ 计算过程与之类似。

根据表 1 中每个状态的强度值, 由式(2)计算每年的强度值为:

$$\begin{aligned}
 E(1) &= \Delta\sigma_B = 415.2 \text{ MPa} \\
 E(2) &= 376.54 \times 0.979 + 299.22 \times 0.008 + 221.9 \times \\
 &\quad 0.006 + 144.58 \times 0.004 + 67.26 \times 0.003 \\
 &\approx 373.1 \text{ MPa} \\
 E(3) &= 376.54 \times 0.958 + 299.22 \times 0.016 + 221.9 \times \\
 &\quad 0.012 + 144.58 \times 0.008 + 67.26 \times 0.006 \\
 &\approx 369.7 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

从图 11 可以看出, 随着桥梁服役时间的增加, U 肋剩余强度逐年降低。经过 10 年时间, 强度从初始强度 415.2 MPa 退化至 346.96 MPa, 就需要进一步加强裂纹检测, 这也与实际桥梁 U 肋微裂缝已初步出现相符。对该 U 肋剩余强度退化过程进行拟合, 可得到:

$$\sigma(t) = 66.5 \times e^{-0.055 \times t} + 319.9 \times e^{-0.0042 \times t} \quad (10)$$

式中: $\sigma(t)$ 为 t 时刻 U 肋的剩余强度; t 为桥梁服役时间, 可以对未来运营期的剩余强度进行初步预测, 以选择合理维修养护策略。

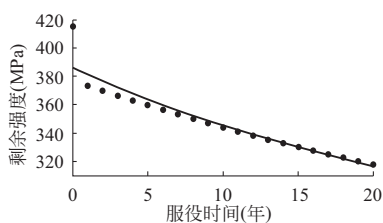


图 11 正交异性板 U 肋强度退化曲线

Fig. 11 Strength degradation curve of U-rib

5 结 论

本文利用马尔可夫过程, 统计并分析了西堍门大桥钢箱梁正交异性板 U 肋关键部位的长期应变实测数据, 研究了钢箱梁构件剩余强度退化的状态预

测模型, 主要实现了:

(1) 根据 Palmgren-Miner 线性疲劳累计损伤理论, 由疲劳应力作用效果分析了钢箱梁正交异性板 U 肋的剩余强度下降规律, 建立了疲劳状态指标。

(2) 由钢箱梁长期应变监测数据, 分析了温度与测量噪声对应变数据的影响, 根据雨流计数法得到疲劳应力循环范围, 然后平均分成 6 个区间, 以各个区间中值作为疲劳应力幅, 考虑到不同应力幅值发生的概率, 根据 U 肋连接部位的 S-N 曲线及设定的疲劳状态区间, 获得了强度状态转移概率。

(3) 基于马尔可夫链理论, 通过归一化和状态转移概率矩阵得到了西堍门大桥 U 肋易损部位在不同时刻的剩余强度值, 计算了正交异性板 U 肋剩余强度退化过程, 实现了对服役性能的评估预测。

参 考 文 献

- [1] Fisher J W. Fatigue and fracture in steel bridges: case studies [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984
- [2] Luo P J, Zhang Q H, Bao Y, et al. Fatigue evaluation of rib-to-deck welded joint using averaged strain energy density method [J]. Engineering Structures, 2018, 177: 682-694
- [3] 唐亮, 黄李骥, 刘高, 等. 正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 112-122 (Tang Liang, Huang Liji, Liu Gao, et al. Fatigue experimental study of a full-scale steel orthotropic deck model [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 112-122 (in Chinese))
- [4] Heng J, Zheng K, Gou C, et al. Fatigue performance of rib-to-deck joints in orthotropic steel decks with thickened edge U-ribs [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(9): 04017059-1-04017059-10
- [5] 安群慧, 沈旺, 王戒躁, 等. 西堍门大桥分体式钢箱梁节段模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2009(2): 27-31 (An Qunhui, Shen Wang, Wang Jiezo, et al. Test study of sectional model of separated steel box girders of Xihoumen Bridge [J]. Bridge Construction, 2009(2): 27-31 (in Chinese))
- [6] Farreras-Alcover I, Chryssanthopoulos M K, Andersen J E. Data-based models for fatigue reliability of orthotropic steel bridge decks based on temperature, traffic and strain monitoring [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 95: 104-119
- [7] Ju X, Tateishi K. Fatigue crack behavior at rib-to-deck weld bead in orthotropic steel deck [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(10): 145-1468
- [8] 杨仕力, 施洲. 我国大跨径钢箱梁桥正交异性板疲劳损伤研究现状[J]. 桥梁建设, 2017, 47(4): 60-65 (Yang Shili, Shi Zhou. Current research of fatigue damage in orthotropic deck plates of long span steel box girder bridges in China [J]. Bridge Construction, 2017, 47(4): 60-65 (in Chinese))
- [9] Fisher J W, Roy S. Fatigue of steel bridge infrastructure

- [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7 (7/8): 457-475
- [10] Connor R J, Fisher J W. Consistent approach to calculating stresses for fatigue design of welded rib-to-web connections in steel orthotropic bridge decks [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5): 517-525
- [11] Pipinato A, Modena C. Structural analysis and fatigue reliability assessment of the Paderno Bridge [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2010, 15 (2): 109-124
- [12] 邓扬, 李爱群. 基于断裂力学和长期监测数据的钢箱梁桥顶板 U 肋焊缝疲劳可靠度分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2019, 49 (1): 68-75 (Deng Yang, Li Aiqun. Fatigue reliability anlysis for welds of U ribs in steel box girders based on fracture mechanics and long-term monitoring data [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2019, 49 (1): 68-75 (in Chinese))
- [13] Maljaars J, Steenbergen H M G M, Vrouwenvelder A C W M. Probabilistic model for fatigue crack growth and fracture of welded joints in civil engineering structures [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 38: 108-117
- [14] Guo T, Chen Y W. Field stress/displacement monitoring and fatigue reliability assessment of retrofitted steel bridge details [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1): 354-363
- [15] 李立峰, 肖小艳, 刘清. 波形钢腹板 PC 组合箱梁疲劳损伤对抗弯承载能力的影响研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45 (7): 111-119 (Li Lifeng, Xiao Xiaoyan, Liu Qing. Study on the residual flexural capacity of composite box girders with corrugated steel webs after fatigue damage [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 111-119 (in Chinese))
- [16] 郭健, 顾正维, 孙炳楠, 等. 基于小波分析的桥梁健康监测方法[J]. 工程力学, 2006, 23(12): 129-135 (Guo Jian, Gu Zhengwei, Sun Bingnan, et al. Method of bridge health monitoring based on wavelet analysis [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (12): 129-135 (in Chinese))
- [17] BS EN 1993-1-9: 2005 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-9: fatigue [S]. London: British Standards Institution, 2005

郭 健(1973—),男,博士,教授级高级工程师。主要从事跨海桥梁防灾减灾及智能监测等方面的研究。

杭 达(1995—),男,硕士研究生。主要从事跨海桥梁智能监测方面的研究。