

基于非齐次复合 Poisson 过程的正交异性 钢桥面板细节疲劳裂纹随机扩展研究

张海萍^{*1}, 刘 扬¹, 罗 媛¹, 郑 辉¹, 邓 扬²

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 株洲 412007; 2. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044)

摘 要:传统的正交异性钢桥面板疲劳损伤评估常采用确定性和可靠性分析方法,忽略了疲劳裂纹扩展的随机性影响,针对这一问题,提出钢桥面板细节疲劳随机扩展分析方法。本文以南溪长江大桥为工程背景,基于长期车辆荷载监测数据,建立了车辆荷载非齐次复合 Poisson 过程模型。建立钢桥面板有限元模型,采用瞬态分析方法将随机车辆荷载转化成细节疲劳应力,基于线弹性断裂力学理论推导 U 肋-顶板焊接细节疲劳裂纹扩展时变微分方程,实现宏观关系式疲劳应力幅次数-疲劳损伤至微观表达式应力时间序列-疲劳损伤转换,讨论了车载次序及超载对疲劳裂纹扩展的影响。研究结果表明,非齐次复合泊松过程模型能够较好描述随机车流运营状态,车辆荷载的次序对疲劳裂纹扩展速率的影响不可忽略,重车排序靠前时能够促使疲劳裂纹扩展增速,南溪长江大桥细节点的车辆超载迟滞效应修正系数取值 0.804。

关键词:桥梁工程;正交异性钢桥面板;超载;非齐次 Poisson 过程模型;随机疲劳

中图分类号:U448.25;O346.2

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2022)05-0614-09

1 引 言

研究表明钢桥面板细节的疲劳失效过程呈现非线性变化^[1]。变幅荷载、超载和荷载顺序均会影响疲劳裂纹的扩展行为。实际车辆运营状态是一种复杂的随机过程^[2],使得车载下钢桥面板细节的疲劳裂纹扩展随机性增强。钢桥面板细节疲劳随机扩展分析方法亟待发展。

近年来,部分研究学者采用随机车流描述车辆的运营状态^[3],其核心思想是基于车流统计数据对车型比例、车重、车距和车速等参数的概率模型进行建模,并采用蒙特卡洛(Monte-Carlo)法对相关参数概率模型进行抽样,最后整合所有的抽样数据得到随机车流样本。随机车流模型没有考虑车流在时间维度上的变化,实为伪随机过程模型。在车辆荷载随机模型研究方面,主要采用单一的白噪音模型^[4]、平衡更新模型^[5]和泊松过程模型^[6]来描述车辆的随机过程。单一的数学随机过程模型忽略了驾驶人员行为和交通规则,使得数值模型与车辆

实际运营状态存在一定的差异。

现阶段,钢桥的疲劳评估方法主要包含疲劳强度曲线法(S-N 曲线法)和断裂力学法。S-N 曲线法研究工作的趋势是通过量化不同标准材料、结构和细节类型疲劳试验,丰富和完善工程结构的疲劳强度规范^[7]。很多学者认为,名义应力法并不适用于正交异性钢桥面结构的评估。不少学者通过多次对细节及周围点的测量应力进行求商来确定热点应力系数。如朱太勇等^[8]提出一种全空间 S-N 曲线法,该疲劳强度曲线能够考虑 OSD 细节热点应力和焊接残余应力对疲劳寿命的影响。S-N 曲线的局限性在于无法考虑随机应力幅和超载应力幅对裂纹扩展的影响,从而无法分析疲劳裂纹的非线性扩展过程。对比 S-N 曲线法,断裂力学能够分析结构或材料疲劳损伤的非线性变化过程,更符合金属材料疲劳损伤的演化规律。但由于实际工作结构的裂纹形状不规则和疲劳应力幅形式复杂,使得实际工程结构细节的应力强度因子求解困难。

本文建立了一套应用于桥梁结构细节疲劳裂纹随机扩展评估方法的理论框架。首先,提出了一种非齐次复合泊松过程随机模型描述车辆的随机运营过程。该模型包含有车流密度、车辆类型、车重和车速等参数。在 ANSYS 平台将车流的随机荷载时间序列数据转换成疲劳应力时间序列。提

收稿日期:2021-03-13;修改稿收到日期:2021-04-21.

基金项目:国家自然科学基金(51878027);湖南省自然科学基金(2020JJ5143);湖南省教育厅优秀青年项目(20B182)资助项目.

作者简介:张海萍^{*}(1988-),男,博士,讲师
(E-mail:zhanghaipingbridge@163.com).

出了能够考虑加载次序和超载因素 OSD 焊接细节的疲劳评估方法,并讨论不同车辆排队顺序与车辆超载率对疲劳开裂扩展速率的影响。

2 车辆荷载非齐次复合 Poisson 过程建模

2.1 车辆随机过程模型

车辆在特定的时间经过某桥梁的某一位置后,车重的时间序列为一种脉冲曲线。车辆数的时间序列随时间的累计呈现出阶梯上升的特征。车重和车辆数是决定细节疲劳开裂扩展的关键变量。复合 Poisson 过程与车流过桥特征高度相似。可以考虑用滤过复合 Poisson 过程模型描述车辆运营过程。用复合 Poisson 过程随机模型描述车辆荷载需要满足三个条件。

(1) 车辆重 $w(t)$ 和车数在时间区间 $[0, T]$ 具有相同概率分布特征。

(2) 复合 Poisson 过程模型只能描述单一车道的车辆运营。

(3) 车辆荷载在时间区间 $[0, T]$ 内保持匀速。复合 Poisson 过程模型的表达式为^[9]

$$w(t) = \sum_{n=0}^{N(t)} \zeta_n \cdot I(t; \tau_n) \quad (1)$$

式中 $N(t)$ 为在时间区间 $[0, T]$ 以速率为 λ 的 Poisson 过程, ζ_n 为第 n 辆货车的重量, τ_n 为第 n 辆货车跨越测量点所需的时间, T_n 为第 $n-1$ 辆到达车辆与第 n 辆到达车辆的时间间隔。 $I(t; \tau_n)$ 的表达式为

$$I(t; \tau_n) = \begin{cases} 1 & (t \in \tau_n) \\ 0 & (t \notin \tau_n) \end{cases} \quad (2)$$

由图 1 可知,高速公路车辆运营车流量随时间变化呈一定的规律性。在 9 时~18 时车流密度相对较高。实际运营的车流密度不满足 Poisson 过程条件假设(1),即车流密度在时间跨度为 1 天内变化较大。需要将时间区间长度按照实际车流密度在时间上的变化来进行划分。可以将模型中的时间区间等分成 M 段,每一段的车辆密度强度参数取值均不同。复合 Poisson 过程的另一个参数 ζ_n 会随车型的变化概率分布有较大的不同。可以看出,用传统的复合 Poisson 过程模型来描述车辆荷载随机过程假设太多,难以满足工程应用的要求。需要建立一种广义符合实际车辆运营状态的数值模型-非齐次复合 Poisson 模型。该模型将不同时段的车流密度强度的 Poisson

模型组合在一起,并能够将车重按照车型分类分别建立概率模型,其表达式为

$$s(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{n=0}^{N_i(t)} \zeta_{jn} \cdot I(t; \tau_{jn}) \quad (3)$$

式中 M 为日交通车流时间区间分段数, $N_i(t)$ 为时间区间 $[T_{i-1}, T_i]$ 的复合 Poisson 过程模型,其车流密度强度参数为 $\lambda_i(t)$, ζ_{jn} 为车辆中第 n 辆 j 型车, τ_{jn} 为第 n 辆 j 型车通过称重传感器的时长。

2.2 随机模型参数

2.2.1 时间区间

参数 M 代表非齐次复合 Poisson 模型中子复合随机模型的个数。 M 的取值越大,划分的时间区间则越多,模型越精确同时也越复杂。 M 的取值需要依据实际车流密度的实时统计曲线来确定。文献[10]统计了 2014 年南溪长江大桥的日交通流均值分布数据(图 1)。由图 1 可知,车流密度在 0 时~7 时区间保持恒定的疏松交通运营状态,可以作为第一个子区间。在 7 时~10 时段,车流量呈直线上升的趋势,作为第二个时间子区间。车流密度在 10 时~18 时时间区间维持在一个较高的密度运营状态,将其划分为第三个时间区间。在时间区间 18 时~24 时,车流密度直线下降,可以将其作为第四个时间区间。综上所述,本文将车辆荷载非齐次复合 Poisson 模型的参数 M 取值 4。

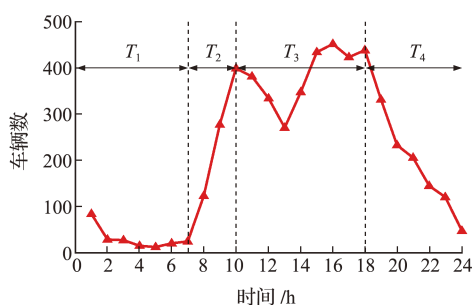


图 1 实时交通流量统计曲线
Fig. 1 Temporal distribution of traffic flow

2.2.2 时间间隔

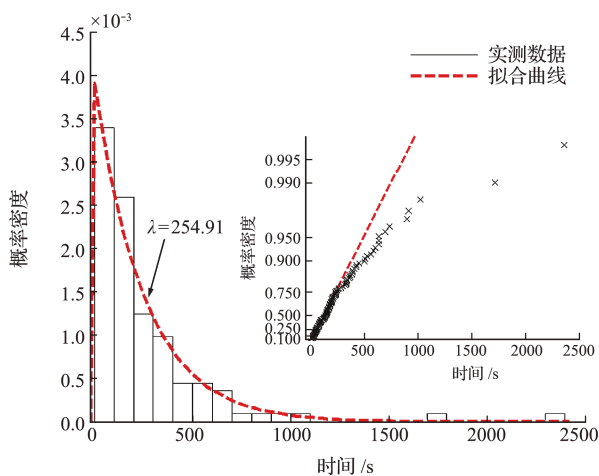
λ_i 为时间区间 $[T_{i-1}, T_i]$ 的车流密度强度。 T_i 的概率分布决定了车辆荷载随机过程模型的类型。本文假定车流随机过程模型用 Poisson 模型来描述,则时间 T 服从指数分布,概率密度函数可表示为

$$f(T) = \begin{cases} (1/\lambda_i) e^{-(1/\lambda_i)T} & (T \geq 0) \\ 0 & (T < 0) \end{cases} \quad (4)$$

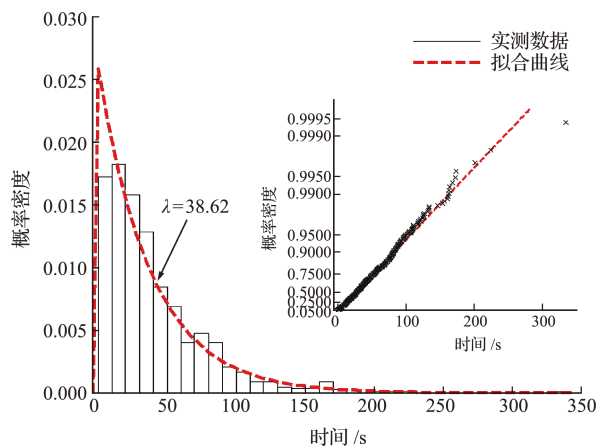
式中 λ_i 为指数分布的强度值。从图 1 可以看出,强度系数 λ_i 随时间呈一定的变化规律。将车流荷

载随机过程的时间区间分为 $[0, 7]$, $[7, 10]$, $[10, 18]$ 和 $[18, 24]$ 4个区间。分别统计时间区间 $[0, 7]$ 和 $[10, 18]$ 车辆时间间隔 T 的概率分布, 并采用指数分布拟合实测分布模型。图2给出了两个代表时段的实测统计分布与拟合模型的对比。采用分段函数来描述4个区间的强度系数 λ_i , 其表达式为

$$\lambda_i = \begin{cases} 254.91 & (0 \leq T < 7) \\ -108.15T + 1011.91 & (7 \leq T < 9) \\ 38.62 & (9 \leq T < 18) \\ 15.45T - 100.43 & (18 \leq T < 23) \end{cases} \quad (5)$$



(a) 0时~7时车辆时间间隔概率分布



(b) 9时~18时车辆时间间隔概率分布

图2 两时段车辆时间间隔概率分布

Fig. 3 Vehicle time interval probability distribution in two differences period of time

2.2.3 车型和车重

(1) 车型

不同车辆类型其车重的概率分布有所不同, 将车辆类型按照车辆轮轴数分为5类, 图3为5类典型车型日平均交通占用率。其中偶数车轴的车占据总重车交通比例的91%。奇数车轴占据交通总量比例的9%。

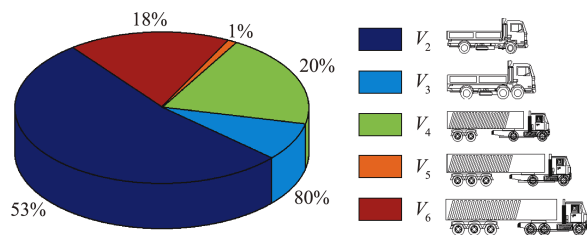


图3 5类典型车型占有率

Fig. 3 Occupation ratio of five types of vehicles

(2) 车重

车辆荷载母样本监测数据包含不同车型和车辆荷载率, 车辆荷载服从高斯混合分布, 则

$$p(x|\theta) = \sum_{i=1}^M w_i N(x|\mu_i, \sigma_i^2) = \sum_{i=1}^M w_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (6)$$

式中 μ_i 为车重的均值, σ_i^2 为方差, 矩阵 θ 包含变量 w_i , μ_i 和 σ_i^2 。表1给出了5类典型车辆车重高斯分布参数估计值。

表1 车重高斯混合模型参数

Tab. 1 GMM parameters of vehicle weight

车型	M_i	w_i	μ_i	σ_i^2
V_2	1	0.26	22.5	67.40
	2	0.27	5.50	3.80
	3	0.47	13.70	13.70
V_3	1	0.58	31.77	78.71
	2	0.24	17.22	6.80
	3	0.18	70.67	181.89
V_4	1	0.29	25.38	20.34
	2	0.20	33.32	93.64
	3	0.52	61.01	196.43
V_5	1	0.34	27.74	25.68
	2	0.42	62.06	383.07
	3	0.24	66.07	54.99
V_6	1	0.31	71.03	501.59
	2	0.20	75.04	78.92
	3	0.19	74.09	97.70
	4	0.29	33.34	41.15

2.2.4 时间参数 τ_{jn}

τ_{jn} 代表车辆荷载经历指定点所需要的时间, 可以用总轴长与车速的比值来定义, 即

$$\tau_{jn} = l_{jn} / v_{jn} \quad (7)$$

式中 l_{jn} 和 v_{jn} 分别为第 n 辆 j 型车经历的总轴长和车速。Guo 等^[11]认为车辆的轴长服从对数正态分布。同时, 对数正态分布模型也可以用来描述车速的概率分布^[12]。假设车辆的总轴长与车速的概率模型相互独立, 由经典统计学理论可知推导时间参数 τ_{jn} 服从对数正态分布。表2列出了时间参

数 τ_{jn} 的拟合模型参数。

表 2 时间参数 τ_{jn} 对数正态模型拟合参数
Tab. 2 Parameters of τ_{jn} Log-normal model

车型	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
μ_τ	0.42	0.55	0.65	0.73	0.80
σ_τ	0.02	0.03	0.05	0.08	0.12

2.4 疲劳应力随机过程

荷载模型需要转换成细节疲劳效应模型才能完成对结构细节疲劳裂纹随机扩展的预测。对于车辆荷载随机过程模型,包含 3 个关键的参数,即相邻两车的时间间距 T 、车辆经过测点的时间 τ_{jn} 和车的总重 ζ_n 。对于结构的荷载效应随机过程模型,两次脉冲效应的时间间距与相邻两车的时间间距 T 相对应。任意一次脉冲效应的持续时间与车辆经过测点的时间 τ_{jn} 相对应。采用瞬态分析将荷载转化成结构的疲劳应力。细节的疲劳应力随机过程模型可表示为

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{n=0}^{N_i(t)} F(\zeta_{jn}; T_e) \cdot I(t; \tau_{jn}) \quad (8)$$

式中 $F(\zeta_{jn}, T_e)$ 为当铺装层温度为 T_e 时,车辆荷载 ζ_{jn} 作用下结构细节节点应力的时间序列。

为实现荷载与应力效应之间的转化,在 ANSYS 平台建立正交异性钢箱梁结构的局部模型。由于局部模型单元划分数量较多,为减少计算量,建立半幅钢箱梁有限元模型。采用 solid45 单元和 shell63 单元分别模拟正交异性箱梁结构的沥青混凝土铺装层和钢箱梁正交异性板。对沥青混凝土铺装层、顶板、底板和 U 肋采用矩形进行网格划分,横隔板采用三角形进行网格划分。假设主梁结构在承受车辆荷载时不发生滑动位移和扭转,有限元模型边界节点的 6 个自由度全部约束。铺装层温度为 20 °C 时,沥青混凝土的弹性模量和泊松比分别为 6147 MPa 和 0.2。U 肋的顶板、腹板和底板厚度分别为 14 mm, 8 mm 和 10 mm。U 肋的弹性模量和泊松比分别为 210 GPa 和 0.3。主梁的局部有限元模型如图 4 所示。

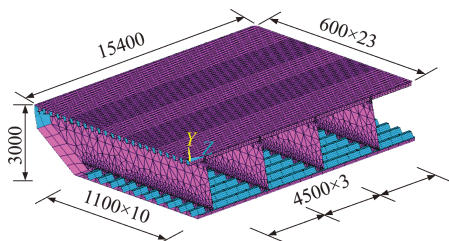


图 4 桥面板有限元模型

Fig. 4 Finite model of steel box girder

图 5 给出了 V₄ 过桥时 U 肋-顶板细节的疲劳应力模拟曲线与应力实测曲线对比。可以看出,模拟曲线和实测曲线整体拟合较好,表明有限元模型满足计算精度要求。

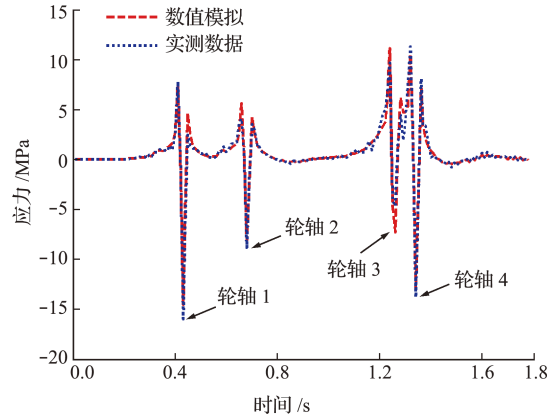


图 5 数值模拟和实测数据应力历程曲线对比

Fig. 5 Comparisons between the measured stress data and FEA results

3 疲劳裂纹随机扩展模型

S-N 曲线法不能考虑材料疲劳开裂的过程, Paris 等^[13]提出了疲劳裂纹开展模型

$$da/dN = C \cdot \Delta K^m \quad (9)$$

式中 C 和 m 为材料参数, a 为材料的疲劳裂纹尺寸, ΔK 为疲劳裂纹尖端附近的应力强度因子。该模型简单描述了裂纹扩展与应力强度因子之间的发展关系, Paris 模型只能计算恒定应力幅作用下的裂纹扩展行为,不能预测变幅作用下结构的疲劳寿命。Elber^[14]认为材料的裂纹张开需要一定的门槛应力,当循环应力大于开口应力时,裂纹才会开口,且裂纹尖端才会向前扩展。提出有效应力强度因子的表达式为

$$\Delta K_{\text{eff}} = \Delta K - \Delta K_{\text{op}} \quad (10)$$

式中 ΔK_{eff} 为有效应力强度因子, ΔK_{op} 为开口应力强度因子。

图 6 给出了材料裂纹从 t 时刻到 $t + \Delta t$ 时刻裂纹扩展的过程。在扩展过程中,材料的疲劳裂纹尖端从点 O 扩展至点 O' , 裂纹尖端的位移为 da , 裂纹的张开位移为 $d\delta$, $t + \Delta t$ 时刻裂纹的张开角度为 θ 。可推导裂纹的扩展位移 da 和裂纹的张开位移 $d\delta$ 之间的关系式为

$$da = \frac{\text{ctg} \theta}{2} d\delta \quad (11)$$

文献[15]通过试验观测得到疲劳裂纹的张开角度变化范围从初始裂纹的 90°到疲劳失效时的

$4^\circ \sim 6^\circ$ 。裂纹的张开角度与材料裂纹尖端的应力强度因子 ΔK 、材料屈服强度应力因子 ΔK_c 和材料裂纹开口应力强度因子 ΔK_{op} 存在相关关系,其表达式为^[16]

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \frac{\Delta K - \Delta K_{op}}{K_c - \Delta K_{op}} \quad (12)$$

式中 当细节承担的应力等于材料的开口应力时,则裂纹张开角度为 90° ;当效应应力等于材料的屈服应力时,裂纹张开角度为 0° 。

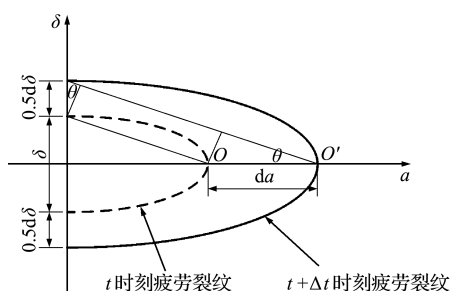


图6 半椭圆疲劳裂纹扩展

Fig. 6 Illustration of semi-elliptic fatigue crack propagation

正交异性板焊接细节点出现疲劳裂纹主要集中在有初始缺陷的部位,属于表面裂纹,故裂纹张开位移的表达式为^[17]

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{\Delta K^2}{E \sigma_y} \quad (13)$$

式中 E 为材料的弹性模量, σ_y 为材料的屈服应力。为进一步简化计算表达式,令

$$\lambda = \frac{\pi}{E \sigma_y} \quad (14)$$

则结合式(11~14),得到在时间 t 和 $t + \Delta t$ 时刻,裂纹张开位移和裂纹深度的关系式为

$$\delta = \lambda \sigma^2 a, \quad \delta' = \lambda (\sigma + d\sigma)^2 (a + da) \quad (15, 16)$$

对式(15,16)求差,得到

$$d\delta = \delta' - \delta = \lambda (2 \sigma a d\sigma + \sigma^2 da) \quad (17)$$

将式(17)代入式(11),得

$$\frac{1}{\operatorname{ctg} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{K_c - K_{op}} \right] / 2 \frac{\pi}{2 E \sigma_y} a(t)} \cdot \frac{da}{dt} = \frac{2 \sigma(t)}{1 - \operatorname{ctg} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{K_c - K_{op}} \right] / 2 \frac{\pi}{2 E \sigma_y} \sigma(t)^2} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad (18)$$

式(18)表达出了微元时间内应力变化引起裂纹尖端尺寸向前扩展的变化值的对应关系。从时间 t 到 $t + \Delta t$ 内,疲劳裂纹尺寸增长长度的表达式为

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{1}{\operatorname{ctg} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{K_c - K_{op}} \right] / 2 \frac{\pi}{2 E \sigma_y} a(t)} \cdot \frac{da}{dt} = \int_t^{t+\Delta t} \frac{2 \sigma(t)}{1 - \operatorname{ctg} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{K_c - K_{op}} \right] / 2 \frac{\pi}{2 E \sigma_y} \sigma(t)^2} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad (19)$$

参数 E , σ_y 和 K_c 均为材料的固有特征参数值,不随外界荷载或环境的变化而变化。表3列出了3个参数的取值。 $a(t)$ 为 t 时刻材料的椭圆形疲劳裂纹的长轴取值,也就是描述疲劳损伤大小的参数。当 $t=0$ 时, $a(0)$ 的取值为材料的初始缺陷裂纹尺寸。通过对现场的测量或假设得到。本文假设初始裂纹长轴长度值为 0.1 ^[18]。 $\sigma(t)$ 为结构材料关注点应力随时间的变化值。

表3 疲劳参数取值^[19]

Tab. 3 Value of fatigue parameters^[19]

材料	E/MPa	σ_y/MPa	$K_c/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
Q345 钢材	205000	345	91

开口应力强度因子 K_{op} 和有效应力强度因子 ΔK_{eff} 作为式(19)的两个复杂的参数变量需要进行详细讨论。根据正交异性板细节点的受力特点,主要受拉压作用,故 I 型裂纹为最危险的裂纹形态^[20]。本文选用 I 型裂纹作为疲劳裂纹的形态。应力强度因子的表达式为^[21]

$$K = F(a) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (20)$$

式中 $F(a)$ 为裂纹的形状函数。 $F(a)$ 的表达式由裂纹的几何形状决定。文献[22]给出了形函数的一般表达式为

$$F(a) = M_1 M_2 / P \quad (21)$$

式中 M_1 和 M_2 分别为裂纹表面修正系数和材料厚度修正系数, P 为形状参数。

$$M_1 = 1 + 0.12 [1 - a/(2c)]^2 \quad (22)$$

$$M_2 = 2w/(\pi a) \cdot \tan[\pi a/(2w)]^{1/2} \quad (23)$$

$$P = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - (1 - a/c)^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (24)$$

式中 a 和 c 分别为半椭圆裂纹的裂纹深度和裂纹宽度, w 为材料的厚度, θ 为裂纹的张开角。本文假设半椭圆的短长轴比值恒定,参考文献[23]的测量值 $a/c=0.1$,则应力强度因子的一般式为

$$K = 1.1 \cdot \left\{ 2w/(\pi a) \cdot \tan[\pi a/(2w)] \right\}^{1/2} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (25)$$

式(25)给出了正交异性板两类焊接细节构造应力强度系数的一般表达。对于开口应力强度因

子 K_{op} 所对应的开口应力 σ_{op} 需要确定。在恒幅荷载作用下,同一材料的疲劳裂纹开口应力保持不变。当荷载形式为变幅时,则材料的开口应力随荷载不同而改变。文献[24]认为裂纹在一个循环荷载作用结束后,裂纹从张开到闭合的过程中,会在裂纹尖端产生椭圆形的反塑性区域。当下一轮循环荷载作用时,拉应力使得裂纹尖端出现塑性区域的面积等于前一轮荷载造成的反塑性区域面积时,裂纹尖端才会从新张开^[25]。反塑性区和塑性区概念的提出解释了变幅荷载为何能够引起材料裂纹开口应力的变化。文献[26]给出反塑性区域半径的计算表达式为

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (26)$$

式中 r_p 为反塑性区域椭圆的长轴。

拉应力作用下,裂纹尖端的塑性区域面积大小为^[27]

$$r_f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K^*}{\sigma_y} \right)^2 \quad (27)$$

式中 $K^* = (\sigma_{eff} - \sigma_{min}) \sqrt{\pi a}$ (28)

当反塑性区域半径 r_p 等于塑性区域半径 r_f 时,裂纹尖端开始向前扩展。结合式(26,27),推导出第 i 次开口应力的表达式为

$$\sigma_{iop} = 1.1 \cdot \left(\frac{2\omega}{\pi a} \cdot \tan \frac{\pi a}{2\omega} \right)^{1/2} \Delta \sigma_{i-1} + \sigma_{imin} \quad (29)$$

式中 σ_{iop} 为第 i 次疲劳裂纹的开口应力, σ_{imin} 为第 i 次循环应力的最小值, $\Delta \sigma_{i-1}$ 为第 $i-1$ 次应力幅值。由式(29)可知,当前疲劳裂纹的开口应力与前一次的应力幅值关系密切。前一次应力幅值越大,当前的开口应力也就越大。值得说明的是,当 $i=1$ 时,依据式(29)可推导开口应力 $\sigma_{iop} = \sigma_{imin}$ 。若 $\sigma_{imin} \leq 0$,则式(29)不成立。故式(29)成立的边界条件为 $i > 1$ 。图 7 为两类疲劳裂纹尖端塑性区间对比。

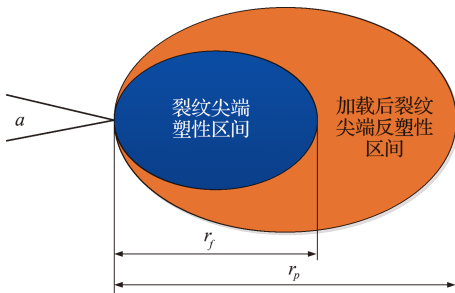


图 7 疲劳荷载作用下裂纹尖端的两塑性区间面积
Fig. 7 Two types of plastic zone under the cycle loading

由式(19)可知裂纹尖端扩展过程为一种随机

过程模型。基于桥梁健康监测数据和有限元计算数据对 OSD 两类典型的细节疲劳裂纹随机扩展模型进行讨论。疲劳裂纹的扩展随机性很强,不能用单一的裂纹扩展曲线来代表细节的裂纹扩展情况。图 8 列出了 100 次细节疲劳裂纹扩展的三个特征值的变化曲线。三个特征值分别为 5%分位值点、均值点和 95%分位值点。当桥梁结构服役 163.3 年时,细节节点的疲劳裂纹深度均值达到顶板的厚度。在桥梁服役年限区间[158.5,170.1],细节节点的疲劳失效概率为 90%。

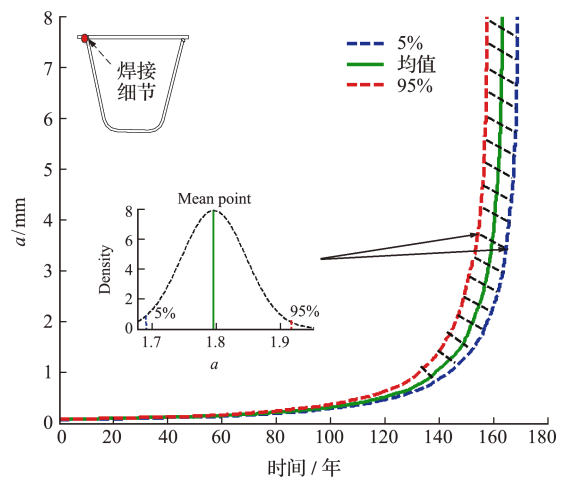


图 8 细节疲劳裂纹随机扩展
Fig. 8 Illustration of fatigue crack random propagation for details

4 讨论

4.1 不同车辆加载次序下疲劳裂纹随机扩展

工况 1 的车辆荷载加载次序遵循从大到小的原则,车辆加载次序依次为 V_6, V_5, V_4, V_3 和 V_2 ; 工况 2 则与工况 1 相反;工况 3 的加载次序介于工况 1 和工况 2 之间,加载次序依次为 V_3, V_5, V_6, V_4 和 V_2 。车辆的车重和轴重按照标准疲劳车辆取值。由图 9 可知,工况 1、工况 2 和工况 3 作用下,细节节点的疲劳寿命分别为 1062000, 1124000 和 1165000 次工况循环加载次。在 3 类工况中,工况 1 和工况 2 作用下的细节疲劳寿命最短和最长。在荷载应力幅和加载次数相同的情况下,两种工况作用下细节节点的疲劳寿命相差了 8.8%。重载车辆排序靠前,能够使得疲劳裂纹在初期得到迅速扩展。由于变量 a 在前期得到较快的增长,使得在后期轻载车辆加载时裂纹尖端应力强度因子仍能达到较高的水平,裂纹扩展速率能够保持在较高的水平。

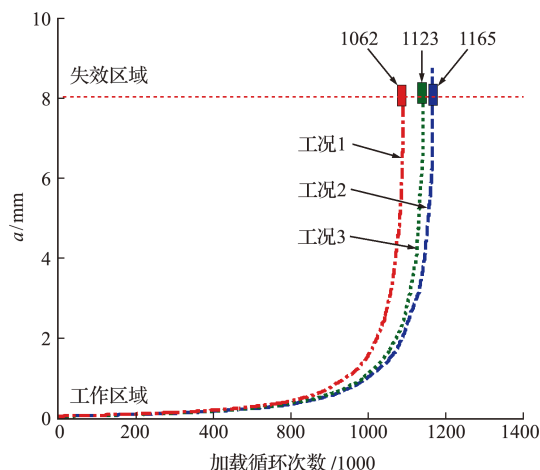


图9 不同工况作用下细节节点的裂纹扩展曲线
Fig. 9 Crack propagation under different vehicle loading sequences

4.2 车辆超载作用下的裂纹扩展模型

在工程实践过程中,超载车辆往往混在交通流之中改变疲劳裂纹的扩展行为,不可忽视超载车辆对结构疲劳寿命的影响。超载率与止裂循环数的对应关系为^[28]

$$R_{OL} = \frac{P_{OL}}{P_{eqm}} = \frac{\sigma_{OL}}{\sigma_{eqm}} = \frac{K_{OL}}{K_{eqm}} \quad (30)$$

式中 P_{OL} , σ_{OL} 和 K_{OL} 分别为超载对应的荷载、应力和应力强度因子。 P_{eqm} , σ_{eqm} 和 K_{eqm} 则为等效荷载、等效应力幅和等效应力强度因子。等效荷载 P_{eqm} 的表达式为^[29]

$$P_{eqm} = \left[\sum \frac{N_i}{N_{total}} \cdot p_i^3 \right]^{1/3} \quad (31)$$

式中 p_i 为第 i 次车辆轴重, N_i 为 p_i 的荷载数循环数, N_{total} 为总的监测车辆轮轴数量。

由于车辆荷载的轴重为变幅荷载,且轴重的概率分布据有多峰特征。对于超载率较小的轮轴 ($R_{OL} < 2$),细节节点的疲劳裂纹扩展往往不会发生迟滞效应。故本文仅讨论轮轴超载率大于2的车辆轮轴对细节疲劳寿命的影响。由WIM系统监测数据可知,2014年至2016年南溪长江大桥单行车道经历货车的轮轴数量的数量级为100万。在运营3年间,有2次车辆轮轴超载率大于2。图10为考虑与不考虑车辆轮轴超载率作用下细节节点在2014年至2016年疲劳裂纹扩展曲线。两种情况下,裂纹深度达到0.022 mm时所用的时间分别为30.02月和35.91月。考虑车辆超载迟滞效应的计算结果与传统计算结果相差19.6%,需考虑超载迟滞效应的修正系数 ξ_{OL} 。南溪长江大桥焊接细点的超载迟滞效应修正系数 ξ_{OL} 为0.804。

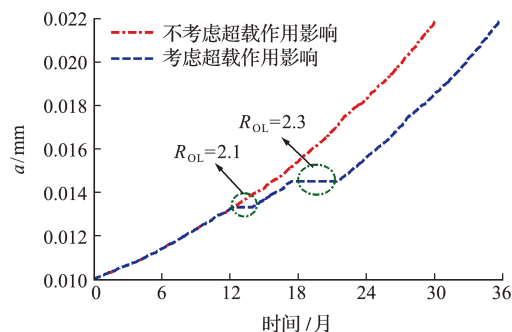


图10 考虑与不考虑车辆轮轴超载细节疲劳裂纹扩展曲线
Fig. 10 Illustration of crack propagation with and without considering overloads for Detail

5 结 论

本文从随机性的角度详细讨论了车辆作用下OSD焊接细节的疲劳扩展。得到以下结论。

(1) 日交通流密度在不同时间区段有着显著差异,车辆荷载的随机过程不能用单一的数学随机过程模型来描述。非齐次复合Poisson过程模型与车辆实际运营状态拟合度高。

(2) 推导了应力时间序列-疲劳损伤微分方程,该方程可以描述车辆疲劳效应与材料疲劳抗力之间的耦合关系。

(3) 车载次序和超载对疲劳裂纹的扩展速率的影响不可忽略。相同车辆类型和数量的车辆,当重车排序靠前时能够促使裂纹快速扩展。在交通荷载统计数据中,需要对超载车辆轴重的超载率和数量进行统计,南溪长江大桥焊接细点的超载迟滞效应修正系数为0.804。

参考文献(References):

- [1] 张海萍,刘 扬,邓 扬,等.基于实测数据的扁平钢箱温度梯度疲劳应力谱分析方法[J].计算力学学报,2017,34(4):466-473. (ZHANG Hai-ping, LIU Yang, DENG Yang, et al. A calculation method of thermal fatigue stress spectrum for flat steel girder box based on measurement data[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 34(4): 466-473. (in Chinese))
- [2] 余志武,朱红兵,蒋丽忠,等.公路桥梁车辆荷载随机过程模型[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(10):3131-3135. (YU Zhi-wu, ZHU Hong-bing, JIANG Li-zhong, et al. Vehicles load stochastic process model of highway bridges[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2011, 42(10): 3131-3135. (in Chinese))
- [3] 罗 媛,颜东煌,袁 明.随机车辆冲击作用下简支梁桥疲劳可靠度评估[J].计算力学学报,2018,35(4):

- 417-423. (LUO Yuan, YAN Dong-huang, YUAN Ming. Fatigue reliability assessment of simply supported bridges subject to impact of stochastic vehicle loads[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, **35**(4):417-423. (in Chinese))
- [4] Ditlevsen O. Traffic loads on large bridges modeled as white-noise fields[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, **120**(4):681-694.
- [5] Chen Y B, Feng M Q, Tan C A. Modeling of traffic excitation for system identification of bridge structures[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2006, **21**(1):57-66.
- [6] 王磊, 张建仁. 基于平衡更新过程的既有桥梁车辆荷载效应模型[J]. 中国公路学报, 2008, **21**(5):50-56. (WANG Lei, ZHANG Jian-ren. Vehicle load effect model for existing bridge based on equilibrium renewal process[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, **21**(5):50-56. (in Chinese))
- [7] European Committee for Standardization (CEN). EN1993-1-9, Eurocode 3. Design of Steel Structures-part 1-9; Fatigue[S]. CEN, Brussels, 2005.
- [8] 朱太勇, 周广东, 张欢, 等. 钢箱梁正交异性桥面板疲劳评估全空间 S-N 曲线研究[J]. 工程力学, 2017, **34**(11):210-217. (ZHU Tai-yong, ZHOU Guangdong, ZHANG Huan, et al. A full range S-N curve for fatigue evaluation of orthotropic bridge decks in steel box-girders [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, **34**(11):210-217. (in Chinese))
- [9] Mei G, Qin Q, Lin D J. Bimodal renewal processes models of highway vehicle loads[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2004, **83**(3):333-339.
- [10] Liu Y, Zhang H P, Deng Y, et al. Effect of live load on simply supported bridges under a random traffic flow based on weigh-in-motion data [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2017, **20**(5):722-736.
- [11] 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.
- [12] Pei X, Sze N N, Wong S C, et al. Disaggregated crash prediction models for different crash types using joint probability model[A]. 2nd International Conference on Transportation Information and Safety[C]. 2013.
- [13] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, **85**(4):528-533.
- [14] Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1970, **21**:37-45.
- [15] Newman J C Jr, James M A, Zerbst U. A review of the CTOA/CTOD fracture criterion[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, **70**(3-4):371-385.
- [16] Srinivasan K, Siegmund T, Kolednik O. A study on crack propagation in heterogeneous elastic-plastic solids[A]. ECF15, Stockholm[C]. 2004.
- [17] Suresh S. *Fatigue of Materials*[M]. Cambridge University Press, 1998.
- [18] Xiao Z G, Yamada K, Inoue J, et al. Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, **28**(4):409-416.
- [19] Lu Z Z, Liu Y M. Small time scale fatigue crack growth analysis[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, **32**(8):1306-1321.
- [20] 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.
- [21] Newman J C Jr, Raju I S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1981, **15**(1-2):185-192.
- [22] Sih George C. *Handbook of Stress-intensity Factors for Researchers and Engineers; Stress-intensity Factor Solutions and Formulas for Reference*[M]. Institute of Fracture and Solid Mechanics, Lehigh University, 1973.
- [23] Xiao Z G, Yamada K, Inoue J, et al. Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, **28**(4):409-416.
- [24] McClung R C. Crack closure and plastic zone sizes in fatigue[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1991, **14**(4):455-468.
- [25] Irwin G R. Plastic zone near a crack and fracture toughness[A]. Mechanical and Metallurgical Behavior of Sheet Materials, Seventh Sagamore Ordnance Materials Research Conference[C]. 1960.
- [26] Rice J R. Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue[A]. Fatigue Crack Propagation [C]. 1967.
- [27] Irwin G R. Linear fracture mechanics, fracture transition, and fracture control[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1968, **1**(2):241-257.
- [28] Taheri F, Trask D, Pegg N. Experimental and analytical investigation of fatigue characteristics of 350WT steel under constant and variable amplitude loadings [J]. *Marine Structures*, 2003, **16**(1):69-91.
- [29] Zhang H P, Liu Y, Deng Y. Fatigue crack assessment for orthotropic steel deck based on compound poisson process[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, **25**(8):04020057.

Fatigue crack stochastic growth assessment of the orthotropic steel bridge deck based on Nonhomogeneous compound Poisson process model

ZHANG Hai-ping^{*1}, LIU Yang², LUO Yuan¹, ZHENG Hui¹, DENG Yang²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The traditional fatigue damage assessment of orthotropic steel decks (OSD) commonly used deterministic and reliability analysis methods. The effect of stochastic fatigue crack propagation was ignored. For this reason, the article proposed a new stochastic fatigue crack propagation analysis method for OSD welds. Taking Nanxi Yangtze River Bridge as the project background, the non-homogeneous compound Poisson process model for the vehicle load was established based on the long-term vehicle load monitoring data. The finite element model of a steel bridge deck was established. Then, the OSD fatigue stresses under the vehicle loading were analyzed using a transient analysis. The time-varying differential equations for fatigue crack propagation from U rib to deck were derived based on the linear elastic fracture mechanics theory. Then, the macroscopic relationship fatigue stress amplitude times-fatigue damage was converted to the microscopic relationship stress time series-fatigue damage. The influences of vehicles order and overload on fatigue crack propagation are discussed. The research shows that the nonhomogeneous compound Poisson process model fit the operation state of random traffic flow well. The loading sequence is influential, for example, crack propagated faster when the higher vehicle load was at the front of a vehicle sequence. An overload correction factor of 0.804 is proposed for the Nanxi Yangtze River Bridge.

Key words: bridge engineering; orthotropic steel deck; overload; nonhomogeneous Poisson process model; stochastic fatigue

引用本文/Cite this paper:

张海萍, 刘 扬, 罗 媛, 等. 基于非齐次复合 Poisson 过程的正交异性钢桥面板细节疲劳裂纹随机扩展研究[J]. 计算力学学报, 2022, 39(5): 614-622.

ZHANG Hai-ping, LIU Yang, LUO Yuan, et al. Fatigue crack stochastic growth assessment of the orthotropic steel bridge deck based on Nonhomogeneous compound Poisson process model[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(5): 614-622.