

考虑非线性累积损伤的桥梁疲劳寿命分析

王会利^{*1,2}, 秦泗凤³, 谭岩斌¹

(1. 大连理工大学 桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116024;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 大连大学 材料破坏力学数值试验研究中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 为了准确反映桥梁非线性累积损伤,建立了桥梁非线性累积损伤模型,并分析了模型中主要参数对桥梁疲劳寿命的影响.首先,基于损伤力学理论,引入桥梁非线性累积损伤模型和对应的等效应力幅计算公式.然后,分析模型中主要参数对结构疲劳性能的影响.最后,用桥梁非线性累积损伤模型和 Miner 模型分析大连某大桥的疲劳性能.研究发现,随着材料参数 α 的减小,结构损伤增大,并且等效应力幅是影响结构损伤的主要因素.桥梁非线性累积损伤模型能准确反映实际的非线性累积损伤过程,而 Miner 模型偏保守.

关键词: 非线性累积损伤;疲劳寿命;Miner 模型;参数分析

中图分类号: TU311;P315.9 **文献标识码:** A **doi:**10.7511/dllgxb201604006

0 引言

疲劳破坏是钢桥主要的破坏形式之一.据美国土木工程师协会统计,80%~90%的钢桥破坏与疲劳有关^[1].研究结构疲劳通常采用断裂力学、损伤力学等,它们属于破坏力学范畴.一般认为,一个完好的结构,内部也有微观缺陷,在反复荷载作用下,微观缺陷逐步形成0.1~1.0 mm的微观裂纹,这个过程属于损伤力学研究的范畴.之后,微观裂纹逐步扩展为宏观裂纹,直至裂纹失稳,这个过程属于断裂力学研究的范畴^[2].现有的结构损伤分析中,大多数采用 Miner 理论,它是疲劳累积损伤理论中最简单的,得到了工程技术人员的广泛应用^[3].但是 Miner 理论是线性的,不能准确反映实际的非线性累积损伤过程,将其应用于以疲劳评估为目标的分析计算时,与实际非线性累积损伤过程有较大偏差^[4].为此,黄洪钟等提出了剩余强度衰减退化的非线性累积损伤准则^[5];Li 等提出了桥梁结构疲劳非线性累积损伤模型^[6-8];Li 等采用连续非线性损伤模型分析了青马大桥的损伤

情况^[6];陈志为等针对大跨多荷载桥梁结构疲劳非线性累积损伤过程中的大量不确定性,对火车、汽车与风荷载作用下的大跨悬索桥,利用连续损伤模型提出了一种疲劳可靠度评估方法^[9].本文在前人的研究基础上,分析非线性累积损伤模型中主要参数对结构疲劳性能的影响,并基于该模型,分析某桥的疲劳寿命,与 Miner 模型相互对比.

1 非线性累积损伤模型

损伤力学研究含有各类微缺陷的变形固体,这些微缺陷可视为连续地分布在固体或材料内部.连续损伤力学中定义损伤指标为

$$D=1-\frac{\tilde{a}}{a}$$

式中: a 为名义横截面面积, $\tilde{a}$ 为考虑损伤后的有效截面积.

Lemaitre 基于连续介质热力学和耗散能理论^[2],建立了高周疲劳损伤演化方程:

$$\dot{D}=\begin{cases} \frac{R_v \sigma_{eq}^2 |\sigma_{eq}-\bar{\sigma}_{eq}|^\beta}{B(1-D)^\alpha} \langle \dot{\sigma}_{eq} \rangle; & \sigma^* \geq \sigma_f \\ 0; & \sigma^* < \sigma_f \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2016-01-12; 修回日期: 2016-05-12.

基金项目: 国家留学基金资助项目(201506060044,201508210247);辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2014027);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT15QY34);亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金资助项目(2014KB11).

作者简介: 王会利^{*}(1979-),男,博士,副教授,E-mail:wanghui@dlut.edu.cn.

式中: B, α, β 是材料常数; σ_{eq} 为 von Mises 等效应力; σ_f 为疲劳应力极限; $\dot{D}$ 为损伤变化率; $\dot{\sigma}_{eq}$ 为等效应力变化率. 符号 $\langle \rangle$ 是 McCauley 括号, 即表示当 $x > 0$ 时, $\langle x \rangle = x$; 当 $x < 0$ 时, $\langle x \rangle = 0$. σ^* 为损伤等效应力, 在塑性阶段就是 von Mises 等效应力. R_v 是三轴应力函数. 在单轴应力状态下, 式(1)可以简化为

$$\dot{D} = \begin{cases} \frac{\sigma^2 |\sigma - \sigma_m|^\beta}{B(1-D)^\alpha} \langle \dot{\sigma} \rangle; & \sigma^* \geq \sigma_f \\ 0; & \sigma^* < \sigma_f \end{cases} \quad (2)$$

其中 σ 为轴向应力, σ_m 为平均应力. 为了便于分析, 先忽略平均应力的影响 ($\sigma_m = 0$), 并不计 $(1-D)^\alpha$ 的变化, 对式(2)在一个应力循环块中积分可得

$$\int_D^{D+\frac{\delta D}{N_{bl}}} dD = \sum_{i=1}^{m_{rb}} \int_0^{\sigma_{\max, ri}} \frac{\sigma^{\beta+2}}{B(1-D)^{\alpha_i}} d\sigma \quad (3)$$

式中: m_{rb} 为块中最大应力下的循环数的上限; N_{bi} 为当前块循环数; $\sigma_{\max, ri}$ 为第 i 次循环的最大应力, 且 $\sigma_{\max, ri} > \sigma_f$. 当 $\sigma_m = 0$ 时, 应力幅 $\sigma_{ar} = \sigma_{\max, r}$, 所以由式(3)可得

$$\frac{\delta D}{\delta N_{bl}} = \sum_{i=1}^{m_{rb}} \frac{\sigma_{ari}^{\beta+3}}{B(\beta+3)(1-D)^{\alpha_i}} \quad (4)$$

其中 N_{bl} 为循环块数量. 对式(4)积分可得

$$N_{bl} = \sum_{i=1}^{m_{rb}} \frac{B(\beta+3)}{(\alpha+1)} [1 - (1-D)^{\alpha+1}] \sigma_{ari}^{-(\beta+3)} \quad (5)$$

整理得

$$D = 1 - \left[1 - \frac{(\alpha+1)N_{bl}}{B(\beta+3)} \sum_{i=1}^{m_{rb}} \sigma_{ari}^{\beta+3} \right]^{1/(\alpha+1)} \quad (6)$$

进一步考虑平均应力的影响, 根据 SWT 方程^[10], 有

$$\sigma_{ar} = (\sigma_{\max} \sigma_a)^{1/2}, \quad \sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m$$

代入式(6)可得非线性累积损伤模型为

$$D = 1 - \left\{ 1 - \frac{(\alpha+1)N_{bl}}{B(\beta+3)} \sum_{i=1}^{m_{rb}} [(\sigma_{ai} + 2\sigma_{mi})\sigma_{ai}]^{\frac{\beta+3}{2}} \right\}^{1/(\alpha+1)} \quad (7)$$

2 基于损伤力学理论的等效应力

由式(4)和 SWT 方程可得

$$\frac{\delta D}{\delta N_{bl}} = \sum_{i=1}^{N_t} \frac{[(\sigma_{ai} + 2\sigma_{mi})\sigma_{ai}]^{\frac{\beta+3}{2}}}{B(\beta+3)(1-D)^{\alpha_i}} \quad (8)$$

其中 N_t 为总循环数量. 如果用等效应力幅表示,

上述方程的特殊形式为

$$\frac{\delta D}{\delta N_{bl}} = \frac{N_t \Delta \sigma_{ef}^{\beta+3}}{B(\beta+3)(1-D)^{\alpha_i}} \quad (9)$$

根据损伤等效原则, 可得基于连续损伤力学的等效应力幅为

$$\Delta \sigma_{ef} = \left\{ \sum_i \frac{n_i}{N_t} [(\sigma_{ai} + 2\sigma_{mi})\sigma_{ai}]^{\frac{\beta+3}{2}} \right\}^{\frac{1}{\beta+3}} \quad (10)$$

其中 n_i 为应力幅等于 σ_a 的循环数.

3 模型参数分析

式(7)中, B, α, β 是材料常数, 需要通过等效应力幅周期循环荷载下的不同应力比 Woehler 曲线来确定^[6]. 需要注意的是, α 与应力幅相关. 为了便于说明问题, 根据文献[9], 假定 $\beta = 0$, $\frac{B(\beta+3)}{\alpha+1} = 6.3 \times 10^{11}$, $\Delta \sigma_{ef} = 16$ MPa, 计算结果如图 1 所示.

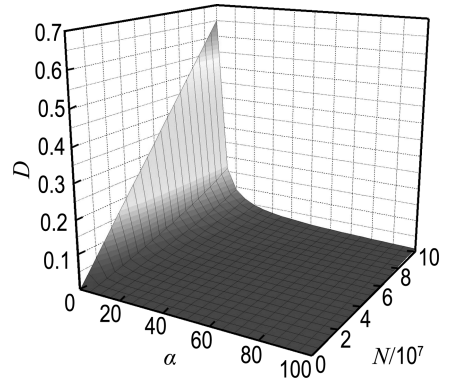


图1 α - N - D 关系

Fig. 1 Relationship between α , N and D

从图 1 可以看出, 当 $\alpha > 20$ 时, α 对结构损伤的影响基本可以忽略不计.

为了进一步研究 α 对结构损伤的影响, 分别令 α 为 0、30、60、90, 可以得到结构损伤指标 D , 计算结果如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 随着 α 的减小, 其对结构损伤的影响在增大. 当 $\alpha = 0$ 时, 非线性累积损伤模型已经退化为 Miner 模型, 此时 α 对结构损伤影响达到线性.

另外, 假定 $\alpha = 50$, 等效应力幅 $\Delta \sigma_{ef}$ 、荷载作用次数 N 对结构损伤的影响如图 3 所示. 从图中可以看出, 随着荷载作用次数 N 的增加, 损伤指标 D 是线性增加的. 而随着等效应力幅 $\Delta \sigma_{ef}$ 的增加,

损伤指标 D 是抛物线式增加的. 可见等效应力幅 $\Delta\sigma_{ef}$ 是影响结构损伤的主要因素.

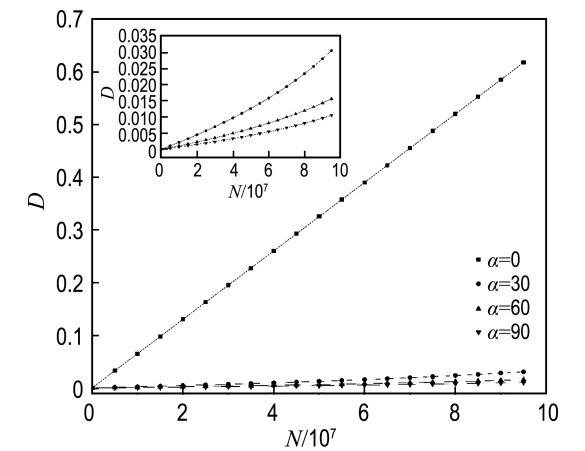


图 2 不同 α 下 N - D 的关系
Fig. 2 Relationship between N and D under different α

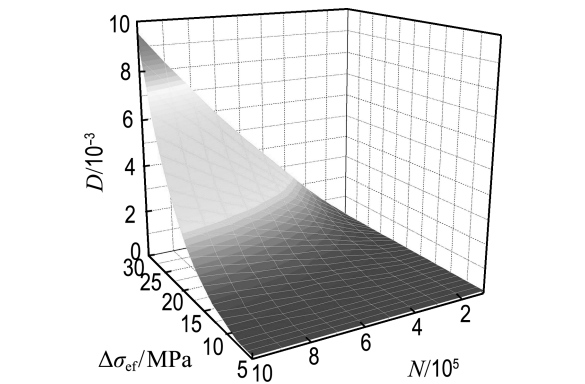


图 3 $\Delta\sigma_{ef}$ - N - D 关系
Fig. 3 Relationship between $\Delta\sigma_{ef}$, N and D

4 实例分析

本文以大连某跨海大桥为例,该桥为地锚式悬索桥.加劲梁为钢桁架结构,计算跨径 820 m,主桥桁架轴线宽 24 m,如图 4 所示.上下两层各单向 4 车道,设计汽车荷载为公路 I 级.

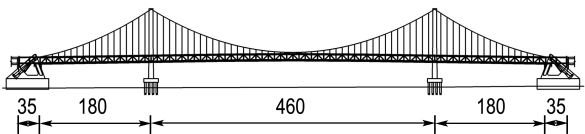


图 4 桥梁立面布置(单位:m)
Fig. 4 Bridge elevation plan (unit:m)

参考 AASHTO 和 BS5400 规定的标准疲劳车荷载^[11],周泳涛等给出了辽宁地区的标准疲劳

车辆荷载^[12],如图 5 所示.

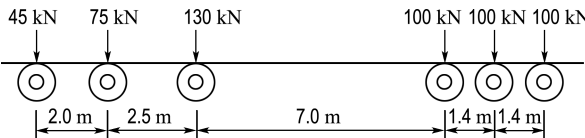


图 5 辽宁省标准疲劳车辆荷载
Fig. 5 Standard fatigue vehicle load of Liaoning province

采用辽宁省标准疲劳车辆加载,桁架弦杆轴力幅如图 6 所示.8 号节点处轴力幅最大,应重点关注此处的疲劳性能.该节点为整体节点,由横向对接焊缝连接,疲劳细节类别为 110^[13-14].

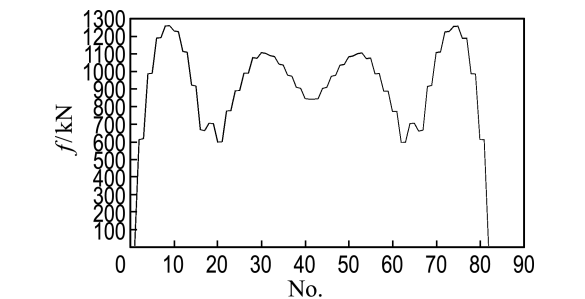


图 6 桁架弦杆轴力幅
Fig. 6 Chord axial force amplitude of truss

将辽宁省标准疲劳车以 80 km/h 的速度匀速通过大桥,8 号节点的应力时程曲线如图 7 所示.

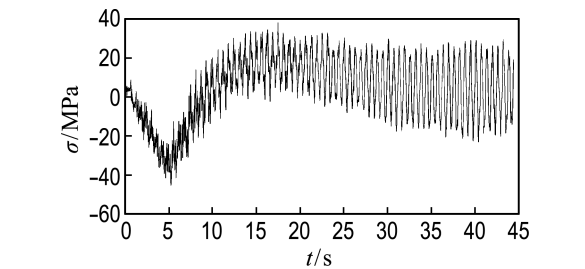


图 7 8 号节点的应力时程曲线
Fig. 7 Stress time-history curve of node 8

用雨流计法^[3,15-16]处理上述时程曲线,可以得到 8 号节点的雨流矩阵图,如图 8 所示.

根据式(7)、(10)可以得到结构的等效应力幅和疲劳寿命,结果见表 1.表 1 中同时列出 Miner 模型的计算结果,可见 Miner 模型是偏保守的.

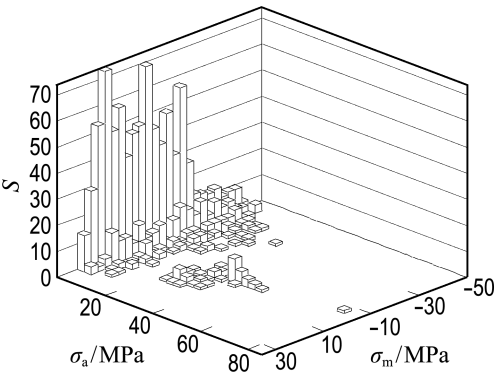


图 8 8 号节点的雨流矩阵图

Fig. 8 Rain flow matrix of node 8

表 1 等效应力幅及疲劳寿命计算结果

Tab. 1 Calculation results of equivalent stress amplitude and fatigue life

模型	等效应力幅/MPa	疲劳寿命/次
Miner 模型	51.7	4.26×10^7
非线性累积损伤模型	16.3	2.41×10^9

5 结 论

(1)引入基于损伤力学理论的桥梁非线性累积损伤模型,分析了模型中主要参数对结构疲劳性能的影响.随着材料参数 α 的减小,其对结构损伤的影响增大.当 $\alpha=0$ 时,非线性累积损伤模型已经退化为 Miner 模型,此时 α 对结构损伤的影响达到线性.

(2)随着等效应力幅 $\Delta\sigma_{ef}$ 的增加,损伤指标 D 呈抛物线式增加,等效应力幅 $\Delta\sigma_{ef}$ 是影响结构损伤的主要因素.

(3)非线性累积损伤模型与 Miner 模型相比,能准确反映实际的非线性累积损伤过程,而 Miner 模型偏保守.

参考文献：

[1] Committee on Fatigue and Fracture Reliability of the Committee on Structure Safety and Reliability of the Structural Division. Fatigue reliability 1-4 [J]. ASCE Journal of the Structural Division, 1982, 108(ST1):3-88.

[2] Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics [M]. 2nd ed. Berlin:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.

[3] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 2 版. 北京:人民

交通出版社, 2013.

XIANG Hai-fan. Advanced Theory of Bridge Structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)

[4] 李兆霞,王莹. 在役桥梁结构疲劳监测与评估[M]. 北京:科学出版社, 2012.

LI Zhao-xia, WANG Ying. Fatigue Analyses and Evaluation of Existing Bridges with Monitoring Data [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)

[5] 黄洪钟,朱顺鹏,汪忠来,等. 基于剩余强度衰减退化的非线性累积损伤准则及其可靠性定寿[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(2):323-334.

HUANG Hong-zhong, ZHU Shun-peng, WANG Zhong-lai, et al. Nonlinear fatigue damage cumulative rule based on strength degradation and its application to fatigue life reliability analysis [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(2):323-334. (in Chinese)

[6] Li Z X, Chan T H T, Ko J M. Fatigue damage model for bridge under traffic loading; application made to Tsing Ma Bridge [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2001, 35(1):81-91.

[7] 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.

[8] Chan T H T, Li Z X, Ko J M. Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data — Part II: application [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(1):55-64.

[9] 陈志为,徐幼麟. 考虑非线性累积损伤的大跨多荷载桥梁的疲劳可靠度评估[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(2):213-219.

CHEN Zhi-wei, XU You-lin. Fatigue reliability analysis of multi-loading suspension bridges considering nonlinear accumulative damage [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(2):213-219. (in Chinese)

[10] Dowling N E. Mean stress effects in strain-life fatigue [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2009, 32(12):1004-1019.

[11] 刘杰,叶见曙,陈娟娟. 基于交通量调查的大跨

PC 箱梁跨中中段疲劳应力谱[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, **23**(2):273-284.

LIU Jie, YE Jian-shu, CHEN Juan-juan. Analysis on fatigue stress spectrum for mid-span segments of long span PC box girders based on traffic volume survey [J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2015, **23**(2):273-284. (in Chinese)

[12] 周泳涛,翟 辉,鲍卫刚,等. 公路桥梁标准疲劳车辆荷载研究[J]. 公路, 2009, **12**(12):21-25.

ZHOU Yong-tao, ZHAI Hui, BAO Wei-gang, *et al.* Research on standard fatigue vehicular load for highway bridges [J]. **Highway**, 2009, **12**(12): 21-25. (in Chinese)

[13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015 [S]. 北京:人民交通出版社, 2015.

CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Specifications for Design of Highway Steel Bridge; JTJG D64-2015 [S]. Beijing:China Communications Press, 2015. (in Chinese)

[14] 程 帅,王会利,韩加伦,等. 钢桁架整体节点研究综述[J]. 钢结构, 2012, **27**(6):1-4.

CHENG Shuai, WANG Hui-li, HAN Jia-lun, *et al.* Review of the study of integral panel points of steel truss girder [J]. **Steel Construction**, 2012, **27**(6):1-4. (in Chinese)

[15] 胡宗武,董邦宣. “雨流法”与疲劳寿命估算[J]. 机械强度, 1985, **7**(4):53-60.

HU Zong-wu, DONG Bang-xuan. Rain-flow counting method and fatigue life evaluation [J]. **Mechanical Strength**, 1985, **7** (4): 53-60. (in Chinese)

[16] 毕继红,陈花丽,任洪鹏. 基于雨流计数法的接触线疲劳寿命分析[J]. 铁道学报, 2012, **34**(6):34-39.

BI Ji-hong, CHEN Hua-li, REN Hong-peng. Analysis on fatigue life of contact wire based on rain-flow counting method [J]. **Journal of the China Railway Society**, 2012, **34**(6):34-39. (in Chinese)

Bridge fatigue life analysis considering nonlinear accumulative damage

WANG Hui-li^{*1,2}, QIN Si-feng³, TAN Yan-bin¹

(1. Institute of Bridge Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
 3. Materials Fracture Mechanics Research Center for Numerical Test, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: To accurately reflect the nonlinear accumulative damage of bridge, a bridge nonlinear accumulative damage model was proposed and the effect of the main parameter in the model on bridge fatigue life was analyzed. Firstly, the bridge nonlinear accumulative damage model based on damage mechanics was propounded and a formula for calculating equivalent stress amplitude was given. Then, the effect of the main parameter in the model on fatigue life was analyzed. Finally, the fatigue life of a bridge in Dalian was analyzed based on the bridge nonlinear accumulative damage model and Miner model. The research results indicate that the damage is increased with the reduced material parameter α and equivalent stress amplitude is the main factor to structure damage. The bridge nonlinear accumulative damage model can reflect actual nonlinear accumulative damage process while Miner model is pessimistic.

Key words: nonlinear accumulative damage; fatigue life; Miner model; parameter analysis