

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202111035

高层建筑风致疲劳分析中的钢材强度退化模型*

郑晓伟^{1,2}, 吕恒林^{1,2}, 李宏男³, 张莹莹¹

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏建筑节能与建造技术工程技术中心, 江苏 徐州 221116; 3. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 全寿命周期内风荷载长期作用下, 钢结构中的钢材和节点将出现不同程度的累积损伤。风致疲劳损伤后结构的抗震能力必然发生相应变化, 而疲劳累积损伤条件下的材料和节点剩余力学性能模型, 是准确开展损伤后结构抗震性能评估的关键。鉴于此, 通过贝叶斯理论, 建立基于物理机制的钢材强度退化模型分析方法。首先, 收集高周疲劳预损伤钢材强度退化的试验数据, 并选取常用的强度退化模型, 通过贝叶斯更新准则确定了退化模型参数的后验估计值。其次, 基于钢材强度退化模型, 给出了确定风致疲劳劣化焊接梁柱节点弯矩和转角骨架曲线的分析方法。结果表明: (1) 疲劳累积损伤条件下的传统钢材强度退化模型离散性大, 且缺少必要的数学和物理依据, 而基于贝叶斯理论的强度退化模型可有效弥补这一缺陷; (2) 相同试验数据, 不同强度退化模型得到的结果差异性较大, 且不存在普遍适用的最优模型。通过贝叶斯理论建立的钢材强度退化模型, 可有效考虑材料型号、试件尺寸、疲劳荷载模式和加载机制等多种因素对试验结果的影响, 且可借此反映风致累积损伤对结构性能退化的影响, 有助于提高风致疲劳损伤后高层钢结构建筑地震风险评估结果的可靠性。

关键词: 强度退化模型; 风致疲劳; 贝叶斯理论; 焊接节点; 高层钢结构

中图分类号: TU312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0276-07

Steel Strength Degradation Model for Wind-induced Fatigue Analysis of High-rise Buildings

ZHENG Xiaowei^{1,2}, LYU Henglin^{1,2}, LI Hongnan³, ZHANG Yingying¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Building Energy Saving and Construction Technology, Xuzhou, 221116, China;
3. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In the whole lifetime of steel structures subject to long-term wind loads, there will be fatigue damage accumulation in the steel material and beam-to-column connections. Seismic performance of the structures will certainly change because of the wind-induced fatigue. It is essential to determine the residual mechanical properties of the steel materials and connections under the action of fatigue cumulative damage when assessing the seismic performance of the deteriorated structures. In this regard, a Bayesian-based method is proposed to establish the physics-based strength degradation model of steel. Firstly, collect the static mechanical experimental data of pre-fatigued steel and choose the widely used strength degradation models, then the Bayes theory is used to develop posterior probabili-

* 收稿日期: 2021-10-04; 修回日期: 2021-11-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2021-11044)、徐州市住房和城乡建设局攻关项目(2019-10612)资助

作者简介: 郑晓伟(1990—), 男, 讲师, 博士。主要从事工程结构多灾害效应与韧性评估研究。E-mail: xwz217@163.com

ty distribution of the unknown model parameters. Secondly, according to the strength degradation model of steel, an analytical method is presented to develop the moment-rotation model for the fatigued welded connections. It can be concluded that: (1) Traditional strength degradation model considering the fatigue cumulative damage will produce large scatter, and lacks necessary mathematical and physical background, which limits their applications, on the contrary, the degradation model obtained by the Bayesian-based method can effectively reduce the model error. (2) For the same test data, there is significant difference in different degradation models and there is no universally applicable optimal strength degradation model. The effects of steel type, experimental specimen size, fatigue load mode and loading mechanism can be well considered in the proposed physics-based strength degradation model. Furthermore, this presented degradation model can be used to reflect the impacts of the wind-induced fatigue cumulative damage on the structural behaviors' deterioration, which is beneficial to improve the reliability of seismic risk assessment on the deteriorated high-rise steel structure buildings suffered the wind-induced fatigue cumulative damage.

Keywords: strength degradation model; wind-induced fatigue; Bayes theory; beam-to-column connection; high-rise steel structure

引 言

风致累积损伤对高层钢结构的影响,主要体现在钢材的力学性能退化以及结构节点的连接能力衰退,进而造成结构整体性能的劣化。高层钢结构建筑具有较长服役期,服役期内可能遭受不同强度风荷载的反复作用。对于金属材料而言,风荷载长期作用引起的高周疲劳是一个不可逆的能量耗散过程;在低循环应力作用下,钢材内部将会出现不同程度的微观损伤,累积损伤达到材料疲劳极限时便会发生破坏^[1-2]。

在疲劳破坏前,钢材的强度和应变等力学性能将随着损伤的累积而衰退^[3-5]。已有研究指出^[6-9],疲劳荷载作用下材料的宏观强度退化模型,可表示为材料加载荷载比(循环应力幅值与未损伤钢材抗拉强度的比值)和加载循环比(加载应力循环次数与相应应力所对应疲劳寿命的比值)等变量的多种函数关系。目前,关于疲劳累积损伤条件下材料强度退化模型的研究,主要集中于复合材料^[6]。试验方法是研究疲劳荷载作用下材料强度退化规律的常用手段。李铁英等^[10]、段忠东等^[11]基于连续介质损伤力学,推导了材料在高周疲劳荷载作用下的损伤演化模型,并通过对比45#钢和16Mn钢两种常用钢材的相关试验表明,钢材的剩余强度随累积损伤程度显著降低。

传统高周疲劳过程中的材料强度退化模型,通常只关注给定循环应力水平下材料强度关于加载

循环比的退化过程,忽略了不同循环应力的影响以及模型参数的不确定性。由传统方法确定的强度退化模型仅是对特定试验数据变化趋势的客观描述,缺少必要的数学和物理解释,即无法考虑试件几何尺寸、疲劳荷载模式和加载机制等因素的影响。因此,有必要针对钢结构建筑中的常用钢材,开展疲劳损伤后材料的试验和理论研究,建立基于物理机制的材料力学性能退化模型,并考虑对模型认知不确定性的影响,这是准确开展高性能结构全寿命可靠度分析的关键。

风致累积损伤引起的材料性能退化,将造成高层钢结构建筑的抗力衰退,这必然会改变损伤后结构的抗震能力。本文聚焦风致累积损伤影响下高层钢结构建筑抗震性能评估的迫切需求,发展了高周疲劳条件下基于贝叶斯理论的钢材强度退化模型。本文建立的疲劳损伤后钢材强度退化模型,可用于修正风致损伤后钢结构的材料参数,进而开展损伤后结构的地震风险评估,切实提高分析结果的可靠性。另外,基于贝叶斯的钢材强度退化模型具有更新功能,在获得更多实验数据后可对该模型进行更新,以此确定更加合理的材料力学性能退化模型。

1 试验数据收集

已有研究通过试验^[12-14],确定了循环应力作用下钢材在不同循环比处的极限强度。李莉等^[12]、李

琳^[13]、吕海波等^[14]分别研究了预疲劳损伤后35CrMo钢和45#钢的强度退化规律。但上述研究仅通过经典强度退化模型对试验数据进行客观描述,忽略了对模型认知不确定性的影响,即未考虑模型参数的概率特性。因此,本文基于已有的试验数据,提出基于概率的钢材强度退化模型分析方法,通过贝叶斯理论确定模型参数的后验概率分布。对已发表的试验数据整理汇总见表1。表中,

S_{\max} 表示所施加应力最大值,即循环应力幅值; $n(\leq N)$ 表示循环应力加载次数, N 表示相同应力水平下材料的疲劳寿命; $S(n)$ 表示钢材在不同循环应力条件下,不同循环比处所对应的静强度。当 $n/N=0$ 时, $S(n)$ 是未损伤试件的抗拉强度;当 $n/N=1$ 时, $S(n)$ 表示材料的疲劳强度。需要注意的是,由于关于试验数据来源的部分文献^[12, 14]中仅给出了试验的平均值,因此表1仅列出了每组试验的平均值。

表1 试验数据汇总

Table 1 Summarization of experimental data

数据来源	$S_{\max}/$ MPa	疲劳寿命 $N/10^3$	$S(n)/\text{MPa}$								
			$n/N=$ 0	$n/N=$ 0.2	$n/N=$ 0.4	$n/N=$ 0.5	$n/N=$ 0.6	$n/N=$ 0.7	$n/N=$ 0.8	$n/N=$ 0.9	$n/N=$ 1.0
李莉等 ^[12]	367	1 151	781	—	—	679	—	674	655	—	367
李琳 ^[13]	300	2 264	685	—	—	675	670	668	658	649	300
	320	1 846	685	—	—	660	652	641	628	604	320
吕海波等 ^[14]	310	35	839.5	832.6	816.9	—	729	—	695.6	—	310

2 经典钢材强度退化模型

段忠东等^[11]通过连续介质力学方法,推导了材料的损伤演化过程,并给出了钢材剩余强度与损伤累积程度之间的关系,即:

$$\frac{S(n)}{S(0)} = (1 - D)^{\frac{\theta_1 + \theta_2 + 1}{\theta_1}} \quad (1)$$

式中, $S(n)/S(0)$ 定义为材料的强度退化系数,即疲劳损伤后材料剩余强度与未损伤材料抗拉强度的比值; D 表示材料的损伤程度指数,对于均质钢材,可由式(2)确定:

$$D = 1 - \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{\frac{1}{\theta_1 + \theta_2 + 1}} \quad (2)$$

赵维涛等^[15]基于式(1)考虑了疲劳累积损伤过程中的钢材强度退化,并据此推导了构件弹性刚度在疲劳荷载作用下的衰减方程,进而对平面桁架结构的可靠性进行了分析。结果表明,由于疲劳累积损伤的影响,在结构设计使用寿命约1/3处其可靠性便不再满足设计要求。李琳^[14]提出了钢材强度退化系数关于加载循环比与荷载比的强度退化模型,并利用该模型描述了高周疲劳累积损伤影响下45#钢的强度退化规律,其表达式为:

$$\frac{S(n)}{S(0)} = \frac{S_{\max}}{S(0)} + \left[1 - \frac{S_{\max}}{S(0)}\right] \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{\rho} \quad (3)$$

张禄等^[8]和刘苏超等^[7]根据疲劳损伤过程的特

点并参照已有退化模型,提出了疲劳累积损伤条件下的钢材强度退化模型,利用已发表的试验数据对该模型进行了验证,其表达式为:

$$\left[\frac{S(n)}{S(0)}\right]^{1/\theta} = 1 - \left[1 - \left(\frac{S_{\max}}{S(0)}\right)^{1/\theta}\right] \frac{n}{N} \quad (4)$$

需要指出的是,上述研究均是在试验数据的基础上,通过频率推断(如最小二乘法)确定模型参数的取值,即认为模型参数是确定性的,忽略了参数本身的不确定性。鉴于此,本文提出通过贝叶斯更新准则确定模型参数的后验概率分布,在结构的可靠度分析中,可进一步借助全概率理论考虑模型认知不确定性的影响。

3 基于贝叶斯理论的退化模型

疲劳累积损伤过程中伴随着材料强度的退化,材料的S-N曲线也可以得到类似结论,即在给定应力循环作用下材料将在其疲劳寿命处发生断裂破坏,此时材料的剩余强度等于所施加循环应力幅值。疲劳荷载循环作用下,基于物理机制的钢材强度退化系数的一般形式可表示为:

$$\frac{S(n|\theta)}{S(0)} = f(\mathbf{X}|\theta_m) + \gamma + \sigma\epsilon = f(\mathbf{X}|\theta_m) + \sum_{i=1}^{N_b} \theta_i h_i + \sigma\epsilon \quad (5)$$

式中,等号右侧第一项为模型中的确定项,可由已

有经典模型描述,如式(1)、(3)和(4);向量 \mathbf{X} 是确定项中的变量,如加载循环比、荷载比等;第二项为模型的误差修正项, h_i 表示可能影响试验结果的物理量,如材料型号、试件尺寸、疲劳荷载模式和加载机制等; N_h 为修正项中变量的数目;模型未知参数 $\Theta=(\theta_m, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \sigma)$, θ_m 表示确定项的模型系数矩阵, θ_i 是修正项中的系数; $\sigma\epsilon$ 表示模型误差,服从均值为0,标准差为 σ 的正态分布。由贝叶斯更新准则^[16-17],可确定未知参数 Θ 的后验概率密度函数 $f(\Theta)$ 为:

$$f(\Theta) = cL(\Theta)p(\Theta) \quad (6)$$

式中, $c = \int L(\Theta)p(\Theta)d\Theta$ 表示归一化系数,用以确保 $f(\Theta)$ 在定义域内的积分为1.0; $L(\Theta) = \prod f(\text{Data}|\Theta)$ 为似然函数,其中, $f(\text{Data}|\Theta)$ 表示给定模型参数条件下观测值的概率密度函数; $p(\Theta)$ 为 Θ 的先验概率密度函数。当模型中只有一个未知变量时, Θ 的先验概率密度函数可表示为:

$$p(\Theta) \propto \frac{1}{\sigma} \quad (7)$$

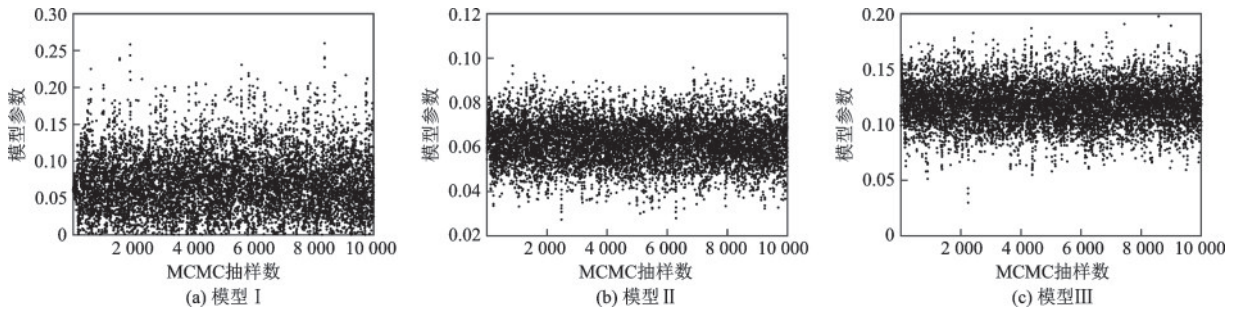


图1 模型未知参数的后验估计值

Fig.1 The posterior estimates of the unknown model parameters

模型参数后验估计值的结果见表2,其中, $m=1,2,3$,分别对应着3类模型。由最小二乘法确定的模型参数取值分别为 $\theta_1=0.062$ 、 $\theta_2=0.062$ 和 $\theta_3=0.118$,其与表中平均值的差异分别为17.7%、0和5.6%。显然,传统方法确定的钢材强度退化模型,与本文所提出的方法相比存在显著差异。因此,在研究疲劳累积损伤条件下材料的强度退化规律时,应该综合考虑模型参数不确定性的影响。

本文建立的强度退化模型误差的先验概率分布和后验概率分布如图2所示。从图2中不难发现,不同模型的误差间存在显著差异,这也进一步说明目前并不存在普遍适用的强度退化模型,有必要发展适用性更好的钢材强度退化模型。另外,与模型

对于多元模型,模型未知参数间可能存在相关性,无信息的先验概率密度函数可写作^[16]:

$$p(\Theta) \propto |R|^{-(n+1)/2} \prod \frac{1}{\sigma} \quad (8)$$

式中, $R=[\rho_{ij}]$ 表示模型未知参数的相关系数矩阵; n 表示模型中未知变量的数目。

由于所收集的试验数据中并未考试件尺寸,疲劳荷载模式和加载机制等因素的影响。因此,本文无法考虑模型修正项,但在今后的研究中可补充相关试验,以此确定疲劳累积损伤条件下更为合理的钢材强度退化模型。本文采用马尔科夫链-蒙特卡罗(Markov Chain-Monte Carlo, MCMC)抽样方法^[18],分别确定模型I(式(1))、模型II(式(3))和模型III(式(4))中未知参数的后验估计值,模型参数的后验估计值如图1所示。从图中可以发现,疲劳累积损伤条件下钢材强度退化模型参数的后验估计值,围绕其平均值上下波动,但存在较大离散性。因此,在地震作用下考虑风致疲劳累积损伤效应的高层钢结构建筑风险评估中,应借助全概率理论综合考虑强度退化模型参数不确定性的影响。

表2 强度退化模型未知参数的后验估计值

Table 2 Posterior statistics of unknown parameters in the strength degradation model

模型	参数	平均值	标准差	相关系数矩阵	
				θ_m	σ_m
I	θ_1	0.073	0.046	1	
	σ_1	0.211	0.034	0.11	1
II	θ_2	0.062	0.010	1	
	σ_2	0.048	0.008	0.01	1
III	θ_3	0.119	0.019	1	
	σ_3	0.047	0.009	-0.01	1

误差的先验分布相比,后验概率分布的变化范围较小,表明试验数据中的信息可以使未知模型参数的分布更加集中,减少模型参数估计值的不确定性。

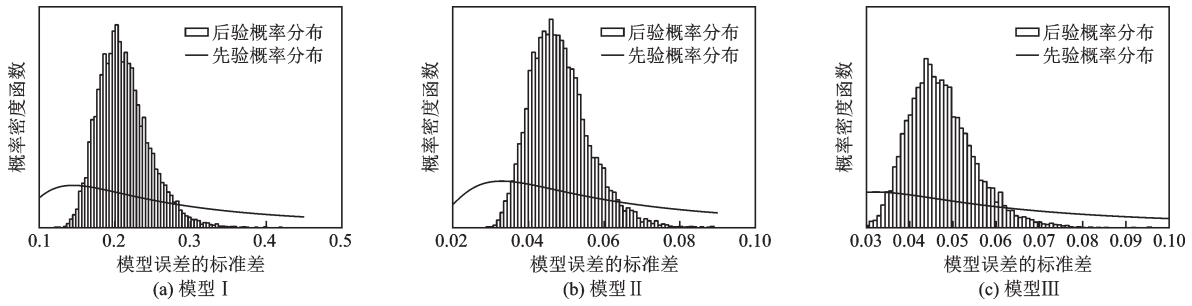


图2 模型误差的先验和后验概率分布

Fig.2 The prior and posterior probability density of model errors

强度退化模型I是关于加载循环比的单变量函数,其分布如图3所示。从3图中可以发现,随着加载循环比的增加材料强度逐渐降低,但降速较为缓慢,这主要是因为本文所收集实验中采用的最大加载荷载比仅约为0.47。此外,强度退化曲线中存在突然死亡的现象,即在加载次数接近疲劳寿命时,材料强度急速降低。模型II和III均是关于加载荷载比和循环比的双变量函数,其等值线分布如图4所示。从图4中不难发现,对于同一批实验数据,不同模型确定的结果差异性较大。因此,有必要考虑不同影响因素补充必要的试验,并发展更为合理的钢材强度退化模型。

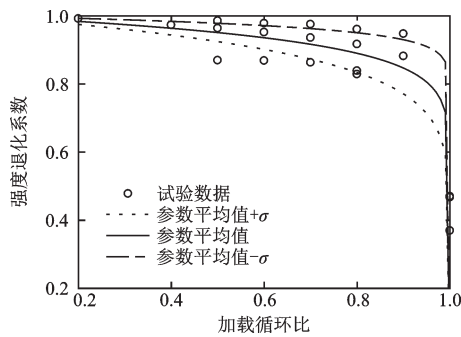


图3 基于贝叶斯理论的模型I分布图

Fig.3 Distributions of Bayesian-based model-I

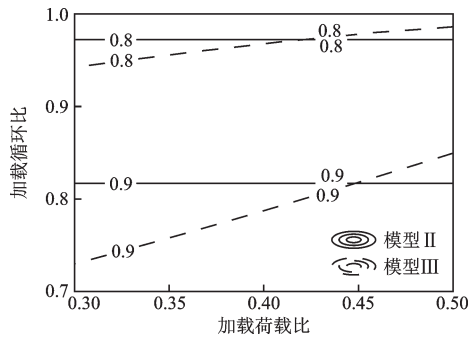


图4 基于贝叶斯理论的强度退化模型等值线

Fig.4 Contours of Bayesian-based models-II and -III

4 梁柱节点退化规律

高层钢结构建筑中,焊接梁柱节点和螺栓连接是最常用的两类连接方式,全寿命期内在风荷载反复作用下,不可避免会造成节点承载力的退化。高层建筑的非线性动力时程分析中,若节点采用壳单元或实体单元建立精细化模型,会带来繁重的计算工作。为提高数值模拟的计算效率,节点可简化为杆系-弹簧模型^[19],而合理的弹簧本构模型是确保计算准确性的关键。以焊接节点为例,其可简化为图5所示形式,弹簧的本构关系可以由随动强化模型描述。

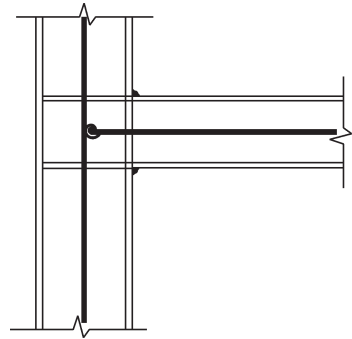


图5 焊接节点简化计算模型

Fig.5 Simplified calculating model for welded joints

弹簧本构模型的关键在于确定屈服弯矩 M_y 、屈服转角 φ_y 、极限弯矩 M_u 和极限转角 φ_u 。若塑性区发生在梁端,屈服弯矩可表示为:

$$M_y = \sigma_y W_b \quad (9)$$

式中, W_b 为梁净截面模量; σ_y 为材料屈服强度。屈服转角为 $\varphi_y = M_y / k_e$, k_e 为节点屈服刚度,规范中提出可以通过“组件法”计算刚度取值^[20]。节点的极限弯矩可由式(10)计算确定:

$$M_u = \sigma_y B t_b (h - t_b) + \sigma_y t_w \left(\frac{h}{2} - t_b \right)^2 \quad (10)$$

式中, h 为梁截面高度; B 为梁截面宽度; t_b 为梁翼缘厚度; t_w 为梁腹板厚度; 极限转角取值为 $\varphi_u = \min(0.02, 3\varphi_y)^{[19]}$ 。

李爱群等^[21-22]对高层钢结构焊接梁柱节点的风致疲劳问题开展了系统的试验和理论研究, 结果表明梁柱节点的平均疲劳寿命在 200 年以上, 这远大于结构的设计使用寿命。换言之, 风荷载长期作用下梁柱节点通常不会发生疲劳破坏, 即可假设梁柱的有效截面和焊缝的有效长度不发生明显变化。显然, 风致累积损伤后焊接梁柱节点抗弯能力的退化规律可由疲劳损伤后材料力学性能的退化模型反映, 其力学性能退化程度与材料的退化程度一致。

应用上述理论计算方法时, 需要引入不同程度的假设, 导致其具有一定局限性。因此, 本文提出在今后研究中建立局部节点的精细化有限元模型, 通过材料强度退化模型修改节点模型中的材料参数, 以此考虑不同风致疲劳损伤程度的影响。同时, 考虑梁柱截面几何尺寸, 焊缝长度和焊材型号等参数的影响, 对节点开展静力分析, 获得其弯矩-转角数据。最后, 通过贝叶斯理论建立基于物理机制的节点弯矩-转角模型, 其中, 理论值作为模型中的确定项, 梁柱截面尺寸等参数作为模型误差修正项中的变量。在后续研究中, 可进一步补充预疲劳损伤后钢材和螺栓连接力学性能退化的试验研究, 建立疲劳累积损伤条件下钢材的节点剩余力学性能的试验数据库以及基于物理机制的力学性能模型。

5 结 论

通过收集预疲劳损伤后钢材的力学试验数据, 提出了通过贝叶斯理论建立基于物理机制的材料强度退化模型, 主要结论如下:

(1) 模型参数取平均值时, 传统方法确定的钢材强度退化模型存在较大离散性, 因此需要考虑模型参数不确定性的影响。

(2) 对于相同的试验数据, 不同强度退化模型得到的结果差异性较大, 且不存在最优模型。现有强度退化模型仅是对试验数据的客观反映, 缺少必要的数学和物理解释。因此, 有必要发展基于物理机制的材料强度退化模型, 以此考虑不同因素的

影响。

高层钢结构建筑往往具有较长的设计使用寿命, 在其全寿命周期内不可避免会因为风荷载等外部激励的反复作用, 造成材料和节点出现不同程度的累积损伤, 进而导致结构性能的退化。而目前缺少针对建筑领域常用钢材, 在高周疲劳荷载作用下强度退化的试验研究。由于所收集试验数据的局限性, 本文给出的钢材强度退化模型并未考虑材料型号、试件尺寸、荷载模式和加载机制等因素的影响。换言之, 本文建立的模型在严格意义上讲并不属于基于物理机制的模型, 但所提出的分析方法提供了考虑多种物理变量影响的有效途径。因此, 在今后的研究中, 应补充不同循环应力在不同加载循环比处的钢材静力力学试验, 并考虑多种物理量对试验结果的影响。

参考文献:

- [1] 黄侨, 汪炳, 刘小玲, 等. 重复荷载作用后栓钉连接件的剩余力学性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 54-64.
Huang Q, Wang B, Liu X L, et al. Residual mechanical properties of stud connectors under cyclic loading [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(6): 54-64. (in Chinese)
- [2] 吴德飞, 童根树. 含初始缺陷钢结构损伤累积至断裂及后期的调查分析[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 160-167.
Wu D F, Tong G S. Damage accumulation, fracture and post fracture analysis for nintially flwed steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 160-167. (in Chinese)
- [3] 姜菊生, 张伟根, 郭乙木, 等. 金属材料疲劳损伤的定量研究[J]. 材料科学与工程, 2000, 18(1): 45-48.
Jiang J S, Zhang W G, Guo Y M, et al. The quantitative research of fatigue damage for metal materials [J]. Materials Science & Engineering, 2000, 18(1): 45-48. (in Chinese)
- [4] Bigaud D, ALI O. Time-variant flexural reliability of RC beams with externally bonded CFRP under combined fatigue-corrosion actions [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 131: 257-270.
- [5] Liu Y, Li H N, Li C, et al. Lifetime seismic performance assessment of high-rise steel-concrete composite frame with buckling-restrained braces under wind-in-

- duced fatigue [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2021, 77(2): 197-215.
- [6] Gao J, An Z. A new probability model of residual strength of material based on interference theory [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 118: 202-208.
- [7] 刘苏超, 姜长杰, 刘新田. 基于强度退化的金属材料疲劳寿命预估 [J]. *机械强度*, 2021, 43(3): 742-746.
Liu S C, Jiang C J, Liu X T. Fatigue life prediction of metal materials based on strength degradation [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2021, 43(3): 742-746. (in Chinese)
- [8] 张禄, 纪威, 周炜, 等. 基于强度退化的疲劳累积损伤模型 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(增1): 47-52.
Zhang L, Ji W, Zhou W, et al. Fatigue cumulative damage models based on strength degradation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(Sup1): 47-52. (in Chinese)
- [9] Philippidis T P, Passipoularidis V A. Residual strength after fatigue in composites: Theory vs. experiment [J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(12): 2104-2116.
- [10] 李铁英, 雷宏刚, 张善元. 金属材料疲劳累积损伤引起的强度衰减分析 [J]. *太原理工大学学报*, 2001, 32(5): 446-448.
Li T Y, Lei H G, Zhang S Y. Strength decreasing analysis of metal fatigue cumulative damage [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2001, 32(5): 446-448. (in Chinese)
- [11] 段忠东, 欧进萍. 金属材料的非线性疲劳累积损伤模型及强度衰减分析 [J]. *应用力学学报*, 1998(3): 106-111.
Duan Z D, Ou J P. Nonlinear fatigue cumulative damage model and strength degradation analysis of metal materials [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1998(3): 106-111. (in Chinese)
- [12] 李莉, 谢里阳, 何雪泓, 等. 疲劳加载下金属材料的强度退化规律 [J]. *机械强度*, 2010, 32: 967-971.
Li L, Xie L Y, He X H, et al. Strength degradation law of metallic material under fatigue loading [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2010, 32: 967-971. (in Chinese)
- [13] 李琳. 疲劳载荷下螺栓刚度及强度退化规律研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
Li L. Research on the law of the stiffness degradation and strength degradation of the bolt under fatigue loads [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)
- [14] 吕海波, 姚卫星. 元件疲劳可靠性估算的剩余强度模型 [J]. *航空学报*, 2000, 21(1): 75-78.
Lyu H B, Yao W X. Residual strength model for fatigue reliability estimation of components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, 21(1): 75-78. (in Chinese)
- [15] 赵维涛, 安伟光, 吴香国. 基于累积损伤的结构系统时变刚度可靠性分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, 27(6): 812-815.
Zhao W T, An W G, Wu X G. Time-dependent stiffness reliability analysis of the structural system based on the cumulative damage [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, 27(6): 812-815. (in Chinese)
- [16] Gardoni P, Der K A, Mosalam K M. Probabilistic capacity models and fragility estimates for reinforced concrete columns based on experimental observations [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(10): 1024-1038.
- [17] Zheng X W, Li H N, Gardoni P. Probabilistic seismic demand models and life-cycle fragility estimates for high-rise buildings [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(12): 04021216.
- [18] Gelman A, Carlin J B, Stern H S, et al. *Bayesian Data Analysis* [M]. Third ed. New York: Chapman & Hall, 2020.
- [19] 熊俊. 强震作用下钢框架焊接节点损伤性能和计算模型研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
Xiong J. Research on the damage behavior and calculation model of welded connections in steel frames under earthquakes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [20] Eurocode 3: Design of steel structures [S]. London: Institution of Civil Engineers, 2005.
- [21] 方钊. 高层钢结构梁柱焊接节点风致疲劳寿命预测研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
Fang Z. Study on wind-induced fatigue life assessment of welded beam-to-column connections in steel high-rise structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [22] 方钊, 李爱群, 李万润, 等. 钢结构风致疲劳分析的多尺度有限元验证分析 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(6): 1131-1139.
Fang Z, Li A Q, Li W R, et al. Verification on multi-scale finite element of wind-induced fatigue of steel structures [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(6): 1131-1139. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)