

基于可靠度的木结构荷载持续作用效应

何敏娟¹, 张婷钰¹, 倪春², 李征¹, 陶铎¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 加拿大林产品创新研究院, 温哥华 V6T1Z4)

摘要: 木材在长期荷载作用下强度会逐渐降低, 在工程设计中需考虑该效应的影响来确定木材强度设计值。为探究荷载持续作用对木材强度的影响, 基于现行木结构设计标准规定的木结构极限状态设计及荷载的概率统计模型, 采用JC法和Foschi-Yao累积损伤模型, 针对我国恒荷载、楼面活荷载以及南京、哈尔滨、北京、上海和金华的雪荷载条件, 对不同荷载工况、活荷载与恒荷载比率 ρ 及木材强度变异系数等对木结构荷载持续作用效应的影响进行研究, 给出了不同工况下的荷载持续时间影响系数。结果显示, 当荷载比率较小时, 荷载持续时间影响系数 K_{DOL} 随 ρ 的增大而增大; 荷载比率较大时, K_{DOL} 不随 ρ 值变化; 且材料强度变异系数对 K_{DOL} 的影响随着荷载比率的增大而减小。

关键词: 荷载持续作用效应; 可靠度分析; 累积损伤模型; 概率统计模型

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

Reliability Based Investigation into the Duration of Load Effect for Timber Structure

HE Minjuan¹, ZHANG Tingyu¹, NI Chun², LI Zheng¹, TAO Duo¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. FP Innovations, Vancouver V6T1Z4, Canada)

Abstract: The strength of wood will gradually decrease at a long-term sustained load. The obvious duration of load (DOL) effect is one of the characteristics that distinguish wood and wood products from other building materials, and such a DOL effect must be properly considered in the design of timber structures. Based on the limit state design and the probabilistic statistical model of wood structure according to the current Chinese timber design code, an exploratory research was conducted in this paper to determine the DOL effect of timber structures at different load combinations including dead load, floor live load, and snow load in five Chinese

cities (i. e., Nanjing, Harbin, Beijing, Shanghai, and Jinhua), using the JC method and the Foschi-Yao damage accumulation model. The different ratios of the nominal live load to the nominal dead load ρ , and the different coefficients of variation of wood strength were also considered in the reliability analysis. The value of the DOL coefficient K_{DOL} in different load combinations was calibrated. The results show that when the load ratio ρ is small, the DOL coefficient K_{DOL} increases with the increase in ρ . Besides, when the load ratio is large, K_{DOL} does not change with the value of ρ . Moreover, the coefficient of variation of wood strength has less influence on the DOL coefficient K_{DOL} with the increase in load ratio ρ .

Key words: duration of load effect; reliability analysis; damage accumulation model; probabilistic statistical model

木材在长期荷载作用下, 随着时间的增加材料强度逐渐降低, 最终发生破坏。这种随着时间的增加强度下降的现象叫做荷载持续作用效应(duration of load, DOL)。早在1741年, 法国海军工程师Buffon就注意到了这个现象, 他认为木梁的抗弯承载力不应超过短期强度的50%。20世纪40年代, Wood用花旗松进行了清材小试件的受弯试验, 提出了著名的Madison曲线。直到今天, Madison曲线也还在被用来预测木材在DOL效应下的强度退化情况。由于通过长期试验测出木材的长期强度较为费时费力, 需要通过数学模型来对长期强度作出合理的预测。为了预测木材的DOL效应, 研究者们提出了大量模型, 包括经验模型(empirical model)、累积损伤模型(damage accumulation model)、断裂力学模型^[1](fracture mechanics model)、变形动力学模型^[2](deformation dynamic model)和能量模型^[3](energy

收稿日期: 2019-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(E080504)

第一作者: 何敏娟(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为木结构. E-mail: hemj@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

model)来表示长期强度与短期强度之比和荷载持续时间的关系。1979—1987年,美国学者Gerhards提出了指数型累积损伤模型,先利用清材小试件对模型进行校准,随后又用了足尺试件的长期试验数据进行校准。1978年,加拿大学者Foschi等在Gerhards模型基础上,引入了二阶损伤变量及应力阈值 σ_0 。他们基于以恒定速率增加到某一数值再保持不变的荷载模式对清材小试件进行试验,并开发了BF损伤模型。随后将模型推广到更复杂的荷载模式,并用足尺试件的长期荷载数据进行了模型校准。1986年Foschi和Yao^[4]在BF模型的基础上作了改进,提出Foschi-Yao模型,用应力值表示损伤累积,模型参数增加到4个。2017年,中国学者祝恩淳教授曾对木材可靠度进行分析^[5],通过对木构件的 γ_R 进行研究进而确定木材强度设计值。本文采用Foschi-Yao累积损伤模型,基于我国恒荷载、楼面活荷载及雪荷载的概率统计模型,对荷载持续作用效应进行研究。

1 在短期荷载作用下的可靠度计算

1.1 功能函数

可靠度分析就是要根据可靠性总原则的规定和我国可靠度分析的一般要求,结合木材的强度特性,建立极限状态方程及功能函数。

恒荷载和活荷载作用下的荷载效应组合 $E(Q+D)$ 可以表示为

$$E(Q+D) = E(D_n) \cdot (d + q\rho) \quad (1)$$

式中: d 为归一化恒荷载, $d=D/D_n$, D 为恒荷载真实值, D_n 为恒荷载标准值; q 为归一化活荷载, $q=Q/Q_n$, Q 为活荷载真实值, Q_n 为活荷载标准值; $\rho=Q_n/D_n$, ρ 一般取值为0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0。

中国规范《木结构设计标准:GB50005—2017》^[6]中的极限状态设计公式为

$$\gamma_G E(D_n) + \gamma_Q E(Q_n) = \frac{f_{(0.05)} K_{DOL}}{\gamma_R} \quad (2)$$

式中: γ_G 和 γ_Q 分别为永久荷载和可变荷载的分项系数; $E(D_n)$ 、 $E(Q_n)$ 分别为永久荷载和可变荷载的荷载效应; $f_{(0.05)}$ 为材料强度特征值,即 f_k ,短期强度分布的5%分位值; K_{DOL} 为长期荷载影响系数,在不考虑长期荷载效应时取定值1.0。

结合式(1)和式(2)可以得到

$$E(Q+D) = \frac{f_{(0.05)}}{\gamma_R (\gamma_G + \gamma_Q \rho)} \cdot (d + q\rho) \quad (3)$$

则功能函数 G 可以表示为

$$G = \frac{R}{f_{(0.05)}} - \frac{1.0}{\gamma_R (\gamma_G + \gamma_Q \rho)} \cdot (d + q\rho) \quad (4)$$

构件抗力 R 在可靠度计算中为随机变量,假定服从对数正态分布。根据GB50005的规定, R 为

$$R = K_{Q3} K_A K_P f \quad (5)$$

式中:长期荷载影响系数 $K_{Q3}=K_{DOL}$,在不考虑长期荷载作用时取值1.0;构件几何特征不定性影响系数 K_A 、计算模式误差影响系数 K_P 及木材或木产品的短期强度 f 均为随机变量。 f 为足尺试验强度,服从对数正态分布。抗力 R 可根据随机变量理论,得到其均值和变异系数。

中国规范《木结构设计标准:GB50005—2017》中的极限状态设计公式为

$$\bar{R} = \bar{K}_A \bar{K}_P m_f \quad (6)$$

$$V_R^2 = V_{KA}^2 + V_{KP}^2 + V_f^2 \quad (7)$$

1.2 荷载分布及参数

在进行短期荷载作用下的可靠度计算时,只需考虑荷载变量的分布类型及其相应的归一化均值和变异系数,不考虑荷载的时变效应。其中归一化均值为荷载平均值与标准值之比。根据《木结构设计标准:GB50005—2017》中的规定,各项荷载统计参数及分布类型如表1所示。

表1 荷载统计分布及其参数

Tab.1 Distribution type of loads and corresponding parameters

荷载种类	归一化均值	变异系数	分布类型
恒荷载	1.060	0.070	正态分布
办公室楼面活荷载	0.524	0.288	极值I型分布
住宅楼面活荷载	0.644	0.233	极值I型分布
雪荷载(50年重现期)	1.139	0.225	极值I型分布

表1中,我国规范对雪荷载的统计分布参数的规定忽略了城市间的差异,均采用统一的分布参数值。但为了保证短期雪荷载模型与长期雪荷载模型间的统一,在进行短期荷载作用下的可靠度计算时,不同城市的雪荷载(50年重现期)的统计参数均采用相应的长期雪荷载模型,计算得到的结果如表2。

表2 典型城市的雪荷载分布参数

Tab.2 Parameters of snow load distribution in typical cities

城市	归一化均值	变异系数
哈尔滨	1.114	0.223
北京	1.129	0.249
上海	1.183	0.337
南京	1.136	0.261
金华	1.134	0.258

1.3 可靠度分析

研究采用国际安全度联合委员会(The Joint Committee of Structural Safety, JCSS)推荐使用的改进的一次二阶矩法,即JC法,计算可靠度指标 β 与 γ_R 之间的关系^[7]。根据文献[8]的规定,针对不同安全等级,目标可靠度指标按表3分别取为 $\beta_0=2.7、3.2、3.7、4.2$ 。本研究在安全等级为二级状态下进行。

表3 结构构件承载力极限状态下的可靠指标

Tab.3 Reliability index of the structure limit state

破坏类别	安全等级		
	一级	二级	三级
延性	3.7	3.2	2.7
脆性	4.2	3.7	3.2

此外,在建立 γ_R 与材料强度变异系数 C_{OV} 的关系时,需要利用满足对数正态分布的材料抗力均值与五分位值的关系。

$$\frac{f_m}{f_{(0.05)}} = e^{1.645\sqrt{\ln(1+C_{OV}^2)}} \cdot \sqrt{1+C_{OV}^2} \quad (8)$$

将功能函数重新表示为

$$G = \frac{K_A K_P f \gamma_R}{f_{(0.05)}} - \frac{d + q\rho}{\gamma_G + \gamma_Q \rho} \quad (9)$$

该种木产品期望达到的目标可靠度指标以及抗力、恒荷载和活荷载等各随机变量的均值和变异系数均已知,通过迭代可以计算出功能函数中 $\left[\frac{K_A K_P f \gamma_R}{f_{(0.05)}}\right]$ 项的均值 $\left[\frac{\bar{K}_A \bar{K}_P f_m \gamma_R}{f_{(0.05)}}\right]$ 。代入材料抗力均值与五分位的关系式(8),可以得到

$$\frac{\bar{K}_A \bar{K}_P f_m \gamma_R}{f_{(0.05)}} = \frac{\gamma_R \bar{K}_A \bar{K}_P f_m}{f_{(0.05)}} = \quad (10)$$

$$\gamma_R \bar{K}_A \bar{K}_P e^{1.645\sqrt{\ln(1+C_{OV}^2)}} \cdot \sqrt{1+C_{OV}^2}$$

进一步可以得到 γ_R 与 C_{OV} 的关系

$$\gamma_R = \frac{\bar{K}_A \bar{K}_P f_m \gamma_R / f_{(0.05)}}{\bar{K}_A \bar{K}_P e^{1.645\sqrt{\ln(1+C_{OV}^2)}} \cdot \sqrt{1+C_{OV}^2}} \quad (11)$$

2 在长期荷载作用下的可靠度计算

2.1 损伤模型

累积损伤模型通过引入并没有实际物理意义的损伤变量,在一定荷载历史条件下,对结构单元的累积损伤进行定量计算,从而预测单元的失效时间。常用的共有3种损伤累积模型^[9]: Gerhards模型、Barrett-Foschi模型、Foschi-Yao模型,本文采用Foschi-Yao模型,即加拿大模型^[10]进行研究,对应力

及强度值进行归一化,即统一除以材料强度特征值,并采用以应力比为自变量的函数形式。

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = a \left[\frac{\tau(t)}{\tau_s} - \sigma_0 \right]^b + c \left[\frac{\tau(t)}{\tau_s} - \sigma_0 \right]^n \alpha, \\ \quad \left(\frac{\tau(t)}{\tau_s} - \sigma_0 > 0 \right) \\ \frac{d\alpha}{dt} = 0, \quad \left(\frac{\tau(t)}{\tau_s} - \sigma_0 \leq 0 \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: α 为损伤状态变量; $\tau(t)$ 为归一化后任意时刻的应力。 $a、b、c、n$ 和 σ_0 这5个模型参数假定为对数正态分布,对于一个给定的结构构件而言为常数,但对于不同的构件而言为随机变量。 τ_s 为构件归一化后的短期标准强度,呈对数正态分布,材料的实际短期标准强度通过加载速率为 k 的短期斜坡加载试验测得,同样对于一个给定的结构构件而言为常数,但对于不同的构件而言为随机变量。模型参数 σ_0 定义为界限应力比,实际应力比超过界限应力比时材料才会发生损伤累积,即当 $\frac{\tau(t)}{\tau_s} - \sigma_0 \leq 0$ 时,材料不会发生损伤累积。

2.2 损伤计算

功能函数 G 可以表示为

$$G = 1 - \alpha(\tau_s, d, q, b, c, n, \sigma_0, t) \quad (13)$$

初始状态时损伤变量 $\alpha=0$,即功能函数 $G=1$;当损伤变量 $\alpha=1$,即功能函数 $G=0$ 时,材料发生破坏。

对于任意荷载时程,一般无法求得式(12)的积分表达式,也无法直接计算破坏时间 T_i (即该时刻损伤状态变量 α 为1)并与使用年限进行对比来判断材料是否会破坏。因此采用近似的方法,将荷载时程细分为时间间隔为 Δt 的小段(在实际分析过程中,根据活荷载、雪荷载变化的时间间隔分段,每段时长可能不同,但段内荷载保持不变),设荷载时程中第 i 段的初始损伤为 α_{i-1} ,则该段荷载结束时的损伤 α_i 可表示为

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} K_i + L_i \quad (14)$$

其中

$$K_i = e^{c(\varphi_i - \sigma_0)^n \Delta t} \quad (15)$$

$$L_i = \frac{a}{c} (\varphi_i - \sigma_0)^{b-n} (K_i - 1) \quad (16)$$

参数 a 可写作变量 $k_s、\tau_s、b$ 和 σ_0 的函数, φ_i 为荷载作用下的材料应力比,具体表示为

$$a = \frac{k_s(b+1)}{\tau_s(1-\sigma_0)^{b+1}} \quad (17)$$

$$\varphi_i = \frac{\tau(t_i)}{\tau_s} = \frac{1}{\tau_s} \cdot \frac{(d_n + q_n \rho)}{\gamma_R(\gamma_G + \gamma_Q \rho)} \quad (18)$$

式中:变量 d 、 q 、 ρ 、 γ_R 、 γ_G 、 γ_Q 和式(4)中的含义相同。荷载时程中任意时刻的损伤均能通过式(14)的递推关系求得。

2.3 荷载模型

2.3.1 恒荷载

恒荷载设计值一般根据材料的平均重量计算。为了考虑结构在使用年限内重量变化的不确定性,一般假定恒荷载 D 是正态随机变量。恒荷载与其标准值的比值 d 可表示为

$$d = \frac{D}{D_n} = \bar{d} + V_D R_n \quad (19)$$

式中: \bar{d} 为恒荷载与标准值比值的平均值; V_D 为恒荷载的变异系数; R_n 为标准正态随机变量。为保证在统计意义上与中国规范荷载参数一致,根据恒荷载参数, \bar{d} 取值为1.06, V_D 取值为0.07。

2.3.2 楼面活荷载

在我国荷载规范中,设计基准期内住宅楼面活荷载的均值要明显高于办公室的楼面活荷载均值,同时住宅楼面活荷载的变异系数要更小,因此本文中的荷载模型以住宅的统计参数为依据。

我国《建筑结构荷载规范:GB50009—2012》^[11]规定,楼面活荷载按其随时间变异的特点,可分持续性和临时性两部分。出于分析上的方便,对2种活荷载的分布类型采用极值I型分布,参考国外的研究方法,采用JCSS(结构安全联合委员会)提出的楼面活荷载模型拟合实际情况^[12]。

持续性活荷载和临时性活荷载模型分别采用以下假定:

(1)持续性荷载出现的时刻 X_1, X_2, \dots 服从泊松分布,所以荷载变化的时间间隔服从均值为 λ_{sus} 的指数分布。

(2)持续性荷载的幅值 P_{sus} 服从均值为 μ_{sus} 、标准差为 $\sigma_{\text{sus}} = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_{u,\text{sus}}^2} \frac{A_0}{A}$ 的伽马分布,其中 A_0 为FBC-field(Ferry Borges-Castanheta模型域)的参考面积, A 为从属面积, κ 为形状系数。

(3)临时性荷载出现的时刻 X_1, X_2, \dots 也服从泊松分布,所以荷载变化的时间间隔服从均值为 λ_{tem} 的指数分布。

(4)临时性荷载的幅值 P_{tem} 服从均值为 μ_{tem} 、标准

差为 $\sigma_{\text{tem}} = \sqrt{\sigma_{u,\text{tem}}^2} \frac{A_0}{A} \kappa$ 的伽马分布,临时性荷载的时长为 t_{tem} 。

为了得到基准期为50年的最大组合荷载的分布,将进行5000次重复的计算机模拟,每次模拟采用不同的持续性和临时性荷载的序列组合。通过2种荷载序列的叠加可以计算每次模拟下的最大组合荷载。选取模拟数据中较大的50%,利用极值I型分布拟合最大荷载值的模拟结果,得到活荷载的相关分布参数。

2.3.3 雪荷载

年最大场地雪荷载 G 服从极值I型分布,其中,分布参数可以用平均值 \bar{G} 和变异系数 V_G 得到。则服从极值I型分布的随机变量 g 为

$$g = \frac{G}{G_{50}} = \frac{B + \frac{(\ln N - \ln(-\ln p))}{A}}{B + \frac{(-\ln(-\ln 49/50))}{A}} = B^* + \frac{(-\ln(-\ln p))}{A^*} \quad (20)$$

参数 p 为0到1间的均匀分布随机变量,其他参数可以表示为

$$B^* = \frac{AB + \ln N}{AB + 3.9019} \quad (21)$$

$$A^* = AB + 3.9019$$

式中: A 、 B 为与位置参数 μ 和尺度参数 α 有关的参数,可以根据不同城市10年、50年和100年重现期下的基本雪压值计算得出。由于我国不同城市的基本雪压差距较大,需对各个城市分别进行计算,本文以南京、哈尔滨、北京、上海、金华为例进行说明。假定一年有 N_s 段等时长的荷载段,每一段的荷载保持不变且相互独立。为了概率分布的统一,该分布必须满足 N_s 个荷载段中荷载最大值的分布与年荷载最大值的分布相同。通过类比可以得到

$$g_s = \frac{G_s}{G_{50}} = B^{**} + \frac{1}{A^{**}} \left\{ -\ln \left[-N_s \ln(1.0 - p_e + p_e p) \right] \right\} \quad (22)$$

式中: p_e 为一个荷载段下雪的概率。

2.4 可靠度分析

采用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法^[13]计算考虑长期荷载效应下构件的可靠度。为确保计算结果精确性,样本量取值为 $N_R = 100\,000$ 次。恒荷载与活

荷载组合的计算方法如下:

(1)选择 γ_R 、活荷载标准值与恒荷载标准值之比 ρ 以及材料强度变异系数。

(2)为每次重复模拟建立载荷序列。①选择一个标准正态随机数来计算恒荷载 d ,并假定在设计周期内保持恒定。②生成活荷载。对于楼面活荷载:反复生成2个均匀分布随机数来计算持续性荷载 q_{sus} 的大小和持续时间,直到总的持续时间等于或大于使用年限。反复生成3个均匀分布随机数来计算临时性荷载 q_{tem} 的大小、持续时间及时间间隔,直到总的时间等于或大于使用年限。对于雪荷载:对于每一个荷载段,生成一个0到1之间的均匀分布随机数。如果该随机数大于 ρ_c ,说明该荷载段无雪荷载;反之,则再生成一个0到1之间的均匀分布随机数,用于计算雪荷载 q 。

(3)计算每个样本在设计周期内的损伤累积。①根据优化得到的参数 b, c, n, σ_0 和 τ_s 的对数正态分布特征选取5个对数正态分布随机数作为相应的取值。②根据递推关系式(14)计算累积损伤变量 α 。③计算功能函数

$$G = 1.0 - \alpha \quad (23)$$

如果 $G \geq 0$,说明样本未破坏;如果 $G < 0$,则说明样本发生破坏。

(4)接下来将上述步骤(2)、(3)重复进行 N_R 次。

(5)统计在使用年限 i 年内样本破坏的数量 N_{Fi} 并计算破坏概率 $P_f(i)$ 。

$$P_f(i) = \frac{N_{Fi}}{N_R} \quad (24)$$

(6)计算相应的可靠度指标 β_i 。

$$\beta_i = -\Phi^{-1}(P_f(i)) \quad (25)$$

(7)根据要求,可以改变 γ_R, ρ 以及 C_{ov} 的取值并从步骤(1)开始进行重复计算。

3 确定损伤模型参数

加拿大林产品创新研究院(FP Innovations)对Hemlock进行了5组长期试验,持荷时间分别为3个月、1年和4年,长期荷载值为20.68 Mpa和31.03 Mpa。试验时试件的应力时程如图1所示。

试验时较为重要的是试件的破坏时间 T_i (即该时刻损伤状态变量 α 为1)。加载时,荷载线性增加到一个定值 τ_c ,然后保持不变直到试件破坏(如图1),通过式(12)的积分可得破坏时间的表达式为

$$T_i = t_c + \frac{1}{c(\tau_c/\tau_s - \sigma_0)^n} \cdot \ln \left[\frac{1 + (a/c)(\tau_c/\tau_s - \sigma_0)^{b-n}}{\alpha_c + (a/c)(\tau_c/\tau_s - \sigma_0)^{b-n}} \right] \quad (26)$$

式中: t_c 为试验开始长期持荷时所对应的时间; α_c 为此时的累积损伤。

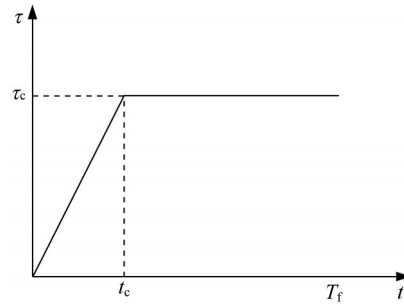


图1 试验的应力时程

Fig.1 Specific stress history used in tests

由于长期试验的结果重复性较好,取其中试验时间较长的2组数据作为依据对损伤模型进行拟牛顿法非线性优化(nonlinear optimization)^[14]。优化的过程大致如下,由MATLAB软件编程实现。

(1)选定各参数均值和变异系数的初值,一般来说初值的数量级不能跟最优解的数量级相差太多,选用的初值如表4。

表4 各参数的初值选择

Tab.4 Initial values chosen for model parameters

变量	分布类型	均值	标准差
b	对数正态分布	50.00	10.00
c	对数正态分布	0.10×10^{-5}	0.20×10^{-6}
n	对数正态分布	1.00	0.20
σ_0	对数正态分布	0.50	0.10

(2)根据变量 b, c, n, σ_0 和 τ_s 的分布生成随机数序列,重复2 000次然后代入式(26)计算破坏时间 T_i ,按照大小进行排序得到相应的累积概率分布。

(3)将模拟得到的累积分布与试验数据进行对比,其差值由函数 Φ 表示

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \left(1.0 - \frac{T_{fi}}{T_{di}} \right)^2 \quad (27)$$

式中: N 为用于比较时选取的概率水平的数量; T_{fi} 、 T_{di} 分别为相同概率水平下的模拟得到的破坏时间和试验得到的破坏时间。

(4)保持变量随机数的次序不变,分别改变不同变量的均值和变异系数并重复步骤(2)、(3),求出式(27)中函数 Φ 相对于各变量均值和变异系数的偏导

函数并用于接下来的优化程序。

(5)利用自编的非线性优化算法寻找式(27)的最小值,即可得到对应的各参数均值和变异系数的最优解。

表5 各参数的优化结果

Tab.5 Optimization results of model parameters

变量	分布类型	均值	标准差
b	对数正态分布	30.096 1	0.233 7
c	对数正态分布	$7.215 0 \times 10^{-5}$	0.289 1
n	对数正态分布	0.208 2	0.250 1
σ_0	对数正态分布	0.533 0	0.298 0

通过优化得到损伤累积模型的参数如表5所示,图2及图3对比了由该损伤模型计算得到的和长期试验得到2种荷载水平下的累积破坏概率-对数破坏时间关系。从图中可以看出,该损伤模型的拟合效果较好,而且该模型能够有效预测持荷时间超过4年后的累积破坏概率增长情况。

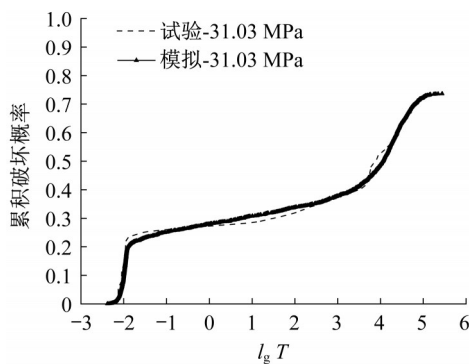


图2 荷载为31.03MPa时试验和模拟的累积破坏概率-对数破坏时间对比

Fig.2 Damage accumulation model versus experimental results at 31.03MPa

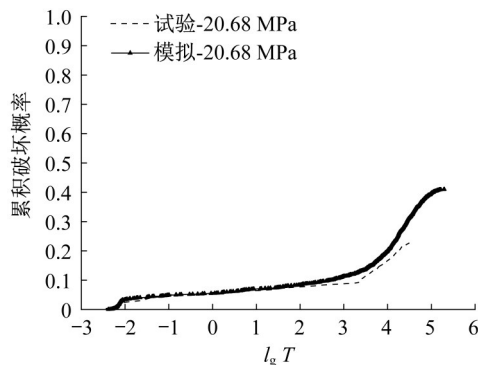


图3 荷载为20.68 Mpa时试验和模拟的累积破坏概率-对数破坏时间对比

Fig.3 Damage accumulation model versus experimental results at 20.68 Mpa

4 荷载持续时间影响系数

计算的基本过程如图4所示,该图表明2种情况下 γ_R 和 β 之间的关系:短期荷载曲线(曲线1)不考虑材料损伤累积,只考虑材料的短期强度,由第1节方法得到;长期荷载曲线(曲线2)则考虑荷载的持续时间影响,由第2节可靠度分析的方法得到。对于相同的目标可靠度,曲线1(不考虑材料损伤累积)对应的抗力分项系数为 $\gamma_{R,1}$,而曲线2(考虑材料损伤累积)对应的抗力分项系数为 $\gamma_{R,2}$,则可按式(28)计算荷载持续时间影响系数 K_{DOL} 。

$$K_{DOL} = \frac{\gamma_{R,1}}{\gamma_{R,2}} \quad (28)$$

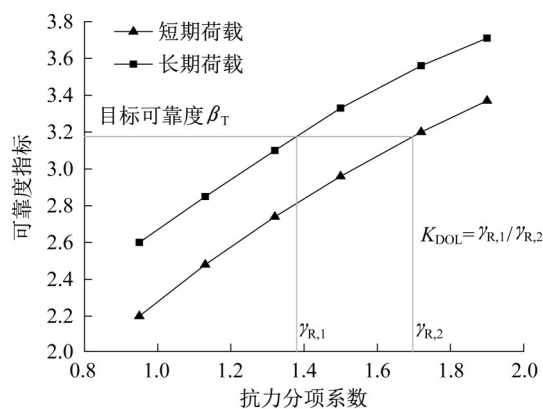


图4 计算荷载持续时间影响系数示意

Fig.4 Procedure to determine the DOL adjustment factor K_{DOL}

4.1 恒荷载

对于只有恒荷载的工况,在模拟中将活荷载与恒荷载的比率 ρ 设为0.001,对 C_{OV} 由0.05~0.50变化进行全面分析。对于受弯、受压以及受拉构件,在 $\beta=3.2$ 、 $\beta=3.7$ 的情况下, $\gamma_{R,1}$ 、 $\gamma_{R,2}$ 与 C_{OV} 的关系如图5所示。受弯及受压构件的结果相近,在 $\beta=3.2$ 的条件下,当 C_{OV} 由0.05增加到0.50时, $\gamma_{R,1}$ 由1.026增加到1.689, $\gamma_{R,2}$ 由2.231增加到2.856,根据式(28)计算可得 K_{DOL} 值由0.46增加到0.59左右。对于受拉构件,在 $\beta=3.7$ 的条件下,当 C_{OV} 由0.05增加到0.50时, $\gamma_{R,1}$ 由1.082增加到2.148, $\gamma_{R,2}$ 由2.489增加到3.707,根据式(28)计算可得 K_{DOL} 值由0.43增加到0.58左右。可以发现,恒荷载工况下的 K_{DOL} 值随着 C_{OV} 的增大而增大,变化范围在0.43到0.59之间,综合后续工况结果,本文取值为0.52。

4.2 恒荷载且楼面活荷载

对于恒荷载且楼面活荷载的工况,在模拟中分

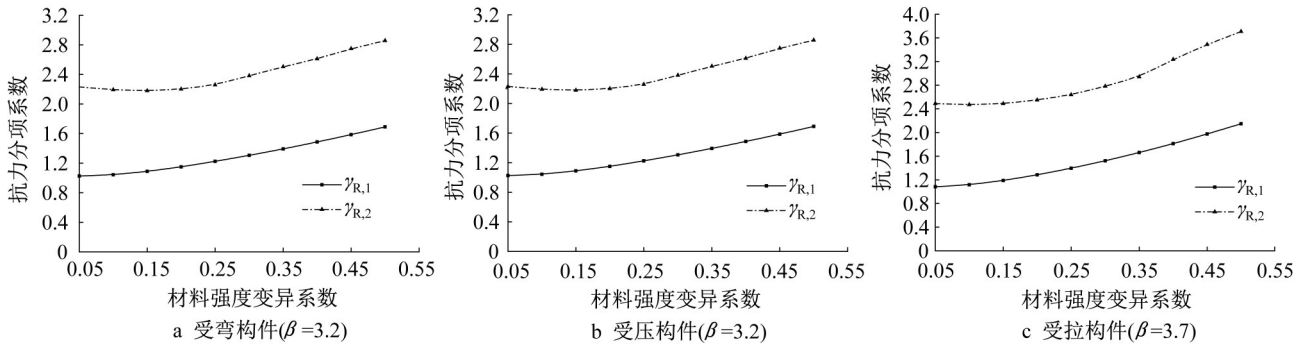


图 5 $\rho=0.001$ 时抗力分项系数与材料强度变异系数的关系

Fig.5 γ_R versus C_{OV} at $\rho=0.001$

别考虑楼面活荷载与恒荷载的比率 ρ 为 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 和 4.0 时的情况,对 0.05~0.50 范围内的变化进行全面分析。其中 $\rho=1.0$ 时的 $\gamma_{R,1}$ 、 $\gamma_{R,2}$ 与 C_{OV} 关系如图 6,受弯及受压构件的结果相近,在 $\beta=3.2$ 的条件下,当 C_{OV} 由 0.05 增加到 0.50 时, $\gamma_{R,1}$ 由 0.958 增加到 1.412, $\gamma_{R,2}$ 由 1.493 增加到 2.036,根据式(28)计算可得 K_{DOL} 值由 0.64 增加到 0.69 左右。对于受拉构件,在 $\beta=3.7$ 的条件下,当 C_{OV} 由 0.05 增加到 0.50 时, $\gamma_{R,1}$ 由 1.048 增加到 1.802, $\gamma_{R,2}$ 由 1.625 增加到 2.617,根据式(28)计算可得 K_{DOL} 值也由 0.64 增加到 0.69 左右。对其他 ρ 进行同样计算

分析后,可以认为在恒荷载且楼面活荷载的工况下,对于受弯、受压及受拉构件,在 $\beta=3.2$ 和 $\beta=3.7$ 情况下的 K_{DOL} 值基本相同,且 K_{DOL} 随着 ρ 的增大而增大,直到 ρ 大于 3.0 时, K_{DOL} 基本保持在 0.80 左右。在 $\rho=0.5$ 、 $\rho=1.0$ 的情况下, K_{DOL} 也随着 C_{OV} 的增大而增大。在 $\rho=1.5$ 、 $\rho=2.0$ 、 $\rho=3.0$ 、 $\rho=4.0$ 的情况下, K_{DOL} 与 C_{OV} 无明显关系, C_{OV} 在 0.05~0.50 范围内变化时, K_{DOL} 的变化很小。可以得出, C_{OV} 对 K_{DOL} 的影响随着 ρ 的增大而明显减小。当 $\rho > 1.0$ 时,可以认为这时 C_{OV} 对 K_{DOL} 几乎没有影响。

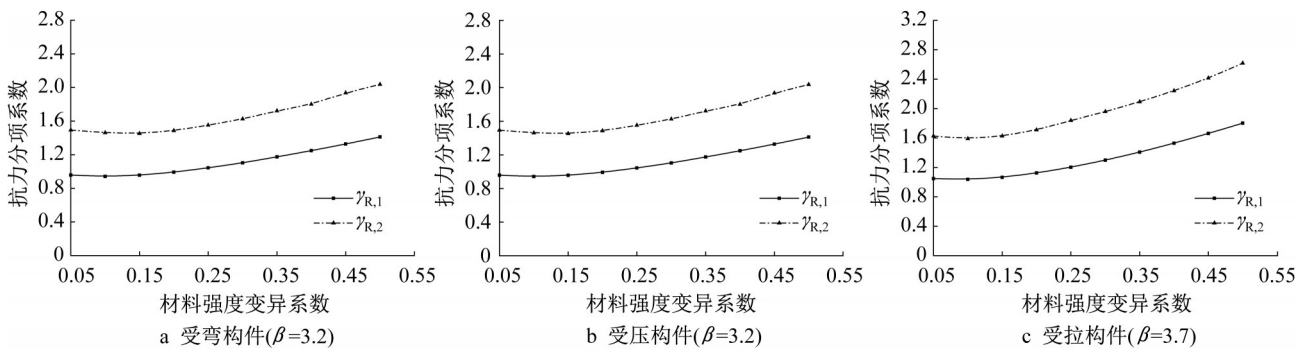


图 6 $\rho=1.0$ 时抗力分项系数与材料强度变异系数的关系

Fig.6 γ_R versus C_{OV} at $\rho=1.0$

鉴于只有恒荷载的工况等同于荷载比率 ρ 为 0.001 时的恒荷载且活荷载工况,综合考虑可近似得

$$K_{DOL} = \begin{cases} 0.800, & \rho > 3.00 \\ 0.670 + 0.280 \lg \rho, & 0.25 < \rho \leq 3.00 \\ 0.520, & \rho \leq 0.25 \end{cases} \quad (29)$$

4.3 恒荷载且雪荷载(南京)

对于恒荷载且雪荷载的工况,在模拟中考虑城市南京的雪荷载与恒荷载比率 ρ 为 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 和 4.0 等情况,并对材料强度变异系数在 0.05~0.50 范围内变化进行全面分析。其中 $\rho=4.0$

时的 $\gamma_{R,1}$ 、 $\gamma_{R,2}$ 与 C_{OV} 关系如图 7,受弯、受压及受拉构件的结果相近,在 $\beta=3.2$ 和 $\beta=3.7$ 的条件下,由式(28)可得,当 C_{OV} 在 0.05 到 0.50 范围内变化时, K_{DOL} 值在 0.79 到 0.81 范围内波动。对其他活、恒荷载比率进行同样计算分析后,可以认为在恒荷载且雪荷载(南京)的工况下,受弯、受压及受拉构件结果相近。当 ρ 大于 1.0 时, K_{DOL} 基本保持在 0.80 左右。同时, C_{OV} 对 K_{DOL} 的影响随着 ρ 的增大而明显减小。当 ρ 大于 0.5, C_{OV} 在 0.05~0.50 范围内变化时, K_{DOL} 的变化很小,可认为这时 C_{OV} 对 K_{DOL} 几乎无影响。

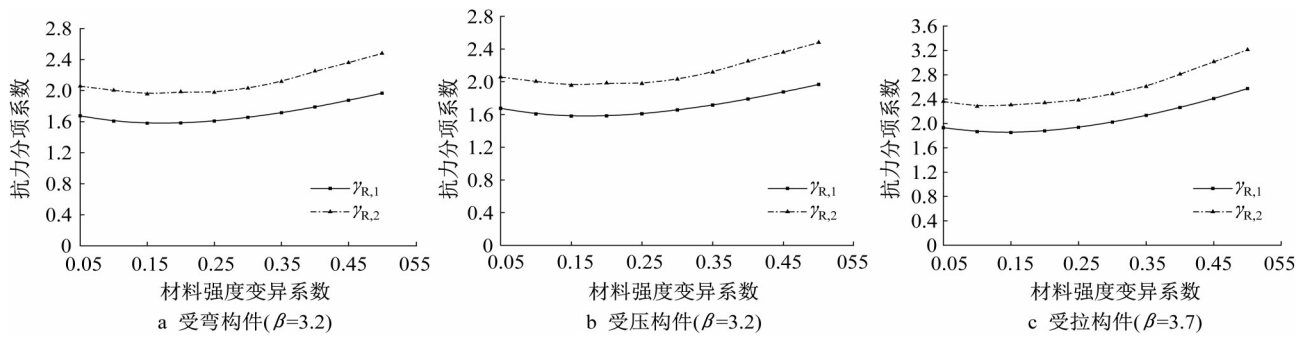


图7 $\rho=4.0$ 时南京抗力分项系数与材料强度变异系数的关系

Fig.7 γ_R versus C_{ov} at $\rho=4.0$ in Nanjing

鉴于只有恒荷载的工况亦等同于荷载比率 ρ 为0.001时的恒荷载且雪荷载工况,综合考虑可以近似得到南京的 $K_{DOL,NJ}$ 与 ρ 的关系式如式(30)所示。

$$K_{DOL,NJ} = \begin{cases} 0.810, & \rho > 1.50 \\ 0.745 + 0.370\lg\rho, & 0.25 < \rho \leq 1.50 \\ 0.520, & \rho \leq 0.25 \end{cases} \quad (30)$$

4.4 恒荷载且雪荷载(其他城市)

对于恒荷载且雪荷载的工况,在模拟中考虑城市哈尔滨、北京、上海、金华的 ρ 为0.5、1.0、2.0和4.0等情况,并对材料强度变异系数由0.05~0.50变化进行全面分析。其中哈尔滨地区 $\rho=4.0$ 时的

$\gamma_{R,1}$ 、 $\gamma_{R,2}$ 与 C_{OV} 关系如图8所示,受弯、受压及受拉构件的结果相近,在 $\beta=3.2$ 和 $\beta=3.7$ 的条件下,根据式(28)计算可得,当 C_{OV} 在0.05到0.50范围内变化时, K_{DOL} 值在0.80到0.82范围内波动。对其他活、恒荷载比率及其他城市进行同样计算分析后,可以认为在恒荷载且雪荷载(哈尔滨、北京、上海、金华)的工况下,受弯、受压及受拉构件结果相近。当 ρ 大于1.0时, K_{DOL} 基本保持在0.81左右。同时, C_{OV} 对 K_{DOL} 的影响随着 ρ 的增大而明显减小。当 ρ 大于0.5, C_{OV} 在0.05~0.50范围内变化时, K_{DOL} 的变化很小,可以认为这时 C_{OV} 对 K_{DOL} 几乎没有影响。

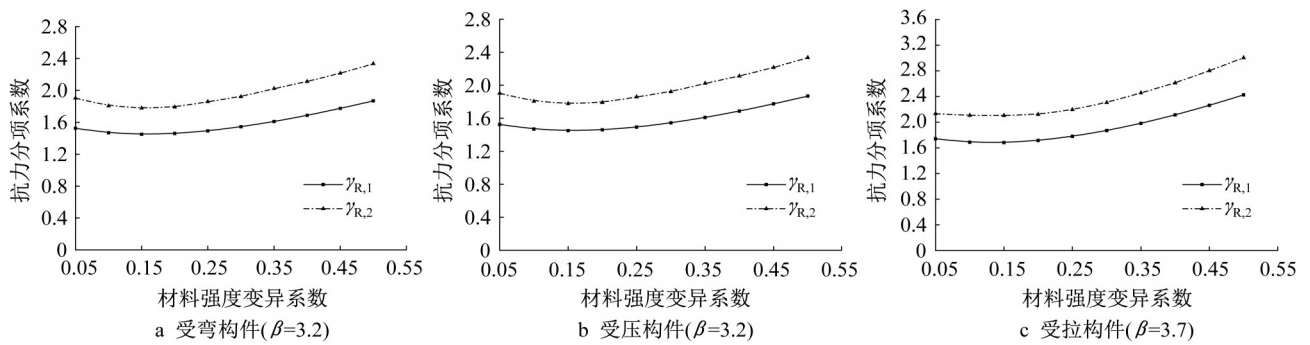


图8 $\rho=4.0$ 时哈尔滨抗力分项系数与材料强度变异系数的关系

Fig.8 γ_R versus C_{ov} at $\rho=4.0$ in Harbin

因只有恒荷载的工况等同于 $\rho=0.001$ 时恒荷载且雪荷载工况,综合考虑可近似得哈尔滨(HEB)、北京(BJ)、上海(SH)、金华(JH)的 K_{DOL} 与 ρ 关系

$$K_{DOL,HEB} = \begin{cases} 0.810, & \rho > 2.00 \\ 0.745 + 0.230\lg\rho, & 0.10 < \rho \leq 2.00 \\ 0.520, & \rho \leq 0.10 \end{cases} \quad (31)$$

$$K_{DOL,BJ} = \begin{cases} 0.820, & \rho > 2.00 \\ 0.745 + 0.251\lg\rho, & 0.13 < \rho \leq 2.00 \\ 0.520, & \rho \leq 0.13 \end{cases} \quad (32)$$

$$K_{DOL,SH} = \begin{cases} 0.800, & \rho > 1.00 \\ 0.800 + 0.330\lg\rho, & 0.15 < \rho \leq 1.00 \\ 0.520, & \rho \leq 0.15 \end{cases} \quad (33)$$

$$K_{DOL,JH} = \begin{cases} 0.820, & \rho > 2.00 \\ 0.760 + 0.200\lg\rho, & 0.07 < \rho \leq 2.00 \\ 0.520, & \rho \leq 0.07 \end{cases} \quad (34)$$

5 结论

根据中国规范 GB50005—2017 及 GB50009—

2012中荷载的概率统计模型,对荷载的时变过程进行模拟,采用Foschi-Yao模型,将短期及长期荷载下的可靠度计算结果进行对比,得到不同条件下的荷载持续作用效应的影响情况。具体结论如下:

(1)在恒荷载工况下, K_{DOL} 值由0.430增加到0.590,综合后续工况结果,本文取值0.520。

(2)在恒荷载且住宅楼面活荷载工况下, $\rho < 3.00$ 时 K_{DOL} 值为 $0.670 + 0.280 \lg \rho$, $\rho > 3.00$ 时 K_{DOL} 值为0.800。

(3)在恒荷载且雪荷载工况下,南京地区 $\rho < 1.50$ 时 K_{DOL} 值为 $0.745 + 0.370 \lg \rho$, $\rho > 1.50$ 时 K_{DOL} 值为0.810;哈尔滨地区 $\rho < 2.00$ 时 K_{DOL} 值为 $0.745 + 0.230 \lg \rho$, $\rho > 2.00$ 时 K_{DOL} 值为0.810;北京地区 $\rho < 2.00$ 时 K_{DOL} 值为 $0.745 + 0.250 \lg \rho$, $\rho > 2.00$ 时 K_{DOL} 值为0.820;上海地区 $\rho < 1.00$ 时 K_{DOL} 值为 $0.800 + 0.330 \lg \rho$, $\rho > 1.00$ 时 K_{DOL} 值为0.800;金华地区 $\rho < 2.00$ 时 K_{DOL} 值为 $0.760 + 0.200 \lg \rho$, $\rho > 2.00$ 时 K_{DOL} 值为0.820。

作者贡献申明:

何敏娟:提供目前国内外研究进展情况,把控研究整体思路方向,审查研究内容及结果的合理性。

张婷钰:负责具体的计算分析工作,整理论文思路并撰写论文。

倪春:提供研究背景及主要研究思路方法,审查研究内容及结果的合理性。

李征:提供研究思路,审查论文内容,把控研究方向。

陶铎:负责将模型抽象化原理转换为Matlab语言,为后续计算分析做铺垫。

参考文献:

- [1] van der PUT T A C M. Deformation and damage processes in wood[D]. Delft: Delft University of Technology, 1989.
- [2] PHILPOT T A, FRIDLEY K J, ROSOWSKY D V. Energy-based failure criterion for wood[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1994, 6(4): 578.
- [3] GERHARDS C C, LINK C L. A cumulative damage model to predict load duration characteristics of lumber[J]. Wood and Fiber science, 1987, 19(2):147.
- [4] FOSCHI R O, YAO Z C. Another look at three duration of load models [C]//Proceedings of IUFRO Wood Engineering

Group Meeting. Florence: [S.n.]:1986.

- [5] 祝恩淳,牛爽,乔梁,等.木结构可靠度分析及木材强度设计值的确定方法[J].建筑结构学报,2017,38(2):28.
ZHU Enchun, NIU Shuang, QIAO Liang, *et al.* Reliability analysis of wood structures and method for determining design strength value of timber [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 28.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.木结构设计标准:GB 50005—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of timber structures: GB 50005—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [7] 乔梁.木结构可靠度分析及木产品强度设计指标的确定方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
QIAO Liang. Reliability analysis of timber structures and method for determining the strength design value of wood products[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程结构可靠性设计统一标准:GB 50068—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [9] SØRENSEN J D, SVENSSONS, STANG B D. Reliability-based calibration of load duration factors for timber structures [J]. Structural Safety, 2005, 27(2):153.
- [10] YAO F Z, FOSCHI R O. Duration of load in wood: Canadian results and implementation in reliability-based design [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1993, 20(3):358.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [12] JCSS. Probabilistic model code: Part 2.2 - Load models: Live load[M].[s.l.]: JCSS, 2001.
- [13] 邸小坛,纪鹏远,曾兵.荷载标准值与分项系数的分析[J].四川建筑科学研究,2017,43(1):12.
DI Xiaotan, JI Pengyuan, ZENG Bing. Analysis of load characteristics value and partial coemcient [J]. Sichuan Building Science, 2017,43(1):12.
- [14] 孔祥迪.木材横纹抗拉强度及其荷载持续时间效应研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2016.
KONG Xiangdi. Investigation of the tension strength perpendicular to grain of wood and the duration of load effect [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2016.