

# 等幅荷载下钢筋混凝土梁变幅疲劳全过程分析

梁 栋<sup>1</sup>,葛昌伟<sup>1</sup>,李清华<sup>2</sup>,张亚楠<sup>3</sup>,栾现伟<sup>4</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院,天津 300401;2. 中交一公局集团有限公司,北京 100024;  
3. 中国民航大学交通科学与工程学院,天津 300300;4. 邢台路桥建设集团有限公司,河北 邢台 054000)

**摘 要** 目的 研究等幅荷载下钢筋混凝土梁的应力变化规律,实现在等幅荷载下钢筋混凝土梁变幅疲劳全过程分析,精准预测疲劳作用后钢筋混凝土梁的抗弯性能。  
**方法** 首先基于混凝土疲劳残余应变推导出变幅疲劳下的损伤值,根据疲劳下混凝土及钢筋的强度和刚度退化及疲劳残余变形演化规律,构建出混凝土及钢筋变幅疲劳本构模型,然后提出了变幅疲劳的仿真分析流程,最后借助有限元软件 ABAQUS 建立等幅疲劳荷载下的钢筋混凝土梁模型。**结果** 通过不断更新疲劳损伤后材料的本构模型,可以模拟任意疲劳荷载次数后钢筋混凝土梁的疲劳状态。**结论** 仿真结果与试验结果吻合程度高,验证了该分析方法的准确性;等幅荷载下受压区混凝土和受拉钢筋的应力均会出现不同程度的变化。

**关键词** 钢筋混凝土梁;变幅疲劳;材料疲劳损伤;疲劳本构模型;疲劳应力分析;疲劳全过程分析

中图分类号 TU375

文献标志码 A

## Analysis of the Whole Process of Fatigue of Reinforced Concrete Beams with Variable Amplitude under Equal Amplitude Loading

LIANG Dong<sup>1</sup>, GE Changwei<sup>1</sup>, LI Qinghua<sup>2</sup>, ZHANG Ya'nan<sup>3</sup>; CHANG Xianwei<sup>4</sup>

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401; 2. CCCC First Highway Engineering Group Co. Ltd., Beijing, China, 100024; 3. Transportation Science and Engineering College, China Civil Aviation University, Tianjin, China, 300300; 4. Xingtai Road and Bridge Construction Group Co. Ltd., Xingtai, China, 054000)

**Abstract:** To realize the whole process analysis of variable amplitude fatigue of reinforced concrete beams under equal amplitude load, to accurately predict the flexural performance of reinforced

收稿日期:2022-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51978236);河北省交通运输厅科技项目(YC-201912);天津市交通运输委员会科技发展项目(2019-06)

作者简介:梁栋(1976—),男,教授,博士,主要从事桥梁结构的智能检测等方面研究。

concrete beams after fatigue action, and to study the stress change law of reinforced concrete beams under equal amplitude load. Firstly, the damage values under variable-amplitude fatigue are derived based on the residual fatigue strain of concrete and a variable-amplitude fatigue constitutive model of concrete and reinforcement is constructed based on the degradation of strength and stiffness of concrete and reinforcement under fatigue and the evolution of fatigue residual deformation. Then the simulation analysis procedure for variable amplitude fatigue is proposed. Finally, with the help of finite element software ABAQUS, a model of the reinforced concrete beam under equal amplitude fatigue load is established, and the fatigue state of the reinforced concrete beam after any number of fatigue loads can be simulated by continuously updating the constitutive model of the material after fatigue damage. The results show that the simulation results match the test results to a high degree, which verifies the accuracy of the analysis method; the stresses in concrete and tensile reinforcement in the compressed zone under equal amplitude loading will vary to different degrees.

**Key words:** reinforced concrete beams; variable amplitude fatigue loading; material fatigue damage; fatigue constitutive model; fatigue stress analysis; full-range fatigue analysis

混凝土结构在承受反复荷载的作用下,结构将会产生累积损伤,混凝土和钢筋等材料会不断劣化。若结构出现裂缝,在疲劳作用下裂缝会不断生长,导致结构内的应力发生重分布,混凝土和钢筋的应力在相同荷载下也会发生改变<sup>[1-2]</sup>。因此,即使混凝土结构承受等幅疲劳荷载,实际结构中也会发生复杂的多级变幅应力疲劳,故不能简单使用S-N曲线进行寿命预测和疲劳性能研究,而且由于疲劳试验中材料发生损伤,无法直接通过试验测得的应变值来计算应力的值。

朱劲松等<sup>[3]</sup>通过建立疲劳后的混凝土和钢筋本构模型,对钢筋混凝土梁进行了等幅疲劳全过程分析。X. Su等<sup>[4]</sup>考虑材料性能的退化、氯化物的侵蚀和预应力的损失问题,依据残余面积法和S-N法代替了基于疲劳裂纹扩展的疲劳损伤累积估计方法,建立了预测等幅荷载下腐蚀预应力混凝土梁疲劳寿命的评估方法。雷兵等<sup>[5]</sup>根据混凝土和钢筋材料的疲劳本构关系,并结合疲劳作用后预应力筋的有效预应力损失情况,模拟了预应力混凝土梁在等幅疲劳荷载下的疲劳性能。冯秀峰等<sup>[6]</sup>仅考虑疲劳后混凝土变形模量和钢筋的有效面积变化,对变幅疲劳下部分预应力混凝土构件进行了非线性分析。潘华<sup>[7]</sup>根据平截面假定,由钢筋和混凝土

的粘结应力规律推导出了平均截面的材料本构关系,并利用条带法计算出等幅荷载下混凝土受弯构件的变幅疲劳性能,但是条带法分析法的求解过于繁琐,不太符合实际受力情况。

为实现变幅疲劳下混凝土结构的全过程分析,笔者从混凝土疲劳破坏机理出发,建立由混凝土的疲劳残余应变来反映疲劳损伤值的模型,根据此损伤值,可方便地计算出变幅疲劳下混凝土的疲劳强度、疲劳刚度以及疲劳残余应变和峰值应变;并结合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[8]</sup>构建出混凝土变幅疲劳本构模型,然后利用断裂力学原理,计算钢筋的疲劳损伤值,并根据钢筋在疲劳作用下的演化规律,构建出钢筋变幅疲劳本构模型;最后借助大型通用有限元软件ABAQUS建立钢筋混凝土梁模型,通过不断校正疲劳后混凝土和钢筋的材料性能,对等幅疲劳荷载下梁的疲劳性能进行了更精确的全过程非线性分析,并根据有限元仿真结果,探讨了钢筋和混凝土的应力变化情况。

## 1 混凝土变幅疲劳本构模型

### 1.1 疲劳残余应变及疲劳损伤

吴佩刚等<sup>[9]</sup>在1994年提出了考虑混凝土疲劳应力比和循环次数的疲劳残余应变累

积模型:

$$\varepsilon_r(n) = a(R)n^{0.1662} \times 10^{-6}. \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_r(n)$  为混凝土承受疲劳应力比  $R$  时, 疲劳荷载作用  $n$  次后的混凝土残余应变;  $a(R)$  为与疲劳应力比  $R$  相关的系数, 计算方法采用文献[10]给出的拟合公式。

在此基础上, 笔者假设混凝土在疲劳荷载次数从第  $m$  次到第  $m + n_i$  次之间发生第  $i$  级变幅疲劳应力行为, 在此期间不发生应力变化, 则在此期间产生的疲劳残余应变为

$$\varepsilon_{r,i}(n_i) = \varepsilon_{r,i}(m) - \varepsilon_{r,i}(m + n_i). \quad (2)$$

在变形“唯一性”假设<sup>[11]</sup>下, 变幅疲劳作用下的混凝土总残余应变等于各级疲劳荷载产生的残余应变线性叠加, 各级荷载之间互不影响; 根据式(2), 混凝土在共  $j$  次变幅疲劳下的总残余应变为

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^j(n) &= \varepsilon_{r,1}(n_1) + \varepsilon_{r,2}(n_2) + \cdots = \\ \sum_{i=1}^j \varepsilon_{r,i}(n_i). \end{aligned} \quad (3)$$

混凝土疲劳过程中, 内部的微观结构和微裂缝等微观变量会产生很大的变化, 造成疲劳损伤会不断增加, 引起宏观力学性能逐渐劣化, 其中混凝土残余变形可以反映混凝土微观变量不可逆发展的情况。根据非线性累积损伤, 笔者采用混凝土的疲劳残余应变来反映疲劳损伤值, 在第  $i$  级疲劳加载下的损伤值为

$$D_i(n_i) = \frac{\varepsilon_{r,i}(n_i)}{\varepsilon_r(N_i^{cf})}. \quad (4)$$

式中:  $N_i^{cf}$  为混凝土第  $i$  级的疲劳寿命, 将  $N_i^{cf}$  带入式(1), 即可得到第  $i$  级变幅疲劳荷载下总残余应变  $\varepsilon_r(N_i^{cf})$ ;  $N_i^{cf}$  可由 K. Aas-Jakobsen<sup>[12]</sup> 提出的直线形式 Wohler 方程计算得到:

$$S_{\max,i}^c = 1 - \beta(1 - R_i) \lg N_i^{cf}. \quad (5)$$

式中:  $S_{\max,i}^c$  为混凝土在第  $i$  级变幅疲劳荷载下的最大应力水平,  $S_{\max,i}^c = \sigma_{\max,i}^c / f_c$ ;  $R_i$  为混凝土在第  $i$  级变幅疲劳荷载下的应力比,  $R_i = \sigma_{\max,i}^c / \sigma_{\min,i}^c$ ;  $\sigma_{\max,i}^c$  和  $\sigma_{\min,i}^c$  分别为第  $i$  级变幅疲劳后荷载上限和下限对应的混凝土应力;  $f_c$  为混

凝土抗压强度;  $\beta$  为系数, 取 0.064。

由此, 可得混凝土在  $j$  次变幅疲劳下的损伤总值:

$$\begin{aligned} D(n) &= D_1(n_1) + D_2(n_2) + \cdots = \\ \sum_{i=1}^j D_i(n_i). \end{aligned} \quad (6)$$

### 1.2 疲劳强度和刚度退化及峰值应变

在上述混凝土疲劳损伤总值  $D(n)$  的基础上, 混凝土疲劳  $n$  次后的受压剩余疲劳强度和刚度计算式为

$$f_c(n) = [1 - D(n)] f_c. \quad (7)$$

$$E_c(n) = [1 - D(n)] E_c. \quad (8)$$

式中:  $f_c(n)$  为混凝土在疲劳  $n$  次后的抗压强度;  $E_c(n)$  为混凝土在疲劳  $n$  次后的弹性模量;  $E_c$  为混凝土初始弹性模量。

为简化计算, 采用不考虑应力比来计算混凝土疲劳  $n$  次后抗拉强度退化<sup>[13]</sup>:

$$f_t(n) = f_t(1 - \lg n / 10.954). \quad (9)$$

式中:  $f_t$  为混凝土初始抗拉强度。

由 E. Hongnestad<sup>[14]</sup> 本构来确定疲劳混凝土峰值应变:

$$\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^2 - \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} + \frac{\sigma}{f_c} = 0. \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon_c$  为混凝土初始静载时受压峰值应变。

由于单轴混凝土应力应变曲线可包络混凝土疲劳残余强度<sup>[15]</sup>, 可将式(7)带入式(10), 并考虑疲劳残余应变  $\varepsilon_r^j(n)$ , 经过简化和变换得混凝土疲劳  $n$  次后受压疲劳峰值应变  $\varepsilon_{cp}(n)$ :

$$\varepsilon_{cp}(n) = \varepsilon_c [1 + \sqrt{D(n)}] - \varepsilon_r^j(n). \quad (11)$$

由于受拉状态下混凝土的循环应力-应变曲线几乎为直线, 斜率变化很小<sup>[16]</sup>, 当混凝土拉应力在小于其疲劳后的抗拉强度时, 仍然表现为线弹性。由此, 可得到疲劳作用  $n$  次后混凝土受拉峰值应变:

$$\varepsilon_{tp}(n) = \frac{f_t(n)}{E_c(n)}. \quad (12)$$

### 1.3 疲劳后混凝土本构关系

基于上述对变幅疲劳下混凝土疲劳强度

和刚度退化,以及疲劳残余应变和峰值应变的分析,并结合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[8]</sup>附录中的混凝土单轴受拉、压本构关系,得到变幅疲劳下的受压本构模型如下:

$$\sigma(n) = \begin{cases} \frac{p(n)x_c(n)f_c(n)}{p(n)-1+x_c(n)^{p(n)}}, & x_c(n) \leq 1; \\ \frac{x_c(n)f_c(n)}{\alpha_c[x_c(n)-1]^2+x_c(n)}, & x_c(n) > 1. \end{cases} \quad (13)$$

混凝土疲劳受拉疲劳本构关系:

$$\sigma(n) = \begin{cases} E_c(n)[\varepsilon(n) - \varepsilon_r^j(n-1)], & x_t(n) \leq 1; \\ \frac{x_t(n)f_t(n)}{\alpha_t[x_t(n)-1]^{1.7}+x_t(n)}, & x_t(n) > 1. \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $x_c(n) = \frac{\varepsilon(n) - \varepsilon_r^j(n-1)}{\varepsilon_{cp}(n)}$ ;  $x_t(n) = \frac{\varepsilon(n) - \varepsilon_r^j(n-1)}{\varepsilon_{tp}(n)}$ ;  $p(n) = \frac{E_c(n)\varepsilon_{cp}(n)}{E_c(n)\varepsilon_{cp}(n) - f_c(n)}$ ;  $\varepsilon_r^j(n-1)$  为疲劳  $n-1$  次后的总残余应变;  $\alpha_c$  和  $\alpha_t$  分别为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数值; 变量  $\sigma(n)$  和  $\varepsilon(n)$  分别为混凝土疲劳  $n$  次后的应力和应变。

## 2 钢筋变幅疲劳本构模型

基于断裂力学原理,文中定义钢筋的疲劳损伤总值  $D_s(n)$  由钢筋疲劳裂纹面积  $A_s$  与开始时的无损截面积  $A_0$  之比计算得到:

$$D_s(n) = \frac{A_s}{A_0} = \frac{A_0 - A_s(n)}{A_0}. \quad (15)$$

其中,  $A_s(n)$  为变幅应力作用下的钢筋截面的有效面积,可按式求解<sup>[6]</sup>:

$$A_s(n) = A_0 \prod_{i=1}^j \left[ 1 - \frac{n_i}{N_i^{rf}} \left( 1 - \frac{\sigma_{\max,i}}{f_y} \right) \right]. \quad (16)$$

式中:  $n_i$  为第  $i$  级疲劳作用次数;  $N_i^{rf}$  为第  $i$  级疲劳所对应的钢筋疲劳寿命;  $\sigma_{\max,i}$  为第  $i$  级变幅疲劳后荷载上限对应的钢筋应力;  $f_y$  为初始的钢筋强度。

朱劲松等<sup>[17]</sup>通过拟合大量的钢筋混凝土梁疲劳数据,建立了钢筋的  $S-N$  方程,得到普通钢筋的疲劳寿命  $N_i^{rf}$  的计算方程为

$$\lg N_i^{rf} = 14.7806 - 3.7928 \cdot \lg(\Delta\sigma_{s,i}^r) \quad (17)$$

式中:  $\Delta\sigma_{s,i}^r$  为第  $i$  级疲劳所对应的钢筋应力幅,  $\Delta\sigma_{s,i}^r = \sigma_{\max,i}^r - \sigma_{\min,i}^r$ ,  $\sigma_{\min,i}^r$  为第  $i$  级变幅疲劳后荷载下限对应的钢筋应力。

疲劳  $n$  次后钢筋剩余强度可以表示为

$$f_y(n) = [1 - D_s(n)]f_y. \quad (18)$$

由于在高周疲劳下,可以由钢筋的  $S-N$  曲线试算得到受拉钢筋的应力水平,一般均未达到屈服强度,应力水平比较低,受力和变形均处于弹性阶段。这里既假定钢筋的疲劳弹性模量不变,始终等于初始弹性模量。

为简化计算,钢筋采用理想的弹塑性应力应变模型,在变幅疲劳下的本构模型为

$$\sigma_s(n) = \begin{cases} E_s[\varepsilon_s(n) - \varepsilon_{sr}(n-1)], & \varepsilon_{sr}(n-1) < \varepsilon_s(n) < \varepsilon_{sp}(n); \\ f_y(n), & \varepsilon_s(n) \geq \varepsilon_{sp}(n). \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $E_s$  为钢筋初始弹性模量; 变量  $\sigma_s(n)$  和  $\varepsilon_s(n)$  分别为钢筋疲劳  $n$  次后的应力和应变;  $\varepsilon_{sr}(n-1)$ 、 $\varepsilon_{sp}(n)$  为疲劳加载  $n-1$ 、 $n$  次后的钢筋残余应变和屈服应变,可按文献[3]求解,其中  $\varepsilon_{sr}(n-1) = [f_y(n) - f_y(n-1)]/E_s$ ;  $\varepsilon_{sp}(n) = \varepsilon_{sr}(n-1) + f_y(n)/E_s$ 。

## 3 钢筋混凝土梁变幅疲劳全过程分析

### 3.1 有限元加载周期

根据文献[18],等幅疲劳荷载下混凝土结构疲劳损伤大致分为三阶段,第一阶段和第三阶段的疲劳寿命大约均占全过程的 10%,此时的疲劳损伤不稳定发展,有限元仿真时,为满足精度要求,加载周期  $T_i$  取值小一些(取 1 万次<sup>[19]</sup>),而对于第二阶段近乎线性增长阶段,将加载周期  $T_i$  取值大一些(取 10 万次)。根据混凝土梁疲劳损伤三阶段规律,由于材料



劣化,不同加载周期  $T_i$  区间内结构应力会发生变化;笔者假定在同一个加载周期  $T_i$  区间内承受第  $i$  级变幅疲劳应力,材料的本构关系在每个加载周期内不发生变化,结构承受等幅疲劳应力,由此构成了多级变幅疲劳行为,将各个分段周期的计算结果联系起来,实现非线性疲劳求解。

3.2 结构疲劳失效准则

3.2.1 混凝土疲劳失效准则

由于混凝土存在初始缺陷,加之疲劳的作用,材料发生劣化,缺陷逐步发展,最终混凝土将会发生疲劳破坏,当混凝土的疲劳残余应变  $\varepsilon_r(n)$  达到 0.4 倍的静载极限压应变  $\varepsilon_0$  时,混凝土损伤严重,将不能继续安全使用<sup>[20]</sup>。在此,沿用该混凝土疲劳失效准则:

$$\varepsilon_r(n) \geq 0.4\varepsilon_0. \tag{20}$$

式中: $\varepsilon_r(n)$  为混凝土疲劳  $n$  次后的压应变; $\varepsilon_0$  为结构静载时混凝土的极限应变。

3.2.2 钢筋疲劳失效准则

结构在承受疲劳荷载后,由式(18)可知,钢筋的极限强度会不断的减小,笔者以钢筋的疲劳强度为破坏指标,在疲劳荷载上限时,有限元计算出的钢筋应力  $\sigma_{\max}^s(n)$  达到式(18)中的最大应力限值  $f_y(n)$ ,则认为钢筋已经发生疲劳破坏,即:

$$\sigma_{\max}^s(n) \geq f_y(n). \tag{21}$$

3.3 仿真分析流程

笔者采用类似钢筋混凝土梁疲劳试验的方法,定义疲劳一定次数后进行有限元静力分析来模拟疲劳后的损伤状态,具体流程见图 1。

模拟时将整个疲劳过程简化为以下三个阶段:

①静力加载阶段。验证有限元模型的正确性,并确定结构的极限承载力。

②疲劳加载阶段。按照定义的加载周期对有限元模型进行分段线性分析,笔者假定在一个加载周期  $T_i$  区间内结构承受等幅疲劳应力,根据加载周期  $T_i$  开始前的应力状态等信息更新计算材料的疲劳损伤本构关系,

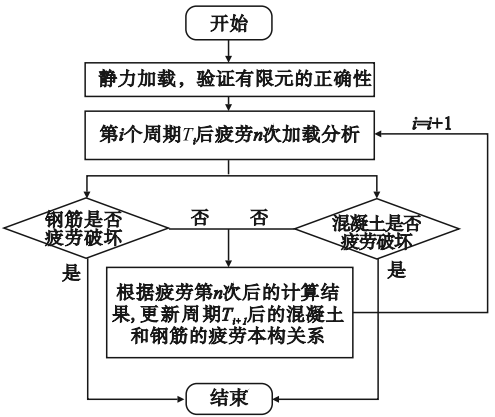


图 1 结构变幅疲劳全过程仿真分析流程图

Fig. 1 Flow chart of structural variable amplitude fatigue full process simulation analysis

求解加载周期  $T_i$  结束后的疲劳状态,并分别判断钢筋和混凝土是否满足疲劳失效准则。

③如果结构中的一种材料发生失效破坏,则终止计算;若所有的材料均未失效,则重复步骤②继续计算,直到满足疲劳失效准则,停止计算。

4 疲劳全过程有限元分析

4.1 算例选取

算例选取文献[21]中三根空心矩形截面钢筋混凝土梁,下缘受拉钢筋为 HRB335,架立筋和箍筋均采用 R235 级光圆筋,混凝土等级为 C25,混凝土的净保护层厚度为 25 mm,具体的截面尺寸和配筋情况见图 2 和图 3,加载参数见表 1。疲劳加载方式采用等幅疲劳荷载。

4.2 有限元建模

在有限元 ABAQUS 中,混凝土采用三维六面体减缩单元 C3D8R 模拟,所有钢筋采用二结点三维桁架单元 T3D2 模拟,对混凝土和钢筋骨架采用分离式嵌入模型简化,在加载点和支座处设置刚性垫块以防止出现应力集中现象,有限元网格尺寸为 40 mm,有限元模型见图 4。首先根据静力加载以验证有限元模型的正确性,静力加载的材料参数根据文献[21]来确定,并确定结构的极限承载

力;其次在疲劳加载阶段,根据笔者提出的混凝土和钢筋的变幅疲劳本构模型,实时更新疲劳加载  $n$  次后的混凝土和钢筋弹性模量及应力应变本构关系,以及更新钢筋的有效面积,输入到有限元 ABAQUS 中,来求解在疲劳加载  $n$  次后结构的性能,并将仿真结果与

文献[21]中的试验结果做对比,以此验证本构模型的可靠性;最后借助混凝土和钢筋的变幅疲劳本构模型以及有限元建模,分析比较等幅疲劳荷载加载过程中结构内混凝土和钢筋的应力变化规律。

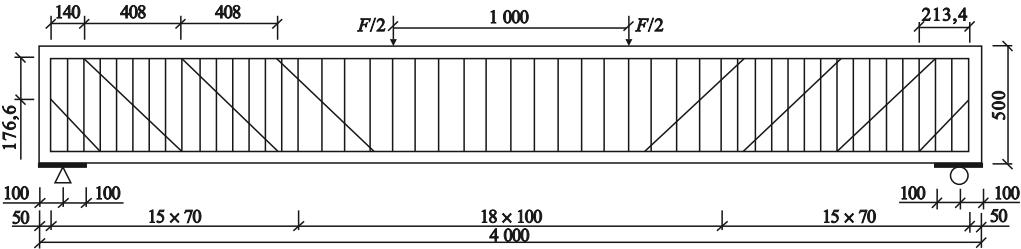


图 2 试验梁纵截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of longitudinal section of test beam

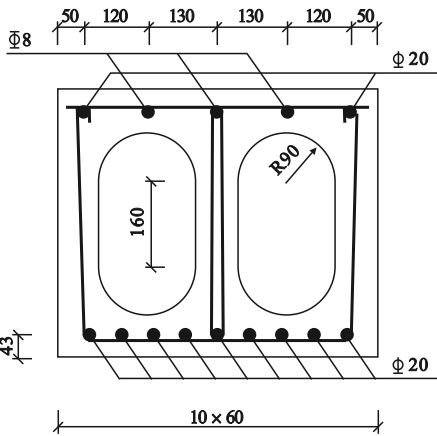


图 3 试验梁横截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross section of test beam

表 1 疲劳加载参数

Table 1 Fatigue loading parameters

编号	试验类型	荷载下限 $P_{min}/\text{kN}$	荷载上限 $P_{max}/\text{kN}$	最大荷载 水平
L0	静载试验	—	—	—
L1	疲劳试验	104	312	0.6
L4	疲劳试验	104	260	0.5

4.3 静载仿真分析

有限元仿真和试验测量的静载荷载-跨中位移曲线如图 5 所示。从图中可以看出, L0 梁的极限承载力试验值为 520 kN,有限元仿真值为 535 kN,仿真值与试验值误差为 2.8%;L0 梁开裂荷载试验值为 170 kN,有限元仿真值为 161 kN,仿真值与试验值误差为 5.2%。误差均满足要求,仿真曲线与试验曲线基本一致,验证了有限元模型及分析结果的正确性。

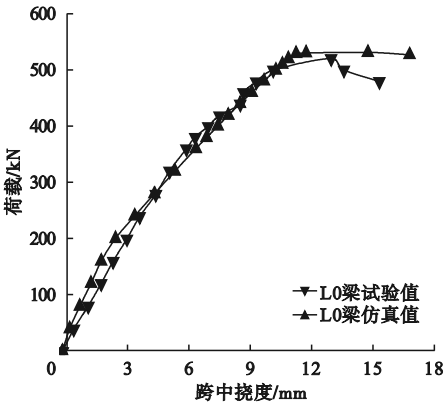


图 5 静载下荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load deflection curves under static load

4.4 疲劳全过程仿真分析

为便于分析对比,图 6、图 7 分别给出了试验梁 L1、L4 疲劳加载 1 万次和 60 万次后静态荷载-挠度曲线。从图中可以看出,有限

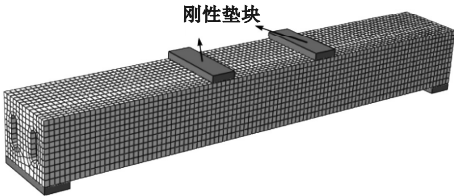


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

元仿真曲线与试验曲线吻合程度较高,最大误差发生在 L1 梁疲劳加载 1 万次的时候,最大误差为 7.6%。同时可以看出,同一根梁,随着疲劳次数的增大,材料损伤逐渐累积,试验梁的刚度不断变小,荷载-挠度曲线斜率随之减小,相同荷载下的挠度逐渐增大;在相同的疲劳荷载下限时,材料的损伤随着疲劳荷载水平的增大而增大,刚度减小也会更快。图中梁 L1 的损伤要比梁 L4 的损伤更加严重,曲线斜率也更小,对应的疲劳寿命也会更短,这一点可由材料的  $S-N$  计算式(5)和式(17)验证。

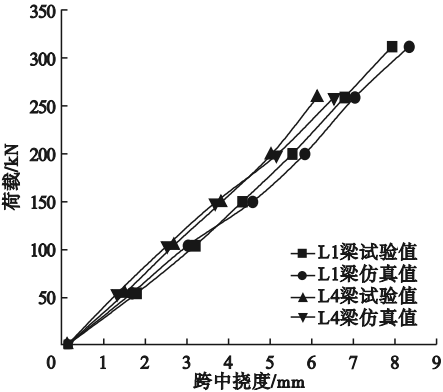


图6 各梁疲劳加载1万次后荷载-挠度曲线  
Fig.6 Load deflection curves of each beam after 10 thousand times of fatigue loading

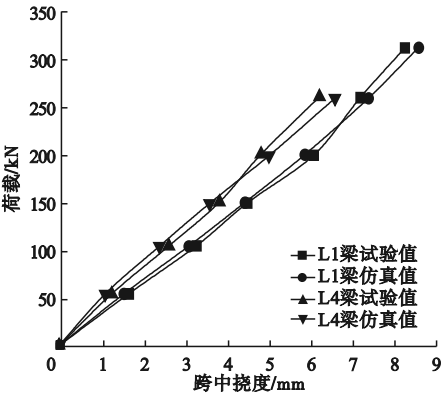


图7 各梁疲劳加载60万次后荷载-挠度曲线  
Fig.7 Load deflection curves of each beam after 600 thousand times of fatigue loading

为了更加直观展现疲劳发展的三阶段规律,笔者选取梁 L4 的受拉钢筋和混凝土受压区的应变进一步分析,其中梁 L4 试验测

得的疲劳寿命为 328.06 万次,图 8 和图 9 分别为疲劳荷载作用下梁 L4 混凝土跨中上缘受压区的应变和钢筋受拉应变变化曲线。从图中可以看出,仿真值与试验值变化趋势基本一致,由于疲劳造成材料损伤,以及残余应变的累积,疲劳荷载上下限所对应的混凝土和钢筋的最大、最小应变均会随着疲劳次数的增大而增大,前 30 万次左右疲劳过程中增长速度较快,然后增长较缓,这与混凝土结构疲劳发展的三阶段规律相符,说明结构在此逐渐由第一阶段向第二阶段转变;中间的大部分疲劳加载期间变化比较舒缓,随着疲劳次数的增大,材料的损伤也进一步累积,在疲劳加载次数接近270万次以后,无论是仿真

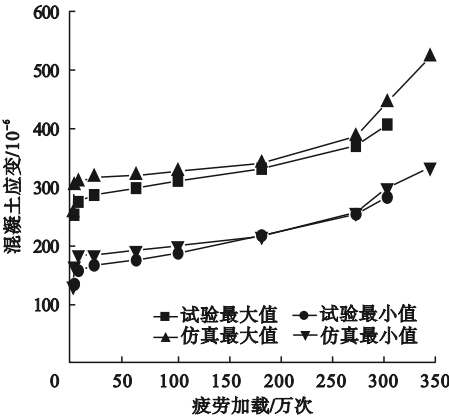


图8 疲劳加载阶段混凝土受压应变  
Fig.8 Compression strains of concrete in fatigue loading stage

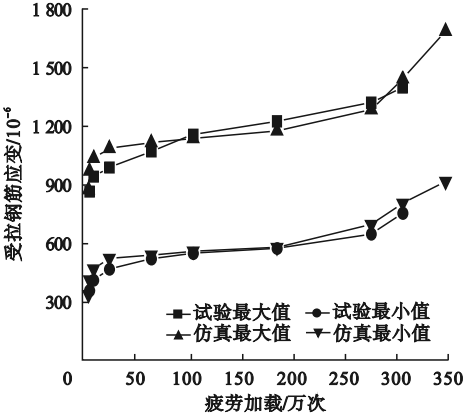


图9 疲劳加载阶段钢筋受拉应变  
Fig.9 Tensile strains of reinforcement in fatigue loading stage

值还是试验值增长幅度明显加快,符合混凝土结构疲劳发展的第三阶段情况;最终在加载到 341 万次时,钢筋的计算最大应力为 264.4MPa,超过此时钢筋的疲劳强度 261.9MPa,有限元仿真暂停计算。

图 8 和图 9 均体现出达到疲劳破坏前,混凝土受压应变和钢筋受拉应变较初始值增长均超过 50%,分析原因主要是由于疲劳损伤引起的残余应变累积和试验梁的整体刚度下降而引起的。

4.5 疲劳过程中结构内应力变化规律

根据式(8)可知,在疲劳加载过程中,混凝土的弹性模量会不断的降低,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[8]</sup>也规定,混凝土在疲劳过程中的弹性模量取值大小降为初始值的一半以上,由于在试验过程中仅能测得混凝土应变的变化,所以很难精确的进一步计算得到混凝土实际应力的变化,只能通过应变来表征混凝土的损伤情况;另外根据现有的测量技术,在疲劳试验中也很难直接测得钢筋应力的大小。针对此,笔者着重对等幅疲劳荷载加载过程中受压区混凝土和受拉钢筋的应力进行仿真分析研究。

L4 梁疲劳过程中混凝土跨中上缘受压区的应力仿真结果如图 10 所示。

较低,若将其应力数据代入混凝土的  $S-N$  曲线计算式(5)可知,一般情况不会发生疲劳破坏,混凝土的压应力比均保持在 0.45 左右,与疲劳施加的荷载比 0.4 基本相同。在加载初期,疲劳荷载上下限对应的压应力在疲劳加载初始阶段都迅速减小,疲劳荷载下限对应的最小值变化在 0.4 MPa 以内,疲劳荷载上限对应的最大值变化接近 0.9 MPa,应力变化幅度均在 13% 左右。在前 30 万次疲劳过程中混凝土应力迅速减小,可能是由于疲劳开始时,混凝土的损伤较多,由式(8)可得混凝土的弹性模量随着疲劳损伤值的增加而等比例迅速减小;刘磊<sup>[22]</sup>也在计算中发现,疲劳加载初期时,混凝土的弹性模量会呈现指数下降,试验梁加载初期的疲劳性能主要受混凝土的损伤控制,控制次数约占疲劳总循环次数的 10%;随着疲劳次数的增大,混凝土损伤趋于稳定,弹性模量减少速率随之变缓,混凝土的应力基本保持不变,在疲劳加载前两阶段混凝土的应力变化与潘华<sup>[7]</sup>采用的条带法计算趋势基本相同;在疲劳加载次数接近 270 万次后期,猜测由于混凝土结构疲劳裂缝的生长,受压区高度不断减小,为了满足平衡,混凝土的应力随之增大。疲劳加载过程中的混凝土压应力会不断变化,在计算钢筋混凝土梁的疲劳性能时,需要注意混凝土应力的变化,否则计算可能会出现很大的偏差。

大量试验结果表明,钢筋混凝土梁在疲劳作用下的破坏一般都是受拉钢筋的断裂引起的,在疲劳过程中需重点关注钢筋的应力变化。由于在高周疲劳下,受拉钢筋的应力水平比较低,一般均未达到屈服强度,受力和变形均处于弹性阶段,这里也假定试验中钢筋的疲劳弹性模量不变,始终等于初始弹性模量,然后通过试验测得的应变计算得出钢筋应力的试验值大小。疲劳加载阶段钢筋受拉应力仿真结果和试验结果如图 11 所示。

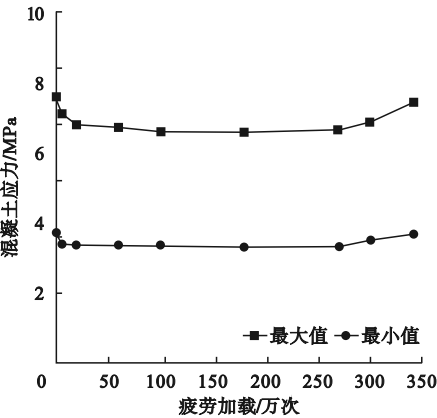


图 10 疲劳加载阶段混凝土跨中上缘受压区应力

Fig. 10 Stresses in the upper edge of the concrete midspan in the fatigue loading stage

由图 10 可以看出,混凝土所受的压应力



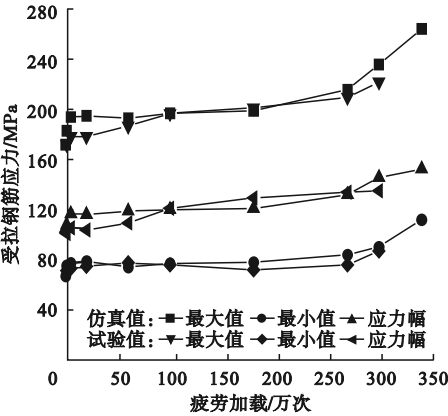


图 11 疲劳加载阶段受拉钢筋应力  
Fig. 11 Tensile stresses of reinforcement in fatigue loading stage

由图 11 可以看出,无论是仿真值还是试验值,疲劳荷载上限对应的最大值增长速率要比疲劳荷载下限对应的最小值增长速率快一些,造成疲劳过程中钢筋的应力幅逐渐增大,仿真值和试验值在结构疲劳前两阶段应力幅比初始值大 25% 左右,这与文献[22]给出的结论基本相同,若钢筋的最大应力达到此时的疲劳强度,钢筋会发生疲劳断裂。钢筋应力增大的原因,可能是由于结构受拉区混凝土抗拉性能的减弱,逐渐退出工作,拉应力逐渐由钢筋承担。另外可由式(16)可知,在疲劳加载过程中钢筋的有效截面面积减小,也会造成应力增大。经过以上对钢筋混凝土梁的受压区混凝土和受拉钢筋应力分析,在疲劳加载前期,钢筋的应力增大而混凝土的应力减小,显然是不符合常理的,这里猜测是由于疲劳加载前期混凝土的受压区高度会有一定程度的增大<sup>[23]</sup>,所以才能平衡弯矩。

5 结 论

(1)笔者在考虑材料损伤的基础上,基于混凝土疲劳残余应变推导出变幅疲劳下的损伤值,由此得出变幅疲劳下混凝土的疲劳强度、疲劳刚度以及疲劳残余应变和峰值应变,并结合钢筋在变幅疲劳下的本构关系和损伤模型,利用有限元软件 ABAQUS 不断更

新材料疲劳损伤后的性能,仿真计算结果与试验结果吻合度较高,为钢筋混凝土梁在变幅疲劳下计算提供了参考。

(2)等幅疲劳荷载下,钢筋混凝土梁会承受不同程度的变幅疲劳应力,在以后进行相关疲劳研究时,不宜简单套用疲劳荷载的大小,要综合考虑结构内的应力变化。

(3)在疲劳加载初始阶段,混凝土承受的最大和最小应力,以及应力幅均随疲劳次数的增加而降低,在疲劳加载后期,其值会变大;而钢筋却与之不同,在整个疲劳加载阶段,均有增大的趋势,由于钢筋混凝土梁的疲劳破坏基本是钢筋断裂产生的,在设计计算中需要重点关注钢筋应力的变化。

(4)利用混凝土和钢筋的变幅疲劳本构模型,通过有限元分析,可以有效模拟疲劳试验,并获得疲劳试验中不易获取的数据,如疲劳应力等。

参考文献

[1] 林路宇. 预应力混凝土梁式桥开裂后受力性能研究及损伤评估[D]. 西安: 长安大学, 2008.  
(LIN Luyu. Research on mechanical performance and damage assessment of prestressed concrete beam bridge after cracking [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.)

[2] 杨晓明, 陈鹤, 韩志强. 钢筋混凝土梁开裂后钢筋应力变化规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(7): 718-723.  
(YANG Xiaoming, CHEN He, HAN Zhiqiang. The change rule of reinforcement stress after cracking of reinforced concrete beams [J]. Journal of Liaoning university of engineering and technology (natural science edition), 2017, 36(7): 718-723.)

[3] 朱劲松, 朱先存. 钢筋混凝土桥梁疲劳累积损伤失效过程简化分析方法[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 107-114.  
(ZHU Jinsong, ZHU Xiancun. Simplified analysis method for fatigue cumulative damage failure process of reinforced concrete bridges [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(5): 107-114.)

[4] SU X, MA Y, WANG L, et al. Fatigue life prediction for prestressed concrete beams under corrosion deterioration process [J]. Structures, 2022, 43: 1704-1715.

[5] 雷兵. 部分预应力混凝土梁疲劳性能试验研究及数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学,

2013.  
(LEI Bing. Experimental research and numerical simulation on fatigue performance of partially prestressed concrete beams [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.)
- [6] 冯秀峰, 宋玉普, 宋元成. 预应力混凝土受弯构件疲劳损伤全过程非线性分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(3): 410–415.  
(FENG Xiufeng, SONG Yupu, SONG Yuancheng. Nonlinear analysis of the whole process of fatigue damage of prestressed concrete flexural members [J]. Journal of Dalian university of technology, 2005, 45(3): 410–415.)
- [7] 潘华. 混凝土受弯构件疲劳性能的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
(PAN Hua. Experimental study on fatigue performance of concrete flexural members [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.)
- [8] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
(China Academy of Building Sciences. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture Press, 2011.)
- [9] 吴佩刚, 赵光仪, 白利明. 高强混凝土抗压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 1994(3): 33–40.  
(WU Peigang, ZHAO Guangyi, BAI Liming. Research on compressive fatigue performance of high-strength concrete [J]. Journal of civil engineering, 1994(3): 33–40.)
- [10] 屈浩. 混凝土梁重载疲劳全过程分析与疲劳寿命研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.  
(QU Hao. Full process analysis and fatigue life study of concrete beams under heavy load fatigue [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.)
- [11] 王瑞敏, 赵国藩, 宋玉普. 混凝土的受压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 1991, 24(4): 38–47.  
(WANG Ruimin, ZHAO Guofan, SONG Yupu. Research on compressive fatigue performance of concrete [J]. Journal of civil engineering, 1991, 24(4): 38–47.)
- [12] AAS-JAKOBSEN K. Fatigue of concrete beams and columns [M]. Norwegian: Trondheim, 1970.
- [13] BALAGURU P, SHAH S P. A method of predicting crack widths and deflections for fatigue loading [J]. ACI special publication, 1982, 75(5): 153–175.
- [14] HOGNESTAD E. Confirmation of inelastic stress distribution in concrete [J]. Journal of the structural division, 1957, 83(2): 1–17.
- [15] TORRENTI J M, PIJAUDIER-CABOT G, REYNOUARD J. Mechanical behaviour of concrete: cyclic and dynamic loading, fatigue of structural concrete [J]. ISTE and wiley, hoboken, NJ, 2010: 185–223.
- [16] SAITO M, IMAI S. Direct tensile fatigue of concrete by the use of friction grips [J]. ACI journal, proceeding, 1983, 80(5): 431–438.
- [17] 朱劲松, 闫广鹏. 钢筋混凝土桥面板疲劳数值分析方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 59–66.  
(ZHU Jinsong, YAN Guangpeng. Numerical analysis method for fatigue of reinforced concrete bridge decks [J]. Journal of China highway engineering, 2012, 25(1): 59–66.)
- [18] 张劲泉, 宋紫薇, 韩冰, 等. 车辆荷载作用下公路混凝土桥梁疲劳问题研究进展[J]. 土木工程学报, 2022, 55(12): 65–79.  
(ZHANG Jinquan, SONG Ziwei, HAN Bing, et al. Research progress on fatigue issues of highway concrete bridges under vehicle loads [J]. Journal of civil engineering, 2022, 55(12): 65–79.)
- [19] 文雨松, 廖群力, 李品福. 铁路混凝土梁疲劳问题的分段线性解[J]. 铁道学报, 1995, 18(1): 79–83.  
(WEN Yulong, LIAO Qunli, LI Pinfu. Piecewise linear solution for fatigue problems of railway concrete beams [J]. Journal of railways, 1995, 18(1): 79–83.)
- [20] 李朝阳, 宋玉普, 赵国藩. 混凝土疲劳残余应变性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2001(3): 355–358.  
(LI Chaoyang, SONG Yupu, ZHAO Guofan. Research on fatigue residual strain properties of concrete [J]. Journal of Dalian university of technology, 2001(3): 355–358.)
- [21] 吴忠河. 桥梁用钢筋混凝土空心梁疲劳性能及寿命预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
(WU Zhonghe. Research on fatigue performance and life prediction of reinforced concrete hollow beams for bridges [D]. Changsha: Central South University, 2009.)
- [22] 刘磊. 环境和荷载共同作用下钢筋混凝土桥梁疲劳性能研究[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2015.  
(LIU Lei. Research on fatigue performance of reinforced concrete bridges under the combined action of environment and load [D]. Beijing: Research Institute of Highway Science, Ministry of Transport, 2015.)
- [23] BIRKNER D, MARX S. Large-scale fatigue tests on prestressed concrete beams [C]. IABSE congress, christchurch 2021: resilient technologies for sustainable infrastructure, Christchurch: [s. n.], 2021.

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)