

DOI:10.11918/201912052

受剪应力影响的 CFRP-钢界面蠕变本构模型

徐佰顺^{1,2}, 姚亚东^{1,2}, 常建梅^{1,2}, 张长江¹, 宋 帅³

(1. 内蒙古大学 交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古自治区桥梁检测与维修加固工程技术研究中心, 呼和浩特 010070;
3. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘 要: 为研究碳纤维增强复合材料 (CFRP)-钢界面胶粘剂的蠕变特性, 开展不同拉伸荷载作用下 CFRP-钢双剪试件的长期加载试验, 分析 CFRP 应变分布规律及其随加载时间变化特点. 基于 Burgers 模型特性及胶层剪应变随时间变化规律给出了模型中各参数的求解方法. 根据试验数据拟合得到了 Burgers 模型和 Findley 幂律方程中各参数的表达式. 结果表明: 在长期界面剪切应力作用下 CFRP-钢界面胶粘剂发生了蠕变变形, CFRP 应变从加载端到固定端非线性减小, 其随加载时间增加而增大且增大速率逐渐减小; 界面名义剪应力越高, 胶粘剂蠕变变形越大, CFRP 应变增加越多; Burgers 模型中参数 η_M 和 G_K 均是剪应力 τ 的一次函数, 参数 η_K 是剪应力 τ 的二次函数; Findley 幂律方程中参数 m 是剪应力 τ 的一次函数, 参数 n 是剪应力 τ 的二次函数; Burgers 模型和 Findley 幂律方程的均方根误差都很小, 两类模型都能较好地预测胶粘剂的蠕变变形; 当界面剪应力 τ 较高时, Burgers 模型预测的胶粘剂蠕变变形与试验结果吻合程度要好于 Findley 幂律方程.

关键词: CFRP-钢界面; 胶粘剂; 蠕变; 本构模型; 双剪试件; 剪应力

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)03-0170-08

Creep constitutive model of CFRP-steel interface under shear stress

XU Baishun^{1,2}, YAO Yadong^{1,2}, CHANG Jianmei^{1,2}, ZHANG Changjiang¹, SONG Shuai³

(1. Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;
2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Testing and Strengthening for Bridges, Hohhot 010070, China;
3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China)

Abstract: To study the creep properties of the adhesive of carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-steel interface, long-term loading tests of CFRP-steel double-lap specimens were carried out under different tensile loads, and the strain distribution law of CFRP and its changing characteristics with loading time were analyzed. Based on the characteristics of the Burgers model and the time-varying law of the shear strain of adhesive layer, a solving method for each parameter in the model was given. According to the experimental data, the expressions of the parameters in the Burgers model and the Findley power law equation were obtained. Results show that under the action of long-term interfacial shear stress, the adhesive of CFRP-steel interface had creep deformation, and the strain of CFRP decreased nonlinearly from loading end to fixed end, which increased with the increase of loading time and the increasing rate decreased gradually. The higher the value of interfacial nominal shear stress was, the larger the creep deformation of adhesive was, and the more the strain of CFRP increased. In the Burgers model, parameters η_M and G_K were both linear functions of shear stress τ , and parameter η_K was a quadratic function of shear stress τ . In the Findley power law equation, parameter m was a linear function of shear stress τ , and parameter n was a quadratic function of shear stress τ . The root mean square errors of the Burgers model and the Findley power law equation were small, and both models could predict the creep deformation of the adhesive. When the interfacial shear stress τ was high, the creep deformation predicted by the Burgers model was better than that predicted by the Findley power law equation.

Keywords: CFRP-steel interface; adhesive; creep; constitutive model; double-lap specimen; shear stress

CFRP 具有重量轻、强度高、易于加工成形、便于施工、耐腐蚀等优点, 广泛用于混凝土结构及钢结

构的加固补强工程中^[1-2]. 黏贴 CFRP 加固钢结构技术通过胶粘剂将 CFRP 片材与钢材连接成一体共同受力. 该技术钢材不需要开孔或焊接, 避免了焊接连接引起的焊接残余应力或栓接连接导致的截面削弱^[3]. CFRP 与钢材之间的黏结界面是整个加固体系的薄弱环节, 其黏结性能是加固成功的关键, 这方面学者们已经开展了大量卓有成效的试验研究^[4-6]

收稿日期: 2019-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(51808376);

内蒙古自治区自然科学基金(2019BS05024);

中国博士后科学基金(2019M651076)

作者简介: 徐佰顺(1986—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 姚亚东, sdtzdong11@163.com

和理论分析^[7-8],包括界面黏结失效形式、黏结滑移本构关系、极限承载力计算方法和数值模拟分析等。在长期荷载作用下,结构加固工程中常用的胶粘剂表现出黏弹性特性^[9],既有固体的弹性又有流体的黏性。胶粘剂随时间而变化的变形过程,主要表现为蠕变和应力松弛。胶粘剂的蠕变变形会导致加固结构界面发生内力重分布^[10],致使黏结界面发生蠕变损伤,这种损伤会影响黏结界面的黏结性能^[3,11]。在 CFRP 加固体系中若要明确胶粘剂的黏弹性特性对加固结构影响,关键在于得到准确表征胶粘剂剪切蠕变行为的黏弹性本构方程。

近年来研究者们对 CFRP-混凝土单面搭接试件或双面搭接试件进行长期加载试验,并考虑多种因素影响以获得表征胶粘剂蠕变变形的本构模型。文献[12]认为界面剪应力水平和胶层厚度对胶粘剂蠕变行为有显著影响。文献[13]在文献[12]研究基础上引入了胶粘剂养护龄期的影响,采用改进的 Maxwell 模型和 Findley 幂律方程预测界面的蠕变变形。文献[14]采用广义的 Maxwell 模型预测界面的蠕变变形以及界面的蠕变断裂发展。文献[15]和文献[16]应用时间-温度等效原理(TTSP),通过短时间高温条件下双剪试件拉伸蠕变试验获得界面的黏弹性特性,并用串联的标准线性固体模型模拟界面的蠕变变形。文献[17]利用 TTSP 原理进行了短期胶体拉伸蠕变试验得到了 Burgers 本构模型,基于此模型对持续拉伸荷载作用下 CFRP-混凝土双剪试件进行了试验验证和有限元分析。

在 CFRP 加固钢结构方面,文献[10]采用有限元分析方法研究了胶粘剂黏弹性对 CFRP-钢界面应力的影响,考虑胶粘剂黏弹性后,界面剪应力和剥离应力随时间增加而减小。本文对 CFRP-钢双剪试件进行了长期蠕变试验,采用 Burgers 模型和 Findley 幂律方程表征 CFRP-钢界面胶粘剂的剪切蠕变行为,基于 Burgers 模型特性及胶层剪应变-时间曲线推导了各参数的求解方法,结合试验结果进行了拟合分析,得到了本构模型中考虑剪应力影响的各参数表达式,并对模型的预测结果进行了对比和验证。

1 黏弹性本构模型

1.1 Burgers 模型

图 1 所示为典型的 Burgers 模型,该模型属于流变力学模型的一种,具有概念清晰以及物理意义明确的特点。Burgers 模型由 Maxwell 模型和 Kelvin 模型串联而成。Maxwell 模型由“弹簧”元件和“黏壶”元件串联而成, G_M 为剪切弹性模量, η_M 为黏度系数。Kelvin 模型由“弹簧”元件和“黏壶”元件并联而

成, G_K 为剪切弹性模量, η_K 为黏度系数。

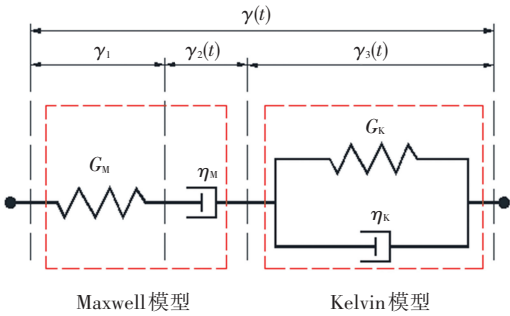


图 1 Burgers 模型

Fig.1 Burgers model

在恒定的剪应力 τ_0 作用下,任意 t 时刻 Burgers 模型的总应变 $\gamma(t)$ 可表示成 3 部分:Maxwell 模型中“弹簧”元件的剪切弹性应变 γ_1 和“黏壶”元件的黏性应变 $\gamma_2(t)$, Kelvin 模型的延迟弹性应变 $\gamma_3(t)$ 。根据流变力学理论 γ_1 、 $\gamma_2(t)$ 、 $\gamma_3(t)$ 的表达式分别为

$$\gamma_1 = \tau_0 / G_M, \tag{1}$$

$$\gamma_2(t) = \frac{\tau_0 \cdot t}{\eta_M}, \tag{2}$$

$$\gamma_3(t) = \frac{\tau_0}{G_K} (1 - e^{-\frac{G_K \cdot t}{\eta_K}}). \tag{3}$$

式中: γ_1 为瞬时弹性应变, $\gamma_2(t)$ 和 $\gamma_3(t)$ 的和为蠕变应变。

t 时刻的总应变 $\gamma(t)$ 为

$$\gamma(t) = \gamma_1 + \gamma_2(t) + \gamma_3(t). \tag{4}$$

将式(1)~(3)代入式(4)得

$$\gamma(t) = \tau_0 \left[\frac{1}{G_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{G_K} (1 - e^{-\frac{G_K \cdot t}{\eta_K}}) \right]. \tag{5}$$

在正常使用阶段的荷载作用下,黏弹性材料的应变-时间关系如图 2 所示。在加载瞬间黏弹性材料产生瞬时弹性应变,此时为弹性阶段。随后加载大小不变而应变随时间逐渐增加,增加的应变即为蠕变应变,大致可分为两个阶段:一个是过渡蠕变阶段,在此阶段黏弹性材料的应变速率(曲线的斜率)随加载时间的增加而不断降低;一个是稳态蠕变阶段,在此阶段曲线基本为一条直线,即曲线的斜率保持不变,也就是说蠕变应变与加载时间成正比例关系。

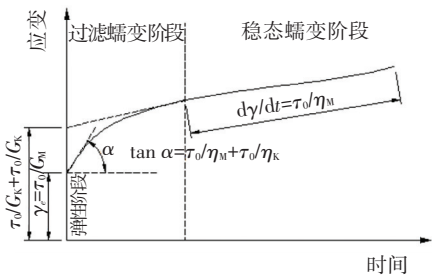


图 2 应变-时间关系

Fig.2 Strain-time relationship

根据 Burgers 模型特性以及黏弹性材料的应变-时间关系曲线特点,可通过下列步骤逐步求解 Burgers 模型的各项参数。

步骤 1 将加载时间 $t = 0$, 代入式(5)中得, 瞬时弹性应变 γ_e 为

$$\gamma_e = \tau_0 / G_M. \quad (6)$$

对应于图 2 中的弹性阶段, 式(6)变换后可得参数 $G_M = \tau_0 / \gamma_e$ 。

步骤 2 在式(5)中取 $t = \infty$, 则 $e^{-\frac{G_K \cdot t}{\eta_K}} \rightarrow 0$, 式(5)可简化为

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0 \cdot t}{\eta_M} + \left(\frac{\tau_0}{G_M} + \frac{\tau_0}{G_K} \right). \quad (7)$$

在式(7)中取 $t = 0$, 有 $\gamma(0) = \tau_0 / G_M + \tau_0 / G_K$, 表示稳态蠕变阶段曲线的延长线与应变轴的交点到原点的距离, 如图 2 所示. 在步骤 1 中求得参数 G_M 后, 继而可求参数 G_K 。

步骤 3 对式(5)求导, 得

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = \frac{\tau_0}{\eta_M} + \frac{\tau_0}{\eta_K} e^{-\frac{G_K \cdot t}{\eta_K}}. \quad (8)$$

当式(8)中取 $t = \infty$, 则 $e^{-\frac{G_K \cdot t}{\eta_K}} \rightarrow 0$, 式(8)变为

$$\left. \frac{d\gamma(t)}{dt} \right|_{t=\infty} = \frac{\tau_0}{\eta_M}. \quad (9)$$

式(9)表示稳态蠕变阶段曲线的斜率 $k = \tau_0 / \eta_M$, 如图 2 所示. 根据曲线斜率 k , 可求参数 $\eta_M = \tau_0 / k$ 。

步骤 4 当 $t = 0$ 时, 式(8)简化为

$$\left. \frac{d\gamma(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\tau_0}{\eta_M} + \frac{\tau_0}{\eta_K}. \quad (10)$$

式(10)表示过渡蠕变阶段曲线的初始应变速率为 $\tan \alpha = (\tau_0 / \eta_K + \tau_0 / \eta_M)$, 如图 2 所示. 在步骤 3 中求得参数 η_M 后, 继而可求参数 η_K 。

1.2 Findley 幂律方程

Findley 幂律方程最早是由 Findley^[18] 提出的. 因其公式简单, 参数较少, 在表征高分子聚合物的黏弹性方面应用广泛. Findley 幂律方程的剪切应变 $\gamma(t)$ 形式为

$$\gamma(t) = \gamma_0 + m \cdot t^n. \quad (11)$$

式中: $\gamma(t)$ 为时间为 t 时的总剪应变; γ_0 为初始弹性剪应变; m 和 n 为相关系数, 由试验结果确定。

2 长期加载试验

2.1 试件设计及制作

试验采用的钢板为热轧 Q235B, 宽度为 50 mm, 长度为 300 mm, 厚度为 6 mm, 抗拉强度为 309 MPa, 弹性模量为 190 GPa. CFRP 布采用密度为 300 g/mm²

的东丽 UT70-30 型, 宽度为 30 mm, 长度为 420 mm, 厚度为 0.167 mm, 抗拉强度为 3 920 MPa, 弹性模量为 237 GPa, 伸长率为 1.71%. 胶粘剂采用爱牢达 XH 180 型, 抗拉强度为 47 MPa, 弹性模量为 2.86 GPa. 钢-钢拉伸抗剪强度为 16 MPa, 伸长率为 1.90%。

为方便试验加载及有效采集试验数据, 试验中采用双剪试件. 试件制作时首先用电砂轮打磨钢板除去表面锈迹和油污, 并用 800 目砂纸磨掉表面毛刺, 用丙酮擦拭钢板, 待干燥后用毛刷均匀地涂抹胶粘剂, 利用刮板均匀挤压 CFRP 布赶出气泡. 制作好一面后, 24 h 后再黏贴另一面. 待试件制作完成后, 在实验室条件下养护 7 d。

试件尺寸及应变片布置如图 3 所示. 试件每面各布置 12 个应变片, 每个试件黏贴 24 个应变片. 为方便试验结果表达, 将测试面分别定义为 Q 面和 H 面, 应变片编号从加载端到固定端依次定义为 $Q0\# \sim Q11\#$ 及 $H0\# \sim H11\#$. 其中编号 $Q0\#$ 和 $H0\#$ 两个应变片位于两块钢板空隙处的 CFRP 布上。

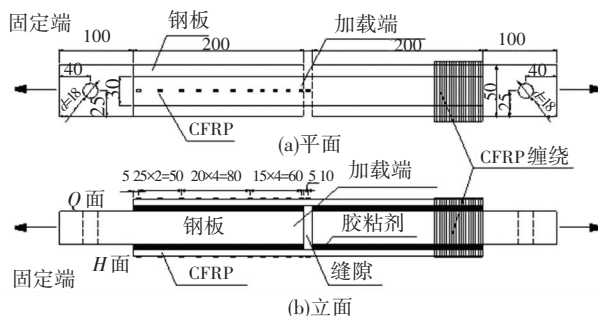


图 3 CFRP-钢板双剪试件及应变片布置 (mm)

Fig. 3 CFRP-steel plate double-lap specimen and layout of strain gauges (mm)

2.2 试验方案及加载装置

试验共设计并制作 27 个 CFRP-钢双剪试件. A 组 3 个试件, 待养护完成后进行静力破坏试验, 得到极限承载力 P_u 分别为 27.4、28.8、31.6 kN, P_u 平均值为 29.3 kN, 标准差为 2.1. 平均极限剪切强度 $\tau_u = P_u / (2b_c l_c)$, 其中 b_c 为 CFRP 宽度 30 mm, l_c 为 CFRP 黏结长度 200 mm, 可计算得到 $\tau_u = 2.44$ MPa. B、C、D、E 组每组 6 个试件, 持续施加的界面名义剪应力 τ_0 分别取 $0.22\tau_u$ 、 $0.44\tau_u$ 、 $0.60\tau_u$ 和 $0.73\tau_u$, 即分别为 0.54、1.07、1.46、1.78 MPa. 试验的分组情况、黏结界面上长期施加的界面名义剪应力 τ_0 和加载时间见表 1。

长期加载采用自制的加载装置, 与文献[19]一样. 该装置根据杠杆原理制作, 整个装置由底梁、立柱、横梁组成, 底梁与立柱通过焊接连接, 立柱与横梁通过螺栓连接. 横梁一端加载重物, 一端连接试

件,为减小重物的重量,两力臂的比值为10:1.重物为浇筑的立方体混凝土块.一个底梁对称分布两套加载装置,两套装置之间通过与立柱焊接的连接杆进行连接以保证结构的稳定性.不同重量的混凝土块进行组合后,通过丝杆串联,丝杆顶部采用花篮螺栓与加载横梁相连.通过调节旋紧花篮螺栓的速度,可以控制加载重物的提升速度,以保证匀速加载.

表 1 试件分组

Tab.1 Arrangement of specimens

试件 编号	τ_0 / MPa	加载 时间/d	试件 编号	τ_0 / MPa	加载 时间/d
B22D5	0.54	5	D60D5	1.46	5
B22D10	0.54	10	D60D10	1.46	10
B22D20	0.54	20	D60D20	1.46	20
B22D35	0.54	35	D60D35	1.46	35
B22D60	0.54	60	D60D60	1.46	60
B22D90	0.54	90	D60D90	1.46	90
C44D5	1.07	5	E73D5	1.78	5
C44D10	1.07	10	E73D10	1.78	10
C44D20	1.07	20	E73D20	1.78	20
C44D35	1.07	35	E73D35	1.78	35
C44D60	1.07	60	E73D60	1.78	60
C44D90	1.07	90	E73D90	1.78	90

2.3 试验结果

2.3.1 CFRP 表面应变分布

试件 B22D90、C44D90、D60D90、E73D90 的 CFRP 表面应变分布(每组仅示出一个试件)如图 4 所示.观察各图中 CFRP 应变分布曲线可知,在荷载作用下仅在测点 Q1#~Q5# 范围内 CFRP 布应变响应较大,测点 Q1#(加载端部)应变值最大,距测点 Q1#越远,应变值急剧减小,测点 Q5#后各测点应变较小.表明荷载仅在 CFRP-钢界面端部一部分区域内传递,且 CFRP 应变呈现非线性减小.对比图中同一测点在不同加载时间的应变数值,可知随着加载时间的增加,测点 Q1#~Q5# 范围应变数值逐渐增大.

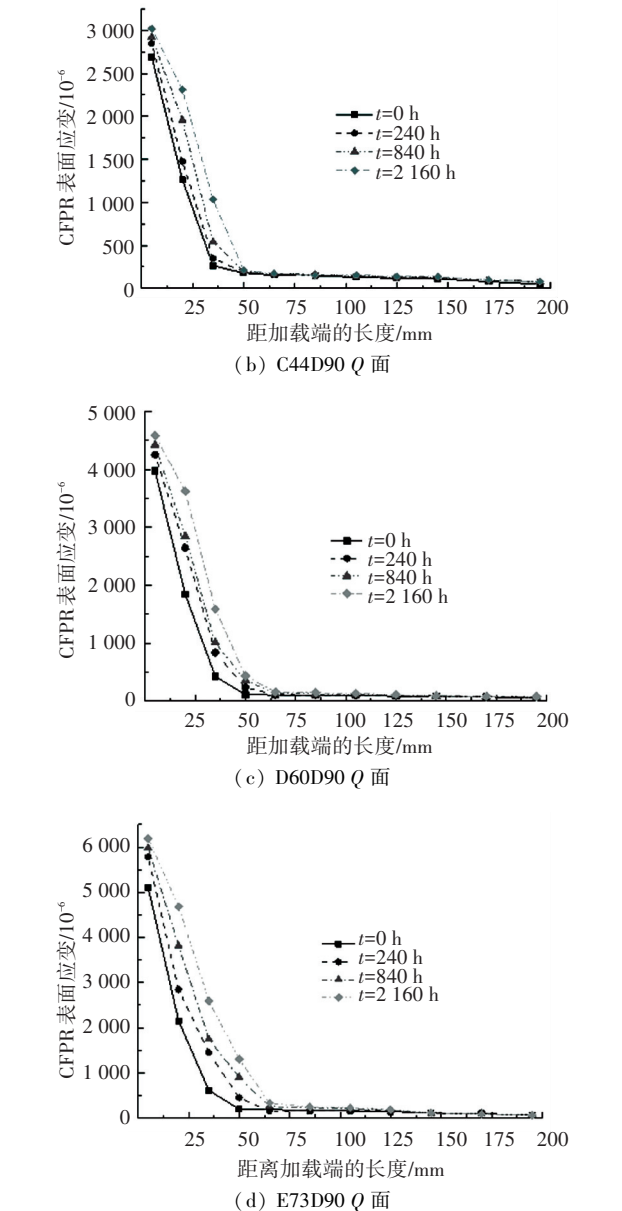
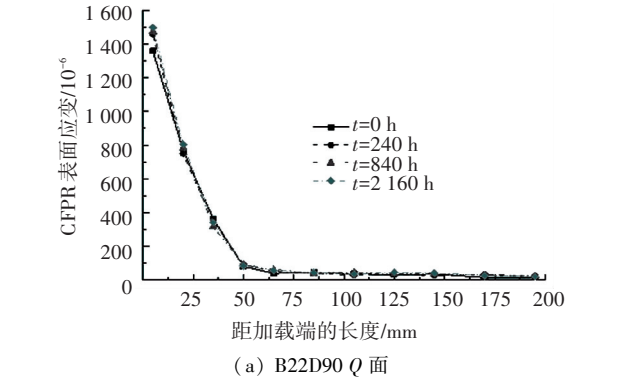


图 4 CFRP 应变分布

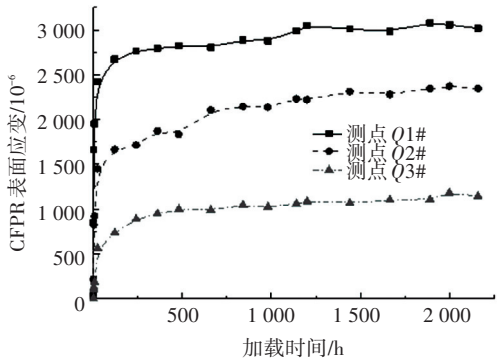
Fig.4 Strain distribution of CFRP

2.3.2 CFRP 各测点应变随时间变化

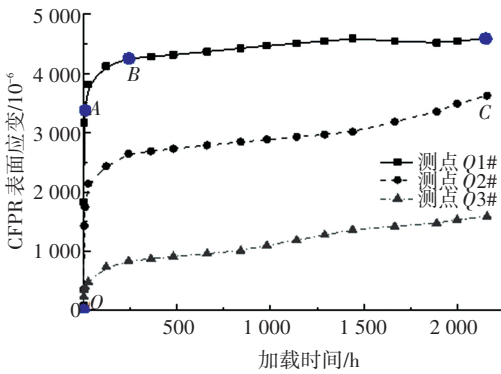
为更直观表达各测点应变随加载时间的变化情况,将图 4 中试件 C44D90、D60D90、E73D90(试件 B22D90 应变变化较小)测点 Q1#、Q2#、Q3# 在整个试验周期内的应变数值进行整理如图 5 所示.由图 5 可知,测点 Q1#、Q2#、Q3# 的应变值均随着加载时间的增加而增大.各组曲线具有相似的特点,由 3 个阶段组成,以图 5 中(b)图中测点 Q1# 为例,第 1 阶段,图中 OA 段,荷载施加瞬时 CFRP 发生弹性变形,应变与荷载大小成正比;第 2 阶段,图中 AB 段,弹性变形完成后,CFRP 应变随着时间的增加逐渐增大,但增大速率不断减小,即曲线斜率变小;第 3 阶段,图中 BC 段,应变增大速率减小到一定值后,在剩余试验周期内基本不发生变化或变化很小.图 5 中 CFRP 应变随时间变化关系与图 7 中胶粘剂的剪

应变-时间关系曲线具有相似特性,即应变在前期增大较快,后期增大逐渐减缓,最后应变增加速率保持不变.这是因为在持续荷载作用下胶粘剂层发生了蠕变变形,致使试件发生了内力重分布,表现为 CFRP 应变增加,为保持受力平衡与胶粘剂层临近的钢板表面应变应减小.

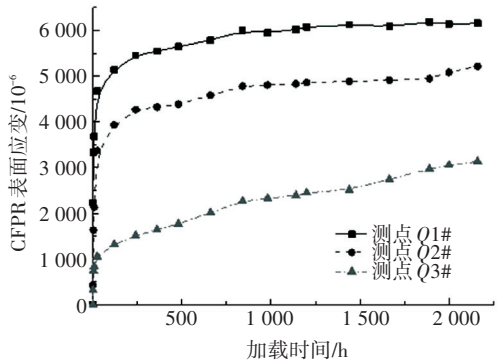
另外,经过 2 160 h 后,试件 C44D90、D60D90 和 E73D90 测点 Q1# 的蠕变应变(总应变减去第 1 阶段弹性应变)与弹性应变比值的分别为 0.122、0.153 和 0.206,表明在测试周期内 CFRP 应变分别增加了 12.2%、15.3%和 20.6%.说明界面名义剪应力 τ 越大,胶粘剂蠕变变形就越大,CFRP 应变增加的就越多.



(a) C44D90 Q 面



(b) D60D90 Q 面



(c) E73D90 Q 面

图 5 CFRP 应变随时间变化

Fig.5 Strain distribution of CFRP varying with time

3 胶粘剂层的剪切变形

CFRP-钢双面搭接试件在受到拉伸荷载作用后,胶层的变形如图 6 所示.

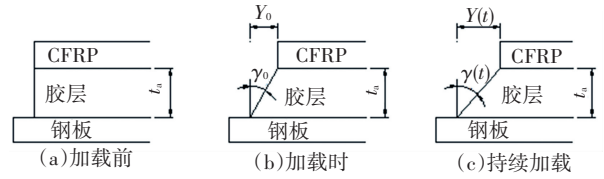


图 6 胶层剪切荷载作用

Fig.6 Adhesive layer under shear load

由图 6 中的几何关系可知,加载瞬时 γ_0 为

$$\gamma_0 = Y_0/t_a. \quad (12)$$

式中: t_a 为胶层的厚度, γ_0 为加载瞬时胶层的剪应变, Y_0 为胶层上、下表面之间相对变形.

随着加载时间的增加胶粘剂将发生蠕变,则 $\gamma(t)$ 为

$$\gamma(t) = Y(t)/t_a, \quad (13)$$

式中: $\gamma(t)$ 为 t 时刻胶层总的剪应变, $Y(t)$ 为胶层上、下表面的总的相对变形.

假设 CFRP-胶粘剂界面不发生相对滑动且 CFRP 全截面上应变不变,对 CFRP 表面应变进行积分可得 $Y(t)$ 为

$$Y(t) = \int_0^x \varepsilon(x) dx, \quad (14)$$

式中 $\varepsilon(x)$ 为 CFRP 表面应变.

本试验中测得的 CFRP 表面应变是不连续的,可通过数值积分的方法近似计算 $Y(t)$ [20] 为

$$Y(t) = \frac{(\varepsilon_{c,i+1} + \varepsilon_{c,i})}{4}(L_{i+1} - L_i) + \sum_{j=i}^n \frac{(\varepsilon_{c,j+1} + \varepsilon_{c,j+2})}{2}(L_{i+2} - L_{i+1}), \quad (15)$$

式中: $\varepsilon_{c,i}$ 为第 i 个 CFRP 表面应变测点的数值, L_i 为第 i 个 CFRP 表面应变测点到加载端的距离.

结合式(13)和式(15),可以得到任意 t 时刻 $\gamma(t)$ 为

$$\gamma(t) = \frac{(\varepsilon_{c,i+1} + \varepsilon_{c,i})}{4t_a}(L_{i+1} - L_i) + \frac{1}{t_a} \sum_{j=i}^n \frac{(\varepsilon_{c,j+1} + \varepsilon_{c,j+2})}{2}(L_{i+2} - L_{i+1}). \quad (16)$$

根据长期加载试验实测数据,可通过式(16)得到胶层剪应变与加载时间的关系.试件 B22D90、C44D90、D60D90、E73D90 的胶层剪应变随时间变化(每组仅示出 1 个试件)如图 7 所示.观察图 7 中各条曲线可知,曲线特征与图 2 类似,可分为 3 个阶段:弹性阶段、过渡蠕变阶段和稳态蠕变阶段.

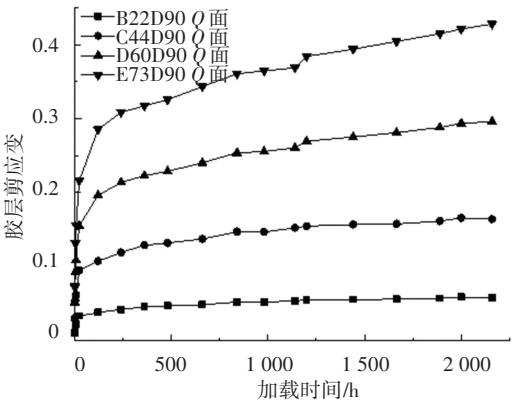


图 7 胶层剪应变与加载时间关系

Fig.7 Relationship between shear strain of adhesive layer and loading time

4 模型参数的求解与验证

4.1 Burgers 模型参数

根据第 2 节的试验结果及式 (16), 可得各组试件胶层剪应变随时间变化曲线, 结合第 1 节中 Burgers 模型中各参数的求解方法, 可得到 Burgers 模型中各参数的数值. G_M 通过式 (6) 计算得 25.44 MPa, 其他参数见表 2. 表 2 中各参数求解时以各组试件的 Q 面应变变数据为依据.

表 2 Burgers 模型计算结果

Tab.2 Calculation results of Burgers model

试件 编号	$\eta_M /$ (10^4 MPa · h)	$G_K /$ MPa	$\eta_K /$ (MPa · h)	RMSE
B22D5	6.45	20.6	374.9	0.006
B22D10	6.55	20.9	368.5	0.010
B22D20	6.47	21.3	372.9	0.005
B22D35	6.41	20.5	378.3	0.009
B22D60	6.42	22.3	377.2	0.008
B22D90	6.43	21.1	374.7	0.005
C44D5	4.31	13.5	235.8	0.032
C44D10	4.35	13.2	232.2	0.018
C44D20	4.25	12.6	228.6	0.029
C44D35	4.36	12.4	233.5	0.021
C44D60	4.36	13.8	236.9	0.016
C44D90	4.33	13.5	236.4	0.013
D60D5	3.26	9.5	276.6	0.048
D60D10	3.38	10.0	265.5	0.050
D60D20	3.39	10.4	282.3	0.043
D60D35	3.31	10.8	277.2	0.052
D60D60	3.40	10.7	281.0	0.046
D60D90	3.26	10.6	274.9	0.039
E73D5	2.65	8.8	308.4	0.075
E73D10	2.78	8.2	301.2	0.061
E73D20	2.91	8.9	298.5	0.053
E73D35	2.85	9.0	310.6	0.072
E73D60	2.66	8.4	312.3	0.066
E73D90	2.86	8.6	312.1	0.086

以表 2 中参数 η_M 、 G_K 和 η_K 的数值为纵坐标, 各

组试件的界面名义剪应力 τ 为横坐标绘制 Burgers 模型参数与名义剪应力关系曲线, 如图 8 所示. 由图 8 可看出, 各组试件参数 η_M 、 G_K 和 η_K 的数值的大小与界面名义剪应力有一定关系. 根据最小二乘法原理, 采用 MATLAB 实现曲线拟合得到参数 η_M 、 G_K 和 η_K 与界面名义剪应力 τ 的函数关系分别为

$$\eta_M(\tau) = -29\,728\tau + 783\,379, \tag{17}$$

$$G_K(\tau) = -10\tau + 25.5, \tag{18}$$

$$\eta_K(\tau) = 254.3\tau^2 - 633.4\tau + 637.2. \tag{19}$$

则 Burgers 模型的表达式为

$$\gamma(\tau, t) = \tau \left[\frac{1}{G_M} + \frac{t}{\eta_M(\tau)} + \frac{1}{G_K(\tau)} \left(1 - e^{-\frac{G_K(\tau)}{\eta_K(\tau)} \cdot t} \right) \right]. \tag{20}$$

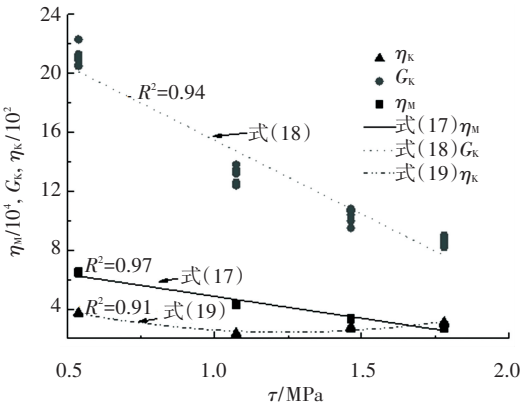


图 8 Burgers 模型参数与名义剪应力关系

Fig.8 Relationship between parameters of Burgers model and nominal shear stress

4.2 Findley 幂律方程

根据各组试件胶层剪应变随时间变化曲线, 同样可采用最小二乘法回归分析得到 Findley 幂律方程中的参数, 结果见表 3. 从表 3 中可知, 各组试件的 m 与 n 大小不同, 说明界面名义剪应力的大小对参数有影响. 参数 m 、 n 与界面名义剪应力 τ 的关系如图 9 所示. 采用 MATLAB 对数据进行拟合分析, 可得到参数 m 与 n 为因变量, 剪应力 τ 为自变量的函数方程为

$$m(\tau) = 0.045\,5\tau - 0.017\,6, \tag{21}$$

$$n(\tau) = 0.059\,9\tau^2 - 0.14\tau + 0.287\,8. \tag{22}$$

4.3 本构模型的校核

在得到 Burgers 模型和 Findley 幂律方程各参数表达式后, 为检验两类模型的预测能力, 采用 H 面的试验结果进行验证. 通过均方根误差 (RMSE) 的大小反映预测值与试验值的偏离程度, RMSE 越小表示模型的预测精度越高. RMSE 的表达式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i^{\text{exp}} - \gamma_i^{\text{pred}})^2}{N}}, \tag{23}$$

式中： γ_i^{exp} 为 H 面的试验数据计算的胶层剪应变， γ_i^{pred} 为由模型预测的胶层剪应变， N 为试验数据点的数量。

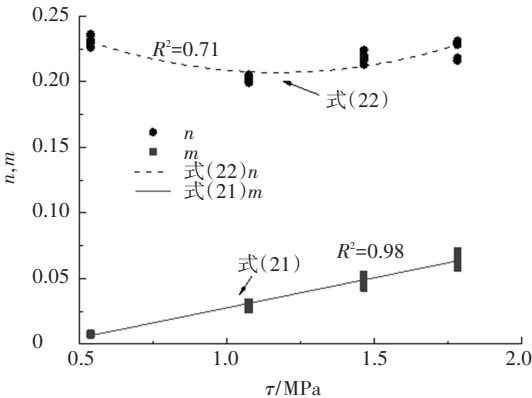


图 9 Findley 幂律方程参数与名义剪应力关系

Fig.9 Relationship between parameters of Findley power law equation and nominal shear stress

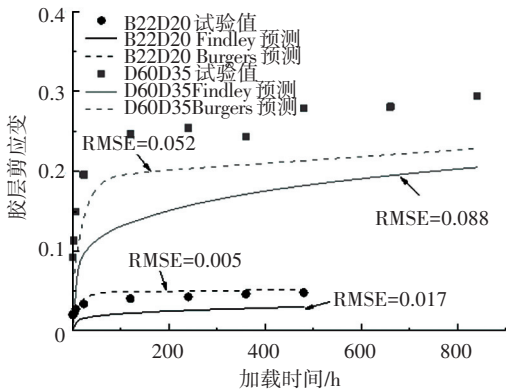
表 3 Findley 幂律方程计算结果

Tab.3 Calculation results of Findley power law equation

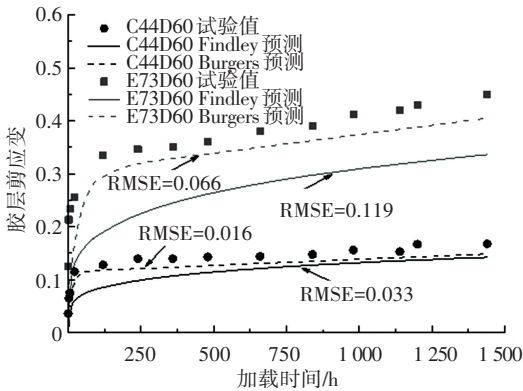
试件编号	m	n	RMSE
B22D5	0.007 7	0.232	0.016
B22D10	0.007 2	0.236	0.013
B22D20	0.007 3	0.229	0.017
B22D35	0.007 5	0.226	0.018
B22D60	0.007 9	0.235	0.017
B22D90	0.007 6	0.231	0.001
C44D5	0.032	0.201	0.056
C44D10	0.031	0.205	0.040
C44D20	0.028	0.203	0.038
C44D35	0.026	0.202	0.045
C44D60	0.029	0.204	0.033
C44D90	0.031	0.199	0.042
D60D5	0.052	0.224	0.082
D60D10	0.048	0.218	0.095
D60D20	0.053	0.220	0.104
D60D35	0.045	0.219	0.088
D60D60	0.043	0.213	0.067
D60D90	0.052	0.216	0.091
E73D5	0.064	0.228	0.190
E73D10	0.062	0.216	0.133
E73D20	0.058	0.218	0.169
E73D35	0.071	0.230	0.176
E73D60	0.068	0.229	0.119
E73D90	0.063	0.231	0.145

选取试件 B22D20、C44D60、D60D35 和 E73D60 作为每组的代表，将胶层剪应变的试验值、Burgers

模型的预测曲线及 Findley 幂律方程的预测曲线绘制于图 10 中。由图 10 可知，两类模型的 RMSE 均较小，表明模型预测值与试验值偏离较小，两类模型都可以很好地预测 CFRP-钢界面的剪切蠕变变形。



(a) B 组与 D 组试件



(b) C 组与 E 组试件

图 10 胶层剪应变的试验值与预测值

Fig.10 Experimental and predicted values of shear strain in adhesive layer

各组试件胶层剪应变 Burgers 模型的预测值与 H 面试验值之间的 RMSE 见表 2，Findley 幂律方程的预测值与 H 面试验值之间的 RMSE 见表 3。对比表 2 与表 3 中的 RMSE 大小可知，Burgers 模型得到的 RMSE 普遍小于 Findley 幂律方程得到的 RMSE，尤其对于 D 组和 E 组试件表现更为明显。这可能是因为 Findley 幂律方程中参数 m 拟合方程的 R^2 较小，即拟合曲线对观测值的拟合程度一般，D 组和 E 组试件的界面名义剪应力较高，这种影响就会越大。说明对于 CFRP-钢界面胶粘剂的剪切蠕变变形的表征上 Burgers 模型要优于 Findley 幂律方程。这点也可从图 10 中直观看出，Burgers 模型的预测曲线更接近于试验值。

5 结 论

1) 在长期界面剪切应力作用下 CFRP-钢界面胶粘剂发生了蠕变变形。胶层蠕变导致黏结界面发生了内力重分布，直观表现为同一位置处 CFRP 应

变随加载时间增加而增大,CFRP 应变前期增大较快,后期增大较慢.另外,不同组试件之间对比发现界面名义剪应力 τ 越大,胶粘剂蠕变变形就越大,CFRP 应变增加的就越多.

2)可采用 Burgers 模型和 Findley 幂律方程表征剪应力作用下 CFRP-钢界面胶粘剂的蠕变变形.两类本构模型中参数与界面剪应力 τ 的大小有一定关系. Burgers 模型中参数 η_M 和 G_K 均与剪应力 τ 具有线性关系,参数 η_K 是剪应力 τ 的二次函数. Findley 幂律方程中参数 m 是剪应力 τ 的一次函数,参数 n 是剪应力 τ 的二次函数.

3)Burgers 模型和 Findley 幂律方程的 RMSE 均较小,即预测值与试验值偏离较小,说明两类模型都可以很好地预测 CFRP-钢界面的剪切蠕变变形.相对而言, Burgers 模型的 RMSE 要小于 Findley 幂律方程的 RMSE,尤其是当界面剪应力较高时更为明显,说明 Burgers 模型预测的 CFRP-钢界面胶粘剂蠕变变形与试验结果吻合更好.

参考文献

[1] AL-SAAD N T K, MOHAMMED A, AL-MAHAIDI R, et al. A state-of-the-art review: near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 748. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2019. 03. 121

[2] ZHAO X L, ZHANG L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures [J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1808. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2006. 10. 006

[3] 徐佰顺. CFRP-钢复合结构界面时变力学行为研究[D].成都:西南交通大学,2017

XU Baishun. Research on time-dependent mechanical behavior of CFRP-steel composite structure interface [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017

[4] 李传习,柯璐,陈卓异,等. CFRP-钢界面粘结性能试验与数值模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3534

LI Chuanxi, KE Lu, CHEN Zhuoyi, et al. Experimental study and numerical simulation for bond behavior of interface between CFRP and steel [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3534. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20180316.001

[5] 薛耀,张龙,曹双寅,等. 低龄期下 CFRP-钢界面黏结性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(2): 360

XUE Yao, ZHANG Long, CAO Shuangyin, et al. Experimental study on bonding behavior of CFRP-to-steel interface under early curing age[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(2): 360. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-0505. 2015. 02. 028

[6] TENG J G, YU T, FERNANDO D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78: 131. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2012. 06. 011

[7] 李春良,李凯,张立辉,等.CFRP 端部被锚固后加固钢结构的界面粘结行为[J].哈尔滨工业大学学报,2016, 48(9): 113

LI Chunliang, LI Kai, ZHANG Lihui, et al. Interfacial bond behav-

ior of CFRP reinforced steel structures with end anchorage [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 113. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.020

[8] FERNANDO D, YU T, TENG J G. Behavior of CFRP laminates bonded to a steel substrate using a ductile adhesive[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 18(2): 04013040. DOI: 10. 1061/(ASCE)CC. 1943-5614. 0000439

[9] COSTA I, BARROS J. Tensile creep of a structural epoxy adhesive: experimental and analytical characterization [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015, 59: 115. DOI: 10. 1016/j. ijadhadh. 2015. 02. 006

[10] 徐佰顺,钱永久,唐继舜,等.基于黏弹性本构的 CFRP-钢界面应力参数敏感性分析[J].公路交通科技,2017,34(11):57

XU Baishun, QIAN Yongjiu, TANG Jishun, et al. Analysis on CFRP-to-steel interfacial stress parameter sensitivity based on viscoelastic constitution [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(11): 57. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-0268. 2017. 11. 009

[11] 马明,徐佰顺,张方,等.持续荷载下 CFRP-混凝土界面黏结性能试验与分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(3):128

MA Ming, XU Baishun, ZHANG Fang, et al. Experiment and performance analysis on bonding behavior of CFRP-concrete interface under sustained load [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 128. DOI: 10. 11918/j. issn. 0367-6234. 201703086

[12] CHOI K K, MESHGIN P, TAHA M M R. Shear creep of epoxy at the concrete-FRP interfaces [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(5/6): 772. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.10.003

[13] MESHGIN P, CHOI K K, TAHA M M R. Experimental and analytical investigations of creep of epoxy adhesive at the concrete-FRP interfaces [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29(1): 56. DOI: 10. 1016/j. ijadhadh. 2008. 01. 003

[14] DIAB H, WU Z. A linear viscoelastic model for interfacial long-term behavior of FRP-concrete interface [J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(4): 722. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007. 05.007

[15] FERRIER E, MICHEL L, JURKIEWIEZ B, et al. Creep behavior of adhesives used for external FRP strengthening of RC structures [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 461. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.002

[16] MEAUD C, JURKIEWIEZ B, FERRIER E. Investigation of creep effects in strengthened RC structures through double lap shear testing [J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(3): 359. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.12.024

[17] HOUBOU N, BENZARTI K, QUIERTANT M, et al. Analysis of the nonlinear creep behavior of concrete/FRP-bonded assemblies [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014, 28(14/15): 1345. DOI: 10.1080/01694243.2012.697387

[18] FINDLEY W N. Mechanism and mechanics of creep of plastics[J]. Society of Plastic Engineering, 1960, 16(1): 57

[19] 徐佰顺,姚亚东,钱永久,等.具有荷载作用历史的 CFRP-钢界面粘结性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):167

XU Baishun, YAO Yadong, QIAN Yongjiu, et al. Experiment on bonding behavior of CFRP-steel interface with load history [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020,52(9):167. DOI: 10.11918/201905011

[20] FERNANDO N D. Bond behaviour and debonding failures in CFRP-strengthened steel members [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2010