

## 外贴碳纤维布加固混凝土梁的徐变试验及有限元模拟

张 洋, 黄 悦\*, 张益宁, 孟祥伦

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

**摘 要:**通过对 2 条外贴 CFRP 加固钢筋混凝土试验梁进行长期持续荷载作用下的持荷试验, 并采集相关数据, 使用 ABAQUS 有限元软件 UMAT 子程序定义混凝土材料的收缩、徐变的数值模型, 建立了外贴 CFRP 加固钢筋混凝土试验梁在长期持续荷载作用下的时变分析模型。试验测量数值与有限元分析模型数值差距较小, 证明了该模型分析的可靠性, 可以利用模型来进行不同数值参数下的有限元分析。同时还考虑了环氧胶黏剂随时间变化的剪切蠕变行为, 发现胶层蠕变对试验梁附加挠度的影响较小, 但为了使模拟值更加准确, 应考虑胶层蠕变的影响。

**关键词:**CFRP 加固混凝土梁; 持续荷载; 徐变; 试验; 有限元模拟

**中图分类号:**TU746.3; TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2025)02-0040-09

## Creep experiment and finite element simulation of concrete beams strengthened with external carbon fiber-reinforced polymer

ZHANG Yang, HUANG Yue\*, ZHANG Yining, MENG Xianglun

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** The load holding test of two reinforced concrete test beams strengthened by external CFRP was carried out under long-term sustained load, and relevant data were collected. The numerical model of the shrinkage and creep of the concrete materials was defined using the UMAT subroutine of ABAQUS finite element software. A time-varying analysis model of the reinforced concrete test beams strengthened by external CFRP under long-term sustained load was established. The difference between the values measured by the test and the values from the finite element analysis model is small, which proves the reliability of the analysis by the model and proves that the model can be used to carry out finite element analysis under different numerical parameters. At the same time, the shear creep behavior of epoxy adhesive with time change was also considered. It is found that the influence of the creep of epoxy adhesive layer on the additional deflection of the test beams is small. However, in order to make the simulation more accurate, the influence of the creep of epoxy adhesive layer should be considered.

**Key words:** CFRP reinforced concrete beams; sustained load; creep; experiment; finite element

收稿日期: 2023-09-29

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR202102280030)

作者简介: 张 洋(1998—), 男, 山东泰安人。硕士, 研究方向为 FRP 加固。E-mail: 1831223419@qq.com。

\* 通信作者: 黄 悦(1982—), 男, 河北唐山人。博士, 教授, 主要从事 FRP 结构加固、UHPC 及固废材料等方面的研究。  
E-mail: jeff.yue.huang@outlook.com。

simulation

纤维增强复合材料(Fiber-Reinforced Polymer, FRP)具有轻质高强、耐腐蚀、便于制造和施工便利等优点<sup>[1-2]</sup>,碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber-Reinforced Polymer, CFRP)和玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber-Reinforced Polymer, GFRP)是加固混凝土结构的常用材料<sup>[3-4]</sup>,外贴 FRP 加固可以提高建筑结构的抗剪和抗弯强度<sup>[5-6]</sup>,近年来被广泛应用于建筑结构的抗震加固与受损结构的修复补强当中。

国内外学者对外贴 FRP 加固钢筋混凝土的长期受力行为进行了一些研究。CHAMI 等<sup>[7]</sup>研究了 CFRP 布加固钢筋混凝土梁在不同持续荷载水平下的徐变响应,发现聚合物纤维降低了钢筋混凝土梁的蠕变行为。SÁ 等<sup>[8]</sup>研究了跨度为 1800 mm 的 GFRP 黏结加固工字钢(150 mm×75 mm×8 mm)的蠕变行为,并进行了四点弯曲试验,发现 GFRP 复合材料在加载 1 年后降低了蠕变应变。

BAZANT 于 21 世纪初归纳了 3 种应用广泛的徐变效应分析方法<sup>[9]</sup>:①使用 Trost-Bazant 方程调整不同龄期有效模量的一步近似求解法;②符合叠加原理使用增量形式方法的积分型徐变模型 SSM 逐步计算法;③由 Maxwell 链及 Kelvin 链组成的率型本构关系 SSM 法。传统分析方法大多采用有效模量法与调整有效模量法模拟混凝土构件的徐变行为,该方法需要在不考虑混凝土开裂及截面中性轴位置改变等情况下使用,不能考虑混凝土开裂后对构件徐变变形的影响,导致对蠕变值的高估。本文使用符合叠加原理使用增量形式方法的积分型徐变模型 SSM 逐步计算法,该方法是把积分方程改写成划分时段的代数方程,进行不同时间段的代数计算,最终进行累加计算。同时考虑混凝土受拉开裂的影响,受拉过程中将其视为非线性材料,使用混凝土弥散模型的应力-应变关系矩阵,在混凝土受拉开裂前后使用不同的关系矩阵,模拟裂缝的产生与发展,这种方法在混凝土开裂后不需要重新对模型中的单元网格进行调整。在混凝土徐变收缩的分析中,采用以未开裂混凝土公式为基础开发的有限元数值分析模型,模拟了裂缝的变化。

本文先总结了 2 条外贴 CFRP 加固钢筋混凝土试验梁在长期持续荷载作用下的试验结果,包括试验挠度及应变随时间的变化;然后使用 ABAQUS 有限元软件 UMAT 子程序定义混凝土材料的收缩、徐变的数值模型,建立了外贴 CFRP 加固钢筋混凝土试验梁在长期持续荷载作用下的时变分析模型,通过对比模拟结果与试验结果发现两者较为吻合,证明了该模型分析的可靠性,可以利用模型来进行不同数值参数下的有限元分析。

## 1 试验梁的制备

本试验建造了 2 根全尺寸钢筋混凝土梁进行长期试验,梁长度为 3000 mm,净跨长度为 2800 mm。加固梁在受拉面粘贴 2 层 CFRP 布,粘贴宽度为 50 mm,长度为 2600 mm。采用堆载混凝土试块的加载方式施加长期持续荷载。施加的长期持续荷载为外贴 CFRP 加固混凝土梁极限承载力的 40%、60%,即  $0.4M_{ES}$ 、 $0.6M_{ES}$ ,其中极限承载力  $F=24.66$  kN,  $M_{ES}=17.26$  kN·m, EB0.4 试验梁承受的荷载为  $q=7.05$  kN/m, EB0.6 试验梁承受的荷载为  $q=10.57$  kN/m。图 1 为试验梁的钢筋布置,图 2 为试验梁长期试验加载示意。

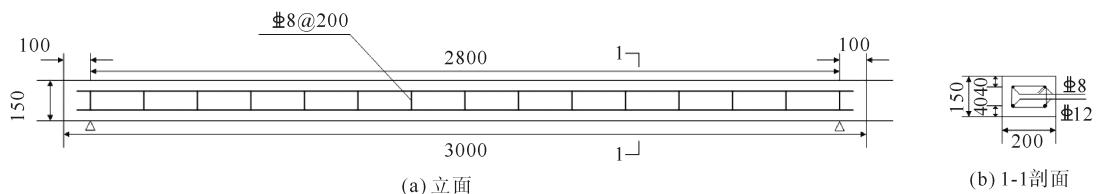


图 1 试验梁钢筋布置

试验用的材料性能为:C40 混凝土,实测立方体抗压强度为 43.6 MPa,弹性模量为  $3.34 \times 10^4$  MPa。钢筋实测力学指标见表 1。

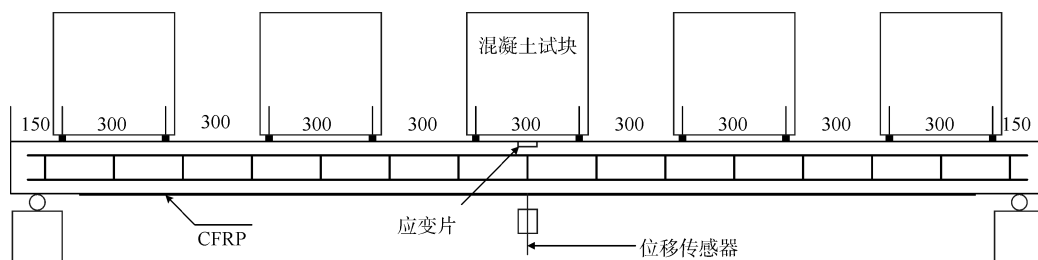


图2 试验梁长期试验加载示意

碳纤维布采用宽 50 mm、厚 0.167 mm、抗拉强度 3400 MPa、弹性模量 245 GPa 的单向高强度织物,界面黏结胶采用由环氧树脂及固化剂组成的碳纤维浸渍胶。

试验数据的采集设备包括位移传感器及应变片。使用位移传感器测量试验梁跨中位移,使用应变片测量试验梁受拉钢筋跨中应变及跨中 CFRP 应变。

## 2 有限元模型

### 2.1 混凝土短期模型

混凝土的应力-应变对应关系如式(1)所示,展开形式如式(2)所示。

$$\Delta\sigma = C \cdot \Delta\varepsilon \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\sigma_3 \\ \Delta\sigma_4 \\ \Delta\sigma_5 \\ \Delta\sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\varepsilon_3 \\ \Delta\varepsilon_4 \\ \Delta\varepsilon_5 \\ \Delta\varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma$  为应力增量矩阵; $\Delta\varepsilon$  为应变增量矩阵; $C$  为刚度矩阵,刚度矩阵中各元素如式(3)~(5)所示,其中,下标 1、2、3 表示单元的 3 个正交方向,下标 4、5、6 表示单元的剪切方向; $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ 、 $\Delta\sigma_3$  为单元的正交方向的应力增量; $\Delta\sigma_4$ 、 $\Delta\sigma_5$ 、 $\Delta\sigma_6$  为单元剪切方向的应力增量; $\Delta\varepsilon_1$ 、 $\Delta\varepsilon_2$ 、 $\Delta\varepsilon_3$  为单元正交方向的应变增量; $\Delta\varepsilon_4$ 、 $\Delta\varepsilon_5$ 、 $\Delta\varepsilon_6$  为单元剪切方向的应变增量。

当混凝土受力而未开裂破碎时,将其视为均匀的各向同性材料,刚度矩阵中各元素如式(3)~(5)所示:

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = \frac{E_c \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \quad (3)$$

$$C_{12} = C_{13} = C_{21} = C_{23} = C_{31} = C_{32} = \frac{E_c \cdot \nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \quad (4)$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

式中: $E_c$  为混凝土弹性模量; $\nu$  为混凝土泊松比;其余  $C_{ij} = 0$ 。

由于混凝土受拉破坏后材料刚度下降速率很快,在有限元软件运算分析中会对收敛性产生影响,所以通常情况下会在有限元程序的编写过程中采用给切线刚度  $E_t$  一个微小的负值,在模型分析步中迭代运行来解决分析模型收敛性的问题<sup>[10]</sup>。

当混凝土受力而开裂破碎时,将其视为非均匀的各向异性材料,刚度矩阵中各元素如式(6)~(9)

所示:

$$C_{11} = \mu E_c \quad (6)$$

$$C_{22} = C_{33} = \frac{E_c}{1-\nu^2} \quad (7)$$

$$C_{44} = C_{66} = \frac{\eta E_c}{2(1+2\nu)} \quad (8)$$

$$C_{55} = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

式中: $\mu$  为开裂单元弹性模量折减系数, $\mu = E_t/E_c$ ;  $\eta$  为混凝土开裂后的剪力传递系数,普通钢筋混凝土梁建议取 0.5。

在开裂后的混凝土的本构矩阵当中,不再考虑裂缝方向泊松比的影响,矩阵对应的非对角项取 0,即  $i \neq j$  时  $C_{ij} = 0 (i=1, \dots, 6; j=1, \dots, 6)$ 。

## 2.2 混凝土长期模型

总应变  $\epsilon$  包括由瞬时应变  $\epsilon_{\text{ins}}$  及蠕变应变  $\epsilon_{\text{cp}}$  组成的应力相关黏弹性应变  $\epsilon_v$  和应力无关应变  $\epsilon^0$  [11]。根据叠加原理,未开裂混凝土的黏弹性 [12] 应变  $\epsilon_v$  随时间变化的形式为

$$\epsilon_v(t) = \int_0^t \mathbf{B} \mathbf{J}(t, t') d[\sigma(t')] \quad (10)$$

式中: $\mathbf{J}(t, t')$  为柔度函数; $\sigma(t')$  为  $t'$  时刻的应力; $\mathbf{B}$  为多轴广义矩阵。

采用  $\Delta t = t_r - t_{r-1} (r=1, 2, 3, \dots, n_t)$  将时间分割为  $n_t$  个离散的时间步,假设每个时间间隔内应力为常数,应用误差为  $\Delta t^2$  的梯形积分规则。时间步  $r$  的总应变  $\epsilon(t_r)$  近似为下列公式:

$$\epsilon(t_r) = \mathbf{B} \mathbf{J}_{r,0} [\sigma(t_0)] + \sum_{s=1}^r \mathbf{B} \left[ \frac{J_{r,s} + J_{r,s-1}}{2} \right] [\sigma(t_s) - \sigma(t_{s-1})] + [\epsilon^0(t_r)] \quad (11)$$

式中: $\sigma(t_s)$  为  $t_s$  时刻的应力; $\sigma(t_0)$  为初始荷载施加完全后的应力; $\epsilon^0(t_r)$  为  $t_r$  时刻的应力无关应变; $J_{r,s}$  为时间步长  $t_s$  处施加的负载在时间步长  $t_r$  处的柔度模量。

根据时间步  $r$  的总应变  $\epsilon(t_r)$  公式(式(11))可以计算出时间步  $r-1$  的总应变  $\epsilon(t_{r-1})$ ,两者作差可以计算出时刻  $t_r$  的增量应变  $\Delta \epsilon(t_r)$  为

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon(t_r) = & \mathbf{B} [\sigma(t_0)] (J_r - J_{r-1}) + \sum_{s=1}^{r-1} \mathbf{B} \left( \frac{J_{r,s} + J_{r,s-1}}{2} - \frac{J_{r-1,s} + J_{r-1,s-1}}{2} \right) [\sigma(t_s) - \sigma(t_{s-1})] + \\ & \mathbf{B} \left( \frac{J_{r,r-1} + J_{r-1,r-1}}{2} - \frac{J_{r-1,s} + J_{r-1,s-1}}{2} \right) [\sigma(t_s) - \sigma(t_{s-1})] + [\epsilon^0(t_r) - \epsilon^0(t_{r-1})] \end{aligned} \quad (12)$$

增量应变  $\Delta \epsilon''$  包括蠕变应变及应力无关效应应变:

$$\Delta \epsilon'' = \mathbf{B} [\sigma(t_0)] (J_{r,0} - J_{r-1,0}) + \sum_{s=1}^{r-1} \mathbf{B} (J_{r,s-1/2} - J_{r-1,s-1/2}) [\Delta \sigma(t_s)] + \Delta \epsilon_r^0 \quad (13)$$

通过扩展  $\mathbf{B}$ ,可以得到时刻  $t_r$  的增量应变  $\Delta \epsilon(t_r)$  平衡方程组:

$$\begin{bmatrix} \Delta \sigma_1 \\ \Delta \sigma_2 \\ \Delta \sigma_3 \\ \Delta \sigma_4 \\ \Delta \sigma_5 \\ \Delta \sigma_6 \end{bmatrix} = \frac{E_{ci}(t) \cdot \mathbf{C}}{E_c} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_1'' \\ \Delta \epsilon_2 - \Delta \epsilon_2'' \\ \Delta \epsilon_3 - \Delta \epsilon_3'' \\ \Delta \epsilon_4 - \Delta \epsilon_4'' \\ \Delta \epsilon_5 - \Delta \epsilon_5'' \\ \Delta \epsilon_6 - \Delta \epsilon_6'' \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: $E_{ci}(t)$  为随时间变化的混凝土弹性模量。

采用由 KELVIN F 等 [13] 提出的指数下降型曲线,描述混凝土受拉开裂后的应力-应变关系,对混凝土的受拉软化效应建模,本构关系如图 3 所示。

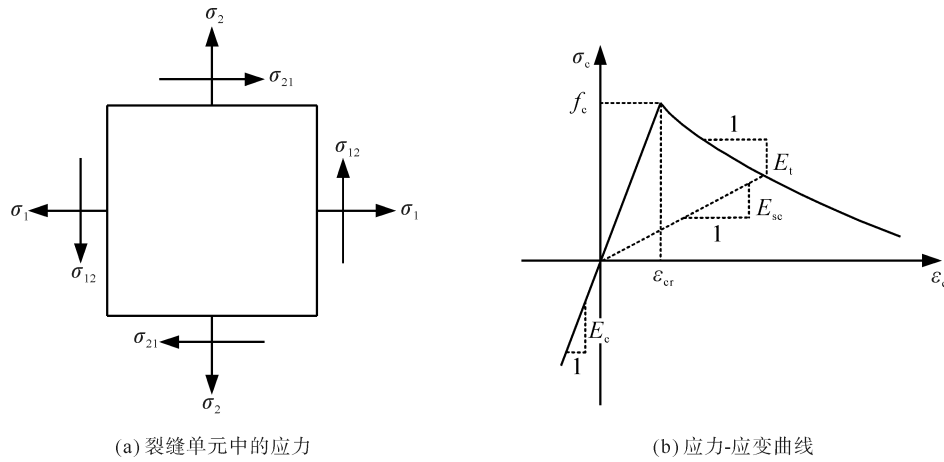


图3 开裂后的混凝土本构曲线

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \epsilon_c & \epsilon_c \leq \epsilon_{cr} \\ e^{-0.8(\epsilon_c - \epsilon_{cr}) \times 10^{-3}} E_c \epsilon_{cr} & \epsilon_c > \epsilon_{cr} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\epsilon_c$  为混凝土应变； $\epsilon_{cr}$  为混凝土开裂应变。

随时间变化的混凝土长期弹性模量采用文献[14]中提出的公式计算：

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \beta_E(t) \quad (16)$$

$$\beta_E(t) = \beta_{cc}^{0.5}(t) \quad (17)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (18)$$

式中： $E_{ci}(t)$  为龄期为  $t$  天的混凝土弹性模量； $E_{ci}$  为 28 d 龄期的混凝土弹性模量； $s$  为与水泥强度等级相关的系数。

普通混凝土徐变系数采用文献[14]中提出的公式计算：

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0) \quad (19)$$

$$\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t_0) \quad (20)$$

$$\varphi_{dc}(t, t_0) = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t_0) \beta_{dc}(t, t_0) \quad (21)$$

其中： $\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1.8}{(f_{cm})^{0.7}}$ ； $\beta_{bc}(t, t_0) = \ln \left[ \left( \frac{30}{t_{0,adj}} + 0.035 \right)^2 \cdot (t - t_0) + 1 \right]$ ； $\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{(f_{cm})^{1.4}}$ ； $\beta(RH) =$

$\frac{1 - \frac{RH}{100}}{\sqrt[3]{0.1 \times \frac{h}{100}}}$ ； $\beta_{dc}(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_{0,adj}^{0.2}}$ ； $\beta_{dc}(t, t_0) = \left[ \frac{(t, t_0)}{\beta_h + (t, t_0)} \right]^{\gamma(t_0)}$ ； $\beta_h = 1.5h + 250\alpha_{fcm} \leq 1500\alpha_{fcm}$ ； $\gamma(t_0) =$

$\frac{1}{2.3 + \frac{3.5}{\sqrt{t_{0,adj}}}}$ ； $\alpha_{fcm} = \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.5}$ 。

式中： $\varphi(t, t_0)$  为混凝土徐变系数； $\varphi_{bc}(t, t_0)$  为基本徐变系数； $\varphi_{dc}(t, t_0)$  为干燥蠕变系数； $f_{cm}$  为龄期为 28 d 的混凝土立方体平均抗压强度，MPa；RH 为环境相对湿度，%； $t_{0,adj}$  为调整后的加载龄期，d； $h$  为构件理论厚度，mm， $h = 2A/u$ ； $A$  为构件截面面积， $mm^2$ ； $u$  为构件与大气接触的周长，mm。

普通混凝土总收缩应变采用文献[14]中提出的公式计算：

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cbs}(t) + \epsilon_{cds}(t, t_s) \quad (22)$$

$$\epsilon_{cbs}(t) = \epsilon_{cbs0}(f_{cm}) \cdot \beta_{bs}(t) \quad (23)$$

$$\epsilon_{cds}(t, t_s) = \epsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (24)$$

$$\text{其中, } \epsilon_{\text{cbs0}}(f_{\text{cm}}) = -\alpha_{\text{bs}} \left( \frac{0.1f_{\text{cm}}}{6+0.1f_{\text{cm}}} \right)^{2.5} \times 10^{-6}; \beta_{\text{bs}}(t) = 1 - \exp(-0.2\sqrt{t}); \epsilon_{\text{cds0}}(f_{\text{cm}}) = [(220 + 110\alpha_{\text{ds1}}) \cdot \exp(-\alpha_{\text{ds2}} \cdot f_{\text{cm}})] \times 10^{-6}; \beta_{\text{sl}} = \left( \frac{35}{f_{\text{cm}}} \right)^{0.1} \leq 1.0; \beta_{\text{ds}}(t-t_s) = \left[ \frac{(t-t_s)}{0.035h^2 + (t-t_s)} \right]^{0.5};$$

$$\beta_{\text{RH}} = \begin{cases} -1.55 \times \left[ 1 - \left( \frac{\text{RH}}{100} \right)^3 \right] & 40 \leq \text{RH} < 99\beta_{\text{sl}} \\ 0.25 & \text{RH} \geq 99\beta_{\text{sl}} \end{cases}.$$

式中: $\epsilon_{\text{cs}}(t, t_s)$ 为混凝土总收缩应变; $\epsilon_{\text{cbs}}(t)$ 为无水分损失情况下发生的基本收缩率; $\epsilon_{\text{cds}}(t, t_0)$ 为发生水分损失产生的干燥收缩率; $\beta_{\text{RH}}(\text{RH})$ 为与环境相对湿度有关的收缩系数; $\beta_{\text{ds}}(t-t_s)$ 为与时间有关的函数; $f_{\text{cm}}$ 为 28 d 龄期混凝土立方体平均抗压强度,MPa; $t$ 为计算考虑时刻的混凝土龄期,d; $t_s$ 为混凝土开始干燥时的龄期,d; $t-t_s$ 为干燥持续时间,d; $\alpha_{\text{bs}}, \alpha_{\text{ds1}}, \alpha_{\text{ds2}}$ 为水泥类型相关的系数,对于水泥强度等级为 32.5R、42.5R 的水泥三者分别取 700、4 和 0.012。

### 2.3 环氧胶层长期模型

混凝土与 CFRP 界面上可以观察到显著的剪切蠕变现象,环氧胶黏结剂随时间变化的剪切蠕变行为采用 Maxwell 链模型,如式(25)所示。

$$G(t) = G_u + \sum_{i=1}^{N_G} G_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{G_i}}} \quad (25)$$

式中: $G(t)$ 为随时间变化的剪切弹性模量; $G_u$ 为胶层的最终剪切模量; $G_i$ 为每个 Maxwell 单元的松弛剪切模量; $N_G$ 为 Maxwell 单元的个数; $\tau_{G_i}$ 为材料常数。

根据 CHOI 等<sup>[15]</sup>的研究, $N_G=1, G_1=0.6 \text{ GPa}, \tau_{G_1}=2 \text{ d}, G_u=G_1/5$ 。

## 3 试验结果及数值计算结果

对 2 条加固梁进行为期 180 d 的长期持荷试验,采集试验梁跨中挠度、跨中 CFRP 应变、混凝土压应变的加载瞬时值,180 d 后的最终值及附加变形值如表 2 所示。两条试验梁采集的试验值及有限元模拟值对比如图 4—图 6 所示。

表 2 试验记录值及模拟值数据

挠度与应变	试验值与模拟值比较	加载瞬时	终值	附加变形
EB0.4 梁跨中挠度	试验值/mm	10.10	17.50	7.40
	模拟值/mm	9.36	16.94	7.57
	误差/%	-7.33	-3.20	2.30
EB0.6 梁跨中挠度	试验值/mm	18.30	27.20	8.90
	模拟值/mm	17.34	26.75	9.40
	误差/%	-5.25	-1.65	5.62
EB0.4 梁跨中顶部混凝土压应变	试验值/ $\mu\epsilon$	-624	-1352	-728
	模拟值/ $\mu\epsilon$	-664	-1071	-407
	误差/%	6.40	-20.80	-44.10
EB0.6 梁跨中顶部混凝土压应变	试验值/ $\mu\epsilon$	-1073	-1929	-855
	模拟值/ $\mu\epsilon$	-1032	-1828	-796
	误差/%	-3.80	-5.24	-6.90

通过图 4、图 5 可以发现,2 条试验梁跨中挠度曲线试验值与有限元模拟值差距较小,因胶层蠕变产生的附加挠度较小,试验梁产生挠度变化的主要原因是持续荷载作用下混凝土徐变产生的截面刚度变化。施加持续荷载后,试验梁前期挠度随时间变化速度较快,随着时间的增加,挠度变化速率逐渐减小。

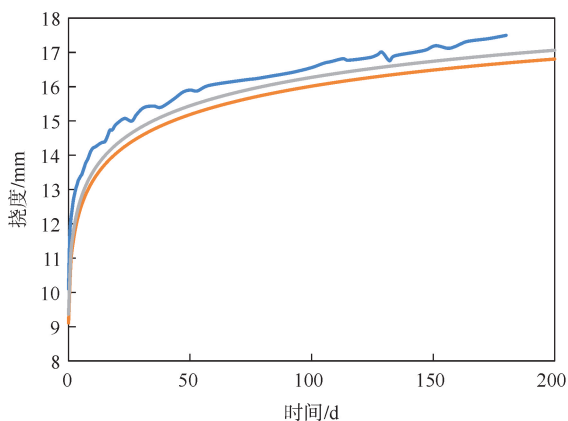


图4 EB0.4梁跨中挠度曲线试验及模拟

— 试验值; — 考虑混凝土徐变时的模拟值;  
— 考虑混凝土徐变及胶层蠕变时的模拟值

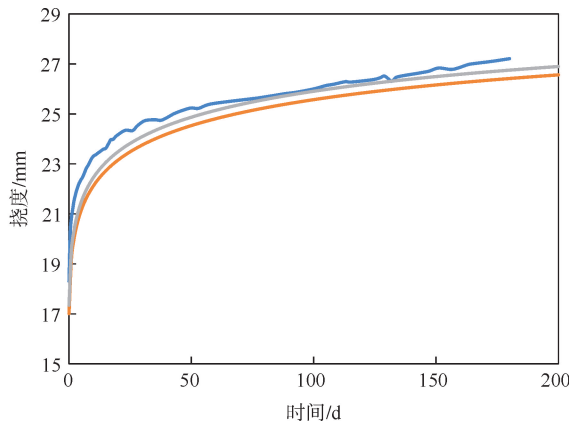


图5 EB0.6梁跨中挠度曲线试验及模拟

— 试验值; — 考虑混凝土徐变时的模拟值;  
— 考虑混凝土徐变及胶层蠕变时的模拟值

图6为试验梁跨中顶部受压混凝土压应变试验值及模拟值随时间变化的曲线,EB0.4梁跨中顶部混凝土压应变加载瞬时值误差为6.40%,加载终值误差为-20.80%,由荷载产生的附加变形误差为-44.10%。EB0.6梁跨中顶部混凝土压应变加载瞬时值误差为-3.80%,加载终值误差为-5.24%,由荷载产生的附加变形误差为-6.90%。EB0.4试验梁跨中顶部受压混凝土压应变各项误差均大于EB0.6试验梁。EB0.4试验梁误差较大的原因可以归结于以下3个因素:①混凝土的不均匀性,局部容易产生应力集中现象,有限元模拟中将其处理为各向匀质的均匀材料,因此试验值比模拟值更小。②测量混凝土压应变使用的应变片为丝栅尺寸80mm×3.5mm的应变片,测量的为一段长度范围内混凝土压应变的平均值,并非某一处混凝土的压应变值。③应变片数据采集容易受到试验环境温度、湿度的影响,导致其与模拟值产生差距。

从表2可以发现,EB0.6梁跨中顶部受压混凝土压应变各项模拟值跟试验值误差均小于10%,且混凝土压应变的变化情况与挠度变化情况类似,施加荷载后前期混凝土压应变随时间变化速度较快,随着时间增加速度逐渐减小。

由图7可知,持荷200d后,EB0.4试验梁跨中CFRP应变增加1.6倍,EB0.6试验梁跨中CFRP应变增加1.49倍,施加持续荷载后前期CFRP应变随时间变化速度较快,后期速度逐渐减慢。

图8为EB0.4梁、EB0.6梁距离CFRP端部不同位置处CFRP初始及200d后的应变变化曲线。EB0.4梁施加初始荷载后跨中CFRP应变为端部CFRP应变的9.50倍,200d后跨中CFRP应变为端部CFRP应变的6.06倍;EB0.6梁施加初始荷载后跨中CFRP应变为端部CFRP

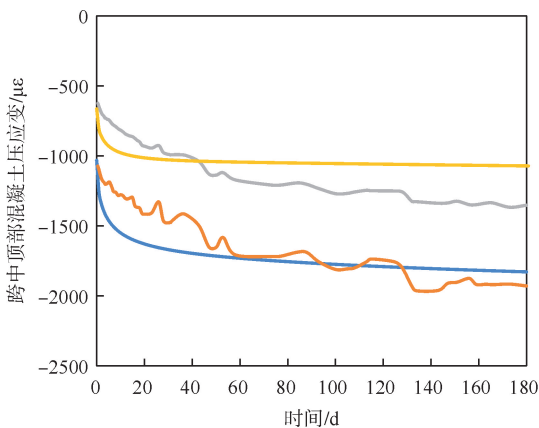


图6 受压混凝土压应变试验及模拟

— EB0.6模拟值; — EB0.6试验值;  
— EB0.4试验值; — EB0.4模拟值

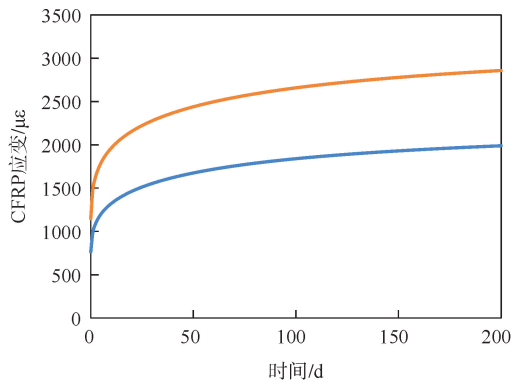


图7 试验梁跨中CFRP应变变化模拟曲线

— EB0.4梁; — EB0.6梁

应变的 9.46 倍,200 d 后跨中 CFRP 应变为端部 CFRP 应变的 6.78 倍。

表 3 为只考虑胶层徐变、不考虑混凝土徐变情况下试验梁跨中挠度模拟值变化情况,可知,由于环氧树脂胶层蠕变的存在,梁跨中挠度随时间增长而增大。通过前期模拟发现,高荷载作用下,黏结界面剪应力大多会产生较大的剪切蠕变变形。随着施加荷载的增大,环氧树脂蠕变引起的挠度也逐渐增大,高荷载作用下挠度的增长量比低荷载作用下挠度的增长量更加显著。荷载增加 20%,胶层蠕变产生的跨中附加挠度增加 30%。在施加荷载后的前 50 d 内,胶层蠕变产生的跨中附加挠度增长较快,50 d 后胶层蠕变产生的跨中附加挠度增长速度急剧减小,胶层蠕变产生的附加挠度不再明显。图 4 及图 5 中绘制了考虑胶层

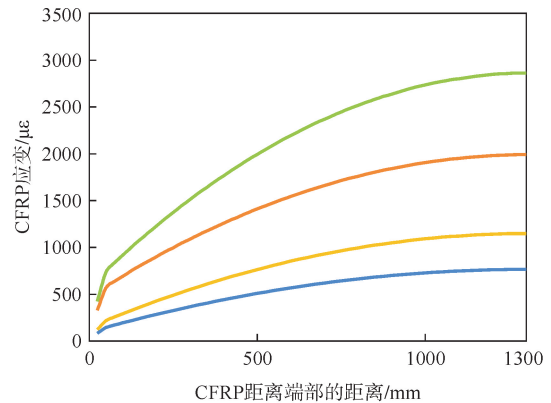


图 8 试验梁不同位置 CFRP 应变变化曲线

— EB0.4 梁 0 d; — EB0.4 梁 200 d;  
— EB0.6 梁 0 d; — EB0.6 梁 200 d

蠕变作用影响的试验梁跨中挠度随时间的变化情况,根据模拟值,EB0.4 试验梁中,施加持续荷载 200 d 后,试验梁跨中挠度因胶层蠕变产生的附加挠度约为 0.257 mm,胶层蠕变产生的附加挠度约为混凝土蠕变挠度的 3.4%;EB0.6 试验梁中,施加持续荷载 200 d 后,试验梁跨中挠度因胶层蠕变产生的附加挠度约 0.335 mm,胶层蠕变产生的附加挠度约为混凝土蠕变挠度的 3.6%。胶层蠕变对试验梁总附加挠度的影响不大,对试验梁总附加挠度的影响情况取决于外贴 CFRP 布的横截面积,外贴 CFRP 布提供的承载力不同,胶层蠕变对试验梁跨中挠度增大的影响程度不同,为了使模拟值更加准确应考虑胶层蠕变的影响。

表 3 跨中挠度模拟值随时间变化情况

试验梁编号	时间/d				
	10	30	50	100	200
EB0.4	0.147	0.238	0.255	0.257	0.257
EB0.6	0.192	0.310	0.333	0.335	0.335

## 4 结论

通过 2 条外贴 CFRP 加固梁在持续荷载下的徐变试验,与 ABAQUS 有限元软件子程序 UMAT 相结合,建立了外贴 CFRP 加固钢筋混凝土试验梁在长期持续荷载作用下的时变分析模型,得出以下结论:

- 1) 持续荷载施加后,前期试验梁挠度、受压区混凝土压应变及跨中 CFRP 应变试验值随时间变化速度较快,随着时间的增加,变化速率逐渐减小。
- 2) 有限元模型中,试验梁挠度、受压区混凝土压应变及跨中 CFRP 应变试验值与模拟值之间差距很小,有限元分析结果能够较为准确地反映试验梁的变形情况,可以通过有限元模型研究加固梁在持续荷载下的长期受力情况,进一步可以进行相关参数分析。
- 3) 环氧胶层的徐变特性对外贴 CFRP 加固钢筋混凝土试验梁在长期持续荷载作用下的受力性能有一定影响,胶层蠕变对试验梁总附加挠度的影响不大,但为了使模拟值更加准确应考虑胶层蠕变的影响。

### 参考文献(References):

[1] PATHAK P,ZHANG Y X. Nonlinear finite element analyses of fiber-reinforced polymer-strengthened steel-reinforced concrete beams under cyclic loading[J]. Structural Concrete,2017,18(6): 929-937.  
[2] RWAWIIRE S,TOMKOVA B,WIENER J,et al. Short-term creep of barkcloth reinforced laminar epoxy composites[J]. Composites Part B,2016,103:131-138.

- [3] BERARDI V P, PERRELLA M, FEO L, et al. Creep behavior of GFRP laminates and their phases: Experimental investigation and analytical modeling[J]. *Composites Part B*, 2017, 122: 136-144.
- [4] DONG J F, WANG Q Y, GUAN Z W. Structural behaviour of RC beams externally strengthened with FRP sheets under fatigue and monotonic loading[J]. *Engineering Structures*, 2012, 41: 24-33.
- [5] FERRIER E, LABOSSIÈRE P, NEALE K W. Modelling the bending behaviour of a new hybrid glulam beam reinforced with FRP and ultra-high-performance concrete[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(8): 3883-3902.
- [6] PENG Hui, ZHANG Jianren, SHANG Shouping, et al. Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates[J]. *Engineering Structures*, 2016, 127: 62-72.
- [7] CHAMI A G, THERIAULT M, NEALE K W. Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(4): 1640-1652.
- [8] SÁ M F, GOMES A M, CORREIA J R, et al. Creep behavior of pultruded GFRP elements Part 1: Literature review and experimental study[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(10): 2450-2459.
- [9] BAZANT Z P. Prediction of concrete creep and shrinkage: Past, present and future[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2001, 203(1): 27-38.
- [10] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
JIANG Jianjing, LU Xinzhen, YE Lieping. Finite element analysis of concrete structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [11] HUANG Q, HAMED E, GILBERT R I. Experimental and numerical investigation of the creep response of precast concrete sandwich panels[J]. *Structures*, 2020, 28(20): 2096-2110.
- [12] GIUSTI A, COLOMBARO I. Prabhakar-like fractional viscoelasticity[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2018, 56: 138-143.
- [13] KELVIN F, BISCHOFF P H. Tension stiffening and cracking of high-strength reinforced concrete tension members[J]. *Structural Journal*, 2004, 101(4): 447-456.
- [14] CEB-FIP, *fib* model code for concrete structures 2010[S].
- [15] CHOI K K, TAHA M M R, MASIA M J, et al. Numerical investigation of creep effects on FRP-strengthened RC beams[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(6): 812-822.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)

---

### (上接第8页)

- [13] 梁一凡, 赛庆毅, 王玄. 基于均匀设计法的高比转速离心风机研究[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(1): 7-13.  
LIANG Yifan, SAI Qingyi, WANG Xuan. Study on high specific speed centrifugal fan based on the uniform design test[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2021, 38(1): 7-13.
- [14] YE Q, ZHANG Z Q, LAW R. Sentiment classification of online reviews to travel destinations by supervised machine learning approaches[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 6527-6535.
- [15] SAWANT S S, WIEDMANN M, GÖB S, et al. Compression of deep convolutional neural network using additional importance-weight-based filter pruning approach[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(21): 1-18.
- [16] HASSAN H, BADR A, ABDELHALIM M B. Prediction of O-glycosylation sites using random forest and GA-tuned PSO technique[J]. *Bioinformatics & Biology Insights*, 2015, 9(9): 103-109.
- [17] KHAN Z, GUL A, PERPEROGLU A, et al. Ensemble of optimal trees, random forest and random projection ensemble classification[J]. *Advances in Data Analysis and Classification*, 2020, 14: 97-116.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)