

FRP 筋呋喃树脂混凝土梁蠕变性能试验研究

晏石林 余启明

(武汉理工大学理学院, 武汉, 430070)

摘要: 玻璃钢 (FRP) 筋呋喃树脂混凝土是一种强度高、全方位耐腐蚀的新型工程材料, 具有十分广泛的应用前景。本文首先对呋喃树脂混凝土梁和 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土梁的弯曲蠕变特性进行了试验研究与分析, 采用四点弯曲试验方法分别得到了梁在不同荷载水平作用下的蠕变曲线, 对其粘弹性性质进行了分析, 结果表明 FRP 筋不仅提高了呋喃树脂混凝土梁的初始刚度和强度, 而且明显地降低梁的蠕变变形。其次, 运用最小二乘法确定蠕变模型参数, 分别建立了呋喃树脂混凝土梁和 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土梁的弯曲蠕变幂律模型, 为估计材料的长期力学性能提供依据, 对 FRP 筋呋喃树脂混凝土结构设计具有重要的工程实用价值。

关键词: 呋喃树脂混凝土; 玻璃钢(FRP)筋; 蠕变性能

The study on creep behavior of FRP rebar reinforced furan resin concrete beam

YAN Shi-lin, YU Qi-ming

(School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: FRP furfural resin concrete is a kind of anti-corrosive new engineering material with high strength, which has extensive application prospect. In this paper, firstly the experience has performed about the bending and creep characteristic of non-FRP reinforced furan resin concrete beam and FRP reinforced furan concrete beam, and the creep curves are gained of the beams under different loads by four-point bending test method, and analysis is carried on the viscoelasticity nature, the result shows that FRP not only enhances the furan resin concrete beam's initial stiffness and strength, but also obviously reduced the creep strain of the beam. Secondly the creep model variables are determined through the least square method, the bending creep power law model are separately built of non-FRP reinforced furan resin concrete beam and FRP reinforced furan concrete beam which is the basis of estimation of material's long term mechanics performance, and also has important project practical value to the FRP furan resin concrete structure design.

Key words: furan resin concrete; FRP rebar; creep behavior

树脂混凝土是一种用热固性合成树脂作粘结剂, 以石英石、粗砂、细砂为骨料的混凝土材料。与普通的水泥混凝土相比, 具有耐腐蚀性优良、抗裂强度高、抗渗性能好、凝固速度快等突出优点。玻璃纤维增强塑料 (玻璃钢, FRP) 筋是一种采用连续玻璃纤维作增强材料, 不饱和聚酯树脂作为基体材料, 通过拉挤成型工艺制作出来的棒材。与普通钢筋相比, FRP 筋轴向拉伸强度高、耐腐蚀性优良、重量轻等特点。因此, 根据钢筋混凝土结构的基本原理, 由 FRP 筋与树脂混凝土复合而成的 FRP 筋加强树脂混凝土是一种全方位耐腐蚀的结构材料, 由于这种材料集防腐功能和结构承重作用于一身, 因而可视为一种新型的功能-结构一体化材料, 可以广泛用于耐化学腐蚀的建筑物, 尤其是直接受各种腐蚀介质强烈作用的建筑物或设备中, 如化工厂房建筑、海港码头建筑、电解设备等。在有侵蚀性的工业建筑中使用树脂混凝土或 FRP 筋树脂混凝土构件, 可以大大减少日常的维修工作量和劳力, 提高结构的使用寿命, 具有较好的经济价值。

由于采用聚合物材料代替水泥作为混凝土的粘结剂, 所以聚合物混凝土构件的蠕变性能成为了设计人员和用户关注的焦点, 直接影响着聚合物混凝土结构的使用与推广。聚合物混凝土以及加强聚合物混凝土的蠕变特性、在聚合物混凝土结构设计时如何考虑蠕变的影响、FRP 用作聚合

基金项目: 国家自然科学基金 (50573060)

作者简介: 晏石林 (1963-), 男, 教授, E-mail: yanshl@mail.whut.edu.cn

物混凝土加强筋的可行性等是需要进一步深入研究的关键问题。本文以 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土用于铜、锌电解槽结构制造为应用背景，着重开展呋喃树脂混凝土和 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土蠕变特征的试验研究，并对其蠕变规律进行模型分析，对其长期力学性质进行预测，从而为 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土结构的设计、长期使用荷载水平的确定等提供依据。

1 试件的制作

本试验采用的呋喃树脂由黄石汇波防腐技术有限公司提供，混凝土由呋喃树脂、固化剂、石英粉、石英砂和石英石按照一定的配比混合固化而成。加强筋采用由无碱玻璃纤维与不饱和聚酯树脂通过连续拉挤成型工艺制得的圆截面 FRP 棒材。为了提高 FRP 筋与树脂混凝土的界面粘结性能、保证混凝土对加强筋的握裹力，在 FRP 筋材表面预先进行了处理。试件分为 A 和 B 两大类：A 类试件是不加筋的呋喃树脂混凝土梁，试件尺寸为 $600 \times 40 \times 50\text{mm}$ ；B 类试件为 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土梁，试件尺寸与第一组相同，FRP 筋的直径为 5mm （配筋率约为 1.0% ）。试件制作方法是：先将固化剂、粉料、骨料混合均匀，再掺入呋喃树脂，搅拌均匀后浇筑于预先安置有 FRP 筋的模具中，振捣密实后放在通风且湿度小于 50% 的实验室中常温固化，3 天后脱模并常温养护 14 天以上。FRP 筋加强呋喃树脂混凝土梁试件及其横截面见图 1。

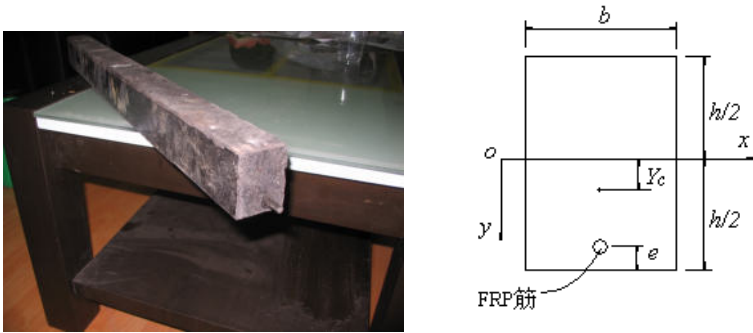


图 1 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土梁试件及横截面

2 试验装置与方案设计

本文采用梁的四点弯曲试验来研究呋喃树脂混凝土和 FRP 加强呋喃树脂混凝土的蠕变性能。因为蠕变试验周期较长，一般要求在 1000 小时以上，直接用电测方法测试应变随时间的变化率比较困难，可能因中途出现停电等意外事故而导致试验的失败。因此，本文先通过测得试件梁在一定荷载作用下的跨中挠度 f_c 随时间 t 的变化曲线，再根据挠度与弯曲应变的关系换算得到应变与时间的关系曲线，试验装置如图 2 所示。

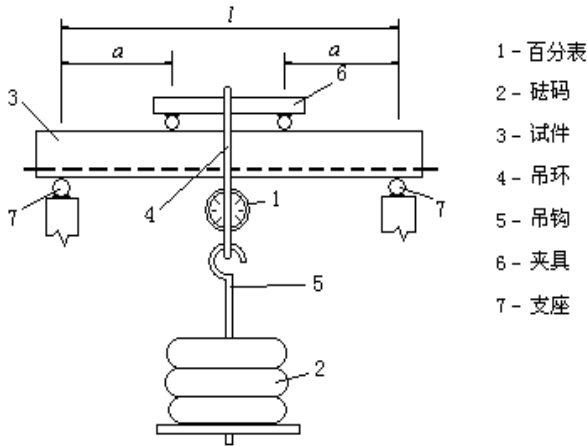


图 2 四点弯曲蠕变试验装置示意图

梁弯曲时下表面的轴向拉应变 ε 与跨中挠度 f_c 的关系近似为：

$$\text{跨中挠度：} \quad f_c = \frac{Pa}{48EI} (3l^2 - 4a^2) \quad (1)$$

$$\text{无筋梁：} \quad \varepsilon = \frac{M}{EI} h/2 = \frac{Pa}{2EI} \frac{h}{2} = \frac{12h}{3l^2 - 4a^2} f_c \quad (2)$$

$$\text{加筋梁：} \quad \varepsilon = \frac{M}{EI} (h/2 - Y_c) = \frac{Pa}{2EI} (\frac{h}{2} - Y_c) = \frac{12(h - 2Y_c)}{3l^2 - 4a^2} f_c \quad (3)$$

式中， f_c 为跨中挠度； ε 为梁下表面的轴向拉应变； P 为外加的恒定荷载； $EI, \overline{EI}$ 分别为无筋梁和加筋梁的抗弯刚度； Y_c 为加筋梁截面惯性轴到截面形心的距离； h, l, a, e 分别为梁截面高度、跨距、荷载到支座的距离和 FRP 筋距梁下表面的距离（见图 1 和图 2）。

在做蠕变试验之前，预先对呋喃树脂混凝土和 FRP 筋的弹性模量进行了测试，分别为： $E_{pc}=8.1\text{GPa}, E_{FRP}=49.5\text{GPa}$ 。此外，为了合理确定蠕变试验荷载的大小，选择合适的应力水平范围，对 A、B 两类试件梁分别进行了静力弯曲试验，测得其极限弯曲荷载。试件及实验装置的相关参数见表 1。

表 1 试件及试验装置的相关参数

试件类别	$l(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$e(\text{mm})$	$Y_c(\text{mm})$	$a(\text{mm})$	FRP 筋直 径 (mm)	静力弯曲极限 荷载 $P_{\max}(\text{N})$
A 类试件	550	40	50	-	0	200	-	985
B 类试件	550	40	50	15	0.69	200	5	1640

分别对无筋梁和加筋梁进行了不同应力水平下的蠕变试验。对于呋喃树脂混凝土梁，采用两种应力水平，试验荷载分别约为极限弯曲荷载的 15% 和 25%；对于 FRP 筋呋喃树脂混凝土梁，采用三种应力水平，试验荷载分别约为极限弯曲荷载的 15%、30% 和 45%。试件分为五组，每组 3 根。各组试件及试验荷载大小见表 2。

表 2 试件分组及蠕变试验荷载值

试件组编号	A-1	A-2	B-1	B-2	B-3
蠕变试验荷载值 $P(\text{N})$	147	245	245	490	735
试验荷载/极限荷载	0.15	0.25	0.15	0.3	0.45

注：A 类试件为呋喃树脂混凝土梁；B 类试件为 FRP 筋呋喃树脂混凝土梁

采用砝码加载，荷载加上后立即读取初始挠度（即弹性变形），此后定时读取数据，记录不同时间的挠度值，蠕变试验持续时间超过 1500 小时（图 3）。

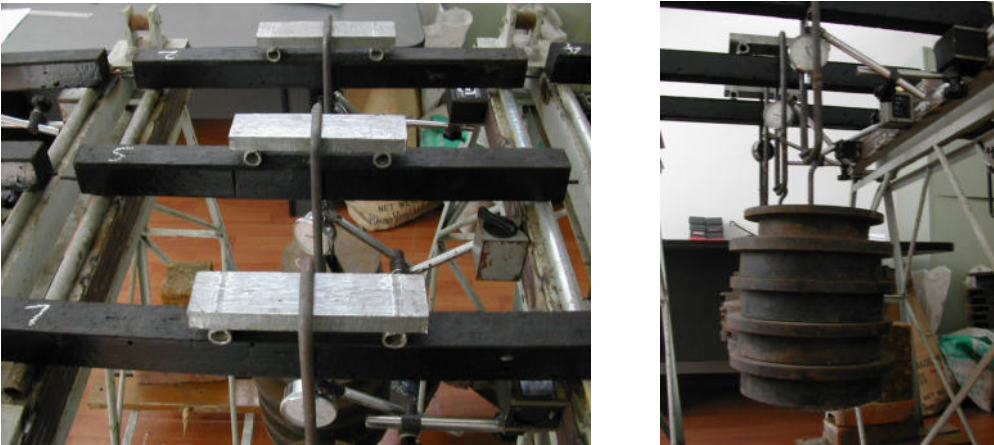


图 3 不同应力水平下的蠕变试验

3 试验结果与分析

3.1 呋喃树脂混凝土的蠕变特性

通过记录下每根呋喃树脂混凝土梁试件在蠕变试验过程中不同时刻 t 的跨中挠度 $f_c(t)$ ，再用式 (2) 换算得到梁下表面的拉伸轴向应变 $\varepsilon(t)$ ，各组 (A-1 和 A-2) 取平均值后，即可画出在两种应力水平下的 $\varepsilon(t) - t$ 曲线 (图 4) 和 $\varepsilon(t)/\varepsilon_0 - t/\tau_0$ 曲线 (图 5)。这里， ε_0 为初始应变或弹性应变， τ_0 为涉及时间的单位 (本文时间单位为小时)。

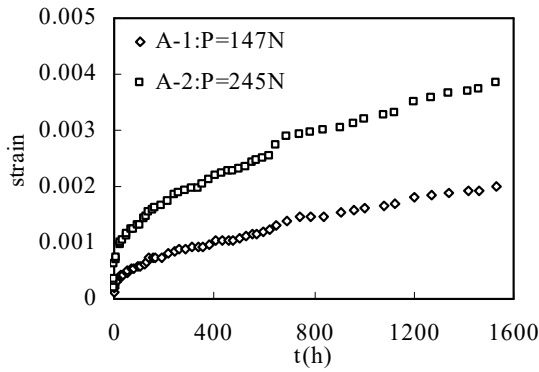


图 4 无筋梁在不同应力水平下的蠕变曲线

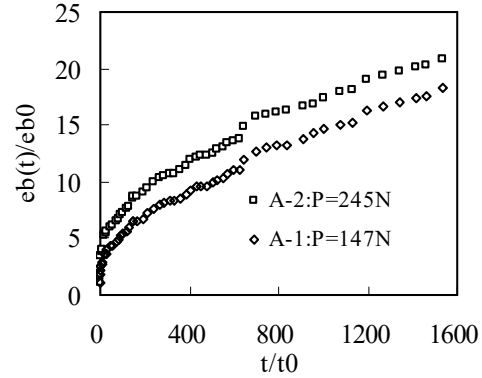


图 5 无筋梁的正则化蠕变曲线

由图 4 可以看出，呋喃树脂混凝土梁的弯曲蠕变非常明显，既使在 1500 小时后，应变仍然在增加。应力水平增大，弹性应变和蠕变应变都相应增大。图 5 为正则化后的应变-时间曲线，在不同应力水平 (即荷载水平) 下，曲线并不重合，说明呋喃树脂混凝土的蠕变大小与应力水平不成线性关系，表现出非线性粘弹性性质。应力水平增大时，弹性应变 ε_0 按比例增大，而蠕变应变则以更大的比例增长。即时间一定时，正则化总应变随着应力水平的增加而增大。由图 5 看出，经历 1500 小时的蠕变变形后，在 15% 极限荷载下，总应变为弹性应变的 18 倍，而在 25% 极限荷载下，总应变超过了弹性应变的 20 倍。

3.2 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土的蠕变特性

采用 FRP 筋加强后的呋喃树脂混凝土梁 (配筋率约为 1%)，在三种应力水平下测得的 $\varepsilon(t) - t$ 曲线和 $\varepsilon(t)/\varepsilon_0 - t/\tau_0$ 曲线分别见图 6 和图 7。

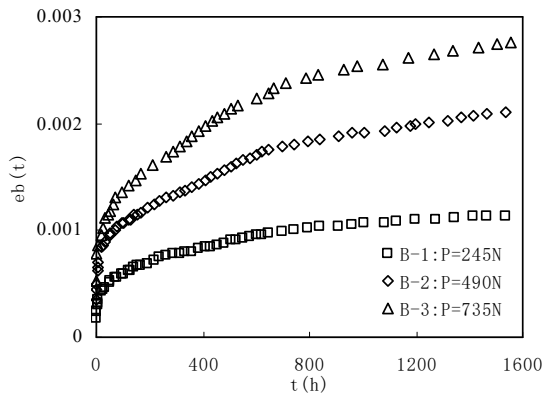


图 6 加筋梁在不同应力水平下的蠕变曲线

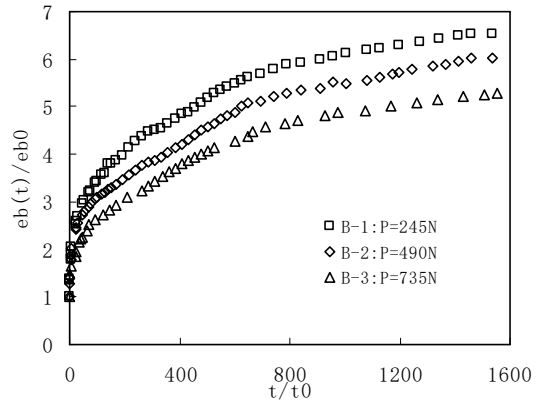


图 7 加筋梁的正则化蠕变曲线

图 6 反映了 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土的弯曲蠕变规律。图 7 为正则化总应变随时间的变

化曲线。在三种应力水平下，三条曲线也不重合，同样表现出非线性粘弹性的性质。但是与不加 FRP 筋的情况不同，蠕变应变增长的比例比应力水平增长的比例要小。即时间一定时，正则化总应变随着应力水平的增加而减小。经历 1500 小时的蠕变变形后，在 15% 极限荷载下，总应变为弹性应变的 6.5 倍；在 30% 极限荷载下，总应变为弹性应变的 6 倍；而在 45% 极限荷载下，总应变减少到了弹性应变的 5.3 倍。说明在应力水平较高的情况下，FRP 筋起到抑制蠕变的效果更加明显。

FRP 加强筋阻止蠕变变形的效果还可从图 8 得到显示，在 $P=245\text{N}$ 的相同荷载作用下，加筋梁的蠕变应变比无筋梁要小得多，在 1500 小时后，加筋梁的正则化总应变只有无筋梁的 31%。

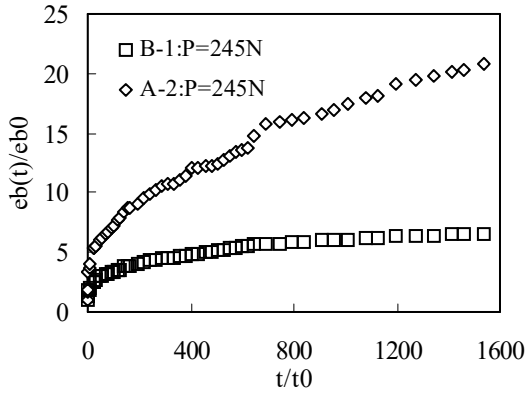


图 8 无筋梁和加筋梁的正则化蠕变曲线

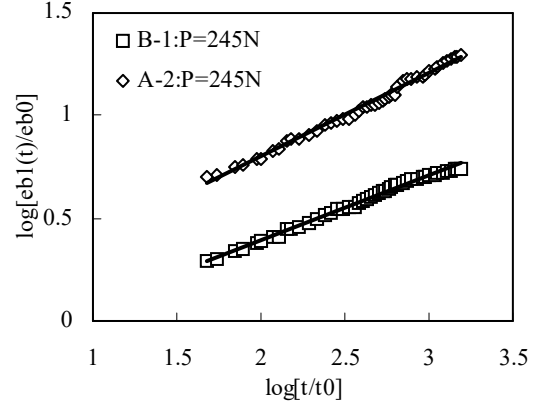


图 9 无筋梁和加筋梁的正则化蠕变对数曲线

4 蠕变模型与分析

从试验结果可以看出，不论呋喃树脂混凝土是否含有加强筋，都具有粘弹性性质，在恒定荷载作用下，其试件梁的弯曲总应变包含两部分，即弹性应变和蠕变应变。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1(t) \quad (4)$$

或写成：

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_0} = 1 + \frac{\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

式中， $\varepsilon(t)$, ε_0 , $\varepsilon_1(t)$ 分别为总应变、弹性应变和蠕变应变。设蠕变应变随时间的变化规律满足幂指数关系：

$$\frac{\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_0} = \beta \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^n \quad (6)$$

其中， β 和 n 为蠕变模型参数，可以通过蠕变试验并采用曲线拟合技术来确定； τ_0 为涉及时间的单位。对式（6）两边取对数得：

$$\log \left(\frac{\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_0} \right) = n \log \left(\frac{t}{\tau_0} \right) + \log \beta \quad (7)$$

式（7）为线性方程。对 A-2 组和 B-1 组试件的蠕变试验数据进行处理，画出蠕变对数曲线，并进行直线拟合（见图 9），可确定对应的蠕变模型参数分别为：

无筋梁（A-2 组）： $n=0.4095$, $\beta=0.9526$

加筋梁（B-1 组）： $n=0.3182$, $\beta=0.5674$

将以上参数分别代入式（6）和式（5），得到无筋梁和加筋梁的蠕变模型表达式分别为：

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_0} = 1 + 0.9526 \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^{0.4095} \quad (8)$$

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_0} = 1 + 0.5674 \left(\frac{t}{\tau_0} \right)^{0.3182} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)画出的幂指数模型蠕变曲线以及与 A-2、B-1 组试件蠕变试验结果的对比见图 10, 可以看出, 用幂指数模型能够较好地描述呋喃树脂混凝土和 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土的弯曲蠕变特性。通过蠕变模型表达式, 图 10 还画出了时间外推到 5000 小时的蠕变情况, 无筋梁的应变还有明显的增长趋势, 而加筋梁的应变增长以变的非常缓慢。

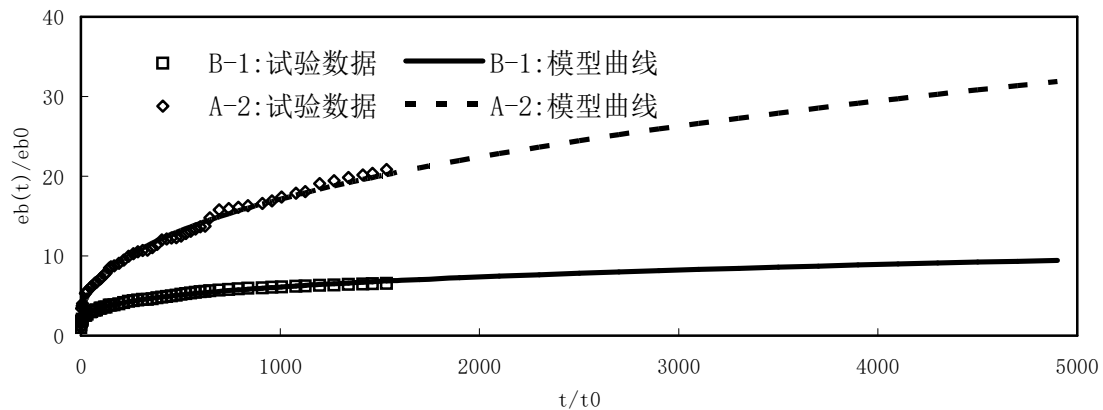


图 10 无筋梁和加筋梁的蠕变模型曲线

5 结论

1) 呋喃树脂混凝土和 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土都属粘弹性材料, 在恒定荷载作用下, 总应变随着时间的增加而增大。

2) 应力水平对呋喃树脂混凝土和 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土梁的弯曲蠕变性能有明显的影响。时间一定时, 无筋梁的正则化弯曲总应变随着应力水平的增加而增大; 而加筋梁的正则化弯曲总应变随着应力水平的增加而减小。因此, 都表现出非线性粘弹性质。

3) FRP 加强筋对呋喃树脂混凝土的蠕变应变有非常明显的抑制效果。在相同荷载作用下, 配筋率 1% 的 FRP 加强呋喃树脂混凝土梁的弯曲应变比不加筋时减少了 2/3 以上, 而且随着应力水平的增加, FRP 筋对蠕变应变的抑制作用更加显著。

4) 采用幂指数蠕变模型能够较好地描述呋喃树脂混凝土以及 FRP 筋加强呋喃树脂混凝土的蠕变特性, 并能够比较方便地预测这种材料的长期性能。

参考文献

- [1] C.M.L Tavares, M.C.S. Ribeiro, A.J.M. Ferreira, R.M.Guedes. Creep behavior of FRP-reinforced polymer concrete. Composite Structures, 2002, 57, 47~51
- [2] 晏石林, 张炎, 王伟, 余波. GFRP 筋加强混凝土的粘接性能研究, 武汉理工大学学报, 2004, 26(7): 34~37
- [3] 王伟, 晏石林, 张炎. 玻璃钢筋增强树脂混凝土梁的弯曲性能研究, 武汉理工大学学报, 2005, 27(2): 7~9
- [4] 闵召辉, 王晓环. 青混凝土的蠕变特性试验的研究, 路交通科技, 2004, 21(1): 1~3
- [5] 吕伟民, 郭忠印. 环氧沥青混凝土的蠕变特性, 石油沥青, 1995, 9(4): 1~3