

Creep Analysis of Hollow and Solid GFRP Tube Reinforced Concrete Eccentric Compression Member

Ni Zhang^{1*}, Runbo Ma¹, Yuyi Xiao¹, Hongda Ding¹, Jielin Liu¹, Yongtao Sun¹, Lianguang Wang²

¹College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning

²School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning

Email: *418688814@qq.com

Received: Nov. 23rd, 2019; accepted: Dec. 16th, 2019; published: Dec. 23rd, 2019

Abstract

In order to study the effect of creep on the eccentric compression members of hollow and solid GFRP tube reinforced concrete, the creep formula of hollow and solid GFRP tube reinforced concrete was established. GFRP tube reinforced concrete eccentric compression member creep effect analysis and calculation was established, and a numerical example was calculated, analyzing the effect of eccentricity, the hollow rate, action load, the thickness of GFRP tube and strength grade of concrete to influence of eccentric compression member creep. Results of the computation showed that the creep of the eccentric compression member was increased with the increase of eccentricity, hollow rate, action load and strength grade of concrete, the decrease of the thickness of GFRP tube. The influence of hollow rate and action of the creep of GFRP tube reinforced concrete eccentric compression member was large, and eccentricity and the thickness of GFRP tube were the secondary factor. The strength grade of concrete was relatively small.

Keywords

GFRP Tube, Steel Reinforced Concrete, Hollow and Solid, Eccentric Compression, Creep

空实心GFRP管钢筋混凝土偏心受压构件徐变分析

张 霓^{1*}, 马润博¹, 肖宇屹¹, 丁虹达¹, 刘杰林¹, 孙永涛¹, 王连广²

¹辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新

²东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳

*通讯作者。

文章引用: 张霓, 马润博, 肖宇屹, 丁虹达, 刘杰林, 孙永涛, 王连广. 空实心 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件徐变分析[J]. 土木工程, 2019, 8(10): 1483-1492. DOI: 10.12677/hjce.2019.810173

Email: 418688814@qq.com

收稿日期: 2019年11月23日; 录用日期: 2019年12月16日; 发布日期: 2019年12月23日

摘要

为研究徐变对空心 and 实心GFRP管钢筋混凝土偏心受压构件的影响, 本文建立适用于空心 and 实心的GFRP管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变公式。编制空、实心GFRP管钢筋混凝土偏心受压构件徐变程序, 并分析具体算例, 研究了偏心距、空心率、作用荷载、GFRP管壁厚及混凝土强度等级等参数对偏心受压构件徐变的影响。研究表明: GFRP管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变随偏心距的增大、空心率的增大、作用荷载的增大、GFRP管壁厚度的减小及混凝土强度等级的提高而增大。空心率和作用荷载对GFRP管钢筋混凝土偏心受压构件徐变的影响较大, 偏心距和GFRP管壁厚度的影响次之, 混凝土强度等级的影响相对较小。

关键词

GFRP管, 钢筋混凝土, 空实心, 偏心受压, 徐变

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic, 中文名玻璃纤维增强塑料)管钢筋混凝土构件是在 GFRP 管内设置纵向受力钢筋, 再向其内部浇筑混凝土而形成的一种新型构件。随着研究的深入和应用的发展, 从实心截面逐渐发展到了空心截面[1] [2] [3]。GFRP 管与混凝土是物理、力学性能截然不同的两种材料, 为此, 在长期使用过程中, 由于受到时间、周围环境等变化的影响, 混凝土会发生收缩与徐变, 从而导致了 GFRP 管和混凝土发生内力重分布等。GFRP 管钢筋混凝土构件主要用于轴心受压的结构中, 但在实际应用中, 由于混凝土的不均匀性、荷载位置的不确定性及施工偏差, 轴心受压状态几乎不可能出现, 绝大多数的受压构件处于偏心受压状态。国内外一些学者、专家对 GFRP 管钢筋混凝土构件的偏心受压性能进行研究[4]-[8], 但对其徐变效应的研究并不多见。本文对空、实心 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的初始状态进行分析, 求得核心混凝土的初始应力以及偏心受压构件的徐变计算公式。编制空、实心 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件徐变计算程序, 分析了主要参数对其徐变性能的影响。

2. 偏心受压构件初始状态受力分析

偏心受压构件是指承受不通过截面形心的轴向压力作用, 或是在承受轴向压力的同时承受横向作用力或弯矩的构件。本文针对偏心受压构件徐变的分析, 做如下基本假定:

- 1) GFRP 管与混凝土之间无相对滑移;
- 2) 截面应变符合平截面假定;
- 3) 不考虑剪切变形的影响;
- 4) 构件两端为铰接, 且挠曲线为正弦半波曲线。

2.1. 受力分析

当构件处于偏心受压状态时,有:

$$\sigma_f = N_f \left(\frac{1}{A_f} + \frac{er_f}{I_f} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_c = N_c \left(\frac{1}{(A_c - A_{ch})} + \frac{er_f}{I_c} \right) \quad (2)$$

式中: σ_f —GFRP 管受压区最大应力; N_f —GFRP 管承担的竖向力; A_f —构件截面 GFRP 管面积; σ_c —混凝土受压区最大应力; A_c 、 A_{ch} —构件截面实心混凝土面积、空心部分混凝土面积; N_c —混凝土承担的竖向力; r_f —核心混凝土的半径。

偏心受压构件符合下列关系:

$$M = N(e_0 + f), \quad e = e_0 + f = \eta e_0$$

式中: e_0 —外荷载作用点的初始偏心距; f —构件的挠度; e —外荷载作用在构件中的偏心距; η —偏心距增大系数[9], $\eta = \frac{e_0 + f}{e_0} = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_E}}$ 。

2.2. 紧箍应力分析

空、实心 GFRP 管钢筋混凝土构件中,截面应力分布不均匀,紧箍力的分布也不均匀,核心混凝土处于不等侧压应力的三向应力状态。核心混凝土应力状态,见图 1。

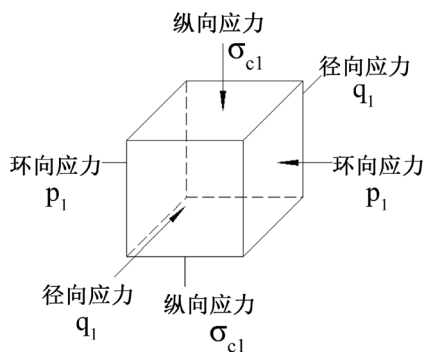


Figure 1. Eccentric core concrete stress

图 1. 核心混凝土应力状态

由胡克定律得核心混凝土应变:

$$\varepsilon_{c1} = \frac{1}{E_c} [\sigma_{c1} - \mu_c (p_1 + q_1)] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{c2} = \frac{1}{E_c} [q_1 - \mu_c (\sigma_{c1} + p_1)] \quad (4)$$

$$\varepsilon_{c3} = \frac{1}{E_c} [p_1 - \mu_c (\sigma_{c1} + q_1)] \quad (5)$$

GFRP 管的应力状态,见图 2。

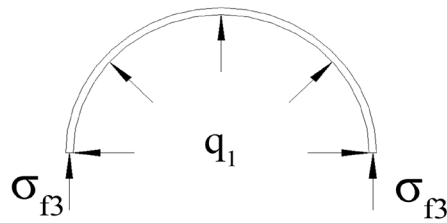


Figure 2. The stress of GFRP tube
图 2. GFRP 管应力状态

以受压为正，得：

$$\sigma_{f3} = -\frac{r_f}{t_f} q_1$$

$$\varepsilon_{f1} = \frac{\sigma_{f1}}{E_{f1}} - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \sigma_{f3} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{f2} = -\frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \sigma_{f1} - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \sigma_{f3} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{f3} = \frac{\sigma_{f3}}{E_{f3}} - \frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \sigma_{f1} \quad (8)$$

由变形协调条件，假设 $\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{f1}$ 、 $\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{f2}$ 、 $\varepsilon_{c3} = \varepsilon_{f3}$ ，得：

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_c} [\sigma_{c1} - \mu_c (p_1 + q_1)] &= \frac{\sigma_{f1}}{E_{f1}} - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \sigma_{f3} \\ \frac{1}{E_c} [q_1 - \mu_c (\sigma_{c1} + p_1)] &= -\frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \sigma_{f1} - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \sigma_{f3} \\ \frac{1}{E_c} [p_1 - \mu_c (\sigma_{c1} + q_1)] &= \frac{\sigma_{f3}}{E_{f3}} - \frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \sigma_{f1} \end{aligned}$$

化简得：

$$q_1 = n_1 \sigma_{c1} \quad (9)$$

$$p_1 = n_2 \sigma_{c1} \quad (10)$$

$$\text{式中： } n_1 = \frac{\frac{\mu_{f1} - \mu_c}{E_c}}{m_1 m_2 + \frac{1 - \mu_c \mu_{f1}}{E_c}}, \quad n_2 = \frac{\frac{\mu_{f1} - \mu_c}{E_c}}{m_1 m_2 + \frac{1 - \mu_c \mu_{f1}}{E_c}},$$

$$m_1 = \frac{\mu_c (\mu_{f1} + 1)}{E_c} + \frac{\mu_{f3} (\mu_{f1} + 1) r_f}{E_{f3} t_f}, \quad m_2 = \frac{\frac{1 + \mu_c}{E_c}}{\frac{1 - \mu_c}{E_c} + \frac{(1 - \mu_{f3}) r_f}{E_{f3} t_f}}$$

$$\sigma_{f1} = \left(\frac{1 - \mu_c n_2 - \mu_c n_1}{E_c} - \frac{\mu_{f3} r_f n_2}{E_{f3} t_f} \right) E_{f1} \sigma_{c1} \quad (11)$$

2.3. 初始应力计算

对于偏心受压构件，有

$$N = N_f + N_c + N_s$$

式中 GFRP 管和混凝土的初始应力由式(1)和(2)计算。

由平截面假定可知，纵向钢筋的轴向应变和混凝土的轴向应变相同。将纵向钢筋的面积折算成混凝土的面积，可得纵向钢筋的轴力：

$$N_s = \frac{A_s}{A_c - A_{ch}} \cdot \frac{E_s}{E_c} N_c$$

则

$$N_f = \gamma \left(\frac{1 - \mu_c n_2 - \mu_c n_1}{E_c} - \frac{\mu_{f3} r_f n_2}{E_{f3} t_f} \right) E_{f1} N_c \quad (12)$$

$$\text{式中：} \gamma = \frac{\frac{1}{A_c - A_{ch}} + \frac{er_f}{I_c}}{\frac{1}{A_f} + \frac{er_f}{I_f}}$$

整理得：

$$N_c = \frac{N}{1 + \gamma \left(\frac{1 - \mu_c n_2 - \mu_c n_1}{E_c} - \frac{\mu_{f3} r_f n_2}{E_{f3} t_f} \right) + \frac{A_s}{A_c - A_{ch}} \cdot \frac{E_s}{E_c}} \quad (13)$$

GFRP 管最大受压纤维处初始应力为：

$$\sigma_{f0} = \frac{\left(\frac{1 - \mu_c n_2 - \mu_c n_1}{E_c} - \frac{\mu_{f3} r_f n_2}{E_{f3} t_f} \right) E_{f1} \left(\frac{1}{A_c - A_{ch}} + \frac{er}{I_c} \right)}{1 + \gamma \left(\frac{1 - \mu_c n_2 - \mu_c n_1}{E_c} - \frac{\mu_{f3} r_f n_2}{E_{f3} t_f} \right) + \frac{A_s}{A_c - A_{ch}} \cdot \frac{E_s}{E_c}} N \quad (14)$$

混凝土最大受压纤维处初始应力为：

$$\sigma_{c0} = \frac{N}{1 + \gamma \left(\frac{1 - \mu_c n_2 - \mu_c n_1}{E_c} - \frac{\mu_{f3} r_f n_2}{E_{f3} t_f} \right) + \frac{A_s}{A_c - A_{ch}} \cdot \frac{E_s}{E_c}} \left(\frac{1}{A_c - A_{ch}} + \frac{er}{I_c} \right) \quad (15)$$

3. 偏压构件徐变理论计算公式

构件在徐变过程中会发生应力重分布，设 GFRP 管内力变化为 N_f^c ，应力变化为 σ_f^c ；核心混凝土内力变化为 N_c^c ，应力变化为 σ_c^c ；纵筋内力变化为 N_s^c ， $N_s^c = (A_s / (A_c - A_{ch})) \cdot (E_s / E_c) N_c^c$ ，则有：

$$\left(1 + \frac{A_s}{A_c - A_{ch}} \frac{E_s}{E_c} \right) N_c^c + N_f^c = 0 \quad (16)$$

$$\sigma_{c1}^c = N_c^c \left(\frac{1}{A_c - A_{ch}} + \frac{er_f}{I_c} \right)$$

$$\sigma_{c1}^c = N_f^c \left(\frac{1}{A_f} + \frac{er_f}{I_f} \right)$$

整理得 GFRP 管最大受压纤维处应力变化为:

$$\sigma_{f1}^c = -\frac{1}{\gamma} \left(1 + \frac{A_s}{A_c - A_{ch}} \cdot \frac{E_s}{E_c} \right) \sigma_{c1}^c \quad (17)$$

GFRP 管发生徐变时, 其应变变化为:

$$\varepsilon_{f1}^c = \frac{\sigma_{f1}^c}{E_{f1}} + \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r}{t} \Delta q_1$$

混凝土的应变变化为:

$$\varepsilon_{c1}^c = (\sigma_{c0} + \sigma_{c1}^c) c_1$$

混凝土的轴向徐变度为:

$$c_1 = c \cdot [1 - \mu_{cp,1} (n_1 + n_2)] \quad (18)$$

式中: c —素混凝土的徐变度, 文中采用混凝土徐变的继效流动理论[10], 该理论适用于不断卸载的混凝土徐变, 而 GFRP 管钢筋混凝土构件中混凝土在徐变过程中正是处于不断卸载状态, 因此采用继效流动理论分析空、实心 GFRP 管钢筋混凝土构件的徐变, 取

$$c = \left[1.51(1 - e^{-2.7(t-t_0)}) + 3.34(1 - e^{-0.14(t-t_0)}) + 2.17(1 - e^{-1.15(t-t_0)}) + 8.85(1 - e^{-0.015(t-t_0)}) \right] \times 10^{-6}$$

有效徐变泊松比为:

$$\mu_{cp,1} = 0.16 - \frac{0.074}{n_1 + n_2} + \frac{0.028}{(n_1 + n_2)^2}$$

GFRP 管径向应变变化为:

$$\varepsilon_{f2}^c = -\frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \sigma_{f1}^c + \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r}{t} \Delta q_1$$

混凝土最大受压纤维处的径向徐变为:

$$c_2 = c \left(1 - \mu_{cp,2} \frac{1+n_2}{n_1} \right) \quad (19)$$

有效徐变泊松比为:

$$\mu_{cp,2} = 0.16 - \frac{0.074}{\frac{1+n_2}{n_1}} + \frac{0.028}{\left(\frac{1+n_2}{n_1} \right)^2}$$

根据 GFRP 管的径向变形与混凝土最大受压纤维处变形协调条件, 有:

$$\varepsilon_{f2}^c = \varepsilon_{c2}^c$$

整理得:

$$-\frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \sigma_{f1}^c + \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r}{t} \Delta q_1 = (q_1 + \Delta q_1) c_2$$

根据 GFRP 管的轴向变形与核心混凝土最大受压纤维处变形协调条件, 有:

$$\varepsilon_{f2}^c = \varepsilon_{c2}^c$$

整理得:

$$\frac{\sigma_{f1}^c}{E_{f1}} + \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r}{t} \Delta q_1 = (\sigma_{c0} + \sigma_{c1}^c) c_1$$

简化得:

$$\Delta q_1 = \frac{n_1 c_2 \sigma_{c0} - \frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \frac{1}{\gamma} \left(1 + \frac{A_s}{A_c - A_{ch}} \frac{E_s}{E_c} \right) \sigma_{c1}^c}{\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} - c_2} \quad (20)$$

$$\sigma_{c1}^c = - \frac{c_1 - n_1 c_2 - \frac{E_{f3}}{\mu_{f3}} \frac{t_f}{r_f} c_1 c_2}{\frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \frac{1}{\gamma} n_3 + c_1 + \frac{1}{\gamma E_{f1}} n_3 - \frac{E_{f3}}{\mu_{f3}} \frac{t_f}{r_f} c_1 c_2 - \frac{E_{f3}}{\mu_{f3}} \frac{t_f}{r_f} \frac{1}{\gamma E_{f1}} n_3 c_2} \sigma_{c0} \quad (21)$$

$$\text{式中: } n_3 = 1 + \frac{A_s}{A_c - A_{ch}} \cdot \frac{E_s}{E_c}$$

考虑紧箍力时空、实心 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变公式为:

$$\varepsilon_c^c = (\sigma_{c0} + \sigma_{c1}^c) c \quad (22)$$

4. 计算分析

利用建立的理论模型, 编制适用于空、实心 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件徐变分析程序, 计算分析偏心距、空心率、作用荷载、GFRP 管管壁厚度及混凝土强度等级等参数对偏心受压构件徐变的影响。可以看出, 在荷载作用初期(28 天内), 偏心受压构件的徐变随天数的增长呈线性增加, 且增长速度较快, 28 天后, 增长速度相对缓慢, 大约 6 个月后, 趋于平稳发展。

在计算时采用的数据为: 混凝土为 C30, GFRP 管厚度 $t_f = 5 \text{ mm}$, 混凝土半径 $r_f = 100 \text{ mm}$, 空心部分混凝土半径 $r_h = 50 \text{ mm}$, GFRP 管的轴向弹性模量 $E_{f1} = 22925 \text{ MPa}$, GFRP 管的环向弹性模量 $E_{f3} = 61099 \text{ MPa}$, GFRP 管轴向泊松比 $\mu_{f1} = 0.147$, 环向泊松比 $\mu_{f3} = 0.39$; 混凝土的弹性模量 $E_c = 3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$, 纵向钢筋弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

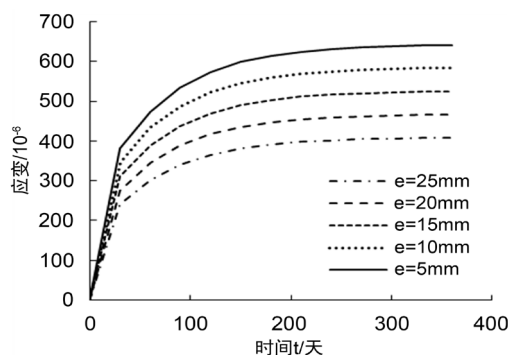


Figure 3. The influence curve of eccentricity

图 3. 偏心距对徐变的影响曲线

1) 偏心距的影响

由编制的 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变分析程序, 计算偏心距分别为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm 的徐变影响曲线, 见图 3。可以看出, 偏心受压构件的徐变随偏心距的增大而增加。构件的偏心距越大, 截面最大应力也越大, 故偏心受压构件的徐变越大。偏心距是 10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm 的徐变比偏心距是 5 mm 的徐变分别增大 14.2%、28.5%、42.7%和 56.9%。

2) 空心率的影响

由编制的 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变分析程序, 计算空心部分混凝土半径分别为 0 mm、25 mm、50 mm 和 75 mm 的徐变影响曲线, 见图 4。可以看出, 偏心受压构件的徐变随空心率的增大而增加。空心部分混凝土半径分别为 25 mm、50 mm 和 75 mm 的徐变比空心部分混凝土半径为 0 mm 的徐变分别增大 4.6%、23.7%和 88.8%。

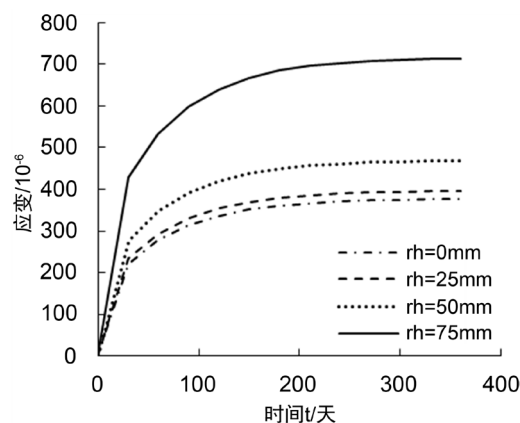


Figure 4. The influence curve of hollow rate on creep
图 4. 空心率对徐变的影响曲线

3) 作用荷载的影响

由编制的 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变计算分析程序, 计算作用荷载分别为 300 kN、400 kN、500 kN、600 kN 和 700 kN 的徐变影响曲线, 见图 5。可以看出, 偏心受压构件的徐变随作用荷载的增大而增加, 这是因为随着作用荷载的增大, 混凝土的应力增大, 所以偏心受压构件的徐变增大。作用荷载为 400 kN、500 kN、600 kN 和 700 kN 的徐变比作用荷载为 300 kN 的徐变分别增大 33.3%、66.7%、100.0%和 133.3%。

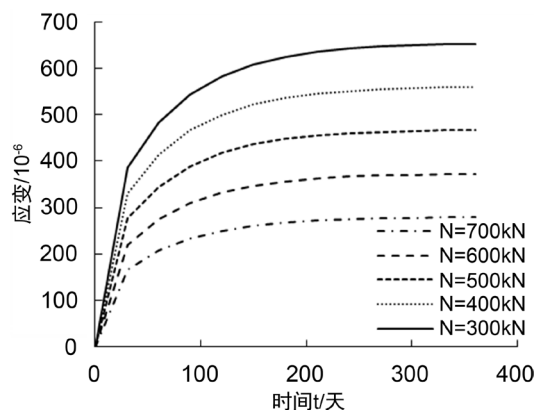


Figure 5. The influence curve of action load on creep
图 5. 作用荷载对徐变的影响曲线

4) GFRP 管管壁厚度

由编制的 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变分析计算程序, 计算 GFRP 管管壁厚度分别为 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm 和 7 mm 的徐变影响曲线, 见图 6。可以看出, 偏心受压构件的徐变随着 GFRP 管管壁厚度的增大而减小。这是因为 GFRP 管厚度增加, GFRP 管的起的作用增大, 混凝土作用相对变小, GFRP 管对混凝土的限制作用增加, 所以混凝土的徐变减小。GFRP 管管壁厚度为 4 mm、5 mm、6 mm 和 7 mm 的徐变比 GFRP 管管壁厚度为 3 mm 的徐变分别减小 5.6%、11.9%、19.5%和 29.3%。

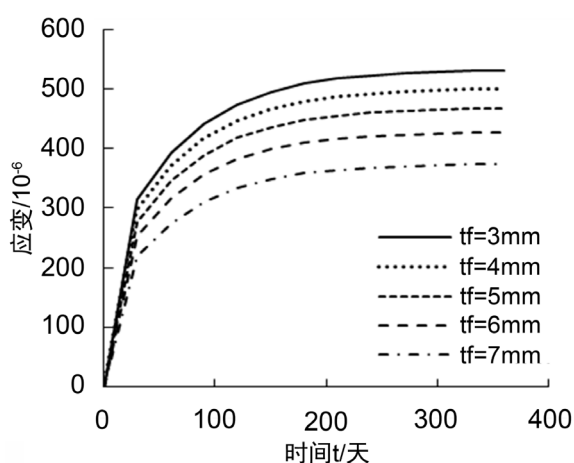


Figure 6. The influence curve of the thickness of GFRP tube on creep
图 6. GFRP 管壁厚度对徐变的影响曲线

5) 混凝土强度等级的影响

由编制的 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变计算分析程序, 计算混凝土强度等级分别为 C30、C40、C50、C60 和 C70 的徐变影响曲线, 见图 7。可以看出, 偏心受压构件的徐变随着混凝土强度等级的提高而增大。随着混凝土强度等级的提高, 混凝土的徐变会相应降低, 但混凝土强度等级提高使应力会向混凝土转移的多, 以上两种作用相反, 会相互抵消, 由计算结果能够看出, 后一种作用力相对大一些, 故徐变随着混凝土强度等级的提高而增大, 混凝土强度等级的变化对受弯构件徐变的影响较小。混凝土强度等级为 C40、C50、C60 和 C70 的徐变比混凝土强度等级为 C30 的徐变分别增大 9.0%、16.2%、21.4%和 24.9%。

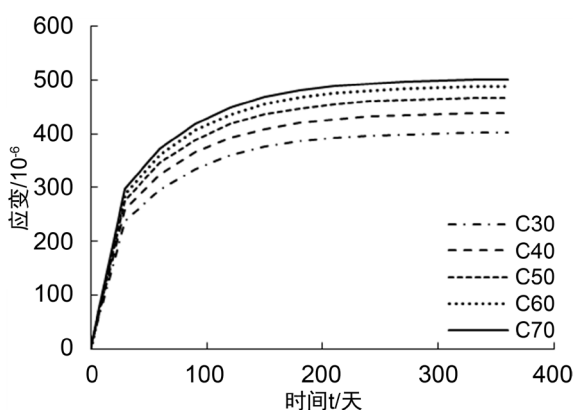


Figure 7. The influence curve of concrete strength grade on creep
图 7. 混凝土强度等级对徐变的影响曲线

5. 结语

1) 对空、实心 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件进行分析, 建立同时适用于实心 and 空心 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变公式。

2) 编制徐变分析程序, 分析了偏心距、空心率、作用荷载、GFRP 管管壁厚度及混凝土强度等级等参数对 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件徐变的影响。

3) GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件的徐变随偏心距的增大、空心率的增大、作用荷载的增大、GFRP 管管壁厚度的减小及混凝土强度等级的提高而增大。空心率和作用荷载对 GFRP 管钢筋混凝土偏心受压构件徐变的影响较大, 偏心距和 GFRP 管管壁厚度的影响次之, 混凝土强度等级的影响相对较小。

基金项目

辽宁省自然科学基金项目(20170540303)。

参考文献

- [1] 王连广, 陈百玲. GFRP 管及钢管型钢混凝土结构[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2013.
- [2] 汪子豪. FRP - 混凝土 - 高强度实心双管柱的试验研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [3] Ahmad, I., Zhu, Z.Y. and Mirmiran, A. (2008) Behavior of Short and Deep Beams Made of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes. *Journal of Composites for Construction*, **12**, 102-110.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:1\(102\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:1(102))
- [4] 肖建庄, 刘胜. 钢管/GFRP 管约束再生混凝土柱偏心受压试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(2): 21-26.
- [5] Micelli, F. and Modarelli, R. (2013) Experimental and Analytical Study on Properties Affecting the Behaviour of FRP-Confined Concrete. *Composites Part B: Engineering*, **45**, 1420-1431.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.055>
- [6] 于洋, 国庆波, 吴紫阳. 偏心受压下混凝土强度对 GFRP 管 - 混凝土 - 钢管组合柱力学性能的影响[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2018, 33(1): 64-70.
- [7] 秦国鹏. GFRP 管钢筋混凝土构件力学性能研究[D]:[博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [8] Lim, J.C. and Ozbakkaloglu, T. (2014) Unified Stress-Strain Model for FRP and Actively Confined Normal-Strength and High-Strength Concrete. *Journal of Composites for Construction*, **19**, 1-13.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000536](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000536)
- [9] 王元丰. 钢管混凝土徐变[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 唐崇钊. 混凝土的继效流动理论[J]. 水利水运科学研究, 1980(4): 4-16.