

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.126

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱的轴压徐变性能

张霓¹, 郑晨阳¹, 美丽娜¹, 王连广²

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110000)

摘要:为研究玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱轴压下的徐变性能,对空心柱轴压下的受力特性进行分析,建立了适用于玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱轴压徐变公式。编制轴心受压荷载作用下徐变分析程序计算徐变应变与时间关系曲线,并通过已有试验对该程序的正确性进行验证。在程序正确性的基础上,计算空心率、混凝土强度、作用荷载及玻璃纤维管壁厚等主要参数对其轴压徐变性能的影响。结果表明:空心柱的徐变应变在28 d以内(作用初期)增长较快,28 d以后增长速度变得缓慢,大约6个月以后徐变应变趋于稳定。空心率和混凝土强度对玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱轴压徐变影响较小,其次是玻璃纤维管壁厚,作用荷载对徐变影响较大。

关键词:玻璃纤维管;钢筋混凝土;空心柱;轴压;徐变性能

中图分类号: TU378.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)06-0088-07

Creep behavior of glass fiber reinforced polymer tube filled with reinforced hollow concrete columns on axial compression

ZHANG Ni¹, ZHENG Chenyang¹, XIAN Lina¹, WANG Lianguang²

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China; 2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110000, P. R. China)

Abstract: In order to study the characteristics of creep performance of glass fiber reinforced concrete hollow columns under axial compression, the mechanical properties were analyzed according to the mechanical characteristics of the hollow column under axial compression in this paper. The creep formula of the GFRP tube reinforced concrete hollow column was established under axial compression. A creep analysis program under the axial compression load was developed to calculate the creep strain-time relationship curve. And the correctness of creep program was verified by existing tests. On this basis, the influence of the main design parameters, such as applied load, thickness of GFRP tube wall, strength grade of concrete and hollow ratio on axial compression creep performance was calculated and analyzed. The results show that the creep of hollow columns increases rapidly in 28 days (the early stage of load action), and the growth rate becomes slower after 28 days. The creep tends to be stable after about 6 months. The hollow ratio and concrete strength have little effect on the axial compressive creep of GFRP concrete hollow columns, followed by the thickness of GFRP tube wall. The applied load has a greater effect on the creep.

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 辽宁省自然科学基金(201705403030); 辽宁省教育厅基础项目(LJ2019JL018)

作者简介: 张霓(1985-), 博士, 主要从事钢与混凝土组合结构研究, E-mail: 418688814@qq.com.

Received: 2020-05-26

Foundation items: Natural Science Foundation of Liaoning Province (No. 201705403030); Basic Project of Department of Education of Liaoning Province (No. LJ2019JL018)

Author brief: ZHANG Ni (1985-), PhD, main research interests: steel and concrete composite structure, E-mail: 418688814@qq.com.

Keywords: glass fiber reinforced polymer tube; reinforced concrete; hollow columns; axial compression; creep behavior

玻璃纤维管钢筋混凝土柱是将纵向受力钢筋放置于玻璃纤维管内,并在管内灌注混凝土形成的实心柱。玻璃纤维管优良的抗腐蚀性能可以保护内部纵向钢筋和混凝土,同时,混凝土强度因玻璃纤维管的约束作用得到提高。该结构的优异性能受到工程界的广泛关注,由于该结构更能适应当今工程结构承受恶劣环境的需要以及向重载、轻质、大跨及高强发展的要求,因而在地下工程、民用建筑、桥梁和海洋工程中得到越来越广泛地应用^[1-3]。随着研究和应用的不断发展,从玻璃纤维管钢筋混凝土实心截面逐渐发展到空心截面^[4-6]。空心柱中的混凝土在长期使用过程中受轴压作用产生徐变,玻璃纤维管、纵向受力钢筋和混凝土之间会发生内力重分布现象,与普通钢筋混凝土结构类似,混凝土徐变的不断变化将影响玻璃纤维管钢筋混凝土空心结构的应变状态,而与普通钢筋混凝土结构徐变相比,玻璃纤维管钢筋混凝土空心结构中混凝土的徐变性能因其处于三向受力状态变得更加复杂,因此,准确预测徐变的变化对玻璃纤维管钢筋混凝土空心组合结构有着重要意义。玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱的徐变问题随着其广泛应用而变得越来越突出。目前,研究人员对该新型结构的研究主要以玻璃纤维管钢筋混凝土空、实心柱轴心受压、偏心受压和受弯性能以及其实心柱徐变性能为主^[7-10],但对于该空心柱徐变性能的研究并不多见^[11]。笔者根据玻璃纤维管钢筋混凝土空心组合柱受力特点,对该空心柱受力性能进行分析,建立轴压徐变计算公式,并编制该空心柱轴压下徐变分析程序,计算空心率、作用荷载、混凝土强度及玻璃纤维管壁厚等主要参数对其轴压徐变性能的影响,以供工程实践参考。

1 初始状态受力分析

1.1 弹性阶段的约束力

截面应力由弹性力学的拉梅公式^[12]计算。

$$\sigma_{\rho} = -\frac{\frac{R^2}{\rho^2} - 1}{\frac{R^2}{r^2} - 1} p_1 - \frac{1 - \frac{r^2}{\rho^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} p_2$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\frac{R^2}{\rho^2} + 1}{\frac{R^2}{r^2} - 1} p_1 - \frac{1 + \frac{r^2}{\rho^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} p_2$$

式中: σ_{φ} 、 σ_{ρ} 分别为环、径向应力; p_1 、 p_2 分别为圆筒的内、外压力; r 、 R 分别为圆筒内、外径。

1.1.1 玻璃纤维管受力分析 因壁厚远小于半径 $t_f/R_f \ll 1$, (t_f 为壁厚), $R_f = r_f + t_f$, $p_2 = 0$, 则 $R_f^2/\rho^2 \approx 1$; $r_f^2/(R_f^2 - r_f^2) = r_f^2/(2r_f t_f + t_f^2) \approx r_f/2t_f$ 。所以,玻璃纤维管的环、径向方程为: $\sigma_{\varphi} = \frac{r}{t} p_1$; $\sigma_{\rho} = 0$ 。式中: p_1 为玻璃纤维管的约束应力。玻璃纤维管受力图见图 1。从图 1 中可知, p_1 是拉应力时, σ_{φ} 是压应力; p_1 是压应力时, σ_{φ} 是拉应力,所以得 $\sigma_{\varphi} = -\frac{r}{t} p_1$ 。

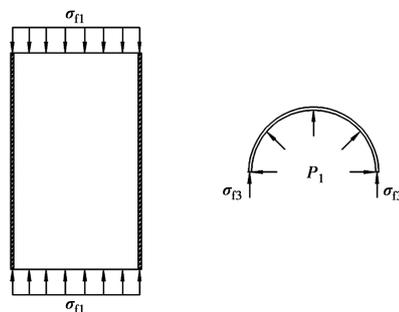


图 1 玻璃纤维管受力图

Fig. 1 The force diagram of GFRP tube

玻璃纤维管的环、径向应力表示为

$$\sigma_{t3} = -\frac{r}{t} p_1, \sigma_{r3} = 0$$

式中: σ_{t3} 、 σ_{n1} 分别为玻璃纤维管的环、纵向应力。

玻璃纤维管环、纵向应变表示为

$$\epsilon_{t3} = \frac{\sigma_{t3}}{E_{t3}} - \frac{\mu_{n1}}{E_{n1}} \sigma_{n1}, \epsilon_{n1} = \frac{\sigma_{n1}}{E_{n1}} - \frac{\mu_{t3}}{E_{t3}} \sigma_{t3} \quad (1)$$

式中: E_{t3} 、 E_{n1} 分别为玻璃纤维管的环、纵向弹性模量; μ_{t3} 、 μ_{n1} 分别为玻璃纤维管的环、纵向泊松比。

1.1.2 混凝土受力分析 图 2 为混凝土受力图。

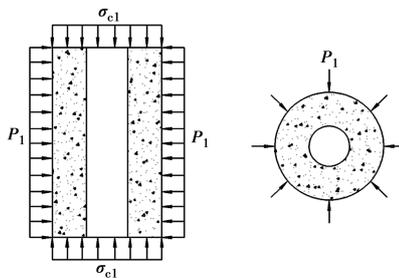


图 2 混凝土受力图

Fig. 2 The force diagram of concrete

混凝土应力状态为等侧应力状态,即

$$\sigma_{c2} = \sigma_{c3} = p_1$$

由胡克定律得混凝土应变

$$\epsilon_{c1} = \frac{\sigma_{c1}}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} p_1$$

$$\epsilon_{c2} = \frac{p_1}{E_c} - \frac{\mu_c}{E_c} (\sigma_{c1} + p_1) \quad (2)$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量; σ_{c1} 为混凝土纵向应力; μ_c 为混凝土泊松比。

μ_c 为随徐变变化而变化的一个变量, 因混凝土处于三向受力状态, 故该值由文献[13]公式计算。

$$\mu_c = F + (0.5 - F) \left(\frac{\sigma_c}{[\sigma_0]} \right)^G$$

$$[\sigma_0] = f_{ck} + 5.5 f_{ck} \left(\frac{p_0}{f_{ck}} \right) 0.91$$

$$p_0 = -\frac{\alpha_f}{2} \frac{2\mu + 1}{\sqrt{3(\mu^2 + \mu + 1)}} f_f$$

$$\mu = -\frac{\varphi + 2}{2(\varphi + 1)}$$

式中: $F = 0.16 + 0.53\alpha$; $G = 1.96 - 1.94\alpha$; $\alpha = A_f/A_c$, A_c , A_f 分别为混凝土、玻璃纤维管的截面面积; φ 为套箍系数, $\varphi = \alpha f_f/f_{ck}$; $[\sigma_0]$ 为混凝土极限应力。

1.1.3 约束力计算 由纵向变形协调条件可知, 混凝土和玻璃纤维管的纵向应变相等, 即 $\epsilon_{c1} = \epsilon_{f1}$ 。

$$\frac{\sigma_{c1}}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} p_1 = \frac{\sigma_{f1}}{E_{f1}} - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \sigma_{f3} \quad (3)$$

同理, 混凝土的径向应变和玻璃纤维管的环向应

$$N = \left[\left(\frac{1}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} n \right) A_s E_s + (A_c - A_{ch}) + \left(\frac{1}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} n - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} n \right) E_{f1} A_f \right] \sigma_{c1}$$

$$\sigma_{c1} = \frac{N}{\left(\frac{1}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} n \right) A_s E_s + (A_c - A_{ch}) + \left(\frac{1}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} n - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} n \right) E_{f1} A_f} \quad (6)$$

2 徐变计算公式

混凝土、纵向受力钢筋和玻璃纤维管在轴压下共同受力, 但因混凝土和玻璃纤维管不同的泊松比, 在空心柱受力过程中, 混凝土受到玻璃纤维管的套箍约束作用。空心柱发生徐变时, 截面上的应力因混凝土处于卸载状态发生重分布, 应力逐渐向玻璃纤维管和纵向受力钢筋转移, 导致玻璃纤维管和纵向受力钢筋应力增加。

依据混凝土多轴徐变理论^[14], 混凝土纵向有效泊松比 $\mu_{cp,1}$ 为

$$\mu_{cp,1} = 0.16 - \frac{0.034}{n} + \frac{0.007}{n^2}$$

纵向徐变度 c_1 为

变相等, 即 $\epsilon_{c2} = \epsilon_{f3}$ 。

$$\frac{p_1}{E_c} - \frac{\mu_c}{E_c} (\sigma_{c1} + p_1) = \frac{\sigma_{f3}}{E_{f3}} - \frac{\mu_{f1}}{E_{f1}} \sigma_{f1}$$

整理得

$$p_1 = \frac{\frac{\mu_{f1} - \mu_c}{(\mu_{f1} \mu_{f3} - 1) r_f E_c} + (2\mu_{f1} \mu_c + \mu_c - 1)}{E_{f3} t_f} \sigma_{c1} \quad (4)$$

$$\text{令 } n = \frac{\mu_{f1} - \mu_c}{\frac{(\mu_{f1} \mu_{f3} - 1) r_f E_c}{E_{f3} t_f} + (2\mu_{f1} \mu_c + \mu_c - 1)}$$

可得 $p_1 = n \sigma_{c1}$ 。

1.2 初始应力分析

玻璃纤维管对混凝土具有套箍约束作用, 故在进行初始应力分析时, 应考虑套箍约束作用的影响, 则

$$N = N_s + N_c + N_f$$

$$N = \sigma_{s1} A_s + \sigma_{c1} A_c + \sigma_{f1} A_f \quad (5)$$

纵向钢筋与混凝土的纵向应变相等, 即 $\epsilon_{s1} = \epsilon_{c1}$ 。

$$\frac{\sigma_{s1}}{E_s} = \frac{\sigma_{c1}}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} p_1$$

$$\sigma_{s1} = \left(\frac{\sigma_{c1}}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} p_1 \right) E_s = \left[\frac{1}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} n \right] E_s \sigma_{c1}$$

由式(3)和式(4)得

$$\sigma_{f1} = \left(\frac{1}{E_c} - \frac{2\mu_c}{E_c} n - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} n \right) E_{f1} \sigma_{c1}$$

整理得

$$c_1 = \frac{c}{\sigma_u} (\sigma_{c1} - 2\mu_{cp,1} p_1)$$

式中: c 为素混凝土徐变度; σ_u 为单轴应力下混凝土的纵向应力。

因空心柱发生徐变时内部混凝土处于不断卸载状态, 故空心柱的徐变度 c 由混凝土徐变继效流动理论^[14]计算得到。

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

混凝土纵向应力 σ_{c1} 与混凝土的纵向应力 σ_u 在单轴应力下相等, 得 $\sigma_{c1} = \sigma_u$ 。

纵向徐变度 c_1 化为

$$c_1 = (1 - 2\mu_{cp,1} \cdot n) \cdot c \quad (7)$$

在空心柱发生徐变时, 空心柱截面上的应力会

发生应力重分布,但这种应力重分布对外荷载无影响,故

$$N_c^c + N_f^c + N_s^c = 0$$

$$\sigma_{cl}^c (A_c - A_{ch}) + \sigma_{fl}^c A_f + \sigma_{sl}^c A_s = 0$$

式中: σ_{cl}^c 为混凝土纵向应力增量; σ_{sl}^c 为钢筋纵向应力增量; σ_{fl}^c 为玻璃纤维管纵向应力增量。

玻璃纤维管增加的弹性应变

$$\epsilon_{fl}^c = \frac{\sigma_{fl}^c}{E_{fl}} + \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} \Delta p_1$$

式中: Δp_1 为由徐变产生的约束力 p^1 的增量; ϵ_{fl}^c 为由徐变产生的玻璃纤维管的应变增量。

混凝土的徐变

$$\epsilon_{cl}^c = (\sigma_{c0} + \sigma_{cl}^c) \cdot c_1$$

徐变对横向变形的影响

$$\epsilon_{f3}^c = \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} \Delta p_1 - \frac{\mu_{fl}}{E_{fl}} \sigma_{fl}^c$$

$$\epsilon_{c2}^c = (p_1 + \Delta p_1) \cdot c_2$$

式中: c_2 为混凝土径向徐变度。

在计算混凝土的侧向徐变度时,由于空心柱中约束力的增量 Δp_1 较小,因此,可将其忽略。

$$c_2 = \frac{c}{\sigma_u} [p_1 - \mu_{cp,2} (p_1 + \sigma_{cl}^c)]$$

式中: $\mu_{cp,2}$ 为混凝土侧向徐变泊松比。

令 $\sigma_u = p_1$,有

$$c_2 = \left[1 - \mu_{cp,2} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right] \cdot c \quad (8)$$

$$\mu_{cp,2} = 0.16 - \frac{0.037}{1 + \frac{1}{n}} + \frac{0.007}{\left(1 + \frac{1}{n} \right)^2}$$

玻璃纤维管约束力的增量

$$\Delta p_1 = \frac{n \sigma_{c0} c_2 + \frac{\mu_{fl}}{E_{fl}} \sigma_{fl}^c}{\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} - c_2} \quad (9)$$

由纵向变形协调条件 $\epsilon_{cl}^c = \epsilon_{fl}^c$,有

$$(\sigma_{c0} + \sigma_{cl}^c) c_1 = \frac{\sigma_{fl}^c}{E_{fl}} + \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} \frac{n \cdot \sigma_{c0} c_2 + \frac{\mu_{fl}}{E_{fl}} \sigma_{fl}^c}{\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} - c_2}$$

简化得

$$\sigma_{fl}^c = \frac{(\sigma_{c0} + \sigma_{cl}^c) c_1 - \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} n \sigma_{c0} c_2}{\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} - c_2} \quad (10)$$

其中

$$m = \frac{1}{E_{fl}} + \frac{\frac{\mu_{fl}}{E_{fl}} \frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f}}{\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} - c_2}$$

由纵向钢筋和混凝土的纵向变形相等,得 $\epsilon_{sl}^c = \epsilon_{cl}^c$ 。

则

$$\sigma_{sl}^c = (\sigma_{c0} + \sigma_{cl}^c) c_1 E_s$$

混凝土在徐变中产生的应力增量

$$\sigma_{cl}^c = \frac{c_1 E_s A_s + \frac{A_f}{m} c_1 - \frac{\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} n c_2 A_f}{m \left(\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} - c_2 \right)}}{E_s A_s c_1 + \frac{A_f}{m} c_1 + (A_c - A_{ch})} \sigma_{c0} \quad (11)$$

玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱在轴压荷载下的徐变计算公式

$$\epsilon_{fc}^c = \left[1 - \frac{c_1 E_s A_s + \frac{A_f}{m} c_1 - \frac{\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} n c_2 A_f}{m \left(\frac{\mu_{f3}}{E_{f3}} \frac{r_f}{t_f} - c_2 \right)}}{E_s A_s c_1 + \frac{A_f}{m} c_1 + (A_c - A_{ch})} \right] c_1 \sigma_{c0} \quad (12)$$

3 设计参数的影响

根据以上公式,编制玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱在轴压下的徐变计算分析程序,计算空心率、作用荷载、混凝土强度和玻璃纤维管壁厚等参数对徐变的影响。

3.1 公式验证

为验证徐变分析程序的正确性,将计算得到的徐变应变-时间关系曲线分别与文献[15]的试验试件B3、文献[16]的试件L1-0.3和L2-0.3进行对比,见图3。从图3可以看出,空心柱的徐变在28d以内(作用初期)增长较快,28d以后增长速度变得相对缓慢,大约6个月后徐变应变趋于稳定。总体来说,计算结果偏于保守,且与试验结果吻合较好。文献[15]混凝土直径150mm,混凝土28d立方体抗压强度51.1MPa,纵向钢筋为4根直径8mm的螺纹钢,纵向钢筋屈服强度256MPa,FRP壁厚0.572mm,极限强度2060MPa,弹性模量118000MPa,文献[16]FRP抗拉强度1430.7MPa,弹性模量118000MPa,核心混凝土直径100mm,混凝土28d立方体抗压强度34.9MPa,弹性模量32800MPa,L1-0.3FRP壁厚0.111mm,作用荷

载 100 kN, L2-0.3FRP 壁厚 0.222 mm, 作用荷载 150 kN。本文建立的组合柱在轴压下的徐变公式考虑的参数包括: 玻璃纤维管管壁厚度、混凝土强度等级、混凝土直径、作用荷载等因素, 通过图 3 的对比可知, 试件在不同纤维壁厚、混凝土直径、混凝土强度及作用荷载条件下, 计算曲线与试验曲线吻合良好, 说明利用编制的徐变分析程序对玻璃纤维管钢筋混凝土空心组合柱进行轴压荷载下不同纤维壁厚、混凝土强度、混凝土直径及作用荷载下的徐变性能分析是可行的。

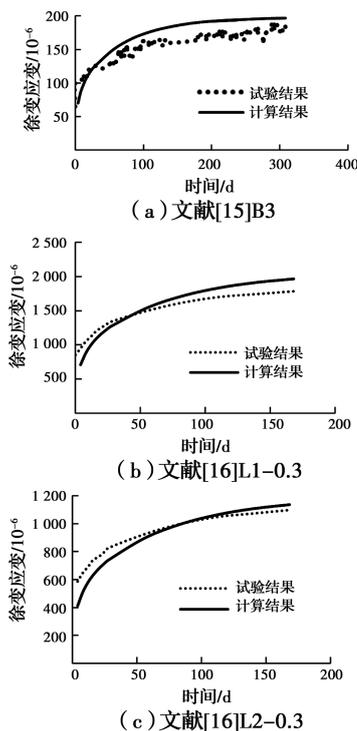


图 3 计算结果与试验结果对比图

Fig. 3 The comparison diagram between calculated and experimental results

3.2 设计参数的影响

计算采用的基本参数: 玻璃纤维管内径 200 mm, 管壁厚度 5 mm, 玻璃纤维管环向弹性模量 $E_{f3} = 61\ 099\ \text{MPa}$, 环向泊松比 $\mu_{f3} = 0.39$, 纵向弹性模量 $E_{f1} = 22\ 925\ \text{MPa}$, 纵向泊松比 $\mu_{f1} = 0.147$, 混凝土 C30, 空心部分混凝土半径 50 mm, 纵筋 $4\Phi 12$ 。在其他参数不变的情况下, 通过改变空心率、作用荷载、混凝土强度和玻璃纤维管壁厚等参数, 计算其对该空心柱轴压下徐变性能的影响。

3.2.1 徐变对混凝土应力的影响 从图 4 中可以看出混凝土应力随时间的变化规律, 混凝土的应力随时间逐渐减小, 混凝土处于持续卸载状态; 从图 5

中可以看出, 徐变应变与混凝土应力基本呈线性关系, 徐变应变随混凝土应力的减小而增大。

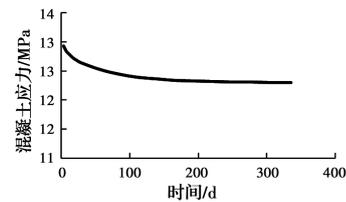


图 4 混凝土应力随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of concrete stress changing with time

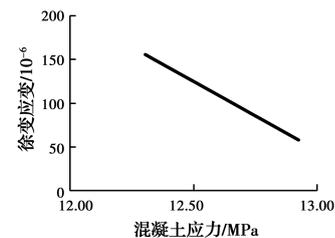


图 5 徐变与混凝土应力关系图

Fig. 5 Relationship between creep and concrete stress

3.2.2 空心率的影响 采用编制的空心柱轴压下徐变计算分析程序, 计算空心部分半径 r_h 分别为 75、50、25、0 mm (实心) 的徐变应变-时间关系曲线, 见图 6。从图中可以看出, 空心柱的徐变应变随空心率的增大而增加。原因是玻璃纤维管对混凝土的约束作用随着空心率的逐渐减小而相应增加, 造成空心柱徐变应变降低。空心部分半径 r_h 为 75、50、25 mm 的徐变应变比实心 0 mm 的徐变应变分别减小 1.9%、1.2% 和 0.6%。

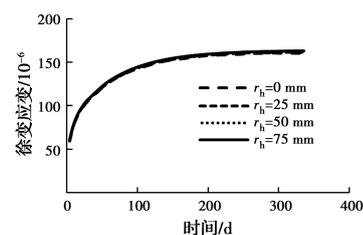


图 6 空心率的影响

Fig. 6 The influence of hollow ratio

3.2.3 混凝土强度等级的影响 采用编制的空心柱轴压下徐变计算分析程序, 计算混凝土强度分别为 C70、C60、C50、C40 和 C30 的徐变应变-时间关系曲线, 见图 7。从图中可以看出, 空心柱的徐变应变随混凝土强度等级的逐渐增加而相应降低。原因是混凝土的徐变随着混凝土强度等级的逐渐提高而相应降低, 造成空心柱的徐变应变降低。混凝土强度 C70、C60、C50 和 C40 的徐变应变比 C30 的徐变应

变分别减小 4.3%、3.7%、2.6%和 1.2%。

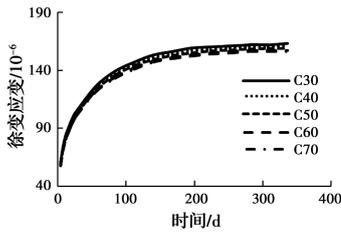


图 7 混凝土强度等级的影响

Fig. 7 The influence of strength grade of concrete

3.2.4 作用荷载的影响 采用编制的空心柱徐变计算分析程序,计算荷载分别为 700、600、500、400、300 kN 时的徐变应变-时间关系曲线,见图 8。从图中可以看出,空心柱的徐变应变随作用荷载的增大而增加,因为混凝土受到的应力随作用荷载的逐渐增大而相应增加,造成空心柱的徐变应变增加。作用荷载为 700、600、500、400 kN 的徐变应变比作用荷载 300 kN 的徐变应变分别增大 133.6%、99.8%、67.0%和 33.2%。

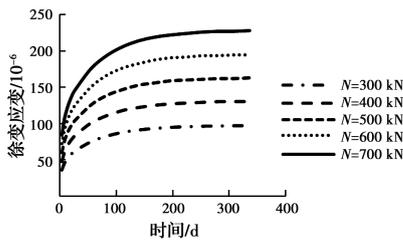


图 8 作用荷载的影响

Fig. 8 The influence of action load

3.2.5 玻璃纤维管壁厚度的影响 采用编制的空心柱徐变计算分析程序,计算壁厚 t_f 分别为 7、6、5、4、3 mm 的徐变应变-时间关系曲线,见图 9。从图中能够得知,空心柱的徐变应变随管壁厚度的增大而减小。因为玻璃纤维管的约束力随着壁厚 t_f 的逐渐增加而相应增大,混凝土的作用相对变小,造成空心柱的徐变应变逐渐减小。壁厚 t_f 为 7、6、5、4 mm 的徐变应变比壁厚 t_f 为 3 mm 的徐变应变分别减小 19.5%、8.9%、3.6%和 1.2%。

由上述分析可知,玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱轴压下的徐变应变随空心率的增加而增加,当空心部分半径 r_h 从 75~0 mm,徐变应变减小 1.9%;随混凝土强度的增大而减小,当混凝土强度从 C30 到 C70,徐变应变减小 4.3%;随作用荷载的增大而增加,当作用荷载从 300~700 kN,徐变应变增大 133.6%;随玻璃纤维管壁厚 t_f 的增大而减小,当壁

厚 t_f 从 3~7 mm,徐变应变减小 19.5%。空心率和混凝土强度对空心柱轴压徐变影响较小,其次是玻璃纤维管壁厚,作用荷载对其徐变影响较大。

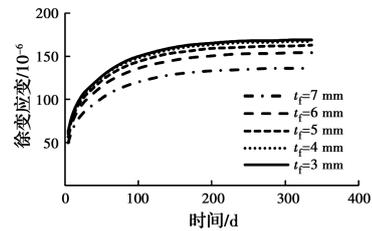


图 9 玻璃纤维管壁厚的影响

Fig. 9 The influence of tube wall thickness

4 结论

1)根据轴压下玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱的受力特点,依据混凝土的多轴应力和继效流动理论建立了考虑玻璃纤维管约束力时空心柱轴压徐变计算公式,该公式可以用来预测玻璃纤维管钢筋混凝土空心柱及玻璃纤维管混凝土柱轴压荷载作用下的徐变曲线。

2)根据建立的公式编制轴压徐变分析程序,计算分析徐变应变-时间关系曲线,得到空心柱的徐变应变在 28 d 以内增长较快,28 d 以后增长速度相对缓慢,徐变应变大约 6 个月以后趋于稳定。并通过已有试验对徐变程序进行验证。

3)在此基础上,计算分析主要设计参数对空心柱轴压徐变的影响。空心率和混凝土强度对空心柱轴压徐变影响较小,其次是玻璃纤维管壁厚,作用荷载对其徐变影响较大。

参考文献:

[1] YANG D Y, FRANGOPOL D M, TENG J G. Probabilistic life-cycle optimization of durability-enhancing maintenance actions: Application to FRP strengthening planning [J]. Engineering Structures, 2019, 188: 340-349.

[2] AUMAN H, STRATFORD C, PALERMO A. An overview of research and applications of FRP in New Zealand reinforced concrete structures [J]. Structural Engineering International, 2020, 30(2): 201-208.

[3] 吴智深,刘加平,邹德辉,等. 海洋桥梁工程轻质、高强、耐久性结构材料现状及发展趋势研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 31-40.

WU Z S, LIU J P, ZOU D H, et al. Status quo and development trend of light-weight, high-strength, and

- durable structural materials applied in marine bridge engineering [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(3): 31-40. (in Chinese)
- [4] LIM J C, OZBAKKALOGLU T. Unified stress-strain model for FRP and actively confined normal-strength and high-strength concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(4): 04014072.
- [5] HAIN A, ZAGHI A E, SAIIDI M S. Flexural behavior of hybrid concrete-filled fiber reinforced polymer tube columns [J]. *Composite Structures*, 2019, 230: 111540.
- [6] 张霓, 郑晨阳, 姜丽娜, 等. 玻璃纤维管增强树脂复合材料管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(12): 3052-3063.
ZHANG N, ZHENG C Y, XIAN L N, et al. Flexural behavior of glass fiber reinforced polymer tube filled with steel bars/concrete hollow members [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(12): 3052-3063. (in Chinese)
- [7] 周浪. 间隔包裹 FRP 约束长龄期混凝土圆柱的徐变变形分析[J]. *建筑科学*, 2011, 27(Sup1): 1-3.
ZHOU L. Creep analysis of fiber straps-wrapped long-term concrete columns [J]. *Building Science*, 2011, 27(Sup1): 1-3. (in Chinese)
- [8] YAN L B, CHOUW N. Natural FRP tube confined fibre reinforced concrete under pure axial compression; a comparison with glass/carbon FRP [J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 82: 159-169.
- [9] 潘毅, 吴晓飞, 曹双寅, 等. 长期轴压下有初应力的 CFRP 约束混凝土柱应力-应变关系分析[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(9): 9-19.
PAN Y, WU X F, CAO S Y, et al. Analysis on the stress-strain relationship of CFRP confined concrete with initial stress under long-term sustained load [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(9): 9-19. (in Chinese)
- [10] BAZLI M, ZHAO X L, BAI Y, et al. Durability of pultruded GFRP tubes subjected to seawater sea sand concrete and seawater environments [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 245: 118399.
- [11] 张霓. GFRP 管空心钢筋混凝土构件试验研究与理论分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
ZHANG Ni. Experimental research and theoretical analysis on GFRP tube filled with reinforced hollow concrete members [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016. (in Chinese).
- [12] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.
XU Z L. Concise course in elasticity [M]. Beijing: Higher Education Press, 1984. (in Chinese)
- [13] 王元丰. 钢管混凝土徐变[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
WANG Y F. Creep of concrete filled steel tube [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [14] NEVILLE A M, DILGER W H, BROOKS J J. Creep of plain and structural concrete [M]. London and New York: Construction Press, 1983.
- [15] 张电杰. 考虑徐变效应的 FRP 约束混凝土塑性模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
ZHANG D J. A plasticity model for confined concrete including creep effects [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [16] 于清, 韩林海, 张铮. 长期荷载作用对 FRP 约束混凝土轴心受压构件力学性能的影响[J]. *中国公路学报*, 2003, 16(3): 58-63.
YU Q, HAN L H, ZHANG Z. Long-term effect in FRP-confined concrete stub columns under sustained loading [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, 16(3): 58-63. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)