

钢管混凝土大偏心受压构件的徐变分析

郭薇薇, 王元丰, 韩 冰

(北方交通大学土木建筑学院, 北京 100044)

摘 要:在对钢管混凝土大偏心受压构件的力学特性和核心混凝土徐变进行分析的基础上, 使用多轴应力状态下混凝土徐变及适用于不断卸载状态混凝土徐变的继续流动理论, 研究钢管混凝土大偏心受压构件的徐变。通过确定初始条件和构件混凝土的徐变模型, 建立计算构件徐变的方法并使用它对含钢率、偏心率及紧箍应力等构件徐变的影响因素进行分析。并引入迭代的方法对混凝土徐变的时效性质进行模拟。应用该方法得到的结果是合理的。

关键词: 钢管混凝土; 大偏心受压构件; 徐变; 继续流动理论

中图分类号: TU37, TU398 **文献标识码:** A

1 前言

钢管混凝土在实际工程中主要用于受压结构。而在实际工程中, 理想的轴心受压的状态几乎是不可能出现的。由于制造的偏差、轴心线的偏离等因素, 使得绝大多数的受压构件处于偏心受压状态。因此, 对偏心受压构件的研究不仅具有理论上的价值, 而且还具有非常深远的实际工程意义。目前, 国内外理论及工程界, 对钢管混凝土偏心受压构件的性能已有较深入的研究, 但对于实际工程影响很大的徐变问题尚未见到公开发表的文献。文献[1]对钢管混凝土偏心受压构件的徐变进行了研究, 主要对徐变影响钢管混凝土偏心受压构件的承载力进行了试验研究。本文将在文献[2]的工作基础上, 进一步研究钢管混凝土大偏心受压构件的徐变问题。

2 钢管混凝土偏心受压构件的受力分析

上述截面应符合下列平衡条件^[3]:

$$\sum N = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2)$$

由式(1)、(2)有

$$N = \frac{A_c s_c \cos b_1}{1 + \cos b_1} + \frac{A_s s_s \cos b_1}{1 + \cos b_1} \quad (3)$$

$$M = \frac{A_c s_c r}{2(1 + \cos b_1)} + \frac{A_s s_s r}{2(1 + \cos b_1)} \quad (4)$$

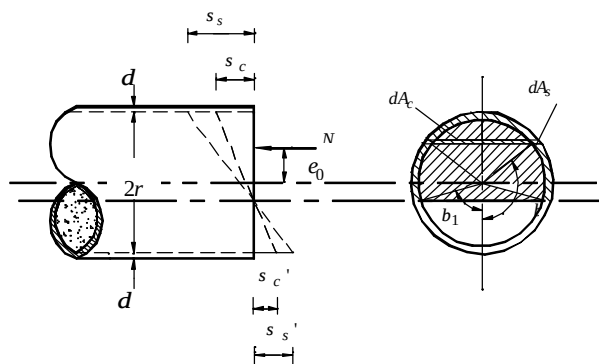


图 1 钢管混凝土大偏心受压构件应力示意图

Fig.1 Stress sketch of eccentrically compressed CFST member

式中, N — 作用在钢管混凝土上的竖向荷载;

M — 由于 N 的偏心在构件截面上产生的弯矩;

A_s 、 s_s — 构件截面钢管面积及受压区最大应力;

A_c 、 s_c — 构件截面混凝土面积及受压区最

收稿日期: 2001-06-16; 修改日期: 2002-10-10

基金项目: 铁道部科技发展基金资助项目(J99Z071), 北方交通大学校基金(2002SM011)

作者简介: 郭薇薇(1976), 女, 江西乐平人, 博士生, 从事结构工程, 桥梁结构研究

王元丰(1965), 男, 黑龙江呼兰人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究生院副院长, 从事力学, 结构工程研究

韩 冰(1973), 男, 黑龙江双城人, 博士生, 从事结构工程, 桥梁结构及工程管理研究

大应力；

r —核心混凝土半径；

b_1 —构件受压区圆心角的一半(图 1)，

$$\cos b_1 = \frac{r}{2(e_0 + f_0)}。$$

钢管混凝土大偏心受压构件的初始应力计算

当构件为大偏心受压时，可推得构件中钢管和核心混凝土的内力关系

$$N_c = \frac{N(1 + m_s)}{a(n - nqm_c - nq + m_c) + 1 + m_s} \quad (5)$$

进而可得混凝土的最大初始应力为

$$s_{c0} = \frac{N_c}{A_c} \frac{1 + \cos b_1}{\cos b_1} \quad (6)$$

由此推出大偏心受压钢管混凝土构件钢管的初始应力

$$s_{s0} = \frac{s_{c1}(N - N_c)}{aN_c} \quad (7)$$

3 钢管混凝土大偏心受压构件的徐变

图 2 所示为偏心受压构件徐变应变分布图。图中， e_{sc} 为核心混凝土最大受压纤维处的总应变； e_{sc}^c 为核心混凝土最大受压纤维处的徐变； e_c^c 为核心混凝土最大受压纤维处素混凝土徐变； e_{sc} 在小偏心受压时为截面的最小应变，大偏心受压时为最大受拉纤维处的应变； e_{sc}^c 在小偏心受压时为截面最小徐变，在大偏心受压时为最大受拉纤维处的徐变； e_c^c 在小偏心受压时为截面最小应变处素混凝土徐变； r 为核心混凝土半径； d 为钢管厚度。下文中提及的应力、应变均为构件的最大受压纤维处的应力和应变。

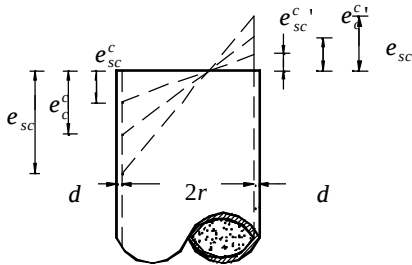


图 2 钢管混凝土大偏心受压构件徐变应变示意图

Fig.2 Creep sketch of eccentrically compressed CFST member

在徐变过程中产生应力重分布时，设核心混凝土上内力变化为 N_c^c ，应力变化为 s_c^c ；钢管上内力变化为 N_s^c ，应力变化为 s_s^c ，在大偏心受压状态下，

核心混凝土最大受压纤维处混凝土与钢管上的内力与应力的增量关系为

$$s_s^c = \frac{1 + \cos b_1}{A_s \cos b_1} N_s^c, \quad s_c^c = \frac{1 + \cos b_1}{A_c \cos b_1} N_c^c$$

式中， s_s^c 与 s_c^c 的关系为

$$s_s^c = -\frac{1}{a} s_c^c \quad (8)$$

a —构件含钢率

3.1 不考虑紧箍应力的钢管混凝土大偏心受压构件的徐变

在钢管混凝土大偏心受压构件中，核心混凝土与构件徐变的关系为

$$s_c^c = -aE_s e_{sc}^c \quad (9)$$

不考虑紧箍应力的钢管混凝土大偏心受压构件的徐变计算公式为

$$e_{sc}^c = \frac{s_{c0}^c}{1 + aE_s c} \quad (10)$$

式中， s_{c0} 为初始应力，

$$s_{c0} = \frac{N}{A_c(1 + an)} \frac{1 + \cos b_1}{\cos b_1}$$

n —钢材与混凝土的模量比， $n = \frac{E_s}{E_c}$ ， E_s 为钢材的模量， E_c 为混凝土的模量。

c —核心混凝土的徐变度。核心混凝土上徐变度按混凝土的继效流动理论计算，继效流动理论适用于不断卸载的混凝土的徐变，比较符合钢管混凝土中核心混凝土的情况，应用这个理论计算的混凝土的徐变能够较好地与试验值符合，徐变度取值可根据素混凝土的徐变试验，本文中的取值见文献[4,5]；

3.2 考虑紧箍应力的钢管混凝土大偏压构件的徐变

当考虑紧箍应力影响时，核心混凝土处于三向应力状态下，大偏心受压构件的徐变为

$$e_{sc}^c = s_{c1} c_1 \quad (11)$$

式中

$$s_{c1} = s_{c0} + s_{c1}^c$$

$$s_{c1}^c = -\frac{E_s c_1 + \frac{qc_2 E_s}{E_s c_2 - \frac{2m_s}{a}}}{\frac{1}{a} + E_s c_1 - \frac{2m_s}{a} \frac{\frac{m_s}{a} - qc_2 E_s}{E_s c_2 - \frac{2m_s}{a}}} s_{c0}$$

c_1 —核心混凝土的轴向徐变度。应用文献[6]

中的三维应力状态下混凝土的徐变理论有，

$$c_1 = c(1 - m_{cp,1}(q_1 + q))$$

$$m_{cp,1} = 0.16 - \frac{0.074}{q_1 + q} + \frac{0.028}{(q_1 + q)^2}$$

c_2 —核心混凝土的径向徐变度,

$$c_2 = c(1 - m_{cp,2}(\frac{q_1}{q} + \frac{1}{q}))$$

$$m_{cp,2} = 0.16 - \frac{0.074}{\frac{q_1}{q} + \frac{1}{q}} + \frac{0.028}{(\frac{q_1}{q} + \frac{1}{q})^2}$$

m_c —混凝土的泊松比,其取值见文献[1,7];

m_s —钢管的泊松比。

其中, q 、 q_1 分别为构件轴向、横向的紧箍系数,按下式计算,

$q =$

$$q_1 = \frac{n - \frac{n(1+m_c)}{1+m_s} - nm_c^2 + m_s m_c \frac{n(1+m_c)}{1+m_s}}{-\frac{2}{a} m_c + m_c m_s \frac{n(1+m_c)}{1+m_s} + nm_c + \frac{2}{a} m_s - \frac{n(1+m_c)}{1+m_s} + nm_c^2} \cdot \frac{(n - \frac{n(1+m_c)}{1+m_s}) - (nm_c + \frac{2}{a} m_s - \frac{n(1+m_c)}{1+m_s})q}{nm_c}$$

根据以上分析,可得到钢管混凝土大偏心受压构件徐变计算公式如下:

$$\begin{cases} e_{sc}^c = \frac{s_{c0}C}{1 + aE_s C} & (\text{不考虑紧箍应力时}) \\ e_c^c = s_{c1}C_1 & (\text{考虑紧箍应力时}) \end{cases} \quad (12)$$

至此,我们已经得到钢管混凝土大偏心受压构件的徐变计算公式,根据以上公式进而可得到钢管混凝土构件因徐变引起的截面应力重分布的变化规律。由上述徐变计算公式可知,需采用迭代的方法计算考虑紧箍应力的大偏心受压构件徐变。计算采用的迭代步骤为:1) 计算构件初始偏心距和 b_0 ; 2) 计算混凝土上的应力 s_{cli} ; 3) 计算混凝土的泊松比 m_c ; 4) 计算 p 、 q 、 q_1 ; 5) 计算 $m_{cp,1}$ 、 $m_{cp,2}$; 6) 计算 c_1 、 c_2 ; 7) 计算 s_{c1}^c ; 8) $s_{cli+1} = s_0 + s_{c1}^c$; 9) 若 $|s_{cli+1} - s_{cli}| < e$ (e 为迭代误差),迭代结束;否则, $s_{cli} = s_{cli+1}$,重复步骤 3)至 9),可最终算得钢管混凝土轴心受压的徐变应变 e_{sc}^c 。

4 算例

下面将对具体构件应用上面的计算公式进行分析。用来进行分析的构件,构件长度为 450mm,钢管的内半径为 50mm,钢材的弹性模量为 $E_s = 206 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

图 3 所示为忽略紧箍作用与不忽略紧箍作用的钢管混凝土大偏心受压构件的徐变比较曲线。核心混凝土标号为 C40,钢管钢材为 Q235,构件上作用荷载为 200kN。图 2 中,曲线 1、3、5 为不考虑紧箍应力的徐变曲线,曲线 2、4、6 为考虑紧箍应力的徐变曲线,曲线 1、2、3、4 的构件含钢率为 0.1,其中,曲线 1、2 的偏心率为 0.6,曲线 3、4 的偏心率为 0.7;曲线 5、6 的偏心率为 0.7,含钢率为 0.05。从图中可以看出,忽略紧箍作用的徐变与不忽略紧箍作用的徐变还是有一定的差别的。在以后的计算中,采用两种公式结合的方式,即当紧箍应力小于轴向应力的较大比例(本文认为 $p < 0.05s_{c1}$)时,紧箍作用可忽略不计,反之采用考虑紧箍作用的公式。

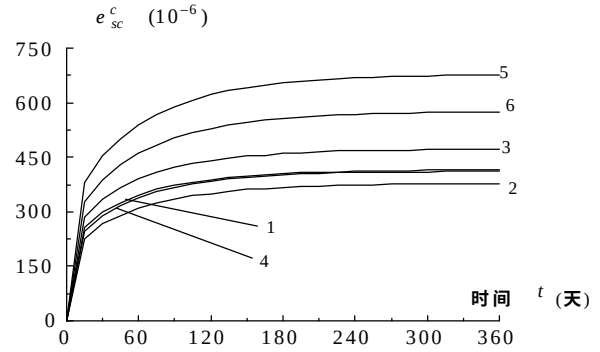


图 3 忽略与不忽略紧箍应力的徐变比较图

Fig.3 Creep comparison with and without confined stress

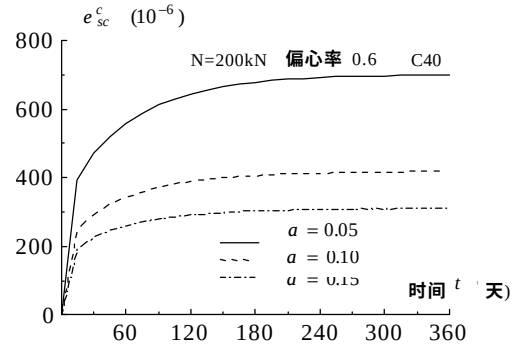


图 4 含钢率对徐变的影响曲线

Fig.4 Influence of steel ratio on creep

图 4 为不同含钢率钢管混凝土大偏心受压构件的徐变—时间曲线。图 4 中所计算构件核心混凝土标号为 C40,作用荷载为 200kN。当构件的含钢率不同时,从图中可以看出,含钢率越高的构件,其徐变值越小,由文献[1,7]的研究可知,含钢率越高的构件,钢管在整个构件中所起的作用就越大,当核心混凝土产生徐变时,钢管对核心混凝土徐变变形的约束也就越大,所以徐变应变就小。该结论与文献[1,7]相同。

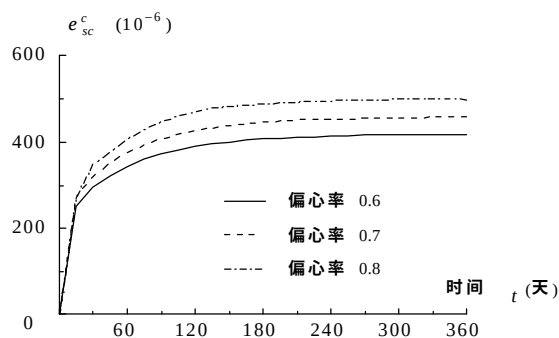


图 5 偏心率对徐变的影响曲线

Fig.5 Influence of eccentric ratio on creep

图 5 中所示为不同偏心率对构件徐变影响的关系曲线。从图中可以看出,当构件的偏心率越大时,构件的徐变也越大。

图 6 所示为不同荷载作用时,构件徐变的发展趋势。当作用荷载越大时,构件的徐变就越大。

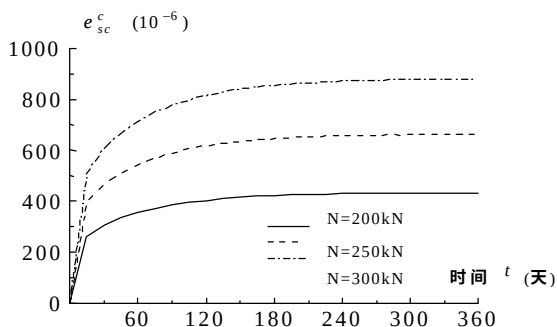


图 6 作用荷载对徐变的影响曲线

Fig.6 Influence of loadings on creep

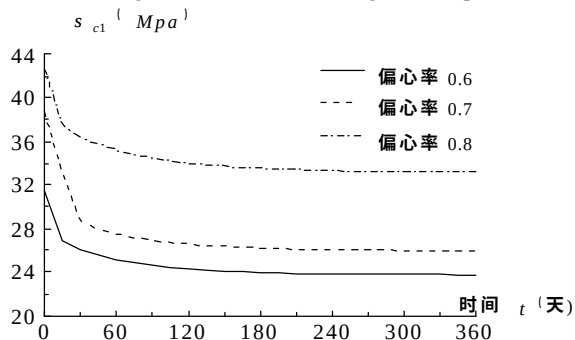


图 7 核心混凝土的轴向应力随时间变化曲线(不同偏心率)

Fig.7 Time-dependent history curves of core concrete stress in axial direction (different eccentric ratio)

图 7、8 所示为钢管混凝土大偏心受压构件核心混凝土上作用的轴向应力随时间变化的曲线。从图中可以看出,核心混凝土上轴向应力在徐变的过程中,一直呈下降的趋势。在图 7 中,所示为不同偏心率的轴向应力变化曲线。三条曲线中,偏心率为 0.7 的构件应力下降最多,较初始应力下降了

32%。

图 8 为不同含钢率的轴向应力变化曲线。三条曲线中,含钢率为 0.15 的构件应力下降最多,约为 33%。

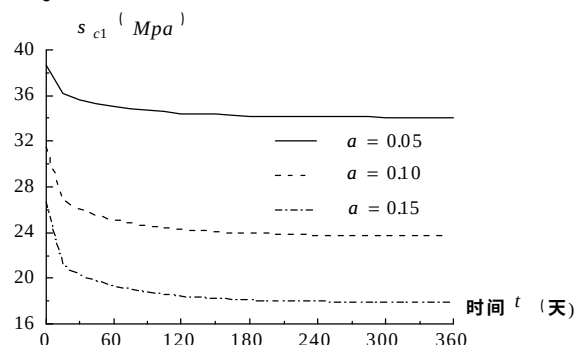


图 8 核心混凝土的轴向应力随时间变化曲线

Fig.8 Time-dependent history curves of core concrete stress in axial direction (different steel ratio)

5 结论

通过以上的计算分析,对钢管混凝土大偏心受压构件的徐变可得出如下结论:

- 1) 钢管混凝土大偏心受压构件的徐变在一年左右几乎停止;
- 2) 徐变使钢管混凝土大偏心构件的截面产生应力重分布,核心混凝土的轴向应力降低,同时钢管的轴向应力增加;
- 3) 通过对考虑和不考虑钢管对核心混凝土的紧箍作用两种情况的对比,认为当核心混凝土上紧箍应力小于轴向应力的 5% 时,可以忽略紧箍应力的作用;
- 4) 当构件的其它条件相同时,钢管混凝土大偏心受压构件的徐变随含钢率的增加而降低。含钢率由 0.05 增加到 0.15 时,构件的徐变减小 80% 左右;
- 5) 对大偏心受压构件来说,偏心率由 0.6 增加到 0.8,构件的徐变量增加 30% 左右;
- 6) 徐变将减小大偏心受压构件的受压区高度,但影响不大,可忽略徐变的影响。

参考文献:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 黑龙江科学技术出版社, 1994.
Zhong Shantong. Concrete filled steel tubular structures [M]. Heilongjing Science and Technic Press, 1994.
- [2] 韩冰, 王元丰. 钢管混凝土小偏心受压构件的徐变分析[J]. 工程力学, 2001, 18(6): 110-116.

- Han Bing, Wang Yuanfeng. Creep analysis of concrete filled steel tubular eccentrically compressed members[J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(6): 110-116.
- [3] 斯托罗任克. 钢管混凝土结构[M]. 冶金工业出版社, 1982.
- Storozenko. Concrete filled steel tubular structures[M]. Metallurgic Industry Publishing House, 1982.
- [4] Wang Yuanfeng, Han Bing. Creep analysis of axially compressed concrete filled steel tubular members[C]. International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC VII), Macao, 1999.
- [5] 韩冰, 王元丰. 钢管混凝土轴心受压短柱的徐变分析[J]. 铁道学报, 1999, 12(6): 87-90.
- Han Bing, Wang Yuanfeng. Creep analysis of concrete filled steel tubular short compressed columns[J] Railway Journal, 1999, 12(6): 87-90.
- [6] A M Neville, W H Dilger and J J Brooks. Creep of Plain and Structural Concrete[M]. Construction Press, London and New York, 1983.
- [7] 谭素杰, 齐加连. 长期荷载对钢管混凝土受压构件强度影响的试验研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1987, 2: 10-24
- Tan Sujie, Qi Jialian. Experimental study on creep influence on strength of concrete filled steel tubular compressed members under long-term loadings[J]. Journal of Harbin Architectural and Civil Engineering Institute, 1987, 2: 10-24.
- [8] 中国工程建设标准化协会标准. 钢管混凝土结构设计规程(CECS 28:90)[S]. 1990.
- Standard of Chinese Engineering Construction Standardization Association. Design and construction code of concrete filled steel tubular structures (CECS 28: 90)[S]. 1990.

CREEP ANALYSIS OF ECCENTRICALLY COMPRESSED CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR MEMBERS

GUO Wei-wei , WANG Yuan-feng , HAN Bing

(School of Civil Engineering and Architecture, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: This paper focuses on the creep analysis of eccentrically-compressed concrete filled steel tubular members. The creep theory of concrete under multi-axial stresses and the elastic continuation and plastic flow theory of concrete creep are adopted in the analysis. By determination of the initial conditions and construction of a creep model for the members, a method is developed. The influence of steel ratio, eccentric ratio and confined stress on the creep of eccentrically compressed concrete filled steel tubes is studied. Iterative process is introduced into the model to simulate the time-dependent property of concrete creep.

Key words: concrete filled steel tube; eccentrically compressed members; creep; elastic continuation and plastic flow theory