

文章编号:1671-6833(2013)05-0026-05

预应力度对梁徐变系数与徐变挠度系数数值关系的影响

王 俊^{1,2}, 赵静超³, 刘立新²

(1. 许昌学院 土木工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 河南省建筑设计研究院, 河南 郑州 450014)

摘 要: 预应力混凝土梁的徐变挠度是其长期挠度主要组成部分, 搞清梁的徐变系数与徐变挠度系数间数值关系对准确预估其长期挠度十分关键. 对长期加载的预应力梁徐变变形运用 ANSYS 软件进行模拟分析, 讨论了预应力度值对预应力梁徐变系数与徐变挠度系数数值关系的影响. 结果表明, 对全预应力梁, 徐变挠度系数大于徐变系数; 对部分预应力梁, 徐变挠度系数小于徐变系数. 与文献[1]中对预应力梁徐变应变几何模型的解析法分析结果一致. 研究结论可为工程中建立精确的预应力混凝土梁长期挠度计算模式奠定基础.

关键词: 预应力混凝土梁; 预应力度; 徐变系数; 徐变挠度系数; 数值关系; 有限元法

中图分类号: TU378.1

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.05.006

0 引言

高速公路或铁路桥面的平顺程度对高速行驶车辆的安全性影响很大, 准确预测并合理控制桥梁的长期挠度尤为重要^[1-2]. 桥梁结构的长期挠度主要由混凝土徐变和收缩共同引起, 而徐变挠度是其长期挠度的主要组成部分, 因此, 精确的徐变挠度计算是准确预测长期挠度的基础, 搞清预应力混凝土梁的挠曲徐变系数与徐变挠度系数间的数值关系是准确计算徐变挠度的关键. 当前, 对混凝土梁长期挠度的预测方法多不统一, 部分研究成果将梁的徐变系数与徐变挠度系数等同为一个参数^[3], 或是对徐变系数乘以一个不等于 1 的修正系数作为长期挠度系数值, 且修正系数所考虑因素的多寡也不尽相同^[4-5]. 近期研究表明, 预应力混凝土梁长期挠度系数、徐变挠度系数及徐变系数并不等同, 而是受预应力度值等诸多因素的影响^[1,6]. 笔者用 ANSYS 软件对长期加载的预应力混凝土梁徐变变形模拟分析, 分别讨论了预应力混凝土梁在相同挠曲徐变系数模式但预应力度不同、混凝土挠曲徐变系数模式和预应力度均不相同的情况下, 徐变系数与徐变挠度系数间的数值关系. 研究结论可为进一步在工程中建立精确的预应力混凝土梁长期挠度

计算模式奠定基础.

1 预应力混凝土梁徐变变形分析的有限单元法

1.1 基本概念

预应力度(简称为 PPR)指预应力混凝土梁消压弯矩与使用荷载下控制截面弯矩的比值^[7].

预应力混凝土梁徐变系数, 是指梁控制截面边缘在持续荷载作用下的挠曲应变徐变值与加载瞬时弹性挠曲应变的比值, 亦称挠曲徐变系数^[8].

预应力混凝土梁徐变挠度系数是指梁在长期荷载持续作用下, 计算截面的徐变挠度增量值与加载时刻瞬时弹性挠度的比值. 长期挠度系数是指长期挠度增量与加载时瞬时弹性挠度的比值.

1.2 ANSYS 软件实现对混凝土构件徐变变形的模拟分析

混凝土徐变性能类似于金属材料蠕变的初始阶段, 故可借用 ANSYS 软件分析金属蠕变的方法来模拟分析混凝土徐变^[9]. 结合预应力混凝土梁的工况特点, 混凝土徐变变形分析采用初始显示蠕变方程, 运用欧拉超前法, 将加载时间分为若干个加载步, 每个加载步内的徐变增量 $\Delta\epsilon_{cr}$ 为^[10]

收稿日期:2013-02-01; 修订日期:2013-05-09

基金项目:河南省科学技术研究重点项目(12A560009); 许昌市科技攻关重点项目(2127)

作者简介:王俊(1975-), 男, 河南光山人, 许昌学院副教授, 博士, 郑州大学水利工程博士后流动站博士后, 主要从事混凝土结构基本理论研究, E-mail:wangjun7512@sina.com.

$$\Delta \varepsilon_{cr} = \dot{\varepsilon}_{cr} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

加载步内徐变率为

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} \varepsilon_1^{C_3} e^{-C_4/T}. \quad (2)$$

故可得

$$\Delta \varepsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} \varepsilon_1^{C_3} e^{-C_4/T} \Delta t, \quad (3)$$

式中: ε_{cr} 为加载步开始时的总应变; σ 为加载步开始时的等效应力; ε_1 为初始弹性应变; ε_2 是 t 时刻混凝土的总应变; T 为绝对温度; t 为本加载步结束时的混凝土龄期; e 是自然对数的底数。

$C_1 \sim C_4$ 为运用 ANSYS 库中 APDL 语言编制命令流时用户定义的与材料性能相关的常数: C_1 与徐变增量时程规律相关, 假定每个加载步内徐变率为常数, 故 C_1 可取定值; C_2 、 C_3 、 C_4 分别与应力、应变、温度相关. 为了进一步简化式(3), 可假定: 假定混凝土弹性模量为常数, 故可取 $C_3 = 1$; 假定混凝土线性徐变理论成立, 故可取 $C_2 = 0$.

因此, 式(3)中徐变增量可简化为

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{cr} &= C_1 \varepsilon_2 \Delta t = C_1 (\varepsilon_{cr} + \varepsilon_1) \Delta t \\ &= C_1 [\varepsilon_1 + \varphi(t, \tau) \varepsilon_1] \Delta t, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ε_{cr} 为徐变应变; t 、 τ 分别是每个加载步内混凝土龄期和加载龄期; $\varphi_c(t, \tau)$ 是徐变系数。

故在恒载作用 t 时刻混凝土的总应变为

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_{cr} = \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \varphi_c(t, \tau), \quad (5)$$

$$\text{故徐变增量 } \Delta \varepsilon_{cr} = \varepsilon_1 \Delta \varphi_c(t, \tau). \quad (6)$$

结合式(4)和式(6), 可得

$$C_1 = \frac{\Delta \varphi_c(t, \tau)}{\Delta t (1 + \varphi_c(t, \tau))}, \quad (7)$$

式中: Δt 为步长, 即相邻加载步的时间间隔; $\Delta \varphi_c(t, \tau)$ 是徐变系数在加载步内的改变量。

2 预应力梁徐变系数与徐变挠度系数数值关系

2.1 预应力混凝土梁徐变变形效应分析的有限元模型

分析对象采用文献[8]中的三片折线先张预应力混凝土梁 XPB1、XPB2、XPB3, 三片梁挠曲徐变系数模式分别根据试验结果确定为 $1.52 \times \frac{(t-t_0)^{0.6}}{8+(t-t_0)^{0.6}}$ 、 $2.35 \times \frac{(t-t_0)^{0.6}}{8+(t-t_0)^{0.6}}$ 、 $1.75 \times \frac{(t-t_0)^{0.6}}{8+(t-t_0)^{0.6}}$, 实际预应力度值分别为 1.12、0.91、1.03. 三片试验梁的几何尺寸均为 $200 \times 400 \times 7\,500$, 预应力钢束为 $\phi'15.2(1 \times 7)$ 钢绞线, $f_{pk} = 1\,860 \text{ MPa}$, $\sigma_{con} = 0.75 f_{pk}$, 非预应力筋采用 HRB500 MPa 钢筋, C50 混凝土, 试验梁预应力钢束线形及截面配筋如图 1 所示。

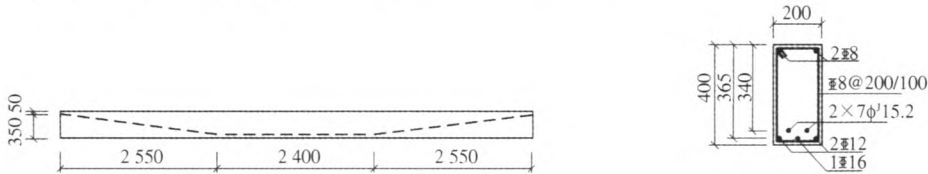


图 1 折线先张梁钢绞线线形及截面图

Fig. 1 Strand shape and section view of studied beams

每个加载步内使用时间作为跟踪参数, 在每个加载步终点给时间赋值, 对步长进行识别, 用 Link8 单元对钢绞线进行模拟^[9-10], 采用降温法模拟预应力, 用带筋 Solid65 单元建立弥散钢筋模型. 二次加载采用在梁 1/3 跨度处施加等效面荷载, 自重按体力考虑. 建模时对称取 1/

4 梁体研究, 几何模型如图 2(a) 所示. 混凝土 $\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\nu = 0.2$; 钢绞线弹性模量 $E_p = 1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比 $\nu = 0.3$, 线膨胀系数 $\delta = 1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$. 对几何模型赋予相应的材料属性后进行有限元网格划分, 模型如图 2(b) 所示。

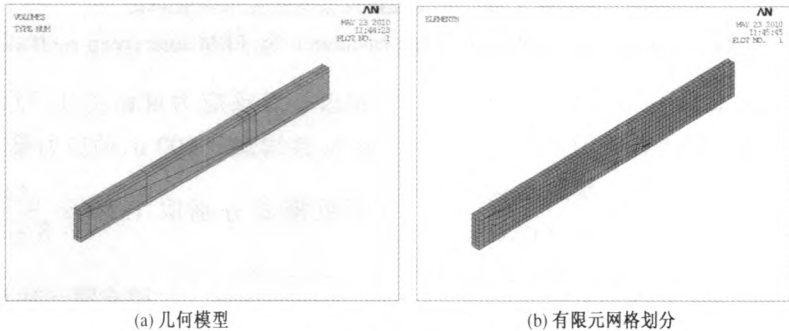


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

2.2 预应力梁徐变挠度

运用 ANSYS 软件计算分析 XPB1、XPB2、XPB3 的徐变挠度,持续加载 600 d 时的徐变挠度计算值与实测的长期挠度值如表 1 所示,运用 ANSYS 软件时程后处理功能绘制了持续加载约 10 000 d 时跨中徐变挠度云图如图 3 所示。

从表 1 中看出,有限元法计算的徐变挠度值比长期挠度小,约占长期挠度的 90% 左右,为长期挠度主要组成部分,这与理论一致。从图 3 持荷 10 000 d 时 3 片梁的挠度云图中看出,梁端部至跨中截面挠度变化趋势有明显不同,跨中截面下挠量较大,梁的挠度变形与实际情况吻合,挠度变

化等值线在梁端分布较密,在跨中截面分布较疏,这与材料力学理论一致,表明 ANSYS 软件模拟分析预应力梁徐变变形有可行性。

表 1 持荷 600 d 时的长期挠度增量试验值与徐变挠度有限元分析值

Tab.1 Test beams long-term deflection measured values and creep deflection caculated by FEM mm			
梁编号	XPB1	XPB2	XPB3
①长期挠度	3.93	6.77	3.25
②徐变挠度有限元值	3.69	6.42	2.88
②/①	0.94	0.95	0.87

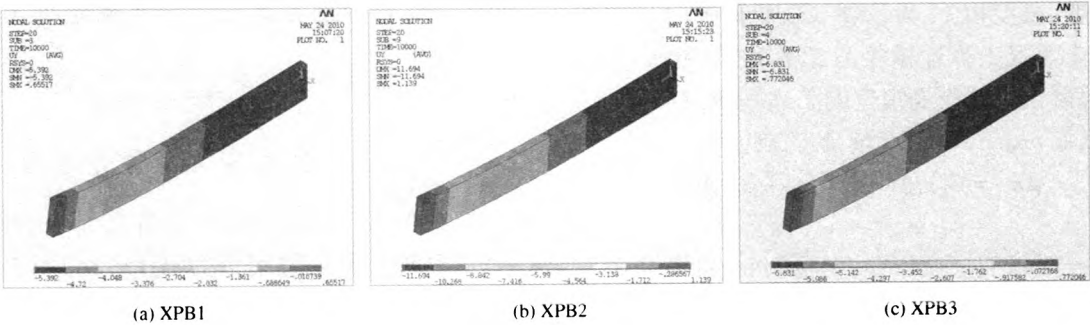


图 3 折线先张梁持荷 10 000 d 的挠度云图

Fig.3 10 000 days' deflection cloud map of deflection of the prestressed concrete beams

2.3 不同徐变系数模式且不同预应力度梁的两系数数值关系

分别选用折线先张梁 XPB1、XPB2、XPB3 为研究对象,预应力度值和徐变系数模式均采用试

验时梁的时间参数,用有限元软件分析计算了试验梁在不同加载时刻的徐变挠度值,绘制了三片不同预应力度梁徐变系数与徐变挠度系数对比曲线如图 4 所示。

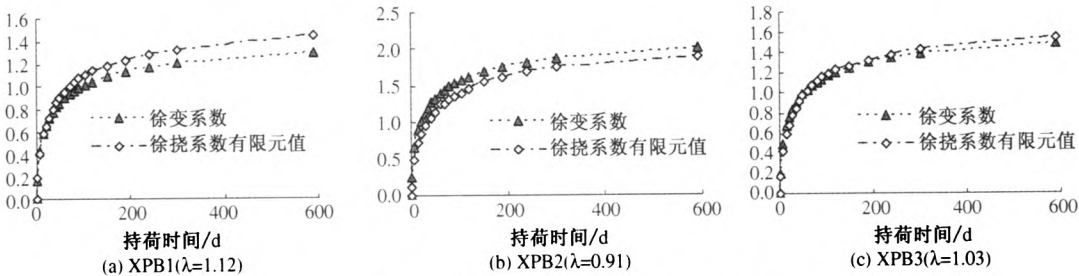


图 4 徐变挠度系数有限元计算值与徐变系数值对比

Fig.4 Creep deflection coefficient value calculated by FEM and creep coefficient

从图 4 中看出,对 λ 为 1.12 的全预应力梁 XPB1,徐变挠度系数的有限元计算值明显大于其徐变系数值;对 XPB3, λ 为 1.03,其徐变挠度系数略大于徐变系数;对部分预应力梁 XPB2, λ 值为 0.91,其徐变挠度系数明显小于徐变系数。

2.3 相同徐变系数模式不同预应力度梁的两系数间数值关系

选择 XPB1 为分析对象,通过调整二次加载

值改变其预应力度值为 1.25、1.05 (1.1)、0.9、0.8。持续加载 600 d,预应力梁的混凝土挠曲徐变系数模式分别取 $1.52 \times \frac{(t-t_0)^{0.6}}{8+(t-t_0)^{0.6}}$ 、 $1.75 \times$

$\frac{(t-t_0)^{0.6}}{8+(t-t_0)^{0.6}}$ [6,8],用有限元法分别计算在每种徐变系数计算模式且不同预应力度梁的徐变挠度值。依据徐变挠度系数的定义,绘制了徐变挠度系

数时程曲线,并与挠曲徐变系数时程曲线进行对

比,如图 5(a)、(b)所示。

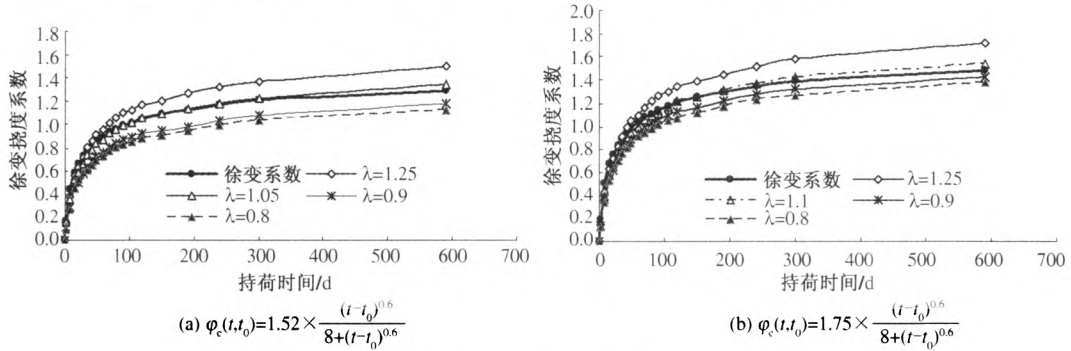


图 5 相同徐变系数不同 PPR 梁的徐变挠度系数时程曲线对比
Fig. 5 Time-history curves of creep deflection of different PPR beams as the same creep coefficient

从图 5 中看出,在相同徐变系数模式下,通过改变预应力度值,预应力梁的徐变挠度系数与徐变系数间的数值关系表现出同样的规律:随着预应力度值的改变,预应力梁的徐变挠度系数与徐变系数的数值关系也在改变.当预应力度值为 1.1 时,徐变挠度系数大于徐变系数,当预应力度值达到 1.25 时,徐变挠度系数明显大于徐变系数,且徐变挠度系数与徐变系数的

比值随预应力的增大而增大.当预应力度值分别为 0.8、0.9 时,徐变挠度系数明显小于徐变系数,且比值变化规律与预应力度值大小基本一致。

3 徐变挠度系数与徐变系数间数值关系的解析法分析结论

预应力梁的徐变曲率几何模型如图 6 所示。

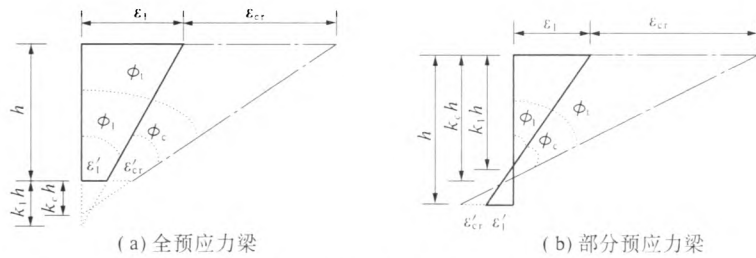


图 6 徐变曲率研究模型
Fig. 6 Creep curvature geometry model

运用解析法,以徐变曲率参数为纽带,根据挠曲构件的曲率与挠度的关系,对预应力梁,其徐变系数 $\varphi_c(t, t_0)$ 与徐变挠度系数 $\varphi_f(t, t_0)$ 间的数值关系

$$\varphi_f(t, t_0) = k \cdot \varphi_c(t, t_0); \tag{9}$$
$$k = \frac{\frac{N_p}{A_0} \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) + \frac{M_p}{W} \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)}{\frac{N_p}{A_0} \cdot \frac{2}{\lambda} + \frac{2M_p}{W} \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)}. \tag{10}$$

k 是受预压应力 N_p 、构件的截面面积 A_0 、预应力度 λ 、预应力产生的弯矩值 M_p 及构件抗弯截面模量 W 等因素影响的综合性系数. 对式(10)中 $N_p, M_p, \lambda, A_0, W$ 这 4 个因素进行敏感性分析. λ 值在实际数值的基础上改变 $-20\% \sim 10\%$, k 值在 $-30\% \sim 30\%$ 间变化,而其他几个因素 $-20\% \sim 10\%$ 幅度变化只引起 k 值在 $-3\% \sim 5\%$ 间变

化,说明预应力度值 λ 是最主要因素,其他几个因素对 k 值影响较小^[1,6].

从式(10)看出,对于全预应力混凝土梁, $\lambda > 1$, 则 $k > 1$, 其意义为徐变挠度系数大于徐变系数;对部分预应力梁 $0 < \lambda < 1$, 则 $k < 1$, 其意义为徐变挠度系数小于徐变系数. 这与有限元法分析结论一致。

4 结论

(1) 对预应力混凝土梁长期变形的有限元分析过程表明,梁的挠曲徐变系数模式对其徐变挠度计算的结果影响甚大,故在桥面平顺度要求高的桥梁中,应通过现场模型试验获取的混凝土挠曲徐变系数模式,这对准确计算及预控长期挠度具有重要意义。

(2) 有限元分析结论表明,对全预应力梁,其

徐变挠度系数大于徐变系数,对于部分预应力梁,其徐变挠度系数小与徐变系数,验证了解析法所得出的徐变挠度系数与徐变系数数值关系表达式的正确性,该公式可应用于进一步建立精确地预应力梁长期挠度计算模式.

参考文献:

- [1] 王俊,刘立新. 预应力度对预应力梁徐变曲率影响的试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(8):37-43.
- [2] XIANG T Y, TONG Y Q, ZHAO R D. A general and versatile nonlinear analysis program for concrete bridge structure[J]. Advances in Engineering Software,2005,36(10):681-690.
- [3] 孙海林,叶列平,冯鹏. 钢筋混凝土梁长期变形的计算[J]. 工程力学,2007,24(11):88-93.
- [4] 刘立新,安鸿飞,于秋波,等. 淮河大桥 35m 先张折线形箱梁预应力损失的研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2007,28(4):12-15.
- [5] 周履,陈永春. 收缩徐变[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.
- [6] 王俊. 折线先张法预应力混凝土梁徐变性能研究[D]. 郑州大学土木工程学院,2011.6.
- [7] 薛伟辰. 现代预应力结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003,1-18.
- [8] 王俊,刘立新. 折线先张预应力混凝土梁徐变试验研究[J]. 建筑科学,2010,26(9):7-10.
- [9] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007. 430-489.
- [10] 赵静超. 折线先张及曲线后张预应力混凝土梁徐变性能研究[D]. 郑州:郑州大学土木工程学院,2010.

Numerical Relationship Between Creep Coefficient and Creep Deflection Coefficient of Prestressed Concrete Beams Effected by Partial Pre-stressing Ratios

WANG Jun^{1,2}, ZHAO Jing-chao³, LIU Lin-xin²

(1. Department of Civil Engineering, Xuchang University, Xuchang, 461000, China; 2. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Architecture design and research institute of HeNan Province, Zhengzhou 450014, China)

Abstract: To pre-stressed concrete beams, it is very important to forecast long-term deflection accurately to figure out numerical relationship between creep coefficient and creep deflection coefficient. By analyzing creep deformation of pre-stressed concrete beams under long-term loaded in ANSYS software, and studying numerical relationship between creep coefficient and creep deflection coefficient while creep coefficient also PPR of beams are different, or beam creep coefficient is same but different PPR. Then the results show that full-prestressed concrete beams creep deflection coefficient is greater than creep coefficient, while the opposite is true for partial-prestressed beams. Moreover, this conclusion was further proven by analytical method to creep strain geometry model. This result may be useful for establishing accurate long-term deflection calculation model of pre-stressed concrete beams.

Key words: pre-stressed concrete beam; partial pre-stressing ratio; creep coefficient; creep deflection coefficient; numerical relationship, finite element method