

# 徐变对钢管混凝土拱桥拱肋截面应力重分布的影响\*

## Analysis of Cross-section Stress Redistribution in CFST Arch Bridge under the Standing Load

谢肖礼      秦    荣      谢开仲  
Xie Xiaoli    Qin Rong    Xie Kaizhong

(广西大学土木工程学院 南宁市西乡塘路 10号 530004)  
(College of Civil Engi. Guangxi Univ.,  
10 Xixiangtanglu, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**摘要** 采用混凝土徐变理论及有限单元法,并考虑混凝土的弹性后效及混凝土受四周约束作用的徐变特性,对任意形状拱肋截面的钢管混凝土拱桥的应力重分布进行研究,推出短期荷载作用下截面应力和在长期荷载作用下应力重分布的半解析表达式,提出相应的分析方法及实施步骤。分析表明,徐变对钢管混凝土拱桥的截面应力重分布影响非常显著,如与外荷载作用下的应力相叠加,则可能会恶化结构构件的工作。

**关键词** 徐变 钢管混凝土拱桥 有限单元法 应力重分布  
中图法分类号 TU 528.59

**Abstract** The concrete creep theory and the finite element method are used, in consideration of the elastic post effect of concrete and creep features of concrete restrained all around, to analyze stress redistribution of steel tube concrete (CFST) arch bridge with arbitrary shape cross-section. Stress under short-term loading and stress redistribution under standing load have been developed and the procedure for the analysis is also presented. The analysis results show that the creep has a great influence upon the cross-section stress redistribution of CFST arch bridge. If the creep is superposed on the stress resulted from external loading, the performance of structural member and component may deteriorate.

**Key words** creep, steel tube concrete arch bridge, finite element method, stress redistribution

钢管混凝土 (CFST) 拱桥最早出现在苏联,但发展最快的是中国<sup>[1,2]</sup>,中国自 1990 年建成第一座钢管混凝土拱桥——四川旺苍大桥以来,已建成 120 余座,可见其发展迅猛。经过十多年的研究及工程实践,表明钢管混凝土拱桥的主要优点具有 4 个方面: 1) 跨径适应能力强; 2) 承载能力大,施工快捷; 3) 地基适应能力强,可设计成有推力的钢管混凝土拱,也可以设计成无推力的系杆拱; 4) 振动小,建设和养护费用较低,特别适合中国的经济水平。然而作为一种采用新材料的桥型,钢管混凝土拱桥的理论研究目前还相对滞后于工程实践,跟不上其发展步伐<sup>[3]</sup>,中国尚未有钢管混凝土拱桥的设计及施工规范,特别是徐变作为钢管混凝土拱桥结构分析的基本问题之一,其影响量值应力至今少有文献报道<sup>[3]</sup>。国外对钢管混凝土的徐变问题研究不多,各国在设计中对这一问题的考虑也不同。哈尔滨建筑大学在 1978 年和 1983 年进

行了两次徐变试验,对钢管混凝土劲性骨架拱桥的徐变问题,在建造四川万县长江大桥时做过模型试验,取得一批成果,但均限单根圆形钢管混凝土,而钢管混凝土拱桥常用的截面是哑铃形,因此钢管混凝土徐变的一些结论未必都能用于任意截面的钢管混凝土拱桥上,而且一般来说钢管混凝土拱桥的构件是曲的或折线形,与直的钢管混凝土有一定的差别。

收缩、徐变在很大程度上影响着钢管混凝土组合截面构件的应力—变形状态的变化。有这样的危险,由于混凝土收缩、徐变使混凝土与钢管之间产生空隙,这不仅破坏了混凝土与钢管的协同工作,而且使混凝土发生应力松弛,钢管应力显著增大。

在钢管混凝土构件中,与钢筋混凝土中钢筋有很大差别的管壳对收缩和徐变总变形的发展过程有显著影响,同时也对随时间而发展的长期过程提供了特殊的条件。因此,两者的收缩、徐变的特征有着根本的差别。

试验研究和实践表明,细长偏心受压钢管混凝土构件在很多情况下远未失稳前就不能满足正常使用

2000-11-13 收稿。

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50068001) 和广西自然科学基金 (9912002) 资助。

要求,因此研究混凝土收缩徐变产生的应力重分布是非常重要的。目前,通过改进施工工艺、添加微膨胀剂及压浆补填等措施将有助于保证钢管和混凝土的密贴,减少收缩对结构的影响,因此,徐变问题就显得尤为重要。本文对此问题进行了一些理论研究。

## 1 基本理论及公式推导

### 1.1 基本假设

1) 假设钢管与混凝土之间粘结良好,两者协同工作,满足平截面假定; 2) 钢管混凝土拱桥为压弯结构,忽略扭转的影响,且不考虑施工过程中产生的初应力; 3) 采用线弹性本构关系。

### 1.2 徐变影响的公式推导

设坐标轴  $z$  为轴向,  $x$ 、 $y$  轴所在平面为杆件截面(任意截面),由协调条件得<sup>[4]</sup>:

$$\bar{X}_z + \Delta \bar{X}_z = \bar{X}_z(1 + h'_t) - \Delta \varepsilon_z^c, \quad (1)$$

式中,  $\bar{X}_z$ 、 $\bar{X}_x$  为钢管和混凝土的初始变形;  $\Delta \bar{X}_z$  为时间  $t$  时钢管的附加变形;  $\Delta \varepsilon_z^c$  为以发生徐变为先决条件的混凝土相对变形,是由于混凝土受周围约束作用造成的;  $h'_t$  为考虑混凝土弹性后效在隔离状态中的混凝土徐变特征值。

由上述变形方程式(1),根据混凝土变形的徐变理论,且不考虑横向变形,则可用应力表达如下:

$$\frac{\varepsilon_z + \Delta \varepsilon_z}{E_s} = \frac{\varepsilon_z^c}{E_c} (1 + h'_t) - \int_0^t \frac{d\varepsilon_z^c(f)}{df} \left[ \frac{1}{E_c(f)} + \frac{h'_t + h_t}{E_c} \right] df. \quad (2)$$

按中值理论,(2)式可写成在弹性模量不随时间变化时:

$$\frac{\varepsilon_z + \Delta \varepsilon_z}{E_s} = \frac{\varepsilon_z^c (1 + h'_t)}{E_c} - \frac{\Delta \varepsilon_z^c}{E_c} (1 + \frac{h'_t}{2}), \quad (3)$$

在小偏心情况下:

$$\varepsilon_z = N_s \left( \frac{1}{A_s} + \frac{e_y' \cdot y}{I_x'} + \frac{e_x' \cdot x}{I_y'} \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = N_c \left( \frac{1}{A_c} + \frac{e_y' \cdot y}{I_x} + \frac{e_x' \cdot x}{I_y} \right), \quad (5)$$

其中:  $A_s$ 、 $A_c$  分别为截面的钢管面积和混凝土面积,由(4)、(5)式得:

$$N_s = \frac{A_s I_x' I_y' \varepsilon_z^c}{I_x' I_y' + A_s I_y' e_y' \cdot y + A_s I_x' e_x' \cdot x}, \quad (6)$$

$$N_c = \frac{A_c I_x I_y \varepsilon_z^c}{I_x I_y + A_c I_y e_y'' \cdot y + A_c I_x e_x'' \cdot x}, \quad (7)$$

其中:  $N_s + N_c = N$ ,  $N_c$  为混凝土部分所受轴力;  $N_s$  为钢管部分所受轴力。

同理

$$\Delta N_s = \frac{A_s I_x' I_y' \varepsilon_z^c}{I_x' I_y' + A_s I_y' e_y' \cdot y + A_s I_x' e_x' \cdot x}, \quad (8)$$

$$\Delta N_c = \frac{A_c I_x I_y \Delta \varepsilon_z^c}{I_x I_y + A_c I_y e_y'' \cdot y + A_c I_x e_x'' \cdot x}, \quad (9)$$

设作用在构件上的力不随时间变化,则

$$\Delta N_s + \Delta N_c = 0, \quad (10)$$

所以

$$\Delta \varepsilon_z^c = -T_1 \Delta \varepsilon_z^c, \quad (11)$$

其中

$$T_1 = \frac{A_c I_x' I_y' (I_x' I_y' + A_s I_y' e_y' \cdot y + A_s I_x' e_x' \cdot x)}{A_s I_x' I_y' (I_x I_y + A_c I_y e_y'' \cdot y + A_c I_x e_x'' \cdot x)}, \quad (12)$$

把(11)式代入(3)式得:

$$\Delta \varepsilon_z^c = \frac{2[\varepsilon_z^c E_s (1 + h'_t) - \varepsilon_z^c E_c]}{2T_1 E_c + (2 + h'_t) E_s}, \quad (13)$$

最后可得在徐变影响下任意形状截面应力重分布的半解析表达式

$$\varepsilon_z^c = \varepsilon_z^c + \frac{2[\varepsilon_z^c E_s (1 + h'_t) - \varepsilon_z^c E_c]}{2T_1 E_c + (2 + h'_t) E_s} T_1, \quad (14)$$

$$\varepsilon_z^c = \varepsilon_z^c - \frac{2[\varepsilon_z^c E_s (1 + h'_t) - \varepsilon_z^c E_c]}{2T_1 E_c + (2 + h'_t) E_s}. \quad (15)$$

### 1.2.1 任意形状截面初始应力分布的求解

设  $\bar{A}_s$ 、 $\bar{I}_s$  分别为换算成钢管的横截面等效面积和等效惯性矩,  $\bar{A}_c$ 、 $\bar{I}_c$  分别为换算成混凝土的横截面等效面积和等效惯性矩,

$$\text{设 } \bar{A}_s = A_s + \frac{A_c}{n}, \quad (16)$$

$$\bar{A}_c = A_c + n A_s, \quad (17)$$

$$\bar{I}_x = I_x + \frac{I_x'}{n}, \quad (18)$$

$$\bar{I}_y = I_y + \frac{I_y'}{n}, \quad (19)$$

$$\bar{I}_x = I_x + n I_x', \quad (20)$$

$$\bar{I}_y = I_y + n I_y', \quad (21)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c}, \quad (22)$$

$$\text{利用关系: } EA = E_c A_c + E_s A_s, \quad (23)$$

$$EI = E_c I_c + E_s I_s, \quad (24)$$

可得在短期荷载作用下任意形状截面应力分布的半解析公式

$$\varepsilon_z^c = N \left( \frac{1}{\bar{A}_s} + \frac{e_y' \cdot y}{\bar{I}_x} + \frac{e_x' \cdot x}{\bar{I}_y} \right), \quad (25)$$

$$\varepsilon_z^c = N \left( \frac{1}{\bar{A}_c} + \frac{e_y' \cdot y}{\bar{I}_x} + \frac{e_x' \cdot x}{\bar{I}_y} \right), \quad (26)$$

其中  $\alpha = \frac{M_y}{N}$ ,  $e_y = \frac{M_x}{N}$ ,

将(25)式和(26)式相比得:

$$\varepsilon_z^c = n \cdot \varepsilon_z^c. \quad (27)$$

### 1.2.2 偏心距 $e_x'$ , $e_y'$ , $e_x''$ , $e_y''$ 的求解

由(4)式和(25)式的关系得:

$$\left( \frac{1}{A_s} + \frac{e_y' \cdot y}{I_x'} + \frac{e_x' \cdot x}{I_y'} \right) = N \left( \frac{1}{\bar{A}_s} + \frac{e_y' \cdot y}{\bar{I}_x} + \frac{e_x' \cdot x}{\bar{I}_y} \right) +$$

$$\frac{\alpha \cdot x}{I_y}), \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \text{整理得: } & \left(\frac{N_s}{A_s} - \frac{N}{A_s}\right) + \left(\frac{N_s \cdot e_y'}{I_x} - \frac{N \cdot e_y}{I_x}\right)y + \\ & \left(\frac{N_s \cdot \alpha'}{I_y} - \frac{N \cdot \alpha}{I_y}\right)y = 0, \end{aligned} \quad (29)$$

由于上式对任意的  $x, y$  均成立, 故其系数均为零, 即有  $N_s = \frac{N A_s}{A_s}, e_y' = \frac{A_s I_x}{A_s I_x} e_y, \alpha' = \frac{A_s I_y}{A_s I_y} \alpha,$  (30)

$$\text{同理可得 } e_y'' = \frac{A_c I_x}{A_c I_x} e_y, e_x'' = \frac{A_c I_y}{A_c I_y} \alpha, N_c = \frac{N A_c}{A_c}. \quad (31)$$

### 1.3 计算步骤

以上建立了计算钢管混凝土拱桥在长期荷载作用下徐变的应力重分布的基本计算公式, 具体实施时可按如下步骤进行: 1) 按空间梁单元计算出所求截面的内力; 2) 求出偏心距; 3) 求出所求截面的  $\epsilon_x$  和  $\epsilon_y$ ; 4) 代入 (13) 式求混凝土附加应力; 5) 用 (11) 式求钢管的附加应力; (6) 用 (14)、(15) 式求得应力重分布。

## 2 实例

南宁市永和大桥主桥初步设计方案(已在全国投标中中标)为单跨为 338 m 下承式特大型等宽变高截面钢管混凝土桁拱(图 1), 位于南宁市中心, 其北接中华路延长线, 南联南建路, 在湘桂线邕江铁路桥下游跨越邕江, 路线走向为南北向, 桥面宽为 35 m, 为四车道城市桥梁, 设计为荷载汽超 20, 挂 -120, 拱肋的上、下弦杆断面形状为横哑铃形, 圆管外径为、壁厚 16 mm, 两圆管间缀板钢板厚 16 mm

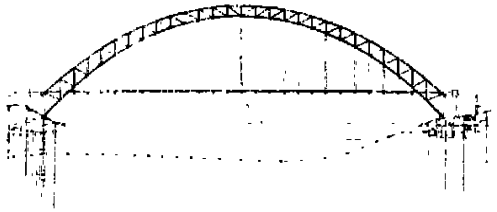


图 1 永和大桥初设方案立面图

Fig. 1 Elevation drawing of Yonghe bridge in initial design

### 2.1 构件截面几何参数

弦杆:  $A_s = 0.15289 \times 10^6 \text{ mm}^2, I_x = 0.2888 \times 10^{11} \text{ mm}^4, I_y = 0.12044 \times 10^{12} \text{ mm}^4, A_c = 2.848 \times 10^6 \text{ mm}^2, I_x = 2.4679 \times 10^{11} \text{ mm}^4, I_y = 1.9788 \times 10^{12} \text{ mm}^4;$  腹杆:  $A_s = 0.045088 \times 10^6 \text{ mm}^2, I_s = 0.020163 \times 10^{11} \text{ mm}^4;$  横联:  $A_s = 0.039848 \times 10^6 \text{ mm}^2, I_s = 0.040896 \times 10^{11} \text{ mm}^4;$  徐变特征值  $b'$  取 0.6

### 2.2 单元划分

采用子结构方法时, 每个节点作为一个子结构处理 采用三维单元进行细分, 考虑混凝土与钢管协调变形 钢管采用 8 结点的壳单元, 与 8 结点壳单元对应, 选择 20 结点的实体单元来模拟混凝土。典型节点分带横联的上、下弦节点和不带横联的上、下弦杆节点, 单元剖分见图 2 图 3

采用梁单元分析时, 则按空间杆系考虑, 将哑铃形弦杆和双圆腹杆均简化为一杆件, 如图 4 所示。

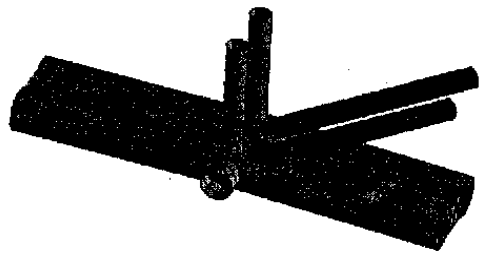


图 2 带横联的下弦节点  
Fig. 2 Lower node with cross joint

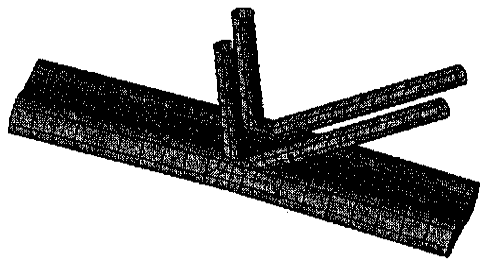


图 3 不带横联的下弦节点  
Fig. 3 Lower node without cross joint

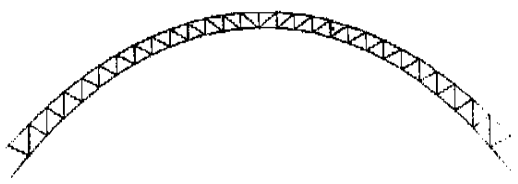


图 4 空间梁单元模型  
Fig. 4 Model of spatial beam element

### 2.3 计算截面

选取下弦杆  $L/4$  处截面作为计算截面, 其内力值及偏心距如表 1 所示。

表 1 计算截面的内力值及偏心距

Table 1 Stress and eccentric distance of calculated cross-section

工况 Condition	$N$ (kN)	$M_x$ (kN·m)	$M_y$ (kN·m)	$e_x = \frac{M_y}{N}$ (mm)	$e_y = \frac{M_x}{N}$ (mm)
裸拱时 Under bare arch	- 19.242	- 81.362	9.92	- 0.516	4.228
成桥后 Under finished bridge	- 44.652	- 654.14	14.151	- 0.317	14.65

## 2.4 子结构与半解析法解答的比较

取钢管与混凝土交界处的点进行计算,计算点如图 5 所示,其中点 3 的坐标为 (0, 459), 点 2 的坐标为 (1484, 0) 两种方法计算结果见表 2 成桥后

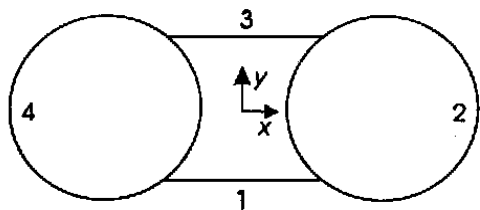


图 5 计算点的位置

Fig. 5 Location of computational point

表 2 子结构与半解析法解答的比较

Table 2 Comparison by sub-structure method and semi-interpretation method

计算方法 Calculating method	计算点应力值 Stress of calculating points (M Pa)			
	裸拱时 Under bare arch		成桥后 Under finished bridge	
	3	2	3	2
子结构法 Sub-structure method	$\sigma_z^s$ - 30.318	- 30.435	- 74.409	- 70.058
	$\sigma_z^c$ - 5.054	- 5.098	- 12.404	- 11.736
半解析法 Semi-interpretation method	$\sigma_z^s$ - 32.131	- 31.619	- 77.685	- 75.515
	$\sigma_z^c$ - 5.148	- 5.065	- 12.446	- 12.098

表 3 成桥后短期荷载与长期荷载作用下的应力值变化对比

Table 3 Comparison of stress changes under standing load and short-term load of finished bridge

计算点 Calculating point	应力值 Stress and changing rates				改变率 Changing rates (%)
	短期荷载作用下 Under short-term		长期荷载作用下 Under standing-load		
	$\sigma_z^s$	$\sigma_z^c$	$\sigma_z^s$	$\sigma_z^c$	
点 3 子结构法 Point 3 sub-structure method	$\sigma_z^s$ - 74.409	$\sigma_z^c$ - 108.857	46.30		
	$\sigma_z^c$ - 12.404	- 10.552	- 14.90		
半解析法 Semi-interpretation method	$\sigma_z^s$ - 77.685	$\sigma_z^c$ - 109.762	41.29		
	$\sigma_z^c$ - 12.446	$\sigma_z^c$ - 10.654	- 14.40		
点 2 子结构法 Point 2 sub-structure method	$\sigma_z^s$ - 70.058	$\sigma_z^c$ - 103.028	47.10		
	$\sigma_z^c$ - 11.736	$\sigma_z^c$ - 9.964	- 15.10		
半解析法 Semi-interpretation method	$\sigma_z^s$ - 75.515	$\sigma_z^c$ - 107.048	41.76		
	$\sigma_z^c$ - 12.098	$\sigma_z^c$ - 10.399	- 14.04		

在短期荷载作用下和长期荷载作用下计算点应力值的比较见表 3

从表 2 可看出,半解析法的解答与子结构法计算结果十分接近,并略大于子结构法的计算结果,说明了采用半解析法求解截面应力的合理性。从表 3 的对比结果可知,由于管径较大,在混凝土的应力松弛仅为 14% ~ 15% 的情况下,即导致钢管应力明显增大,达 40% ~ 50%。

## 3 结语

由徐变产生的截面应力重分布是非常明显的,从算例中看出,管径较大时,混凝土应力松弛后其应力减小,钢管的应力显著增加,应引起工程界的重视。

本文提出徐变产生的应力重分布的半解析表达式比较简洁,应用较为方便,对钢管混凝土拱桥任意形状截面均适用,表达式还考虑了混凝土的弹性后效及混凝土受四周约束的徐变特性。

大跨度钢管混凝土拱桥节点是整个结构安全的关键环节之一,是应力集中和高应力区,根据本文建立的公式及计算手段,可对节点在徐变影响下的应力重分布进行分析,从而对节点的承载力进行重新评估。

建议采用本文提出的半解析法求解截面的初始应力,对于有限的计算机资源来说是切实可行的方法。另外还可以通过子结构分析技术求和,对半解析法求解的结果加以校核。

致谢

感谢广西大学土木工程学院博士研究生罗月静同学为本文所做的部分计算工作。

## 参考文献

- 1 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展. 土木工程学报, 1999, (4).
- 2 钟善桐. 钢管混凝土结构. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 1994.
- 3 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- 4 斯托鲁. 任科著 (苏联). 钢管混凝土结构. 伯君, 东奎译. 北京: 冶金工业出版社, 1982.

(责任编辑: 黎贞崇)