

# 钢管混凝土劲性骨架拱桥收缩徐变影响理论研究

谢肖礼, 秦 荣, 彭文立, 邓志恒

(广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004)

**[摘要]** 采用混凝土徐变理论、变形协调、中值理论及平衡条件, 并考虑混凝土的弹性后效及受四周约束作用的徐变特性, 导出了混凝土徐变、收缩引起的截面应力重分布的表达式。公式简单, 应用方便, 并对万县长江大桥收缩、徐变模型试验进行分析, 所得结果与模型试验较为吻合, 同时指出了影响该桥型应力的主要因素。

**[关键词]** 钢管混凝土劲性骨架; 收缩徐变; 初应力; 应力重分布

## 1 引言

以钢管混凝土劲性骨架为支架, 分层、分段包裹混凝土, 最后形成劲性骨架与混凝土的复合桥型。设计充分利用了钢管混凝土良好的受力特性及箱型拱桥的优点, 具有造价低、坚固耐用、抗腐蚀强、跨径大、振动小和养护费用低等优越性, 与斜拉桥相比, 可节约投资  $1/3 \sim 1/2$ , 现已成为修建特大跨径混凝土拱桥的合理可行、最具竞争力的桥型之一<sup>[1]</sup>。近年来, 该结构形式在国内外发展较快, 日本的宇佐川桥, 我国的丹东沙河口桥、宜宾金沙江大桥、广西邕宁邕江大桥 (312 m 中承式)、云南化皮冲大桥和四川万县长江大桥 (420 m 上承式) 等均采用此 SRC 结构形式。目前, 四川万县长江大桥位居世界同类桥型净跨之首, 为世界所瞩目。

结合广西邕宁邕江大桥和四川万县长江大桥, 国内学者研究开发了千斤顶斜拉扣挂悬拼架设骨架、混凝土连续浇注技术、施工稳定性控制技术、混凝土配制与泵送技术以及有关混凝土施工过程中收缩、徐变、几何非线性、材料非线性等因素的研究<sup>[1-6]</sup>, 取得了很大的成绩, 为确保大桥安全建成通车做出了贡献。笔者就研究混凝土收缩、徐变

问题的理论研究结果与试验实测较为吻合, 并根据理论和工程实践, 指出一些应注意的工程技术问题。

## 2 基本理论及公式推导

### 2.1 基本假设

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; 钢管混凝土拱桥为压弯结构, 忽略扭转的影响; 忽略收缩和徐变之间的耦合作用; 考虑施工过程中产生的初应力。

### 2.2 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 (任意形状截面), 对于钢管混凝土部分, 由协调条件得:

$$\epsilon_z^s + \Delta\epsilon_z^s = \epsilon_z^c(1 + \varphi'_t) - \Delta\epsilon_z^c \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_z^s$ 、 $\epsilon_z^c$  为钢管和混凝土的初始变形;  $\Delta\epsilon_z^s$  为时间  $t$  时钢管的附加变形;  $\Delta\epsilon_z^c$  为以发生徐变为先决条件的混凝土相对变形, 是由于混凝土受钢管约束作用造成的;  $\varphi'_t$  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<sup>[7]</sup>。

由基本假设条件和变形方程式 (1) 对钢管混凝土外包混凝土时也成立。于是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

[收稿日期] 2000-10-31; 修回日期 2000-12-18

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50068001); 广西自然科学基金资助项目 (9912002)

[作者简介] 谢肖礼 (1963-), 男, 广东南海市人, 广西大学计算力学与结构仿真分析研究所副研究员

下：

$$\frac{\sigma_z^s + \Delta\sigma_z^s}{E_s} = \frac{\sigma_z^c}{E_c}(1 + \varphi'_t) - \int_0^t \frac{d\sigma_z^c(\tau)}{d\tau} \left[ \frac{1}{E_c(\tau)} + \frac{\varphi'_t - \varphi_\tau}{E_c} \right] d\tau \quad (2)$$

按中值理论，在弹性模量不随时间变化时，式(2)可写成：

$$\frac{\sigma_z^s + \Delta\sigma_z^s}{E_s} = \frac{\sigma_z^c(1 + \varphi'_t)}{E_c} - \frac{\Delta\sigma_z^c}{E_c}(1 + \frac{\varphi'_t}{2}) \quad (3)$$

在小偏心情况下：

$$\sigma_z^s = N_s \left( \frac{1}{A_s} + \frac{e_y'y}{I_x^s} + \frac{e_x'x}{I_y^s} \right); \quad (4)$$

$$\sigma_z^c = N_c \left( \frac{1}{A_c} + \frac{e_y''y}{I_x^c} + \frac{e_x''x}{I_y^c} \right) \quad (5)$$

式中： $A_s$ 、 $A_c$ 分别为截面的钢管面积和混凝土面积。

由式(4)、(5)得：

$$N_s = \frac{A_s I_x^s I_y^s \sigma_z^s}{I_x^s I_y^s + A_s I_x^s e_y'y + A_s I_x^s e_x'x} \quad (6)$$

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

$$N_s + N_c = N$$

式中： $N_c$ 、 $N_s$ 分别为混凝土和钢管所受轴力。

同理，

$$\Delta N_s = \frac{A_s I_x^s I_y^s \Delta\sigma_z^s}{I_x^s I_y^s + A_s I_x^s e_y'y + A_s I_x^s e_x'x} \quad (8)$$

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

设：作用在构件上的力不随时间变化，则

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

$$\text{所以，} \Delta\sigma_z^s = -\alpha_1 \Delta\sigma_z^c \quad (11)$$

式中，

$$\alpha_1 = \frac{A_c I_x^c I_y^c (I_x^s I_y^s + A_s I_x^s e_y'y + A_s I_x^s e_x'x)}{A_s I_x^s I_y^s (I_x^c I_y^c + A_c I_x^c e_y''y + A_c I_x^c e_x''x)} \quad (12)$$

把式(11)代入式(3)得：

$$\Delta\sigma_z^c = \frac{2[\sigma_z^c E_s (1 + \varphi'_t) - \sigma_z^s E_c]}{2\alpha_1 E_c + (2 + \varphi'_t) E_s} \quad (13)$$

在徐变影响下，最后可得任意形状截面应力重分布的半解析表达式：

$$\sigma_z^s = \sigma_z^s + \frac{2[\sigma_z^c E_s (1 + \varphi'_t) - \sigma_z^s E_c]}{2\alpha_1 E_c + (2 + \varphi'_t) E_s} \alpha_1 \quad (14)$$

$$\sigma_z^c = \sigma_z^c - \frac{2[\sigma_z^c E_s (1 + \varphi'_t) - \sigma_z^s E_c]}{2\alpha_1 E_c + (2 + \varphi'_t) E_s} \quad (15)$$

### 2.2.1 任意形状截面初始应力分布求解

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。则：

$$\bar{A}_s = A_s + A_c/n \quad (16)$$

$$\bar{A}_c = A_c + nA_s \quad (17)$$

$$\bar{I}_x^s = I_x^s + I_x^c/n \quad (18)$$

$$\bar{I}_y^s = I_y^s + I_y^c/n \quad (19)$$

$$\bar{I}_x^c = I_x^c + nI_x^s \quad (20)$$

$$\bar{I}_y^c = I_y^c + nI_y^s \quad (21)$$

$$n = E_s/E_c \quad (22)$$

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：

$$\sigma_z^s = N \left( \frac{1}{A_s} + \frac{e_y'y}{\bar{I}_x^s} + \frac{e_x'x}{\bar{I}_y^s} \right) \quad (25)$$

$$\sigma_z^c = N \left( \frac{1}{A_c} + \frac{e_y''y}{\bar{I}_x^c} + \frac{e_x''x}{\bar{I}_y^c} \right) \quad (26)$$

式中： $e_x = M_y/N$ ， $e_y = M_x/N$ 。

将式(25)和式(26)相比得：

$$\sigma_z^s = n \cdot \sigma_z^c \quad (27)$$

### 2.2.2 偏心距 $e'_x$ 、 $e'_y$ 、 $e''_x$ 、 $e''_y$ 求解

由式(4)和式(25)的关系得：

$$N_s \left( \frac{1}{A_s} + \frac{e'_y'y}{I_x^s} + \frac{e'_x'x}{I_y^s} \right) = N \left( \frac{1}{A_s} + \frac{e_y'y}{\bar{I}_x^s} + \frac{e_x'x}{\bar{I}_y^s} \right) \quad (28)$$

整理得：

$$\left( \frac{N_s}{A_s} - \frac{N}{A_s} \right) + \left( \frac{N_s e'_y}{I_x^s} - \frac{N e_y}{\bar{I}_x^s} \right) y + \left( \frac{N_s e'_x}{I_y^s} - \frac{N e_x}{\bar{I}_y^s} \right) x = 0 \quad (29)$$

由于式(29)对任意的  $x$ 、 $y$  均成立，故其系数均为零，即有：

$$N_s = NA_s/\bar{A}_s \quad (30)$$

$$e'_y = \frac{\bar{A}_s I_x^s}{A_s \bar{I}_x^s} e_y \quad (31)$$

$$e'_x = \frac{\bar{A}_s I_y^s}{A_s \bar{I}_y^s} e_x \quad (32)$$

同理可得：

$$e''_y = \frac{\bar{A}_c I_x^c}{A_c \bar{I}_x^c} e_y \quad (33)$$

$$e''_x = \frac{\bar{A}_c J_y^c}{A_c \bar{I}_y^c} e_x, \quad (34)$$

$$N_c = NA_c / \bar{A}_{c_0}. \quad (35)$$

### 2.3 收缩影响的公式推导

考虑到钢管混凝土部分在任意时间  $t$ , 钢管的相对变形等于混凝土的自由收缩相对变形与因钢管的阻碍使混凝土产生的相对变形的代数和, 即

$$\epsilon_z^s = \epsilon_{z(t)}^c - \Delta_z. \quad (36)$$

式中,  $\epsilon_{z(t)}^c$  为在自由条件下混凝土的收缩变形。

根据老化理论及中值理论<sup>[7]</sup>, 式 (36) 变为

$$\epsilon_z^s = \epsilon_{z(t)}^c - \sigma_z^c / E_c (1 + \varphi'_t / 2). \quad (37)$$

式中,  $\sigma_z^c$  为混凝土收缩产生的应力。

由于混凝土和钢管的纵向收缩变形也应相互协调, 即

$$\epsilon_z^s = \epsilon_z^c. \quad (38)$$

由式 (37) 和式 (38) 解得:

$$\sigma_z^c = \frac{(\epsilon_{z(t)}^c - \epsilon_z^c) E_c}{(1 + 0.5\varphi'_t)}. \quad (39)$$

注意到基本假设条件, 钢管混凝土外包部分的收缩应力与钢管内混凝土收缩应力相等。

又因收缩产生的内力是相互平衡的, 由纵向平衡得:

$$A_s \sigma_z^s + A_c \sigma_z^c = 0, \quad (40)$$

$$\text{可得 } \sigma_z^s = -\frac{A_c}{A_s} \sigma_z^c. \quad (41)$$

式中的  $\sigma_z^c$  由式 (39) 决定。

### 2.4 收缩徐变产生的截面应力重分布表达式

$$\sigma_z^c = \sigma_z^c + \sigma_z^c + \sigma_{0z}^c, \quad (42)$$

$$\sigma_z^s = \sigma_z^s + \sigma_z^s + \sigma_{0z}^s. \quad (43)$$

式中,  $\sigma_{0z}^c$ 、 $\sigma_{0z}^s$  分别为混凝土和钢管在施工过程中产生的纵向初应力。

## 3 计算实例

用以上导出的计算公式, 分析四川万县长江大桥劲性骨架徐变收缩模型试验<sup>[4]</sup>, 并与实测结果作出比较。

模型试验为一钢管混凝土劲性骨架, 计算简图及加载模型如图 1 所示, 拱圈的拱顶节段长 3.40 m, 高 1.40 m, 宽 1.68 m, 钢管  $\phi 76 \times 4$  mm, 管内充 30# 混凝土。箱形截面节段分 3 次浇筑, 即底板、侧板和顶板, 模型试验断面如图 2 所示, 各层混凝土浇筑完 7 d 后加载, 加载值如表 1。

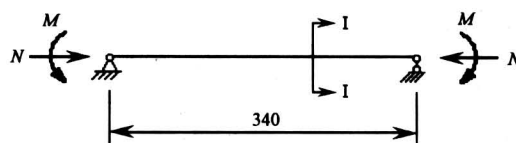


图 1 计算简图及加载模型

Fig.1 Model of applied load

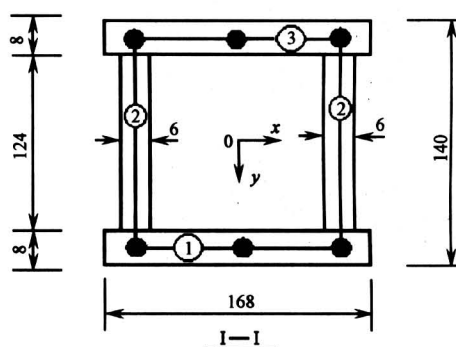


图 2 模型试验断面

Fig.2 Cross section of model test

表 1 加载值

Table 1 The values of applied load

加载次数	N/kN	M/kN·m
①	1102	33.105
②	173	5.402
③	1395	47.342

图中①②③表示箱形截面分 3 次浇筑, 其中第①②层混凝土各加载持续 30 d 后浇筑下一层混凝土, 第③层混凝土加载后一直持续 255 d。

将整个加载及观测时间划分成 12 个时段, 每层混凝土的龄期如表 2 所示。

表 2 模型加载龄期

Table 2 The ages of applied load of model

加载次数	加载龄期/d												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
①	7	37	44	74	81	99	130	160	206	272	286	300	336
②			7	37	44	62	93	123	169	235	249	263	299
③					7	25	56	86	132	198	212	226	262

取  $E_s = 2.0 \times 10^5$  MPa,  $E_c = 2.754 \times 10^4$  MPa,  $\varphi'_t = 0.6$ <sup>[7],[8]</sup>

根据文献 [9] 提供的 C30 混凝土数据, 密闭养护的钢管混凝土试件最大总自由收缩量为:

$$\epsilon_z^c = (20 \sim 25) \times 10^{-5}$$

文献 [4] 提供的 C30 混凝土的自由最大收缩值  $\epsilon_{z(t)}^c = 3.25 \times 10^{-6}$  (由小试件模型提供)。本文计算时, 恒载取 3 次加载之和:  $N = 2\,670\text{ kN}$ ,  $M = 85.849\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

忽略自重的情况下, 求得  $N$ 、 $M$  恒载作用下底层钢管应力及管壁处混凝土应力:

$$\sigma_z^s = -45.6\text{ MPa},$$

$$\sigma_z^c = -6.2\text{ MPa}。$$

根据文献 [4], 施工完成时, 钢管和混凝土实

测的数据分别为  $-93.8\text{ MPa}$ 、 $-15.87\text{ MPa}$ ; 考虑第 1 次加载至第 3 次加载的时间较长, 因此第 3 次加载结束时收缩徐变对截面已产生影响。设对钢管和混凝土的影响值分别为  $\Delta\sigma_{sc}^s$ 、 $\Delta\sigma_{sc}^c$ , 则在施工过程中产生的初应力为:

$$\sigma_{0z}^s = -93.8 - (-45.6) - \Delta\sigma_{sc}^s = -48.74 - \Delta\sigma_{sc}^s (\text{MPa}),$$

$$\sigma_{0z}^c = -15.87 - (-6.2) - \Delta\sigma_{sc}^c = -9.67 - \Delta\sigma_{sc}^c (\text{MPa})。$$

根据文献 [9] 提供的钢管混凝土收缩取值范围, 用式 (42)、(43) 求得最终应力分布 (计算收缩徐变部分应力时应加上  $\Delta\sigma_{sc}^s$ 、 $\Delta\sigma_{sc}^c$ )。结果见表 3。

表 3 最终应力分布

Table 3 final stresses

总收缩量 / $\epsilon_z^c \times 10^{-5}$	20	21	22	23	24	25
最终应力 $\sigma_z^s / \text{MPa}$	-311.279	-303.231	-287.133	-271.059	-255.015	-238.918
$\sigma_z^c / \text{MPa}$	-13.006	-13.112	-13.324	-13.536	-13.747	-13.959

以上结果与文献 [4] 提供加载 262 d 的实测结果  $\sigma_z^s = -269.4\text{ MPa}$ 、 $\sigma_z^c = -10.7\text{ MPa}$  相比, 以上结果是比较吻合的。

#### 4 结论

1) 本文理论分析结果表明, 收缩徐变产生的截面应力重分布不可忽视。由于考虑了混凝土的弹性后效及受钢管约束的徐变特性, 因此能更好地反映了实际情况, 与实验值对比为吻合。

2) 本文结果也再次证明了用内力叠加法来衡量受力状态是不合理的。

3) 从钢管应力最终结果的组成成份来看, 施工过程中产生的初应力和收缩应力最为显著, 徐变引起的应力影响较小 (相对以上两者), 这是因为含钢率较低的缘故 (相对于钢管混凝土拱桥), 万县长江大桥的实桥监测结果也证明了以上观点。由此不难看出, SRC 拱桥要上一个新台阶 (如 500 m 以上净跨), 必需解决的首要问题是减少施工过程中的产生初应力, 其次是解决混凝土收缩引起的应力, 从而就能保证 SRC 拱桥有足够的安全储备。另外, 对施工过程的稳定性及拱轴线的控制, 仍是至关重要的。

郑皆速院士对本文工作给予了热情指导并提出中肯的建议, 在此表示感谢。

#### 参考文献

[1] 顾安邦, 刘忠, 周水兴. 万县长江大桥混凝土时效和

几何、材料等非线性因素影响分析[J]. 重庆交通学院学报, 1999, 18(44): 1~7

[2] 郑皆连. 特大跨径 RC 拱桥悬拼合拢技术的探讨[J]. 中国公路学报, 1999, (1): 41~48

[3] 刘忠. 大跨径钢-混凝土复合桥梁的时间、几何、材料、温度非线性空间分析[D]. 上海: 同济大学, 1994

[4] 周水兴, 顾安邦. 大跨径劲性骨架钢筋混凝土拱桥徐变收缩时效分析[J]. 重庆交通学院学报, 1996, (1): 1~7

[5] 谢幼藩, 赵雷, 谢邦珠, 等. 用劲性骨架建造特大跨度钢筋混凝土拱桥的施工安全性分析[A]. 四川省公路学会桥梁学术研讨会论文集[C], 成都: 西南交通大学出版社, 1996. 46~53

[6] 杨雅华. 万县长江大桥主拱圈混凝土纵向浇筑程序的设计[A]. 四川省公路学会桥梁学术研讨会论文集[C]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996, 21~24

[7] 斯托鲁任科著. 伯君, 东奎. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982

[8] 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实验研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1987, (2): 10~24

[9] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 1994

[10] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987

[11] 秦荣. 计算结构非线性力学[M]. 南宁: 广西科技出版社, 1999

[12] 唐崇钊. 混凝土的徐变力学与试验技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 1982

## Theoretical Analysis of Creep and Shrinkage Effects in SRC Arch Bridge

Xie Xiaoli, Qin Rong, Peng Wenli, Deng Zhiheng

(Guangxi University, Nanning 530004, China)

[Abstract] In this paper, the concrete creep theory, compatibility equations, median theory and equilibrium conditions are used and the elastic aftereffect of concrete and creep shrinkage features of concrete restrained all around are considered to develop formulae of cross-section stress redistribution resulted from concrete creep and shrinkage. The formulae which are simple and convenient to use are applied to Wanxian Changjiang Bridge (420 m in span) for the model test analysis of creep and shrinkage. The obtained results are compared with those of model test and the agreement between them is very good. The main factors to affect the stress of this type of bridge are indicated.

[Key words] SRC arch bridge; creep and shrinkage; initial stress; stress redistribution.

---

## 碳纳米管研制香港科技大学居世界领先水平

由中国工程院院长宋健和中国科学院院长路甬祥等 485 位中国科学院院士、中国工程院院士投票选出的“2000 年世界十大科学进展”，香港榜上有名。香港这一席之地来自当今全球发展最迅速，竞争最激烈的纳米技术领域，由香港科技大学物理系两位博士研制出全球最细的纳米碳管。国际上最权威的英国《自然》杂志已经承认这一成果，美国权威的《化学材料新闻周刊》更把它列为去年四大材料发现之一。

香港科大物理系主任沈平教授介绍说，为什么科学家们对纳米技术那么着迷？因为当物质小到纳米级这个尺度时，就会出现完全不同的性质，好像是生物进化一样，产生无穷的变化。掌握了纳米技术，就等于建立了一个产业革命的新平台！

科大物理系一共有 26 位教师，他们有的来自香港本地，有的来自祖国内地，而沈教授作为诺贝尔物理奖得主费曼的弟子，来港之前已在美国开展了二三十年的研究工作。香港科大的最大突破就是研制出直径为 0.4 nm 的单壁碳管。所谓单壁纳米碳管，是由单原子的石墨（含碳元素）卷曲而成。1991 年，日本物理学家饭岛博士发现了纳米碳管，而如何合成出直径最细的纳米碳管同时又能保证其状态稳定，则是全球科学家所共同面对的挑战。

科大物理系汤子康博士，这个腼腆的浙江书生，经过无数的失败，有一天突然来了灵感：他巧妙地利用多孔沸石的微孔，让碳管在其中形成，就像把肉馅塞进莲藕里一样。结果，既保证了碳管的直径细小，又解决了碳管的稳定问题，它们都老实地呆在微孔之中。就这样，汤子康在 1998 年成功研制出尺寸最小、排列整齐并且大量存在的 0.4 nm 单壁碳管。

1999 年，当他们的论文发表在物理学界最重要的杂志《应用物理杂志》上，以前曾抱怀疑态度的外国科学家开始和他们联系，希望展开合作。

去年 11 月 2 日出版的《自然》杂志，刊登了由饭岛领导的一个日本研究小组的纳米碳管研究成果。饭岛在论文中指出，要研制出单壁、尺寸均一、排列整齐的 0.4 nm 碳管，仍旧是科学家所面临的挑战。

戏剧性的是，就在这同一页中，也刊登了汤子康和王宁的研究报告。文中令人信服地描述他们是如何研制出 0.4 nm 单壁碳管的，击败了这一挑战。杂志一问世，立即在国际上引起轰动，英国 BBC 等欧美传媒纷纷采访两位博士。