

文章编号:1673-2049(2013)03-0120-07

钢管混凝土拱桥收缩次内力计算

赖秀英,陈宝春

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

摘要:针对管内混凝土收缩会在钢管混凝土超静定拱中产生次内力,根据钢管混凝土拱的结构特性,提出了2种钢管混凝土拱收缩次内力计算方法——解析法和有限元法,并采用这2种计算方法对9个钢管混凝土拱桥实例进行分析。结果表明:2种方法均可用于计算钢管混凝土拱桥的收缩次内力,但采用等效降温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的解析法计算得到的收缩次内力较采用有限元法直接计算的收缩次内力大了50%以上;若采用等效降温的解析法计算,等效降温值还有待于进一步研究。

关键词:钢管混凝土拱桥;收缩;次内力;解析法;有限元法

中图分类号:U448

文献标志码:A

Calculation of Shrinkage Secondary Internal Force of CFST Arch Bridge

LAI Xiu-ying, CHEN Bao-chun

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: Aimed at the shrinkage of core concrete causing secondary internal force in the concrete-filled steel tubular (CFST) fixed arch, according to the structural properties of CFST arch, two methods were proposed to calculate the shrinkage secondary internal force, including analytical method and finite element method. The two methods were used to calculate the shrinkage secondary internal force of nine CFST arch bridges. The results show that both the two methods can be used to calculate the shrinkage secondary internal force of CFST arch bridge. But the results from the equivalent decreasing temperature of $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in analytical method are larger more 50% than the results calculated directly from the finite element method. If the analytical method of equivalent decreasing temperature will be used, the equivalent decreasing temperature values maybe research in the future.

Key words: concrete-filled steel tubular arch bridge; shrinkage; secondary internal force; analytical method; finite element method

0 引言

收缩是混凝土在无荷载作用下随时间增长产生的变形,是混凝土本身固有的属性。对于超静定混凝土拱,混凝土收缩会在拱内产生附加内力(次内力)。钢管混凝土拱桥多为超静定拱,管内混凝土的收缩也会产生附加内力,由于其截面是由钢管和管

内混凝土组成的组合截面,截面刚度、管内混凝土的收缩值计算均与普通混凝土拱有所不同。目前,中国与拱桥有关的公路桥梁设计规范^[1-3]中,尚无钢管混凝土拱桥设计计算的内容。在已颁布的有关钢管混凝土拱桥的地方行业标准^[4-5]中,也没有混凝土收缩次内力计算的相关规定。一般工程设计中,收缩次内力计算有沿用混凝土拱按降温考虑的计算方

收稿日期:2013-06-05

基金项目:住房和城乡建设部“2011年工程建设标准制订、修订计划”项目(2011-1-59)

作者简介:赖秀英(1986-),女,福建漳州人,工学博士研究生,E-mail:xiuyinglai@gmail.com。

法,也有用有限元程序直接计算混凝土收缩次内力。在文献[6],[7]中介绍的20个拱桥实例中,有12个提到了收缩次内力的计算,其中有5个桥例采用降温 15°C 的方法计算钢管混凝土的收缩次内力,其余7个采用有限元程序直接计算混凝土收缩次内力。然而,究竟这些计算方法的合理性如何,目前尚未见研究报道。为此,本文中笔者将对2种钢管混凝土拱的收缩次内力计算方法进行讨论,以提出参考性建议。

1 收缩次内力计算方法

1.1 计算方法简介

1.1.1 解析法

收缩属于变形问题,当超静定拱受到多余约束时,将产生次内力。对于一个三次超静定的无铰拱,其混凝土收缩引起的附加内力计算模型见图1,其中, H_s 为附加水平力, y_s 为拱结构的弹性中心至拱顶的竖向距离, l 为拱的计算跨径, Δl_s 为核心混凝土收缩引起拱在水平方向的变形。由结构力学理论可知,混凝土水平方向的收缩 Δl_s 在弹性中心处产生的附加水平力 H_s 可由典型方程式(1)求得,即

$$H_s = \frac{\Delta l_s}{\delta_{22}} \quad (1)$$

式中: δ_{22} 为柔度系数。

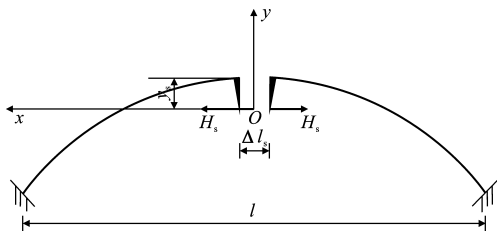


图1 混凝土收缩引起的附加内力计算模型

Fig.1 Calculation Model of Secondary Internal Force Caused by Concrete Shrinkage

混凝土收缩与温度下降均使拱肋产生缩短变形,所引起超静定拱次内力的力学原理相同,计算方法也相同,所以,解析法中多采用等效降温的方法来计算混凝土收缩次内力。

根据原公路桥规《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)^[8]可知:①整体浇筑的混凝土结构的收缩影响力,对于一般地区相当于降温 20°C ,干燥地区相当于降温 30°C ;整体浇筑的钢筋混凝土结构的收缩影响力,相当于降温 $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$;②分段浇筑的混凝土或钢筋混凝土结构的收缩影响力,相当于降温 $10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$;③装配式钢筋混凝土结构的

收缩影响力,相当于降温 $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

根据现行铁路桥规《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1—2005/J 460—2005)^[9]可知:对于整体浇筑的混凝土结构,相当于降低温度 20°C ;对于整体浇筑的钢筋混凝土结构,相当于降低温度 15°C ;对于分段浇筑的混凝土或钢筋混凝土结构,相当于降低温度 10°C ;对于装配式钢筋混凝土结构,相当于降低温度 $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

以等效降温值代入式(1)计算出附加水平力 H_s 后,可由式(2)计算出其在拱结构中任意截面产生的附加内力,具体计算方法参见文献[10],[11]

$$\left. \begin{aligned} M_s &= -H_s y = -H_s (y_s - y_1) \\ N_s &= H_s \cos(\varphi) \\ Q_s &= \pm H_s \sin(\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: M_s 为核心混凝土收缩在拱结构任意截面产生的附加弯矩; N_s 为核心混凝土收缩在拱结构任意截面产生的附加轴力; Q_s 为核心混凝土收缩在拱结构任意截面产生的附加剪力; y 为拱结构的弹性中心至任意截面的竖向距离; y_1 为拱顶至拱结构任意截面的竖向距离; φ 为拱结构任意截面在拱轴切线方向与水平方向的夹角。

1.1.2 有限元法

混凝土收缩次内力的计算也可以直接通过有限元程序进行。计算中,最主要的问题是确定混凝土的收缩值。

收缩变形的大小与混凝土的组成和所处的环境条件有关,各国进行了大量的研究。然而,由于混凝土材料组成比较复杂,影响混凝土收缩的因素众多,不同条件、不同材料都会引起混凝土收缩变形的差异,因此,目前有较多的混凝土收缩计算模型。常见的模型有 CEB-FIP MC90, ACI 209R-92, Gardner 和 Lockman, Bazant B3, Sakata, BP-2 和 BP-KX 等。中国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ D62—2004)中采用的混凝土收缩计算模型是 CEB-FIP MC90 模型。

1.2 收缩次内力计算

钢管混凝土超静定拱由于混凝土收缩引起的次内力计算,目前也有2种方法:①按等效降温的解析法;②有限元法。这2种计算方法的原理与普通混凝土均相同,但是需要考虑钢管混凝土拱组合截面的特性。

1.2.1 解析法

(1)拱肋刚度

在计算柔度系数 δ_{22} 时要用到钢管混凝土拱肋

的轴压与弯曲刚度。有关钢管混凝土的轴压与弯曲刚度,已有大量的研究,各国的规范规定也有所不同,轴压刚度一般考虑将钢管与混凝土的轴压直接相加;而对于弯曲刚度,则在混凝土弯曲刚度是否折减及折减值的取值上有所不同^[12-14]。对于超静定结构的次内力计算,刚度越大,则次内力也越大,所以不考虑混凝土刚度折减的计算是偏安全的。福建省地方标准 DBJ/T 13-136—2011 中规定,内力计算时拱肋截面弯曲刚度采用钢管与混凝土直接相加法计算。笔者后面的收缩次内力计算中,拱肋轴压 $(EA)_{sc}$ 与弯曲刚度 $(EI)_{sc}$ 按式(3),(4)计算,即采用钢管与混凝土直接相加法计算

$$(EA)_{sc} = E_s A_s + E_c A_c \quad (3)$$

$$(EI)_{sc} = E_s I_s + E_c I_c \quad (4)$$

式中: E_s 为钢材弹性模量; E_c 为混凝土弹性模量; A_s 为钢管混凝土单圆管截面钢管面积; A_c 为钢管混凝土单圆管截面混凝土面积; I_s 为钢管混凝土单圆管截面钢管惯性矩; I_c 为钢管混凝土单圆管截面混凝土惯性矩。

(2) 等效降温法计算的线膨胀系数

采用等效降温法计算收缩次内力时,钢管混凝土拱肋截面轴线方向的线膨胀系数需要考虑其组合截面的特性,可按式(5)计算

$$\alpha = \frac{\alpha_s A_s + \alpha_c A_c}{A_s + A_c} \quad (5)$$

式中: α 为钢管混凝土拱肋截面沿轴线方向的线膨胀系数; α_s 为钢材线膨胀系数,取 1.2×10^{-5} ; α_c 为混凝土材料线膨胀系数,取 1.0×10^{-5} 。

(3) 等效降温值

将收缩次内力等效成降温来计算时,式(1)中的 Δl_s 可表示为

$$\Delta l_s = \Delta l_t = \alpha \Delta t l = \epsilon_{sh} l \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{\epsilon_{sh}}{\alpha} \quad (7)$$

式中: Δt 为等效降温值; ϵ_{sh} 为核心混凝土收缩应变。

本文中根据文献[6]~[9]中的参数取值,按照降温 $15^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 计算收缩次内力。

1.2.2 有限元法

(1) 双单元模型

钢管混凝土是由外包钢管和核心混凝土组成的组合截面,采用有限元程序进行钢管混凝土收缩次内力计算时需要分别建立钢管单元和核心混凝土单元,两者在节点处协调变形,即同节点双单元模型。采用双单元模型建模进行有限元计算时,可以在软

件中直接设置混凝土单元的依时特性,输入混凝土收缩应变模型,从而计算出收缩变形和收缩次内力。

(2) 单单元模型

单单元模型是将外包钢管与核心混凝土看成一个组合截面,只建立一个钢管混凝土单元,将钢管混凝土等效成一种材料进行计算。

在钢管与核心混凝土完全粘结的情况下,钢管混凝土截面的平均收缩引起超静定结构的次内力。对于一端固接、一端自由的钢管混凝土构件,假设核心混凝土在无约束状态下的自由收缩变形为 Δ_c ,由于外包钢管的存在,钢管混凝土的收缩变形为 Δ_{sc} ,如图2所示,根据力的平衡原理可得

$$E_c A_c \frac{\Delta_c - \Delta_{sc}}{L} = E_s A_s \frac{\Delta_{sc}}{L} \quad (8)$$

$$\Delta_{sc} = \frac{E_c A_c}{E_s A_s + E_c A_c} \Delta_c \quad (9)$$

式中: L 为构件的计算长度。

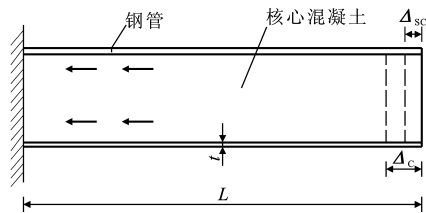


图2 钢管混凝土收缩变形示意

Fig. 2 Shrinkage Deformation Diagram of CFST

由 Δ_{sc} 可以求得超静定拱的多余内力。

采用单单元模型计算时不能考虑核心混凝土与钢管的相互作用,可根据式(9)计算得到钢管混凝土的收缩变形来计算钢管混凝土拱的收缩次内力。

对于普通超静定混凝土拱,混凝土的收缩作用会引起拱结构产生次内力,而对于钢管混凝土拱,拱肋截面由核心混凝土和钢管组成,核心混凝土的收缩作用还会引起拱肋截面的非线性应力。由于钢管与核心混凝土的相互作用限制了混凝土的自由收缩,从而导致核心混凝土产生拉应力;钢管与核心混凝土协调变形导致钢管产生压应力。由图2中的构件,可以得到钢管和核心混凝土的应力分别为

$$\sigma_{sh,c} = \frac{\Delta_c - \Delta_{sc}}{L} E_c \quad (10)$$

$$\sigma_{sh,s} = \frac{\Delta_{sc}}{L} E_s \quad (11)$$

式中: $\sigma_{sh,c}$ 为收缩引起的核心混凝土拉应力; $\sigma_{sh,s}$ 为收缩引起的钢管压应力。

图2中混凝土的自由收缩变形 Δ_c 可由混凝土收缩模型计算得到。有限元程序中有多种收缩模型

可供选择,但都是沿用普通混凝土的收缩模型。常规的混凝土结构暴露在大气环境中,除了混凝土自身的水化反应引起收缩外,还存在混凝土水分丢失而引起的干燥收缩。对于钢管混凝土中的管内混凝土,外包钢管使其处于密闭环境中,与大气环境没有发生湿度交换,混凝土自身的化学收缩是主要收缩,干燥收缩不存在或极小,可忽略不计。因此,外包钢管的约束作用与密闭环境使得钢管混凝土的收缩变形远小于普通混凝土。混凝土的收缩与徐变密切相关,各国已开展了以徐变为主的钢管混凝土的收缩徐变试验研究,结果表明,在众多模型中,ACI 209R-92 模型的收缩徐变预测值与试验值更加接近,为此,DBJ/T 13-136—2011 中的管内混凝土收缩徐变计算模型推荐采用 ACI 209R-92 模型,文献[13]中的算例均采用了此模型。因此,目前在钢管混凝土拱的收缩计算时,主要有 2 种计算模型,即 CEB-FIP MC90 模型和 ACI 209R-92 模型。

2 收缩次内力计算实例分析

2.1 计算方法

根据第 1 节所述,计算钢管混凝土拱收缩次内力的方法有 2 种,本文中采用这 2 种方法对 3 个钢管混凝土拱桥实例进行计算,并做对比分析。计算时,分别采用降温 15℃~20℃和按混凝土收缩模型(ACI 209R-92 模型和 CEB-FIP MC90 模型)直接计算管内混凝土收缩应变的方法计算钢管混凝土拱桥的收缩次内力。

2.2 实例基本资料

本文中采用桥梁设计软件 MIDAS/Civil 对 9 个钢管混凝土拱桥进行收缩次内力计算。计算实例中包括单圆管截面钢管混凝土拱桥、哑铃形桁式截面钢管混凝土拱桥和四肢(六肢)桁式截面钢管混凝土拱桥,桥梁资料如表 1 所示。

2.3 收缩次内力计算

钢管混凝土拱肋充填的混凝土要求具有自密实混凝土的性能,即流动性高、扩展性好、不分层离析、坍落度经时损失小且要缓凝。进行收缩次内力计算时,ACI 209R-92 模型的计算参数取值为:混凝土强度等级按各实例实际情况取值,坍落度 220 mm,细骨料质量分数 38%,体积-面积比按各个拱桥实例实际管径计算,水泥密度 500 kg·m⁻³,空气体积分数 2.5%,环境相对湿度 90%,开始收缩时混凝土龄期为 1 d;CEB-FIP MC90 模型的参数取值为:开始时混凝土收缩龄期 1 d,年平均环境相对湿度 90%,构件理论厚度按实际取值(由程序自动计算),混凝土强度等级按各桥例实际情况取值。按收缩模型直接计算钢管混凝土收缩次内力时,收缩与时间有关,因此,本文中收缩次内力分析时间从拱肋空钢管合龙后开始计算至成桥后 3 650 d。

采用双单元模型建立钢管混凝土拱桥有限元模型,核心混凝土单元和钢管单元共节点双单元,两者在节点处变形协调。混凝土的收缩与时间有关,计算时对钢管混凝土拱桥进行施工阶段划分,各计算实例均分为假设空钢管阶段、各拱肋一次性浇筑混凝土阶段、桥面系施工阶段和成桥 3 650 d 阶段。钢管混凝土拱肋各构件均采用梁单元模拟,采用等效降温计算时温度荷载按照梁单元荷载施加,即同时在混凝土单元和钢管单元上施加相同的降温值,本文中为了方便比较分析,计算时采用降温 15℃和 20℃两种工况。

以重庆巫峡长江大桥为例,全桥共 4 414 个节点,共划分 8 974 个单元,其中,钢管混凝土拱肋的弦杆划分为 992 个梁单元;拱肋的上、下平联和上、下弦杆间的腹杆共 3 244 个梁单元;拱肋横撑共 1 404 个梁单元;吊杆共 56 个杆单元;拱上建筑共 2 876 个梁单元;拱脚采用固接约束,其空间有限元

表 1 钢管混凝土拱桥收缩次内力计算

Tab. 1 Calculations of Shrinkage Secondary Internal Force of CFST Arch Bridge						
序号	桥名	跨径/m	矢跨比	结构形式	拱肋截面形式	管内混凝土强度等级
1	群益大桥	46	1/3	中承式	单圆管	C30
2	深圳北站桥	150	1/4.5	下承式	四肢桁式	C50
3	漳州西洋坪大桥	40+150+40	1/5	飞鸟式	横哑铃桁式	C50
4	河南蒲山特大桥	219	1/5	下承式	四肢(六肢)桁式	C55
5	广东东莞水道大桥	50+280+50	1/5	飞鸟式	四肢桁式	C50
6	广州丫髻沙大桥	76+360+76	1/4.5	飞鸟式	六肢桁式	C60
7	总溪河大桥	360	1/5.217	上承式	四肢桁式	C55
8	重庆巫峡长江大桥	492	1/3.8	中承式	四肢桁式	C60
9	四川合江长江一桥	530	1/4.5	中承式	四肢桁式	C60

模型如图 3 所示。

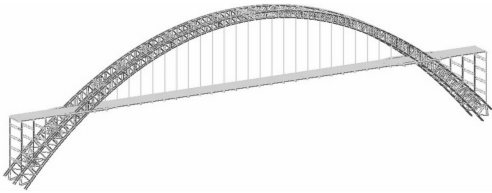


图 3 重庆巫峡长江大桥有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Chongqing Wuxia Yangtze River Bridge

2.4 计算结果分析

对 9 个钢管混凝土拱桥实例采用解析法和有限元法分别计算收缩次内力,提取拱脚处、 $L/4$ 截面处和拱顶截面处的内力结果及拱顶处位移,结果如表 2~4 所示。

从表 2~4 可以看出,在混凝土收缩作用下,桁式截面钢管混凝土拱肋上、下弦管在拱脚处的受力状况为上弦管受拉、下弦管受压;拱顶处则表现为上弦管受压、下弦管受拉;而西洋坪大桥和东莞水道桥在拱脚处的受力状况为上、下弦管均受拉,这是由于这 2 座桥在拱脚段上、下弦管之间填充混凝土以加大其刚度,从而在收缩作用下拱脚段产生的弯曲变形较小,没有形成上、下弦管一拉一压的受力状态。

此外,从表 2~4 还可以看出,采用等效降温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 计算钢管混凝土拱收缩次内力时,其下限值降温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 计算的结果比 2 种收缩模型的计算结果大很多。以上弦管及 ACI 209R-92 模型为例,采用降温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 计算的收缩次内力及收缩变形均比采用 ACI 209R-92 模型计算的结果增大了 50 %

表 2 采用 2 种计算方法计算的拱肋控制截面轴力比较

Tab. 2 Comparisons of Axial Force at Arch Rib Control Section for Two Calculation Methods

桥名	位置	解析法计算的轴力/kN				有限元法计算的轴力/kN				$\frac{F_1-F_2}{F_1}/\%$
		等效降温 15 ℃		等效降温 20 ℃		ACI 209R-92 模型		CEB-FIP MC90 模型		
		上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	
群益大桥	拱脚	11.4		15.2		4.8		5.5		57.9
	L/4	23.9		31.9		7.4		10.9		69.0
	拱顶	22.1		29.5		7.2		10.1		67.4
深圳北 站桥	拱脚	681.6	-116.1	908.8	-154.8	328.3	-35.7	308.8	-47.9	51.8
	L/4	-46.3	93.8	-61.7	125.08	-26.4	47.7	-21.9	43.1	43.0
	拱顶	-176.8	277.7	-235.8	370.2	-82.6	131.0	-79.5	125.2	53.3
漳州西洋 坪大桥	拱脚	2 100.2	-1 918.0	2 800.3	-2 557.4	882.2	-811.5	868.4	-799.4	58.0
	L/4	-122.8	437.5	-163.7	583.3	-48.4	184.5	-47.5	181.9	60.6
	拱顶	-738.5	1 256.7	-984.7	1 675.6	-314.1	537.8	-309.8	530.6	57.5
河南蒲山 特大桥	拱脚	152.9	191.7	203.9	255.6	34.6	578.3	-30.8	188.7	77.4
	L/4	-967.4	1 311.7	-1 289.9	1 748.9	-54.0	516.3	-316.9	434.8	94.4
	拱顶	-1 050.5	1 890.3	-1 400.7	2 520.3	-56.9	689.8	-347.8	640.4	94.6
广东东莞 水道大桥	拱脚	8 684.2	8 673.0	11 578.9	11 564.0	3 842.0	3 475.2	3 291.2	3 286.5	55.8
	L/4	345.2	85.0	460.3	113.4	134.7	23.5	133.9	31.3	61.0
	拱顶	-1 062.5	1 969.9	-1 416.7	2 626.5	-373.1	719.0	-404.9	755.5	64.9
广州丫髻 沙大桥	拱脚	3 714.4	-3 244.9	4 952.6	-4 326.6	1 843.9	-1 610.9	1 171.9	-1 023.9	50.4
	L/4	-148.1	416.9	-197.5	559.0	-73.6	208.1	-46.7	131.6	50.3
	拱顶	-1 146.9	1 666.8	-1 529.2	2 222.3	-569.4	827.4	-361.9	525.9	50.4
总溪河 大桥	拱脚	4 657.9	-109.5	6 210.6	-146.0	572.1	-647.2	304.5	-946.9	87.7
	L/4	229.7	343.1	306.3	457.4	30.2	110.4	25.9	122.8	86.9
	拱顶	-195.6	1 481.6	-260.8	1 975.4	-260.8	452.4	-183.5	463.3	-33.3
重庆巫峡 长江大桥	拱脚	1 470.8	-790.1	1 961.0	-1 053.4	579.4	-349.6	496.2	-286.8	60.6
	L/4	241.1	-14.2	321.4	-18.9	59.8	0.4	71.9	-5.3	75.2
	拱顶	-709.7	1 026.5	-946.2	1 368.6	-185.7	270.7	-205.8	298.9	73.8
四川合江 长江一桥	拱脚	2 802.1	-2 123.7	3 736.2	-2 831.6	957.6	-622.6	1 102.0	-609.1	65.8
	L/4	300.4	16.1	400.5	21.4	161.1	-59.4	160.0	-53.5	46.4
	拱顶	-1 016.8	1 459.8	-1 355.7	1 946.4	-245.3	385.9	-269.1	415.7	75.9

注: F_1 为等效降温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的上弦轴力; F_2 为 ACI 209R-92 模型计算的上弦轴力。

表 3 采用 2 种计算方法计算的拱肋控制截面弯矩比较

Tab. 3 Comparisons of Bending Moment at Arch Rib Control Section for Two Calculation Methods										
桥名	位置	解析法计算的弯矩/(kN·m)				有限元法计算的弯矩/(kN·m)				$\frac{M_1-M_2}{M_1}/\%$
		等效降温 15 ℃		等效降温 20 ℃		ACI 209R-92 模型		CEB-FIP MC90 模型		
		上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	上弦	下弦	
群益大桥	拱脚	-100.3		-133.7		-38.2		-47.2		61.9
	L/4	11.6		15.5		5.6		5.7		51.7
	拱顶	31.1		41.5		15.7		15.5		49.5
深圳北 站桥	拱脚	-51.2	-44.3	-68.2	-59.1	-25.1	-22.1	-23.3	-20.3	51.0
	L/4	2.9	0.4	3.9	0.5	1.4	0.3	1.4	0.2	51.7
	拱顶	61.2	56.4	81.6	75.2	32.4	29.8	28.4	26.2	47.1
漳州西洋 坪大桥	拱脚	-103.6	-146.1	-138.2	-194.8	-40.7	-57.4	-39.8	-56.2	60.7
	L/4	8.4	-3.2	11.2	-4.3	3.4	-1.6	3.4	-1.6	59.5
	拱顶	232.3	208.0	309.7	277.4	99.7	89.3	98.4	88.2	57.1
河南蒲山 特大桥	拱脚	482.5	566.1	643.4	754.8	256.0	450.9	197.9	292.9	46.9
	L/4	42.5	34.3	56.7	45.8	15.6	25.8	17.1	19.0	63.3
	拱顶	62.4	57.1	83.2	76.2	3.8	22.1	19.9	22.5	93.9
广东东莞 水道大桥	拱脚	-54.2	-53.7	-72.3	-71.6	-49.4	-49.3	-25.7	-25.5	8.9
	L/4	-27.3	-33.3	-36.5	-44.4	-10.8	-13.1	-10.6	-12.9	60.4
	拱顶	232.5	236.6	309.9	315.4	93.7	95.4	90.7	92.3	59.7
广州丫髻 沙大桥	拱脚	102.3	15.0	136.3	20.1	50.8	7.5	32.3	4.7	50.3
	L/4	-12.7	-12.9	-16.9	-17.2	-6.3	-6.4	-3.9	-4.1	50.4
	拱顶	7.6	5.2	10.1	6.9	3.8	2.6	2.4	1.6	50.0
总溪河 大桥	拱脚	-45.8	-340.2	-61.1	-453.6	-56.4	-42.6	-89.5	-15.6	-23.1
	L/4	-144.8	-0.3	-193.1	-0.4	-7.8	-1.0	-24.3	0.3	94.6
	拱顶	248.0	202.4	330.7	269.8	57.9	48.2	56.7	46.6	76.7
重庆巫峡 长江大桥	拱脚	79.7	-126.9	106.2	-169.2	4.1	-49.9	17.5	-40.3	94.9
	L/4	-28.3	-42.2	-37.7	-56.2	-8.3	-11.9	-8.5	-12.5	70.7
	拱顶	249.9	227.4	333.2	303.2	75.3	68.1	74.7	67.9	69.9
四川合江 长江一桥	拱脚	-91.9	-127.4	-122.6	-169.8	-39.2	77.5	-62.4	120.1	57.3
	L/4	13.4	0.8	17.8	1.1	1.3	-2.4	2.2	-1.8	90.3
	拱顶	349.9	327.2	466.6	436.2	101.8	94.9	99.8	92.8	70.9

注:M₁ 为等效降温 15 ℃时的上弦弯矩;M₂ 为 ACI 209R-92 模型计算的上弦弯矩。

表 4 采用 2 种计算方法计算的拱肋、拱顶截面位移比较

Tab. 4 Comparisons of Displacement at Arch Rib and Crown Section for Two Calculation Methods					
桥名	解析法计算的位移/mm		有限元法计算的位移/mm		$\frac{S_1-S_2}{S_1}/\%$
	等效降温 15 ℃	等效降温 20 ℃	ACI 209R-92 模型	CEB-FIP MC90 模型	
群益大桥	−7.2	−9.7	−3.4	−3.6	52.8
深圳北站桥	−29.8	−39.7	−15.1	−13.7	49.3
漳州西洋坪大桥	−33.2	−44.3	−14.1	−13.9	57.5
河南蒲山特大桥	−41.3	−55.1	−10.3	−13.7	75.1
广东东莞水道大桥	−56.9	−75.8	−22.5	−22.1	60.5
广州丫髻沙大桥	−78.9	−105.3	−39.2	−24.9	50.3
总溪河大桥	−86.7	−115.6	−19.1	−19.2	78.0
重庆巫峡长江大桥	−98.5	−131.3	−29.1	−29.2	70.5
四川合江长江一桥	−119.9	−159.9	−35.6	−33.6	70.3

注:S₁ 为等效降温 15 ℃时的位移;S₂ 为 ACI R209-92 模型计算的位移。

以上,等效降温 20 ℃就更大了,而 ACI 209R-92 模型和 CEB-FIP MC90 模型已经偏于保守。此外,2 种

收缩计算模型的计算结果相差不大,可见计算钢管混凝土拱桥由于收缩产生的次内力时,2 种模型均可以采用,而等效降温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的值偏大。

3 结 语

钢管混凝土收缩引起的次内力可以通过解析法和有限元法计算求得,根据对 9 个钢管混凝土拱桥实例进行分析得出,采用原公路桥规《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)中推荐的等效降温 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 计算收缩次内力时结果偏大,在没有更可靠的计算资料时,直接计算可以采用 ACI 209R-92 模型或 CEB-FIP MC90 模型计算管内混凝土的收缩次内力。若采用等效降温计算,等效降温值还有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] JTJ D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].
JTJ D60—2004,General Code for Design of Highway Bridges and Culverts[S].
- [2] JTJ D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
JTJ D62—2004,Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts[S].
- [3] JTJ D61—2005,公路圬工桥涵设计规范[S].
JTJ D61—2005,Code for Design of Highway Masonry Bridges and Culverts[S].
- [4] DBJ/T 13-136—2011,钢管混凝土拱桥技术规程[S].
DBJ/T 13-136—2011,Technical Specification for Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges[S].
- [5] CQJTG/T D66—2011,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
CQJTG/T D66—2011,Code for Design of Highway Concrete-filled Steel Tube Arch Bridges[S].
- [6] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一)[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
CHEN Bao-chun. Case Sets of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges; The First Volume[M]. Beijing:China Communications Press,2002.
- [7] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(二)[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
CHEN Bao-chun. Case Sets of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges; The Second Volume[M]. Beijing:China Communications Press,2008.
- [8] JTJ 021—89,公路桥涵设计通用规范[S].
JTJ 021—89,General Code for Design of Highway Bridges and Culverts[S].
- [9] TB 10002.1—2005/J 460—2005,铁路桥涵设计基本规范[S].
TB 10002.1—2005/J 460—2005,Fundamental Code for Design on Railway Bridge and Culvert[S].
- [10] 顾懋清,石绍甫. 公路桥涵设计手册——拱桥(上册)[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
GU Mao-qing,SHI Shao-fu. Design Manual of Highway Bridges—Arch Bridge; The First Volume[M]. Beijing:China Communications Press,2000.
- [11] 顾安邦,孙国柱. 公路桥涵设计手册——拱桥(下册)[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
GU An-bang,SUN Guo-zhu. Design Manual of Highway Bridges—Arch Bridge; The Second Volume[M]. Beijing:China Communications Press,2000.
- [12] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,2007.
CHEN Bao-chun. Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges[M]. 2nd ed. Beijing:China Communications Press,2007.
- [13] 陈宝春,韦建刚,吴庆雄. 钢管混凝土拱桥技术规程与设计应用[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
CHEN Bao-chun,WEI Jiang-gang,WU Qing-xiong. Technical Specification for Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge and Design Applications [M]. Beijing:China Communications Press,2011.
- [14] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
ZHONG Shan-tong. Structure of Concrete Filled Steel Tube [M]. Beijing:Tsinghua University Press,2003.