

文章编号: 1000-5013(2012)02-0188-04

# 脱粘对钢管混凝土拱温度应力及内力影响分析

刘振宇, 郭子雄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 选取钢管混凝土单圆管拱、哑铃型拱和桁拱 3 座桥例为工程背景, 结合有限元法, 分析脱粘对温度应力及内力的影响. 研究表明: 脱粘使得夏季的平均温度降低, 冬季的平均温度升高, 但总体上脱粘与无脱粘的平均温度相差很小; 脱粘使得钢管的温度自应力增大, 核心混凝土的温度自应力减小, 且超过拱肋自重产生的应力, 因此钢管混凝土拱桥温度应力的计算要考虑脱粘的影响. 此外, 脱粘对钢管混凝土单圆管拱、哑铃形拱的温度内力基本上没有影响, 对桁拱的温度内力有较大的影响.

**关键词:** 桥梁工程; 钢管混凝土; 拱; 脱粘; 温度应力

**中图分类号:** U 441.5

**文献标志码:** A

钢管混凝土拱作为组合结构, 钢管与管内混凝土能否共同工作, 发挥组合作用, 是桥梁界工程师十分关注的一个问题. 工程实践表明, 大量的钢管混凝土拱桥在运营若干年后, 拱肋内部存在着不同程度的钢管与混凝土脱粘的现象, 脱粘使钢管与混凝土的组合作用受到质疑, 成为钢管混凝土拱桥中研究的一个热点与难点. 对于钢管混凝土拱脱粘问题已有一些研究成果<sup>[1-4]</sup>, 如在自然环境温度变化影响下, 钢管混凝土拱截面极易发生脱粘, 脱粘使得钢管混凝土拱的受力模式发生变化, 进而对内力和应力产生影响. 文献[5]提出了钢管混凝土拱桥温度应力计算的基本方法, 但没有进行实际结构的计算分析. 文献[6]对钢管混凝土单圆管拱和桁式拱 2 座桥例的温度应力进行分析, 指出钢管混凝土拱桥的温度应力值与拱肋自重产生的应力相当. 文献[7-9]仅分析了线性温度变化下的温度应力. 这些研究均建立在钢管与混凝土完全粘结的情况下, 而实际工程中钢管混凝土拱可能发生脱粘, 钢管与混凝土的受力模式将发生变化, 因此脱粘对钢管混凝土拱温度应力和内力的影响有多大还是个值得研究的问题. 本文以 3 座钢管混凝土拱桥为工程背景, 进行脱粘对钢管混凝土拱的温度应力和温度次内力的影响分析.

## 1 有限元分析方法<sup>[10]</sup>

进行温度应力的计算, 拱肋单元的划分可以采用实体单元, 但对于复杂的结构, 需要太多的消耗. 实际应用中, 一般将非线性的温度场分解为“等效线性温度场”和“等效非线性温度场”, 二者产生的温度应力之和就是总的温度应力.

“等效线性温度场”产生温度次内力(应力), 即截面平均温度变化在超静定拱中产生的内力, 可采用杆系结构求解, 使问题得到简化. 对于无脱粘的情况, 拱肋结构模型采用双单元法建立, 即钢管单元和混凝土单元共用节点, 分别赋予钢材和混凝土的材料属性. 对于脱粘的情况, 由于引起脱粘的机理复杂, 很难准确确定脱粘的具体范围和脱粘厚度, 为研究方便, 假定钢管与混凝土界面沿钢管混凝土拱肋纵向、环向全部脱粘, 钢管与混凝土之间的摩擦力为 0. 具体建模时, 在钢管与混凝土单元之间沿  $y$  方向设置一刚度很大的弹簧来模拟二者之间的相互作用.

“等效非线性温度场”产生的应力称为温度自应力, 它在截面上不产生附加内力(应力自平衡). 计算时只需针对各个具体截面, 而不要进行结构计算. 由温度场的计算结果提取出截面上各单元的温度, 由

收稿日期: 2011-10-11

通信作者: 刘振宇(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事钢-混凝土组合结构的研究. E-mail: lzzyu@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2011J05134); 华侨大学高层次人才科研启动项目(10BS318)

平截面假定, 求出各单元的温度自应力.

## 2 算例分析

### 2.1 桥例及有限元模型

选取福建省的福安群益单圆管肋拱桥、泉州百崎湖哑铃型肋拱桥、漳州西洋坪桁肋拱桥 3 座钢管混凝土拱桥为工程背景进行计算分析. 其中: 群益大桥为单跨 46 m 的钢管混凝土中承式单圆管肋拱; 百崎湖大桥为 3 跨下承式系杆拱, 主孔跨径为 80 m, 拱肋截面为哑铃形; 西洋坪大桥为 3 跨飞鸟式钢管混凝土桁肋拱桥, 主孔跨径为 150 m, 拱肋截面为桁式拱肋. 3 个算例桥梁的详细资料参见文献[2, 11-12].

拱肋的材料组成、气象资料均采用漳州西洋坪大桥的资料. 钢管的初始温度取 15.0 °C, 即西洋坪大桥钢管合拢时的温度, 混凝土初始温度取 25.3 °C, 即西洋坪大桥第 1 根弦管混凝土浇筑完成时的温度. 不失一般性地选取脱粘空隙为 1 mm 进行脱粘对温度次内力和自应力的影响分析. 应用通用程序 ANSYS 建立有限元计算模型, 拱肋采用 BEAM 188 梁单元来模拟, 弹簧采用 COMBIN 39 单元来模拟. 图 1 是 3 座钢管混凝土拱桥的有限元模型. 有限元分析中, 钢的泊松比  $\nu_s$  为 0.286, 混凝土的泊松比  $\nu_c$  为 0.167, 钢的线膨胀系数  $\alpha_s$  为  $1.2 \times 10^{-5}$ , 混凝土

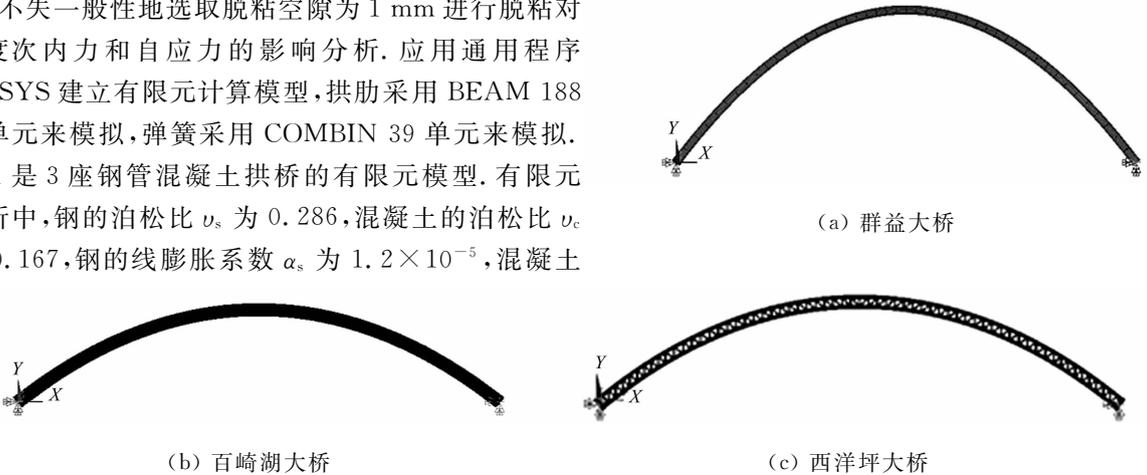


图 1 3 座钢管混凝土拱桥的有限元模型  
Fig.1 FE model of three CSFT arch bridges

的线膨胀系数  $\alpha_c$  为  $1.0 \times 10^{-5}$  [13].

### 2.2 计算工况及对应的平均温度值

根据可能产生最不利的情况, 选取了 2 个工况.

1) 工况 1. 由于夏季截面正温差最大, 将 2007 年 7 月份的气象资料带入进行温度场计算, 由温度场的计算结果可知 2007 年 7 月 17 日下午 14:00, 截面的正温差达到最大.

2) 工况 2. 由于冬季截面负温差最大, 故将 2008 年 1 月份的气象资料带入进行温度场计算, 由温度场的计算结果可知 2008 年 1 月 2 日上午 6:00, 截面的负温差达到最大. 由于实桥温度场测试没有

观测到夏季和冬季最不利的情况, 因此, 工况 1 和工况 2 的分析均采用气象资料. 表 1 是拱肋截面在两种工况下的平均温度值. 由表 1 可以看出: 脱粘使得夏季的平均温度降低, 冬季的平均温度升高, 但总体上脱粘与无脱粘的平均温度相差很小.

表 1 拱肋截面各工况下的平均温度

Tab.1 Average temperature of arch rib in each case °C

拱肋	无脱粘		脱粘	
	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
群益大桥	36.90	6.53	36.66	6.88
百崎湖大桥	36.48	7.01	36.64	7.38
西洋坪大桥	36.02	6.35	35.57	6.47

### 2.3 脱粘对温度应力及温度内力的影响

2.3.1 非线性温度自应力分析 表 2 分别给出群益大桥、百崎湖大桥和西洋坪大桥各工况下拱肋截面温度自应力极值. 由表 2 可看出, 脱粘使得钢管的自应力增大, 核心混凝土的自应力减小. 由表 2 可见: 对于群益大桥, 无脱粘时钢管表面的最大压应力可达 -33.14 MPa, 脱粘时的最大压应力可达 -40.51 MPa, 均大于自重产生的压应力 -10.31 MPa; 对于百崎湖大桥, 无脱粘时钢管表面的最大压应力可达 -34.90 MPa, 脱粘时的最大压应力可达 -41.51 MPa, 均超过了拱肋的自重应力 -12.07 MPa; 对于西洋坪大桥, 无脱粘时钢管表面的最大压应力可达 -31.53 MPa, 脱粘时的最大压应力可达 -36.81 MPa, 均超过了拱肋的自重应力 -22.09 MPa. 对比分析可以看见: 脱粘时的最大应力增大, 因此, 钢管

混凝土拱桥的温度自应力的计算要考虑脱粘的影响.

表2 各工况下3座样桥的温度自应力极值

Tab.2 Thermal stress of three bridges in each case

MPa

材料	应力	群益大桥					百崎湖大桥				
		无脱粘		脱粘		自重应力	无脱粘		脱粘		自重应力
		工况1	工况2	工况1	工况2		工况1	工况2	工况1	工况2	
钢管	压应力	-33.14	—	-40.51	—	-10.31	-34.90	-1.70	-41.51	-0.57	-12.07
	拉应力	—	3.34	—	5.58	2.21	0.58	4.80	0.49	6.75	—
混凝土	压应力	-4.17	-0.94	-3.47	-0.86	-1.88	-4.17	-1.12	-2.90	-1.11	-2.15
	拉应力	0.78	0.39	0.87	0.16	0.47	0.93	0.69	0.99	0.41	—

材料	应力	西洋坪大桥									
		上弦(工况1)		下弦(工况1)		自重应力	上弦(工况2)		下弦(工况2)		自重应力
		无脱粘	脱粘	无脱粘	脱粘		无脱粘	脱粘	无脱粘	脱粘	
钢管	压应力	-31.53	-36.81	-22.33	-3.10	—	—	—	—	—	-22.09
	拉应力	—	—	—	—	2.83	4.84	2.84	4.83	—	—
混凝土	压应力	-4.87	-3.56	-3.23	-2.18	-1.44	-1.15	-1.18	-1.15	-3.10	—
	拉应力	1.07	0.93	1.33	1.00	1.32	0.83	1.32	0.92	—	—

2.3.2 等效线性温度场引起的温度内力分析 表3是群益大桥、百崎湖大桥和西洋坪大桥各工况下的温度内力值.由表3可以看出:脱粘与无脱粘时,群益大桥、百崎湖大桥的温度内力基本上相同,脱粘对单圆管拱和哑铃型拱的温度内力没有影响;西洋坪大桥无脱粘的温度内力值大于脱粘时的内力值,即脱粘使得钢管混凝土桁拱的温度次内力减小.

表3 各工况下3座样桥的温度内力值

Tab.3 Internal thermal force of three bridges in each case

桥例	部位	材料	参数	工况1		工况2	
				无脱粘	脱粘	无脱粘	脱粘
群益大桥	拱脚	钢管	M/kN·m	28.32	28.04	-28.66	-28.10
		混凝土	M/kN·m	33.27	32.84	-33.67	-32.94
		钢管	N/kN	-711.66	-710.42	-415.80	-423.10
		混凝土	N/kN	707.70	706.51	419.80	427.02
	拱顶	钢管	M/kN·m	-17.91	-17.67	18.13	17.71
		混凝土	M/kN·m	-20.22	-20.03	20.46	20.09
		钢管	N/kN	-712.42	-697.95	-415.03	-413.74
		混凝土	N/kN	705.92	691.52	421.61	420.19
百崎湖大桥	拱脚	钢管	M/kN·m	-459.61	-457.00	482.33	478.95
		混凝土	M/kN·m	-1 133.70	-1 131.50	1 189.80	1 186.10
		钢管	N/kN	-2 008.70	-2 015.80	-1 144.70	-1 149.50
		混凝土	N/kN	1 890.90	1 898.40	1 268.30	1 272.60
	拱顶	钢管	M/kN·m	257.64	257.46	-270.38	-269.78
		混凝土	M/kN·m	623.16	620.66	-653.97	-650.64
		钢管	N/kN	-2 018.00	-2 002.00	-1 135.00	-1 125.00
		混凝土	N/kN	1 866.40	1 850.80	1 294.10	1 283.40
西洋坪大桥	上弦	拱脚	M/kN·m	187.07	-136.89	153.32	-81.67
			N/kN	-596.68	1474.25	-152.18	425.10
		拱顶	M/kN·m	42.36	74.73	24.11	51.72
			N/kN	456.69	-545.47	210.53	-118.73
	下弦	拱脚	M/kN·m	35.83	-185.34	19.41	-89.72
			N/kN	780.62	-1 113.98	320.70	-271.10
		拱顶	M/kN·m	48.57	82.41	27.94	56.82
			N/kN	539.62	776.06	-231.00	192.48

### 3 结论

通过 3 座钢管混凝土拱桥进行脱粘对钢管混凝土拱的温度应力和温度次内力的影响分析, 得到如下 3 点结论.

1) 脱粘使得夏季的平均温度降低、冬季的平均温度升高, 但总体上脱粘与无脱粘对应的平均温度相差很小.

2) 非线性温度场产生的自应力超过拱肋自重应力; 脱粘使得钢管的温度自应力增大, 核心混凝土的温度自应力减小, 因此, 钢管混凝土拱桥温度应力的计算要考虑脱粘的影响.

3) 脱粘对钢管混凝土单圆管拱、哑铃形拱的温度内力基本上没有影响, 对桁肋拱的温度内力有较大的影响.

#### 参考文献:

- [1] 陈宝春, 刘振宇. 钢管混凝土脱粘构件温度场研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 82-89.
- [2] 刘振宇. 钢管混凝土桁拱温度问题研究[D]. 福州: 福州大学, 2010.
- [3] 叶跃忠. 混凝土脱黏对钢管混凝土中、低长柱性能的影响[J]. 铁道建筑, 2001, 41(10): 2-5.
- [4] 涂光亚, 颜东煌, 邵旭东. 脱黏对桁架式钢管混凝土拱桥受力性能的影响[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 61-66.
- [5] 何雄君, 文武松, 胡志坚. 钢管混凝土拱桥温度荷载分析[J]. 桥梁建设, 2000(1): 17-19.
- [6] 徐爱民, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥温度应力数值分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 1999, 27(3): 15-18.
- [7] 范丙臣. 中承式钢管混凝土拱桥的温度评价及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [8] 熊红霞. 钢管混凝土拱桥收缩徐变与温度应力的数值模拟分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [9] 赵毓成. 钢管混凝土拱桥温度应力分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [10] 刘振宇, 陈宝春. 钢管混凝土桁拱热脱粘及温度应力分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(7): 67-72.
- [11] 陈宝春, 刘振宇. 钢管混凝土桁拱温差计算取值研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(12): 86-93.
- [12] 柯婷娴. 钢管混凝土哑铃形拱的计算温度取值研究[D]. 福州: 福州大学, 2009.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTG D60-2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

## Influence of Debonding on Thermal Stress and Internal Force of Concrete Filled Steel Arch

LIU Zhen-yu, GUO Zi-xiong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Three concrete filled steel tube (CFST) arch bridges were studied by finite element method, to investigate the influence of debonding on thermal stress and internal force. The analysis result shows that comparing with non-debonding, debonding decreases average temperature of arch rib section in summer, and increases the temperature in winter, but average temperature difference between debonding and non-debonding is slight; debonding increases the thermal stress of steel, decreases the stress of the core concrete, the debonding stress variation is greater than the gravity stress, therefore the influence of debonding should be considered in thermal stress calculation of CFST arch bridge. Debonding has little influence on internal thermal force of CFST arch with singular or dumbbell section, has significant influence on internal thermal force of CFST truss arch.

**Keywords:** bridge engineering; concrete filled steel tube; arch; debonding; thermal stress

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)