

脱粘对单圆管钢管混凝土拱桥极限承载力的影响

涂光亚¹, 颜东煌¹, 邵旭东²

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410004, runner_mail@126.com;

2. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要: 为了解单圆管钢管混凝土拱桥脱粘后受力模式改变带来的受力性能变化, 采用有限元方法计算了脱粘对单圆管钢管混凝土拱桥面内极限承载力的影响, 基于完全脱粘计算假定, 构造了钢管与混凝土之间的连接单元, 编制了考虑几何、材料双重非线性的面内极限承载力计算程序, 并对无初应力和成桥状态下4种荷载作用方式的面内极限承载力进行计算分析. 结果表明: 完全脱粘使跨中集中力、 $L/4$ 集中力和半跨均布荷载作用下的面内极限承载力变化不明显; 而使全跨均布荷载作用下的面内极限承载力降低较大. 对于单圆管钢管混凝土拱桥, 在全跨均布荷载作用下, 完全脱粘使得面内极限承载力下降可达10%左右.

关键词: 单圆管; 钢管混凝土拱桥; 脱粘; 极限承载力

中图分类号: TM912.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)12-1999-04

Debonding effects on ultimate bearing capacity of single tube concrete-filled steel tubular arch bridge

TU Guang-ya¹, YAN Dong-huang¹, SHAO Xu-dong²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China, runner_mail@126.com; 2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To quantitatively analyze the effect of debonding between steel tube and filled concrete on the ultimate bearing capacity of CFST arch bridge, a calculation model was proposed based on reasonable assumptions. The calculation program was written by using finite element method, and used to simulate the process of debonding between steel tube and filled concrete. The program was verified. By taking a single tube CFST arch bridge as a case study, the calculation results show that under uniformly distributed load on full span, the complete debonding makes the ultimate bearing capacity of single tube CFST arch bridge decreased about 10%.

Key words: single tube; concrete-filled steel tubular arch bridge; debonding; ultimate bearing capacity

钢管混凝土拱桥的优势除了施工方便外, 主要在于钢管与核心混凝土的协同工作提高了混凝土的强度和整个结构的延性^[1]. 在钢管混凝土拱桥运营过程中, 由于核心混凝土的收缩徐变和环境温度的变化常常使得钢管与核心混凝土界面的

拉应力超过粘结强度而出现脱粘现象. 当脱粘发生之后, 钢管混凝土拱肋的受力模式发生了变化, 核心混凝土只受到来自于钢管的径向压力作用. 受力模式的改变必然导致受力性能的变化. 面内极限承载力是结构受力性能的重要指标之一, 本文以常见的单圆管钢管混凝土拱桥为例, 定量分析脱粘对面内极限承载力的影响程度.

1 计算假定

对于具体的钢管混凝土拱桥而言, 脱粘的范围和实际高度难以精确确定, 为了研究方便, 计算

收稿日期: 2009-05-02.

基金项目: 湖南省高校科技创新团队支持计划资助项目(2008); 长沙理工大学土木与建筑学院重点学科基金资助项目(10QSSK07).

作者简介: 涂光亚(1974—), 男, 博士, 副教授;
颜东煌(1961—), 男, 教授, 博士生导师;
邵旭东(1961—), 男, 教授, 博士生导师.

分析时引入以下假定^[2]:1)钢管与核心混凝土界面沿拱肋纵向、环向全部脱粘;2)脱粘的高度为0;3)钢管与混凝土之间无摩擦力.将满足以上假定的情况称为完全脱粘,在完全脱粘情况下钢管与混凝土径向位移相等.同时将钢管与混凝土界面粘结良好的情况称为完全粘结,钢管混凝土拱桥的实际受力性能应该介于完全脱粘与完全粘结之间.

2 完全脱粘计算模拟

在平面杆系中用杆长为0的连接单元模拟钢管与核心混凝土界面,连接单元如图1所示.

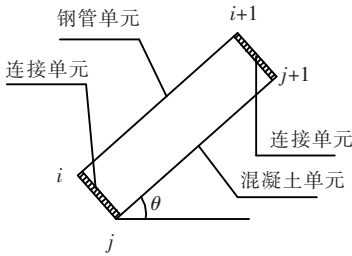


图1 连接单元示意图

连接单元的单元刚度矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}. \quad (1)$$

计算时将连接单元的轴向刚度 k 取计算结构所有单元轴向刚度最大值的300倍即可.

3 钢管混凝土本构关系

3.1 钢管的应力-应变关系

钢管应力-应变曲线可以采用理想弹塑性曲线,不考虑钢材的应力强化,有

$$\begin{cases} \sigma = E_y \cdot \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_s; \\ \sigma = \sigma_s, & \varepsilon_s < \varepsilon \leq \varepsilon_u. \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 为钢管的应力, E_y 为钢管弹性阶段的弹性模量, ε 为钢管的应变, σ_s 为钢管的屈服应力, ε_s 为钢管的屈服应变, ε_u 为钢管的极限应变.

3.2 混凝土的应力-应变关系

考虑套箍作用,钢管内核心混凝土的应力-应变关系,可采用分段的多项式表达^[3],当核心混凝土受压时具体表达式为

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_0 \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_0; \\ \sigma = \sigma_0 + q\sigma_0 \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{0.1\xi} - 1 \right], & \xi \geq 1.12, \varepsilon > \varepsilon_0; \\ \sigma = \frac{\sigma_0 \varepsilon \varepsilon_0}{\beta(\varepsilon - \varepsilon_0)^2 + \varepsilon \varepsilon_0}, & \xi < 1.12, \varepsilon > \varepsilon_0. \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 为核心混凝土的应力, σ_0 、 ε 、 ε_0 、 q 、 ξ 、 β 分别按下列公式计算.

$$\sigma_0 = \left[1 + (-0.054\xi^2 + 0.4\xi) \cdot \left(\frac{24}{f_c} \right)^{0.45} \right] \cdot f_c, \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + \left[1400 + 800 \cdot \left(\frac{f_c}{24} - 1 \right) \right] \cdot \xi^{0.2}, \quad (5)$$

$$q = \frac{\xi^{0.745}}{2 + \xi}, \quad (6)$$

$$\xi = a \cdot \frac{f_y}{f_{ck}}, \quad (7)$$

$$\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} \cdot f_c^2 \cdot 3.51 \times 10^{-4}. \quad (8)$$

式(5)中 ε_{cc} 按下式计算:

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5f_c. \quad (9)$$

式(4)、式(5)、式(8)、式(9)中 f_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度;式(7)中 a 为钢管混凝土截面含钢率, $a = A_s / A_c$; A_s 和 A_c 分别为钢管和混凝土的截面积; f_y 为钢材的屈服极限; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值.

当核心混凝土受拉时应力-应变关系按下式确定^[4],即

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_p \left[\frac{1.2\varepsilon}{\varepsilon_p} - 0.2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2 \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_p; \\ \sigma = \sigma_p \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) \frac{1}{0.51\sigma_p^2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} - 1 \right) + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}}, & \varepsilon > \varepsilon_p. \end{cases} \quad (10)$$

式中: σ_p 为峰值拉应力, $\sigma_p = 0.26(1.5f_{ck})^{\frac{2}{3}}$; ε_p 为峰值拉应力时的应变, $\varepsilon_p = 43.1\sigma_p$.

4 计算程序及验证

采用考虑几何非线性和材料非线性的极限稳定有限元分析理论^[5-6]进行计算编程.几何非线性考虑了大位移和初应力影响,材料非线性按折减刚度法考虑.核心混凝土本构关系如上所述,考虑了“套箍效应”.拱肋破坏的判定标准为:逐级增加荷载,考察结构的变形和受力特征,直至荷载位移曲线进入弹塑性并不能收敛,则认为结构已发生破坏.收敛准则采用位移收敛准则,收敛指标为 ∞ -范数,eps 取为 0.000 1 m.计算编程是在颜东煌教授自编的施工控制专用软件 BDCMS 的基础上进行的,增加了钢管与核心混凝土之间的连接单元类型和面内极限承载力的计算功能.以文献^[7]中钢管与核心混凝土之间完全粘结的 A-1

和 A-2 两根模型拱肋试验与理论计算结果进行程序验证。

采用自编程序进行计算,结果如下:A-1 的极限承载力为 36.8 kN, A-2 的极限承载力为 49.2 kN. 文献[8]中 A-1 模型拱肋面内极限承载力的试验值为 31.9 kN, 理论计算值为 36.1 kN, 试验值、理论值与本文计算值的相对误差分别为 15.4% 和 1.9%; A-2 模型拱肋面内极限承载力的试验值为 42.07 kN, 理论计算值为 50.5 kN, 试验值、理论值与本文计算值的相对误差分别为 16.9% 和 -2.5%. 由此可见本文计算值与文献[8]的理论值吻合较好, 与试验值相差较大, 主要是由于本构关系的误差所致. 另外, 本文在各级荷载作用下计算的最大竖向位移结果如表 1、表 2 所示。

表 1 A-1 拱肋在各级荷载作用下最大竖向位移

荷载/kN	最大位移/mm	荷载/kN	最大位移/mm
3.7	-2.4	22.2	-17.8
7.4	-5.4	25.9	-21.2
11.1	-8.4	29.6	-25.9
14.8	-11.5	33.3	-33.3
18.5	-14.7	36.8	-45.8

表 2 A-2 拱肋在各级荷载作用下最大竖向位移

荷载/kN	最大位移/mm	荷载/kN	最大位移/mm
5	-1.9	30.0	-13.7
10	-4.2	35.0	-16.8
15	-6.5	40.0	-21.5
20	-8.8	45.0	-28.4
25	-11.2	49.2	-36.5

表 1、表 2 的结果与文献[9]的计算结果也吻合较好. 因此, 采用本文计算程序和计算方法进行面内极限承载力计算是可行的。

5 实例分析

某钢管混凝土拱桥净跨径 46 m, 矢跨比为 1/3, 拱轴线为悬链线, 拱轴系数 $m = 1.543$, 拱脚固接, 主拱圈由单根直径为 800 mm、壁厚为 14 mm 的钢管内灌 C30 混凝土组成, 钢管材料为 Q235, 屈服极限为 235 MPa. 将钢管和混凝土分别划分为 20 个单元, 共 40 个单元. 将钢管与核心混凝土的界面划分为 19 个连接单元, 模拟完全脱粘的情况. 钢管与核心混凝土的单元类型为分层的梁单元, 沿截面高度方向分为 20 层. 计算时不考虑拱肋的初始缺陷。

工况计算分 2 种情况考虑: 1) 无初应力, 即在承受极限荷载之前不计结构自重作用; 2) 模拟施工过程, 考虑核心混凝土收缩徐变成桥之后的极限承载力(收缩徐变考虑至成桥后 5 a)。

施工过程按 3 种工况考虑: 1) 空钢管架设; 2) 灌注管内混凝土; 3) 上桥面系荷载(桥面系荷载按 240 kN/m 考虑)。

模型计算分 2 种情况考虑: 1) 钢管与核心混凝土界面完全脱粘(用界面连接单元模拟); 2) 钢管与核心混凝土界面完全粘结(用钢管与核心混凝土共结点模拟)。

荷载计算分 4 种情况: 1) 跨中集中力; 2) L/4 处集中力; 3) 全跨均布荷载; 4) 半跨均布荷载。

5.1 无初应力工况比较

在钢管与核心混凝土均无初应力情况下, 完全脱粘与完全粘结 2 种情况在 4 种类型荷载作用下的面内极限承载力如表 3 所示, 极限竖向位移如表 4 所示。

表 3 面内极限承载能力比较(无初应力)

荷载类型	跨中集中力/kN	L/4 处集中力/kN	全跨均布荷载/ (kN · m ⁻¹)	半跨均布荷载/ (kN · m ⁻¹)
完全粘结	2 366	1 798	491	151
完全脱粘	2 361	1 798	445	151

表 4 面内极限竖向位移比较(无初应力)

荷载类型	位移/mm			
	跨中集中力时	L/4 处集中力时	全跨均布荷载时	半跨均布荷载时
完全粘结	-232.8	-298.1	-77.1	-232.0
完全脱粘	-232.3	-299.2	-69.8	-232.2

5.2 模拟施工过程比较

模拟施工过程成桥收缩徐变完成之后, 完全脱粘与完全粘结 2 种情况在 4 种类型荷载作用下的面内极限承载力如表 5 所示, 极限竖向位移如表 6 所示。

表 5 面内极限承载能力比较(模拟施工过程)

荷载类型	跨中集中力/kN	L/4 处集中力/kN	全跨均布荷载/ (kN · m ⁻¹)	半跨均布荷载/ (kN · m ⁻¹)
完全粘结	1 201	1 051	140	74
完全脱粘	1 200	1 049	122	72

由以上计算结果可知: 1) 两种工况下, 完全脱粘使全跨均布荷载作用下的面内极限承载能力和面内极限竖向位移降低. 主要原因是在全跨均布荷载作用下, 钢管混凝土拱肋以受压为主, 弯矩

值相比轴力值而言比较小,而完全脱粘后钢管与核心混凝土的轴力分配规律与完全粘结时不同^[10].考虑施工过程,面内极限承载力降低的比例较大,为12.9%,而极限竖向位移降低的比例较小,为3.9%;说明考虑施工过程,面内极限承载力降低,同时结构延性变差.2)两种工况下,完全脱粘使跨中集中力、 $L/4$ 集中力以及半跨均布荷载作用下的面内极限承载能力和面内极限竖向位移变化不明显,差值百分比不超过4%.主要原因是在以上3种类型荷载作用下,钢管混凝土拱肋是以受弯为主,轴力相比弯矩而言比较小,而完全脱粘后,钢管与核心混凝土的弯矩分配规律与完全粘结时相同^[10].

表6 面内极限竖向位移比较(模拟施工过程)

荷载类型	位移/mm			
	跨中集中力时	$L/4$ 处集中力时	全跨均布荷载时	半跨均布荷载时
完全粘结	-140.5	-129.2	-82.0	-107.2
完全脱粘	-138.2	-131.8	-78.8	-109.0

6 结 论

1)采用有限元方法进行结构计算时,将钢管与核心混凝土分别划分单元节点,用连接单元连接钢管与核心混凝土节点来模拟完全脱粘的情况进行结构受力分析是可行的.

2)采用自编的有限元程序进行钢管混凝土拱桥面内极限承载力计算,经考证是可行的,与其他文献的计算和试验结果基本吻合.

3)经计算分析,完全脱粘使得单圆管钢管混凝土拱桥在全跨均布荷载作用下的面内极限承载能力和面内极限竖向位移降低,降低幅度均为

10%左右;而在跨中集中力、 $L/4$ 集中力以及半跨均布荷载作用下的极限承载能力和面内极限竖向位移与完全粘结时差别不明显,差值比例均不超过4%.

参考文献:

- [1] ROEDER C W, CAMERON B, BROWN C B. Composite action in concrete filled tubes[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(5): 477-484.
- [2] 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.
- [3] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科技出版社, 2000.
- [5] DEPPO D D, RSCHMIDT. Nonlinear analysis of buckling and post-buckling behavior of circular arches[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 1969, 847(20): 31-37.
- [6] DAWE D J. Curved finite elements for the analysis of shallow and deep circular arches[J]. Computer and Structure, 1974(4): 22-28.
- [7] 陈友杰. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程研究[D]. 福州: 福州大学, 1998.
- [8] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [9] 颜全胜, 王颀. 钢管混凝土拱肋面内弹塑性承载力分析[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2003, 28(5): 110-113.
- [10] 涂光亚. 脱空对钢管混凝土拱桥受力性能影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.

(编辑 魏希柱)