

文章编号:1671-6833(2011)05-0015-05

## 矩形钢管混凝土桁架静力性能非线性有限元分析

吝红育<sup>1,2</sup>, 刘永健<sup>1</sup>, 任翔<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 为了研究矩形钢管混凝土桁架的静力性能和分析模型, 采用非线性有限元法, 建立了两种不同的杆系模型, 并将分析结果进行比较。结果表明: 单材料模型对矩形钢管混凝土桁架的分析结果较为可靠, 但材料本构关系成为有限元分析的关键; 矩形钢管混凝土桁架的破坏并不是杆件造成的, 而是由节点失效引起的, 且失效将发生在相对变形量较大的节点位置; 分析所得极限承载力为桁架节点发生塑性变形时荷载值, 与桁架整体极限承载力稍有偏差, 但分析模型能够满足桁架在桥梁结构中的设计要求。

**关键词:** 桥梁工程; 矩形钢管混凝土桁架; 静力性能; 非线性分析

**中图分类号:** TU392.3

**文献标志码:** A

### 0 引言

钢管混凝土桁架在大跨径拱桥中的应用十分成功, 我国已建成约 30 多座钢管混凝土桁架拱桥[1]。近年来钢管混凝土桁架也出现在其它桥型中, 如连续刚构桥和斜拉桥等, 其技术经济效益十分显著[2]。矩形钢管对混凝土的约束效应虽不如圆形钢管明显, 但试验和理论研究表明[3], 矩形钢管混凝土柱的实际承载力高于其相应的钢管柱和混凝土柱承载力之和, 并且具有较好的延性和抗震性能。

目前, 圆形钢管混凝土桁架的研究较多[4-7], 理论较为成熟, 矩形钢管混凝土桁架也开展了一些理论和试验研究[8-12], 但仍需要进一步研究。矩形钢管桁架结构在实际工程中也有采用, 如芜湖长江大桥、武汉天兴洲长江大桥和东莞东江大桥, 其主桁架弦杆均采用了矩型钢管。矩形钢管内填混凝土, 可提高桁架节点的强度及刚度, 有利于矩形钢管混凝土桁架在桥梁结构中的推广应用。

为了研究矩形钢管混凝土桁架的静力性能和分析模型, 采用非线性有限元法, 建立 2 种矩形钢管混凝土桁架的杆系模型——单材料模型和双材料模型, 并利用统一理论对材料的本构关系、弹性模量等参数进行分析确定, 得到矩形钢管混凝土桁架合理的分析模型、极限承载力及破坏模式等, 为工程应用和工程设计提供理论依据。

### 1 材料本构关系

本构关系是非线性分析的关键, 对于钢管混凝土结构来说, 钢管和混凝土的相互作用使得钢管和混凝土都处于复杂受力状态。单材料模型的本构关系为按统一理论分析得到的本构关系曲线; 双材料模型中, 钢材的本构关系采用常见的本构关系曲线, 而核心混凝土的本构关系则考虑钢管对混凝土强化作用的影响, 这种影响体现在核心混凝土的本构关系曲线中。

#### 1.1 钢管混凝土的本构关系

钢管混凝土受压时, 钢管协助混凝土受力的情况较为明显, 混凝土的强度得以加强, 同时钢管的屈曲也得以改善。受压矩形钢管混凝土的本构关系曲线分为 3 个阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段、强化段或下降段, 其数学表达式如下。

弹性阶段:

$$\sigma = E_{sc} \varepsilon \quad (1)$$

弹塑性阶段:

$$\varepsilon^2 + a\sigma^2 + b\varepsilon + c\sigma + d = 0 \quad (2)$$

强化或下降段:

$$\sigma = \begin{cases} f_{scy} + E_{sch}(\varepsilon - \varepsilon_{scy}) & (\xi \geq 4.5) \\ f_{scy} \varepsilon / [D(\varepsilon - \varepsilon_{scy})^2 + \varepsilon] & (\xi < 4.5) \end{cases} \quad (3)$$

式中相关参数见文献[13], 按上式确定的受压矩形钢管混凝土本构关系如图 1 所示, 图中曲线为当采用 Q345 钢材和 C50 混凝土, 不同含钢

收稿日期: 2011-03-29; 修订日期: 2011-06-16

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(2006319812112); 陕西省教育厅科学研究计划项目(2010JK669)

作者简介: 吝红育(1978-), 女, 陕西蒲城人, 长安大学博士生, 西安科技大学讲师, 主要从事道路与桥梁工程方面的研究, E-mail: 13991278913@163.com.

率  $\alpha$  时的本构关系曲线。

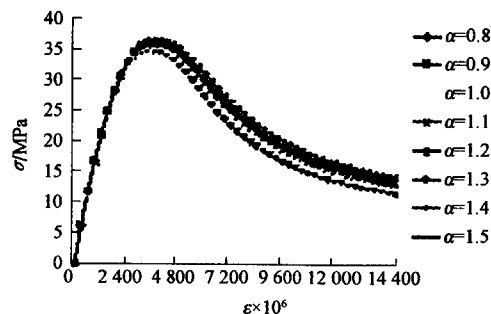


图1 受压矩形钢管混凝土本构关系

Fig.1 Constitutive relationship of compressive RCFST

钢管混凝土受拉时,钢管为主要受力材料,混凝土几乎不承受拉力,但混凝土在结构刚度上的贡献较为明显,特别是在桁架结构节点上作用较大。因此,受拉矩形钢管混凝土本构关系曲线与钢材曲线类似,如图2所示。关键问题在参数取值上,如屈服强度和弹性模量,文中钢管混凝土受拉材料的屈服强度  $f'_{acy} = f_y/A_{ac}$ , 弹性模量  $E'_{ac} = f'_{acy}/\varepsilon_y$ , 其中  $f_y, \varepsilon_y$  为钢材的屈服强度和屈服应变,  $f'_{acy}, E'_{ac}, A_{ac}$  为钢管混凝土的材料屈服强度、弹性模量和面积。

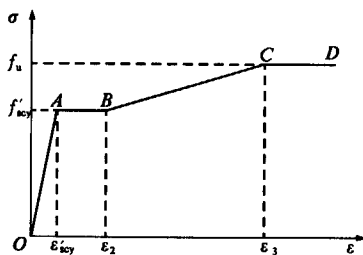


图2 受拉矩形钢管混凝土本构

Fig.2 Constitutive relationship of tensile RCFST

## 1.2 核心混凝土的本构关系

受压核心混凝土本构关系采用文献[13]的单轴本构关系,但实际上考虑了钢管和混凝土在受力过程中的相互作用,是混凝土三维受力状态的简化,其数学表达式如下:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta(x-1)^{\eta} + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (4)$$

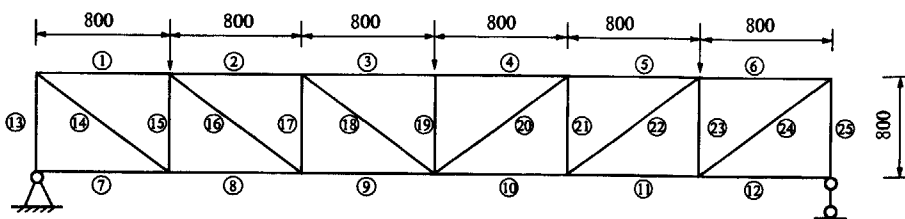


图3 单材料模型单元划分(单位:mm)

Fig.3 Element division of single material model (unit:mm)

其中:  $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, y = \frac{\sigma}{\sigma_0}, \sigma_0 = [1 + (-0.0135\xi^2 + 0.1\xi)(\frac{24}{f_c})^{0.45}]f_c$ , 其它参数见文献[13].

钢管混凝土受拉构件中,由于混凝土的抗拉强度很小,核心混凝土几乎不参与受力,混凝土对结构的贡献主要体现在刚度上,因此受拉核心混凝土本关系采用常规混凝土受拉的本构关系。

## 2 分析模型建立

钢管混凝土桁架应用于桥梁结构时,是一种细长结构,离散成杆系模型较为合理,并考虑几何非线性和材料非线性。在处理材料非线性问题时,分别采用单材料和双材料模型。单材料模型是将钢管和混凝土看成统一体,利用钢管混凝土构件的本构关系进行非线性分析。该模型能够利用通用有限元程序进行建模,能较准确的反映出钢管混凝土桁架的极限承载力,但不能反映各阶段钢管和混凝土各自的受力情况。双材料模型是将钢管和混凝土分别作为两根杆件输入,在相同的节点间建立两个单元,一个输入钢管的材性,另一个输入混凝土的材性。该模型能反映各阶段钢管和混凝土的受力情况,但不能反映各阶段钢管和混凝土协同工作的情况。两种模型在反映桁架受力特性上存在一定差异。

选用在工程中广泛使用的空间柏式桁架进行分析。模型长4.8 m,高0.8 m,共6个节间;弦杆均为矩形钢管混凝土构件,其截面尺寸为200 mm × 200 mm × 6 mm;腹杆为空钢管构件,其截面尺寸为160 mm × 160 mm × 5 mm;混凝土C50;钢材Q345。为了简化分析,将模型设计成简支结构。单元划分如图3~4所示,荷载采用三点对称加载。

采用通用有限元程序 ANSYS 进行分析,二维梁单元进行模拟。单材料模型中,1~6号为受压钢管混凝土单元,7~12号单元为受拉钢管混凝土单元,13~25为钢管单元;双材料模型中,1~25号为钢管单元,26~31号为受压混凝土单元,32~37号为受拉混凝土单元。

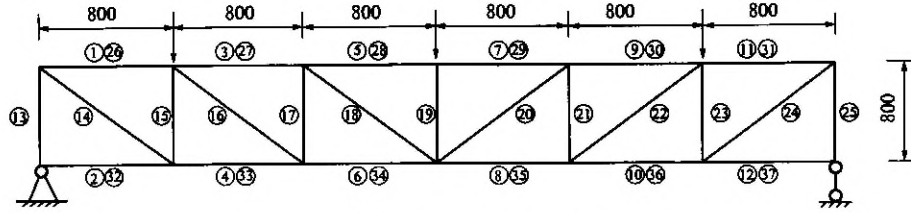
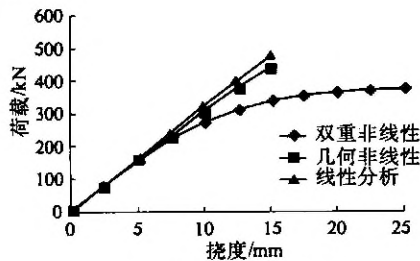


图4 双材料模型单元划分(单位:mm)

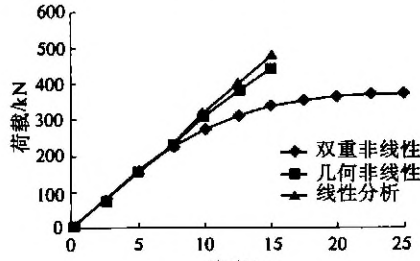
Fig.4 Element division of double material model (unit:mm)

### 3 静力性能分析

采用上述钢材和钢管混凝土的本构关系模型,对矩形钢管混凝土桁架线性、几何非线性、双重非线性的极限承载力进行分析,分析结果如图5~8所示。



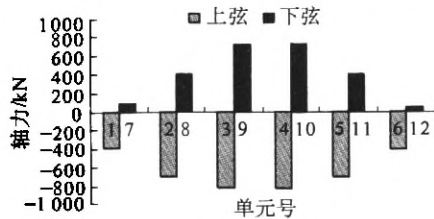
(a) 单材料模型



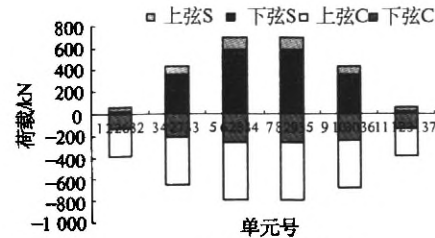
(b) 双材料模型

图5 荷载一下弦跨中挠度曲线

Fig.5 Load-deflection curves for mid-span of truss



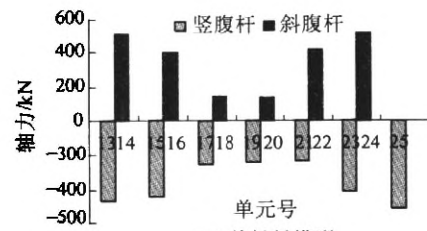
(a) 单材料模型



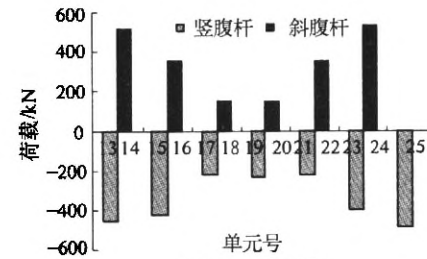
(b) 双材料模型

图6 弦杆轴力分布图

Fig.6 Axial force distribution of chord pipes



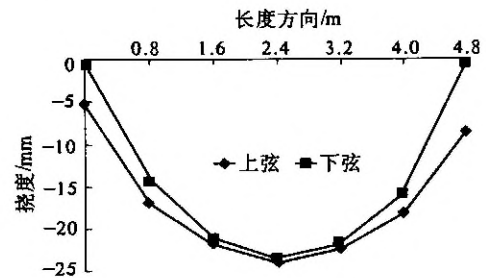
(a) 单材料模型



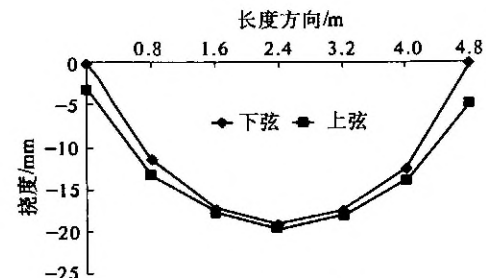
(b) 双材料模型

图7 腹杆轴力分布图

Fig.7 Axial force distribution of web pipes



(a) 单材料模型



(b) 双材料模型

图8 弦杆挠度分布图

Fig.8 Deflection distribution of chord pipes

#### 3.1 单材料模型分析

单材料模型分析结果如图5~8中图(a)所示。

(1)由图5(a)可知,当桁架的跨中挠度接近20 mm时,桁架节点发生明显塑性变形,桁架整体进入塑性变形阶段,结构发生破坏,极限承载力 $F=366.57$  kN.3种分析下的荷载挠度曲线相差较大,仅考虑几何非线性的分析结果与弹性相似,考虑双重非线性的分析结果与弹性相差较大,故材料的本构关系是分析的关键.

(2)由图6(a)和7(a)可知,达到极限荷载时,桁架中段弦杆内力较大,边段腹杆内力较大.但从杆件轴力大小来看,均未达到杆件破坏时的内力值(弦杆 $1.61\text{e}3$  kN、腹杆 $1.07\text{e}3$  kN).可见,结构破坏发生在节点.

(3)由图8(a)可知,桁架的最大变形发生在跨中,达到极限荷载时接近20 mm,为计算跨径的0.42%,可见桁架的整体变形较小.从挠曲形状来看,中段节点相对变形较小,而边段相对变形较大,节点破坏将发生在桁架边段节点相对变形较大处,与现有试验结论相符.

### 3.2 双材料模型分析

双材料模型分析结果如图5~8中图(b)所示.

(1)当桁架的跨中挠度接近18 mm时,桁架节点变形进入塑性阶段,达到极限状态,结构发生破坏,极限承载力为 $F=339.09$  kN.由图5(b)可知,材料非线性仍是影响结构承载力的主要因素.

(2)由图6(b)和7(b)可知,到达极限荷载时,弦杆内力中段大,腹杆内力边段大.从轴力的分配来看,受压弦杆中矩形钢管对核心混凝土有一定的约束效应;受拉弦杆中荷载主要由钢管承受.从轴力的大小来看,均未达到杆件破坏时的内力值(弦杆 $1.61\text{e}3$  kN、腹杆 $1.07\text{e}3$  kN).可见,结构破坏发生在节点处.

(3)由图8(b)可知,桁架的最大变形达到极限荷载时接近18 mm,桁架的整体变形较小.从挠曲形状来看,边段节点相对变形较大,节点破坏将发生在桁架边段节点相对变形较大处,与现有试验结论相符.

### 3.3 对比分析

(1)两种模型分析所得极限承载力有一定差异,相差大约8%左右.双材料模型中,受拉弦杆中混凝土所能承受的荷载十分有限,当杆件节点处混凝土发生受拉破坏时,有限元求解不收敛,认为结构发生了破坏.而单材料模型中,受拉钢管混凝土被认为一种材料受力,受拉强度大大提高.因

此,单材料模型对矩形钢管混凝土桁架极限承载力的分析更为可靠.

(2)两种模型均表明,几何非线性影响较小,材料非线性是影响结构承载力的主要因素.因此在进行极限承载力分析时,材料的本构关系就尤为重要,建议选用文中有关钢管混凝土构件受拉、受压的本构关系模型.

(3)两种模型均表明,极限状态时桁架各杆件内力并未达到极限值,且桁架整体变形较小,结构破坏并不是杆件破坏造成的;从挠度分布来看,桁架边段节点相对变形量较大,节点破坏将发生在边段节点处.

## 4 结论

矩形钢管混凝土桁架静力性能的研究必将进一步推动其在桥梁工程中的应用,笔者提出的单材料模型可以从宏观上把握钢管混凝土桁架的极限荷载和破坏模式,其分析精度能够满足工程设计的要求.基于笔者的分析模型,桁架节点处材料发生较大屈服时,程序计算因不收敛而终止,此时荷载即为极限荷载.但桁架某个节点的破坏并不会立刻引起整个结构的失效,结构承受的荷载仍会缓慢上升,但变形急剧增大.笔者分析的极限荷载即为桁架节点发生塑性破坏、整体进入塑性变形阶段的荷载,与实际极限荷载稍有偏差.如果要得到桁架塑性阶段的变形和极限荷载,需要对钢管混凝土杆件塑性铰做进一步研究.

## 参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥的设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [2] 张联燕, 李泽生, 程懋方. 钢管混凝土空间桁架组合梁式结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [3] 刘永健. 矩形钢管混凝土桁架节点极限承载力试验与设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2003.
- [4] 邵旭东, 成尚锋, 李立峰. 钢管混凝土拱肋节段模型试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(4): 34-37.
- [5] 崔军, 孙炳楠, 楼文娟, 等. 钢管混凝土桁架拱桥模型试验研究[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 83-86.
- [6] 陈宝春, 黄文金. 圆管截面桁架极限承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 28(3): 31-36.
- [7] 王百成, 崔军, 王景波. 大跨度钢管混凝土桁式拱桥结构非线性分析[J]. 世界地震工程, 2004, 20(1): 121-125.

- [8] 周绪红,刘永健,莫涛,等. 矩形钢管混凝土桁架结构设计[J]. 建筑结构,2004,34(1):20-23.
- [9] 刘永健,周绪红,肖龙. 矩形钢管混凝土桁架受压节点承载力[J]. 建筑结构,2004,34(1):24-26.
- [10] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土 K 型节点试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2007,24(2):36-42.
- [11] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土 T、Y 型节点受压性能试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(5):48-52.
- [12] 吝红育,董鹏宁,高迎社. 矩形钢管混凝土与圆形钢管混凝土桁架受力性能对比分析[J]. 混凝土,2008,226(8):24-27.
- [13] 翰林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2004.

## Nonlinear Finite Element Analysis on the Static Behavior of Rectangular Concrete-Filled Steel Tubular Truss

Lin Hong-yu<sup>1,2</sup>, Liu Yong-jian<sup>1</sup>, Ren Xiang<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to study the static behavior and finite element model of rectangular concrete-filled steel tubular truss, two analysis models were built with nonlinear finite element method, the ultimate bearing capacity were analyzed and the results of two different analysis models were compared. The results show that the single material model was more effective than the double material model, but the constitutive relationship became the critical factor; the failure of rectangular concrete-filled steel tubular truss was caused by the points of truss not the chord pipes; and there was some deviation between textual results and actual results on the ultimate bearing capacity, but the results can meet the design requirements in bridge structure.

**Key words:** bridge engineering; rectangular concrete-filled steel tubular truss; static behavior; nonlinear analysis