

圆钢管混凝土桁架受力性能研究

高胜伟, 陈誉

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:对矩形断面、倒三角形断面、梯形断面和正三角形断面4种圆钢管混凝土桁架进行对比试验,研究不同断面形式的桁架受力分布模式.结果表明,桁架试件在 $0-2/6l$ 段的桁架下弦节点受力较大,而试件TT上弦节点受力较大;断面形式的不同对桁架的上、下弦杆的轴力影响较大,且弦杆各个节段均承受很大的平面弯矩,而对腹杆的轴力分布模式影响不同,其中试件IT的腹杆受力比较合理.断面从矩形、梯形到倒三角形,对腹杆平面内弯矩影响越来越大,且下弦杆受力情况也越来越复杂;填充混凝土的上弦杆从矩形、梯形到倒三角形、正三角形这种断面的“削弱”对各段的杆件平面内弯矩影响不同.

关键词:圆钢管混凝土桁架;断面形式;受力性能;受力分布模式

中图分类号:TU323.3;TU528.59 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.01.016

Research on mechanical behavior of circular concrete filled steel tubular truss

GAO Sheng-wei, CHEN Yu

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

Abstract: To research the mechanical behavior of circular concrete filled steel tubular (CFST) truss, four truss specimens of the different sections such as rectangular truss, inverse-triangular truss, trapezoid truss and triangular truss were tested under static point loading. Results of these tests showed that truss specimens are stressed more in the segment $0-2/6l$ of the bottom chord, expect specimen TT which is stressed more in the top chord. The difference among these trusses sections has a great influence on the axial force of chord, and each segment bears quite large in-plane bending moment, but it has different influence on the web members. Among these trusses, webs of specimen IT have a more reasonable condition. The influence on web in-plane bending moment is larger and larger as the following order: rectangular section, trapezoid section, inverted triangular section, furthermore, force condition of bottom chords is more and more complex. To the top chords filled concrete, section “weaken” from rectangular section to trapezoid section, inverted triangular section, and triangular section makes a different influence on in-plane bending moment of each segment.

Key words: circular concrete filled steel tubular (CFST) truss; section form; mechanical behavior; force distribution model

0 引言

圆钢管桁架结构凭借其诸多优势,在房屋建筑、展厅、桥梁和海洋平台等工程中得到广泛应用^[1]. 伴随大跨度空间结构的发展,其结构荷载和跨度也不断增大,导致此类结构承载力、刚度等性能受到限制. 在桁架受压弦杆内填充混凝土,成为钢管混凝土桁架,使混凝土发挥其抗压优势,协同钢管受压,同时克服了钢管易屈曲的劣势^[2].

本文以受压的上弦杆填充混凝土的圆钢管混凝土桁架为研究对象,对不同断面形式的圆钢管混凝土桁架受力性能进行研究,并分析在节点荷载作用下桁架试件的轴力和弯矩分布模式.

1 试验

1.1 试件设计

按《空心管结构设计指南 CIDECT7》^[3]及《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)^[4]的要求设计圆钢管混凝土 Pratt 桁架试件,桁架的左、右半跨(N型)节点的腹杆轴力方向相同,即左、右半跨中斜腹杆受拉且直腹杆受压.

试验共设计4榀圆钢管混凝土桁架试件,均为上弦杆圆钢管内填充混凝土且腹杆与下弦杆均为空圆钢管. 4榀圆钢管混凝土桁架试件断面分别为矩形桁架 RT (rectangular truss)、倒三角形桁架 IT (inverse-triangular truss)、梯形桁架 TZ (trapezoid truss 简写)和正三角形桁架 TT (triangular truss). 桁架全长 3 130 mm,计算跨度为 3 000 mm,宽为 400 mm,高为 400 mm,节间距为 500 mm,高跨比为 1:7.5,高宽比为 1:1,弦杆与腹杆交角为 41°,腹杆间隙为 11 mm,试件简图见图 1. 上下弦杆钢管采用 $\Phi 89 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$,其钢管径厚比为 17.8;斜腹杆、直腹杆钢管及横向支撑杆件钢管分别采用 $\Phi 50 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ 和 $\Phi 40 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$;腹杆与弦杆的管径比为 0.56 及 0.45. 试件中所有材料均采用 Q345 钢材. 所有试件节点均为焊接节点,采用 E43 系列焊条. 4 榀桁架试件中上弦杆内均填充 C30 等级的混凝土. 将上弦节点从左到右标识为 0, 1/6l, 2/6l, 3/6l, 2/6l, 1/6l, 0, 其中 0—2/6l 段即为桁架节点 0 与节点 2/6l 之间的距离.

1.2 试验方案

将整榀桁架试件平面平行于试验室地槽方向放置,采用滚轴使桁架支座与试验室支座连接,绕滚轴支撑点可自由转动,用来模拟桁架试件的铰支

座连接,以达到简支桁架的受力效果. 试验加载仪器为 100 t 油压千斤顶,通过分配梁对桁架试件进行对称加载,加载装置示意图见图 2.

测量竖向荷载作用下桁架试件腹杆和弦杆的内力分布,腹杆中截面对称布置 2 个应变片,弦杆中截面对称布置 2 个或 4 个应变片. 考虑桁架试件的空间作用,试件左右对称与前后对称分别布置应变片,如图 3 所示,图中钢管壁上短黑线为应变片. 此布置方案为试件 RT 的应变片布置方案,其余 3 个试件布片方案与之相同或相似. 桁架试件共布置了 11 个位移计,其中 $D_1—D_5$ 测试桁架整体挠度,即桁架下弦杆各节点的挠度, $D_6—D_9$ 测试桁架支座的转角位移及横向位移, $D_{10}—D_{11}$ 测试桁架的支座沉降位移. 位移计具体布置见图 3.

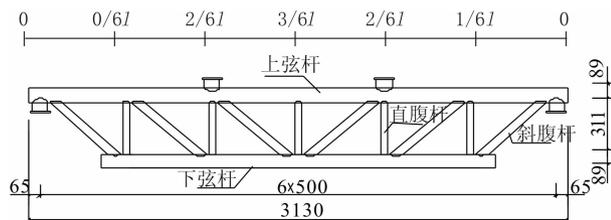


图 1 圆钢管混凝土桁架试件简图/mm

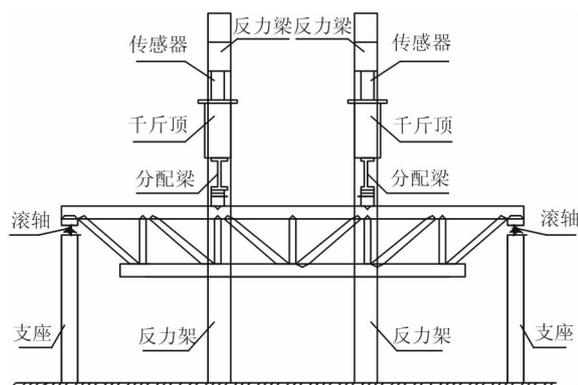


图 2 桁架试件加载示意图

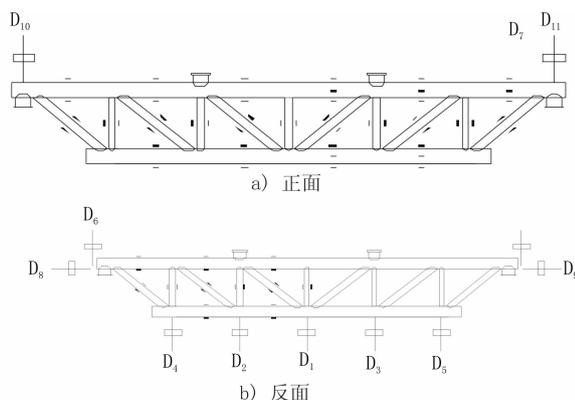


图 3 位移计布置简图

2 受力性能分析

2.1 轴力分布模式分析

针对桁架试件在弹性范围 ($F = 20 \text{ kN}$ 时) 内弯矩较小而轴力较大, 因此分析 4 榀桁架试件的轴力分布模式. 4 榀桁架的试验轴力分布图见图 4, 其中杆件受拉为正值, 受压为负值.

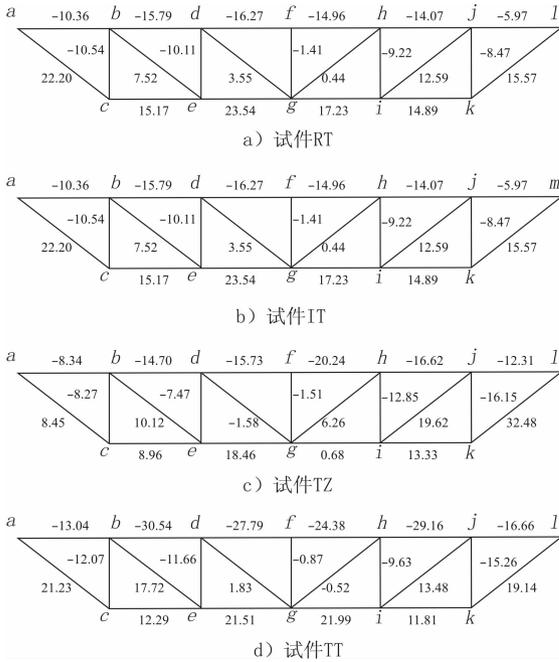


图 4 桁架试件轴力分布图/kN

由图 4 可知: 1) 4 个试件的上弦杆轴力, TT 最大, 其次是 TZ, RT, 最后是 IT. 2) 4 个试件的下弦杆轴力, IT 最大, 其次是 TT, RT, 最后是 TZ. 3) 4 个试件的斜腹杆轴力, 对杆件 $ac, lk (mk)$, 4 个试件相差不多; 而对于杆件 be, ji , 则轴力大小排序为 $RT > TZ$ 和 $TT > IT$; 对于杆件 dg, hg , 试件 RT 和 TZ 的轴力较大. 4) 4 个桁架的直腹杆轴力, 对于杆件 bc, jk , 试件 IT, TT 大于 RT, TZ; 对于杆件 be, hi , 4 个试件轴力大小基本相同; 对于杆件 fg , 4 个试件大小排序为 $IT > TZ, RT > TT$. 5) 对于 4 个试件而言, 节点 c, e, i, k 相连接的杆件均轴力较大; 另外, 对于试件 TT 而言, 上弦杆的轴力也较大. 故断面形式的不同对桁架的上、下弦杆的轴力影响较大, 而对腹杆的轴力分布模式影响不同. 此外节点 c, e, i, k 受力较大.

桁架试件第 1 根杆件开始屈服时, 桁架节点由轴力与弯矩共同作用产生的应力将超过钢管的屈服强度, 发生明显的内力重分布, 因此对 4 榀桁架试件的屈服荷载作用下的轴力、弯矩进行分析. 试件 RT, IT, TZ, TT 开始屈服时的受力分布模式见图 5—

图 8.

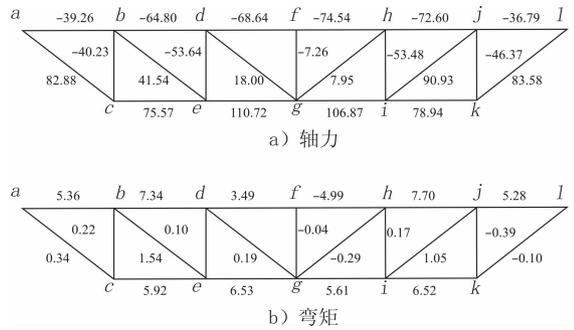


图 5 试件 RT 受力分布模式/kN

由图 5 可知, 上、下弦和斜腹杆 ac 和 lk 的轴力均较大, 同时上、下弦及斜腹杆 be 和 ji 的弯矩也比较大; 节点 c, k, e 和 i 连接的杆件受力较大. 由于上弦杆填充混凝土, 约束上弦节点的变形, 故在试验中上弦节点变形较小, 而下弦节点均出现不同程度的破坏.

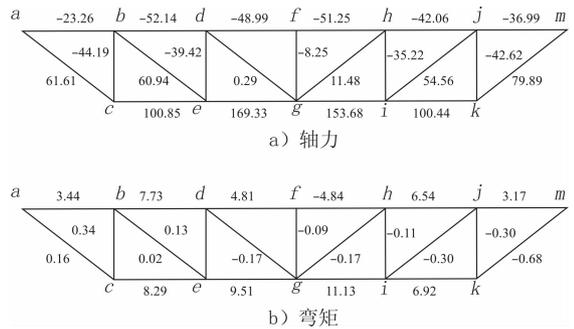


图 6 试件 IT 受力分布模式/kN

由图 6 可知, 下弦杆的轴力、弯矩明显大于其他杆件, 下弦杆节点为危险节点; 上弦杆的轴力不大, 弯矩较大, 混凝土协同钢管受压; 腹杆的轴力、弯矩大小基本相同, 受力合理.

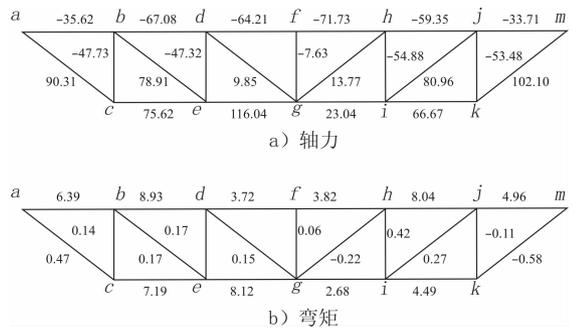


图 7 试件 TZ 受力分布模式/kN

由图 7 可知, 该试件上、下弦杆轴力、弯矩较大, 类似于试件 RT, 腹杆的轴力、弯矩大小相差不多, 类似试件 IT. 节点 c, k 和 e 相连接杆件的受力较大.

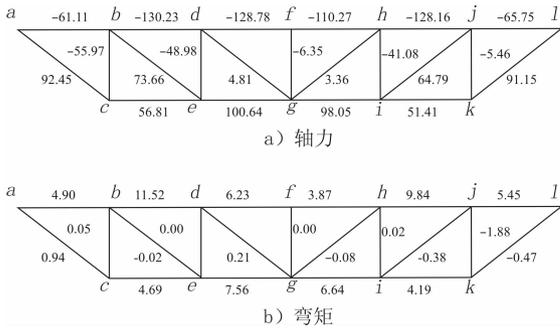


图8 试件TT受力分布模式/kN

由图8可知,上弦杆的轴力明显大于其他杆件.上弦、下弦的弯矩均很大.除了杆件jk,其他直腹杆的弯矩均很小,且直腹杆轴力大小基本相同.

由此可知,桁架的上、下弦杆的受力较大,由于上弦杆内填充混凝土,分担了部分荷载,使其弦杆钢管受力减小,同时管内混凝土克服钢管易屈曲的劣势,提高了上弦节点的强度和刚度,约束了腹杆端头的转动能力,从而使腹杆能够承受较大的弯矩.在斜腹杆ac, lk的轴力和弯矩均很大,这对节点c, e, i, k的承载力性能产生很大的不利影响,从而导致节点c, e, i, k提前失效.

文献[5]中在节点荷载下,荷载作用点相邻的2个节段内弦杆承受很大的弯矩,与本试验不同,空间桁架刚度的整体性,导致上弦杆各个节段均承受很大的弯矩,尤其是试件IT, TZ.在0-1/6l段,试件RT, TZ和TT的腹杆轴力较大,而试件IT则不同,在0-2/6l段,其斜腹杆、直腹杆的轴力基本相同.

传统的桁架理论中认为弦杆与腹杆采用理想铰接模型,但是圆钢管混凝土桁架的腹杆有较大的弯矩存在,故在桁架计算中不宜采用铰接模型.针对0-1/6l段斜腹杆的轴力、弯矩均很大的问题,在实际应用中,可采取增加截面等措施来提高其受力性能.腹杆受力性能对桁架承载力起着重要的作用,文献[5]研究了腹杆布置形式对整体受力性能的影响,修正的Warren式桁架是提高腹杆受力性能的形式之一.

2.2 弯矩分布模式分析

从实测的桁架试件杆件应变可知,4榀桁架试件的上、下弦杆弯矩较大,而腹杆弯矩较小.4榀桁架的试验平面内弯矩分布图见图9—图12.

从图9可知:1)对于杆件ce,在较小荷载($F < 20$ kN)作用下,4个试件的弯矩大致相同,在较大荷载作用下,IT的弯矩最大,其次是TZ, TT,而RT最小;随着荷载的增加,试件RT曲线基本按线性模式增加,试件TZ, TT表现略微的非线性,而试件IT则

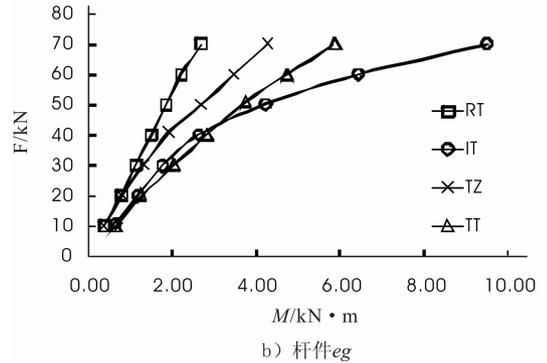
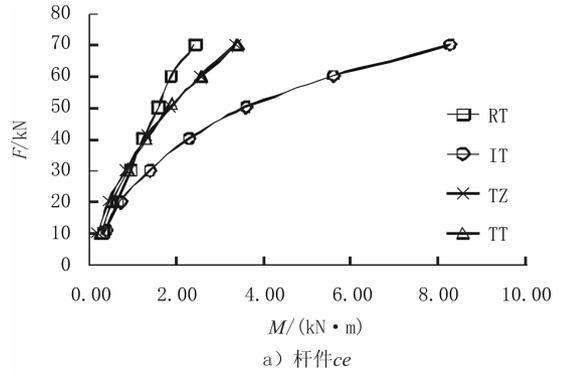
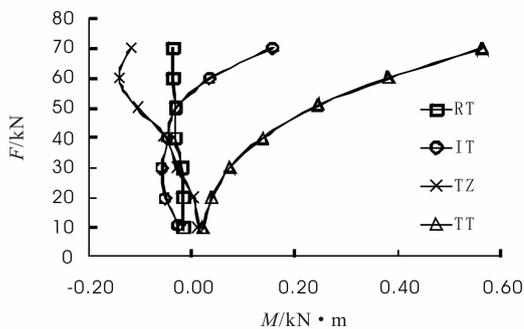


图9 下弦杆荷载 - 弯矩曲线

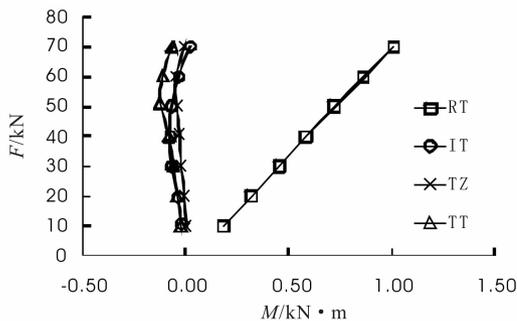
为明显的非线性模式;在同一弯矩作用下,较小弯矩($M < 1.8$ kN·m)情况下,试件IT的荷载小于其他3个试件,在较大弯矩情况下,荷载大小的排序为 $RT > TZ$ 和 $TT > IT$. 2)对于杆件eg,在较小荷载($F < 20$ kN)作用下,试件RT与TZ基本相同,试件IT与TT基本相同,而试件RT, TZ大于试件IT, TT;在较大荷载(20 kN $< F < 40$ kN)作用下,试件弯矩的大小排列为 $RT > TZ > IT > TT$;当荷载 $F > 40$ kN时,试件弯矩的大小排列为 $RT > TZ > TT > IT$;随着荷载的增加,试件RT和TT曲线基本按线性模式增加,试件TZ表现略微的非线性,而试件IT则为明显的非线性模式. 3)桁架断面形式的不同影响桁架下弦杆的受力:试件RT的下弦杆受力比较简单,荷载-弯矩曲线为线性;试件IT的下弦杆受力比较复杂,且弯矩比其他3个试件大;试件TZ, TT情况在这两者之间.

可见,当填充混凝土上弦杆的数量不变,桁架断面从矩形变化到梯形、倒三角形时,其弯矩逐步增大,说明同一截面的腹杆角度对下弦杆的弯矩影响很大.

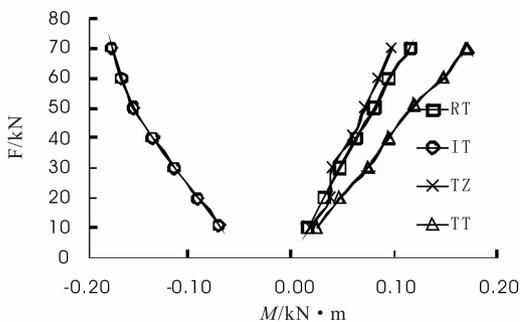
从图10可知:1)对于杆件ac,试件TT的弯矩较大,其他3个试件的弯矩均较小.随着荷载的增加,试件RT的弯矩基本不变,IT, TZ未表现出明显变化趋势,而TT表现出明显的非线性.从试件IT, TZ的曲线可以看出,杆件ac比较复杂. 2)对于杆



a) 杆件ac



b) 杆件be

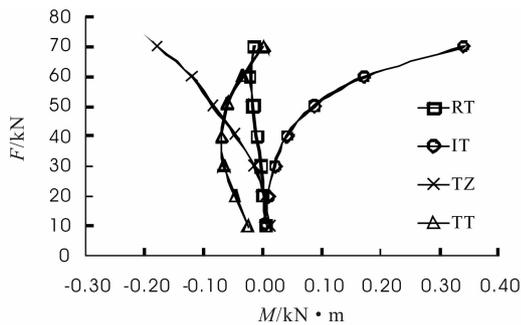


c) 杆件dg

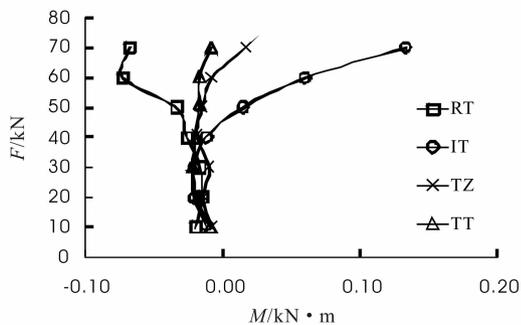
图 10 斜腹杆荷载 - 弯矩曲线

件 *be*, 试件 RT 的弯矩明显大于其他 3 个桁架, 且试件 IT, TZ, TT 的弯矩值基本相同; 随着荷载的增加, 试件 RT 的弯矩呈线性增加, 而其他 3 个试件的弯矩基本不变. 3) 对于杆件 *dg*, 4 个试件的弯矩均表现为线性变化. 在同级荷载下, 试件 RT, TZ 基本相同, 试件 IT, TT 的绝对值基本相同, 且试件 IT, TT 的弯矩绝对值大于试件 RT, TZ. 4) 桁架断面不同, 对试件各个斜腹杆的弯矩影响不同. 桁架由矩形、梯形到三角形的变化对杆件 *ac* 的弯矩影响越来越大, 即端斜腹杆 *ac*, 填充混凝土的上弦杆数量对其弯矩影响很大. 杆件 *be* 的弯矩只在试件 RT 情况下比较大, 对于受力较小的杆件 *dg*, 试件 IT, TT 发挥着更大的作用, 说明无论倒三角形还是正三角形桁架对其斜腹杆的利用率都较高, 受力也较合理.

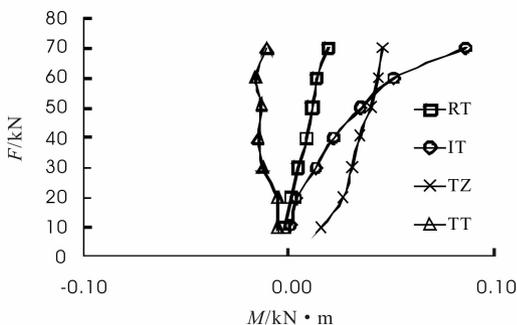
从图 11 可知: 1) 对于杆件 *bc*, 在较小荷载下, 4 个试件的弯矩基本相同, 但是在较大荷载下, 试件



a) 杆件bc



b) 杆件de



c) 杆件fg

图 11 直腹杆荷载 - 弯矩曲线

IT, TZ 的弯矩值大于 RT, TT. 随着荷载的增加, 试件 IT, TZ 表现出明显的非线性, 而试件 RT, TT 的弯矩基本未变化. 2) 对于杆件 *de*, 在较小荷载下, 4 个试件的弯矩基本相同, 但是在较大荷载下, 试件 IT, RT 的弯矩值大于 TZ, TT. 随着荷载的增加, 试件 IT 表现出明显的非线性, 而试件 RT, TT, TZ 的弯矩基本未变化. 3) 对于杆件 *fg*, 4 个试件基本呈线性变化. 4) 桁架断面的变化对直腹杆的影响是, 断面从矩形、梯形到倒三角形, 倒三角形桁架试件 IT 的直腹杆弯矩表现出明显的非线性. 由此可见, 桁架杆件在内力重分布中, 对试件 IT 的直腹杆影响比较严重^[9-10]. 故在设计桁架中, 直腹杆的偏心对其弯矩影响尤为严重.

从图 12 可知, 这 3 根杆件的弯矩曲线基本呈线性变化. 1) 对于杆件 *ab*, 试件 TT 的弯矩明显大于其他 3 个桁架. 2) 对于杆件 *bd*, 试件 IT, TT 的弯矩

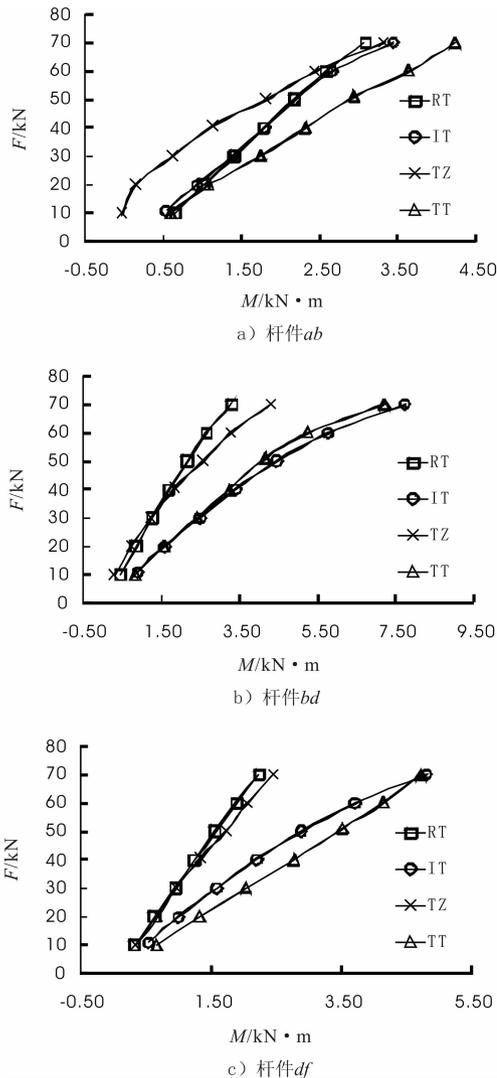


图12 弦杆荷载-弯矩曲线

明显大于 RT, TZ. 3) 对于杆件 df , 试件 IT, TT 的弯矩明显大于 RT, TZ, 与杆件 bd 相似. 4) 桁架断面的不同, 从矩形、梯形到倒三角形、正三角形这种断面的“削弱”, 对上弦杆 ab 影响较小, 而对杆件 bd, df 影响较大.

由此可见, 对于受压较大的上弦杆, 尤其是杆件 bd 和 df , 杆内填充的混凝土约束了钢管的屈曲变形及节点的强度, 使其能够承受较大的弯矩作用, 从而提高了桁架的整体承载力.

3 结论

对矩形断面、倒三角形断面、梯形断面和正三角形断面 4 榀圆钢管混凝土桁架进行了对比试验, 研究不同断面形式的桁架受力分布模式, 得出如下结论:

1) 断面形式的不同对桁架的上、下弦杆的轴力影响较大, 而对腹杆的轴力分布模式影响不同, 其

中试件 IT 的腹杆受力比较合理.

2) 在节点荷载作用下, 不同断面形式的桁架弦杆各个节段均承受很大的平面内弯矩, 在 $0-2/6l$ 段的桁架下弦节点受力较大, 试件 TT 除外. 试件 TT 的上弦杆及节点的受力较大.

3) 由于桁架断面形式不同, 影响桁架下弦杆的平面内弯矩受力情况. 桁架断面从矩形变化到梯形、倒三角形时, 其弯矩逐步增大, 说明同一截面的腹杆角度对下弦杆的弯矩影响很大. 试件 IT 的下弦杆受力比较复杂, 且弯矩比其他 3 个试件大. 而试件 TZ, TT 情况在这两者之间.

4) 由于桁架断面不同, 对试件各个斜腹杆的平面内弯矩影响不同. 桁架由矩形、梯形到三角形对 $0-2/6l$ 段杆件的弯矩影响越来越大.

5) 桁架断面的变化对直腹杆的影响是, 断面从矩形、梯形到倒三角形, 对直腹杆平面内弯矩影响也越来越明显, 试件 TT 除外.

6) 桁架断面的不同, 从矩形、梯形到倒三角形、正三角形这种断面的“削弱”, 对上弦杆 ab 影响较小, 而对杆件 bd, df 影响较大. 混凝土约束了钢管的屈曲变形及节点的强度, 提高了桁架整体承载力.

7) 对于圆钢管混凝土桁架, 上弦杆通过混凝土来增强其性能, 因此, 增强下弦杆及其节点性能将成为提高其承载力的方式之一.

参考文献:

- [1] Wardenier J, Kurobane Y, Packer J A, et al. Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints under Predominantly Static Loading[M]. Citect:TUV-Verlag, 1991.
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] Dutta D, Wardenier J, Yeomans N. Design Guide for Fabrication, Assembly and Erection of Hollow Section Structures[M]. Citect:TUV-Verlag, 1998.
- [4] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
- [5] 黄金金, 陈宝春. 腹杆形式对钢管混凝土桁架受力性能影响的研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 55.
- [6] 刘永建, 李运喜, 刘君平, 等. 受压弦管填充混凝土的矩形钢管桁架静力性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(4): 67.
- [7] 刘永建, 刘君平, 杨根杰, 等. 主管内填充混凝土矩形钢管桁架受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3): 107.
- [8] 刘永建, 刘君平, 张俊光. 主管内填混凝土矩形和圆形钢管桁架受弯性能对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 86.
- [9] 郑文忠, 柳旭东, 张博一. 灌浆圆钢管桁架-混凝土组合梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 15.
- [10] 张一博, 郑文忠, 王雪英. 内置灌浆圆钢管桁架预应力混凝土连续梁受力性能试验研究和理论分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 127.