

文章编号:1671-8879(2016)01-0069-08

钢管轻集料混凝土空间桁架梁受弯 承载力试验

傅中秋,吉伯海,刘海生,余振鹏,周宇

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了研究钢管轻集料混凝土空间桁架梁的承载力设计方法,进行了钢管轻集料混凝土空间桁架梁试件的纯弯加载试验,通过试件挠度和钢管表面应变分析,研究了桁架梁受弯承载性能。根据平截面假定并忽略腹杆的影响,对跨中截面进行受力分析,提出了空间桁架梁抗弯承载力的计算方法。研究表明:钢管轻集料混凝土空间桁架梁受弯过程中,腹杆受力较小,上下弦杆变形基本一致,跨中截面弦杆纵向应变分布基本符合平截面假定;桁架梁挠度超过 $L/50$ (L 为跨度)时,弦杆和腹杆表面光滑均没有鼓曲现象,破坏模式为延性破坏;实测受弯承载力按正常使用极限状态取值,试验承载力取值与计算结果相差 5% 以内。

关键词:桥梁工程;钢管轻集料混凝土;空间桁架梁;纯弯试验;受弯承载力;正常使用极限状态
中图分类号:U448.211 **文献标志码:**A

Bending capacity test of lightweight aggregate concrete filled steel tube spatial truss beam

FU Zhong-qiu, JI Bo-hai, LIU Hai-sheng, YU Zhen-peng, ZHOU Yu

(School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the bearing capacity design method of lightweight aggregate concrete filled steel tube (CFST) spatial truss beam, a lightweight aggregate concrete filled steel tube (CFST) spatial truss beam specimen was made to be tested. The bending capacity of specimen was studied through the analysis of deflection and strain of steel surface. Based on the plane cross-section assumption and neglecting the effect of web members, the stress at mid-span section of specimen was studied and calculation method of bending capacity was proposed. The results show that the web members keep relatively small force in the loading process. The deflection of upper chord members has the same tendency with that of bottom ones. The longitudinal strain distribution of chords at mid-span section obeys the plane cross-section assumption. When the truss girder deflection exceeds $L/50$, there is no buckling phenomenon on surface of the chord and web members, which indicates that it is ductile failure. According to the serviceability limit state, bending capacity value of the truss beam was taken. And the test value agrees well with

收稿日期:2015-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51208176);河南大学中央高校基本科研业务费项目(2015B17414)

作者简介:傅中秋(1983-),男,江苏南京人,副教授,工学博士,E-mail:fumidaut@163.com。

the test result which the deviation is less than 5%. 2 tabs, 10 figs, 20 refs.

Key words: bridge engineering; lightweight aggregate concrete-filled steel tube; spatial truss beam; pure bending test; bearing capacity; serviceability limit state

0 引言

钢管混凝土结构充分利用了钢材的受拉性能与混凝土的受压性能,与钢结构或配筋混凝土结构相比,其技术经济效益显著,在工程上被广泛利用^[1-2]。钢管混凝土应用在桥梁受压构件具有明显优势,如拱肋和索塔等,应用于组合梁也具有截面高度小、承载力高的优点^[3-6]。国内外也有部分钢管混凝土应用于主梁的研究和实例^[7-8]。

钢管混凝土空间桁架梁以钢管混凝土空间桁架代替了传统箱梁的腹板和底板,与劲性混凝土桥面板组合成为一个共同工作的整体,结合了钢管混凝土、空间桁架、劲性混凝土结构的特点,具有整体性好、空间刚度大、施工简便且造价低等优点^[9-10]。轻集料混凝土具有自重轻、保温隔热和耐火性能好等特点,将轻集料混凝土代替普通混凝土填充于桁架梁的钢管中,进一步减轻自重,可增大梁体的跨越能力^[11-14]。

目前中国已有4座钢管混凝土空间桁架梁桥建成,并进行了相当多的成桥静载试验,但实桥测试时结构基本处于弹性阶段,无法反映出钢管混凝土的非线性性能和极限承载能力^[13]。而其他现有的试验研究大多把钢管混凝土空间桁架等效成平面桁架,而未考虑结构空间行为的影响。为此,本文通过钢管轻集料混凝土空间桁架梁的受弯试验,对桁架梁破坏形态,荷载-应变曲线及承载力进行了研究,并提出了抗弯承载力的计算方法。

1 试验概况

1.1 试件设计及材料性能

本次试件的设计参数严格按照《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)中有关钢管构造的要求取值。试件示意图及测点布置见下页图1,桁架梁试件跨径为3 600 mm,高为449 mm,宽为994 mm。钢材采用Q235直缝钢管,上下弦杆直径 $\Phi 114$ mm、壁厚3.0 mm,上下平联杆和腹杆直径 $\Phi 59$ mm、壁厚1.9 mm,平联杆设置在*m*、*d*、*e*、*f*、*g*、*a*、*b*、*c*处。主管管外径比 $\beta=0.52$,主管与支管之间的夹角 $\theta=42^\circ$,空间管节点处管的横向夹角 $\varphi=67^\circ$,空间管节点处两支管横向最小间隙*g*点为42 mm、*a*点为39 mm。

为了有效减少焊接对桁架的影响,本次试验先将所有的杆件整体定位,所有杆件轴线尽量平直相交于节点中心,对支杆端部进行加工,不穿入主杆。首先将上弦杆、上平联、腹杆焊接,下弦杆、下平联焊接;腹杆灌入CL40轻集料混凝土,在腹杆外用振捣棒侧振;待腹杆中混凝土有一定强度后,将腹杆与下弦杆焊接;弦杆一端封死,将桁架梁直立,分层灌入CL40轻集料混凝土并振捣密实。在整个制作过程中,严格保证焊接质量。

钢材的强度及弹性模量按《金属拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)的要求由拉伸试验得到,轻集料混凝土骨料为页岩陶粒。钢管的力学性能、轻集料混凝土配合比及力学性能见表1、表2。

表1 钢材力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of steel

钢管	外径/mm	壁厚/mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /MPa
S1(弦杆)	114	3.0	301.9	354.5	1.95×10^5
S2(腹杆)	59	1.9	356.9	446.1	2.04×10^5

表2 轻集料混凝土配合比及力学性能

Tab. 2 Mix proportion and mechanical properties of lightweight concrete

强度等级	水泥/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	陶粒/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	f_{cu} (28 d)/MPa	f_{ck} (28 d)/MPa	E_c /MPa	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
CL40	460	670	650	180	40.9	35.2	26.5×10^3	19.0

注: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_{ck} 为混凝土棱柱体抗压强度; E_c 为混凝土弹性模量。

1.2 加载装置及测点布置

试验在河海大学土木与交通工程试验中心结构工程实验室进行,加载装置如下页图1(c)所示。桁架梁受弯试验通过主分配梁直接作用于放置在上弦

杆的钢梁上,100 t油压千斤顶手动加载。荷载由50 t压力传感器测量,应变及变形分别由电阻应变片和电测位移计测量。如图1(a)所示,在桁架梁弯曲平面内的 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 处布置3个电测位移计

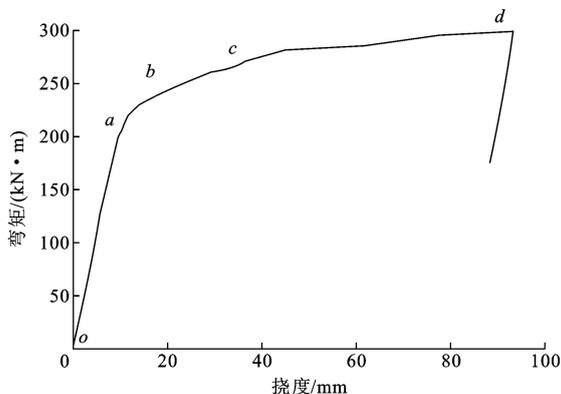


图2 跨中截面弯矩-挠度曲线

Fig. 2 Moment-deflection curve at mid-span section of specimen

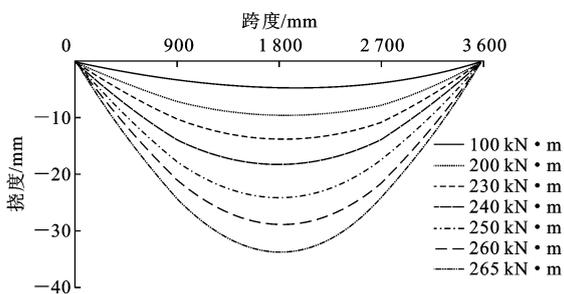


图3 挠度沿构件长度方向分布

Fig. 3 Deflection distribution along the component length of specimen

方向的分布图,在荷载的每个阶段,桁架梁的变形均与最终状态一致,整个桁架破坏形态呈弓形。根据以往研究结论,钢管桁架梁及钢管混凝土平面桁架梁大都以节点破坏而告终,节点破坏是其极限承载力的控制因素^[17]。由于本次试验承载力取值为正常使用极限承载力值,未达到承载力极限状态,加载结束后弦杆和腹杆表面光滑,均没有鼓曲现象,节点处也没有破坏,如图4所示。但在试验过程中,节点处存在残留的焊渣掉落,这在一定程度上反映了节点仍是结构的薄弱部位。在弦杆端口处,内置轻集料混凝土与钢管没有观察到相对滑移,整个桁架梁上下弦杆变形基本一致,试验以桁架梁整体弯曲挠度过大而结束。

2.2 杆件受力分析

下页图5为腹杆处的弯矩-平均纵向应变曲线,从图中应变可以看出,腹杆应力均比较小,没有达到钢材的屈服应变。由于靠近边跨处的腹杆要承担桁架梁一部分剪力,而跨中为纯弯段,边跨处的腹杆应力比跨中段腹杆(a_j 、 ae)应力大。

下页图6为弦杆弯矩-纵向应变曲线,下弦杆 ga 段中部附近,弯矩-应变曲线类似弯矩-挠度曲线,分为弹性、弹塑性、强化3个阶段。最下端应变



(a) 整体形态



(b) 下弦杆节点



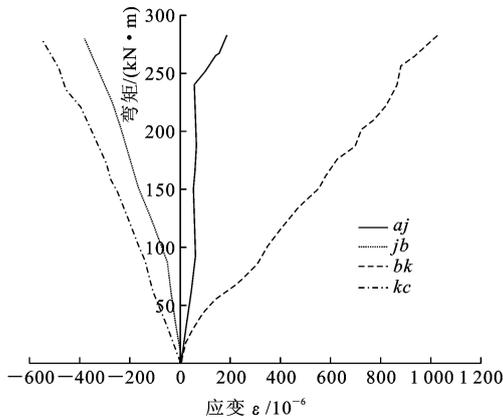
(c) 上弦杆节点

图4 桁架梁破坏形态

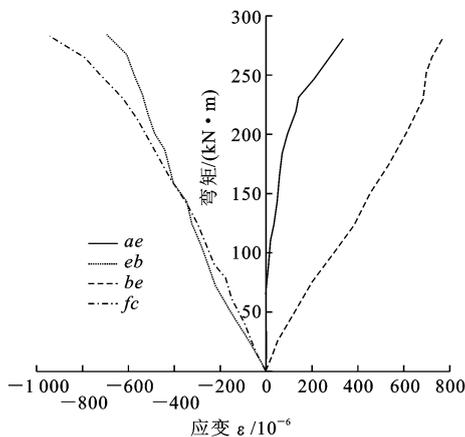
Fig. 4 Failure modes of truss beam

S_3 发展最快,其次是中部 S_2 、 S_4 应变,上部应变 S_1 发展最慢,但在超过屈服弯矩时,钢管均进入塑性阶段,可以看出下弦杆处于拉弯状态。上弦杆 h_j 段中部附近应变较为复杂,在屈服弯矩以内,4个测点均受压,其中最上端 S_1 应变发展最快,其次为 S_2 、 S_4 ,下部 S_3 发展最慢。随着荷载的不断增加,上弦钢管最上端进入屈服阶段,而下端则由受压变成受拉,上弦杆整体处于压弯状态。

下页图7为桁架梁中截面纵向应力分布,为方便观察到每级荷载下的应变分布,将图7分成弹性阶段(a)和弹塑性、强化阶段(b)两部分。取 he 段中部 $S_1 \sim S_4$ 应变与 a 点下部应变(a 点上部处于腹杆



(a) 中腹杆



(b) 边腹杆

图 5 腹杆纵向应变

Fig. 5 Strain of web members

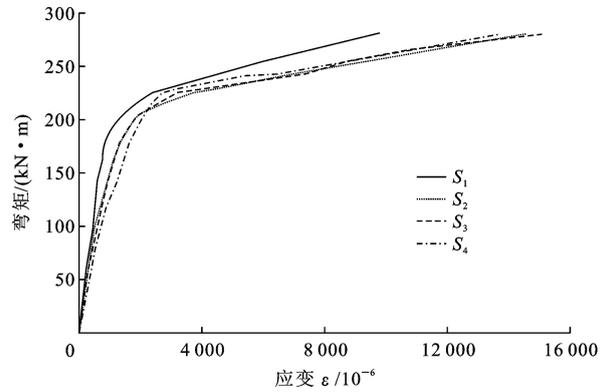
焊接处,不便于粘贴应变片),从图中可以看出,对于各个荷载阶段,试件截面应变分布基本符合平截面假定。加载初期,上弦杆受压,下弦杆受拉,由于轻集料混凝土抗拉能力差,下弦钢管承担的荷载比例较大,使得受拉区应变增加的比受压区快,下弦钢管先达到屈服应变,内置混凝土拉裂,中性轴向受压区移动,最终上弦钢管上侧屈服。

下页图 8 为弦杆的横向变形系数(测点横向应变与纵向应变的比值)随荷载的变化曲线。下弦杆钢管处于受拉区且并未屈服,故钢管的横向变形系数始终小于钢材泊松比的平均值 0.28^[18]。上弦杆横向变形系数随着荷载的继续增加,受压区顶部横向变形系数急剧增大并超过 0.28 时,进入屈服阶段。上弦杆位于受压区,从横向变形系数的变化来看,钢管对轻集料混凝土产生了约束作用。

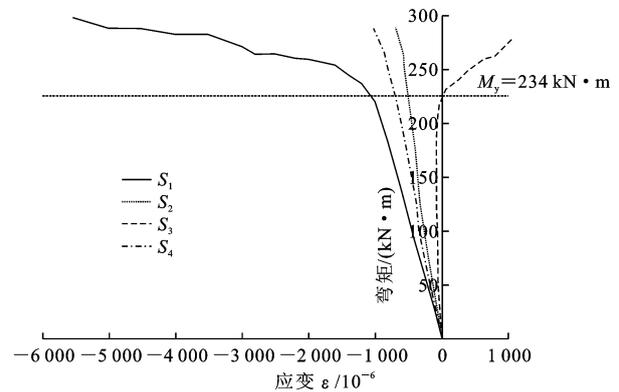
3 承载力计算方法

3.1 承载力试验值

根据钢管混凝土^[19]及钢筋混凝土试验有关资



(a) 下弦杆gh段



(b) 上弦杆hj段

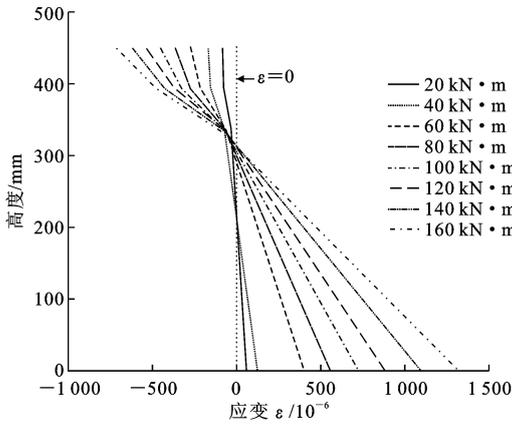
图 6 弦杆弯矩-纵向应变

Fig. 6 Load-strain of chords

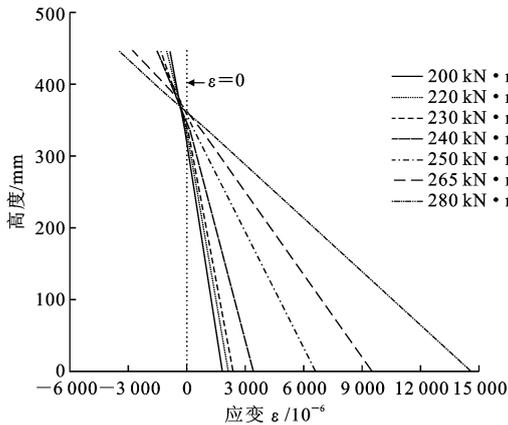
料^[14],取边缘最大纤维应变为 0.01 时对应的弯矩为极限弯矩 M_u (下页图 9 中 c 点),取应变为 0.003 时对应的弯矩为屈服弯矩 M_y (图 9 中 b 点),图 9 中 a 点代表比列极限。本次试验在下弦杆跨中截面布置了纵向应变片(图 1 中 a 点正下方),其弯矩-应变曲线如图 6 所示。从图中得到本次试验极限弯矩 M_u 为 267 kN·m,屈服弯矩 M_y 为 234 kN·m。对比跨中截面弯矩-挠度曲线,二者曲线形状吻合良好,也证实了极限弯矩、屈服弯矩取值的正确性。

3.2 承载力计算

对于桁架结构设计,目前工程中普遍采用的方法是按照理想的铰接模型来进行计算,所有的杆件只受轴力的作用。钢结构规范中规定:桁架平面内杆件的节间长度或杆件长度与直径之比不小于 12(主管)和 24(支管)时,可视为铰接^[20]。但是在实际受力中,桁架梁节点无论采用栓钉还是焊接连接方式,都难以实现所谓理想的“铰接”,况且本次构件杆件与直径比也不满足规定中“铰接”的要求,因此除受到轴力外,还会产生弯矩。为准确得到承载力计算公式,在试验的基础上,对跨中截面进行全程分析,通过强化阶段的应变分布来计算抗弯承载力,如



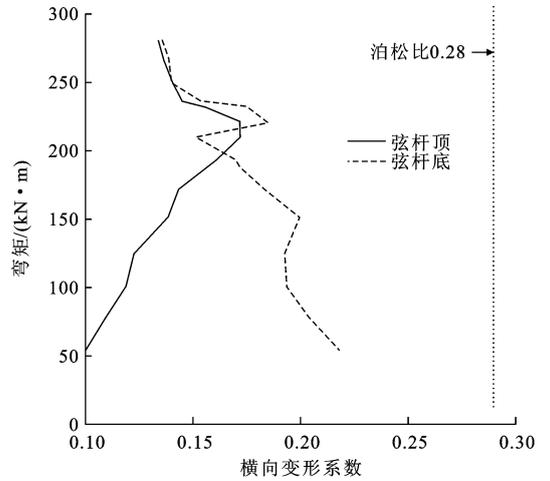
(a) 弹性阶段



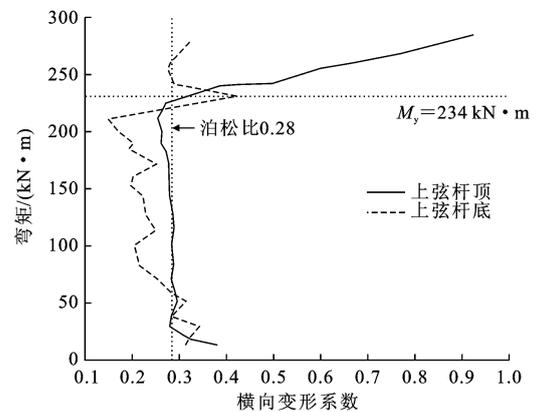
(b) 弹塑性、强化阶段

图7 桁架梁中截面纵向应变分布

Fig.7 Distribution of vertical strains at mid-span section of specimen



(a) 下弦杆ga处



(b) 上弦杆hj处

图8 弦杆的横向变形系数

Fig.8 Lateral deformation coefficients of chords

下页图10所示。计算承载力拟采用以下假定：

①桁架梁腹杆和弦杆连接可靠，在受力过程中符合平截面假定；

②桁架梁的极限承载力由跨中截面所能承担的最大弯矩决定；

③腹杆受力很小并且只受轴力，与上下平联杆类似，在桁架梁受弯过程中仅起着支撑连接弦杆的作用，不考虑其对受弯承载力的影响；

④本次试验的中性轴在上弦杆底部。下弦杆钢管轻集料混凝土全截面均匀受拉，采用钢管混凝土组合受拉强度 f_y' 。上弦杆受压区等效成均匀受压，并达到受压极限承载力，按材料受压强度取值；而受拉区位置靠近中性轴，应变及应力均很小，忽略对承载力的影响。

计算过程：

①按照钢管混凝土受拉强度公式计算得到下弦杆受拉承载力 T_1 ；

②根据上弦杆轴向合力 T_1 等于下弦杆所受拉力 T_2 ，算出等效受压钢材面积 A_{s1} 和受压混凝土面

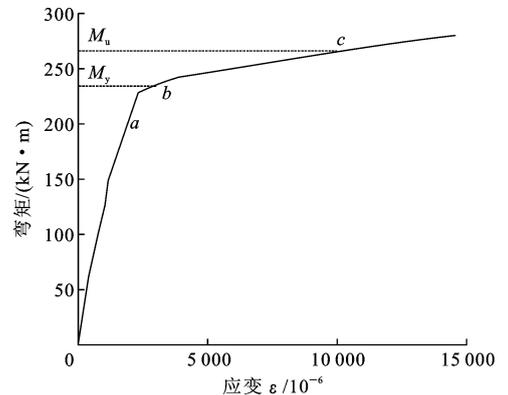


图9 下弦杆跨中截面纵向应变

Fig.9 Longitudinal strain at mid-span section of bottom chords

积 A_{c1} ，从而得到 A_{s1} 、 A_{c1} 的截面形心；

③分别求得 A_{s1} 、 A_{c1} 对下弦杆合力位置的弯矩，其和 M 即为桁架梁的极限承载力。

即可以得到以下公式

$$\sum T_Y = 3(A_{s1}f_y + A_{c1}f'_c) \quad (1)$$

$$\sum T_L = 2A_s f'_y \quad (2)$$

$$\sum T_Y = \sum T_L \quad (3)$$

$$M = 3(A_{s1}f_y h_1 + A_{c1}f'_c h_2) \quad (4)$$

式中: T_Y 为截面轴向压力; T_L 为截面轴向拉力; A_s 为单根弦杆钢管面积; A_{s1} 为上弦杆受压区钢管等效面积; A_{c1} 为上弦杆受压区轻集料混凝土等效面积; f_y 为钢管抗拉强度; f'_y 为钢管抗压屈服强度; f'_c 为受钢管约束的轻集料混凝土抗压强度; h_1 为受压区钢管合力位置距下弦杆形心的距离; h_2 为受压区轻集料混凝土合力位置距下弦杆形心的距离。

计算所得桁架梁极限承载力为 261 kN·m,与

试验值十分接近,误差在 5% 以内。因此在实际工程中,可以采用这种算法来预估桁架梁的抗弯承载力。

此外,如果中性轴在腹杆处,则

$$M = 3(A_s f_y h_1 + A_c f'_c h_2) \quad (5)$$

式中: A_s 、 A_c 分别为受压区钢材面积和混凝土面积。

如果中性轴在下弦杆处,当下弦杆下缘应变达到 0.01 时,上弦杆上缘应变已远远超过 0.01,上弦杆中的混凝土早已压碎,因此在设计时,应该尽量避免这种情况的发生。

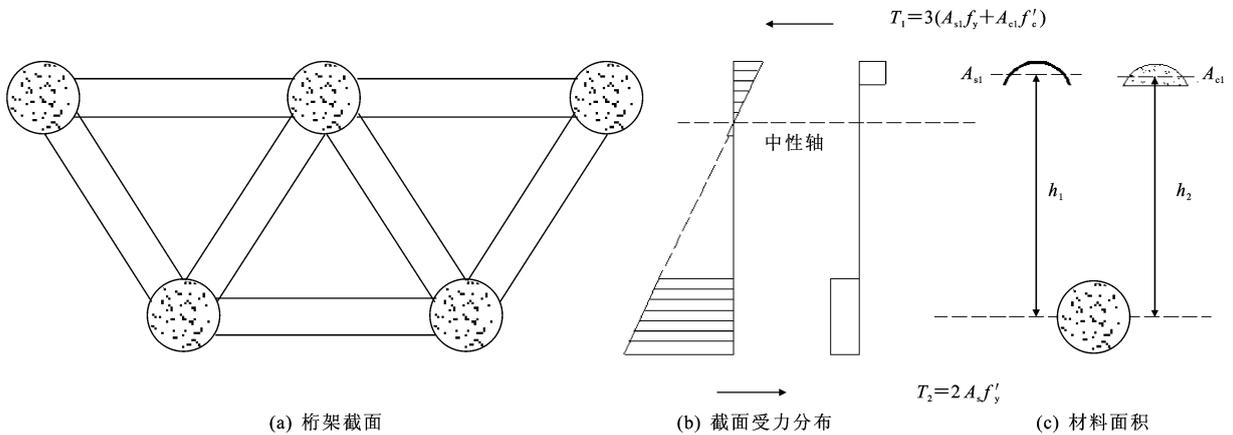


图 10 跨中截面应变分布及等效应变分布

Fig. 10 Distribution of strain and equivalent strain at mid-span section of specimen

4 结 语

(1) 钢管轻集料混凝土空间桁架梁在受弯作用下,下弦杆首先全截面受拉屈服,随后上弦杆部分受压屈服,腹杆受力很小。荷载-挠度曲线大致分为弹性、弹塑性、强化段 3 个阶段,跨中截面应变分布基本满足平截面假定。上下弦杆和腹杆变形协调,整体性能好,其破坏模式为典型的延性破坏。

(2) 受压区钢管横向变形系数在屈服荷载之后超过钢材泊松比,并随荷载的增加而显著增加;受拉区钢管横向变形系数始终小于钢材泊松比。无论是受压还是受拉,钢管对内置轻集料混凝土的约束效应明显,强度得到充分发挥。

(3) 根据平截面假定,忽略腹杆的影响,对跨中截面进行受力分析,得到抗弯极限承载力的计算方法,理论计算值与试验值相比,误差均小于 5%,可作为工程应用参考。

(4) 本试验试件数量有限,因此可结合有限元进行参数扩展分析,并结合局部节点连接试验和分析

作进一步深入研究。

参考文献:

References:

[1] KANG J Y, CHOI E S, CHIN W J, et al. Flexural behavior of concrete-filled steel tube members and its application[J]. International Journal of Steel Structures, 2007, 7(4): 319-324.

[2] NAKAMURA S, TANAKA H, KATO K. Static analysis of cable-stayed bridge with CFT arch ribs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(4): 776-783.

[3] MA Y S, WANG Y F, MAO Z K. Creep effects on dynamic behavior of concrete filled steel tube arch bridge[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2011, 37(3): 321-330.

[4] 杨有福, 曹 凯, 杨志泉, 等. 冻融循环作用后钢管混凝土轴压短柱力学性能[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 51-58.

YANG You-fu, CAO Kai, YANG Zhi-quan, et al. Mechanical properties of concrete-filled steel tubular

- stubs after freezing and thawing cycles under axial loading[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(3): 51-58. (in Chinese)
- [5] 郑皆连, 王建军, 冯 智, 等. 钢管混凝土拱段真空辅助灌注工艺试验[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(6): 44-50.
ZHENG Jie-lian, WANG Jian-jun, FENG Zhi, et al. Vacuum aided concrete grouting process test of concrete filled steel tube arch segment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(6): 44-50. (in Chinese)
- [6] 谷利雄, 丁发兴, 付 磊, 等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(1): 57-63.
GU Li-xiong, DING Fa-xing, FU Lei, et al. Mechanical behavior of concrete-filled round-ended steel tubular stub columns under axial load[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(1): 57-63. (in Chinese)
- [7] 董 军, 张 瑶, 魏 蓝, 等. 桥梁钢管混凝土主梁的试验分析[J]. *世界桥梁*, 2006, 51(5): 51-55.
DONG Jun, ZHANG Yao, WEI Lan, et al. Experimental analysis of a bridge girder made of steel tube filled with concrete[J]. *World Bridges*, 2006, 51(5): 51-55. (in Chinese)
- [8] NAKAMURA S, MOMIYAMA Y, HOSAKA T, et al. New technologies of steel/concrete composite bridges[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58(1): 99-130.
- [9] 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.
ZHANG Lian-yan, LI Ze-sheng, CHENG Mao-fang. On the structure of the space truss compound girder made from steel pipe concrete [M]. Beijing: China Communications Press, 1999. (in Chinese)
- [10] MACHACEK J, CUDEJKO M. Composite steel and concrete bridge trusses [J]. *Engineering Structures* 2011, 33(12): 3136-3142.
- [11] FU Z Q, JI B H, LU L, et al. Behavior of lightweight aggregate concrete filled steel tube slender columns under axial compression [J]. *Advanced Steel Construction*, 2011, 7(2): 144-156.
- [12] MOULI M, KHELAFI H. Strength of short composite rectangular hollow section columns filled with lightweight aggregate concrete[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(8): 1791-1797.
- [13] 张贵忠. 万州大桥钢管混凝土桁架技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
ZHANG Gui-zhong. Study on the technologies of CFST truss of Wanzhou Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese)
- [14] 王柏生. 结构试验与检测[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007.
WANG Bai-sheng. Structure experiment and test [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. (in Chinese)
- [15] 吉伯海, 傅中秋, 程 苗, 等. 钢管轻集料混凝土组合梁受弯性能的试验研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(1): 324-331.
JI Bo-hai, FU Zhong-qiu, CHENG Miao, et al. Experimental study on flexural behaviors of composite beam of lightweight aggregate concrete-filled steel tube[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(1): 324-331. (in Chinese)
- [16] HAN L H. Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(2): 313-337.
- [17] 陈宝春, 黄文金. 圆管截面桁梁试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(3): 31-36.
CHEN Bao-chun, HUANG Wen-jin. Experimental research on ultimate load carrying capacity of truss girders made with circular tubes[J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(3): 31-36. (in Chinese)
- [18] 陈宝春, 王来永, 欧智菁, 等. 钢管混凝土偏心受压应力-应变试验研究 [J]. *工程力学*, 2003, 20(6): 154-159.
CHEN Bao-chun, WANG Lai-yong, OU Zhi-jing, et al. Experimental study of stress-strain relation of eccentrically-loaded of concrete-filled steel tubular column [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(6): 154-159. (in Chinese)
- [19] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论—研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
ZHONG Shan-tong. Unified theory of concrete filled steel tube: research and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [20] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
GB 50017—2003, Code for design of steel structure [S]. (in Chinese)