

预应力内置圆钢管桁架混凝土组合梁的受力性能

张博一¹, 郑文忠¹, 苑忠国²

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 吉林电子信息职业技术学院 材料工程系, 吉林省 吉林市 132021)

摘要:通过4根预应力内置圆钢管桁架混凝土组合简支梁的试验,得到了试验梁的荷载-跨中挠度曲线、正截面承载力、裂缝分布与展开特征。结果表明:可基于平截面假定计算该类组合梁正截面的承载力,该类组合梁的平均裂缝间距取决于下弦钢管外径及下弦二钢管截面面积之和与截面有效受拉混凝土面积的比值。提出了与试验结果吻合良好的裂缝宽度和刚度计算公式。

关键词:工程力学;内置圆钢管桁架混凝土组合梁;正截面承载力;刚度;裂缝宽度;预应力
中图分类号:TU378.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)03-0636-06

Mechanical properties of truss concrete composite beam prestressed encased with circular steel tubes

Zhang Bo-yi¹, Zheng Wen-zhong¹, Yuan Zhong-guo²

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Department of Materials Engineering, Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin 132021, China)

Abstract: A truss concrete composite free-supported beam prestressed encased with 4 circular steel tubes was tested and its curve of load-deflection at mid span, the bending loading capacity, the distribution and development of the cracks were obtained. The results showed that the pure bending region of the beam accords with the plane section assumption from loading to failure, and the average crack spacing depends on the external diameter of the bottom chord tube and the ratio of the sum of the section areas of the two bottom chord tubes to the effective tensile concrete area. The formulas for the bending loading capacity, the stiffness, and the crack width which are in good agreement with the test results of the beam were presented.

Key words: engineering mechanics; truss concrete composite beam prestressed encased with circular steel tubes; bending loading capacity; stiffness; crack width; prestress

用钢桁架代替钢筋骨架,可满足在施工阶段挂模施工的要求^[1]。若采用灌浆圆管桁架替代角钢桁架,既可以解决柱纵筋、梁中预应力筋及喇叭管布置困难的问题,又可以提高钢桁架弦杆钢管

的压陷承载力和钢桁架的整体刚度,而且圆管下弦杆还可以充当部分按直线布置的预应力筋的孔道,比角钢桁架张锚措施更加便捷^[2]。关于在桁架弦杆内注浆的钢管桁架节点的受力性能与承载

收稿日期:2007-10-25.

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(教技司[2005]290号);黑龙江省科技攻关项目(GC4A609);哈尔滨市科技攻关计划项目(2004AA9CS187)(7150080050).

作者简介:张博一(1979-),男,博士研究生.研究方向:现代预应力结构. E-mail:boyi79@163.com

通讯联系人:郑文忠(1965-),男,教授,博士生导师.研究方向:现代预应力结构. E-mail:zhengwenzhong@hit.edu.cn

力计算,作者已经进行了一定的研究,并取得了一些成果^[3,4]。文献[5]对管桁架梁的受力性能与设计计算进行了研究,但对内置管桁架混凝土组合梁的受力性能与设计方法的研究尚未见报道。本文通过 4 根预应力内置圆钢管桁架混凝土组合梁的试验研究,提出这类组合梁的刚度、裂缝及承载力计算方法。

1 试验概述

1.1 材料性能

组成圆钢管桁架的上、下弦杆以及竖、斜腹杆均采用牌号为 Q345 的无缝热轧钢管焊接制成,钢管的力学性能如表 1 所示。

表 1 钢管力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel tube

规格 mm×mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /MPa	泊松比 ν
45×3.5	315	360	1.98×10^5	0.29
70×3.5	328	442	1.98×10^5	0.29
60×3.5	310	381	1.98×10^5	0.29
63.5×5	330	360	1.98×10^5	0.29
42×6	330	442	1.98×10^5	0.29
38×4	330	440	1.98×10^5	0.29

表 2 试验基本参数

Table 2 Schedule of information of test beams

试验梁	上弦钢管 $d_0 \times t_0$	下弦钢管 $d'_0 \times t'_0$	竖腹杆 $d_1 \times t_1$	斜腹杆 $d_2 \times t_2$	每根下弦管内 所用预应力筋	混凝土保护层 /mm	混凝土相对受 压区高度 ξ	预应力度 λ_p
B-1	45×3.5	70×3.5	38×4	42×6	10 ϕ 5	25	0.21	0.49
B-2	45×3.5	60×3.5	38×4	42×6	12 ϕ 5	25	0.21	0.59
B-3	45×3.5	63.5×5	38×4	42×6	12 ϕ 5	25	0.27	0.49
B-4	45×3.5	70×3.5	38×4	42×6	14 ϕ 5	25	0.26	0.57

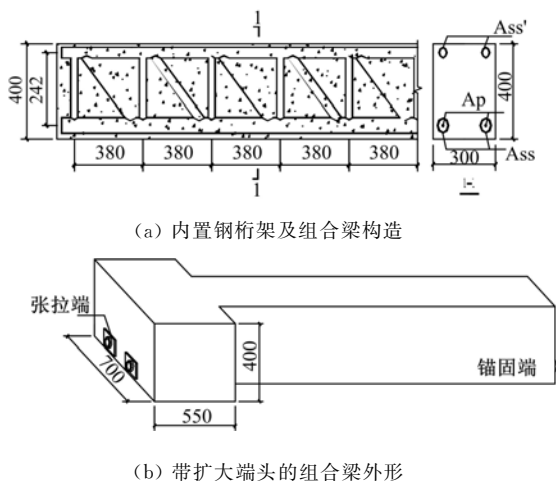


图 1 钢桁架与组合梁构造

Fig. 1 Construction detail of steel truss and composite beam

为避免桁架钢管发生压陷破坏,对试验梁内置钢桁架上、下弦杆进行了灌浆。下弦杆灌浆在混凝土结硬并完成弦杆内预应力筋张拉后进行。灌浆材料由 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥、UEA 膨胀剂和 FDN 高效减水剂构成。试验梁混凝土采用设计强度等级为 C40 的商品混凝土,标准条件养护 28 天,测得混凝土立方体抗压强度 $f_{cu} = 40.46$ MPa、轴心抗压强度 $f_c = 30.75$ MPa、弹性模量 $E_c = 3.27 \times 10^4$ MPa。

1.2 试件设计

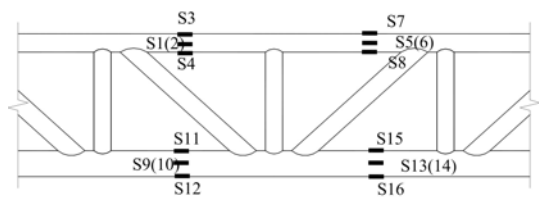
共设计 4 个试件,试件的试验参数见表 2。试验梁的截面尺寸均为 $b \times h = 300$ mm × 400 mm,计算跨度为 3800 mm,试验梁实际长度为 4500 mm。混凝土设计强度等级为 C40。预应力钢丝布置在桁架下弦圆钢管内,预应力锚具采用墩头锚,待组合梁混凝土结硬后再用撑角式千斤顶进行张拉。在组合梁预应力张拉端设置钢筋混凝土扩大端头以保证张拉在梁端顺利进行。内置钢桁架以及组合梁的构造如图 1 所示。

1.3 试验方案

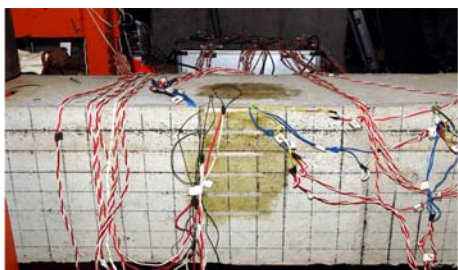
试验梁均为简支梁,采用手动千斤顶两点对

称加载。在达到试验梁跨中屈服荷载的 80% 之前,每级荷载为预估极限承载力的 10%。当达到屈服荷载的 80% 之后,适当减小每级荷载的大小,直至试件破坏为止。

试验梁的正截面抗弯承载力可通过在手动千斤顶上布置力传感器测得。试验梁在荷载作用下跨中挠度可由布置在试验梁跨中底部的百分表测得。为了测定钢桁架上、下弦杆钢管应变以及受压区混凝土应变,验证平截面假定的符合程度,分别在钢桁架纯弯区段以及组合梁纯弯区段布置了如图 2 所示的应变片。传感器、百分表及应变片的读数均通过 DH-3816 静态电阻测试系统采集。



(a) 钢管应变片的布置



(b) 混凝土应变片的布置

图2 应变片布置

Fig. 2 Distribution of strain gauge

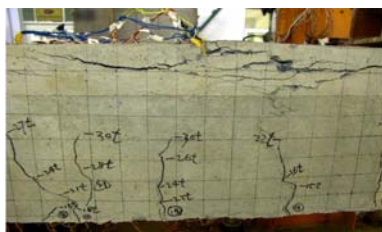
2 试验结果及分析

2.1 试验过程及破坏形态

试验梁纯弯区段混凝土压碎破坏形态如图3所示。以B-1为例,对试验梁破坏过程描述如下:试验梁加载至 $0.4P_u$ 左右,跨中受拉区混凝土



(a) 纯弯区段梁顶混凝土压碎情况



(b) 纯弯区段梁侧混凝土压碎情况

图3 试验梁混凝土破坏特征

Fig. 3 Failure characteristic of concrete in test beam

土出现横向裂缝,其高度延伸到钢桁架的下弦钢管中轴线附近;继续加载至 $0.5P_u$ 左右,跨中受压区混凝土沿钢桁架上弦杆出现纵向裂缝,纯弯区段横向裂缝数目随着荷载的增加而有所增加,但裂缝宽度变化不明显,横向裂缝在高度方向逐

渐向中和轴附近延伸扩展。当加载到 $0.65P_u$ 左右,横向裂缝基本出齐,但横向裂缝宽度和高度的发展仍较慢。当荷载达到 $0.9P_u$ 左右时,纯弯区段下弦钢管屈服,裂缝宽度发展较快。继续加载,试验梁受压区混凝土开始被压碎,发出清脆的混凝土碎裂声,试验梁跨中变形迅速加大,试验梁达到承载力极限状态,试验停止。

2.2 开裂荷载与极限荷载

试验梁受拉区混凝土横向开裂荷载实测值 P_{cr} 、受压区上弦杆附近混凝土出现纵向裂缝时的开裂荷载实测值 P'_{cr} 以及极限荷载实测值 P_u 如表3所示。

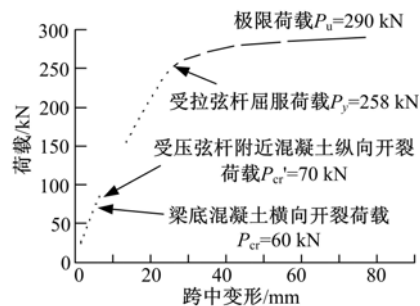
表3 开裂荷载与极限荷载实测值

Table 3 Test results of cracking load and ultimate load

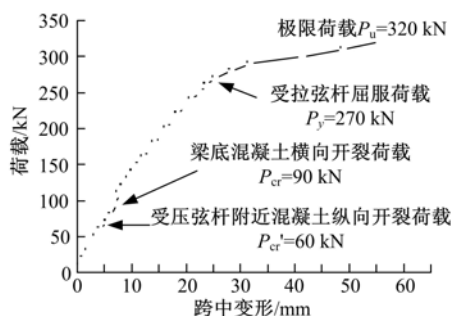
试验梁	P_{cr}/kN	P'_{cr}/kN	P_u/kN
B-1	60	70	290
B-2	90	60	320
B-3	85	130	380
B-4	70	60	350

2.3 荷载-跨中挠度曲线

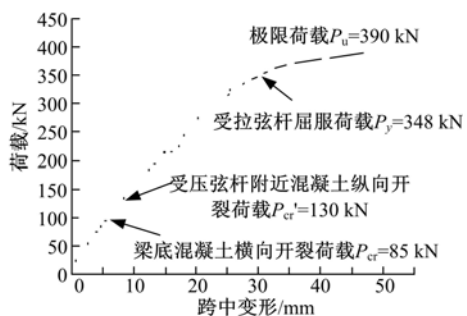
试验测得4根试验梁的荷载-跨中挠度曲线如图4所示。从图中可以看出,预应力内圆钢管桁架混凝土梁的荷载-跨中变形曲线总体上呈二折线的曲线特征。第一阶段为弹性阶段;从加载至开裂之后,荷载-位移曲线未出现明显的转折



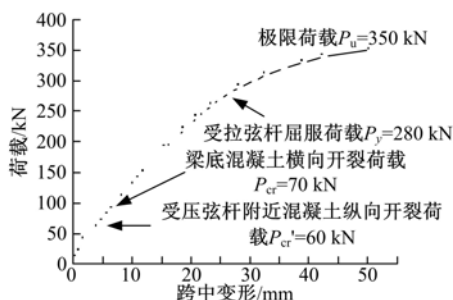
(a) 试验梁 B-1



(b) 试验梁 B-2



(c) 试验梁 B-3



(d) 试验梁 B-4

图 4 试验梁荷载-变形曲线

Fig. 4 Curve of load-deflection of test beams

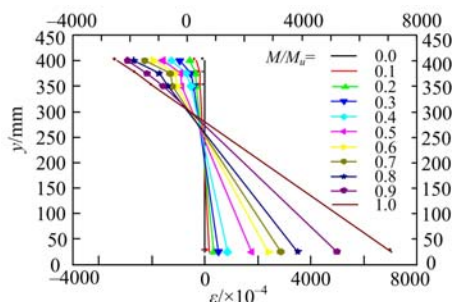
点。这是因为内置钢桁架在屈服之前,其本身的荷载-位移曲线是呈线性的,初期的开裂对组合梁的刚度削弱效果有限,组合梁整体刚度基本呈线性。第二阶段为弹塑性阶段:在受拉弦杆屈服之后,荷载-位移曲线出现转折点,此后随着荷载的增加,组合梁刚度下降明显,跨中变形加大。但是由于内置钢桁架的存在,受压区混凝土压碎后组合梁尚具有一定的承载能力,试件的破坏属于延性破坏。

2.4 试验梁应变在截面上的分布

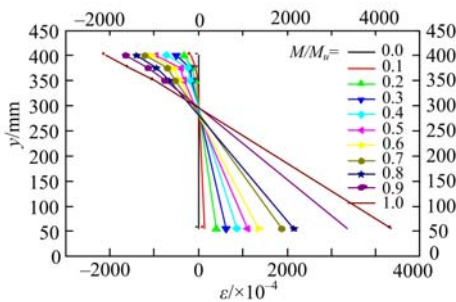
试验梁在各级荷载下纯弯区段应变沿截面的分布通过贴在钢管桁架上、下弦杆以及混凝土梁表面的应变片测得,如图 5 所示。其中纵坐标 0 点对应于梁下边缘。从图中可以看出,预应力内置圆钢管桁架混凝土组合梁的正截面抗弯承载力计算可以基于平截面假定进行。

2.5 试验梁裂缝分布特征

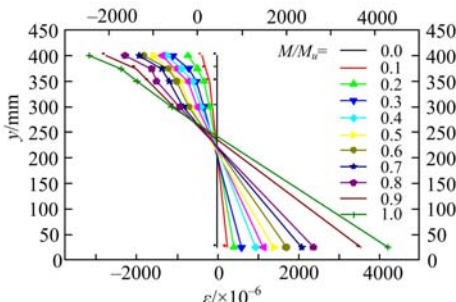
图 6 是试验梁纯弯区段破坏后的裂缝分布情况。试验结果表明,所考察的试验梁的裂缝分布与钢筋混凝土梁以及内置 H 型钢混凝土组合梁有所区别:①由于桁架弦杆直径相对普通钢筋较大,且预应力筋放在下弦钢管内,因此试验梁的平均裂缝间距相对较大;②由于在一定弯矩作用下,内置钢桁架承担一部分弯矩,这类混凝土梁所承



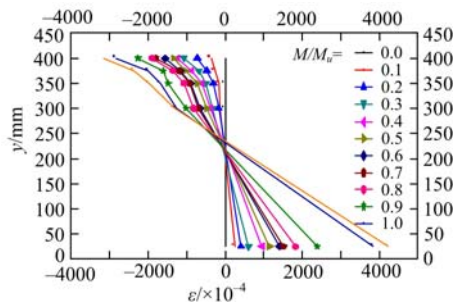
(a) 试验梁 B-1



(b) 试验梁 B-2



(c) 试验梁 B-3



(d) 试验梁 B-4

图 5 试验梁应变沿截面的分布

Fig. 5 Distribution of strain along the section of test beams

担的弯矩相对较小,故在使用荷载作用下裂缝延伸高度相对较低;③由于桁架腹杆的存在,有效地延缓了混凝土相对于钢管的粘结滑移。

需要指出的是,这类组合梁在工程应用时最大管径一般不超过 150 mm,且多要在梁体内配

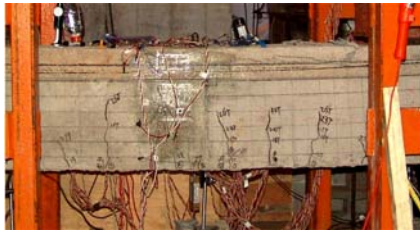


图 6 试验梁纯弯区段裂缝分布

Fig. 6 Distribution of test beams concrete crushing zone
置位于弦杆以外的曲线预应力筋,其裂缝宽度经试算可满足相关标准的裂缝控制要求。

3 组合梁正截面承载力计算

第一步,计算抗弯承载力 M_u 的预估值。 M_u 由等效钢桁架和等效预应力混凝土梁的抗弯承载力 $M_{u,1}$ 和 $M_{u,2}$ 组成。

$$M_{u,1} = A'_s f'_y (h_0 - a'_s) \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_{u,2} = \alpha_1 f_c b x (h_0 - 0.5x), & x < \xi_b h_0 \\ M_{u,2} = \alpha_1 f_c b \xi_b h_0^2 (1 - 0.5\xi_b), & x = \xi_b h_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: A'_s 为上弦杆钢管截面面积; a'_s 为受压混凝土上边缘至上弦圆钢管中心的距离; $\alpha_1 f_c b x = A_p f_{py} + A_{s,e} f_y$, $A_{s,e}$ 为高于上弦钢管面积的下弦钢管的剩余面积, A_p 为预应力筋, f_{py} 为预应力筋抗拉强度设计值; x 为等效预应力混凝土梁的受压区高度; h_0 为预应力混凝土梁截面的有效高度; ξ_b 为相对界限受压区高度, $\xi_b = \beta_1 / (1 + f_y / (\epsilon_u E_s))$;系数 α_1 和 β_1 可根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)中的有关规定取值。

第二步,将第一步求出的混凝土等效受压区高度 x 换算为实际受压区高度 $x_0 = 1.25x$ 。考虑到上弦钢管面积上可能较大应变较大,应力不均匀,钢管中心的应力值不等于于每个截面的应力值,因此根据平截面假定及钢管的本构关系来确定上弦钢管截面上任一点的应变及应力,通过面积积分求出上弦钢管的合力,取下弦钢管和上弦钢管抗力相等来计算等效钢桁架的抗力;通过下弦杆剩余抗力以及预应力筋与混凝土来计算预应力混凝土梁的抗力。

第三步,重复第二步计算,直至最后两次计算结果的偏差控制在 1% 之内,认为此时的计算值即为组合梁最终抗弯承载力 M_u 。

表 4 列出了按本文公式计算得到的 $M_{u,1}$ 和 $M_{u,2}$ 的计算值,试验梁的正截面抗弯承载力计算值 M_u^c 以及实测值 M_u^t 。令 $x = M_u^c / M_u^t$,则均值 $\bar{x} = 0.945$,均方差 $\sigma = 0.023$,变异系数 $\delta = 0.031$ 。

表 4 抗弯承载力实测值与计算值的比较

Table 4 Comparison between the test results of flexural carrying capacity and the calculated one

试验梁	$M_{u,1}$ (kN·m)	$M_{u,2}$ (kN·m)	M_u^c (kN·m)	M_u^t (kN·m)
B-1	87.5	196.2	313.7	330.6
B-2	84.1	203.2	327.4	364.8
B-3	88.9	254.9	423.8	433.2
B-4	87.5	244.1	381.6	399

4 组合梁刚度计算

预应力内置圆钢管桁架混凝土组合梁的刚度由两部分组成。第一部分刚度 $B_{s,1}$ 为假定下弦杆与上弦杆面积相等,腹杆按实际取用的钢桁架的弹性抗弯刚度,可以根据结构力学中关于简支梁挠度计算公式求出。第二部分刚度 $B_{s,2}$ 为下弦杆剩余面积、预应力筋与混凝土组成的等效预应力混凝土梁的刚度,可根据文献[6]中的有关规定计算: $B_{s,2} = 0.85 E_c I_0 / (k_{cr} + (1 - k_{cr}) \omega)$ 。其中, $k_{cr} = M_{cr} / M_k$, M_{cr} 表示组合梁正截面开裂弯矩值, M_k 表示按照荷载效应标准值计算的弯矩值。组合梁短期刚度为 $B_s = B_{s,1} + B_{s,2}$ 。

表 5 列出了正常使用阶段钢桁架刚度计算值 $B_{s,1}$ 、预应力混凝土梁的刚度计算值 $B_{s,2}$ 、试验梁跨中挠度实测值 f^t 以及计算值 f^c 。令 $x = f^c / f^t$,则平均值 $\bar{x} = 0.926$,均方差 $\sigma = 0.027$,变异系数 $\delta = 0.030$ 。

表 5 试验梁跨中挠度实测值 f^t 与计算值 f^c 的对比

Table 5 Comparison between the test results of deflection at mid-span f^t and the calculated one f^c

试验梁	$B_{s,1}$	$B_{s,2}$	f^c / mm	f^t / mm
B-1	8.47×10^{12}	2.66×10^{13}	23.7	24.5
B-2	8.47×10^{12}	2.48×10^{13}	23.6	25.3
B-3	8.47×10^{12}	3.09×10^{13}	25.1	28.1
B-4	8.47×10^{12}	2.96×10^{13}	24.2	26.5

5 组合梁裂缝宽度计算

5.1 平均裂缝间距

梁平均裂缝间距 l_{cr} 按下式计算

$$l_{cr} = 1.9c + 0.08 d_{eq} / \rho_{te}$$

式中: c 为下弦钢管下边缘至混凝土净边缘距离; d_{eq} 为 $0.7d_0$ (d_0 为下弦钢管外径); ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率, $\rho_{te} = (A_{ss} + A_p) / A_{te}$; A_{te} 为有效受拉混凝土面积,

$A_e = 0.5bh$ 。

表6列出了4根试验梁的平均裂缝间距计算值 l_{cr}^c 与试验实测值 l_{cr}^t 。令 $x = l_{cr}^c / l_{cr}^t$, 则平均值 $\bar{x} = 0.98$, 均方差 $\sigma = 0.05$, 变异系数 $\delta = 0.051$ 。

5.2 裂缝宽度计算

组合梁的平均裂缝宽度 w_m 的计算公式仍与普通混凝土梁相同, 即 $w_m = \alpha_s \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_{cr}$ 。式中各参数的计算可参考文献[6]。

短期荷载作用下最大裂缝宽度可根据平均裂缝宽度 w_m 乘以扩大系数 τ_s 求得, 即 $w_{s,max} = \tau_s w_m$ 。

通过4根试验梁纯弯区段正反两面95条裂缝的统计分析, 得到具有95%保证率的裂缝分布不均匀的扩大系数 $\tau_s = 1.73$, 即荷载标准组合作用下最大裂缝宽度为: $w_{s,max} = 1.73 \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} (1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_e})$ 。

表6列出了4根试验梁在短期荷载作用下的平均裂缝宽度 w_m 、最大裂缝宽度 $w_{s,max}$ 的计算值与试验实测值的相关结果。令 $x = w_m^c / w_m^t$, 则平均值 $\bar{x} = 1.09$, 均方差 $\sigma = 0.06$, 变异系数 $\delta = 0.055$ 。

表6 裂缝宽度计算值与实测值的比较

Table 6 Comparison between the calculated crack width and the tested one

试验梁	l_{cr}^c /mm	l_{cr}^t /mm	w_m^c /mm	w_m^t /mm	$w_{s,max}^c$ /mm	$w_{s,max}^t$ /mm
B-1	201.5	189	0.28	0.25	0.49	0.45
B-2	191.7	196	0.31	0.21	0.46	0.41
B-3	158.4	168	0.25	0.23	0.34	0.31
B-4	179.3	190	0.27	0.22	0.42	0.38

6 结 论

(1) 通过4根预应力内圆钢管桁架混凝土组合梁的受力性能试验, 得到该类组合梁的正截面承载力、刚度、裂缝分布与开展等试验结果。

(2) 试验结果表明, 可基于平截面假定进行这

类组合梁正截面承载力计算。这类组合梁的平均裂缝间距仅与下弦钢管外径和下弦二钢管截面面积之和与截面有效受拉混凝土面积的比值这两个因素有关, 提出了与试验结果吻合良好的裂缝宽度及刚度计算公式。

参考文献:

- [1] 郑文忠, 王英, 刘铁, 等. 对既有房屋套建增层改造的认识与思考[J]. 工业建筑, 2005, 35(4): 1-5.
Zheng Wen-zhong, Wang Ying, Liu Tie, et al. Thoughts and understanding of remodeling of adding storeys around existing building[J]. Industrial Construction, 2005, 35(4): 1-5.
- [2] 张博一, 郑文忠, 王英. 组合框架梁中两种内置预应力钢桁架的对比分析[J]. 钢结构, 2007, 22(8): 60-63.
Zhang Bo-yi, Zheng Wen-zhong, Wang Ying. Analysis and constrast of two prestressing stell trusses in composite frame girder [J]. Steel Construction, 2007, 22(8): 60-63.
- [3] Zheng Wen-zhong, Liu Xu-dong, Zhang Ge-ming, et al. Experimental research on ultimate bearing capacity of grouted-round-steel-tube N-joint[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 14(3): 322-329.
- [4] 郑文忠, 张格明, 柳旭东, 等. 灌浆方钢管压陷极限承载力试验研究[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(4): 794-799.
Zheng Wen-zhong, Zhang Ge-ming, Liu Xu-dong, et al. Experimental research on cave-in ultimate bearing capacity of grouted-square-steel tube[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2007, 37(4): 794-799.
- [5] 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, 2007, 28(3): 31-36.
Huang Bao-chun, Huang Wen-jin. Experimental Research on ultimate load carrying of truss giders made with circular tubes[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 31-36.
- [6] GB 50010-2002 混凝土结构设计规范[S].