

细长钢管混凝土构件混凝土应变测试

谢志涛,孙涵,黄文金

(福建农林大学 交通与土木工程学院,福建 福州 350002)

摘要:钢管混凝土桁梁是一种新型组合结构,管内混凝土应变状态是定义这种结构的关键指标之一,但其弦杆管径较小而长细比较大,很难准确测得弦杆管内混凝土应变。本文结合钢管混凝土桁梁受力性能试验研究,开发了内埋式混凝土应变计及其定位构造,并设计了配套的普通强度等级自密实混凝土的配合比和浇筑工艺。应用结果表明,本文开发的小管径、大长细比的钢管混凝土构件管内混凝土应变测试技术,可以减少结构损伤,造价低廉,而且设计和施工简便,可推广应用于钢管混凝土桁梁等新型组合结构的室内小比例模型。

关键词:组合结构;小比例模型;混凝土应变;测试技术

中图分类号:TU528.062

文献标识码:A

Study on concrete strain measuring technology of slender concrete filled steel tubular members

XIE Zhi-tao, SUN Han, HUANG Wen-jin

(School of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fujian Fuzhou 350002, China)

Abstract: Concrete filled steel tubular (CFST) truss girder is a new composite structure, for which the concrete strain status is defined as a key index of structural behavior. However, the member slenderness and the tube diameter of chord are so small that it is rather difficult to measure concrete strain. Based on experimental study on structural behavior of CFST truss girder, a kind of embedded concrete strain gauge with accessory location adjustment configuration are developed, and the special mix method for self-compacting concrete with normal strength grade and concrete pouring technique are also designed. It is verified by the experimental test that, the concrete strain measuring technology developed for infilled concrete of small-diameter but slender CFST members can help to minimize structural injure, cut cost and is convenient for engineering design and construction. The technology can be further applied for experiment of laboratory small scale model and in-situ construction of new composite structures like CFST truss girders.

Key words: composite structure; small scale model; concrete strain; measuring technology

钢管混凝土构件以其优越的抗压性能主要用于建筑结构柱、桥墩和拱肋等以受压为主的结构中^[1-2]。当柱子的长细比较大或荷载偏心率较大时,通常采用格构柱^[3]。钢管混凝土格构柱能以较小直径的柱肢取得较大的截面抗弯刚度,且柱肢以受轴压力为主,因而能够充分发挥钢管混凝土受压承载力大的优点^[4]。钢管混凝土桁梁是钢管混凝土结构从受压结构向受弯结构应用的推

广^[5-6]。与格构柱相似,桁梁能以较小截面的弦杆获得较大的整体抗弯刚度,是一种合理的受弯结构^[7-9]。钢管混凝土桁梁弦杆管内填充混凝土有助于减小腹杆内力引起的弦杆钢管径向不均匀变形,从而改善节点处弦杆钢管受力状态^[10-12]。

钢管混凝土桁梁也被一部分研究人员视为在弦杆管内填充混凝土的钢管桁架结构^[6]。钢管桁架结构的受力性能主要取决于相贯节点,而弦杆

内力一般不控制设计^[5]。显然,钢管混凝土结构优点之一就是钢管与管内混凝土的组合效应。因此,正确界定钢管混凝土桁梁的结构性能,与管内混凝土应力状态有很大关系。钢管混凝土桁梁的弦杆管径较小,不便于在管内布置混凝土应变计。以往在结构分析时,往往对管内混凝土受力状态作理想化假定,即管内混凝土与弦杆钢管协调变形。然而,已有的试验研究表明,在钢管混凝土桁梁丧失整体极限承载力时,弦杆管内混凝土受力并不明显,与传统钢管混凝土柱甚至钢管混凝土梁的管内混凝土有很大区别^[1,9]。常用的内埋式混凝土应变传感器造价高,而且其较大的外观尺寸势必挤占钢管断面空间而影响管内混凝土浇筑质量。为此,本文针对小管径、大长细比的钢管混

凝土构件,研究管内混凝土应变测试技术,开发简易的内埋式混凝土应变计及其定位装置,同时进行普通强度等级的自密实混凝土试配和浇筑工艺设计。

1 内埋式混凝土应变计设计

1.1 钢管混凝土桁梁试验模型简介

钢管混凝土桁梁模型全长为 6 000 mm,计算长度为 5 760 mm,外观高度为 602 mm,见图 1。弦杆钢管为 $\Phi 102.0 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$,腹杆钢管为 $\Phi 57.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$,腹杆布置采用修正 Warren 式,斜腹杆轴线与弦杆轴线夹角为 52° ,弦杆管内填充 C40 混凝土。

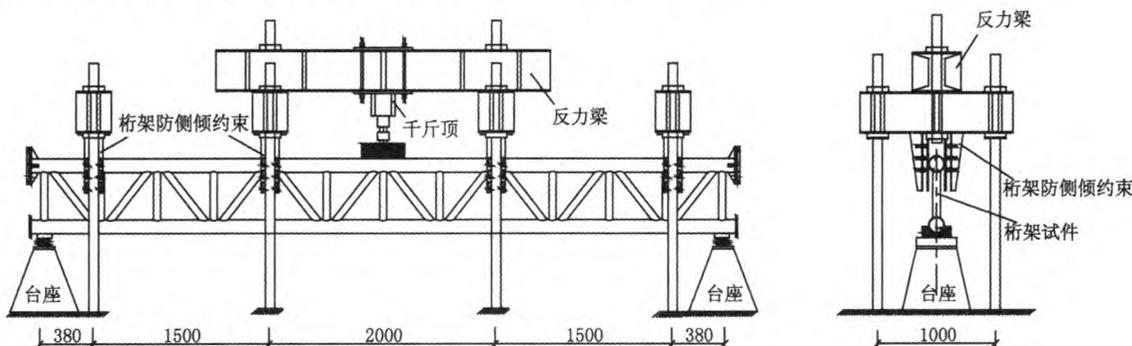


图1 钢管混凝土桁梁试件及加载装置 (单位: mm)

Fig.1 CFST truss girder specimen and loading setup (unit: mm)

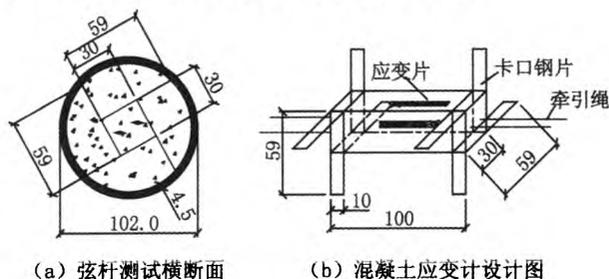
钢管混凝土桁梁试验模型下弦杆两端简支于反力台座上,通过千斤顶对上弦杆跨中截面施加荷载。为了减小外力和腹杆力对弦杆管内混凝土应变测试精度的影响,本试验只在 1/24 跨径截面以及跨中截面测试管内混凝土的轴向应变。

1.2 内埋式混凝土应变计设计

在往钢管混凝土桁梁弦杆管内灌注新拌混凝土之前,预先将混凝土应变计预埋于弦杆钢管设计位置处。混凝土应变计包括混凝土棱柱体、混凝土应变片、卡口钢片、数据线和牵引绳组成。混凝土应变计通过卡口钢片和牵引绳固定于测试截面。如图 2a 和 2b 所示,弦杆钢管外径 102.0 mm,壁厚 4.5 mm,混凝土应变计横断面边长为 30.0 mm,卡口钢片全长为 59.0 mm,自由段长度为 29.0 mm,弦杆钢管内部净空间足够新拌自密实混凝土通过并保证密实。

混凝土应变片采用 502 胶水粘贴于混凝土棱柱体表面,如图 2b 所示,并采用环氧树脂和纱布覆盖起来,以保护应变片在浇筑混凝土过程免受

振捣和水分侵蚀。混凝土棱柱体为普通混凝土,但其强度等级与管内自密实混凝土的一致。混凝土应变计卡口钢片采用结构胶粘贴于混凝土棱柱体表面,钢片自由端抵于弦杆钢管内壁,从而限制了混凝土应变计沿弦杆钢管径向移动。为了将混凝土应变计从弦杆端部沿着弦杆轴向(纵向)移动到设计位置,除了将钢片端角打磨成圆角外,还在混凝土棱柱体内预埋两条纵向牵引绳。



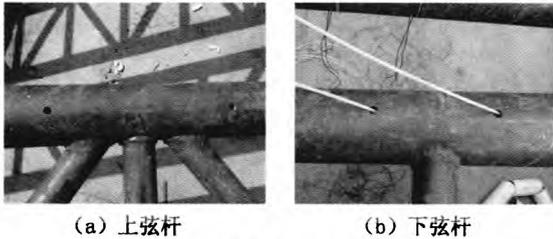
(a) 弦杆测试横断面 (b) 混凝土应变计设计图

图2 内埋式混凝土应变计及定位构造

Fig.2 Embedded concrete strain gauge and positioning structure

此外,采用手持式钻孔机在弦杆管壁开孔,如图 3 所示,通过塑料套管保护的混凝土应变片数

据线,这一措施既可保护数据线也可减小数据线干扰管内混凝土浇筑。加载试验前,采用结构胶和弧形钢板对弦杆钢管开孔处进行覆盖以进行局部加强。



(a) 上弦杆 (b) 下弦杆
图3 弦杆钢管上的应变片数据线孔道

Fig. 3 Holes on chord tube for data cables of strain gauge

2 管内混凝土试配和浇筑

2.1 自密实混凝土配合比设计

自密实混凝土又称自流平混凝土、免振捣混凝土,是基于施工性能来分类和命名的。自密实混凝土通过胶凝材料、粗骨料、细骨料和外加剂的选择来进行配合比优化设计,使得拌合物屈服值减小且又具有足够的塑性粘度;粗细骨料能够悬浮于水中不离析、不泌水,在不用或基本不用振捣的成型条件下,能充分填充所有的空隙,形成密实而均匀的混凝土结构;硬化后,具有良好的力学性能和耐久性能。

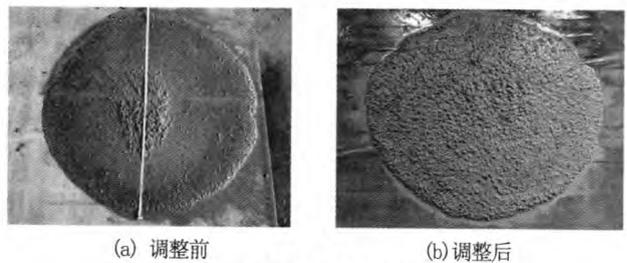
自密实混凝土有多种的配合比设计方法和理论依据,如固定砂石法^[13]、简易配合比法^[14]、参数法^[15]、改进全计算法^[16]、绝对体积法^[17]、纯粹经验推导法^[18]等,不同配合比设计的自密实混凝土的工作性能以及力学强度也有较大差异。本文桁梁模型试验分别采用了固定砂石法、绝对体积法和参数法进行试配。

自密实混凝土试配所采用的原材料为炼石牌 PO42.5 普通硅酸盐水泥,其密度 ρ_c 为 3.12 g/cm^3 ;一级粉煤灰,其近似密度 ρ_f 为 2.30 g/cm^3 ;闽江中砂,其近似密度为 2.67 g/cm^3 ,堆积密度为 1.48 g/cm^3 ;碎石,其近似密度为 2.61 g/cm^3 ,堆积

密度为 1.57 g/cm^3 ,最大粒径为 10 mm ;自来水;TW-PS 聚羧酸减水剂,为福建省建筑科学研究院所生产,固化率为 27% 。三种配合比的材料用量如表 1 所示。表 1 中减水剂掺量是指减水剂与胶凝材料的百分比; T_{50} 表示坍落扩展度达到 500 mm 的流动时间; T_v 表示 V 形漏斗内混凝土全部流出的时间,用于测量新拌混凝土的粘稠性和抗离析性; H_2/H_1 表示 L 型仪两边箱体中拌合物的高度比值,施工现场多采用此法; Δh 为 U 型箱 B 室未填充的高度,此方法用于测量混凝土拌合料通过钢筋间隙与自行填充模板角落的能力^[17,19]。

由表 1 可知,三种方法试配的自密实混凝土的工作性能均满足自密实混凝土工作性的一般要求。实际上,由于试配混凝土设计强度等级较低,在采用固定砂石法试配过程中,泌水现象比较严重,如图 4 所示,后经多次调整形成了表 1 中的配合比设计方案。

根据刚度相似原理,桁梁试件弦杆管内混凝土强度等级设计为 C40。为此,对三种自密实混凝土的不同龄期强度进行了测试。混凝土立方体标准试块抗压强度见表 2,三种方法配制的自密实混凝土的抗压强度均符合设计要求。综合对比混凝土的工作性和强度可以发现:(1)绝对体积法的用水量范围较窄,流动性较差;(2)参数法跟材料本身的性能有很大的关系,适用性较差;(3)固定砂石体积法的参数意义明确,设计过程简单,适用性较好,坍落扩展度大。因此,钢管混凝土桁梁试件



(a) 调整前 (b) 调整后
图4 固定砂石法坍落扩展度

Fig. 4 Slump of fixed aggregate method

表 1 不同设计方法的自密实混凝土配合比及其工作性能

Tab. 1 Mix proportion and workability of self-compacting concrete designed by various methods

技术指标	原材料用量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$					减水剂 /%	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	坍落拓 展度 /mm	T_{50} /s	T_v /s	$\frac{H_2}{H_1}$	$\Delta h/\text{mm}$
	水泥	沙子	碎石	水	粉煤灰							
固定砂石法	356.8	802.9	802.9	233.4	153.1	0.6	2349.0	730	3.5	12.9	0.91	23
绝对体积法	392.3	797.2	861.2	197.2	168.3	1.2	2383.4	690	3.7	18.2	0.81	20
参数法	336.7	713.1	963.0	217.0	144.4	1.2	2338.1	720	3.4	15.8	0.89	23
自密实混凝土指标要求							(- 550,750)(2.0,5.0) (5.0,20.0) ≥ 0.8 ≤ 30					

弦杆管内混凝土的配合比采用固定砂石法进行设计。

表2 混凝土标准试块抗压强度(单位:MPa)

Tab.2 Compressive strength of concrete (Units: MPa)

龄期	3d	7d	28d
固定砂石法	15.5	27.4	43.1
绝对体积法	14.4	25.1	41.0
参数法	19.6	29.6	45.0

2.2 浇筑桁梁试件管内混凝土

在浇筑钢管混凝土桁梁试件弦杆管内混凝土之前,采用PVC管模拟弦杆钢管进行试浇筑试验。在正式浇筑混凝土时,除了不断搅拌混凝土拌合料外,还采用食品保鲜膜覆盖拌合料以减少水分蒸发。浇筑混凝土时,将桁梁试件斜靠在预先搭设的施工平台上,利用混凝土自重加快混凝土沿弦杆钢管内壁流动、使之密实。此外,为了避免因泌水、离析等原因导致桁梁弦杆两端混凝土不够密实,还采用PVC管对弦杆两端进行接长。弦杆管内混凝土终凝完成后,抽掉PVC管再采用微膨胀补强混凝土和钢板对弦杆钢管两端进行封口。

弦杆管内混凝土浇筑分阶段进行,以安装管内混凝土应变计及其定位构造。正式灌注弦杆管内混凝土前,先将导线管从弦杆中部的开孔处深入至端部,将混凝土应变计数据线与导线管临时连接后,再通过导线管将混凝土应变计数据线和定位线牵引出弦杆钢管预留孔道。此时,混凝土应变计仍位于弦杆端部。此后,开始往弦杆钢管内灌注混凝土,直至混凝土砂浆开始从弦杆钢管开孔处外溢,然后通过牵引绳将混凝土应变计准确定位至设计截面。固定好牵引绳,继续浇注弦杆管内混凝土直至PVC管接长段。

在混凝土初凝和终凝完成后,分别采用万用表对混凝土应变片的工作状态进行检测,检测结果表明应变片电阻值正常,混凝土应变计处于正常工作状态。

3 结语

自密实混凝土的工作性能受原材料影响较大,在灌注钢管混凝土梁或桁架小比例模型的管内混凝土时,应采用原材料加强试配和浇筑工艺试验。对于实际工程,可以往钢管内泵送自密实混凝土,因此在使用内埋式混凝土应变计时只需考虑定位问题,而不必担心管内混凝土是否能够密实;若要对混凝土应变进行长期监测,则可以考

虑使用市面上常用的混凝土应变计;若对大量截面的混凝土应变进行短期监测,甚至是对管内混凝土温度梯度进行量测,则可采用本文开发的混凝土应变计,以降低造价和施工难度。

参考文献:

- [1] 韩林海,杨有福.现代钢管混凝土结构技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [2] 蔡绍怀.现代钢管混凝土结构[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 陈宝春.钢管混凝土拱桥(第二版)[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [4] 陈宝春,欧智菁.四肢钢管混凝土格构柱极限承载力试验研究[J].土木工程学报,2007,40(6):32-41.
- [5] 黄文金.钢管混凝土桁梁极限承载力研究[D].福州:福州大学,2009.
- [6] 韩林海.钢管混凝土结构-理论与实践[M].北京:科学出版社,2004.
- [7] 狄谨,周绪红,刘永健.矩形钢管混凝土桁架节点极限承载力研究[J].中国公路学报,2004,17(3):62-67.
- [8] 庄一舟,吴建华,吴开成,等.预应力钢管混凝土桁架应用与研究探讨[J].建筑结构学报,2003,24(2):38-41.
- [9] 张联燕,李泽生,程懋方.钢管混凝土桁架组合梁式结构[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [10] 陈宝春,黄文金.钢管混凝土K形相贯节点极限承载力试验研究[J].土木工程学报,2009,42(12):91-98.
- [11] 陈宝春,黄文金.圆管截面桁梁极限承载力试验研究[J].建筑结构学报,2007,28(3):31-36.
- [12] 黄文金,陈宝春.腹杆形式对钢管混凝土桁梁受力性能影响的研究[J].建筑结构学报,2009,30(1):55-61.
- [13] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.
- [14] NAN SU, KUNG CHUNG HSU, HIS WEN CHAI. A simple mix design method for self-compacting concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(12): 1799-1807.
- [15] 吴红娟.自密实混凝土配合比设计方法研究[D].天津:天津大学,2005.
- [16] 姜德民,高振林.高性能自密实混凝土的配合比设计[J].北方工业大学学报,2001,13(9):89-96.
- [17] TGJ/T283-2012.自密实混凝土应用技术规程[S].
- [18] 范志宏,苏达根,王胜年.自密实混凝土配合比设计方法研究[J].水运工程,2004(2):11-15.
- [19] GB/T 50081-2002.普通混凝土力学性能试验方法标准[S].

(责任编辑 刘存英)