

引用本文: [闫维明], 孔令旭, 慈俊昌, 等. 大径宽比钢管混凝土叠合柱轴压试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(6): 21-28.

[YAN Wei-ming], KONG Ling-xu, CI Jun-chang, et al. Experiment on Axial Compression of Concrete Filled Steel Tube Composite Columns with Large Diameter Width Ratio[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 21-28.

DOI: 10.19815/j.jace.2020.03002

大径宽比钢管混凝土叠合柱轴压试验

[闫维明]¹, 孔令旭¹, 慈俊昌¹, 周大兴²

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;

2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

摘要:为研究大径宽比钢管混凝土叠合柱的轴压性能, 设计制作了外径在 400~600 mm 范围内、含钢管率在 3.70%~6.75% 范围内的 6 根大径宽比钢管混凝土叠合短柱试件, 并对其进行了轴压试验。使用亚克力棒测量了钢管内部混凝土的应变, 给出了不同柱径试件各部位的典型应变增长曲线。结合试验结果, 引入考虑试件尺寸效应的混凝土材料强度折减系数, 提出了适应大径宽比钢管混凝土叠合柱的极限承载力计算公式。结果表明: 大径宽比叠合柱达到峰值荷载后承载力下降缓慢, 具有较好的延性; 含钢管率的提升直接增强叠合柱的承载力, 含钢管率为 6.08% 的试件比含钢管率为 3.70% 的试件承载力高 27.3%; 不同尺寸试件的破坏特点存在差异, 一般表现为尺寸越大, 破坏越显脆性, 但不同尺寸试件的各部位典型应变增长模式基本一致; 叠合柱外部钢筋混凝土在加载中后期对承载力贡献较小。

关键词: 钢管混凝土叠合柱; 轴压性能; 尺寸效应; 材料强度; 折减系数

中图分类号: TU312

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)06-0021-08

Experiment on Axial Compression of Concrete Filled Steel Tube Composite Columns with Large Diameter Width Ratio

[YAN Wei-ming]¹, KONG Ling-xu¹, CI Jun-chang¹, ZHOU Da-xing²

(1. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: In order to study the axial compression performance of concrete filled steel tube composite columns (CFSTCC) with larger aspect ratio, the axial compression test on six CFSTCCs with large diameter width ratio was completed. The diameter of the composite column was in the range of 400-600 mm and the steel pipe ratio of the composite column was in the range of 3.70%-6.75%. The strain of concrete inside the steel tube was measured with some acrylic rods, and the curves of typical strain growth in different parts of specimens with different diameters were given. Combined with the test results and size effects, the material strength reduction factor of concrete was introduced into the in composite columns, and the calculation formula of the ultimate bearing capacity for the CFSTCC with large diameter width ratio was proposed. The

收稿日期: 2020-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10004012201902)

作者简介: [闫维明] (1960-2020), 男, 黑龙江兰西人, 研究员, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: yanwm@bjut.edu.cn.

results show that the bearing capacity of CFSTCC with large diameter width ratio decreases slowly after reaching the peak load and has good ductility. The increasing of steel tube ratio directly enhances the bearing capacity of CFSTCC, and the bearing capacity of the specimen with 6.08% steel tube ratio is 27.3% higher than that of the specimen with 3.70% steel tube ratio. The specimens with different sizes have their own failure characteristics. Generally, the larger the size is, the more brittle the failure is, but the typical strain growth patterns of different size specimens are basically the same. The contribution of reinforced concrete outside the composite column to the bearing capacity is relatively small in the middle and later period of loading.

Key words: concrete filled steel tube composite column; axial compression performance; size effect; material strength; reduction factor

0 引言

钢管混凝土叠合柱(CFSTCC)是一种新型的结构柱构造形式,因其力学性能良好及在防火防锈等方面的综合优势,在工程中获得了广泛的应用^[1]。图 1 为几种常见的叠合柱截面形式,如图 1 所示钢管混凝土叠合柱(以下简称叠合柱)由外部钢筋混凝土与内部钢管混凝土两部分组成。在内圆外方形的叠合柱中,钢管外径与试件宽度的比值(以下简称径宽比)代表这两部分在叠合柱截面中的比例关系。径宽比作为代表叠合柱截面形式的重要参数,直接影响其力学性能。

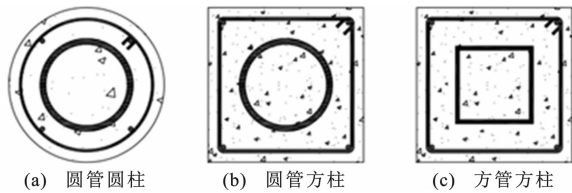


图 1 钢管混凝土叠合柱截面形式
Fig. 1 Section Forms of CFSTCC

目前,研究人员为研究叠合短柱轴压性能,进行了广泛的试验研究^[2-6]。在这些试验中,内圆外方形叠合柱试件宽度在 200~400 mm 之间,其径宽比范围为 0.35~0.665。实际工程中使用的叠合柱构件径宽比通常较大,一般介于 0.7~0.83 范围内且有逐渐上升的趋势。如深圳卓越·皇岗世纪中心^[7]中叠合柱的柱宽为 1 400 mm,钢管直径为 1 160 mm,径宽比为 0.83;绿景纪元大厦^[8]使用的叠合柱的柱宽达到了 1 400 mm,钢管最大直径为 1 160 mm,径宽比为 0.83;龙鼎大厦^[9]中叠合柱的柱宽为 1 400 mm,钢管直径为 1 000 mm,径宽比为 0.71。

尽管目前关于普通径宽比叠合短柱轴压性能的试验研究成果较丰富,但是对于径宽比较大(0.7~0.83)的叠合短柱缺乏细致的试验研究,从而难以明

晰大径宽比叠合短柱轴压性能的影响,导致无法建立适用于大径宽比 CFSTCC 轴压承载力的计算方法,限制了其实际工程应用的推广。因此亟需对大径宽比叠合柱的力学性能进行试验研究并建立更加准确实用的轴压承载力计算方法。

有鉴于此,本文设计了 6 根不同尺寸的大径宽比 CFSTCC 试件,并对其进行了轴压试验,进一步对这种构件的力学性能进行研究,并讨论适用于大径宽比 CFSTCC 的轴压承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

为研究大径宽比对叠合短柱轴压性能的影响,本次制作了 3 组共 6 根钢管混凝土叠合柱,截面形式均为内圆外方,即试件外观为方形,截面中部为圆钢管混凝土,箍筋形式采用八角复合箍。试件的构造如图 2 所示, S 为相邻箍筋中心距。

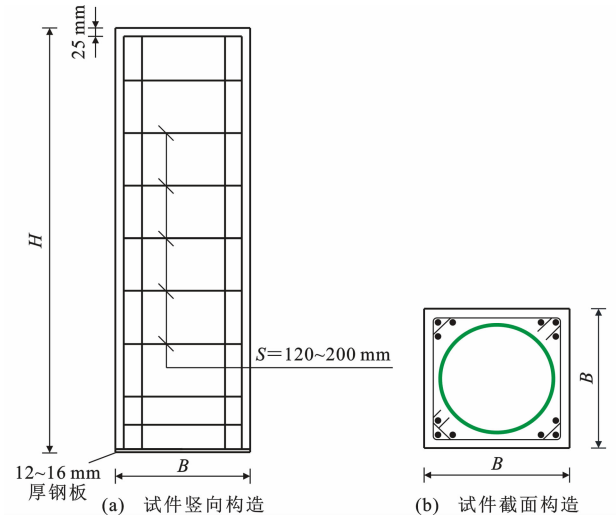


图 2 叠合柱构造详图
Fig. 2 Structural Details of Composite Column

试件按照高宽比 H/B 为 3 : 1 的比例设计成轴

压短柱,其中第 1 组试件的外部尺寸为 400 mm×400 mm×1 210 mm,第 2 组外部尺寸为 500 mm×500 mm×1 512 mm,第 3 组外部尺寸为 600 mm×600 mm×1 816 mm。试件的截面与配筋等构造参数如表 1 所示,钢材的材料性能见表 2。

表 1 叠合柱构造参数

Tab. 1 Structural Parameters of Composite Columns

| 试件编号 | $f_{ccu}/$ MPa | $f_{ocu}/$ MPa | D/mm | t/mm | $\alpha/\%$ | 纵筋 型号 | 箍筋 型号 | $\rho_v/\%$ |
|---------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|---------------|-------------|
| CFSTCC1 | 47.2 | 35.6 | 320 | 6.03 | 7.94 | 12 Φ 12 | Φ 8@150 | 0.766 |
| CFSTCC2 | 47.2 | 35.6 | 320 | 9.80 | 13.78 | 12 Φ 12 | Φ 8@150 | 0.766 |
| CFSTCC3 | 47.2 | 35.6 | 400 | 7.61 | 8.51 | 12 Φ 16 | Φ 8@120 | 0.745 |
| CFSTCC4 | 47.2 | 35.6 | 400 | 12.00 | 13.17 | 12 Φ 16 | Φ 8@120 | 0.745 |
| CFSTCC5 | 47.2 | 35.6 | 500 | 9.80 | 8.51 | 12 Φ 18 | Φ 10@200 | 0.759 |
| CFSTCC6 | 47.2 | 35.6 | 500 | 15.98 | 14.14 | 12 Φ 18 | Φ 10@200 | 0.759 |

注: f_{ccu} 为钢管内混凝土立方体抗压强度; f_{ocu} 为钢管外混凝土立方体抗压强度; D 为钢管外径; t 为钢管实测厚度; α 为内部钢管混凝土含钢率; ρ_v 为体积配箍率。

表 2 钢材材性性能

Tab. 2 Steel Material Property

| 类型 | t/mm | f_a/MPa | f_{au}/MPa | $\delta/\%$ |
|----|---------------|------------------|---------------------|-------------|
| 钢管 | 6.03 | 350.0 | 485.0 | 14.3 |
| | 7.61 | 304.7 | 419.3 | 21.7 |
| | 9.80 | 343.0 | 476.3 | 33.1 |
| | 12.00 | 373.3 | 536.3 | 20.7 |
| | 15.98 | 372.0 | 565.3 | 18.8 |
| 类型 | d/mm | f_s/MPa | f_{su}/MPa | $\delta/\%$ |
| 钢筋 | 8 | 483.7 | 701.7 | 23.5 |
| | 10 | 434.7 | 603.0 | 17.5 |
| | 12 | 432.0 | 657.7 | 21.6 |
| | 16 | 470.1 | 641.0 | 18.0 |
| | 18 | 442.7 | 627.7 | 19.5 |

注: d 为钢筋外径; f_a 为钢管屈服强度; f_{au} 为钢管钢材极限强度;
 f_s 为钢筋屈服强度; f_{su} 为钢筋拉伸强度; δ 为钢材延伸率。

1.2 加载方式与量测

试验在北京市结构工程与防灾重点实验室 112 MN 多功能联合加载结构试验系统上进行。试验加载装置与试件安装如图 3 所示。

试验加载方法参考《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012),首先对试件进行预加载,施加承载力预估值的 5%,预加荷载在 400~1 000 kN 之间,检查试件是否物理对中安装。正式加载时首先进行力加载控制,加载速率约为 7 kN·s⁻¹,每级荷载持荷 5 min 拍照并观察,加载至预估极限荷载的 80%时,控制方式转成位移加载,加载速率为 1 mm·min⁻¹,加载至试件发生明显破坏,停止加载。

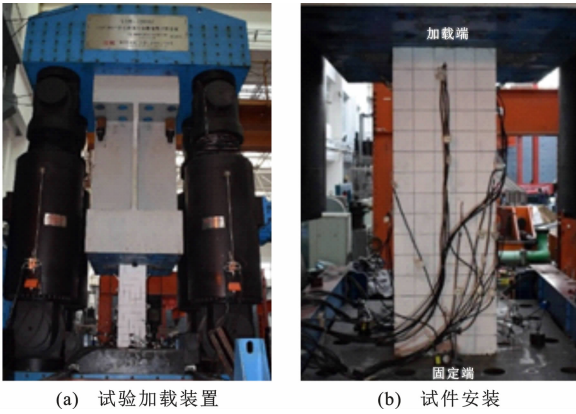


图 3 试验装置与试件安装

Fig. 3 Test Device and Specimen Installation

在试件的 4 个侧面中心布置线性位移传感器(LVDTs),用以量测试件的轴向变形。混凝土浇筑前,在试件横截面正中心、试件中部及 1/4 和 3/4 高度处,悬挂放置贴有应变片的亚克力棒,用于测量核心混凝土的应变。在钢管中部的 2 个侧面、上侧 1/4 处侧面、下侧 1/4 处角部粘贴纵向与横向应变片。正对角的纵筋中部及对边的纵筋各粘贴 1 个应变片。在柱中部的 2 道箍筋中部粘贴应变片。在柱的每个侧面中部粘贴纵向混凝土应变片各 1 个。图 4 为应变片及位移计布置,图 4(a)中 A,B,C 为亚克力棒三处测点,钢管上应变片位置见图 4(c),(d),其余测点布置的详细位置如图 4 所示。

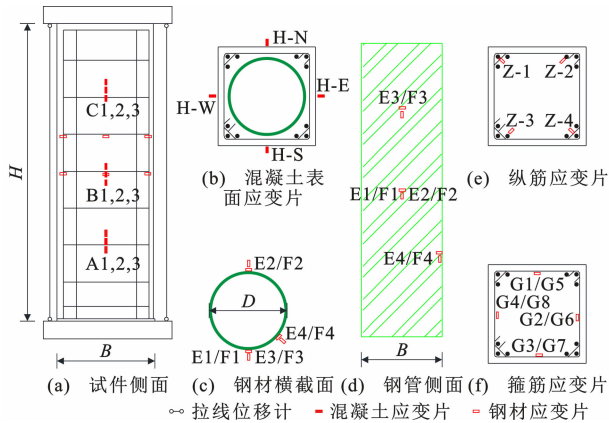


图 4 应变片及位移计布置

Fig. 4 Arrangement of Strain Gauge and Displacement Meter

2 试验结果与分析

2.1 试件破坏过程

所有试件在加载前期均处于线弹性阶段,随着承受荷载的增加,最早在极限荷载的 60%时,柱头中部及脚部出现纵向及斜向裂缝。之后柱中部出现

较为明显的纵向裂缝,并向柱两端开展。在荷载加至极限荷载 75%~85%时,试件的荷载-位移曲线开始出现曲线,即试件开始屈服,加载前期结束。

将从试件开始屈服到加载至极限荷载定义为加载中期,期间试件承载力提升缓慢,裂缝开展较前期稍快,试件保护层开始脱落,此时 3 组试件裂缝开展方式出现差异,预示着试件最终破坏形态的不同,如图 5 所示。

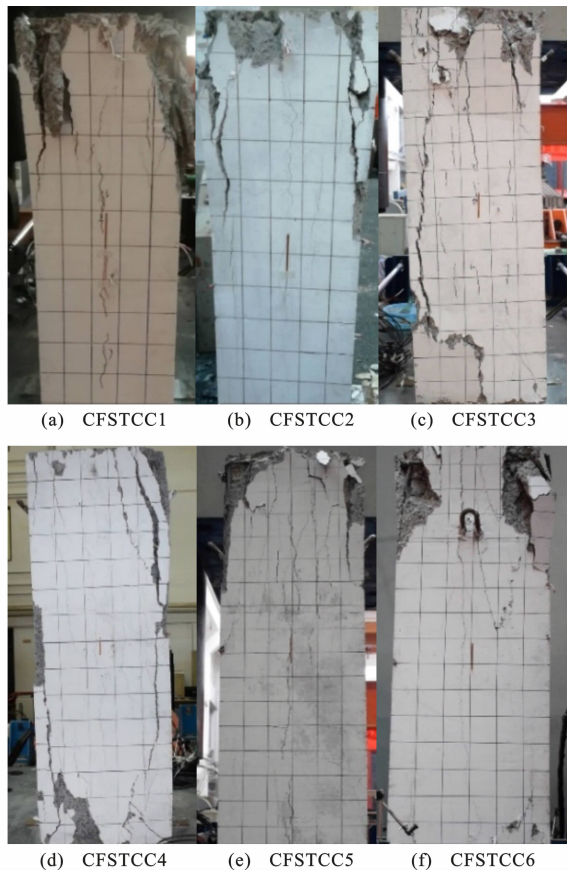


图 5 试件最终破坏形态

Fig. 5 Final Failure Modes of Specimens

试件承受荷载达到极限荷载后,试件 CF-STCC1~5 的承载力开始缓慢下降,试件 CFSTCC6 承载力缓慢上升,这段时间视作加载后期。柱整体表现出良好的延性,随着位移增加较快,此时柱的上下两端裂缝迅速开展,保护层全部开始脱落并发展,少部分箍筋与纵筋发生明显屈服。对于不同尺寸的 3 组试件其最终破坏形态略有不同:第 1 组试件主要表现为柱中上部保护层混凝土开裂脱落,脚部破坏不明显;第 2 组试件破坏的突出特点为上下两端斜向裂缝向中部开展,并最终在试件中间外鼓脱落;第 3 组试件上部保护层混凝土破坏严重,脚部亦出现破坏。所有试件的钢管及钢管内混凝土均未发生严重变形,反映了其良好的变形能力,同时表明其承

载能力仍有继续发挥的空间。

2.2 轴向荷载-应变曲线

所有试件的整体轴向荷载-应变($N-\epsilon$)曲线如图 6 所示,纵坐标为实测荷载(加载设备的力传感器采集的力值),横坐标为试件的轴向应变,所有试件的最终试验结果见表 3,值得说明的是对于试件 CF-STCC6 而言,在其余试件达到最大承载力的应变位移附近,额外定义了一个峰值荷载及峰值应变。

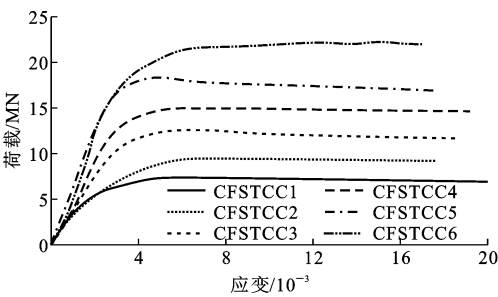


图 6 轴向荷载-应变曲线
Fig. 6 Axial Load-strain Curves

表 3 特征点试验结果

Tab. 3 Test Results of Characteristic Points

| 试件编号 | N_m/kN | ϵ_m |
|---------|-----------------|--------------------------|
| CFSTCC1 | 7 437 | 0.006 79 |
| CFSTCC2 | 9 468 | 0.008 19 |
| CFSTCC3 | 12 578 | 0.007 13 |
| CFSTCC4 | 15 021 | 0.005 82 |
| CFSTCC5 | 18 318 | 0.004 87 |
| CFSTCC6 | 22 880 | 0.015 10 |
| CFSTCC6 | 21 705(N_0) | 0.007 58(ϵ_0) |

注: N_m 为试件极限承载力; ϵ_m 为极限承载力时的试件应变; N_0 为峰值荷载; ϵ_0 为峰值应变。

结合图 6 与表 3 可以得到以下结论:

(1)对于具有较大径宽比的钢管混凝土叠合柱而言,荷载在到达峰值后下降缓慢或略有提升,其轴向荷载-应变曲线形态近似于约束良好的钢管混凝土柱的荷载-应变曲线^[10-11]。

(2)含钢管率的提高直接导致叠合柱承载能力的提升,含钢管率为 6.08%的试件 CFSTCC2 相比含钢管率为 3.70%的试件 CFSTCC1 承载力高 27.3%,含钢管率在 3.70%~6.75%范围内叠合柱荷载-变形曲线的形态差距不大。

(3)对于具有相同含钢管率的叠合柱试件,随着试件尺寸的增加,其最大承载力基本呈线性增长。

2.3 各部位荷载-应变曲线混凝土应变测量

前文已说明,在钢管混凝土截面核心不同高度处放置贴有应变片的亚克力棒,用以测量核心钢管

混凝土的应变,试验结果表明:除部分应变片损坏外,此方法基本能测量到混凝土在整个加载过程中的应变变化,对钢管内部混凝土应变测量具有较好的效果。如图7为试件CFSTCC5位移计测量并转化的整体应变结果与2个亚克力棒测点测量结果的对比,吻合十分良好。证明对于钢管混凝土及类似的构造形式,不便于直接测量混凝土的应变,这种使用内置亚克力棒测量混凝土应变的方法是可行而有效的。

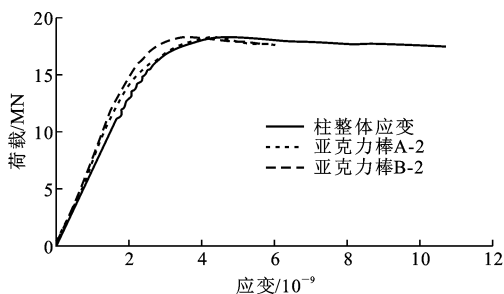


图7 CFSTCC5 混凝土应变

Fig. 7 CFSTCC5 Concrete Strain

图8为试件CFSTCC3, CFSTCC4, CFSTCC5完好测点的钢管内混凝土应变测试结果,由于测量部位的不同,各测点的应变增长速率略有差异,在增长规律上保持一致。

图9为3根不同柱径试件的各部位典型应变结果,可以看到钢管外部混凝土的表面应变变化基本在试件承载力达到极限荷载前后停止,这是因为混凝土的开裂导致外部的应变片失效。核心混凝土内部亚克力棒上的应变片因保护较好能够工作较长时间。通过对比可以看出,在加载前期一直到外部应变片失效,核心钢管混凝土的应变增长远快于外部钢筋混凝土的应变增长,例如试件CFSTCC5加载至15 000 kN(82% N_m)时,典型核心混凝土的应变数值在 $2\ 000 \times 10^{-6} \sim 3\ 100 \times 10^{-6}$ 范围内,典型外部混凝土应变数值在 $650 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ 范围内。内外混凝土应变差异说明在整个加载过程中,叠合柱中钢管混凝土部分承担了主要的荷载。

相关研究表明^[12-13],钢管混凝土的极限应变要大于钢筋混凝土的极限应变,而叠合柱钢管内部混凝土的应变发展快于外部钢筋混凝土的应变发展,这实际上更有利于在受压过程中两部分承载力的协调发挥。

通过观察试件CFSTCC2, CFSTCC4, CFSTCC5中钢材的典型应变测量结果(图9),对比钢管的纵向与横向应变,可以看出在各叠合柱试件中,

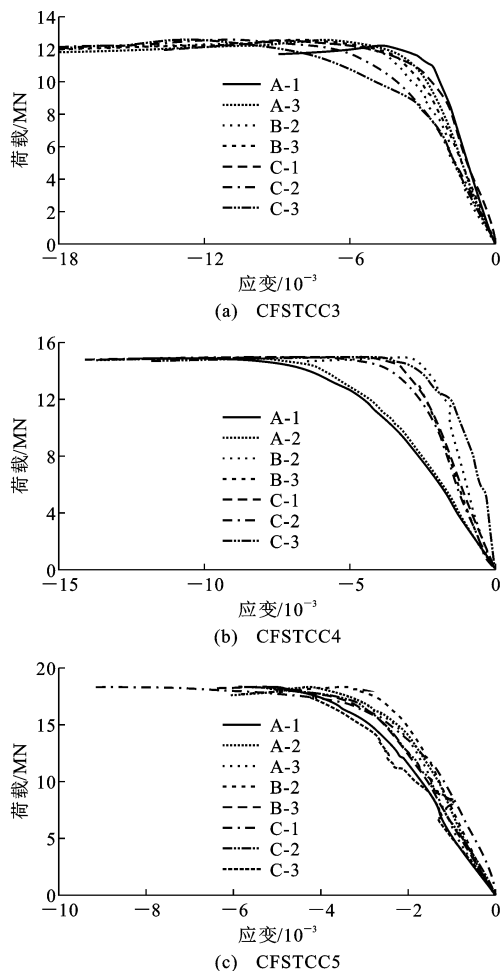


图8 亚克力棒测量的钢管内混凝土应变

Fig. 8 Concrete Strain in Steel Tube Measured by Acrylic Bar

加载前期钢管的纵向应变增长稍快于横向应变增长,中后期横向应变的增长较快。说明在加载过程中钢管的约束较钢管承受轴力存在一定滞后,即加载前期钢管的约束作用较弱,而在荷载施加到一定程度后,钢管的约束作用才显现。

从箍筋与纵筋应变测量结果可见,箍筋的应变增长较纵筋应变增长较快,且基本快于钢管的横向应变增长,在加载的中后期箍筋应变增长速率加快,而纵筋的应变增长放缓。说明加载中前期外部混凝土承受了一定的荷载,发生纵向变形。试件在受力过程中,外部钢筋混凝土在持续横向膨胀并最终破坏,箍筋的约束作用显著,在加载的中后期外部混凝土则以持续向外膨胀变形为主。

2.4 大径宽比叠合柱构件受力过程分析

结合试件不同部位的应变变化,对较大径宽比的CFSTCC试件进行受力分析。根据不同部位的应变数据可知3组试件的受力状态相似,按照加载

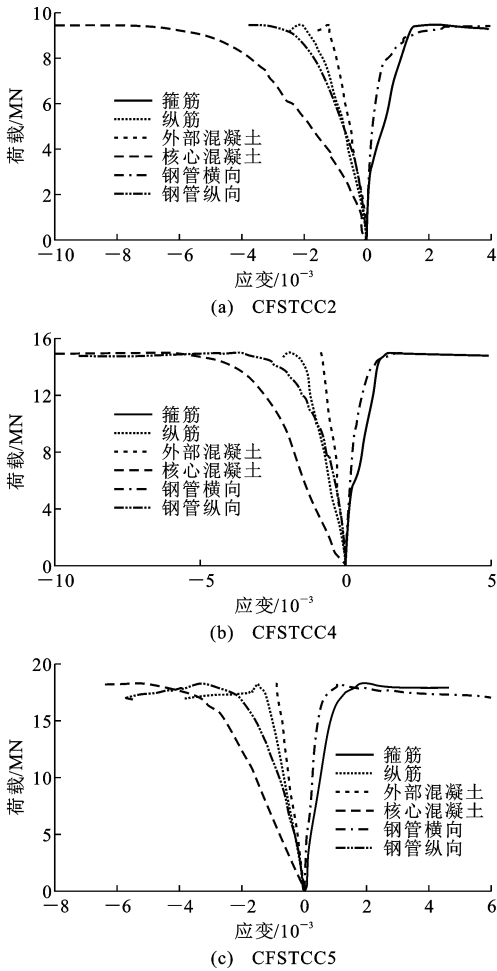


图9 CFSTCC构件各部位典型应变曲线

Fig. 9 Strain Curves of Typical CFSTCC Members

的前中后3个阶段进行说明。

加载前期。试件处于弹性变形状态,截面形式与内外混凝土强度的差异决定了钢管混凝土部分承担了绝大部分的荷载,表现为内部混凝土纵向应变增长远快于外部混凝土纵向应变增长。箍筋横向应变增长较快,证明外部钢筋混凝土横向膨胀,并对钢管有一定约束作用。此时钢管对于核心混凝土的约束作用不明显或并未发生约束作用,各部分材料依靠其本身材料强度承受荷载。

加载中期。试件由弹性变形状态向弹塑性变形状态转变(对CFSTCC6可看作是试件的强化阶段),此时核心混凝土横向变形加快,钢管的约束作用开始显现。外部混凝土持续向外膨胀,箍筋对外部约束混凝土的作用增强。此时试件各部分承受的轴力不仅依靠本身的材料强度,更有钢管对核心混凝土的约束与箍筋对外部部分混凝土约束作用的贡献。对于大径宽比叠合柱构件来说,箍筋约束的混凝土体积较小,这部分约束贡献可以忽略。

加载后期。此时叠合柱的承载力缓慢地下降(其中试件CFSTCC6的承载力逐渐上升),核心混凝土与外部混凝土的变形均加剧,导致钢管对核心混凝土的约束作用继续增长,钢管的约束作用增强,这是叠合柱承载力下降缓慢的主要原因。同时由于外部混凝土变形加剧,保护层混凝土压酥脱落,第3组试件破坏更显脆性。外部混凝土面积变小,导致钢管混凝土部分承受荷载的比重进一步增加,此时外部混凝土基本不再具有承载能力。

3 受压承载力计算方法

叠合柱由钢管混凝土与钢筋混凝土两部分组成,而现有研究表明^[14-16],由于混凝土作为准脆性材料的特性,尺寸效应在这2种结构形式中均存在。本文中共有3组不同尺寸的试件,在计算试件承载力时,将尺寸效应纳入考虑,能够提高计算结果的准确性与精度。考虑到试件受荷达到极限荷载时,内部钢管混凝土承载力仍未完全发挥。在叠合柱技术规程^[17]对轴压短柱承载力计算方法的基础上,结合文献^[6]提出的发挥系数,轴压承载力计算按式(1)计算

$$N_u = 0.85N_{cc} + N_{oc} \quad (1)$$

$$N_{oc} = f_s A_s + \gamma_{oc} f_{oc} A_{oc} \quad (2)$$

$$N_{cc} = \begin{cases} \gamma_{cc} f_{cc} A_{cc} (1 + \theta + \sqrt{\theta}) & \text{普通混凝土} \\ \gamma_{cc} f_{cc} A_{cc} (1 + 1.8\theta) & \text{高强混凝土} \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta = f_s A_s / (f_{cc} A_{cc}) \quad (4)$$

式中: N_u 为叠合柱极限承载力计算值; N_{cc} 为核心钢管混凝土承载力; N_{oc} 为外部钢筋混凝土承载力; A_s 为纵筋截面面积; A_{oc} 为外部混凝土截面面积; A_{cc} 为核心混凝土截面面积; A_a 为钢管截面面积; f_{cc} 为内部混凝土轴心抗压强度; γ_{cc} 、 γ_{oc} 分别为考虑试件的尺寸效应对内外两部分混凝土强度引入的折减系数; f_{oc} 为外部混凝土轴心抗压强度,由文献^[18]给定的方法确定; θ 为钢管混凝土套箍系数^[19]。

γ_{cc} 与 γ_{oc} 采取了Blanks等^[20]尺寸效应模型的基本形式,对钢管内核心混凝土与外部钢筋混凝土部分的混凝土分别有

$$\gamma_{cc} = 1.67 D_{cc}^{-0.112} \quad (5)$$

$$\gamma_{oc} = 1.67 D_{oc}^{-0.112} \quad (6)$$

$$D_{oc} = 2 \sqrt{B^2 / \pi} \quad (7)$$

式中: D_{cc} 为核心钢管内混凝土的直径; D_{oc} 为钢管混凝土叠合柱的等效圆形截面直径^[21],即使用面积等效原理,将叠合柱的整个方形截面转换为圆形,具体

方法采用公式(7)。

表 4 为本次试验的极限承载力试验值与计算值对比,总体吻合情况良好,证明该轴压极限承载力计算方法对柱宽在 400~600 mm 范围内,具有大径宽比(0.7~0.83)的钢管混凝土叠合柱构件较为适用,同时也为更大尺寸的叠合柱构件轴压承载力的计算提供了参考。

表 4 极限承载力试验值与理论计算值对比
Tab. 4 Comparison Between Test Values and Theory Values of Ultimate Bearing Capacity

| 试件编号 | N_m/kN | N_u/kN | N_u/N_m |
|---------|-----------------|-----------------|-----------|
| CFSTCC1 | 7 437 | 7 912 | 1.064 |
| CFSTCC2 | 9 428 | 9 271 | 0.983 |
| CFSTCC3 | 12 580 | 12 354 | 0.982 |
| CFSTCC4 | 15 021 | 14 928 | 0.994 |
| CFSTCC5 | 18 318 | 18 205 | 0.994 |
| CFSTCC6 | 22 880 | 22 568 | 0.986 |

4 结 语

(1)设计并完成了外径在 400~600 mm 范围内的大径宽比钢管混凝土叠合柱轴压试验研究,试件的荷载-应变曲线与约束良好的钢管混凝土柱相似。

(2)在受力过程中内部钢管混凝土承受更多的荷载,含钢管率的提升会直接增强构件的承载能力,尺寸不同的试件破坏形式存在差异。

(3)使用亚克力棒测量了钢管内部混凝土不同位置的应变变化,可以获得整个加载过程的荷载-应变曲线,测试效果良好。

(4)结合试验结果,引入了考虑试件尺寸效应的折减系数,给出了适应不同尺寸大径宽比钢管混凝土叠合柱的计算方法,与试验结果吻合较好。

参考文献:

References:

[1] 林立岩,李庆钢. 钢管混凝土叠合柱的设计概念与技术经济性分析[J]. 建筑结构,2008,38(3):17-21,41.
LIN Li-yan,LI Qing-gang. Design Concept and Analysis of Technical Economy for Steel Tube-reinforced Concrete Column[J]. Building Structure,2008,38(3):17-21,41.

[2] 陈周熠,赵国藩,易伟建,等. 带圆钢管劲性高强混凝土轴压短柱试验研究[J]. 大连理工大学学报,2005,45(5):687-691.
CHEN Zhou-yi,ZHAO Guo-fan,YI Wei-jian, et al. Experimental Research on Behavior of High Strength Concrete Column Reinforced with Concrete-filled

Steel Tube Under Axial Compression[J]. Journal of Dalian University of Technology,2005,45(5):687-691.

[3] 康洪震,钱稼茹. 钢管混凝土叠合柱轴压强度试验研究[J]. 建筑结构,2006,36(增):913-916.
KANG Hong-zhen,QIAN Jia-ru. An Experiment Study of Axial Compressive Strength of Concrete Filled Steel Tube Composite Columns[J]. Building Structure,2006,36(S),913-916.

[4] 林拥军. 配有圆钢管的钢骨混凝土轴心受压柱的试验研究[C]//崔京浩. 第十届全国结构工程学术会议论文集第 II 卷. 北京:《工程力学》期刊社,2001:148-153.
LIN Yong-jun. Experimental Study on Steel Reinforced Concrete Columns with Circular Steel Tubes Under Axial Compression[C]//CUI Jing-hao. Proceedings of the 10th National Academic Conference on Structural Engineering, Volume II. Beijing:Periodical Office of Engineering Mechanics,2001:148-153.

[5] 蔡 健,谢晓锋,杨 春,等. 核心高强钢管混凝土柱轴压性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2002,30(6):81-85.
CAI Jian,XIE Xiao-feng,YANG Chun,et al. An Experimental Research on the Composite Column with Core of High Strength Concrete Filled Steel Tube Under Axial Compression Loading [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition,2002,30(6):81-85.

[6] 刘 阳,郭子雄,贾磊鹏,等. 核心钢管混凝土叠合短柱轴压性能及设计方法研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(12):135-142.
LIU Yang,GUO Zi-xiong,JIA Lei-peng,et al. Experimental Study on Axial Compression Performance and Design Method of Core Steel Tube Reinforced Concrete Short Columns[J]. Journal of Building Structures,2015,36(12):135-142.

[7] 黄用军,尧国皇,宋宝东,等. 钢管混凝土叠合柱在深圳卓越·皇岗世纪中心项目中的应用[J]. 广东土木与建筑,2008(7):3-5.
HUANG Yong-jun,YAO Guo-huang,SONG Bao-dong,et al. The Application of CFST Composite Columns in the Project of Zhuoyue Huanggang Century Center in Shenzhen[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering,2008(7):3-5.

[8] 王爱军,戴苏敏. 某超高层建筑钢管混凝土叠合柱施工技术[J]. 施工技术,2009,38(12):46-49.
WANG Ai-jun,DAI Su-min. Construction Technology of Concrete Filled Steel Tubular Laminated Column in

- Some Super High-rise Building [J]. Construction Technology, 2009, 38(12): 46-49.
- [9] 徐世明, 周建新. 钢管混凝土叠合柱在湖州东吴国际广场的应用[J]. 浙江建筑, 2018, 35(5): 36-39, 44.
XU Shi-ming, ZHOU Jian-xin. Application of the Steel Pipe Concrete Laminated Column in Dongwu International Plaza of Huzhou[J]. Zhejiang Construction, 2018, 35(5): 36-39, 44.
- [10] 徐鹏飞, 张公, 李晓璐, 等. 不同壁厚钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(10): 1514-1520.
XU Peng-fei, ZHANG Gong, LI Xiao-lu, et al. Experimental Study on Axial Compression Performance of Concrete Filled Steel Tube Short Column with Different Wall Thicknesses[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(10): 1514-1520.
- [11] 张素梅, 郭兰慧, 叶再利, 等. 方钢管高强混凝土轴压短柱的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1610-1614.
ZHANG Su-mei, GUO Lan-hui, YE Zai-li, et al. Experimental Research on High Strength Concrete-filled SHS Stub Columns Subjected to Axial Compressive Load[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(12): 1610-1614.
- [12] 王力尚, 钱稼茹. 钢管高强混凝土应力-应变全曲线试验研究[J]. 建筑结构, 2004, 34(1): 11-12, 19.
WANG Li-shang, QIAN Jia-ru. Experimental Study on Stress-strain Curve of High Strength Concrete Filled Steel Tube[J]. Building Structure, 2004, 34(1): 11-12, 19.
- [13] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(10): 1369-1373.
QIAN Jia-ru, CHENG Li-rong, ZHOU Dong-liang. Behavior of Axially Loaded Concrete Columns Confined with Ordinary Hoops[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(10): 1369-1373.
- [14] 杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(I): 材料层次[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9): 28-45.
DU Xiu-li, JIN Liu, LI Dong. A State-of-the-art Review on the Size Effect of Concretes and Concrete Structures (I): Concrete Materials[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(9): 28-45.
- [15] 杜修力, 符佳, 张建伟. 钢筋混凝土柱轴心受压性能尺寸效应的大比尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增2): 1-8.
DU Xiu-li, FU Jia, ZHANG Jian-wei. The Experimental Study on Size Effect of the Large-size Reinforced Concrete Column Under Axial Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2): 1-8.
- [16] 陈鹏, 王玉银, 刘昌永, 等. 圆钢管混凝土轴压性能尺寸效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增1): 249-257.
CHEN Peng, WANG Yu-yin, LIU Chang-yong, et al. Experimental Study on Size Effect of Circular Concrete-filled Steel Tubular Columns Subjected Axial Compression[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S1): 249-257.
- [17] CECS 188: 2005, 钢管混凝土叠合柱结构技术规程[S].
CECS 188: 2005, Technical Specification for Steel Tube-reinforced Concrete Column Structure[S].
- [18] DING F X, YING X Y, ZHOU L C, et al. Unified Calculation Method and Its Application in Determining the Uniaxial Mechanical Properties of Concrete[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2011, 5(3): 381-393.
- [19] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures: Theory and Practice[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [20] BLANKS R F, MCNAMARA C C. Mass Concrete Tests in Large Cylinders[J]. Journal Proceedings, 1935, 31(1): 280-303.
- [21] 陆新征, 张万开, 李易, 等. 方钢管混凝土短柱轴压承载力尺寸效应[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2012, 28(6): 974-980.
LU Xin-zheng, ZHANG Wan-kai, LI Yi, et al. Size Effect of Axial Strength of Concrete-filled Square Steel Tube Columns[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2012, 28(6): 974-980.