

初应力对钢管混凝土哑铃形轴压短柱受力性能影响的试验研究

黄福云, 陈宝春

(福州大学土木建筑学院, 福建 福州 350002)

摘要: 进行了有初应力的钢管混凝土哑铃形轴压短柱试件的试验研究, 分析探讨了初应力对其力学性能的影响及其极限承载力的计算方法. 分析结果表明, 初应力使弹塑性阶段提前、弹性极限荷载降低, 同时峰值极限荷载推迟出现, 构件切线刚度降低. 但初应力对钢管混凝土哑铃形轴压短柱的峰值极限荷载影响很小, 可以采用与无初应力构件相同的方法计算.

关键词: 钢管混凝土; 哑铃形; 初应力; 极限承载力

中图分类号: TU398

文献标识码: A

Experimental research on influence of initial stress to behavior of concrete filled steel tubular dumbbell shaped stub columns under axial loads

HUANG Fu - yun , CHEN Bao - chun

(College of Civil Engineering and Architecture , Fuzhou University , Fuzhou , Fujian 350002 , China)

Abstract: Experimental research on CFST dumbbell shaped columns with initial stresses subjected to axial loads are carried out. Influence effects of initial stress to its behaviors and ultimate load - carrying capacity are analyzed. Analyses results indicate that initial stress make elastic - plastic phase appear ahead and decrease the tangent rigid and elastic ultimate load. However , the initial stresses have almost no influence to the ultimate load - carrying capacity of the member , so it can use the same method to predict the ultimate load of dumbbell shaped CFST short column with initial stress as that in that without initial stress.

Key words : concrete filled steel tube ; dumbbell shaped ; initial stress ; load - carrying capacity

哑铃形截面被广泛应用于钢管混凝土拱桥拱肋之中. 文献[1]、[2]分别对钢管混凝土哑铃形轴压和偏压短柱进行了试验研究, 对其受力性能和破坏机理有了初步的了解. 在试验研究的基础上, 文献[1]~[3]提出了轴压和偏压构件极限承载力的简化算法, 如轴压构件的简单叠加法和等效单圆管法.

钢管混凝土拱桥施工时先安装空钢管拱肋, 利用钢管作为支架与模板灌注管内混凝土, 在管内混凝土形成强度前, 空钢管拱肋要承受自重与混凝土的重量等. 换言之, 在钢管与混凝土作为组合结构共同承受荷载之前, 空钢管中已产生了初应力. 虽然对钢管混凝土单圆管构件的初应力问题已开展了一些研究, 包括轴压、偏压构件及受扭构件, 但钢管混凝土哑铃形构件的初应力问题迄今未见试验研究^[4]. 为此, 以钢管混凝土哑铃形为研究对象, 进行了在初应力作用下的轴压构件试验研究, 分析了初应力对其力学性能的影响, 同时与文献[1]哑铃形轴压短柱试件的试验结果进行了比较, 最后讨论了有初应力的哑铃形轴压短柱极限承载力的计算方法.

1 试验简介

1.1 试件设计与制作

收稿日期: 2005 - 06 - 20

作者简介: 黄福云(1979 -), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 陈宝春, 教授, 博士生导师.

基金项目: 福建省重大科研资助项目(2003F007)

试件的截面尺寸与文献[1]的基本构件相同, 由两根 $\phi 108 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的无缝钢管和 4 mm 厚的腹板焊接而成, 在钢管和腹腔内均灌注 C50 混凝土, 见图 1. 试件的长度 L 均为 800 mm, 含钢率为 0.166, 长细比为 10, 其中 i 为截面回转半径. 试件两端焊有两个厚 10 mm、长为 270 mm \times 120 mm 的矩形钢板.

混凝土的主要材料为: 42.5 号普通硅酸盐水泥、最大粒径为 20 mm 的花岗岩碎石和砂率为 0.35 的中粗砂. 混凝土的水灰比为 0.38. 按重量的配合比为, 水 水泥 砂石 = 19 50 60 120. 测得混凝土 150 mm \times 150 mm \times 150 mm 试块 28 d 的立方体抗压强度为 $f_{cu} = 59.2 \text{ MPa}$. 钢材采用 Q345 钢, 共做了 3 个标准试件, 可测得平均屈服强度 f_s 为 356.0 MPa、抗拉强度 f_u 为 550.4 MPa、弹性模量 E_s 为 2.00×10^6 及泊松比 μ_s 为 0.268.

考虑初应力的影响, 设计制作了 3 个试件. 3 个试件 DS - 1、DSP - 1 及 DSP - 2 对应的初应力度分别为 0% (即无初应力)、25% 和 42%. 初应力度是指钢管拱肋的初始应力 σ_0 与其屈服强度 f_s 之比, 即 σ_0 / f_s .

1.2 初应力的施加

空钢管构件的两端焊接在端承板上, 钢拉杆穿过端承板 6 个孔用螺栓固定, 6 个孔位见图 2 构件横断面图. 通过拧紧拉杆两端的螺栓向空钢管构件施加应力 (既初应力), 拉杆力的大小由设在拉杆中部的拉压传感器来控制 (见图 3). 传感器为 BLR - 1 型拉压式电阻应变传感器, 使用前对它进行了标定. 由于应力可能出现松弛现象, 试验在初应力施加完的 3 d 内每天均对拉杆的拉力进行测量, 发现其值基本不变、较为稳定. 初应力初加 7 d 后, 有初应力的构件和无初应力的构件一起浇灌管内混凝土. 混凝土浇灌完后, 经测量发现初应力也基本不变.

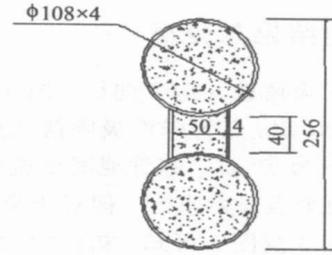


图 1 试件断面 (单位: mm)
Fig. 1 Section of specimen (unit: mm)

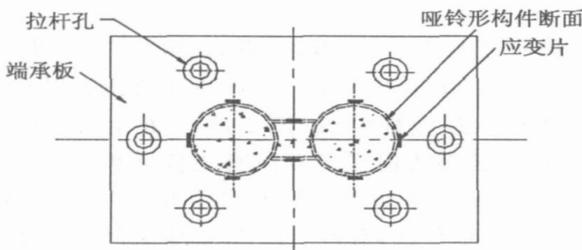


图 2 构件横断面图
Fig. 2 Fransection specimen



图 3 试件加载照片
Fig. 3 Photo of setup

1.3 试件加载

试验在福州大学结构工程试验中心的 500 t 压力机上进行, 试件两端采用平板铰加压. 每个试件在上下端板中心处各设置了 2 个电测位移计, 在中截面处布设了纵向及环向各 8 片电阻应变片, 同时也测试了拉杆的应变值, 当拉杆的应变值为零并基本保持不变时, 拉杆已不起作用, 可把传感器卸下来. 试验加载装置见图 3. 试验采用分级加载, 每级荷载持荷时间约为 3 min, 并分两阶段进行加载, 第一阶段每级荷载为初始荷载 F_0 () 的 1/5, 第二阶段在弹性范围内每级为预计极限荷载的 1/10, 在钢管屈服后为 1/20. 当接近破坏时慢速连续加载, 并连续记录变形值, 直至试件最终破坏. 数据采用自动采集系统进行采集.

2 试验结果与分析

图 4 为荷载 - 应变曲线, 图 5 为荷载 - 变形曲线. 为叙述方便, 设 A 点为构件初始荷载点(初应力荷载), $B(B')$ 点为弹性极限荷载点, C 点为峰值点荷载, 也即极限荷载. 其中, 钢管达到屈服应变时所对应的点为 B 点, 钢管混凝土构件的应变达到钢管屈服应变值时所对应的点为 B' 点. 对于无初应力构件, 这两个点显然重合, 但对于有初应力的构件, 这两个点之间的关系有待试验了解.

由图 4 及图 5 可知, 初应力大小对荷载 - 应变及荷载 - 变形关系曲线都有影响, 初应力度越大, 影响也越大. 对于有初应力的构件, 试验初始阶段, 所施加的荷载为初始荷载 F_0 (), 线段 OA 表示初始荷载加载曲线, 此时试件的刚度只是钢管混凝土哑铃形试件外钢管的刚度, 此刚度要小于构件组合轴压刚度. 由于受到初始荷载的作用, 荷载的起始点应从初始荷载处开始; 对于无初应力的试件, 则是从零荷载开始. 随着荷载的增加, 拉杆的应变值越来越小, 当荷载增加到为初始荷载的两倍左右时, 拉杆的应变值为零. 此时卸下传感器并继续加载, 由荷载 - 变形及荷载 - 应变曲线可知, 弹性范围内, 初应力的存在并不影响构件的力学性能.

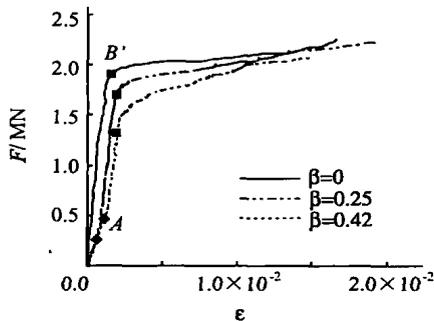


图 4 荷载 - 应变关系曲线图
Fig.4 Load - strain curves

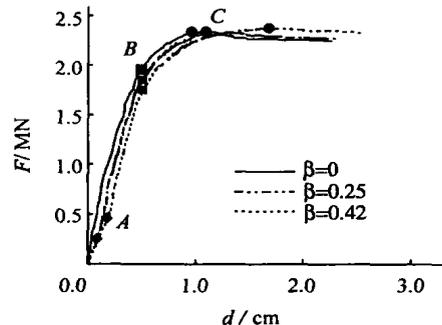


图 5 荷载 - 位移关系曲线图
Fig.5 Load - deflection curves

当荷载增加到 B (图 4) 点时, 此时应变急剧增长, 钢材进入弹塑性阶段. 观察试件发现圆钢管柱表面有细的剪切滑移线出现, 且初应力度增大越快, 剪切滑移线出现的越早. 比较图 4 及图 5 可知, 对于无初应力的试件, 钢材进入弹塑性阶段 (B) 与构件整体进入弹塑性阶段 (图 5 所示 B 点) 基本相一致, 同时变形也增长较快; 但对于有初应力的试件, 应变虽增长很快但变形并没有很快增长, 当钢材进入弹塑性阶段时构件整体还处于弹性阶段, 也即 B 点要小于 B' 点所对应的荷载值, 并且初应力越大, 其差值也越大; 此外, 有初应力试件的切线刚度要大于无初应力试件的切线刚度, 即初应力的存在使组合构件的切线模量发生了改变, 初应力越大, 其变化越明显. 与单圆管试件相比^[5], 具有相似的力学性能.

继续增大荷载, 腹腔内的腹板外凸现象明显, 并伴有铁屑脱落. 持续加载, 在试件端部处首先出现局部屈曲, 腹板凸曲, 荷载不升反降, 说明此时荷载达到极限荷载 N_u (对应图 5 中的 C 点), 试件破坏时圆钢管表面出现若干处局部屈曲并形成腰鼓状, 同时腹腔内的腹板成波浪式凸曲, 最后试件破坏, 试件破坏照片如图 6 所示, 其变形量达到试件的 5%, 说明构件具有良好的塑性变形性能, 由图 4 可知, 随着初应力度的增大, C 点对应的变形值也越大. 文献[1]破坏形态主要是钢管的端部局部屈曲、试件腹板焊缝拉裂、腹腔内混凝土流出, 荷载 - 位移曲线成马鞍状. 比较可知, 本构件的破坏形态与其有所不同, 分析认为这是因为本次构件的

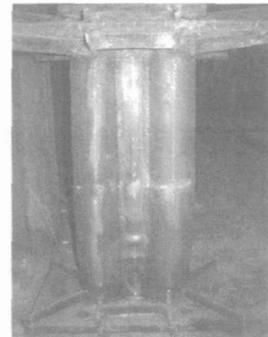


图 6 试件破坏时照片
Fig.6 Photo of specimen after failure

长细比要大于文献[1]的长细比, 构件在腹腔没来得及充分发挥套箍作用时就由于初始偏心和初始缺陷的影响而破坏, 因而其破坏特征和文献[2]小偏心构件的破坏形态更为相似。

由图 4 及图 5 可知, 有无初应力构件进入弹塑性阶段对应的应变 (B) 值基本相同, 即对应钢材的弹性极限应变, 对应的变形值 (B 点) 也基本相同, 但它们对应的荷载减小, 初应力越大, 对应的荷载就越小。但对于弹性极限荷载来说, 图 4 所示荷载 - 应变曲线中的 B 点与图 5 所示荷载 - 位移曲线中的 B 点并不相一致, 如前所述, B 点标志着构件整体进入弹塑性阶段, B 点则仅对应外钢管进入弹塑性阶段。当外钢管进入弹塑性阶段时, 组合构件整体并没有进入弹塑性阶段, 因而 B 点荷载要高于 B 点荷载, 初应力度越大, 对应 B 点的荷载就越小 (不到极限荷载的 60%), 由于弹性极限荷载定义为 B 点荷载, 对于大多数拱桥来说, 设计时尽量工作在弹性范围内, 因而初应力将会给设计带来影响。此外, 随着初应力度的增大, 构件的刚度有所降低, 但变化不大。组合材料的泊松比与荷载关系曲线离散性较大, 但在一定程度上能反映钢管对混凝土的紧箍作用的趋势, 初应力是否会影响两者间的作用存在不同的看法, 因而还有待进一步的研究。

从图 5 的 3 个试件的荷载 - 变形曲线可见, 有钢管初应力和无钢管初应力试件的极限荷载 N_u 和破坏特征基本相同, DS - 1、DSP - 1 及 DSP - 2 的极限荷载分别为 2 339.0、2 335.0 及 2 370.0 kN。比较可知, 3 个构件的极限荷载值相差不超过 2%, 说明初应力的存在并不影响构件的极限荷载。

3 极限承载力简化计算

文献[6]给出了钢管初应力对圆钢管混凝土构件承载力的影响参数 K_p , 其计算公式为:

$$K_p = 1 - f(\lambda) \cdot f(e/r) \cdot (\sigma_0 / f_c) \quad (1)$$

其中:

$$f(\lambda) = \begin{cases} 0.002125\lambda - 0.02 & (\lambda < 80) \\ 0.001625\lambda^2 + 0.004375\lambda - 0.07 & (\lambda > 80) \end{cases}$$

$$f(e/r) = \begin{cases} 0.75(e/r)^2 - 0.05(e/r) + 0.9 & (e/r < 0.4) \\ -0.15(e/r) + 1.06 & (e/r > 0.4) \end{cases}$$

式中: λ 为试件长细比, e/r 为偏心率, K_0 为单根圆管空钢管稳定系数, σ_0 为初应力度。

从文献[1]的研究结果可知, 哑铃形构件中的两个圆钢管混凝土的受力与单根圆钢管混凝土短柱的受力基本相同, 且所提供的极限承载力是整个构件极限承载力的 90% 以上。因此认为在哑铃形轴压构件中可以采用与单圆钢管混凝土轴压构件相同的初应力对极限承载力的影响参数 K_p 。

应用公式(1), 对试件进行计算的结果如表 1 所示。计算结果表明, 不同的初应力度对构件承载力的影响参数 K_p 相差不超过 1%, 且接近于 1。

试验所得 3 个试件的极限承载力也非常接近, 初应力对其极限承载力的影响参数 K_p 值与计算值 K_p 也基本相同, K_p 为有初应力试件试验所得极限承载力与无初应力试件试验所得结果之比值, 其结果如表 1 所示。因此, 对于哑铃形轴压短柱在一般情况下初应力对构件的极限承载力影响很小, 在实际计算中可以不考虑; 如果在研究中要考虑此项影响, 可以采用单圆管构件的计算公式, 即公式(1), 进行计算。

表 1 初应力对试件极限承载力影响参数计算表

Tab. 1 Influence parameter of members' ultimate load with initial stress

| 试件编号 | 初应力度 (σ_0) | 计算值 K_p | 试验值 | |
|---------|---------------------|-----------|------------|-------|
| | | | N_u / kN | K_p |
| DS - 1 | 0.00 | 1.000 | 2 339.0 | 1.000 |
| DSP - 1 | 0.25 | 0.996 | 2 335.0 | 0.998 |
| DSP - 2 | 0.42 | 0.994 | 2 370.0 | 1.013 |

文献[1]给出了哑铃型轴压短柱极限承载力的简单迭加算法, 见公式(2)。

$$N_{\mu} = N_y + (A_{fc}f_c + 2A_{fs}f_s) \quad (2)$$

其中, N_y 为单根圆钢管混凝土轴压短柱的极限承载力; 其它符号见文献[1].

对本文的 3 个试件不考虑初应力影响, 按公式(2) 计算其极限承载力. 应用公式(2) 时, N_y 的计算分别考虑了 3 部计算规程(文献[7] - [9]). 从表 2 可见, 计算结果与试验结果吻合良好. 它进一步说明了哑铃形轴压短柱可以不考虑初应力对极限承载力的影响, 也进一步验证了文献[1]提出的计算方法的正确性.

表 2 试件极限承载力计算表

Tab. 2 The calculated ultimate load of specimens

| 试件编号 | 初应力度 () | N_u / kN | N_e / kN | | | N_e / N_u | | |
|---------|----------|-------------------|-------------------|---------|---------|-------------|-------|-------|
| | | | 文献[7] | 文献[8] | 文献[9] | 文献[7] | 文献[8] | 文献[9] |
| DS - 1 | 0.00 | 2 339.0 | 2 470.0 | 2 105.2 | 2 242.3 | 1.052 | 0.900 | 0.959 |
| DSP - 1 | 0.25 | 2 335.0 | 2 462.1 | 2 096.8 | 2 233.3 | 1.051 | 0.898 | 0.956 |
| DSP - 2 | 0.42 | 2 370.0 | 2 459.1 | 2 092.5 | 2 228.8 | 1.031 | 0.883 | 0.941 |

4 结语

试验研究表明, 钢管混凝土哑铃型轴压短柱中钢管初应力的存在使构件提前进入弹塑性阶段, 也即其降低了构件的弹性极限荷载和刚度, 且延长了构件的弹塑性阶段, 但对构件的极限荷载影响不大, 实用计算中可以不考虑. 哑铃形轴压短柱有无初应力作用的极限承载力都可以采用简单叠加法进行计算. 如果在研究中要考虑初应力对极限承载力的影响, 可以采用单圆管构件的计算公式进行计算.

参考文献:

- [1] 陈宝春, 黄福云、盛叶. 钢管混凝土哑铃形轴压短柱试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 187 - 194.
- [2] 陈宝春, 肖泽荣, 韦建刚. 钢管混凝土哑铃形偏压构件试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 89 - 95.
- [3] 陈宝春, 黄福云, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形短柱极限承载力的等效单圆管算法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(6): 50 - 53.
- [4] 黄福云, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥初应力问题研究综述[J]. 公路交通科技(已录用).
- [5] 黄世娟. 初应力对钢管混凝土轴压构件承载力影响的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1995.
- [6] 尧国皇. 钢管初应力对钢管混凝土压弯构件力学性能的影响研究[D]. 福州: 福州大学, 2002.
- [7] CECS 28: 90, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
- [8] DL/T 5058 - 1999, 钢管混凝土组合结构设计规程[S].
- [9] JCJ 01 - 89, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].