

新型钢管混凝土哑铃形偏压短柱试验研究

盛 叶, 陈宝春, 韦建刚

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 以偏心率为参数, 进行了 6 根新型钢管混凝土哑铃形短柱的偏压试验研究. 结果表明, 新型哑铃形偏压短柱的受力性能与传统哑铃形偏压短柱的基本相同, 极限承载力计算可采用与传统哑铃形偏压短柱相同的计算方法.

关键词: 钢管混凝土; 短柱; 偏压; 极限承载力; 哑铃形截面

中图分类号: TU398

文献标识码: A

Experimental research on concrete filled steel tubular stubs with new type dumbbell section under eccentric loads

SHENG Ye, CHEN Bao - chun, WEI Jian - gang

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

Abstract: Varied with the eccentric ratio, experiments on 6 new type dumbbell section concrete filled steel tube (CFST) stubs under eccentric loads are carried out. The results indicate that the mechanical property of new type dumbbell section members are approximately the same with the traditional ones, and the ultimate load - carrying capacity can be estimated with the same methods which used to calculate the traditional ones.

Keywords: concrete - filled steel tube; stub; eccentric loaded; ultimate load; dumbbell section

哑铃形截面是钢管混凝土拱肋常用的截面形式. 然而在灌注拱肋腹腔混凝土时, 腹板受混凝土压力的作用容易外鼓, 严重时钢管与腹板连接处的焊缝会被拉裂而引发爆管事故. 其主要原因是由于钢管与腹板交接处在灌注腹腔内混凝土时会产生很大的应力^[1]. 为从结构构造上解决这一问题, 文献 [2] 提出了腹腔内不灌混凝土而以 H 型钢加劲的哑铃形截面. 将腹腔内灌有混凝土的哑铃形截面称为传统的哑铃形截面, 相应地称腹腔内不灌混凝土的为新型哑铃形截面. 文献 [3] 分析表明, 新型哑铃形截面的拱肋在灌注管内混凝土时截面上所产生的应力与传统哑铃形的相差不大, 但由于不需灌注腹腔内混凝土, 避免了传统哑铃形截面由于腹板与钢管相交处很大的应力而可能发生的爆管事故. 文献 [3] 对新型哑铃形轴压短柱的试验研究表明, 它的极限承载力与传统哑铃形轴压短柱^[4]基本相同. 由于哑铃形拱肋除受压外一般还受到弯矩作用, 属于偏心受压构件. 因此, 本文进行了新型钢管混凝土哑铃形 (称其为 B 组试件) 偏压短柱的试验研究, 并与传统哑铃形 (称其为 A 组试件) 偏压短柱^[5]试验结果进行比较, 以考察其受力性能, 并提出承载力的计算方法.

1 试件设计制作与试验装置

试件的截面尺寸与文献 [3] 的构件相同, 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, 钢管内灌注 C50 混凝土, 在腹板的中间和四分点处用工字钢加劲, 试件断面见图 1. 试件的长度均为 800 mm (净距为 770 mm, 两端端板厚 15 mm), 长细比 为 10 ($= L/i$ 其中 i 为截面强轴方向的回转半

收稿日期: 2006 - 09 - 21

作者简介: 盛 叶 (1978 -), 女, 博士研究生; 通讯联系人: 陈宝春, 教授.

基金项目: 福建省重大科技资助项目 (2003F007)

径)。试验参数为强轴方向(截面高度方向)的偏心率。偏心率为 $e/(2i)$, 其中 e 为荷载偏心距, i 为截面的回转半径, 变化范围为 $0.06 \sim 0.24$ 。试件的详细情况见表 1。表中编号 1、2、3、4 分别代表偏心距为 10、20、30、40 mm, 部分试件制作了两根, 用括号内的数字 1 和 2 来表示。

钢材强度通过拉伸试验确定, 按《GB 2975 金属材料试验标准》(1982)规定的测试方法进行拉伸试验, 钢材拉伸的典型应力应变曲线见图 2, 测得钢材的平均屈服强度 $f_y = 429 \text{ MPa}$, 抗拉强度 $f_u = 503 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E_s = 1.99 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu_s = 0.271$ 。测得混凝土 28 d 抗压强度为 48.2、43.6 和 41.7 MPa, 取其平均值 44.5 MPa, 换算成抗压强度标准值 $f_{ck} = 29.8 \text{ MPa}$ 。

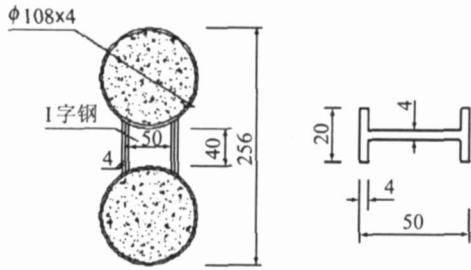


图 1 试件截面(单位: mm)

Fig. 1 Cross section of specimen (unit: mm)

表 1 试件详细情况一览表
Tab. 1 Detail data of specimen

试件编号	e/mm	$e/(2i)$	f_y/MPa	f_{ck}/MPa
B-1	10	0.06	429	29.8
B-2(1)	20	0.12	429	29.8
B-2(2)	20	0.12	429	29.8
B-3(1)	30	0.18	429	29.8
B-3(2)	30	0.18	429	29.8
B-4	40	0.24	429	29.8

试验在福州大学结构工程试验中心的 500 t 压力机上进行, 试件两端采用刀口铰, 以模拟铰接。由于试验主要考察新型哑铃形钢管混凝土试件在强轴方向的受弯, 为了防止试件的面外失稳破坏, 在试件的 $1/4L$ 和 $3/4L$ 的高度处用两根工字钢约束其面外的变形。试验装置见图 3。

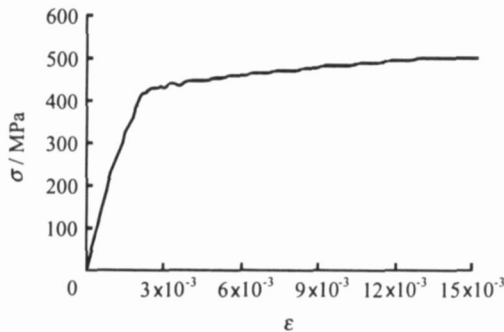


图 2 钢材典型的应力应变关系图

Fig. 2 The typical stress - strain curves of the steel

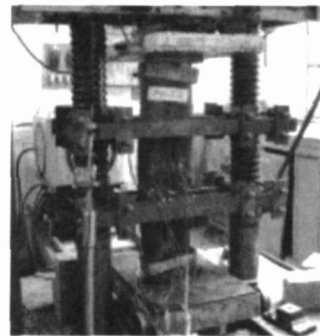


图 3 加载装置图

Fig. 3 The picture of testing set

试验采用分级加载, 弹性范围内每级荷载为预计极限荷载的 $1/10$, 当钢管受压区边缘纤维屈服后每级荷载约为预计极限荷载的 $1/20$, 每级荷载的持荷时间约为 3 min。当接近破坏时慢速连续加载, 同时连续记录各级荷载所对应的变形值, 直至试件最终破坏时停止试验。

2 试验结果与分析

2.1 荷载 - 挠度曲线

图 4(a)为试件的荷载 N 和中截面挠度 μ_m 的关系曲线。偏心率较小时, 荷载 - 挠度曲线在线性段几乎重合, 但进入非线性段后, 偏心率越大, 曲线斜率减小越快, 极限荷载也越小。与图 4(b)传统截面试件的曲线相比, 曲线的形状基本相同, 但本文试件的曲线有峰值点(测到了下降段), 而文献 [5] 的传统截面试件的荷载 - 挠度曲线没有下降段, 说明腹腔内混凝土在加载后期对试件受力有一定的贡献。

2.2 荷载 - 纵向最大压应变曲线

图 5(a)为试件荷载 N 和中截面纵向最大压应变 ϵ_{max} 的关系曲线。当截面的最大压应变达到大约 10×10^{-3} 后, 试件进入强化阶段, 荷载还在增加, 但增加缓慢, 此时中截面处两侧钢管已经出现了明显的外

凸变形. 随着偏心率的增大, 应变增长速度变快. 与图 5 (b)传统截面试件的曲线相比, 曲线的形状基本相同, 新型截面试件和传统截面试件的最大压应变相差不大.

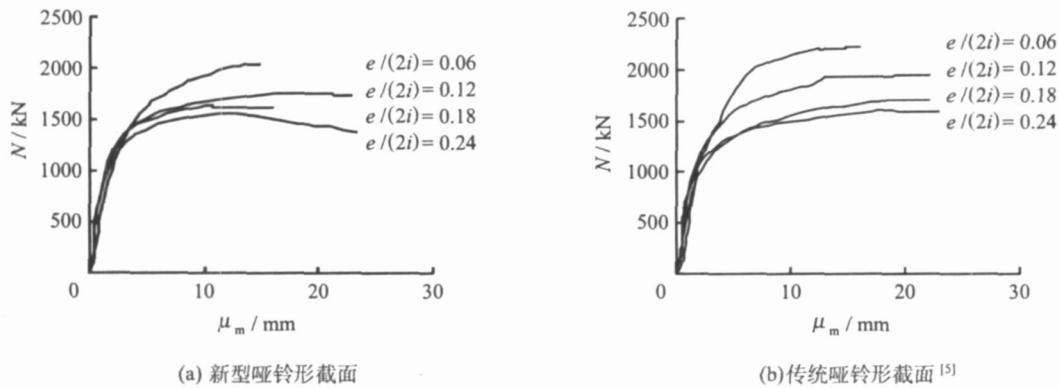


图 4 偏压构件的荷载 - 挠度曲线

Fig 4 Load - deflection curves of eccentrically - loaded columns

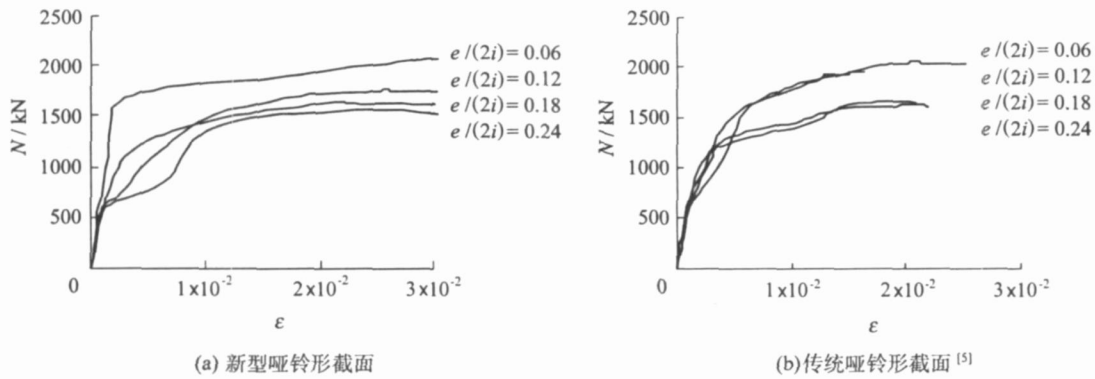


图 5 偏压构件的荷载 - 纵向压应变曲线

Fig 5 Load - longitudinal strain curves of eccentrically - loaded columns

2.3 荷载 - 泊松比曲线

图 6 给出荷载 - 受压区钢管的组合材料泊松比关系曲线. 组合材料的泊松比是指钢管的环向应变与纵向应变之比. 新型截面试件受压区钢管组合材料的泊松比均随着偏心率的增大而降低, 这与传统截面试件的规律是一致的^[5]. 在荷载小于极限荷载的约 0.6 倍以前, 受压区钢管的泊松比大约在 0.2 ~ 0.3, 即为钢材的泊松比, 受压区钢管对内部混凝土基本无约束作用. 当荷载超过极限荷载的 0.6 倍以后, 泊松比迅速增大. 受压区钢管对内部混凝土产生了约束作用.

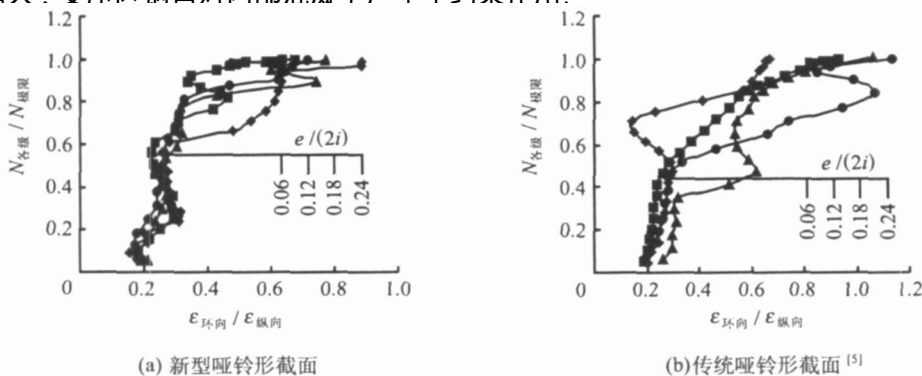


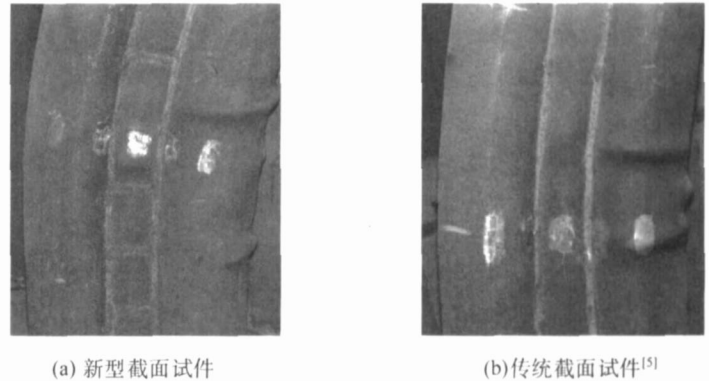
图 6 荷载 - 受压区钢管泊松比关系曲线

Fig 6 Load - poisson ratio curves of steel tube under compression

2.4 破坏形态

文献 [3] 的研究表明, 对于轴压试件, 传统截面的试件与新型截面的试件的破坏特征是不同的. 传统截面试件是在钢管与腹板联接焊缝处被拉裂, 新型截面试件由于腹腔内应力小, 焊缝处未拉裂, 破坏是由腹板和圆钢管壁局部屈服引起的.

与轴压试件不同, 本文的试验结果表明, 新型哑铃形偏压试件的破坏特征与传统哑铃形试件^[5]基本相同, 都是一管先屈服, 然后腹板鼓出, 最后整个试件破坏失去承载力. 在偏压荷载作用下, 传统哑铃形构件腹腔内的混凝土压力不大, 没有出现像轴压构件中的钢管与腹板联接焊缝处开裂的现象. 本文和文献 [5] 偏压构件中段破坏时的典型照片见图 7.



(a) 新型截面试件

(b) 传统截面试件^[5]

图 7 试件破坏时中截面附近区域典型照片

Fig 7 Typical photo of middle section of specimen after failure

2.5 极限承载力

从图 5 可以看出, 当中截面的最大压应变超过 10×10^{-3} 后, 新型截面试件和传统截面试件的荷载还在增加, 但此时试件中截面受压区两侧边钢管壁已出现了明显的外凸变形, 量测到的变形值已不足以代表真实的构件整体变形. 用应变的大小来定义偏压构件极限承载力已经失去了准确性, 应该用试件中截面的水平位移来控制极限承载力的大小.

新型截面试件以图 4(a) 中荷载 - 水平位移曲线的峰值点所对应的荷载值作为试件的极限承载力试验值, 此时中截面水平位移平均值为 14 mm, 对应的最大压应变平均值为 25×10^{-3} . 传统截面没有测到下降段, 文献 [5] 取中截面水平位移为试件净高的 $1/55$ (14 mm) 对应的荷载值为试件极限承载力的试验值, 此时试件虽然还能继续承载, 但荷载增加的幅度非常小, 此时对应的最大压应变平均值为 21×10^{-3} .

表 2 为哑铃形钢管混凝土偏压试件的试验值比较, 其中 N_{e1} 表示传统截面试件的试验平均值, N_{e2} 表示新型截面试件的试验平均值. 由表 2 可知, 两组试件的极限承载力相差很小, 新型截面试件比传统截面试件的极限承载力略小, 前者大约是后者的 95%.

表 2 极限承载力试验值的比较

Tab 2 Comparison of the test data under ultimate load

$e/(2i)$	A 组		B 组		N_{e1}/N_{e2}
	N_{e1}/kN	U/mm	N_{e2}/kN	U/mm	
0.06	2 110	14.0	2 050	14.3	0.97
0.12	1 978	14.0	1 783	17.7	0.90
0.18	1 695	14.0	1 655	12.6	0.98
0.24	1 625	14.0	1 600	10.4	0.98

3 极限承载力计算

由上一节的分析可知, 新型截面试件的受力性能和极限承载力与传统截面试件相差不大, 所以可以采用与传统哑铃形偏压短柱相同的计算方法来计算其极限承载力.

对于传统的哑铃形偏压短柱, 文献 [7] 提出了修正格构式法, 它将哑铃形构件的受力通过平截面假定, 分解到两肢单圆管上, 与传统格构式方法相比, 除承受轴向力外, 还要考虑弯矩的作用, 通过验算各肢压弯构件的极限承载力, 取其小值作为构件的整体极限承载力. 文献 [8] 则提出将哑铃形截面等效成单圆管的单圆管算法. 与传统哑铃形截面不同的是, 对于新型哑铃形截面来说, 这些公式中的腹腔内混凝土面积 A_{cf} 值应为零.

应用上述两种方法,分别采用 CECS^[9]、JCJ^[10]和 DL/T^[11] 3本钢管混凝土设计规程提供的钢管混凝土(单圆管)偏压短柱极限承载力的计算公式,对表 1 中的 6 根试件的极限承载力的计算结果列于表 3(相同构件试验值取其平均值)。由表 3 可知,两种计算方法的理论值与试验值都比较接近,除了等效单圆管法中利用 CECS 规程的计算值比试验值略大外,其余数值均比试验值小,表明上述两种方法基本可行。计算值的大小排列依次为 CECS、DL/T 和 JCJ(修正格构式法中个别情况下 JCJ 规程计算值比 DL/T 规程计算值大),这是由于这三本规程在计算单圆管极限承载力时所采用的方法不同引起的。

表 3 计算结果与试验结果对比

Tab 3 Comparison of predicted value and test result

(kN)

试件编号	修正格构式法			等效单圆管法			试验结果
	CECS	JCJ	DL/T	CECS	JCJ	DL/T	
B - 1	2 012	1 602	1 638	2 118	1 767	1 880	2 050
B - 2	1 752	1 385	1 343	1 927	1 522	1 733	1 783
B - 3	1 518	1 359	1 285	1 761	1 404	1 572	1 655
B - 4	1 358	1 031	1 155	1 690	1 285	1 449	1 600

修正格构式法的计算值比等效单圆管法的计算值低 10% 左右,这一差值是由两种算法对极限承载力的定义不同造成的。修正格构式法是通过单肢钢管混凝土达到极限承载力时,整个构件达到极限承载力;等效单圆管法是将整个截面破坏时的极限承载力定义为构件的极限承载力且计算中提高了腹腔内混凝土的套箍作用,因此,从应用角度来说,是偏不安全的。修正格构式法计算简便且偏于安全,建议工程应用时采用。

4 结语

试验研究表明,新型截面试件与传统截面试件的荷载 - 中截面挠度曲线、荷载 - 最大压应变曲线随偏心率变化的规律基本一致。试件的破坏特征也基本相同,都是一管先屈服,然后腹板鼓出,最后整个试件破坏失去承载力。新型截面的极限承载力的计算方法可以采用与传统截面试件相同的方法来计算。与传统截面构件一样,修正格构式法较之单圆管法计算方便且偏于安全,建议工程应用时采用。

新型哑铃形构件无法灌注腹腔内混凝土,施工时避免了因腹腔灌注混凝土引发的爆管事故,也简化了现场施工。文献 [3] 所进行的轴压试验和本文所进行的偏压试验均表明,新型哑铃形构件的受力性能与极限承载力都与传统截面基本相同。因此,建议今后的钢管混凝土哑铃形拱桥设计中考虑采用。

参考文献:

- [1] 陈宝春,肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形拱肋灌注管内混凝土时的截面应力分析 [J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 73 - 76
- [2] Zhang Weizhong, Chen Baochun, Huang Wenjin. Design of the second highway bridge over Yellow River in Zhengzhou [C] // Proceedings of the Fourth International Conference on Arch Bridge, Barcelona: [s n], 2004: 531 - 537.
- [3] 盛叶,陈宝春,黄福云,等. 新型钢管混凝土哑铃形短柱受力性能研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(3): 29 - 34.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形拱肋施工应力分析与偏压试验研究 [D]. 福州:福州大学, 2003.
- [7] 韦建刚,陈宝春,肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形偏心受压短柱极限承载力的修正格构式算法 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 603 - 607.
- [8] 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
- [9] CECS 28: 90, 钢管混凝土结构设计与施工规程 [S].
- [10] JCJ 01 - 89, 钢管混凝土结构设计与施工规程 [S].
- [11] DL/T 5058 - 1999, 钢管混凝土组合结构设计规程 [S].

(责任编辑:杨青)