

新型钢管混凝土哑铃型短柱受力性能研究*

盛叶¹, 陈宝春¹, 黄福云¹, 肖泽荣²

(1. 福州大学 土木建筑学院, 福建 福州 350002; 2. 福州市规划设计研究院, 福建 福州 350003)

摘要:哑铃型截面是钢管混凝土拱肋常用的截面型式,然而在灌注腹腔内混凝土时钢管与腹板相交处应力很大易发生爆管事故,因而提出一种腹腔内不灌混凝土而用H型钢加劲的新型哑铃型拱肋。施工受力分析表明,由于不需灌注腹腔混凝土,新型哑铃型拱肋施工时发生爆管的可能性很小。对新型哑铃型短柱进行了轴压试验研究。结果表明,新型哑铃型短柱与传统的哑铃型短柱受力性能相近,极限承载力可以采用相同的计算方法。

关键词:钢管混凝土;哑铃型;轴压;试验;极限承载力;新型截面

中图分类号: TU528.59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7029(2005)03-0029-05

Research on concrete filled steel tubular stubs with new type dumbbell section

SHENG Ye¹, CHEN Bao-chun¹, HUANG Fu-yun¹, XIAO Ze-rong²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

2. Fuzhou Planning & Design Research Institute, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Dumbbell-shaped section is often used in concrete filled steel tubular (CFST) arch rib; whereas great stress is likely to produce cracks in the weld sealing between steel tube and web plates when concrete is filling into the web space. Therefore a new type dumbbell section is proposed, in which instead of concrete in the web space is the stiffening H-shape steels. Analysis indicates that the possibility of broken accident is very small because no concrete will fill into the web space in this new type dumbbell section. Experimental research on CFST stubs with new type dumbbell sections subjected to axial loads are carried out. Research results indicate that CFST stubs with new type section behaves similarly to those with traditional section and its ultimate load-carrying capacity can be estimated with the same methods.

Key words: concrete-filled steel tube; dumbbell; axial load; experiment; ultimate load-carrying capacity; new type section

通常所说的哑铃型截面是指由上下两个圆钢管混凝土和两块联接钢板及板内的混凝土组成的截面,它较之单圆管抗弯刚度大。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。分析表明,这种事故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,施工时应尽量采用先两管后腹腔的灌

注顺序,且采用拉杆加劲腹板和分腔灌注等方法,以改善施工受力,避免爆管事故的发生^[1]。为从结构构造上解决这一问题,作者在某钢管混凝土拱桥的设计中提出了腹腔内不灌混凝土而以H型钢加劲的哑铃型截面^[2]。将腹腔内灌有混凝土的哑铃型截面称为传统的哑铃型截面,相应地,称这种腹腔内不灌混凝土的为新型哑铃型截面。

为了解新型哑铃型构件的受力性能,对灌注管

* 收稿日期:2005-02-28

基金项目:福建省重大科技项目(2003F007)

作者简介:盛叶(1978-),女,湖北潜江人,福州大学博士研究生,从事桥梁与结构工程研究

内混凝土时的拱肋应力进行了空间有限元分析;进行了2根轴压短柱的试验,并与文献[1]传统哑铃型轴压构件的试验结果进行了比较,最后讨论了新型哑铃型短柱轴压极限承载力的计算方法。

1 灌注管内混凝土时的受力分析

为进行比较,新型哑铃型截面施工应力分析时,选取的截面与文献[1]中算例一的传统哑铃型截面尺寸相同(见图1),只是将腹腔内混凝土改用H型钢。新型哑铃型截面由于腹腔内不灌注混凝土,所以只有2根钢管需要灌注混凝土。在灌注混凝土时,一般来说,泵送混凝土的内压力产生的截面应力要远大于混凝土自重产生的应力。为了简化分析,本文在分析时不计混凝土自重对截面受力的影响,即认为上下管的灌注顺序可以互换。这样,施工顺序也只有一种,即先灌一管,然后灌另一管。

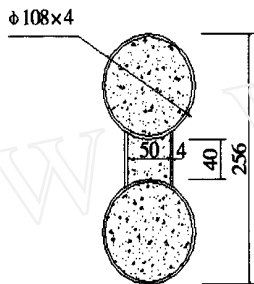


图1 传统哑铃截面算例(单位:mm)

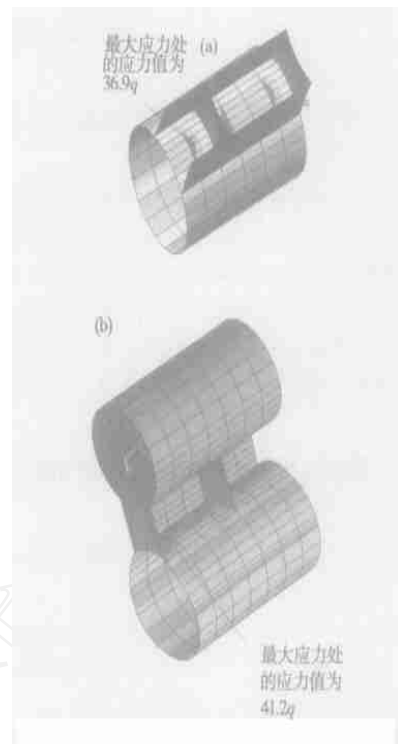
Fig. 1 Traditional dumbbell section in case study (Unit:mm)

新型哑铃型截面钢管混凝土拱肋由于在腹腔内每隔一段距离有工字钢加劲,因而属于空间问题,为此需建立空间计算模型,而不能像文献[2]那样采用平面计算模型。由于钢管、腹板和工字钢属于薄壁结构,采用壳单元进行划分,选择了ANSYS程序中的8节点SHELL单元,考虑混凝土与钢管协调变形,与8节点SHELL单元对应,选择了20节点的SOLID单元来模拟混凝土,且对混凝土采用ANSYS程序中的free mesh(自由划分网格)命令来划分单元网格。

在ANSYS分析中,Q345钢管弹性模量取 2.06×10^5 MPa,泊松比 μ 为0.283,混凝土材料弹性模量取 3.45×10^4 MPa。由于混凝土在受压后,其泊松比 μ 由0.167变化到0.5以上,为反映混凝土受钢管的紧箍力,故在ANSYS分析过程中取 $\mu = 0.4$ 。

在计算中假设灌注混凝土时的内压力为 q (单位:MPa),为了更清晰地了解新型哑铃型截面在灌注上管和下管内混凝土的受力情况,运用ANSYS程序中的SELECT命令选取最大应力附近的单元,

并对模型旋转了一定的角度,以显示其最大应力附近的应力分布。应力分布分别见图2(a)和(b)所示。



(a) - 灌注上管内混凝土;(b) - 灌注下管内混凝土

图2 新型哑铃型截面施工应力分布图

Fig. 2 Stress distribution in new type dumbbell section of CFST arch rib in construction

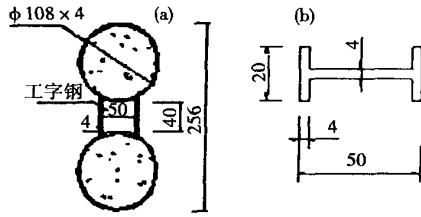
新型哑铃型在上下管内压力作用下的最大应力值分别为 $36.9q$ 和 $41.2q$,与传统哑铃型的 $37.3q$ 和 $39.5q$ 相近^[1]。但传统哑铃型在灌注腹腔内混凝土时的最大应力将达到 $456.7q \sim 574.6q$,易发生爆管事故^[1]。而新型哑铃型拱肋因不需灌注腹腔内混凝土,就避开了这个问题。假定拱肋采用Q345钢,为了保证腹板和钢管处的最大应力值不超过钢的屈服强度, q 必须小于 8.4 MPa,而在泵送管内混凝土时,管内压力远没有那么大,因此新型哑铃型拱肋不会由于灌注管内混凝土产生的内压力而使拱肋应力太大发生爆管。

2 轴压试件设计制作与试验装置

试件的截面以图1为原型,基本以1/10的比例进行设计。试件的截面由2根 $\phi 108 \times 4$ mm的无缝钢管和4 mm厚、相距50 mm的腹板焊接而成。除腹腔内不填混凝土而代之以H型钢加劲外,试件的截面尺寸与文献[2]相同。

文献[2]在试件设计时考虑了腹板间距、高度变化和是否加拉杆等参数,试验结果表明这些参数变化对构件的受力影响不大;对于本文的新型哑铃

型短柱来说,由于腹腔内不填混凝土,这些参数的影响就更小了,所以本文试件设计时不考虑这些参数的变化,仅制作了 2 个试件,分别为 B - 1 和 B - 2,与文献[2]中的试件 A - 1(1),A - 1(2)相对应。试件的长度 L 均为 324 mm,长细比 为 3 ($= L/D$,其中 D 为钢管外半径)。在钢管内灌注 C50 混凝土,试件两端焊有 2 块厚为 10 mm、长为 270 mm、宽为 120 mm 的矩形钢板。试件构造见图 3。



(a) - 哑铃型截面图;(b) - 加劲工字钢

图 3 试件截面(单位:mm)

Fig.3 Cross section of specimen (Unit :mm)

混凝土的主要原材料为 525 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。混凝土浇筑完后在振动台上振捣直至密实。钢材采用 Q345 钢,共做了 3 个标准试件,弹性模量取其平均值,为 2.01×10^5 MPa。钢管的屈服强度 $f_y = 310.9$ MPa,混凝土立方体强度 $f_{cu} = 50.6$ MPa。

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。为了测量构件变形,在每个试件中截面处沿周长平均布设纵向及环向各 12 片电阻应变片,同时沿试件的纵向还设置了 2 个电测位移计以测定试件的纵向变形,试验装置见图 4。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,当钢管屈服后每级荷载约为预计极限荷载的 1/20,每级荷载的

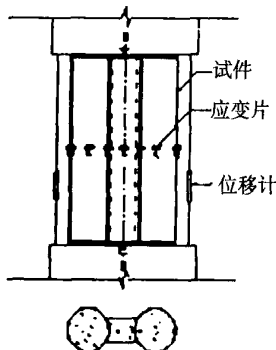


图 4 试验装置

Fig.4 Testing set

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。数据采用自动采集器进行采集。

3 试验结果分析

试验现象与文献[2]所述基本一致。图 5 为试件 B - 1 和文献[2]中 A - 1(1)的荷载 - 位移曲线。

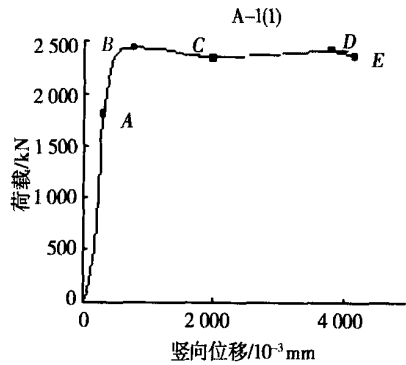
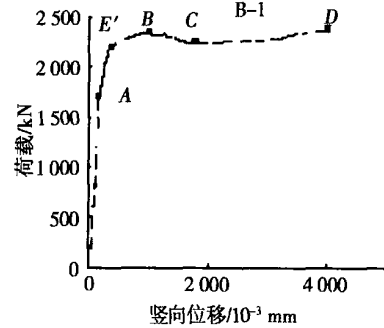


图 5 荷载 - 位移曲线

Fig.5 Load - deformation curves

B - 1 的荷载 - 位移曲线可划分为 5 段,OA 为弹性阶段,构件处于线弹性状态。A 点对应的荷载为极限荷载的 70%,此时构件变形值为 2.00 mm,与构件的轴向长度之比为 0.6%。过了 A 点以后,圆钢管柱表面有细的剪切滑移线出现,构件开始进入弹塑性阶段(AB 段)。随着荷载的增加,剪切滑移线逐渐加粗变密,并伴有铁屑脱落,荷载到达第一个峰值点 B 点。此后,荷载不升反降(BC 段),构件急剧变形,在腹板的工字钢两侧处有向外局部屈曲的现象。构件在端部效应影响下单圆钢管出现两端下陷、中间外鼓现象,到达下降段的最低点 C 点时,构件的变形值与构件长度之比达 5%。继续加载,荷载 - 位移曲线会进入一个斜率很小的上升段(CD 段),即荷载增加缓慢但变形发展很快,D 点处荷载超过 B 点处荷载并有继续向上发展的趋势,但由于变形很大(达 15%)并且腹板在工字钢

两侧向外凸屈,因而认为构件已经破坏。比较试件 B-1 与文献[2]中的 A-1(1)可知,两者的受力性能基本一致,只是在破坏阶段传统的哑铃型试件是在焊缝处被拉裂,构件承载力下降很快,而新型哑铃型截面由于腹腔内应力小,焊缝处未拉裂,在腹板和圆钢管壁局部屈服后,试件的荷载-位移曲线还处于小斜率的上升段中,但此时构件变形已很大且有局部屈曲现象,继续加载意义不大,因此停止了试验。试验后的构件对比照片如图6所示。

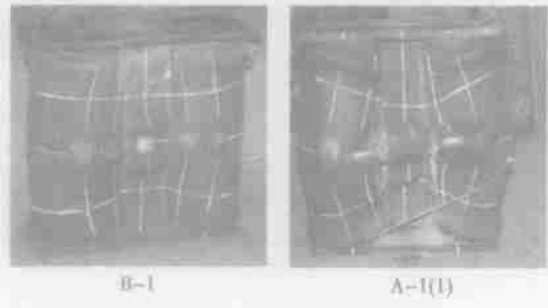


图6 试验后试件的对比照片

Fig. 6 Photograph comparison of the specimens after tests

试验分析发现,荷载达到 N_C 时,试件已有相当大的压缩变形,钢管的应变已达约 $15\ 000\ \mu$,钢管的端部局部屈曲也已相当明显;而当荷载达到 N_D 时,腹板在工字钢两侧开始局部屈曲,压缩变形达到整个试件的 13% 左右,其荷载值已失去工程应用的意义。因此,本文以荷载-变形曲线上第一个峰值点所对应的荷载值 N_B 作为试件的极限荷载值。从表1比较可知,新型截面的极限承载力与传统截面的极限承载力十分接近。从平均值比较来看,前者略小,为后者的 98.3%。

表1 试验值比较

试件	试验值	平均值
A-1(1)	2 400	2 410
A-1(2)	2 420	
B-1	2 350	2 370
B-2	2 390	

4 极限承载力

4.1 简单迭加法

文献[2]提出了工程实际中常采用的简单迭加法,即哑铃型截面中的上下两圆钢管混凝土考虑套箍作用,而腹腔内的钢管和混凝土按钢筋混凝土考虑:

$$N_1 = 2N_y + (A_{fc}f_c + 2A_{fs}f_s) \quad (1)$$

式中: A_{fc} 为腹腔内混凝土的面积; A_{fs} 为钢腹板的

面积; f_s 为钢管的抗拉强度设计值; f_c 为混凝土抗压强度设计值; N_y 为单圆管的轴压极限承载力。

新型哑铃型截面因为腹腔内没有填充混凝土,所以式(1)可以简化为:

$$N_1 = 2N_y + 2A_{fs}f_s \quad (2)$$

4.2 等效单圆管法

文献[3]在对哑铃型轴心受压构件试验研究的基础上,提出了将哑铃型构件等效成单圆管构件的极限承载力计算方法,即将哑铃型截面等效成具有如下钢管面积和混凝土面积的单圆钢管混凝土截面。

$$\left. \begin{aligned} A_s &= 2A_{sg} + 2A_{sf} \\ A_c &= 2A_{cg} + 2A_{cf} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: A_s, A_c 为等效单圆管的钢管和混凝土的面积; A_{sg}, A_{sf} 分别为哑铃型中单根圆钢管和单块钢腹板的面积; A_{cg}, A_{cf} 分别为哑铃型中单根圆钢管内的混凝土面积和腹腔内的混凝土面积。

对于新型哑铃型截面来说,式(3)中的腹腔内混凝土面积 A_{cf} 值为零,所以式(3)可简化为:

$$\left. \begin{aligned} A_s &= 2A_{sg} + 2A_{sf} \\ A_c &= 2A_{cg} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4.3 计算结果讨论

表2给出按前述两种计算方法对试件极限承载力的计算结果。计算中钢管混凝土轴压短柱的极限承载力分别采用了 CECS^[4], JGJ^[5] 和 DL/T^[6]3 本规程的计算方法。表2中: N_1 为简单迭加法计算的结果; N_2 为等效单圆管法计算的结果; N_e 为2个试件试验值的平均值。

表2 计算值与试验值比较

极限承载力	CECS	JGJ	DL/T
N_1	2 128.4	1 805.2	1 559
N_1/N_e	0.91	0.77	0.66
N_2	2 232.4	1 806.1	1 461.7
N_2/N_e	0.95	0.77	0.62

从表2可以看出,3本规程计算的极限承载力均比试验值小,表明上述的两种方法是偏于安全的。计算值的大小排列依次为 CECS, JGJ 和 DL/T, 这是由于这3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。

以 CECS 规程计算的结果来看,简单迭加法计算值略大,为试验值的 91%,等效单圆管法计算值为试验值的 95%。由于等效单圆管算法实际上使截面的含钢率提高从而提高了钢管对混凝土的约束效应,亦提高了承载力的计算值,因而从理论上

说它与简单迭加法相比偏于不安全。但从表2的计算值与试验值比较看,计算值仍小于试验值,这与传统哑铃型轴压短柱采用等效单圆管法计算的极限承载力有些构件超过实测值不同,说明新型哑铃型短柱采用这一方法还存在着相对的合理性。

总而言之,新型哑铃型短柱的轴压受力性能与传统哑铃型的基本一致,其极限承载力计算方法可以采用传统哑铃型截面提出的简单迭加法和等效单圆管法,由于简单迭加法计算简单且偏于安全,建议工程应用时采用。

5 结论

1) 采用新型哑铃型截面的拱肋,在灌注管内混凝土时拱肋截面上所产生的应力与传统哑铃型的相差不大,但由于不需灌注腹腔内混凝土,避免了传统哑铃型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。

2) 新型截面钢管混凝土哑铃型轴压短柱与传统截面短柱受力性能基本一致,具有良好的弹塑性性能,荷载-变形曲线在经过线性和非线性增长后达到第一个峰值点,再经过短暂的下降段后进入缓慢上升的强化段,达到第二个峰值点后迅速破坏。后一个峰值点的荷载较第一个稍大,但从工程应用角度,可把第一个峰值点对应的荷载作为构件的极限荷载。

3) 新型哑铃型截面的破坏形态不同于传统的哑铃型截面。传统的哑铃型截面的钢腹腔内混凝土的横向变形由于受到外层钢管或钢板的约束,对钢管和钢腹板产生了横向的内压力,这个内压力将在钢管与钢腹板交接处产生很大的拉应力,构件破坏时,钢管与钢腹板的交接处的焊缝被拉裂,但新型截面腹板由于受到腹腔内工字钢的约束作用且无腹腔内混凝土的内压作用,因而焊缝处应力较小,不会被拉裂,可将腹板局部屈曲作为破坏的特征。

4) 传统哑铃型轴压构件极限承载力计算的简单迭加法和单圆管算法都可用于新型哑铃型构件中。相比较而言,简单迭加法计算方便且偏于安全,建议工程应用时采用。

参考文献:

- [1] 陈宝春,肖泽荣. 钢管混凝土哑铃型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.
CHEN Bao-chun, XIAO Ze-rong. Analysis on sectional stresses of dumbbell shaped CFST arch rib when pouring concrete into steel tube[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 73 - 76.
- [2] 陈宝春,黄福云,盛叶. 钢管混凝土哑铃型轴压短柱试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 187 - 194.
CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun, SHENG Ye. Experimental research on concrete filled steel tubular dumbbell shaped short columns under axial loads [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 187 - 194.
- [3] 陈宝春,黄福云,肖泽荣. 钢管混凝土哑铃型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.
CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun, XIAO Ze-rong. Equivalent single circular tube method for ultimate load-carrying capacity of concrete filled steel tubular dumbbell shaped short columns[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(6): 50 - 53.
- [4] CECS 28:90, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
CECS 28:90, Specification for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures [S].
- [5] JGJ 01 - 89, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
JGJ 01 - 89, Specification for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures [S].
- [6] DL/T 5058 - 1999, 钢管混凝土组合结构设计规程[S].
DL/T 5058 - 1999, Specification for Design of Steel - Concrete Composite Structures[S].