

文章编号 :1000 - 6869(2006)04 - 0073 - 07

钢管混凝土偏压格构柱长细比影响试验研究

陈宝春¹, 欧智菁^{1,2}

(1. 福州大学 土木建筑工程学院,福建福州 350002; 2. 福建工程学院,福建福州 350007)

摘要:进行了钢管混凝土格构柱偏心受压试验,试验参数为长细比。介绍了试验的情况和过程,对柱肢钢管纵向应变、环向应变、缀管的纵向应变等进行了分析。研究结果表明,随长细比的增加,钢管混凝土格构柱的极限承载力逐渐降低。柱肢以受轴压为主,属于小偏压构件。近载侧的柱肢在试件进入非线性后紧箍效应开始发生作用。缀管的受力较小且都处在弹性阶段。受缀管的影响,节点处柱肢钢管环向应变很大,它是引起柱肢钢管撕裂从而导致试件破坏的主要原因。

关键词:受力性能;钢管混凝土;格构柱;偏心受压

中图分类号:TU528.59 TU317.1 **文献标识码:**A

Experimental study on influence of slenderness ratio in concrete filled steel tubular laced columns under eccentric compression

CHEN Baochun¹, OU Zhijing^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;
2. Fujian University of Technology, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Eccentrically loaded concrete filled steel tubular (CFST) laced columns were tested with slenderness ratio as main experimental parameter. Detailed strain measurement and analysis were conducted for the longitudinal elements and the lacing tubes. Test results indicate that the ultimate load carrying capability of the CFST laced columns compressed eccentrically reduces with the increase of slenderness ratio. The compression force dominates the loading condition in the longitudinal elements and thus they can be considered as eccentrically loaded column with small eccentricity. The circumferential straining takes effect in longitudinal elements on the loading side after the specimen enters nonlinear phase. During the loading, the lacing tubes remained in elastic stage. It was observed that complicated and excessively large strains existed near the nodes of the longitudinal elements and the lacing tubes, which initiated the tearing of the tube walls and eventually resulted the total failure of the member.

Key words: structure behavior;concrete-filled steel tube(CFST);laced columns;compress eccentrically

1 前言

本文所说的钢管混凝土格构柱是指用钢管混凝土

作为柱肢、空钢管作为缀杆或缀件(称为缀管)、柱肢的钢管(称为肢管)与缀管采用焊接连接的以受压为主的构件。格构柱中柱肢的根数称为肢数,常见的有二肢柱、三肢柱和四肢柱。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,能够充分发挥钢管混凝土受压强度大的特性,因此被大量应用于荷载偏心率较大或长细比较大的结构构件中^[1,2]。在文献[3]统计的 45 座已建的跨径超过 120m 的钢管混凝土拱桥中,有 33 座拱肋采用了格构式,占

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578042),福建省重大科技项目(2003F007)。

作者简介:陈宝春(1958 -),男,福建罗源人,工学博士,教授。

收稿日期:2005 年 2 月

总数的 71.7% ;在跨径超过 200m 的 21 座桥梁中,则全部采用格构式。在这些拱肋中除一座为三肢和一座为六肢外,其余均为四肢式。所以,四肢格构式拱肋是大跨钢管混凝土拱桥拱肋的主要截面型式。

与大量应用相比,钢管混凝土格构柱的研究开展得还不多。文献[4]~[7]对钢管混凝土四肢格构柱的面外屈曲、反复荷载作用下的滞回曲线、变形能力进行了试验研究。上述的试验对象是双肢柱,不是工程中常用的三肢和四肢柱;试验没有将面内受力性能与极限承载力作为研究目的。为此,本文以长细比为参数,进行了 4 根钢管混凝土四肢格构柱偏心受压试验,对其受力性能、破坏机理和极限承载力进行了分析,为进一步的研究打下基础。

需要指出的是,由于格构式拱肋中柱肢以受轴力为主,整根拱肋除了受压还有受弯,所以桥梁工程中习惯上将这种形式的拱肋称为“桁式”拱肋。国外的研究文献[4]~[7]中也称之为“truss”。本文作为基础性的构件研究,沿用建筑结构工程中“格构柱”的名称。

2 钢管混凝土格构柱偏压试验

2.1 试件设计与制作

试件设计时,选用了一座在建的跨径为 278m 的钢管混凝土拱桥的拱肋为原型(比例为 1/8)。试件共 4 个,每个试件截面相同(截面高 0.6875m,宽 0.3125m)、高度不同,A-1 到 A-4 试件的高度从 0.5m 到 2.0m,按 0.5m 递增,试件构造见图 1。试件中的钢管均为 Q345 钢的有缝管。四根柱肢为直径 $\Phi = 140\text{mm}$ 、壁厚 2mm 的钢管内填充混凝土的钢管混凝土构件。强轴方向的缀管(有平缀管和斜缀管)均为直径 $\Phi = 74\text{mm}$ 、壁厚 1.5mm 的空钢管;弱轴方向的缀管为直径 $\Phi = 88\text{mm}$ 、壁厚 1.5mm 的空钢管。在图 1 中用 X 表示斜缀管, P_q 和 P_r 分别表示强轴方向和弱轴方向的平缀管,数字表示缀管的编号(括号内数字为另一片缀管的编号)。

试件的设计参数为长细比,参考了几座钢管混凝土桁式拱桥使用荷载下拱肋截面的偏心率 e/h 在 0.2 附近^[3],因此选择试件的偏心率为 0.2。各试件具体参数见表 1。其中构件长细比 λ_y 为格构柱长度与横截面回转半径之比^[8]。

管内混凝土的配合比经试验,取水泥 水 砂 石

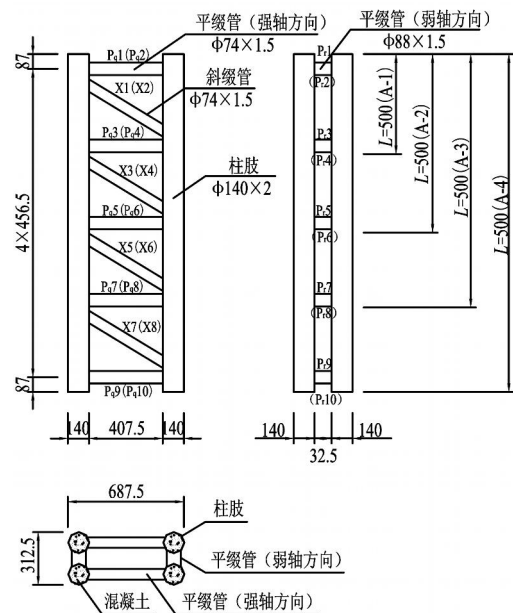


图 1 试件构造图

Fig. 1 Details of specimens

表 1 钢管混凝土偏压格构柱试验参数及结果

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	试件长度/m	构件长细比 λ_y	极限承载力/kN
A-1	0.5	1.818	4700
A-2	1.0	3.636	4390
A-3	1.5	5.294	3900
A-4	2.0	7.273	3080

减水剂 = 400 148 686 1171 6.1。其中,水泥为 525 # 普通硅酸盐水泥。浇灌混凝土时钢管竖立,混凝土从柱肢钢管的顶部灌入,并用 5cm 直径振捣棒插入振实,最后用水泥砂浆将柱端部抹平。试件采用室外天然养护。混凝土立方体试验所得的抗压强度标准值 f_{ck} 为 53.4MPa,长方体试验所得的平均弹性模量为 34500MPa。将由钢管上切割下来的钢带制作成试件,经拉伸试验测得钢材屈服强度为 430MPa。此外,还同批制作了 6 根与试件柱肢相同的钢管混凝土单圆短柱($\Phi 140\text{mm} \times 2\text{mm}$),高度分别为 0.42m、0.5m、1m,轴压试验的结果其极限承载力平均值为 1650kN。

2.2 试验装置

为保证钢管与混凝土共同受力,在试件两端均用 20mm 厚的矩形钢端板与钢管焊牢,尺寸为 362.5mm \times 190mm。并加焊三角形肋板,尺寸为 25mm \times 50mm \times 5mm。全部试件都在 500t 的油压柱试验机上进行加载。考虑到钢管混凝土格构柱与试验机接触面只有柱

肢的面积,为防止试验机压板在大荷载作用下弯断,所有试件在上下两端均垫以 200mm 厚的钢块,尺寸为 362.5mm × 737.5mm。

偏压荷载通过设于两端的辊轴和加荷板传递给试件。钢块上按预定的偏心距设置相应的条形凹槽,与辊轴吻接。辊轴的另一面与加荷板的中心凹坑吻接。在辊轴表面涂刷适量机油,以保证能自由转动。加荷板与辊轴、钢块均重复使用。试验装置见图 2。

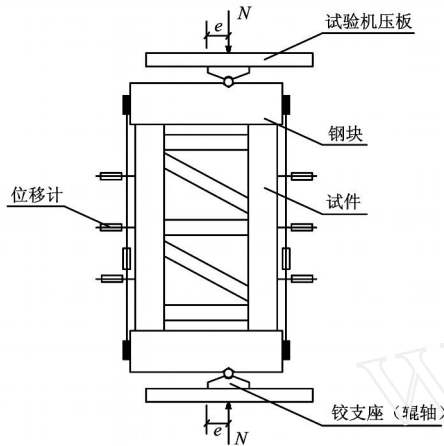


图 2 格构柱偏压试验装置图
Fig. 2 Test set up

在钢管混凝土肢管中截面 A、B、C、D 点各布置一片纵向应变片和环向应变片,如图 3 所示。此外,肢管 1/4、3/4 截面及缀管的中截面均布置纵向应变片。试件两侧柱端各布置一个位移计测量其纵向变形,在强轴方向内沿每根肢管高度四分点各布置三个百分表测量其侧向挠度。全部测点的读数均由应变仪自动记录。采用 IMPDAS 数据采集系统自动采集试验全过程数据,并进行数据处理。

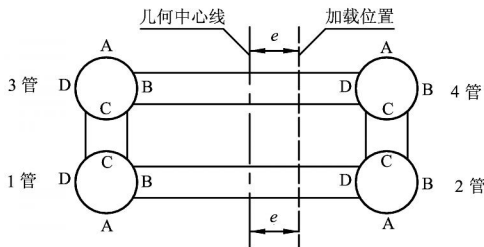


图 3 格构柱各柱肢钢管中截面应变片布置
Fig. 3 Strain gauges arrangement on middle section of longitudinal elements

2.3 试验加载方法

试验采取分级单调加载。初始阶段,每级约为估算极限荷载 N_u 的 1/15 ~ 1/12,在总荷载大约超过极限荷载的 50% 以后,每级减少为 1/20 ~ 1/15 极限荷载,在总荷载大约超过极限荷载的 75% 后,每级减少为 1/25 ~ 1/20 极限荷载。每级持载 2 ~ 3min。当荷载达到最大值,试验机压力表指针开始回转后,仍继续向千斤顶油缸送油,并连续记录读数,以捕捉极限荷载时试件的应变和挠度。每个试件的试验时间约为 1 ~ 1.5h。

3 试验结果与分析

3.1 试验过程

图 4 为各试件荷载-纵向应变曲线,其中纵向应变是构件中截面近载一侧两柱肢钢管(2号管和4号管)B点纵向应变的平均值。从图 4 可见,在加载初期,曲线基本上为直线,表明试件处于弹性阶段。当荷载加至极限荷载的 60% ~ 70% 时,荷载-纵向应变曲线明显偏离其初始的直线,进入弹塑性阶段,此时试件外形没有明显变化,偶有焊接碎片掉落。当外荷加至极限荷载的 80% ~ 96% 时,在试件的近载侧柱肢产生若干处局部凸出,荷载增量不大,而变形发展很快,表现出一定的延性,而另一侧(远载侧)两根柱肢钢管(1号管和3号管)没有局部变形。此后曲线继续以较小的斜率上升,偏压一侧的柱肢钢管出现纵向撕裂,撕裂处混凝土压碎并有少量粉状物流出。撕裂大都位于中截面附近、靠近节点的柱肢钢管内侧。这时试验机压力表指针开始回转,荷载无法增加,在极短时间内,近载侧的柱肢在多处形成显著的皱曲,试件迅速进入破坏状态,将此时荷载(最大荷载)认为试件的极限荷载。

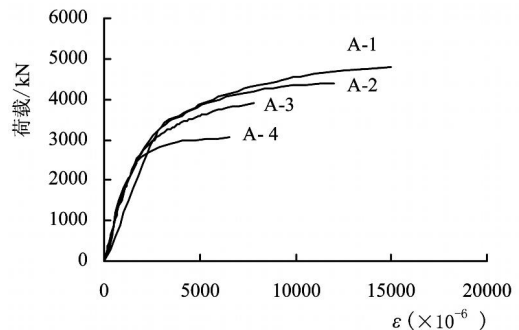


图 4 荷载-纵向应变曲线
Fig. 4 Load-longitudinal strain curves

各构件的极限荷载见表 1。按桁架计算的单肢轴向力,4 个试件的所有四根柱肢均为受压,A-1~A-4 试件达到极限荷载(见表 1)时近载侧柱肢的单肢计算轴力分别为 1645kN、1536kN、1365kN、1078kN;均小于钢管混凝土短柱试件极限荷载平均值 1650kN。其中,构件长细比最小的 A-1 试件,近载侧柱肢的计算轴压力接近于钢管混凝土短柱的极限荷载;构件长细比最大的 A-4 试件,近载侧柱肢的计算轴压力则比钢管混凝土短柱的极限荷载小很多。从总体上来说,4 根试件的破坏均属于整体破坏。

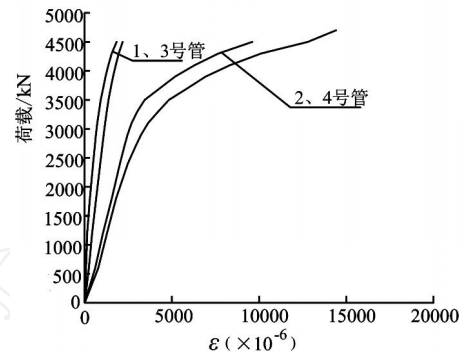
从图 4 中可以看出,各试件的荷载-纵向应变曲线基本相同。在受力前期(极限荷载的 60%~70%之前),各曲线几乎重合,这是由于此时材料还处于弹性阶段,试件的横向变形较小,轴向力在横向变形上产生的附加弯矩(即几何非线性影响)很小。各试件所受的偏心荷载基本相同。此后,构件进入材料非线性和几何非线性阶段,随高度增大,构件所受的几何非线性产生的附加弯矩显著增加。构件长细比越大,荷载-纵向应变曲线上斜的斜率越小,构件的极限承载力越低,极限应变也越小。

从文献[9]可知,单圆管偏心受压试件破坏时,受压一侧出现皱曲现象,但没有撕裂现象出现。格构柱偏压试件的各柱肢虽以受压为主,但也有弯矩存在,因此对单根柱肢也可看成偏心受压的单圆管。但与单圆管偏压试件破坏情况不同,其钢管的皱曲不是发生在偏压一侧(纵向压应力较大的应是在外侧),而是在有缀管的内侧,而且还有撕裂现象出现。此外,单根圆管偏压构件破坏时,构件的横向变形很大,构件的破坏表现出明显的整体破坏的特征,而格构柱由于整体刚度较大,其侧向挠度并不大,构件的破坏是从局部破坏开始的。

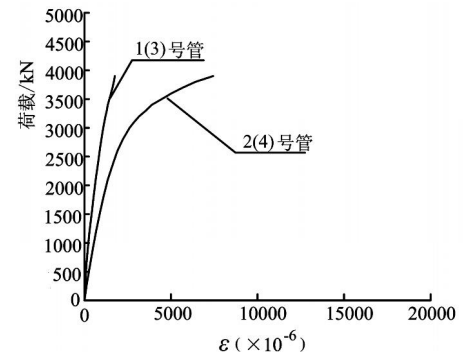
3.2 柱肢钢管纵向应力

钢管混凝土格构柱中的柱肢可分为节间段和节点段。在本文进行的 4 根试件中,A-1 和 A-3 试件由于节间为奇数,所以构件中截面处于柱肢的节间段;而 A-2 和 A-4 试件的节间数为偶数,构件中截面处于柱肢与缀管交汇的节点段。图 5 给出了 A-1 和 A-3 试件各柱肢中截面(节间段)荷载-(B 点处)纵向应变曲线,其中 A-1 试件左右两根柱肢(1 号和 3 号、2 号和 4 号)的曲线略有不同,A-3 试件的两根则几乎重合。从图 5 中可看出,近载一侧柱肢(2、4 号)所承担的荷载大,所以

其钢管的应变值始终大于远载一侧(1、3 号)的,且其荷载-纵向应变曲线较早进入非线性和强化阶段。实际上,试件的最后破坏也是由近载侧的柱肢破坏引起的。远载侧的荷载-纵向应变曲线大致为直线,直到试件接近破坏时才有不是很明显的非线性段出现。从试验结果看这一侧的柱肢尚未达到其自身的极限承载力。比较 A-1 和 A-3 两试件,各柱肢钢管的荷载-纵向应变曲线规律相同,只是 A-3 试件由于长细比大所以极限荷载较小。



(a) A-1 试件



(b) A-3 试件

图 5 荷载-柱肢中截面钢管纵向应变图

Fig. 5 Load-longitudinal strain on middle section of tubes

图 6 给出了 A-1 试件近载侧 4 号柱肢钢管中截面(节间段)的纵向应变分布图。图 6 中正号表示压应变,A、B、C、D 为图 3 中的应变片位置。从图 6 中可以看出,在不同的荷载阶段,柱肢基本上始终保持平面。加载前期 D 点和 B 点的压应变基本相同,柱肢接近于轴压状态;在加载后期,D 点和 B 点的应变差增大,说明随构件整体受弯增大,单根柱肢的弯矩也在增大。但四个方向的应变始终为压应变,根据计算偏压一侧柱肢弯矩引起的应力占总应力的比值在 18%~24%

之间,故柱肢为小偏心受压构件。A-1 试件其余各柱肢以及其余构件的各柱肢的纵向应变分布规律与图 6 基本相同。

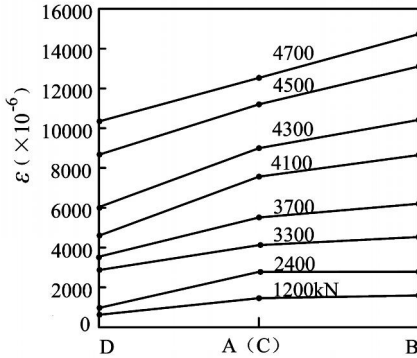


图 6 A-1 试件 4 号管中截面纵向应变分布图

Fig.6 Longitudinal strain distribution on middle section

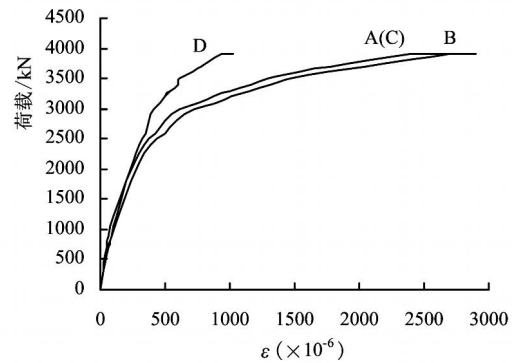
3.3 柱肢钢管环向应变

柱肢节间段与节点段的钢管环向应变有很大的不同,分别分析如下。

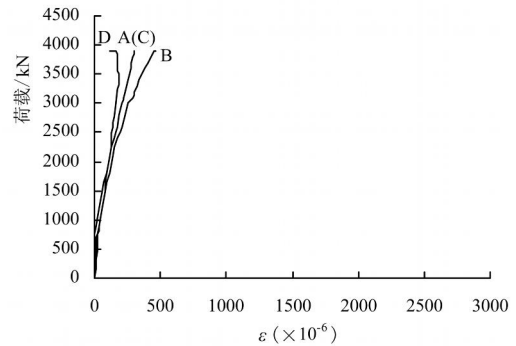
图 7 为柱肢节间段(A-3 试件中截面)的荷载-环向应变图。由于偏心荷载的作用,B 点的环向应变均大于 D 点。同一根柱肢中不同位置的环向应变在受力前期相差不大。近载侧的两根柱肢(如图 7a),到受力后期 B 点的环向应变非线性发展要明显大于 D 点。它的受力接近于单根圆钢管混凝土柱小偏压的受力状态^[9]。而远载侧的两根柱肢(如图 7b),受力后期的环向应变并没有急剧发展,仍处于弹性阶段。

图 8 为柱肢节点段(A-4 试件中截面)的荷载-环向应变图。比较图 7 和图 8 可知,远载侧柱肢节点段的环向应变在受力后期的非线性发展程度要略大于节间段,但由于远载侧柱肢受力总的来说不大,缀管对柱肢受力影响不大,所以二者的环向应变的变化规律大致相同。而对于近载侧的柱肢,由于受力较大,缀管的轴向力作用和缀管在轴压力下的横向变形引起柱肢钢管的环向变形增大,因此节点段的环向应变在受力的后期,要比节间段的大许多。从图 8b 可见,有缀管相交一侧(D 点和 C 点)的环向应变要明显大于光面的一侧(B 点和 A 点),且数值特别大(最大的接近 14000×10^{-6})。

因此,对于节点处的柱肢,纵向应变引起的环向应变只占环向总应变中的一小部分,因此,环向应变与纵向应变之比不能看成组合材料的泊松比。节点处除缀管交汇带来的受力复杂性外,还有应力集中和焊接缺



(a) 2(4)号管



(b) 1(3)号管

图 7 节间段(A-3 试件中截面)柱肢钢管荷载-环向应变图

Fig.7 Load-annulus strain of longitudinal tubes among nodes

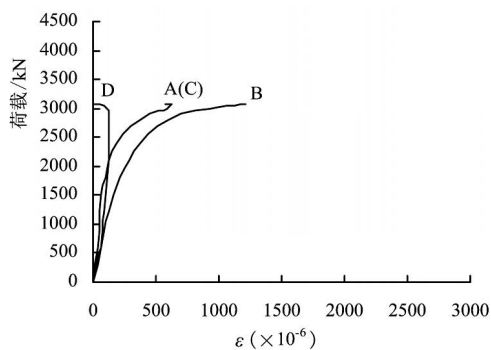
陷和焊接残余应力的作用,因此该处是整个构件的薄弱环节。正是节点附近的环向变形导致了柱肢钢管的撕裂引发了试件的破坏。

与空心管结构相比,钢管混凝土格构柱虽然管内填有混凝土,但构件的极限承载力仍在很大程度上受到节点受力的影响,有着与管结构相似的破坏机理^[10]。

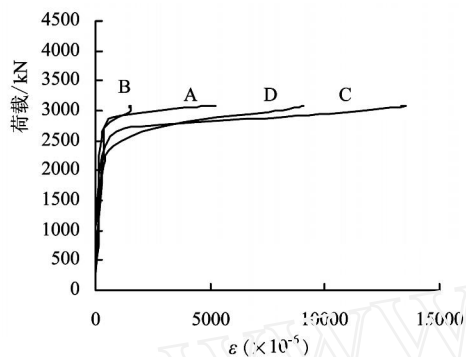
3.4 柱肢节间段的组合材料泊松比

对于节间段的柱肢,为分析钢管对管内混凝土是否有紧箍作用,取组合材料泊松比作为分析对象。组合材料的泊松比是指钢管环向应变与纵向应变之比。钢材泊松比为 0.25 ~ 0.3,取其平均值为 0.283。一般来说,当组合材料泊松比超过钢材的泊松比时,可以认为钢管对混凝土产生了套箍作用。

图 9 所示的是 A-3 试件各柱肢中截面的荷载-组合材料泊松比关系曲线。从图 9a 可见,远载侧两根柱肢组合材料的泊松比在加载全过程基本在 0.283 附近,



(a) 1号管



(b) 2号管

图8 节点段(A-4试件中截面)柱肢钢管荷载-环向应变图

Fig.8 Load-annulus strain of longitudinal tubes in nodes

钢管的紧箍力作用不大,因为其所受的轴压力不大;图9b中近载侧的两根柱肢在受荷前期的情况与远载侧基本相同,但当荷载达到极限荷载的72%时,偏压方向组合材料的泊松比开始超过0.283,且不断增大,说明受力后期紧箍作用开始发生作用,且随荷载的增大而增大,它的受力接近于单根圆钢管混凝土柱轴压或小偏压受力状态。

3.5 缀管纵向应变

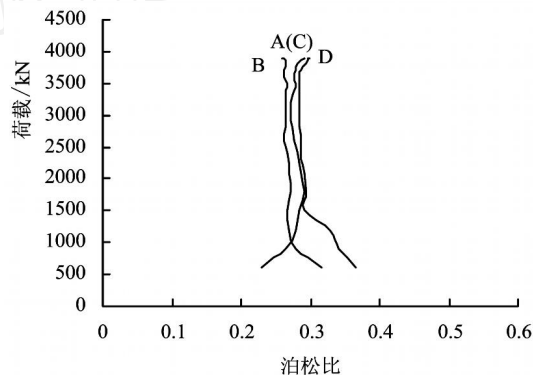
图10为A-2试件各缀管的荷载-(中截面)纵向应变图。图10中各缀管的符号,详见图1。从试验结果看,缀管的应变均很小,所有试件中缀管的最大纵向应变仅为 1918×10^{-6} ,小于钢管的屈服应变,因此缀管的受力都处在弹性阶段。强轴方向缀管的轴力主要来自两个方面:一是受压格构柱在偏心荷载作用下的整体构件的旁弯引起各杆轴线与荷载交角的变化,二是柱肢在纵向力作用下的横向变形受端板的约束。在斜缀管中前者的影响要大于后者的影响,构件在受力后期基本上呈现出随荷载增大轴压力不断增大的趋势。而由于应变较小,且受力复杂,强轴方向平缀管的应变规

律性较差。弱轴方向的平缀管,以纵向的受力来看,不应该产生应力,但由于柱肢钢管横向的变形(膨胀)受到端板的约束,使得其受到压力,所以图10c中弱轴方向平缀管的应变以压应变为主,且随着荷载的增加而增大。

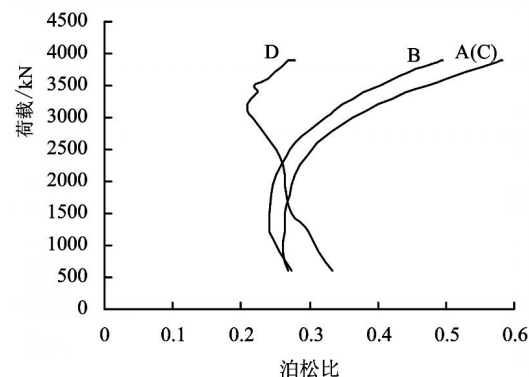
钢管混凝土格构柱与钢管格构柱相比,柱肢钢管内充填有混凝土,但从缀管的受力、柱肢钢管的环向变形(尤其是节点处的环向变形)和试件的破坏原因看,它仍在相当程度上体现了管结构的受力特性。

4 结语

(1)长细比对钢管混凝土偏压格构柱的力学性能影响较大。在其它参数相同的条件下,随着构件高度的增大,长细比的增加,钢管混凝土格构柱的稳定承载力逐渐降低,极限应变减小。



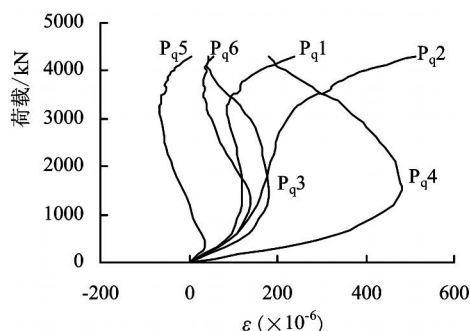
(a) 1(3)号管



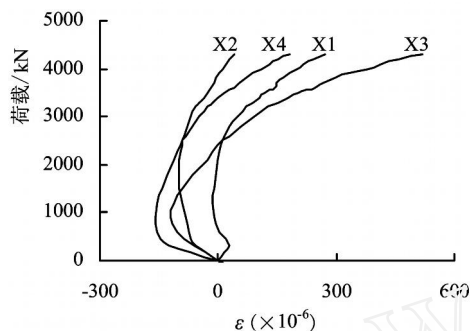
(b) 2(4)号管

图9 A-3试件各柱肢中截面的荷载-组合材料泊松比关系曲线

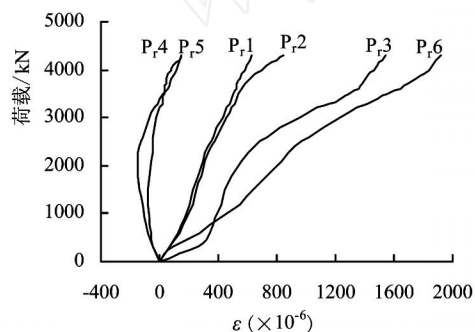
Fig.9 Relationship of load and Poisson's ratio of combination material



(a) 平缀管(强轴方向)



(b) 斜缀管(强轴方向)



(c) 平缀管(弱轴方向)

图 10 A-2 试件各缀管的荷载-中截面纵向应变图

Fig. 10 Load-longitudinal strain on middle section of lacing tubes

(2) 格构柱中的柱肢以受压为主,后期弯矩增大,但仍为小偏压构件。远载侧柱肢的钢管紧箍作用不大;近载侧两柱肢在受力后期紧箍效应开始发生作用

且不断增大,其受力接近于单根圆钢管混凝土柱轴压或小偏压的受力状态。

(3) 由于各缀管交汇带来的受力复杂性,使得节点段柱肢(近载侧)钢管环向应变的变化规律与节间段明显不同。有缀管一侧环向应变发展很快,明显大于光面的一侧,且数值特别大。近载侧柱肢节点附近的钢管环向变形是导致柱肢钢管撕裂从而引发试件破坏的主要原因。

(4) 缀管的受力较小且都处在弹性阶段。斜缀管与弱轴方向的平缀管以受压为主。强轴方向的平缀管应变规律性较差。尽管柱肢钢管内填充有混凝土,钢管混凝土格构柱在一定程度上表现出管结构的受力特点。

参 考 文 献

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构(第三版)[M]. 北京:清华大学出版社,2003:6-8.
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003:297-299.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一)[M]. 北京:人民交通出版社,2002:2-8.
- [4] 河野昭彦,松井千秋. 弦材にコンクリートを充填した平行弦钢管トラスの変形能力[J]. 日本建筑学会构造系论文集,1999,522:129-135.
- [5] 前田珠希,小川厚治,黑羽启明. 弦材が拘面外座屈する钢管トラス梁の変形能力に関する研究[J]. 日本建筑学会构造系论文集,1997,491:121-127.
- [6] Chiaki Matsui, Akihiko Kawano. Strength and behavior of concrete-filled tubular trusses [A]. Proceedings of the International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures[C]. 哈尔滨,1988:113-119.
- [7] 河野昭彦,松井千秋,崎野良比吕. 繰返し水平力を受けるコンクリート充填钢管トラス柱の弾塑性挙動と変形能力に関する実験的研究[J]. 日本建筑学会构造系论文集,1996,482:169-176.
- [8] CECS 28:90 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
- [9] 陈宝春,王来永,欧智菁,韩林海. 钢管混凝土偏心受压应力应变试验研究[J]. 工程力学,2003,20(6):154-159.
- [10] J A Packer J E Henderson,曹俊杰. 空心管结构连接设计指南[M]. 北京:科学出版社,1997.