

文章编号: 1001-8360(2007)06-0074-06

# 加载方式对钢管混凝土轴压长柱和中长柱 受力性能影响的试验研究

陈宝春, 黄福云

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘 要:** 进行 4 种加载方式对钢管混凝土轴压长柱和中长柱试件受力性能影响的试验研究, 并与轴压短柱试验进行对比和分析。结果表明, 加载方式对长柱中截面应力的影响较小, 但对刚度影响较大, 从而影响稳定极限承载力, 其中初应力对长柱的极限承载力降低的影响比短柱明显, 而与之相反, 对于荷载仅施加于钢管之上的长柱, 其极限承载力反而大于同样加载的短柱。随着长细比的增大, 加载方式对试件套箍作用的影响有减小的趋势, 且受力性能的差异也逐渐缩小。加载方式对钢管混凝土中长柱受力性能的影响介于短柱与长柱之间, 但与短柱更接近。最后, 讨论不同加载方式作用下长柱和中长柱的极限承载力计算方法。

**关键词:** 钢管混凝土; 加载方式; 初应力; 试验; 极限承载力; 刚度; 长细比

**中图分类号:** TU398 **文献标志码:** A

## Experimental Research on Influence of Loading Method on Behavior of CFST Long Columns and Mid-long Columns under Axial Loads

CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun

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

**Abstract:** Experimental research on influence of four types of loading methods on behaviors of CFST long columns and mid-long columns subjected to axial loads is carried out. The comparison between stubs and long columns is presented. Analyses results indicate that the loading methods influence the cross-section stresses of long columns slightly and the stiffness and stability limit load-carrying capacity significantly. The effects of initial stresses on load-carrying capacity of long columns are serious than for short columns. When loading is applied only on steel tubes, the load-carrying capacity of the long columns is larger than that of the short columns. With the increasing of the slenderness ratio, the influence of the loading method on the hooping effect and mechanical behavior of the members are decreased. The influence of the loading method on mid-long columns lies between long columns and stub columns, and it appears more close to latter ones. Finally, the estimating method of the load-carrying capacity of CFST long and mid-long columns under different modes of axial loading is discussed.

**Key words:** concrete filled steel tube (CFST); loading method; initial stress; experiment; load-carrying capacity; stiffness; slenderness ratio

钢管混凝土柱是由钢管与管内混凝土组成的组合构件, 存在着不同的加载方式。文献[1]进行了 4 种加载方式对钢管混凝土轴压短柱试件受力性能影响的

试验研究。钢管与混凝土一开始就共同受力的加载方式, 称为 A 式加载方式; 荷载仅施加于核心混凝土之上的加载方式称为 B 式加载方式; 荷载施加在钢管而不是全截面上的情况, 称为 C 式加载方式; 钢管中有初应力存在, 然后进行全截面加载的称为 D 式加载方

收稿日期: 2006-04-25; 修回日期: 2007-08-08  
基金项目: 福建省基础性研究计划重大项目(2003F007)  
作者简介: 陈宝春(1958—), 男, 福建罗源人, 教授, 博士。  
E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn

式。试验研究表明,各加载方式对钢管混凝土轴压短柱的受力性能影响较大。为进一步探讨加载方式对钢管混凝土轴压构件受力性能的影响,本文进行加载方式对钢管混凝土轴压长柱和长中柱试件受力性能影响的试验研究,并与文献[1]进行比较。

## 1 试验简介

此次试验设计制作 10 个钢管混凝土试件,构件截面尺寸和钢管与混凝土的材料性能与文献[1]的试件完全相同。按长细比 ( $\lambda = 4L/D$ ) 的不同分为两组,每组试件 5 个, $L$  为沿试件纵向长度,两组试件长分别为 1 944 mm 与 1 296 mm,对应长细比为 72 与 48。

10 个试件编号分别为 H-A、H-B、H-C、H-D1、H-D2 及 SH-A、SH-B、SH-C、SH-D1、SH-D2。试件编号中,“-”前面的字母“H”表示长细比为 72 的长柱试件,“SH”表示长细比为 48 的中长柱试件;“-”后面的字母表示加载方式。对于 D 式加载每组设计制作两根初应力度 ( $\sigma_0$ ) 不同的试件,即一组为  $\sigma_0 = 0.24$  的 H-D1、 $\sigma_0 = 0.48$  的 H-D2 试件;一组为  $\sigma_0 = 0.25$  的 SH-D1、 $\sigma_0 = 0.50$  的 SH-D2 试件,其他参数见参考文献[1]。另外,每组试件设计制作 1 个相同尺寸的空钢管试件 H-0 和 SH-0。

试验加载过程与文献[1]基本一致。对于 B 式加载的试件,为避免加载板压到钢管,制作时钢管突出混凝土长约 2 mm。试验时,在混凝土端面垫一直径稍小于核心混凝土直径的圆形厚钢板,长细比为 72 与 48 的试件分别高出钢管 30 mm 与 20 mm,以保证加载行程。对于 C 式加载,通过钢质压头传递荷载至钢管,长细比为 72 与 48 的试件的钢质压头高分别为 8 mm 与 6 mm,以保证加载行程。每个试件在上下端板中心处各设置两个电测位移计,在沿构件四分点处各设置 1 个位移计测试其横向变形,在中截面及四分点处布设了纵向及环向各 4 片电阻应变片。试验加载及加载方式详见文献[1]图 1~图 3。

## 2 长柱试验结果分析

图 1 与图 2 分别为长柱试件的荷载-纵向变形曲线与荷载-侧向挠度曲线。对于长细比较大的受压柱的试验研究,一般只进行荷载-(横向)挠度的研究,但由于加载方式对纵向变形与抗压刚度的影响较显著,因此,本文也注重对其荷载-纵向变形关系进行分析。A 式加载的长柱已进行大量试验,为节省篇幅,试件 H-A 的试验过程与结果不再详述<sup>[2]</sup>。

由图 1 中的 H-B 试件荷载-纵向变形曲线可知,

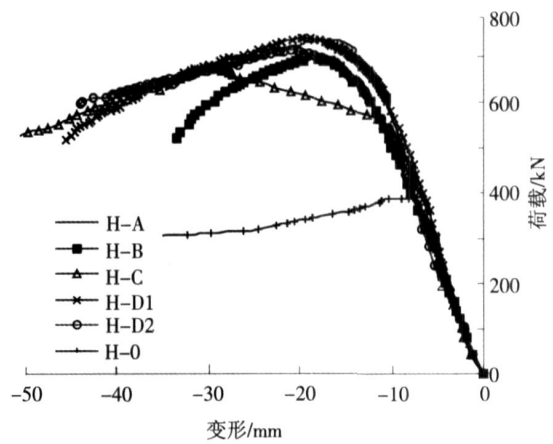


图 1 长柱荷载-纵向变形曲线

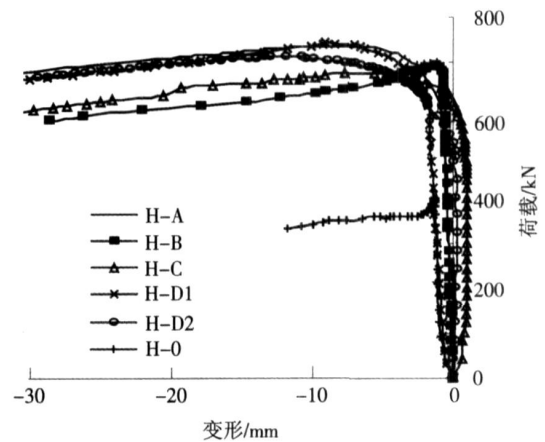


图 2 长柱荷载-侧向挠度曲线

弹性阶段其受力性能与 H-A 试件相似。与短柱中 S-B 的刚度较小相比,其刚度没有明显的减小,因为试件具有足够的长度,钢管与管内混凝土粘结力和摩擦力的作用使外钢管也承担了较多的荷载<sup>[3,4]</sup>,这也符合圣维南原理。随着荷载的增加,试件的斜率逐渐小于 H-A,其极限承载力也小于 A 式加载试件,这与文献[1]短柱试验中 B 式加载试件的切线刚度与极限承载力高于 A 式加载试件有所不同。分析认为,短柱试件破坏主要由强度控制,而长柱试件则主要由稳定控制,理想的轴心受压状态一般难以实现,长柱试件的侧向挠度从加荷一开始就逐渐发展(图 2 荷载-侧向挠度曲线),极限荷载受试件的  $P$ - $\delta$  效应影响较大,由文献[1]可知,B 式加载试件在弹塑性阶段之前的刚度小于 A 式加载试件,此刚度的下降对长柱稳定极限承载力的降低影响显著,尽管由于套箍作用的增强使 B 式加载短柱试件在进入塑性阶段后刚度大于 A 式加载试件<sup>[1]</sup>,但长柱的套箍作用减小明显,因而 H-B 试件极限承载力反而没有 H-A 试件的高。比较长柱与文献[1]中短柱的 B 式加载试件破坏模式可知,短柱的钢管承受的主要是环向套箍作用,试件成腰鼓状破坏,而

长柱试件的钢管则主要承受纵向轴力,试件外鼓不明显,其破坏模式与普通加载方式相似,为压弯破坏。

对 H-C 试件,虽然外荷载只施加在钢管上,但从图 1 可知,在弹性阶段其初始斜率就与 A 式加载试件基本相同,原因也是因为经过一段长度传递后,管内的混凝土也参与受力。当荷载增加到 548 kN 时,钢管外缘开始屈服,试件切线刚度明显减小,纵向及侧向变形显著增加,达到峰值后迅速下降,试件成压弯破坏。试件达到极限荷载所对应的压缩变形接近 3cm,远大于 H-A 与 H-B 试件极限荷载对应的变形量,其极限荷载相比较 H-A 试件也有较大程度的降低。

比较 H-C 试件与文献[1] S-C 试件的受力性能可知,两者表现出不同的力学性能。长柱与短柱试件进入弹塑性阶段对应的荷载分别为 548 kN 与 396 kN,反映钢管与混凝土共同作用随长度的增加而增强,同时, H-C 试件的弹性极限荷载也远大于 H-0 空钢管试件(图 1),且没有出现如 S-C 试件或空钢管试件荷载-变形塑线增长或塑流阶段,其力学性能更接近于钢管混凝土的性能。试件破坏时, H-C 试件为压弯破坏,各截面未出现局部屈曲,而空钢管 H-0 试件在其中部处出现向内凹陷现象。

由图 1 的 H-D1 与 H-D2 荷载-纵向变形曲线可知,初应力度为 0.24 的情况下,其对试件的极限承载力的下降不明显,但达到极限承载力对应的变形量增加;当初应力度达到 0.48 时,其对试件的极限承载力及达到极限承载力对应的变形量均有影响。

图 3 为长柱试件荷载-纵向平均应变(中截面处)关系曲线。由图 3 可知, A、B、C 及当初应力度较小(=0.24)的 D 加载方式下中截面处的荷载-纵向应变曲线基本重合,说明加载方式对长柱试件中截面处的应力影响较小,但初应力度达到 0.48 时的 D 式加载,其弹性段曲线与空钢管试件(H-0)的相近。

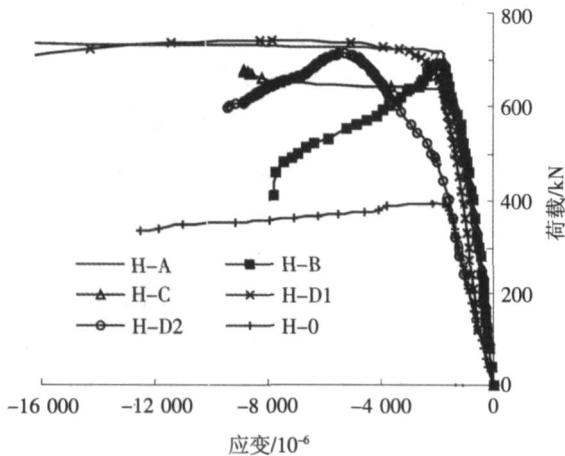


图 3 长柱试件荷载-纵向平均应变曲线(中截面)

图 4 为长柱试件荷载-(中截面处)名义组合泊松比关系曲线。由图 4 可知,除 B 式加载外,各试件名义泊松比  $\mu$  值差别不大,均保持在 0.3 左右,说明在长细比较大的情况下,试件的套箍作用表现的不明显,加载方式的改变对试件套箍作用的影响明显减小。

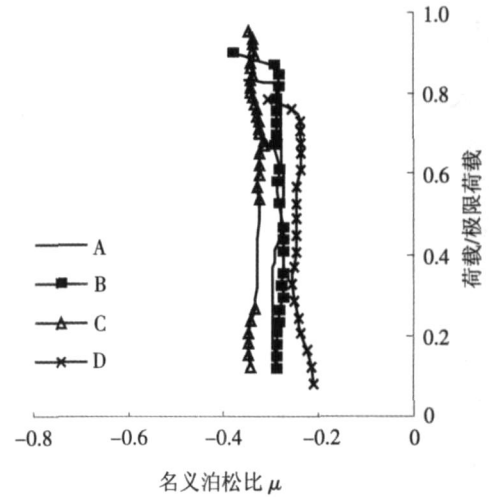


图 4 长柱荷载-泊松比曲线(中截面)

### 3 中长柱试验结果分析

图 5 与图 6 分别为轴压中长柱的荷载-纵向变形曲线与荷载-侧向挠度曲线。图 5、图 6 中 SH-A 试件为典型的钢管混凝土轴压试件荷载-纵向变形与荷载-侧向挠度关系曲线,其受力性能与其他常规研究基本相同<sup>[2]</sup>,为节省篇幅,本文不再详述。

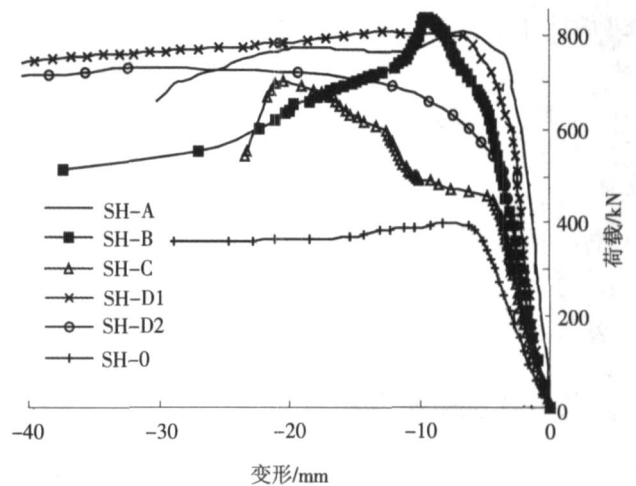


图 5 中长柱荷载-纵向变形曲线

由图 5 的 SH-B 试件荷载-纵向变形曲线可知,初始阶段其初始斜率要小于 SH-A 试件,随着荷载的增加,试件表面开始出现剪切滑移线,当荷载增加到 650 kN 左右时,构件进入弹塑性阶段,此时试件刚度开始减小,纵向变形增长加快,同时荷载-侧向挠度也有所

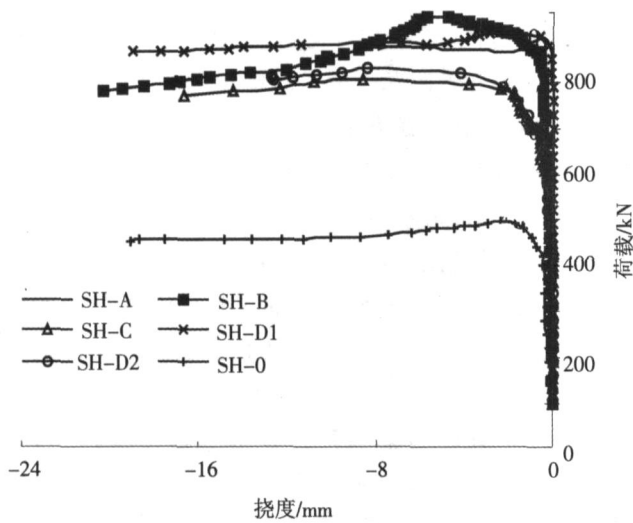


图 6 中长柱荷载-侧向挠度曲线

增加(图 6 的 SH-B 曲线),但增长不是很明显。当荷载达到 800 kN 左右时,试件挠度增长加快,荷载缓慢增加并超过 SH-A 的极限荷载,试件由轴压状态转为压弯状态,当荷载达到极限荷载后纵向变形及侧向挠度均迅速增加,试件承载力迅速降低,最后压弯破坏。

由图 5 的 SH-C 试件荷载-纵向变形曲线可知,初始阶段试件相对其他加载方式下的试件刚度最小,当荷载增加到 455 kN 时,外钢管迅速屈服(文献[1]为 448 kN),试件刚度急剧减小,纵向变形则急剧增大,试件出现屈服平台并进入强化阶段,但侧向挠度增长不大(图 6 的 SH-C 曲线)。当变形达到 12 mm 左右时,试件荷载以接近初始斜率增大,混凝土开始发挥作用,侧向挠度也开始增加。继续增加荷载至约 600 kN,试件纵向与侧向变形增长加快。继续加载,试件达到最大荷载后快速下降,其纵向及侧向挠度均较大,试验停止。试件达到最大荷载对应的纵向变形大致为 22 mm,此变形量均明显超过 SH-A 与 SH-B 试件最大荷载对应的变形量,其最大荷载相比较 SH-A、SH-B 试件极限荷载下降达 15%~20%。试件下降段中,荷载-纵向变形曲线下落急剧、荷载-侧向挠度曲线则较为平缓。

比较图 1 与图 5 的 C 式加载试件可知,两者表现出不同的力学性能,前者由弹性阶段进入塑性阶段后破坏,后者经历了强化阶段后破坏;虽然前者长细比大于后者,但其弹性极限荷载却要高于后者,且试件最大荷载也基本相同。长柱试件力学性能与钢管混凝土性能相似,中长柱力学性能则与文献[1]的 S-C 试件相似。

由图 5 的 SH-D1 荷载-纵向变形曲线可知,在初应力度为 0.25 的情况下,初应力的存在使试件切线刚

度下降,弹塑性阶段较长,达到极限荷载时的变形增大,但对试件的极限承载力影响不明显,荷载达到极限荷载时对应的纵向变形值大致为 14 mm,在 B 式与 C 式之间。当初应力度达到 0.50 时,对刚度下降的影响则较为显著,同时对试件极限承载力的下降影响也较大。因此,初应力的存在对钢管混凝土中长柱受力性能的影响不可忽略<sup>[3]</sup>。

图 7 为中长柱试件荷载-纵向平均应变(中截面处)关系曲线。由图 7 可知,SH-B 试件进入塑性阶段后其应变有所增加,达到极限荷载时应变增长加快。SH-C 试件在进入弹塑性阶段后应变迅速增加,钢管屈服,其曲线类似于空钢管(SH-0)曲线,但没有下降段。SH-D1 试件与 SH-D2 试件早于 SH-A 试件进入弹塑性阶段。

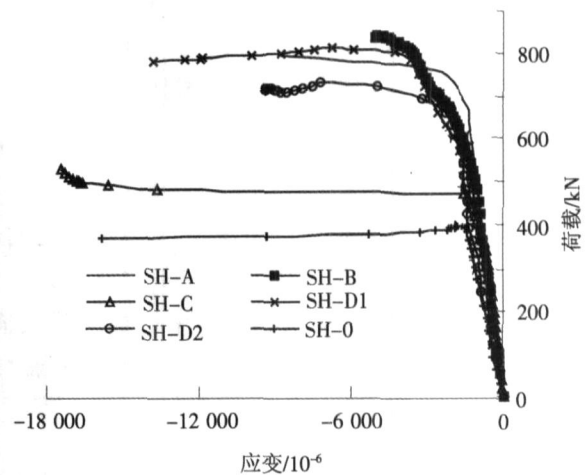


图 7 中长柱荷载-纵向平均应变曲线(中截面处)

图 8 为中长柱试件荷载-(中截面处)名义组合泊松比关系曲线。由图 8 可知,弹性阶段,各试件泊松比曲线及钢材的泊松比曲线基本重合,泊松比系数一般都小于 0.3,随着荷载的增加,除 SH-B 试件缓慢增加外,其他试件泊松比系数基本保持不变,但其上升斜率明显低于文献[1]的 S-B 短柱试件。当各试件进入弹塑性阶段后,除 C 式试件泊松比系数减小外,其他试件泊松比系数开始增大,A 式试件荷载达到极限荷载的 80%左右、B 式试件达到 75%左右、D 式试件达到 65%左右时,泊松比系数增加较大。

比较本文长柱和中长柱两组试件可知,除了以上所述各加载方式特点外,长细比为 48 的中长柱试件其受力性能介于长柱与短柱之间,更接近于短柱试件,加载方式对其影响较大,但破坏模式为弹塑性失稳破坏,而不是强度破坏;对于长细比为 72 的长柱,加载方式对试件受力性能影响显著减弱,各试件受力性能趋于一致。文献[3,4]对钢管混凝土柱的外钢管与管内混

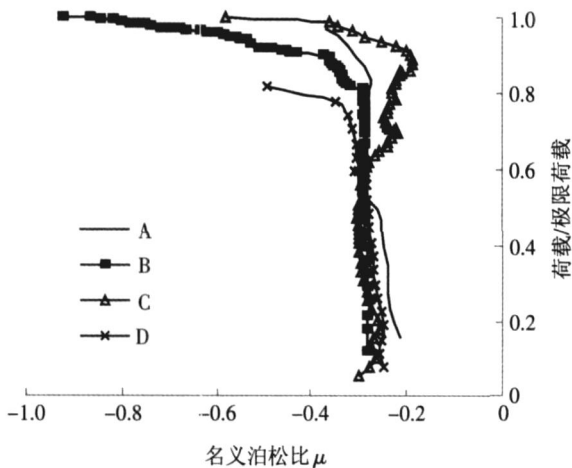


图 8 中长柱荷载-泊松比曲线(中截面)

混凝土间粘结应力进行研究,当荷载只加在管内混凝土时,可以知道荷载将沿一定长度传递给钢管,试件长细比越大,传递越均匀。因此,当试件长细比很大时,各种加载方式将趋于与普通加载方式相接近。

#### 4 极限承载力讨论

对于轴压柱,随着长细比的增大,构件的稳定问题越来越突出,本文对长柱和中长柱在 4 种加载方式作用下的稳定极限承载力均采用试验中的最大荷载值。图 9 为试件在不同加载方式作用下试件稳定极限承载力与长细比的关系曲线。

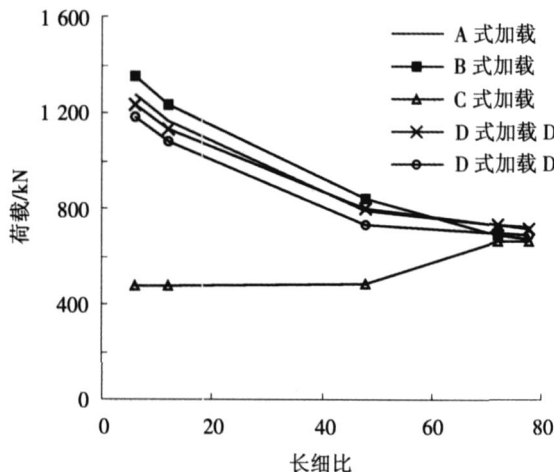


图 9 极限荷载-长细比曲线

由图 9 可知,A 式、B 式与 D 式加载方式下构件荷载随长细比的增大而减小。其中 A 式加载已进行大量研究,其轴压构件的稳定极限承载力计算通常是考虑长细比影响的折减系数乘以其轴压短柱的极限承载力  $N_u$ ,即

$$N_0 = \eta \cdot N_u \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为稳定折减系数,国内 3 种钢管混凝土规程<sup>[6-8]</sup>均有计算值,本文按文献[6]的方法取值; $N_u$ 可按文献[1]的方法计算。为了简单起见,本文 4 种加载方式的稳定极限承载力  $N_A$ 、 $N_B$ 、 $N_C$  和  $N_D$  统一以  $N_0$  表示,短柱的则统一以  $N_u$  表示。

由图 9 的曲线可知,B 式和 D 式加载的钢管混凝土轴压构件的极限承载力也可以应用式(1)来计算。对于 B 式加载,图 9 显示其长细比对稳定极限承载力的影响要比 A 式的大,其原因是 B 式加载的构件荷载只加在混凝土上,其截面抗弯刚度理论上只考虑混凝土的刚度,但同时考虑到钢管也部分地参与作用,因此,设其相对于 A 式加载的全截面刚度之比为  $K$ ,则极限荷载计算应由式(1)改为

$$\begin{cases} N_0 = K \cdot \eta \cdot N_u \\ K = \frac{E_c I_c + k E_s I_s}{E_c I_c + E_s I_s} \end{cases} \quad (2)$$

式中,稳定折减系数  $\eta$  与 A 式加载相同; $N_u$ 可按文献[1]的方法计算(文献[1]式(1)); $K$ 为刚度比(率); $k$ 为修正系数,本文取 0.8; $E_c$ 、 $E_s$  和  $I_c$ 、 $I_s$  分别为管内混凝土和钢管的弹性模量、惯性矩。

对于 D 式加载,文献[9]给出考虑初应力、试件长细比等参数对轴压构件(包括短柱和长柱)极限承载力的影响系数  $K_p$ ,所以对于 D 式加载的长柱或中长柱,采用文献[9]的  $K_p$  值计算  $N_u$  时实际上已考虑初应力对长细比折减系数的影响,因此式(1)中的稳定系数只需按 A 式加载的来考虑, $N_u$ 计算公式见文献[1]式(3)。

由图 9 可见,C 式加载构件极限承载力随长细比变化的规律与其他 3 种加载方式构件的不同。本文所进行的 C 式加载中长柱试件(SH-C)的受力性能与文献[1]的短柱 S-C 的极限承载力基本相同,只比空钢管试件(S-C)的略高。但 C 式加载的长柱试件(H-C)的极限承载力反而提高,从前面的分析可知,其受力性能更接近于钢管混凝土试件,从而使其极限承载力得到提高。

因此,对于 C 式加载轴压构件的稳定极限承载力的计算应根据长细比进行分段计算。对于中长柱也视其为空钢管,稳定系数按钢结构设计规范取值<sup>[10]</sup>, $N_u$ 可按文献[1]的方法计算(文献[1]式(2));对于长柱试件(H-C),其受力性能与 D 式加载(有初应力)的钢管混凝土试件(H-D1 与 H-D2)相似,稳定系数和极限荷载  $N_u$ 可按有初应力的 D 式加载构件来计算,计算时假定初应力度为 1(初应力达到钢管屈服应力)。

计算所得轴压长柱和 中长柱稳定极限承载力  $N_0$

见表 1,同时也给出试件的试验值和文献[1]短柱的极限荷载计算值  $N_u$  和试验值。由表 1 的试验值与计算值表明,各加载方式构件的试验值与计算值均吻合良

好且偏于安全。当然,本文所进行的试件数量有限,上述对不同加载条件下钢管混凝土轴压构件极限承载力的讨论仅是初步的,有待进一步的研究。

表 1 试件极限承载力试验值与计算值列表

kN

试件		A		B		C		D1		D2	
		试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值
短柱 <sup>[1]</sup>	12	1 165	1 085	1 235	1 167	476	439	1 130	1 079	1 080	1 072
中长柱	48	792	732	839	703	481	419	804	717	729	700
长柱	72	734	618	691	592	674	536	731	598	702	578

## 5 结论

(1) 试验研究表明,加载方式对钢管混凝土轴压构件受力性能的影响与长细比有很大的关系。随着长细比的增加,加载方式对受力性能的影响有减弱的趋势。

(2) 加载方式对长柱截面(特别是中截面)应力的影响较小;但对刚度影响仍较大,从而影响到稳定极限承载力。B 式、C 式加载相对于 A 式加载的极限承载力有一定程度的降低,同时,初应力(D 式)对长柱的极限承载力降低的影响比短柱明显。而与之相反,C 式加载长柱的极限承载力反而比 C 式加载短柱的大。

(3) 各加载方式下钢管混凝土中长柱力学性能的影响介于长柱与短柱之间,但更接近短柱。

(4) 对 B 式、D 式加载的轴压长柱和中长柱稳定极限承载力计算可以采用与 A 式加载相似的长细比折减方法,同时,偏于安全考虑,B 式加载的稳定极限承载力应乘以刚度比。对于 C 式加载构件的稳定极限承载力,中长柱时可视为空钢管,长柱时可视为有初应力的钢管混凝土构件进行计算。

(5) 限于试验条件和构件数量,本文对不同加载条件下钢管混凝土轴压构件极限承载力的讨论仅是初步的,尤其是 B 式加载构件的稳定系数和刚度比  $K$ 、C 式加载构件长柱与中长柱的长细比界限的确定等都有待进一步的研究。

### 参考文献:

[1] 陈宝春,黄福云.加载方式对钢管混凝土轴压短柱受力性能

影响的试验研究[R].福州:福州大学,2006.

[2] 蔡绍怀.现代钢管混凝土结构[M].北京:人民交通出版社,2003.

[3] 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,2006,(11):68-72.

HUANG Fu-yun, CHEN Bao-chun. Review of Initial Stress on Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006,(11):68-72.

[4] Johansson. Structural Behaviour of Circular Composite Columns Under Various Means of Load Application [R]. Göteborg:Division of Concrete Structures Chalmers University of Technology, 1999:53.

[5] Mathias Johansson, Kent Gylltoft. Structural Behaviour of Circular Composite Columns Under Various Means of Load Application [J]. Steel and Composite Structures, 2001,1(4):393-410.

[6] 中国工程建设标准化协会. CECS 28:90 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].北京:中国计划出版社,1990.

[7] 中国电力总局. DL/T 5058-1999 钢管混凝土组合结构设计规程[S].北京:中国电力出版社,1999.

[8] 国家建筑材料工业局. JCJ 01—89 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].上海:同济大学出版社,1989.

[9] 福建省建设厅. DBJ 13—51—2003 钢管混凝土结构技术规范[S].福州:福建省建设厅,2003.

[10] 中华人民共和国建设部. GB 50017—2003. 钢结构设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.

(责任编辑 安鸿逵)