

## 初应力对钢管混凝土轴压构件受力性能的影响

黄福云, 陈宝春

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 进行了初应力对钢管混凝土轴压构件受力性能影响的试验研究, 提出了有限元计算方法, 以初应力度与长细比为参数探讨了有初应力构件的力学性能. 分析结果表明, 初应力使构件弹塑性阶段提前、弹性极限荷载降低, 同时极限荷载推迟出现, 构件切线刚度降低. 钢管混凝土轴压构件极限承载力随着初应力度的增大而降低, 降低幅度随着长细比的增大而增大, 但这种降低作用并不显著.

**关键词:** 钢管混凝土; 初应力; 长细比; 极限承载力; 有限元

**中图分类号:** TU398

**文献标识码:** A

### Influence of initial stress to behavior of concrete filled steel columns under axial loads

HUANG Fu - yun, CHEN Bao - chun

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

**Abstract:** Experimental research on concrete filled steel tubular (CFST) columns with initial stresses subjected to axial loads is carried out. Finite element method for analysis of such columns is presented. The influences of initial stress degree and slenderness ratio to the behaviors are analyzed. Analysis results indicate that initial stress make the elastic - plastic phase appeared ahead and the tangent stiffness and elastic ultimate load decreased as well as the ultimate load appeared postponing of the members. The ultimate load - carrying capacity of CFST columns subjected to axial compression will decrease with the increase of the initial stress ratio, and this descending will be intensified with the increase of slenderness ratio. As general speaking, this descending effects by initial stresses are not seriously.

**Keywords:** concrete filled steel tube; initial stress; slenderness ratio; load - carrying capacity; finite element

钢管混凝土结构的施工, 一般是先架设钢管结构, 再灌注管内混凝土形成钢管混凝土结构. 在组合结构共同工作之前, 钢管中就存在着因承受钢管和混凝土重量而产生的应力, 即钢管初始应力, 简称初应力<sup>[1]</sup>.

在钢管混凝土建筑结构中, 其结构设计采用极限状态法, 对初应力问题的研究主要集中在它对极限承载力影响的方面, 其研究主要有: 黄世娟<sup>[2]</sup>对有初应力的圆钢管混凝土轴压构件进行了试验研究; 张晓庆<sup>[3]</sup>对有初应力的圆钢管混凝土偏压构件进行了试验研究; 查晓雄<sup>[4]</sup>用有限元法分析了初应力对圆钢管混凝土压弯扭构件性能的影响; 黄霭明<sup>[5]</sup>在极限平衡法的基础上分析了初应力对圆钢管混凝土轴压短柱极限承载力的影响; 尧国皇<sup>[6]</sup>采用纤维模型法对有初应力的圆钢管混凝土轴压构件和偏压构件进行了理论分析. 在设计中, 则是对初应力值给以一定的限定, 并考虑初应力对极限承载力的影响<sup>[7]</sup>.

对于钢管混凝土拱桥, 初应力值一般来说要比建筑结构中的钢管混凝土结构来得大<sup>[1]</sup>. 钢管混凝土拱桥目前尚无专用的设计规范, 实际工程设计中, 存在着两种设计计算与验算方法. 一种是从架设钢管拱肋开始, 采用应力叠加法分别计算钢管和管内混凝土的应力, 并采用容许应力法进行验算. 另一种方法, 则是在施工阶段进行应力验算, 而对成桥后的受力视钢管混凝土为整体采用内力叠加法计算内力, 然后进行整体和局部构件的承载力验算.

收稿日期: 2007 - 06 - 11

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

基金项目: 福建省重大科技资助项目 (2003F007)

对组合结构, 当其处于弹性范围内时, 应力叠加法反映截面上不同材料的应力实际情况. 若考虑极限承载能力, 应力叠加法及其所对应的容许应力法, 除了以某一点的屈服作为全截面屈服和全结构破坏的不合理性外, 对于组合结构它还忽略了各材料先后进入屈服引起的截面应力重分布, 使组合材料之间不能协调发挥作用. 因此, 从这点来说, 容许应力法是不合理的. 然而, 有初应力的实际结构其受力过程如何 (钢管与混凝土的应力)? 容许应力法和极限状态法之间的关系如何? 如果采用极限状态法, 对初应力是否应进行限制? 如果要限制, 应如何限制? 还有, 如果采用极限状态法, 如何考虑初应力对极限承载力的影响. 针对这些问题, 笔者应用试验与有限元分析方法开展研究. 设初应力度  $\sigma_0 = \sigma_0 / f_s$ , 其中,  $\sigma_0$  为初应力的大小,  $f_s$  为钢材的屈服强度.

### 1 试验简介

设计制作了 9 个钢管混凝土试件, 钢管外径  $D$  均为 108 mm、壁厚  $t$  均为 4 mm, 按长细比 ( $\lambda = 4L/D$ ) 的不同分为 3 组, 组号分别为 H、SH 及 S,  $L$  为沿试件纵向长度, 3 组试件长分别为 1944、1296 与 324 mm, 对应长细比为 72、48 与 12, 每组试件按初应力度  $\sigma_0$  不同各有 3 个. 钢材采用 Q345 钢, 3 个标准试件测得钢材平均屈服强度  $f_s$  为 336.0 MPa, 对应屈服应变为  $1.980 \times 10^{-6}$ ; 比例极限为 270 MPa, 对应应变为  $1.350 \times 10^{-6}$ ; 抗拉强度  $f_u$  为 539.6 MPa, 弹性模量  $E_s$  为  $2.00 \times 10^5$  MPa, 泊松比  $\mu_s$  为 0.286. 管内浇灌 C50 混凝土, 混凝土 28 d 立方体抗压强度为 54.9 MPa, 弹性模量为  $3.45 \times 10^4$  MPa, 泊松比为 0.168. 同时也设计制作了 3 个空钢管试件.

试件的具体参数和试验结果列于表 1. 试件编号中“-”前面的字母“S”、“SH”及“H”分别代表长细比为短柱、中长柱及长柱的 3 组试件的组号;“-”后面的字母“P”与数字分别表示钢管混凝土试件与同组中不同初应力度试件的编号, 字母“O”表示空钢管试件.  $\lambda_1$  表示初应力加载阶段 (未灌注混凝土前) 构件的长细比,  $\lambda_2$  表示灌注混凝土后构件的长细比,  $N_0$ 、 $N_c$  分别为试件的极限承载力试验值与有限元计算值 (详见第 4 节分析), 其中 S 组试件的极限承载力为应变达到强化阶段起始点所对应的荷载, SH 与 H 组试件则为试件的最大荷载.

表 1 试件资料一览表

Tab 1 Information of specimens

组号	试件编号	$D/mm$	初应力度	$L/mm$	空钢管长细比		承载力试验值 $N_0/kN$	承载力计算值 $N_c/kN$
					$\lambda_1$	$\lambda_2$		
S	S - P0	108	0.0	324	9	12	932	901
	S - P1	108	0.25	324	9	12	912	890
	S - P2	108	0.54	324	9	12	895	873
	S - O	108	-	324	9	9	418	412
SH	SH - P0	108	0.0	1296	36	48	792	798
	SH - P1	108	0.25	1296	36	48	804	794
	SH - P2	108	0.50	1296	36	48	729	785
	SH - O	108	-	1296	36	36	398	390
H	H - P0	108	0.0	1944	54	72	734	711
	H - P1	108	0.24	1944	54	72	731	683
	H - P2	108	0.48	1944	54	72	702	671
	H - O	108	-	1944	54	54	372	357

试件的初应力是通过拧紧穿过端承板的 4 根钢拉杆来施加的, 拉力由设在拉杆中部的拉压传感器来控制, 端承板焊在钢管的两端<sup>[8]</sup>. 由于应力可能出现松弛现象, 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. 初应力施加 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, 并于 28 d 后进行加载试验.

试验在 200 t 的油压试验机上进行, 试件两端采用平板铰加载. 对于短柱试件, 每个试件在上下端板

中心线处各设置了 2 个电测位移计,在中截面处布设了纵向及环向各 4 片电阻应变片,长柱试件除在中截面及 4 分点截面处布设纵向及环向各 4 片电阻应变片外并设置电测位移计各一个,以测试其侧向挠度. 试验采用分级加载,每级荷载持荷时间约为 3 min 对于有初应力的试件,初应力施加阶段每级荷载为初始荷载  $F_0$  ( ) 的 1/5,整个试件加载阶段与无初应力试件加载相同. 所有试件当接近破坏时均采用慢速连续加载直至试件破坏. 试验数据采用自动采集系统进行采集. 试验加载装置如图 1 所示.

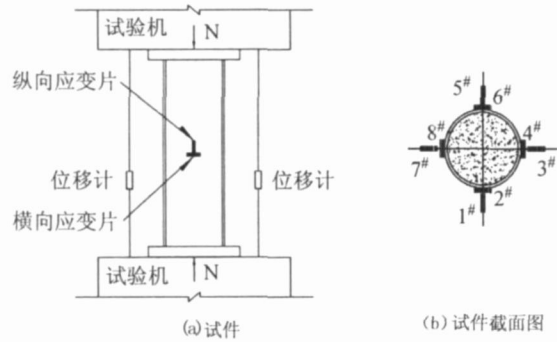


图 1 试验加载装置图  
Fig 1 Testing set - ups

### 2 有限元方法

有限元分析采用大型通用软件 ANSYS 进行. 有限元模型采用 Beam188 梁单元建模,该单元既适合于长柱也适合于中短柱,与其它梁单元相比,在中短柱分析时由于可以考虑剪切变形,效果更好. 钢管混凝土组合材料采用双单元法建模型,不同材料分别赋予不同的材料属性. 截面单元划分方法常见的有矩形单元划分和扇形单元划分,本研究采用 ANSYS 自带的自由网格划分法,截面的划分采用平面单元 plane82 单元模拟.

假定钢管与混凝土之间无相对滑移,钢材的应力 - 应变关系采用弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段及二次塑流段五线段模型,核心混凝土采用考虑了钢管套箍作用的以一维方式表达的应力 - 应变关系. 材料本构关系模型的输入采用 ANSYS 提供的基于 Von Mises 屈服准则的多线性等向强化模型 (MISO). 钢管和混凝土的弹性模量、轴向抗压强度、轴向抗拉强度等参数按实测值输入.

计算考虑几何及材料非线性影响,同时也考虑了  $L/1000$  ( $L$  为构件长度) 的初始缺陷,有限元非线性求解方法采用全 Newton - Raphson 法.

钢管初应力通过单元生死技术来实现<sup>[9]</sup>. 具体地说,就是先建立整个构件模型的包含钢管与混凝土的有限元模型,钢管施加初应力 (构件施工初始荷载) 阶段,先将混凝土单元“杀死”,此时,仅钢管单元受力,混凝土单元不参与受力. 在荷载加至初始荷载值并对构件求解完后,将混凝土单元激活,使其在初始荷载之后的加载阶段,都参与受力. 该方法不考虑初应力对套箍作用的影响.

### 3 试验结果分析

图 2 为各组试件的荷载 - (纵向) 变形曲线,其中,实线表示试验曲线,虚线表示有限元计算曲线. 比较可知,图 2 中的试验曲线与有限元计算曲线总体上吻合较好,可作为初应力分析的一个手段. 从更细的分析发现,空钢管试件的试验曲线与计算曲线均吻合很好. 对于钢管混凝土试件,短柱 S 组和长柱 H 组试验曲线与有限元计算曲线吻合度要好于中长柱 SH 组的,无初应力试件的吻合度要好于初应力度大的试件. 分析原因认为,对于中长柱,它属于弹塑性失稳,初应力将使试件的弹塑性刚度下降,因此初应力对中长柱受力性能的影响要明显大于属强度破坏的短柱和属弹性失稳破坏的长柱. 另一方面,钢管中初应力的存在将影响钢管对混凝土的套箍作用,而现在还没有考虑这一因素的核心混凝土的本构关系,初应力越大这个影响也越大. 因此,为了更精确地模拟有初应力构件的受力性能,今后在有限元分析中可将初应力对核心混凝土套箍作用的影响加进去.

由图 2 可知,加载初期所有试件 (不同长细比与不同初应力) 均处于弹性阶段,但进入弹塑性阶段后,不同长细比的构件表现出不同的受力行为,初应力的影响也不相同. 对于长细比为 12 的 S 组短柱试件 (图 2(a)), 弹塑性阶段之后是强化阶段,以钢管最大应变达到强化阶段起始点为极限荷载值,初应力对

极限荷载值有影响但不大 (详见第 4.1 节分析), 但初应力会使试件的弹塑性阶段明显提前. 从试验曲线可知, 对于无初应力的 S - P0 试件, 进入弹塑性阶段对应荷载约为极限荷载的 0.75 倍, 而对于初应力为 0.54 的 S - P2 试件, 这个值大致为 0.5 倍.

对于长细比为 48 的 SH 组中长柱试件, 从试验曲线可知, 无初应力时的 SH - P0 试件, 试件在弹塑性阶段达到峰值荷载后进入下降段, 而对于有初应力的试件达到峰值荷载后将进入塑性段, 且初应力越大弹塑性段曲线斜率变化越大、塑性段曲线越平缓.

对于长细比为 72 的 H 组长柱试件, 弹性段较长, 进入弹塑性段后很快就达到峰值荷载, 然后急速下降 (图 2(c)). 对于无初应力的 H - P0 试件, 试件具有明显的弹性失稳的特征, 随着初应力的增大, 弹塑性段有所增长且峰值荷载有所下降, 但试件仍可视作弹性失稳.

对于空钢管试件来说, 由于存在局部屈曲现象, 中长柱和长柱试件进入弹塑性阶段后很快就出现峰值并下降, 所测变形与应变较小; 短柱试件由于钢材的强化作用, 所测变形与应变则较大. 钢管混凝土柱由于管内填有混凝土, 因此无论是否有初应力, 钢管混凝土中长柱和长柱试件破坏时均无钢管局部屈曲现象, 其破坏形态均为弯压失稳破坏. 从图 2 可知, 空钢管试件的刚度与承载力均比同组的钢管混凝土柱小很多.

钢管混凝土轴压长柱与中长柱一般以最大荷载作为其极限承载力<sup>[10]</sup>. 由于长柱属于失稳破坏, 故其极限承载力是稳定极限承载力. 对于本文试件中的中长柱和长柱, 均以最大荷载作为其极限承载力 (稳定极限承载力).

对于轴压短柱, 它属于强度破坏, 构件塑性与延性均较好, 无初应力的构件常以钢管应变到达强化阶段起始点 (文献 [11] 通过大量的试验研究和数值回归给出该点的应变大致为  $3\,000 \times 10^{-6}$ ) 时所对应的荷载为极限荷载<sup>[11]</sup>. 对于有初应力的构件, 本文仍采用这一定义, 但认为钢管应变应叠加上钢管的初始应变.

所有试件的极限荷载试验值与有限元计算值见表 1 的最后两列. 从表 1 可见, 对于短柱, 初应力使试件的极限承载力比无初应力试件的降低约 2% ~ 4%, 影响较小; 对于长柱与中长柱, 则降低量约为 1% ~ 9%.

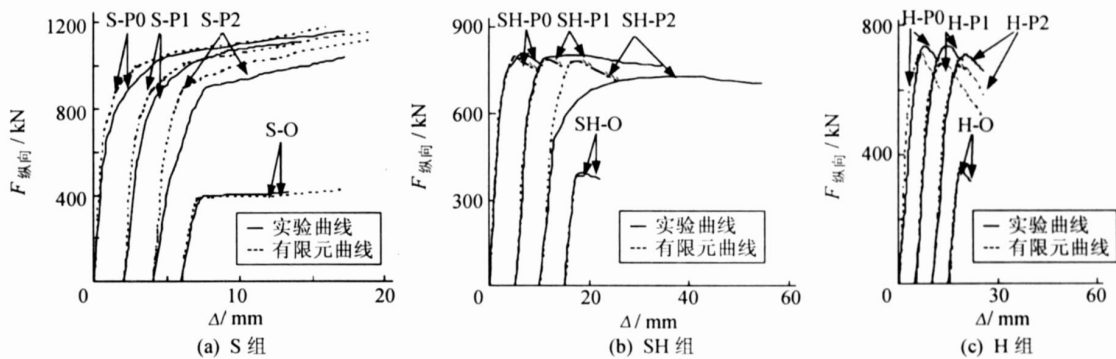


图 2 荷载 - 纵向变形曲线  
Fig 2 Load - deformation curves

### 4 参数分析

由以上试验结果与有限元计算结果分析可知, 本文提出的有限元计算方法能够较好的模拟有无初应力钢管混凝土轴压构件的受力性能, 可以基于该模型进行参数分析. 本节分析的参数主要包括初应力度与长细比.

#### 4.1 初应力度

调查分析表明<sup>[1, 12]</sup>, 钢管混凝土单圆管拱桥的初应力度的范围一般不超过 0.3, 长细比的范围一般在 80 ~ 120. 另外, 在钢管与混凝土未共同工作之前, 空钢管拱肋应符合有关钢结构设计规范<sup>[13]</sup>, 最大初应力度不得大于空钢管稳定系数, 即在灌注混凝土之前保证钢管不出现失稳破坏. 图 3 给出了钢号为 Q345 与 Q235 的空钢管轴心受压稳定系数与长细比的关系曲线. 由图 3 可以看出, 长细比小于 20 的构件, 其初应力度可以超过 0.9, 而长细比为 120 的构件的初应力度最大不能超过 0.45, 本文分析的初应力度的变化范围为 0.0 ~ 0.96, 长细比的变化范围为 10 ~ 120.

图 4 为不同长细比试件在长细比保持不变时初应力度对试件力学性能影响的荷载 - 位移关系全曲线, 限于篇幅, 只给出长细比为 12 的短柱 (图 4 (a)) 与长细比为 72 的长柱试件 (图 4 (b)). 由图 4 可知, 对于有初应力的构件, 在初应力加荷阶段, 由于荷载只加在空钢管上, 刚度小于无初应力的构件, 当构件的初应力大于钢材的比例极限时 ( $\beta = 0.84$  与  $\beta = 0.96$ ), 曲线进入弹塑性阶段, 变形明显增加; 随后钢管与混凝土共同工作, 在此阶段, 构件刚度增大, 构件组合模量与无初应力构件组合弹性模量基本一致; 继续增加荷载, 构件由弹性阶段进入弹塑性阶段, 初应力越大, 构件进入弹塑性阶段越早.

此外, 由图 4 可知, 初应力度为 0.84 和 0.96 构件, 作为钢管混凝土构件则从开始加载就已进入材料非线性阶段, 其中初应力度为 0.96 的构件甚至出现了一个台阶, 非线性更为明显. 一般钢材的比例极限为屈服应力的 0.8 倍, 所以当初应力度大于 0.8 时, 钢管进入了材料非线性阶段, 灌注混凝土成钢管混凝土构件后, 由于钢管处于非线性, 因此整个构件的行为也处于非线性, 虽然此时管内混凝土的应力还很小. 对于一般结构, 要求在使用阶段处于材料线性阶段, 因此, 实际工程中最大初应力度不应大于 0.8. 另一方面, 为保证施工的安全, 在空钢管受力阶段 (也即钢管的初应力受力阶段), 要求按钢结构受力要求验算施工过程的结构, 也不允许钢管拱的应力 (即初应力) 超过屈服应力的 0.8 倍.

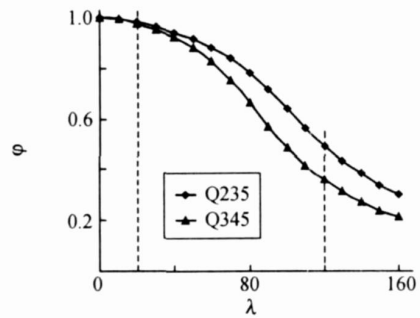


图 3 柱的稳定系数  $\phi$  与长细比  $\lambda$  的关系曲线  
Fig 3 Curves of stability factor - slenderness ratio of columns

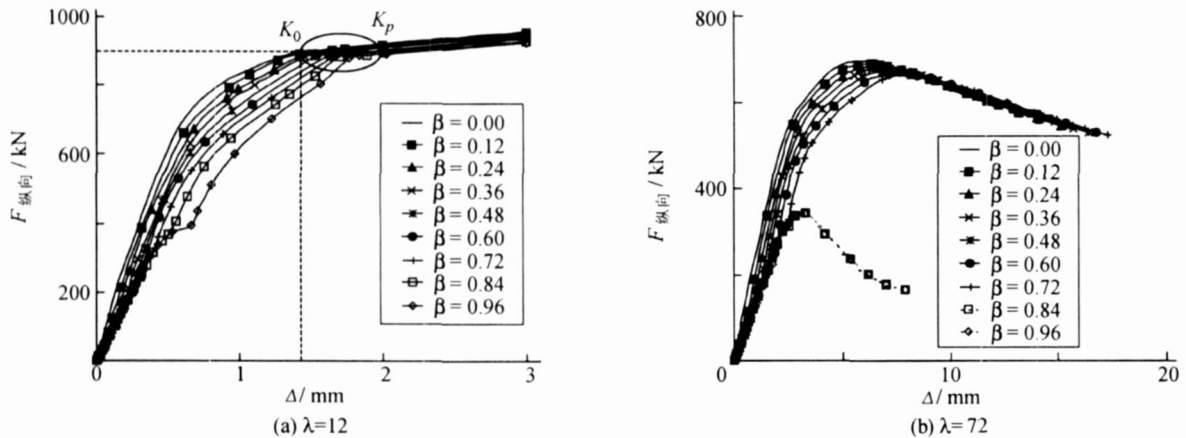


图 4 初应力度对构件荷载 - 位移影响关系曲线  
Fig 4 Curves of load - deflections of columns by initial stress degree

对于图 4 (a) 中长细比为 12 的无初应力试件, 两条虚线的交点大致为构件强化阶段起始点  $K_0$  ( $K_0$  点对应的应变要稍大于  $3.000 \times 10^{-6}$ )。随着初应力度的增大, 构件达到  $K_0$  点所对应的荷载逐渐减小 (竖向虚线所示, 在初应力度为 0.84 时下降幅度接近 20%)。同时, 有初应力试件的强化阶段起始点  $K_p$  推迟出现, 但  $K_p$  点对应的荷载基本不变 (横向虚线所示), 初应力对其影响很小, 小于 1%, 这说明初应力不影响轴压短试件的极限承载力, 而只是推迟出现.

对于图 4 (b) 中长细比为 72 的试件, 初应力除使构件弹塑性阶段的刚度下降外, 也使构件的极限荷载下降, 极限荷载对应的变形值增加, 同时定义构件极限荷载为其稳定极限承载力有限元计算值. 此外, 由图 4 (b) 还可知, 当构件初应力度为 0.84 及 0.96 时 (大于稳定系数), 构件空钢管已经失稳破坏, 得不到其荷载 - 位移曲线, 图中虚线实际上表示的是对应空钢管的荷载 - 位移曲线.

#### 4.2 长细比

图 5 为不同初应力度试件在保持初应力度不变时长细比对试件影响的荷载 - 位移关系曲线, 限于篇幅, 只给出初应力度为 0.0 (图 5 (a)) 与 0.72 (图 5 (b)) 的曲线. 由图 5 可知, 不论构件有无初应力, 随着

长细比的增加, 构件抗压刚度及极限承载力均不断减小, 说明初应力的存在不会改变构件的破坏形态. 图中点划线表示各长细比试件的极限承载力及其对应的变形的连线, 比较可知, 随着长细比的增大, 有初应力构件曲线的下降趋势要稍缓于无初应力的构件, 分析其原因认为初应力的存在使构件的承载力有所下降, 同时也使构件的变形增加, 且其引起的变形增加幅度大于承载力下降幅度. 图 5 (b) 中长细比为 120 的构件稳定系数小于 0.72, 图中虚线实际上为构件空钢管的荷载 - 位移曲线.

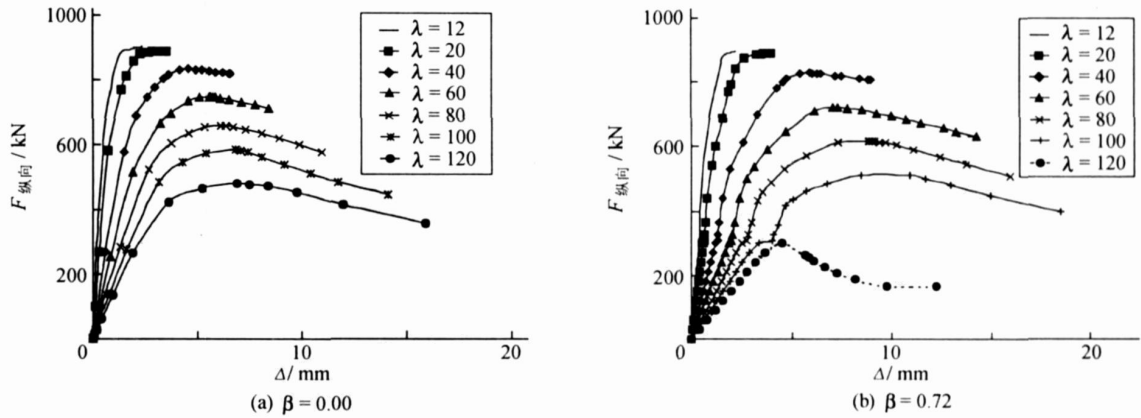


图 5 长细比对构件荷载 - 位移影响关系曲线

Fig 5 Curves of load - deflections of columns by slenderness ratio

### 5 结语

比较试验结果与有限元计算结果表明, 所提出的有限元计算方法可以用来分析有初应力的钢管混凝土构件的力学性能. 分析表明, 初应力的存在对钢管混凝土构件的受力性能有一定的影响, 初应力度不得大于空钢管稳定系数, 且最大初应力度不应大于 0.8.

当试件长细比处于短柱范围时, 初应力的存在主要是对构件弹塑性阶段刚度以及弹性极限荷载的影响, 同时使强化阶段的起始点推迟出现, 但对本研究以强化阶段起始点定义的极限承载力的影响很小. 随着长细比的增大, 初应力使构件稳定极限承载力的下降幅度增大, 最大下降幅度超过 10%. 不论构件有无初应力, 随着长细比的增加, 构件抗压刚度和稳定极限承载力均不断减小、稳定极限承载力所对应的变形增加, 同时, 初应力使构件变形的增加幅度大于承载力的下降幅度. 此外, 初应力的存在不会改变构件的破坏形态.

### 参考文献:

- [1] 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
- [2] 黄世娟. 初应力对圆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.
- [3] 张晓庆. 初应力对圆钢管混凝土偏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.
- [4] 查晓雄. 用有限元法分析初应力对圆钢管混凝土轴压构件基本性能的影响 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997(1): 41 - 49.
- [5] 黄霭明, 李少云. 管壁初始应力对钢管混凝土柱承载能力的影响 [J]. 工程力学, 1998(增刊): 155 - 163.
- [6] 尧国皇, 韩林海. 钢管初应力对圆钢管混凝土力学性能影响的初步研究 [J]. 工程力学, 2002(增刊): 509 - 512.
- [7] DBJ13 - 51 - 2003, 钢管混凝土结构技术规程 [S].
- [8] 黄福云, 陈宝春. 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 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 240 - 244.
- [9] 黄福云, 陈宝春. 钢管混凝土哑铃形轴压短柱初应力有限元研究 [J]. 公路交通科技, 2007(2): 109 - 111.
- [10] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [11] 钟善桐. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [12] 陈宝春, 杨亚林. 钢管混凝土拱桥调查与分析 [J]. 世界桥梁, 2006(2): 73 - 77.
- [13] GB 50017 - 2003, 钢结构设计规范 [S].

(责任编辑: 沈芸)