

文章编号: 1000 - 9779 (2008) 02 - 0001 - 08

# 有初应力的钢管混凝土偏压构件极限承载力计算

陈宝春, 黄福云

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘 要:** 应用有限元方法对有初应力的钢管混凝土偏压试件进行了非线性分析, 算例计算结果与试验结果吻合良好. 应用该方法, 以长细比、偏心率和初应力度为主要参数对有初应力的钢管混凝土偏压构件进行了受力性能分析. 分析结果表明, 初应力度对于偏压短柱受力的影响与初应力对轴压柱的影响基本相同; 对于偏压长柱, 稳定极限承载力随着初应力增大呈非线性下降趋势, 最大下降幅度可达 20%, 同时稳定极限荷载所对应的挠度也相应增大. 增加钢号等参数, 对大量进行了有限元计算, 给出了极限承载力的初应力度影响系数 (有初应力构件的极限承载力与无初应力构件的极限承载力之比) 的简化计算公式. 最后, 以表格的形式给出仅含两个主要参数 (长细比和初应力度) 的初应力度影响系数, 以供工程中更加简便、偏安全的应用.

**关键词:** 钢管混凝土; 初应力; 长细比; 偏心率; 极限承载力; 有限元方法

**中图分类号:** TU398      **文献标识码:** A

## Calculation of ultimate load-carrying capacity of eccentrically loaded concrete filled steel tubular (CFST) columns with initial stresses

CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun

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

**Abstract:** A nonlinear finite element method is presented for analyzing concrete filled steel tube (CFST) columns with initial stress subjected to eccentric load. Case study shows that the calculation results agree well with the test results. This finite element method is employed to analyze the behavior of eccentrically loaded CFST columns, taking initial stress degree, slenderness ratio, and eccentric ratio as the parameters. It is indicated that the influence of initial stress to the behavior of eccentrically loaded stub columns is almost the same with that to axial loaded columns. However, for the eccentrically loaded long columns, initial stress will make its ultimate load-carrying capacity decrease in a nonlinear tendency downwards, and the maximum descend is about 20%. Formula for predicting the initial stress reduction factor (the ratio of ultimate loads of CFST eccentrically loaded column with initial stress to that without initial stress) through an amount calculation results and adding steel strength as the fourth parameter are presented. Finally, a table of initial stress reduction factors with only two main parameters (initial stress degree and slenderness ratio) is given out to put in practice.

**Key words:** concrete filled steel tube; initial stress; slenderness ratio; eccentric ratio; load-carrying capacity; finite element method

收稿日期: 2008 - 01 - 05

基金项目: 福建省重大科技项目 (2003F007)

作者简介: 陈宝春 (1958 - ), 男, 福建大学教授, 博士生导师.

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,在组合结构共同作用之前,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>.初应力的大小一般用初应力度来表示.初应力度( $\sigma_0$ )是指钢管拱肋的初始应力与其屈服强度之比,即  $\sigma_0 = \sigma_0 / f_s$ ,其中: $\sigma_0$ 为初应力的大小, $f_s$ 为钢材的屈服强度.因此, $\sigma_0$ 只与初应力大小和钢材的材质相关.对于有初应力的钢管混凝土轴压构件的受力性能已有较多的研究<sup>[2-3]</sup>.

然而,实际工程中多是偏心受力的构件,张晓庆等人<sup>[4]</sup>进行了初应力对圆钢管混凝土偏压构件极限承载力影响的试验研究,对有初应力的偏压构件受力性能进行了初步分析;查晓雄等人<sup>[5-6]</sup>用有限元法分析了初应力对钢管混凝土压弯扭构件承载力的影响,给出了考虑初应力影响的钢管混凝土构件承载力的验算公式,并对验算公式进行转换后给出了其极限承载力的计算方法,同时给出了高层建筑中偏压柱的初应力的限制值,不过该计算方法较为复杂,影响其在实际工程中的应用;韩林海等人<sup>[7]</sup>进行了初应力对矩形截面钢管混凝土压弯构件承载力影响的试验研究和有限元分析,并在无初应力的钢管混凝土构件承载力验算公式的基础上乘以初应力影响系数作为有初应力的构件承载力,与文献<sup>[2~6]</sup>不同的是,其 $\sigma_0$ 的定义与初应力大小和钢材的屈服强度以及构件空钢管阶段轴心受压时的稳定系数有关,而偏压构件的稳定系数与轴压构件的并不相同,且对承载力验算公式进行转换后的计算公式同样复杂,因此,还有待进一步的研究.

在文献<sup>[4~7]</sup>中,主要针对的是初应力对钢管混凝土柱极限承载力的研究,对于构件钢管与混凝土应力、应变和变形的研究还不深入.本研究以文献<sup>[4]</sup>中偏心受压构件试验研究结果对有限元计算方法加以验证,并通过参数分析对有初应力的钢管混凝土偏心受压构件的受力性能和极限承载力的计算方法进行分析和讨论,给出了其极限承载力的简化计算方法.

## 1 有限元方法

### 1.1 有限元模型

采用大型通用程序 ANSYS<sup>[8]</sup>进行有限元分析.在本研究中,采用 ANSYS自带的自由网格法划分截面单元,截面单元为 2 维 8 节点的 plane82 单元.采用 Beam188 单元建立有限元模型,采用双单元法建立钢管混凝土组合材料模型,不同材料分别赋予不同的材料属性,假定钢管与混凝土之间无相对滑移.采用五折线模型表示钢材的应力-应变关系,采用了考虑钢管套箍作用的、以一维方式表达应力-应变关系的核心混凝土(详见文献<sup>[9]</sup>).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)进行材料本构关系模型的输入.

对偏心受压构件进行有限元模拟时,偏心距的实现可通过在构件顶部模拟一刚度无限大的盖板来获得,同时加载盖板与钢管、混凝土均保证共用节点处的自由度耦合<sup>[10]</sup>.但该方法人为地在构件端部添加了附加构造,与真实结构并不完全一致,存在着一定的偏差.在本研究中,通过使截面剪切中心偏离截面几何中心的方法来实现偏心距.

偏心受压构件加载的模拟可以通过两种方式来实现:在截面的几何中心处施加轴向荷载和弯矩(弯矩通过施加一对力偶来实现),该方法主要应用于压弯构件<sup>[10]</sup>;直接在截面偏心距的位置处施加轴向荷载,本研究采用这种加载方式.钢管初应力通过单元生死技术来实现<sup>[2]</sup>.

### 1.2 算例分析

以文献<sup>[4]</sup>中的试验作为算例对本研究的有限元分析计算方法进行验证.钢管和混凝土等材料的基本资料见表 1,按长细比不同分为 3 组,即 S、SH 和 H 组.根据试验结果,钢管的弹性模量  $E_s$  为  $2.00 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.268;混凝土的初始弹性模量为  $3.2 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.167.将钢管截面

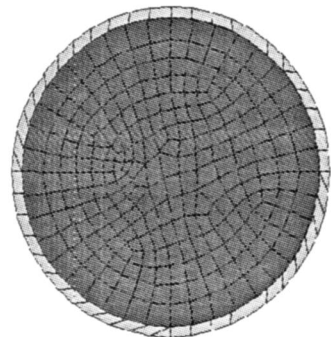


图 1 截面单元划分

共划分为 42 个单元,混凝土截面划分为 283 个单元.假定钢管与混凝土材料之间无相对滑移和变形,两种单元在钢管内壁处直接连接,截面单元划分如图 1 所示.考虑到模型具有千分之一挠度 ( $L/1\ 000$ ) 的初始缺陷,且考虑到几何与材料非线性的影响,沿构件的长度 ( $L$ ) 方向将钢管与混凝土分别划分为 20 个单元.

表 1 试件详细资料与承载力

试件编号	组号	截面尺寸 / mm	长度 $L$ / mm	偏心距 $e$ / mm	长细比	$f_s$ / MPa	$f_{cu}$ / MPa	含钢率	初应力度 $= \sigma_0 / f_s$	试验 $N_0$ / kN	有限元值 $N_c$ / kN
A30	S	133 × 4.5	465	50	14	325.0	42.2	0.15	0.00	630	621
A32		133 × 4.5	465	50	14	325.0	42.2	0.15	0.21	629	617
A33		133 × 4.5	465	50	14	325.0	42.2	0.15	0.30	627	615
A34		133 × 4.5	465	50	14	325.0	42.2	0.15	0.39	625	611
A35		133 × 4.5	465	50	14	325.0	42.2	0.15	0.48	614	604
A38		133 × 4.5	465	50	14	325.0	42.2	0.15	0.43	618	608
A120		SH	133 × 4.5	1 670	50	50	325.0	42.2	0.15	0.00	438
A122	133 × 4.5		1 670	50	50	325.0	42.2	0.15	0.22	430	446
A124	133 × 4.5		1 670	50	50	325.0	42.2	0.15	0.42	416	436
A200	H	133 × 4.5	2 730	66	82	325.0	42.2	0.15	0.00	306	304
A202		133 × 4.5	2 730	66	82	325.0	42.2	0.15	0.22	293	293

对表 1 中 3 组试件的受力全过程进行了有限元计算,图 2 为各试件荷载 - 中截面挠度关系计算曲线与试验曲线比较,其中,实线为试验曲线,虚线为计算曲线.

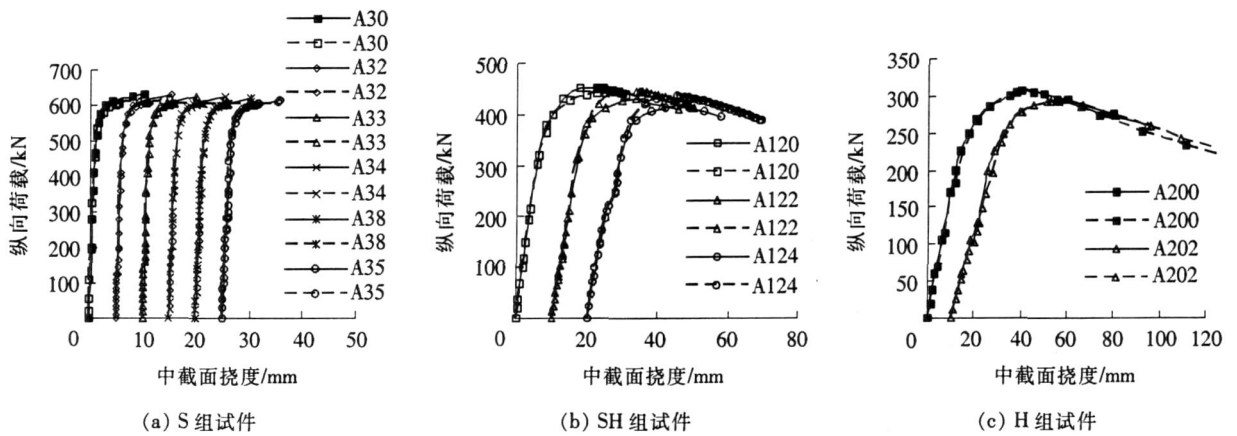


图 2 试验和有限元荷载 - 挠度关系曲线比较

此外,表 1 及图 3 也给出了各组试件承载力的试验值与有限元计算值.从图 2 中各组试件荷载 - 挠度关系计算曲线与试验曲线的比较可知,两者吻合良好.同时,由表 1 最后两列的极限承载力试验值与有限元计算值及图 3 比较可知,两者吻合也较好.说明本研究提出的有限元分析方法能够反映有初应力的钢管混凝土偏压构件的受力特性,可以基于该模型进行参数分析.同时还发现,图 2 中短柱 S 组和长柱 H 组试件的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有初应力的.

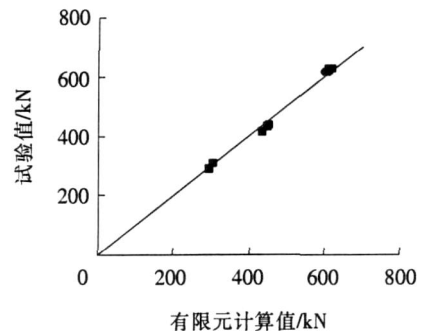


图 3 各试件承载力试验值和有限元值比较

## 2 参数分析

### 2.1 荷载 - 挠度曲线

黄福云等人<sup>[2]</sup>进行了有初应力的钢管混凝土轴压构件的试验. 试件的钢管外径  $D$  为 108 mm、壁厚  $t$  为 4 mm, 钢材平均屈服强度  $f_s$  为 336.0 MPa, 混凝土抗压强度为 54.9 MPa (其他数据详见文献 [2]).

为了解有初应力的钢管混凝土偏心受压构件的受力状态, 以文献 [2] 中的试件为基本构件, 以 3 个参数变化构造出 327 根构件, 应用有限元方法进行分析. 这 3 个参数及其变化范围分别是: 初应力度为  $0.0 \sim 0.80$  ( $= \sigma_0 / f_s$ )、偏心率为  $0.05 \sim 2.0$  ( $= e/r$  其中:  $e$  为偏心距;  $r$  为构件截面半径) 和长细比为  $12 \sim 120$  ( $= 4L/D$ , 其中:  $L$  为构件计算长度;  $D$  为钢管直径). 图 4 给出了 分别为 12, 48 和 72 的构件在 为 0.1 和 0.4 这两种情况时的曲线.

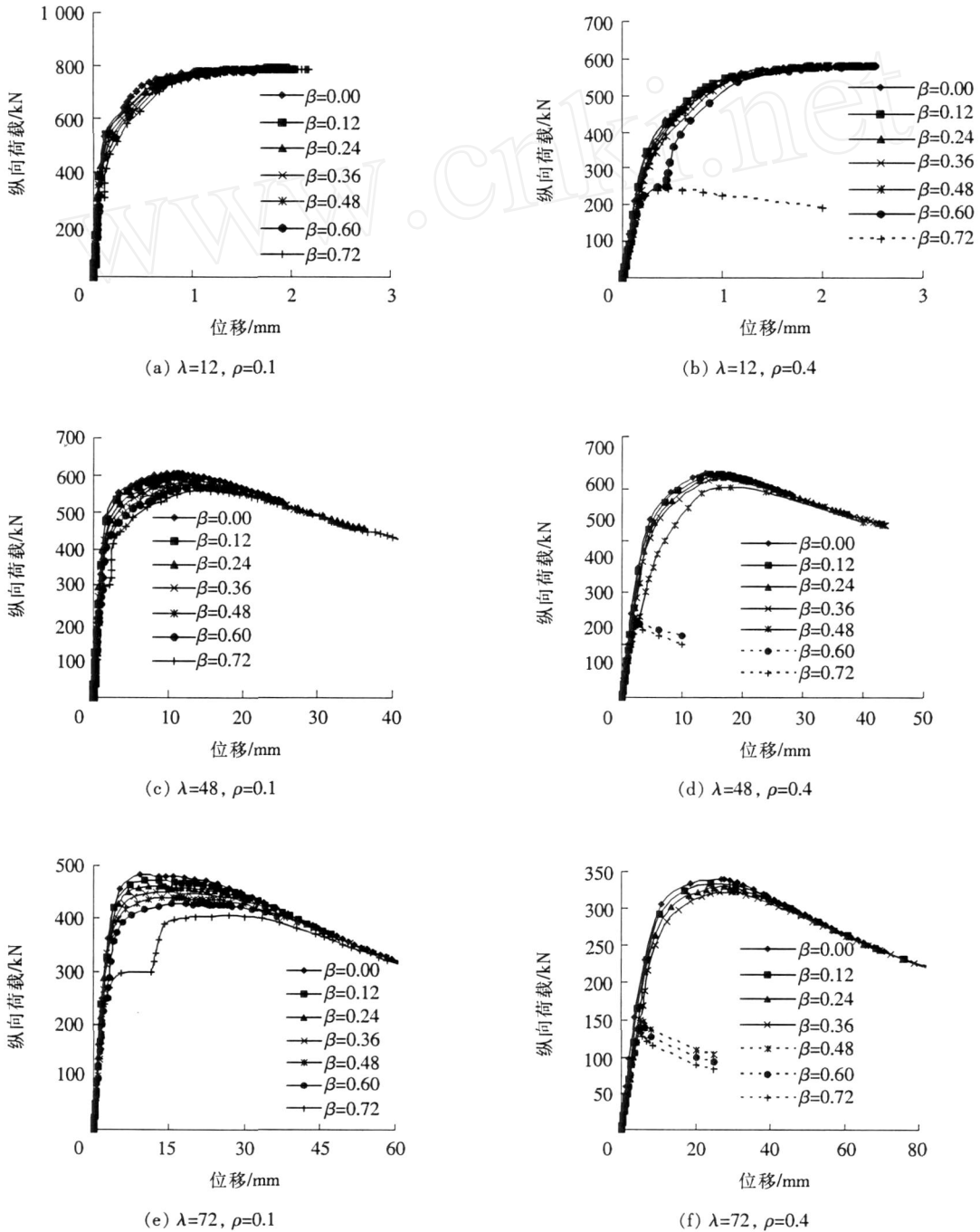


图 4 荷载 - 挠度关系曲线

由图 4 可知, 对于 为 12 的短柱, 初应力对偏压构件的影响与初应力对轴心受压构件的影响基本相同<sup>[2]</sup>, 即不同初应力度构件的极限荷载相差很小, 但初应力会使其弹塑性阶段提前出现, 最大荷载对

应的挠度增加,且这种影响随着初应力的增大而增大。

当增大到一定值时,初应力加载阶段的空钢管试件进入弹塑性阶段(如:图 4 中  $\rho$  为 0.1 且  $\beta$  为 0.7 时的构件与  $\rho$  为 0.4 且  $\beta$  为 0.60 时的构件);继续增加初应力,空钢管将失去稳定而破坏,如:  $\rho$  为 0.4 的构件在  $\beta$  达到 0.72 时失稳破坏,图 4 中虚线实际上表示的是对应空钢管的荷载 - 中截面挠度关系曲线,承载力大大降低。实际工程中这种情况不允许出现,即施工过程空钢管应按钢结构的受力要求进行验算,不允许出现强度和失稳破坏。很显然,该初应力度明显小于文献 [2] 中轴压构件的  $\rho$  (其达到了 0.96 仍未发生失稳破坏)。

对于  $\lambda$  为 48 的中长柱和  $\lambda$  为 72 的长柱构件来说,初应力对构件受力的影响除了与对短柱的刚度等影响外,还对稳定极限承载力和变形有较大的影响,其影响随着  $\beta$  的增大而增大。如:  $\lambda$  为 72 且  $\rho$  为 0.1 的构件在  $\beta$  为 0.72 时最大下降幅度达到了 20%,同时其稳定极限荷载对应的挠度 (30.22 mm) 达到了无初应力构件挠度 (9.09 mm) 的 232%。由图 4 中的虚线可知,空钢管失去稳定而破坏时所对应的  $\beta$  相对于  $\lambda$  为 12 的构件也减小了。

此外,图 4 中当  $\lambda$  和  $\beta$  增大时,构件弹性抗弯刚度减小,极限承载力大大降低,达到极限承载力时中截面所对应的挠度增大,且初应力的存在有增大这种影响的趋势;同时,  $\rho$  和  $\beta$  对构件极限承载力的影响是相互独立的,  $\rho$  越大,对  $\beta$  的限制值也越小。

### 2.2 极限承载力影响分析

设  $K_p$  为考虑钢管初应力影响时构件的极限承载力与不考虑初应力时构件的极限承载力之比,称为极限承载力的初应力度影响系数,简称初应力度影响系数。图 5、6 分别为以  $\lambda$  和  $\beta$  为参数时,  $K_p$  与  $\rho$  的关系曲线(限于篇幅,本文只给出了部分结果,所讨论的范围是在初应力作用下钢管未破坏(强度或失稳破坏)的构件)。

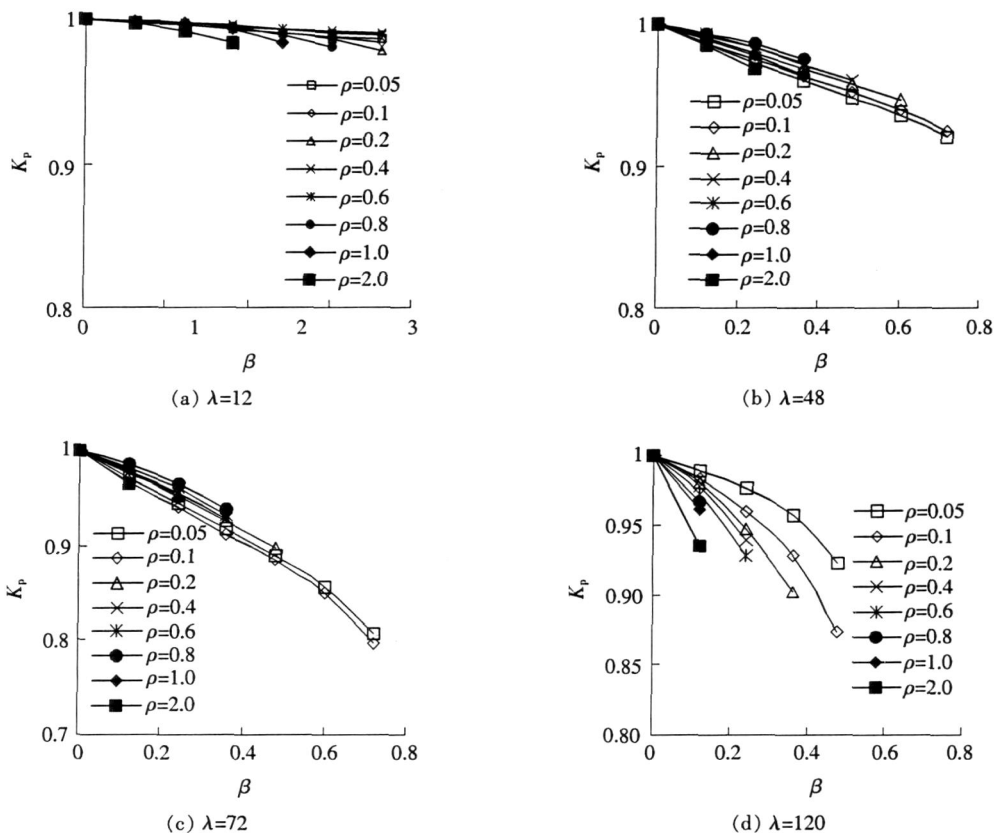
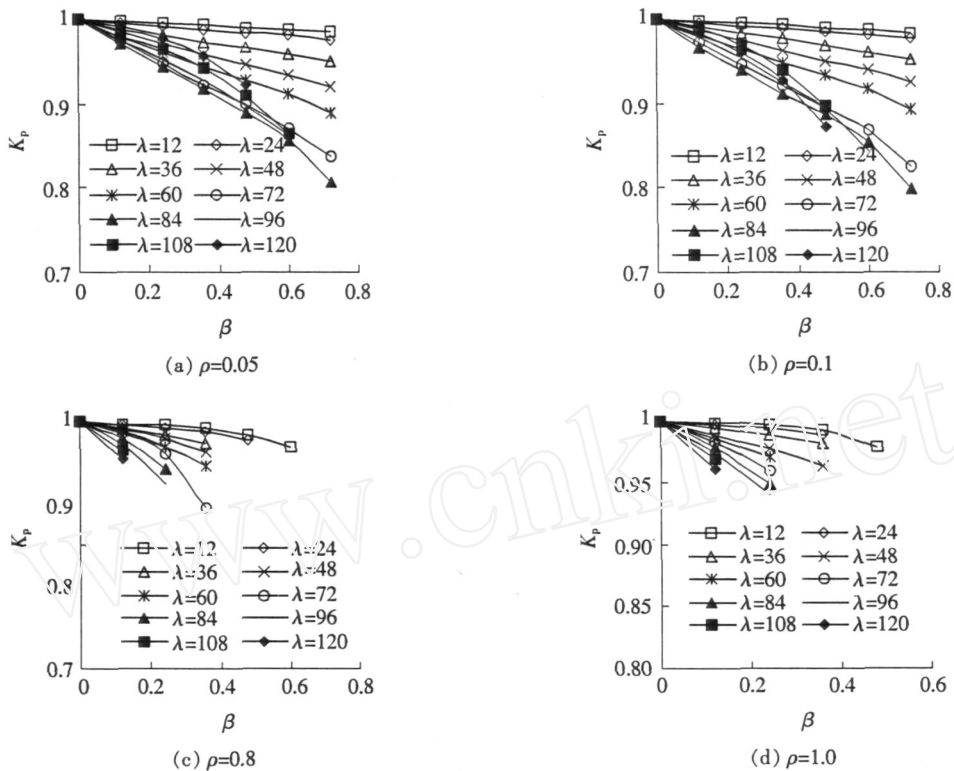


图 5 偏心率对  $K_p$  的影响

图 6 长细比对  $K_p$  的影响

由图 5(a)可知,随着  $\lambda$  和  $\beta$  的增大,偏压短柱的  $K_p$  虽不断减小(承载力不断降低),但总的来说变化很小,如:即便在  $\beta$  达到 0.6 且  $\rho$  为 1.0 时,  $K_p$  的减小也不到 2%。从工程应用的角度来说,可以忽略。

由图 5(b)和 (c)可知,  $\lambda$  与  $\beta$  对构件极限承载力的影响较大。对  $K_p$  的影响以  $\rho$  等于 0.8 时为分界点呈现出不同的规律。当  $\rho$  小于 0.8 时,随着  $\lambda$  的增大,对  $K_p$  的影响逐渐减小;而当  $\rho$  大于 0.8 时,随着  $\lambda$  的增大,对  $K_p$  的影响逐渐增大(其中,  $\rho$  分别等于 0.05 和 0.1 时,  $K_p$  大致都为 0.8,即初应力使构件承载力下降了 20%)。

由图 5(d)可知,  $\lambda$  与  $\beta$  对构件极限承载力的影响很大。随着  $\lambda$  的增大,  $K_p$  逐渐减小,或者说  $\beta$  的影响逐渐增大。但由于构件  $\lambda$  的增大,其允许的最大  $\beta$  会逐渐减小,因而,总的来说,在构件允许的最大  $\beta$  下,以  $\rho$  为 0.1 时的影响最大,  $K_p$  值为 0.87。

对于  $\rho$  分别等于 0.05 和 0.1 的小偏压构件,由图 6(a)和 (b)可知,在  $\lambda$  小于 84 时,相同初应力度下,随着  $\lambda$  的增大,  $K_p$  逐渐减小。同时也可看出,  $\lambda$  分别为 72 与 84 的构件对  $K_p$  的影响接近,以  $\lambda = 84$  ( $\lambda = 0.796$ ) 时  $K_p$  最小;当  $\lambda$  大于 84 时,随着  $\lambda$  的增大,则  $K_p$  逐渐增大。说明在小偏心率的情况下,随着  $\lambda$  的增大,对构件稳定极限承载力降低的影响为先逐渐增大后又有所减小。

对于大偏心率的构件,由图 6(c)和 (d)可知,随着  $\lambda$  的增大,  $K_p$  的影响是逐渐减小的,或者说初应力的影响为不断增加。说明在大偏心率的情况下,随着  $\lambda$  的增大,对构件稳定极限承载力降低的影响逐渐增大。

### 3 极限承载力简化计算

#### 3.1 简化计算公式

在 2.1 中构件及 3 个参数变化范围的基础上,扩大参数的取值范围 ( $\rho$  为 0.0~1.0,  $\lambda$  为 12~160,  $\beta$  为 0.0~2.0) 且增加钢管钢号为第 4 个参数(取常用的 3 种低碳钢 Q235, Q345 和 Q390),共构造了 980 个构件(不包括钢管和混凝土还未共同工作之前就破坏的构件),应用有限元方法计算出  $\lambda$  对极限承载力的初应力度影响系数  $K_p$ 。对计算结果进行回归分析(均值为 1.047,方差为 0.065),拟合曲线,得到  $K_p$

的计算公式:

$$K_p(\eta) = -0.0158\alpha m^2 - 0.0847bn + 1.0 \quad (1)$$

当  $\eta \leq 1$  时,  $\begin{cases} a = 3.352 \frac{2}{0} \\ b = 0.986 \frac{0}{0} \end{cases}$ ; 当  $\eta > 1$  时,  $\begin{cases} a = 1.768 \frac{0}{0} \\ b = 1.063 \frac{0}{0} \end{cases}$ ; 当  $\eta \leq 0.8$  时,  $\begin{cases} m = e^{0.039 \eta^2} \\ n = e^{1.209 \eta - 0.098} \end{cases}$ ; 当  $\eta > 0.8$  时,

$$\begin{cases} m = 0.103 \eta + 2.595 \\ n = 0.382 \eta + 2.905 \end{cases}$$

式中:  $\eta = l_0 / \lambda_p$  (为构件的计算长细比;  $\lambda_p$  为弹性失稳界限长细比,且  $\lambda_p$  只与钢材的材料相关,其中: Q235号钢为 100, Q345号钢为 80, Q390号钢为 75);  $\eta_0$  为构件偏心率;  $\sigma_0$  为初应力度,其值最大不得使构件在钢管和混凝土还未共同工作之前破坏。

根据  $K_p$  的定义,显然有初应力的钢管混凝土偏压构件极限承载力的计算公式:

$$N_0^{ep} = K_p \cdot N_0^e \quad (2)$$

式中:  $N_0^e$  为无初应力的钢管混凝土偏心受压构件的极限承载力。

在国内 3 本规程<sup>[10-12]</sup>中都给出了  $N_0^e$  的计算方法.限于篇幅,图 7 仅给出 CECS 28 90 规程<sup>[10]</sup>采用式 (1), (2) 计算所得极限承载力与有限元计算值的比较.由图 7 可知,简化计算公式具有较好的精度,最大偏差在 10% 范围内(虚线所示),可供实际工程应用;且简化公式计算值小于有限元计算值,是偏安全的,不过长细比较小的短柱构件则相反,这是由于 CECS 规程在计算短构件的承载力时计算结果偏高所引起的<sup>[13]</sup>.

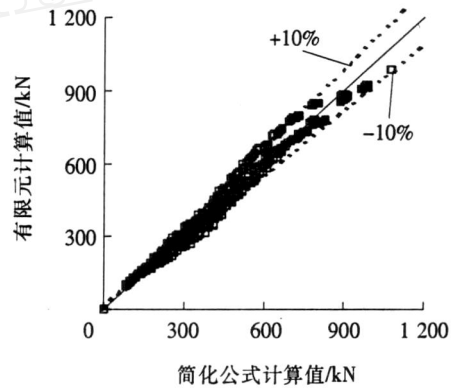


图 7 简化公式计算值与有限元计算值比较

### 3.2 更简便的表格法

对于工程应用来说,式 (1) 含有 4 个参数,计算起来还是显得复杂.因此,对于工程中常用参数

范围内的构件,在增加一个套箍系数  $\mu$  参数 (为 0.4 ~ 1.6) 的基础上,以  $\eta$  和  $\sigma_0$  为两个主要参数,对其他参数取其变化范围内最小的  $K_p$  值,形成表 2.换言之,表 2 是对于其他参数均偏安全地考虑了其对极限承载力下降的影响,而这几个参数又是次要的参数,因此,它对经济性的影响很小,但应用起来非常方便.

表 2 承载力的初应力度影响系数  $K_p$  的最小值

	10	20	40	60	80	100	120
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.10	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95
0.20	1.00	0.99	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90
0.30	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.89	0.85
0.40	1.00	0.98	0.96	0.93	0.90	0.86	0.82
0.50	0.99	0.98	0.95	0.92	0.88	0.84	0.80
0.60	0.99	0.97	0.95	0.91	0.87	0.83	0.79

注:各参数范围分别为  $\eta$ : 0.0 ~ 0.6;  $\sigma_0$ : 10 ~ 120;  $\mu$ : 0.0 ~ 2.0;  $\lambda_p$ : 0.4 ~ 1.6; Q235 ~ Q390

## 4 结 论

1) 本研究应用非线性有限元计算方法对有初应力的钢管混凝土偏压构件进行了分析.算例分析表

明,计算结果与试验结果吻合良好,可以用有限元方法进行钢管混凝土偏压构件的力学性能参数分析.

2) 随着  $\sigma_0$  和  $\eta$  的增加,构件极限承载力和弹性抗弯刚度逐渐减小,中截面挠度逐渐增大, $\sigma_0$  的存在使这种影响趋于明显和增大.初应力对偏压构件的影响与对轴压构件的相同,即:对于偏压短试件,其对强度承载力无影响,只对切线刚度有影响,弹塑性阶段提前出现;对于偏压长试件,其对稳定极限承载力有较大影响,初应力越大,其稳定极限承载力降低也越明显,最大下降幅度达到 20%;但其  $\eta$  的限制值要小于轴压构件的.

3) 钢管混凝土偏心受压构件的稳定极限承载力随着  $\eta$  的增大呈非线性下降,其降低的幅度与  $\sigma_0$  有关.  $\sigma_0$  对构件稳定极限承载力降低的影响幅度随着  $\eta$  的增大为先逐渐增大后又有所减小;  $\eta$  对构件稳定极限承载力降低的影响幅度为小偏心率时影响较大,随着  $\eta$  的增大(至 0.8 左右),其降低的幅度逐渐减小,超过 0.8 后,其降低的幅度又有所增加.

4) 通过大量的构件分析,本研究给出了初应力对钢管混凝土偏压构件承载力的初应力度影响系数的简化计算公式.公式计算结果与有限元结果吻合良好,可供实际工程中应用.在此基础上,为更便于工程应用,以表格的形式给出了偏安全的、以  $\sigma_0$  和  $\eta$  为参数的初应力度影响系数值.

#### 参考文献:

- [1] 黄福云,陈宝春.钢管混凝土拱桥初应力问题[J].公路交通科技,2006,23(11):68-72
- [2] 黄福云,陈宝春.初应力对钢管混凝土轴压构件受力性能影响研究[J].福州大学学报,2008,36(2):272-276
- [3] 黄世娟,钟善桐.初应力对圆钢管混凝土轴压构件承载力影响的实验研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1996,29(6):44-50
- [4] 张晓庆,钟善桐,闫善章,等.初应力对圆钢管混凝土偏压构件承载力影响的实验研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1997,30(1):50-56
- [5] 查晓雄,钟善桐.用有限元分析初应力对钢管混凝土构件承载力影响的研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1997,30(1):41-49
- [6] 查晓雄,唐家祥,钟善桐.钢管混凝土高层及超高层建筑中平行立体交叉法施工及施工中初应力的影响[J].工业建筑,1998,28(11):32-34
- [7] 韩林海,尧国皇.钢管初应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究[J].土木工程学报,2003,36(4):9-18
- [8] ANSYS Incorporation. Theory reference releases 5.6(Third Edition)[M]. USA: SAS Institute Incorporation, 2001.
- [9] 韩林海.钢管混凝土结构[M].北京:科学技术出版社,2000
- [10] CECS 28-90,钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
- [11] JCJ 01-89,钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
- [12] DL/T 5085-1999,钢管混凝土组合结构设计规程[S].
- [13] 韩林海,陶忠,尧国皇,等.钢管混凝土基本构件承载力的设计计算——各国规程比较(D)[J].建筑钢结构进展,2002,4(3):47-55.