

文章编号:1671-8844(2004)05-077-04

# 钢管混凝土偏压柱承载力计算的分析

肖展春<sup>1</sup>, 白 宁<sup>2</sup>

(1. 武汉大学后勤保障部, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉建筑材料工业设计研究院, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**提出了钢管混凝土偏压柱考虑等效紧箍力的作用,把钢材和核心混凝土均简化成理想弹性塑性体,按截面形成塑性铰确定强度承载力,同时采用压溃理论确定构件的稳定承载力。计算公式虽比较繁复,但表达式却很简单,通过电算算出系数值,可供设计时直接查用,简捷而方便。

**关键词:**钢管混凝土偏压柱;等效紧箍力;压溃理论

**中图分类号:**TU 311.4 **文献标识码:**A

## Analysis of calculation of load bearing capacity of concrete-filled steel tubular columns under eccentric loading

XIAO Zhan-chun<sup>1</sup>, BAI Ning<sup>2</sup>

(1. Logistic Department, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan Building Material Industry Design & Research Institute, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** This paper gives the concept of equivalent confining force for concrete-filled steel tubular columns under compression and bending, and how to predigest steel and core concrete to ideal elasto-plastic member. The formation of a plastic hinge at its cross section is considered as the limit state of strength of the member; and the stable load bearing capacity of the member is determined by means of the collapse theory. Although the process is complex, but the final formula is simple. Coefficient calculated by computer can be used directly, so as to make the design process simple and convenient.

**Key words:** concrete-filled steel tubular columns; equivalent confining force; collapse theory

钢管混凝土结构是介于钢结构和钢筋混凝土结构之间的一种新型结构,具有经济效益良好、施工方便和造型美观等优点。在相同承载力下,与钢柱比,可降低造价 50%;与钢筋混凝土柱比,除降低造价外,可减轻自重 70%;由于无模板,施工简单,大大缩短工期;从造型上解决了“胖柱”问题。

在美日等西方国家,钢管混凝土结构广泛应用于高层建筑中,我国 1994 年在惠州商住大厦曾采用该结构,取得了令人满意的结果。近年来,一些钢管混凝土结构的设计规程相继颁布,如“钢管混凝土结构设计与施工规程”(JCJ01-89)、(CECS28:90)<sup>[1]</sup>、“钢-混凝土组合结构设计规程”(DL/

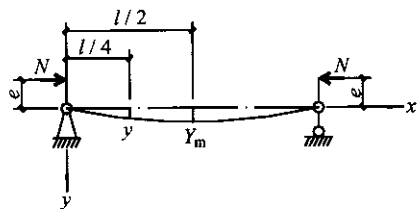
T5085-1999)等,本文试图从考虑等效紧箍力的作用及压溃理论的角度来确定钢管混凝土偏压柱的稳定承载力。

### 1 偏压柱的工作性能

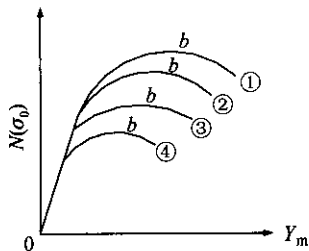
构件在偏心压力作用下,一开始就发生挠曲。以截面的平均应力  $\sigma_0$  或纵向压力  $N$  为纵坐标,杆中挠度  $Y_m$  为横坐标,可绘出  $\sigma_0$ - $Y_m$  关系曲线,如图 1 中(a)和(b)所示。曲线由上升段和下降段组成,上升和下降段的转折点  $b$ (曲线最高点)所对应的纵向力就是偏压柱的极限承载力<sup>[2]</sup>。

当构件的长细比很小时( $\lambda \leq 20$ ),构件达曲线

最高点  $b$  时, 钢管形成塑性铰, 受压区混凝土达极限强度, 受拉区混凝土不参加工作, 这是偏压柱的强度承载力极限, 如图 1(b) 中的曲线①。当构件的长细比较大时, 偏压柱常在截面未形成塑性铰以前, 由于内外力失去平衡而发生破坏, 这种情况称为丧失稳定, 或称屈曲破坏, 如图 1(b) 中的曲线②、③、④。由上升段转变到下降段的最高点  $b$  对应的最大极限荷载称为临界荷载, 或称压溃荷载。



(a) 构件在偏心压力作用下发生挠曲



(b) 偏压构件应力图

图 1 偏压构件的工作性能

钢管混凝土偏压柱的  $\sigma_0 - Y_m$  曲线和钢构件及钢筋混凝土构件的  $\sigma_0 - Y_m$  曲线的主要区别在于: 在构件接近压溃时, 外荷增量很小, 而变形却发展很快, 曲线比较平缓, 甚至出现接近水平的线段, 在构件充分发展塑性后, 承受的外荷载才缓缓下降, 直至构件彻底破坏。具有这种性能特点的原因是: 构件截面的受压区产生和发展了紧箍力, 不但提高了受压区混凝土的承载力, 而且还增加了构件的塑变形能力。当然, 偏压柱由于截面上应力分布不均匀, 压应力较大部位的紧箍力较大, 压应力较小部位的紧箍力较小或为零, 而受拉区则不产生紧箍力, 或通过粘结力而产生反向紧箍力; 因此, 截面上紧箍力的分布是不均匀的。因此, 如何正确确定紧箍力效应是正确确定钢管混凝土偏压柱承载力的关键问题。

随着长细比( $\lambda$ ) 偏心率( $e/r$ ) 的不同, 临界状态时杆中截面的应力分布可分为如图 2 所示三种情况。

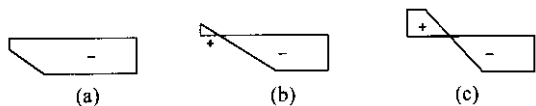
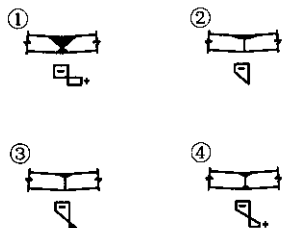


图 2 临界状态时偏心受压柱截面的应力分布

分析钢管混凝土偏心受压柱的工作性能, 归纳起来有如下三个特点:

钢管混凝土偏压柱丧失稳定时, 随荷载、相对偏心的大小和构件长细比的不同, 杆中危险截面上的应力分布也不同, 可分三种情况: (1) 全截面受压而部分发展塑性, 或受压区部分发展塑性而受拉区仍属弹性工作, 如图 1 中曲线②; (2) 受压区部分发展塑性, 受拉区钢管为弹性工作而混凝土不参加工作, 图 1 中曲线③; (3) 受压和受拉区都发展塑性, 而受拉区混凝土不参加工作, 图 1 中曲线④。



(1) 危险截面上既有弹性区, 又有塑性区, 而弹性受拉区的混凝土有参加工作的, 也有退出工作的 (当拉应变超过混凝土的极限拉应变时)。

(2) 由于危险截面上压应力分布不均匀, 且常只分布于部分截面上, 因而紧箍力的分布也极不均匀。

(3) 不但危险截面上两种材料的变形模量随位置的不同而不同, 而且沿构件的长度方向也是变化的。

我们认为, 采用压溃理论来确定钢管混凝土偏压构件的临界力比较合理<sup>[3]</sup>。为此, 首先要解决以下两个问题:

(1) 紧箍力  $P$  的作用。

临界状态杆中截面  $P$  的大致分布如图 3 所示。研究表明, 只在钢管的应力大于其比例极限时, 才产生有效的  $P$ , 否则是可以忽略的。偏压柱临界状态时, 有效的  $P$  仅限于受压区边缘, 这部分混凝土纵向强度将提高, 但此提高值很难确定。考虑到系圆形截面, 边缘部分混凝土强度的提高占整个承载力的比例不大, 如同时也忽略这部分钢材因异号力场而使纵向承载力降低, 则影响更小。因此忽略之。钢管的最大应力用  $\sigma_s$ , 核心混凝土抗拉强度取  $R_s$ , 这一近似处理对长细比和偏心率均很小的构件是偏保守的。

(2) 核心混凝土抗拉强度  $R_s$  的取值。

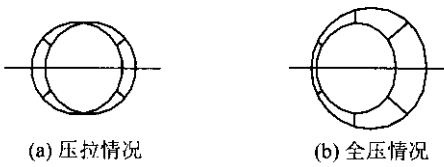


图 3 紧箍力的大致分布

有些研究者认为,钢管混凝土柱中核心混凝土的抗拉强度  $R_a$  要比单向受拉时高<sup>[4]</sup>,但至今无充分的理论分析和实验数据验证,因此忽略  $R_a$  比单向受拉时高的可能性,而按  $R_a = 0.58R^{2/3}$  取值计算,超出此值时不计受拉区混凝土的工作. 由于  $R_a$  较低,受拉区未开裂部分混凝土的面积很小,因而忽略受拉区混凝土的影响.

综上所述,可见钢管混凝土偏压柱的工作性能比轴心受压时要复杂得多,特别是非均布的紧箍力产生的影响.

## 2 偏压柱的强度计算

当  $\lambda \leq 20$  时,偏压柱承载力决定于强度,  $N(\sigma_0)-Y_m$  关系曲线如图 4 所示. 当到达曲线最高点  $b$  时,钢管非常接近于出现塑性铰,受压区混凝土也达极限. 为了简化计算,假设达曲线最高点时,钢管形成塑性铰,受压混凝土应力达  $R'_a$ ,极限状态的应力分布如图 5 所示,受拉区混凝土不参加工作.

根据平衡条件:

$$N = \sigma'_s A_g - N_{gl} + N_{hc} \quad (1)$$

$$Ne = M_{hc} + M_{gl} \quad (2)$$

式中:  $N_{gl} = 2 \int_{\theta}^{\pi} (\sigma_s + \sigma'_s) dA_g$ ;

$$N_{hc} = 2 \int_0^{\theta} R'_a dA_h$$

$$M_{gl} = N_{gl} (r + \frac{t}{2}) \cos \phi$$

$$M_{hc} = N_{hc} r \cos \phi$$

$$A_g = 2\pi(r + \frac{t}{2})t = 2\pi r t (1 + \frac{\alpha}{4})$$

其中  $\alpha = 2t/r$

$$dA_g = (r + \frac{t}{2})t d\phi; dA_h = r^2 \sin^2 \phi d\phi$$

代入平衡方程式,整理后得:

$$\alpha \left(1 + \frac{\alpha}{4}\right) \left\{ \frac{\sigma_s + \sigma'_s}{\pi} \left[ \theta - \frac{r}{e} \left(1 + \frac{\alpha}{4}\right) \sin \theta \right] - \sigma_s \right\} + \frac{R'_a}{\pi} (\theta - \cos \theta \sin \theta - \frac{2}{3} \frac{r}{e} \sin^3 \theta) = 0 \quad (3)$$

由上式可解出危险截面受压塑性区对应的圆心角之半( $\theta$ ),代入公式(1),确定构件的最大承载力  $N_p$  值. 引入安全系数  $\bar{K}$  后,即得钢管混凝土偏压柱  $\lambda \leq 20$  时的强度设计公式:

$$N \leq \frac{N_p}{\bar{K}} \frac{N_0}{N_0} = \varphi_p \beta A_h \quad (4)$$

式中:  $N_0/\bar{K} = \beta A_h$ ,为轴心受压短柱承载力;  $N_p/N_0 = \varphi_p$ ,为偏心受压短柱强度折减系数;  $\beta$  为钢管混凝土构件的换算容许应力,根据构件采用的钢号( $\sigma_s$ )、混凝土标号( $R_a$ )及含钢率( $\alpha$ )直接查表取用<sup>[1]</sup>.

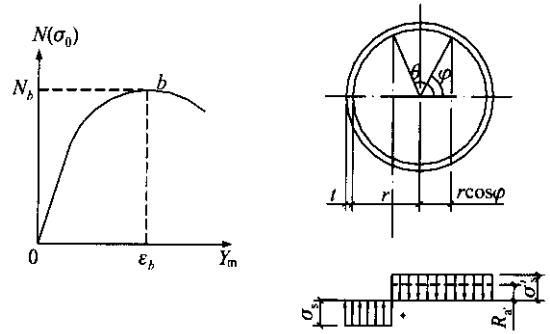


图 4  $\sigma_0-Y_m$  关系曲线 图 5 极限状态的应力分布图

## 3 偏压柱的稳定计算

当构件的长细比  $\lambda > 20$  时,偏压柱的承载力决定于稳定条件. 我们采用压溃理论来确定构件的承载力<sup>[5]</sup>,见图 6.

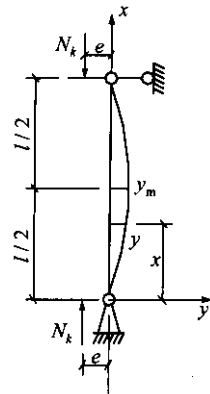


图 6 柱在偏心压力作用下发生挠曲

此时采用下列基本假定<sup>[6]</sup>:

(1) 构件为两端铰接的理想直杆,两端作用着偏心距相等的等值压力;

(2) 临界状态,即构件压溃时,杆轴挠曲线符合

正弦曲线  $y = y_m \sin \frac{\pi x}{l}$ ;

(3) 临界状态时, 截面保持平面;

(4) 钢管和核心混凝土的应力分布都按理想弹性塑性体考虑, 临界压溃时, 两者的受压塑性区相同;

(5) 采用等效紧箍力来考虑紧箍力对受压区钢管和混凝土纵向承载力的影响;

(6) 受拉区混凝土的最大拉应力超过  $R_s = 0.58R^{2/3}$  时, 不考虑全部受拉区混凝土的工作;

(7) 钢材和混凝土弹性模量按规范规定值采用。

如前所述, 偏压柱到达临界压溃时, 危险截面的应力分布有三种情况:

(1) 杆中截面全部受压, 部分发展塑性, 或受压区部分发展塑性, 受拉区为弹性工作, 混凝土全部参加工作;

(2) 杆中截面受压区部分发展塑性, 受拉区钢管为弹性工作而混凝土不参加工作;

(3) 杆中截面受拉和受压区都发展塑性, 而受拉区混凝土不参加工作。

以上三种情况, 构件压溃时的临界力为

$$N_k = \sigma_k (1 + n\alpha) A_h \quad (5)$$

显然, 偏压柱的临界力是钢号 ( $\sigma_s$ )、混凝土标号 ( $R_s$ )、含钢率  $\alpha$ 、偏心率  $e/r$  及构件长细比  $\lambda$  的函数。分析表明:  $e/r$  和  $\lambda$  越大时,  $\sigma_k$  越低;  $\alpha$  越大时,  $\sigma_k$  越高;  $\sigma_s$  和  $R_s$  提高时,  $\sigma_k$  也增大。其中以  $e/r$  及  $\lambda$  的影响最大。

公式(5)引入安全系数  $\bar{K}$  后, 即得钢管混凝土偏压柱  $\lambda > 20$  时的稳定设计公式:

$$N \leq \frac{N_k}{\bar{K}} \frac{N_0}{N_0} = \varphi_p \beta A_h \quad (6)$$

式中:  $N_k/N_0 = \varphi_p$ , 为偏心受压短柱稳定系数。

#### 4 结束语

实验证明, 采用等效紧箍力的概念及压溃理论来确定钢管混凝土偏压柱的稳定承载力, 是符合钢管混凝土构件固有的特性, 适用于任意偏心率和长细比的构件, 具有普遍的实用意义。

#### 参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会. 钢管混凝土结构设计与施工规程(CECS28:90)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1990.
- [2] 蔡绍怀. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [3] 周广师. 钢管混凝土偏压柱稳定承载力的研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1982, (4): 29-46.
- [4] 仲威雄, 加藤勉, 金谷弘, 山口太郎. コンクソト充填钢管の偏的心圧縮試験[A]. 日本建筑学会论文报告集(临时增刊)号外[C]. 昭和 40 年 9 月: 333.
- [5] Timoshenko S P, Gere J M. Theory of elastic stability[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1961. 541.
- [6] Neogi P K, Sent H K, Chapman J C. Concrete-filled tubular steel columns under fecentric loading[J]. The Journal of The Institution of Structural Engineers, 1969, 47(5): 187-195.