

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.010

考虑初应力的钢管混凝土柱轴压承载力统一解

李艳, 赵均海, 梁文彪, 王苏

(长安大学建筑工程学院, 西安 710061)

摘要:采用双剪统一强度理论,考虑中间主应力和材料拉压比的影响,对有初应力的钢管混凝土轴压短柱的受力性能进行理论分析,引入考虑长细比影响的折减系数,建立了考虑初应力的钢管混凝土柱轴压极限承载力的统一解。将计算结果与文献试验结果进行对比,吻合良好,验证了公式的合理性。推导出一个新的初应力影响系数,并对其各参数进行分析。该结果为研究初应力对钢管混凝土轴压构件力学性能的影响提供了理论依据,具有一定的实际参考价值。

关键词:双剪统一强度理论;钢管混凝土;初应力;轴压承载力

中图分类号:TU398.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)03-0063-07

Unified Solution of Bearing Capacity for Concrete-filled Steel Tube Column with Initial Stress under Axial Compression

Li Yan, Zhao Junhai, Liang Wenbiao, Wang Su

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China)

Abstract:Based on the twin shear unified strength theory which considers the influence of intermediate principal stress and the strength-differential of materials, the mechanical behavior of concrete-filled steel tube (CFST) short column is investigated. Whilst considering the influence of slenderness ratio, unified solution of ultimate bearing capacity for CFST column with initial stress under axial compression is developed. Through comparing the results of proposed formula with that of experiments, the rationality of proposed formula is proved. Furthermore, according to the investigation, a new influence coefficient of initial stress is deduced. The results can provide some theoretical references for the study of CFST columns considered the effect of initial stress. And the solution may have some important practical value.

Key words: twin shear unified strength theory; concrete-filled steel tube; initial stress; axial bearing capacity

钢管混凝土具有承载力高、施工方便、塑性、耐火性能和经济效果好等优点,并随着研究理论的不断深入和完善^[1-5],已被广泛应用于多高层建筑大直径柱、海洋平台、桥梁拱肋和桥墩等结构中。然而,实际施工中,通常是先安装若干层空钢管,再在空钢管中浇灌混凝土,因此,钢管在和混凝土共同受力之前,由于施工荷载和湿混凝土自重等因素,产生了纵向初压应力^[6]。钢管初应力的存在占有了部分钢管

承载力,将影响钢管和核心混凝土共同受力阶段的开始和终了。因此,研究初应力对钢管混凝土构件力学性能的影响,是学者一直关注的热点问题之一,对合理地确定钢管混凝土构件极限承载力具有重要意义。

虽然目前世界各国规程大都没有合理的反映初应力对钢管混凝土构件受力性能的影响和计算方法^[6-8],但各国学者都进行了许多研究:韩林海^[6]对

收稿日期:2011-12-23

基金项目:国家自然科学基金(50908015);陕西省自然科学基金(2011JM7002);教育部博士点基金(20110205130001)

作者简介:李艳(1987-),女,博士生,主要从事组合结构、强度理论及应用等研究,(E-mail)liyanlwbdlp@126.com。

赵均海(通信作者),教授,博士生导师,(E-mail)zhaojh@chd.edu.cn。

有初应力的方钢管混凝土压弯构件进行了试验研究和有限元分析,得到了有初应力影响的钢管混凝土压弯构件承载力的实用验算方法;陈宝春等^[9-12]采用有限元方法对钢管初应力作用下的钢管混凝土柱进行了数值分析,提出了相应的极限承载力计算公式;周水兴等^[13-16]对钢管混凝土拱桥进行了试验研究和有限元分析,得到了钢管初应力对钢管混凝土拱桥力学性能的影响等。这些研究成果为该课题的深入研究提供了宝贵的试验数据和理论依据,然而仍存在一定的不足:1)研究方法大多为数值分析方法和极限平衡法,没有较合理的破坏准则为基础;2)初应力影响系数的计算公式大多由试验曲线或数值模拟曲线拟合而得,缺乏理论基础;3)计算过程和计算公式较复杂,不便工程实用。

本文采用双剪统一强度理论,对有初应力的钢管混凝土轴压短柱力学性能进行分析,引入考虑长细比影响的折减系数,建立了钢管初应力影响下钢管混凝土柱轴压极限承载力的统一解。在此基础上,推导出一个新的基于统一强度破坏准则的初应力影响系数,并对其各参数进行了分析。

1 双剪统一强度理论

双剪统一强度理论^[17]考虑了中间主应力和材料拉压比的影响,能够适用于各类不同的材料,其表达式为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = f_s \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (1a)$$

$$F = \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = f_s \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (1b)$$

$$\alpha = \frac{f_s}{f_c} \quad b = \frac{(1+\alpha)\tau_s - f_s}{f_s - \tau_s} \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力; α 为材料的拉压比; f_s 、 f_c 和 τ_s 分别材料的拉伸屈服应力、压缩屈服应力和剪切屈服应力; b 是加权系数,同时也是选用不同强度准则的参数,反映了中间切应力及相应作用面上的正应力对材料屈服或破坏的影响, $0 \leq b \leq 1$ 。

2 考虑初应力的钢管混凝土柱轴压极限承载力

设钢管混凝土柱外径为 D ,核心混凝土的直径为 d ,钢管的厚度为 t_s ,对核心混凝土提供的侧向约束力为 σ_r ,钢管所受的环向拉应力为 σ_θ ,轴向压力为 σ_z ,初应力为 σ_0 。当 $\sigma_0 = 0$ 时,为不考虑初应力

的钢管混凝土柱。钢管与核心混凝土受力简图如图1所示。

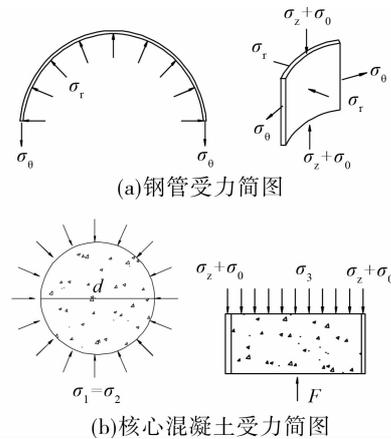


图 1 钢管与核心混凝土受力简图

2.1 考虑初应力的钢管混凝土短柱轴压极限承载力

1) 钢管应力分析

由图1(a)可得

$$\sigma_r d = 2t_s \sigma_\theta \quad \text{即} \quad \sigma_\theta = d\sigma_r / 2t_s \quad (3)$$

钢管在轴压、环拉和径向受压的三向应力状态下屈服时,环向应力增大,纵向承载力有所降低,径向压应力较小^[1]。若规定 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$,则

$$\sigma_1 = \sigma_\theta \quad \sigma_2 = -\sigma_r \quad \sigma_3 = \sigma_z + \sigma_0 \quad (4)$$

因为

$$\sigma_2 = -\sigma_r \leq 0 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} = \frac{\sigma_\theta + \alpha(\sigma_z + \sigma_0)}{1+\alpha}$$

故将式(4)代入式(1a)得

$$\sigma_\theta - \frac{\alpha}{1+b} (-b\sigma_r + \sigma_z + \sigma_0) = f_s \quad (5)$$

将式(3)代入式(5),整理可得

$$\sigma_z = -\frac{1+b}{\alpha} [f_s - (\frac{d}{2t_s} + \frac{\alpha b}{1+b})\sigma_r] - \sigma_0 \quad (6)$$

2) 核心混凝土应力分析

对于核心混凝土,其受力状态为 $0 \geq \sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$,由统一强度理论推得^[17]

$$-\sigma_3 = f_c - k\sigma_1$$

但对受压混凝土,一般取压为正拉为负,则上式变为

$$\sigma_3 = f_c + k\sigma_1 \quad (7)$$

式中: σ_3 为核心混凝土抗压强度; f_c 为混凝土圆柱体抗压强度; $k = \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta}$, θ 为混凝土的内摩擦角,

k 取值在1.0~7.0之间,具体由试验确定。

假定钢管和混凝土径向变形协调,由图1可得

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得

$$\sigma_3 = f_c + k\sigma_r \quad (9)$$

3)考虑初应力的钢管混凝土短柱轴压极限承载力

钢管混凝土短柱轴压承载力由钢管的承载力和核心混凝土的承载力共同组成,即

$$N_0 = N_c + N_s = \sigma_3 A_c + \sigma_s A_s \quad (10)$$

式中: A_c 为核心混凝土的横截面积, A_s 为钢管的横截面积,且

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4} \quad A_s = \frac{\pi D^2 - \pi d^2}{4} \approx \pi d t_s \quad (11)$$

将式(6)、(9)和(11)代入式(10),整理可得

$$N_0 = \frac{\pi d^2}{4} f_c - \frac{1+b}{\alpha} \pi d t_s f_s + \left[\frac{k\pi d^2}{4} + \frac{1+b}{\alpha} \pi d t_s \left(\frac{d}{2t_s} + \frac{ab}{1+b} \right) \right] \sigma_r - \sigma_0 \pi d t_s \quad (12)$$

由

$$\sigma_0 = d\sigma_r / 2t_s \leq f_s$$

得

$$\sigma_r \leq 2t_s f_s / d \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),则考虑初应力的钢管混凝土短柱轴压极限承载力为

$$N_{0u} = \frac{\pi d^2}{4} f_c + \left(\frac{k}{2} + \frac{2bt_s}{d} \right) \pi d t_s f_s - \sigma_0 \pi d t_s = A_c f_c + \left(\frac{k}{2} + \frac{2bt_s}{d} \right) A_s f_s - A_s \sigma_0 \quad (14)$$

初应力的大小用初应力度 β 表示,且

$$\beta = \frac{\sigma_0}{\varphi f_s} \quad (15)$$

式中: φ 为空钢管构件轴心受压稳定系数,按《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中的有关规定确定。设截面的含钢率 $\eta = \frac{A_s}{A_c}$, 套箍系数 $\xi = \frac{f_s}{f_c}$, 则式(14)可以简化为

$$N_{0u} = A_c f_c \left[1 + \left(\frac{k}{2} + \frac{2bt_s}{d} - \varphi\beta \right) \eta\xi \right] \quad (16)$$

2.2 考虑初应力和长细比影响的钢管混凝土柱的轴压极限承载力

引入考虑长细比影响的稳定系数 φ_l [18],且取

$$\varphi_l = 1 - 0.05 \sqrt{\frac{l_0}{D} - 4} \quad (17)$$

式中: l_0 为计算长度,取 $l_0 = \mu l$ 。

则考虑钢管初应力和长细比影响的钢管混凝土柱的轴压极限承载力为

$$N_u = \varphi_l N_{0u} = \varphi_l A_c f_c \left[1 + \left(\frac{k}{2} + \frac{2bt_s}{d} - \varphi\beta \right) \eta\xi \right] \quad (18)$$

2.3 不考虑初应力的钢管混凝土柱轴压极限承载力

当 $\beta = 0, \varphi_l = 1$ 时,式(18)退化为不考虑初应力的钢管混凝土短柱轴压极限承载力的计算公式,即

$$N_{0u'} = A_c f_c \left[1 + \left(\frac{k}{2} + \frac{2bt_s}{d} \right) \eta\xi \right] \quad (19)$$

当 $\beta = 0, \varphi_l \neq 1$ 时,式(18)退化为不考虑初应力的钢管混凝土长柱轴压极限承载力的计算公式,即

$$N_{0u''} = \varphi_l A_c f_c \left[1 + \left(\frac{k}{2} + \frac{2bt_s}{d} \right) \eta\xi \right] \quad (20)$$

其中, k 为材料影响系数,与混凝土的内摩擦角 θ 有关,文献[1]取 $4, \theta = 34.42^\circ$, 文献[19]取 $3.6, \theta = 36.87^\circ$ 。

当 $k = 4, b = 0$ 时,式(20)可简化为

$$N_{0u''} = A_c f_c (1 + 2\eta\xi) \quad (21)$$

与文献[1]中的计算公式完全一致。

3 计算实例及影响因素分析

根据文献[20]提供的钢管混凝土轴压构件的试验资料和数据,采用公式(18)计算其极限承载力,将计算结果和试验结果进行比较,比较结果见表1。

表1 计算结果和文献[20]试验结果对比 ($k = 3.6$)

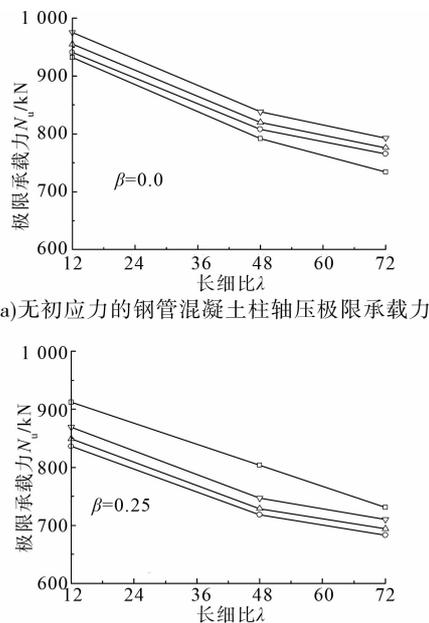
试件 编号	试件尺寸 $D \times t \times L / \text{mm}$	λ	$\varphi\beta$	N_{uc} / kN	N_{uc} / kN						N_{uc} / N_{uc} ($b = 1.0$)
					$b = 0.0$	$b = 0.2$	$b = 0.4$	$b = 0.6$	$b = 0.8$	$b = 1.0$	
S-P0	108×4×324		0.00	932	941	948	955	961	968	975	1.05
S-P1	108×4×324	12	0.25	912	836	842	849	856	863	869	0.95
S-P2	108×4×324		0.54	895	713	720	727	734	740	747	0.83
SH-P0	108×4×1296		0.00	792	808	814	820	826	832	838	1.06
SH-P1	108×4×1296	48	0.25	804	718	724	729	735	741	747	0.93
SH-P2	108×4×1296		0.50	729	627	633	639	645	650	656	0.90
H-P0	108×4×1944		0.00	734	765	771	776	782	787	793	1.08
H-P1	108×4×1944	72	0.24	731	683	688	694	699	705	710	0.97
H-P2	108×4×1944		0.48	702	600	606	611	617	622	628	0.89

计算值与试验值比值均值 $\mu = 0.962$ 方差 $\delta = 0.0066$

注:表中 D 为钢管混凝土构件外径; t 为钢管厚度; λ 为长细比; L 为试件长度; β 为初应力度; N_{uc} 为试验值; N_{uc} 为计算值。

从表 1 中可知,由本文公式计算得到的理论值与试验值吻合良好,验证了公式的合理性。当长细比 λ 一定时,钢管混凝土轴压构件极限承载力随初应力度 β 的增大而降低;当初应力度 β 一定时,其极限承载力随长细比 λ 的增大而降低。这表明,虽然初应力的存在可以延缓构件的破坏^[6,10],但这种延缓作用并不能阻止构件的极限承载力随构件长细比 λ 的增大而降低的趋势,因为当长细比 λ 较大,构件破坏形态为稳定破坏,而非强度破坏,长细比 λ 的影响大于初应力等其他因素的影响,占主导地位。

图 2 给出了文献[20]试件的试验值和采用本文公式计算所得的理论值在有无初应力状态下,随加权系数 b 和长细比 λ 的变化趋势。



(a) 无初应力的钢管混凝土柱轴压极限承载力

(b) 有初应力的钢管混凝土柱轴压极限承载力

注: \circ —试验值 \sim —理论值 $b=0.0$ \rightarrow —理论值 $b=0.4$ \leftarrow —理论值 $b=1.0$

图 2 钢管混凝土柱轴压极限承载力影响因素分析

由图 2 可以看出,当考虑钢管初应力的影响时,钢管混凝土柱的轴压极限承载力 N_u 有所降低,并且,由本文公式计算所得的理论值与试验值相比偏于安全。另外,由图 2 还可看出,当初应力度 β 一定时, N_u 随加权系数 b 的增大而增大,随长细比 λ 的增大而减小。这一结论与试验结果一致。

4 初应力影响系数及参数分析

4.1 初应力影响系数

设初应力影响系数为 φ_β , 则

$$\varphi_\beta = \frac{N_{0u}}{N_{0u}'} = 1 - \frac{\varphi\beta A_s f_s}{A_c f_c \left[1 + \left(\frac{k}{2} + \frac{2bt_s}{d} \right) \eta \xi \right]} =$$

$$1 - \frac{\varphi\beta\eta\xi}{1 + \left(\frac{k}{2} + \frac{2bt_s}{d} \right) \eta \xi} \quad (22)$$

式中: N_{0u} 、 N_{0u}' 分别为考虑初应力影响和不考虑初应力影响的钢管混凝土轴压短柱极限承载力。

由上述分析可知,初应力影响系数 φ_β 是根据统一强度破坏准则建立的,与以往拟合试验曲线或数值模拟曲线的方法不同。 φ_β 较全面地体现了初应力度 β 、构件长细比 λ (空钢管稳定系数 φ)、截面含钢率 η 、套箍系数 ξ 、钢材屈服强度 f_s 、混凝土强度 f_c 和材料影响系数 k 等多种因素的影响。

4.2 可行性比较

图 3 给出了本文推导出的初应力影响系数 φ_β 与文献[6]、[9]和[10]中的初应力影响系数 k_p 的比较,计算条件为 $D=108$ mm, $e/r=0$, $0 \leq \beta \leq 0.6$, $\eta=0.16$, $\xi=14.55$, Q345 钢材, C50 混凝土, k 分别取 4, 5, 6, 7。 b 是选用不同强度准则的参数,当 $b=0$ 时,为 Mohr-Coulomb 强度准则;当 $b=1$ 时,为双剪强度理论;当 $\alpha=1$, $b=0, 0.5$ 和 1 时,则分别为 Tresca 屈服准则、Mises 屈服准则的线性逼近及双剪屈服准则。此处取 $b=1$, 即取双剪屈服准则下的初应力影响系数 φ_β 与相关文献中的初应力影响系数进行比较。

由图 3 可见,本文推导出的初应力影响系数与文献资料中的初应力影响系数相比,偏于安全,具有一定的可行性。同时,图 3 还表明, k 取值越大,本文推导出的初应力影响系数与文献资料中的初应力影响系数吻合越好,并且, λ 越大,吻合越好。这是由于本文偏安全地考虑了初应力对钢管混凝土柱轴压极限承载力的影响。

4.3 参数分析

根据式(22)对影响初应力系数 φ_β 的各参数进行分析。计算条件为 $D=108$ mm, $\xi=14.55$, $e/r=0$, $0 \leq \beta \leq 0.6$, $b=1$, 对于 k , 参考文献[19], 取 $k=3.6$ 。

1) 初应力度 β 和长细比 λ

当 $\eta=0.16$, Q345 钢材, C50 混凝土时,在不同长细比 λ 影响下,初应力影响系数 φ_β 随初应力度 β 的变化规律如图 4 所示。

图 4 表明,当构件长细比 λ 等其他因素一定时, φ_β 随初应力度 β 的增大而减小。这是因为,钢管初应力的存在占有了钢管承载力的一部分,将影响钢管和核心混凝土共同承受的极限荷载,且初应力越大,这种影响越显著。另外,图 4 还表明,当初应力度 β 较小时, φ_β 随构件长细比 λ 的增大(即 φ 的减

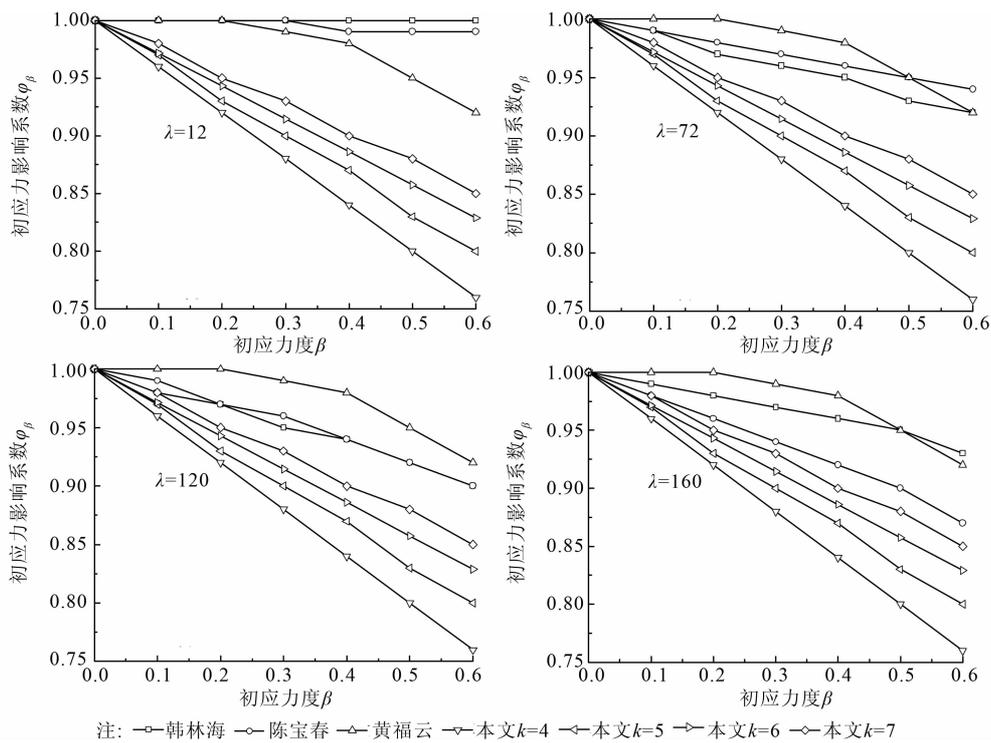


图 3 本文与相关文献初应力影响系数 φ_β 比较

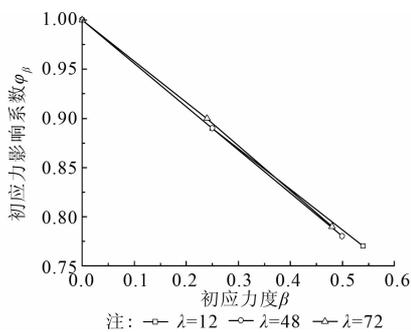


图 4 不同 λ 下, φ_β 随 β 的变化规律

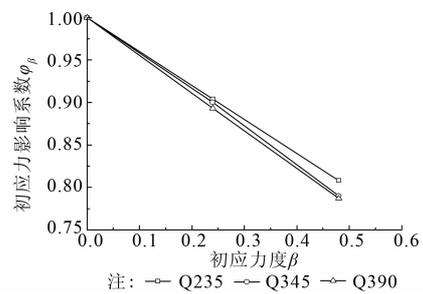


图 5 不同 f_s 下, φ_β 随 β 的变化规律

小)而增大,这是因为,当构件长细比 λ 较大时,钢管混凝土构件跨中截面受拉区域较大,钢管初压应力的存在延缓了截面受拉区域的发展,从而延缓了构件的破坏;当初应力系数 β 较大时, φ_β 随构件长细比 λ 的增大(即 φ 的减小)而减小,这是因为,长柱较短柱对初应力更为敏感,随初应力度 β 的增大下降速度更快。

2)初应力度 β 和钢材屈服强度 f_s

当 $\eta = 0.16$, $\lambda = 72$, C50 混凝土时,在不同钢材屈服强度 f_s 影响下,初应力影响系数 φ_β 随初应力度 β 的变化规律如图 5 所示。

图 5 表明, φ_β 随钢材屈服强度 f_s 的增大而减小。这是因为,钢材屈服强度 f_s 越高,钢管承载力占钢管混凝土构件承载力的比重越大,钢管初应力的影响越显著,同文献[6]结论一致。

3)初应力度 β 和混凝土强度 f_c

当 $\eta = 0.16$, $\lambda = 72$, Q345 钢材时,在不同混凝土强度 f_c 影响下,初应力影响系数 φ_β 随初应力度 β 的变化规律如图 6 所示。

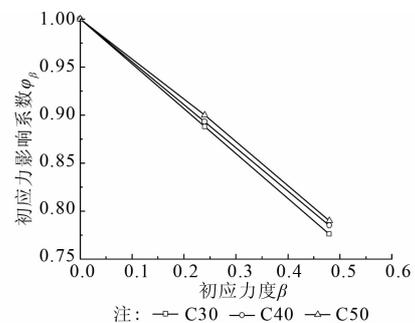


图 6 不同 f_c 下, φ_β 随 β 的变化规律

图 6 表明, φ_β 随混凝土强度 f_c 的增大而增大。这是因为,混凝土强度 f_c 越高,核心混凝土承载力占钢管混凝土构件承载力的比重越大,钢管承载力

比重越小,钢管初应力的影响越不显著,同文献[6]结论一致。图 6 还表明,混凝土强度 f_c 对初应力影响系数 φ_β 的影响不大,研究表明^[6],在工程常用参数范围内,混凝土强度对初应力影响系数的影响在 1% 左右变化。

4) 含钢率 η 和套箍系数 ξ 的影响规律

含钢率 η 和套箍系数 ξ 对初应力影响系数 φ_β 的影响规律同钢材屈服强度 f_s , 即 φ_β 随含钢率 η 和套箍系数 ξ 增大而减小。这是因为,含钢率 η 和套箍系数 ξ 越大,钢管承载力占钢管混凝土构件承载力的比重越大,钢管初应力的影响越显著。

图 7 为当 $\lambda = 72$, Q345 钢材, C50 混凝土时,在不同含钢率 η 影响下,初应力影响系数 φ_β 随初应力度 β 的变化规律。

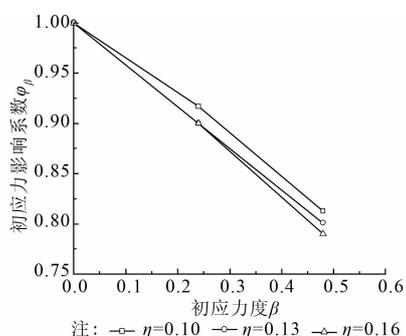


图 7 不同 η 下, φ_β 随 β 的变化规律

5 结 论

1) 采用双剪统一强度理论,考虑中间主应力和材料拉压比的影响,建立了考虑初应力影响的钢管混凝土柱轴压极限承载力的统一解,计算值与试验值吻合良好,验证了公式的合理性,也说明了统一强度理论对有初应力的钢管混凝土轴压构件具有良好的适用性。

2) 研究表明,考虑初应力的钢管混凝土柱的轴压极限承载力,当长细比和和加权系数一定时,随初应力度的增大而减小;当初应力度和长细比一定时,随加权系数的增大而增大;当初应力度和加权系数一定时,随长细比的增大而减小。

3) 推导出一个新的基于统一强度破坏准则的初应力影响系数,该系数较全面合理地考虑了长细比、初应力度、套箍作用、含钢率和材料影响系数等多种因素的影响,且偏于安全。

4) 对于轴压长柱,在轴压短柱的基础上,引入考虑长细比影响的折减系数,研究表明,该方法简洁合理,便于工程实用。

参考文献:

- [1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] Chen B C, Paulo B L. An overview of concrete and CSFT arch bridges in China [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Arch Bridge. Madeira, Portugal, 2007.
- [3] Sakino K, Nakahara H, Morino S, et al. Behavior of centrally loaded concrete-filled still-tube short columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188.
- [4] Nassif A Y. Finite element thermal analysis of concrete filled hollow steel sections during fires [J]. Emirates Journal for Engineering Research, 2004, 9(2): 111-115.
- [5] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [6] 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. Han L H, Yao G H. Effect of initial stress on bearing capacity of concrete-filled steel tubular beam-columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 9-18.
- [7] ASCCS. Concrete filled steel tubes—a comparison of international codes and practices [R]. ASCCS Seminar Report, Innsbruck, September, 1997.
- [8] Johansson M, Gylltoft K. Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(8): 1073-1081.
- [9] 陈宝春, 黄福云. 有初应力的钢管混凝土偏压构件极限承载力计算[J]. 长沙交通学院学报, 2008, 24(2): 1-8. Chen B C, Huang F Y. Calculation of ultimate load-carrying capacity of eccentrically loaded concrete filled steel tubular (CFST) columns with initial stresses [J]. Journal of Changsha Communications University, 2008, 24(2): 1-8.
- [10] 黄福云, 陈宝春, 林友勤, 等. 初应力对钢管混凝土轴压柱套箍作用影响研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 575-588. Huang F Y, Chen B C, Lin Y Q, et al. Research on hooping effect of concrete filled steel tube stubs with initial stress under axial compression [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2011, 39(4): 575-588.
- [11] Xiong D X, Zha X X. A numerical investigation on the behavior of concrete-filled steel tubular columns under

- initial stress [J]. Journal of Construction Steel Research, 2007, 63(5): 599-611.
- [12] Xiong D X, Zha X X. Non-linear analysis of the initial stress effect on the behavior of concrete-filled square steel tubular members [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Steel Structures. Shanghai: Elsevier Science Ltd, 2005, 599-611.
- [13] 周水兴, 刘琪, 陈湛荣. 钢管初应力对哑铃型钢管砼拱桥承载力影响分析[J]. 工程力学, 2008, 25(7): 159-178.
- Zhou S X, Liu Q, Chen Z R. Effect of initial stress on bearing capacity of dumbbell concrete-filled steel tube arch bridge [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 159-178.
- [14] 韦建刚, 黄福云, 陈宝春. 初应力对钢管混凝土单圆管拱极限承载力影响的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 103-112.
- Wei J G, Huang F Y, Chen B C. Research on the influence of initial stress to ultimate load carrying capacity of concrete filled steel tubular(single tube)arches [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 103-112.
- [15] 周水兴, 张敏, 王小松. 钢管初应力对钢管砼拱桥承载力影响非线性分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2): 291-302.
- Zhou S X, Zhang M, Wang X S. Nonlinear analysis of steel tube initial stress effect in steel tube on bearing capacity for CFST arch bridges [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(2): 291-302.
- [16] Wei J G, Chen B C, Wu Q X, et al. Equivalent beam-column method to estimate in-plane circle loads of parabolic fixed steel arches [J]. Bridge Engineering, ASCE, 2009, 14(5): 346-354.
- [17] Yu M H. Unified strength theory and its applications [M]. Berlin: Springer, 2004.
- [18] 赵均海. 强度理论及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 谭克锋, 蒲心诚, 蔡绍怀. 钢管超高强混凝土的性能与极限承载力的研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 2(1): 10-15.
- Tan K F, Pu X C, Cai S H. Study on the mechanical properties of steel extra-high strength concrete encased in steel tubes [J]. Journal of Building Structures, 1999, 2(1): 10-15.
- [20] 黄福云, 陈宝春. 初应力对钢管混凝土轴压构件受力性能的影响[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 272-277.
- Huang F Y, Chen B C. Influence of initial stress to behavior of concrete filled steel columns under axial loads [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2008, 36(4): 272-277.

(编辑 胡 玲)