

钢骨-钢管高强混凝土长柱承载力可靠度分析

肖阿林, 何益斌, 郭健, 黄频

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:基于《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001), 利用一次二阶矩法(JC法)对钢骨-钢管高强混凝土轴压长柱的极限承载力进行了可靠度分析, 研究了可变荷载组合类型、荷载效应比、混凝土强度等级、钢管壁厚、钢管截面面积、钢材屈服强度及长细比对组合柱承载力可靠指标的影响。分析结果表明, 在工程常用长细比范围内, 各公式的可靠指标均能满足规范对延性构件可靠度指标的要求; 在所研究参数范围内, 长柱的可靠度指标随荷载组合和荷载效应比的变化而变化, 随混凝土强度等级的提高而增大, 随钢管壁厚的增加而有所降低, 钢管截面面积对长柱的可靠指标无明显影响, 同时, 钢材屈服强度和长细比对各公式可靠指标的影响各不相同。

关键词:组合柱; 长柱; 极限承载力; 可靠度分析; 一次二阶矩验算点法

中图分类号: TU311.2; TU398.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)05-0031-07

Reliability Analysis on Ultimate Bearing Capacity of Steel-Reinforced High-Strength Concrete Filled Steel Tubular Slender Columns

XIAO A-lin, HE Yi-bin, GUO Jian, HUANG Pin

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: The first degree second order moment method (JC method) recommended in Unified Standard for Reliability Design of Building Structures (GB50068—2001) was applied to analyze the reliability of steel-reinforced high-strength concrete filled steel tubular slender columns. Several performances were studied, which were the influences of different load combinations, specific values of loads, strength grades of concrete, thickness of steel tube, area of cross-section of structural steel, steel yield strength and slenderness ratio on the reliability of the composite column. It was found that, when the slenderness ratios were within common range, the reliability indexes of the proposed formulae satisfied the demand of GB50068—2001 for plastic material on the whole. And it was concluded that the reliability index varied with the load combination and specific value of loads. The reliability index increased with the increase of concrete strength grade and decreased with the increase of steel tube thickness. Furthermore, steel yield strength and slenderness ratio had different influences on the reliability indexes.

Key words: composite structure; slender columns; ultimate bearing capacity; reliability analysis; JC method

王清湘等^[1-2]提出了一种重载柱设计的新模式, 即钢骨-钢管高强混凝土组合柱(截面形式如图1所示)。该新型组合柱综合了钢骨高强混凝土柱和钢

管高强混凝土柱两者的性能优势, 能够满足现代工程结构往大跨、重载、高耸及承受恶劣条件方向发展 and 工业化生产施工的要求, 具有良好的工程应用前

收稿日期: 2009-04-30

基金项目: 湖南省科技计划项目(2008GK312); 湖南省杰出青年基金资助项目(05JJ10009)

作者简介: 肖阿林(1980-), 男, 博士, 主要从事混凝土结构及组合结构研究, (E-mai)onionxiao@yahoo.com.cn.

景。目前,有关学者对该新型组合柱的力学性能和设计方法展开了一些的试验和理论研究^[3-8],提出了钢管-钢管高强混凝土轴压短柱和长柱极限承载力的各种设计计算公式。有关钢管-钢管高强混凝土组合柱的可靠度问题,HE Yi-bin 等采用蒙特卡罗(Monte-Carlo)法对钢管-钢管混凝土轴压短柱承载力进行了可靠性分析^[9],但迄今尚未见到有关轴压长柱承载力的可靠性研究报道。笔者认为,对钢管-钢管高强混凝土轴压长柱极限承载力进行可靠度校验,对于该新型组合柱的推广和应用具有重要意义。该文利用改进的一次二阶矩法(JC 法),对不同学者提出的钢管-钢管高强混凝土轴压长柱极限承载力计算公式进行了可靠度分析和比较,研究了可变荷载组合类型、荷载效应比、混凝土强度等级、钢管壁厚、钢管截面面积、钢材屈服强度及长细比对组合柱承载力可靠指标的影响。

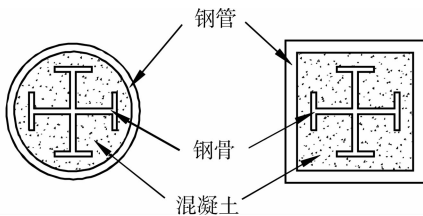


图 1 钢管-钢管高强混凝土组合柱的截面形式

1 轴压长柱极限承载力计算公式

迄今为止,中国有关学者基于不同理论建立了各自的钢管-钢管高强混凝土轴压长柱极限承载力计算公式^[1,7-8]。简要列举如下:

文献[1]基于钢柱设计理论,引入相对长细比概念,参照 Viridi 和 Dowling 的方法,建立了组合轴压长柱极限承载力的计算公式

$$N = \varphi_l [A_c f_c (1 + 2\theta) + A_s f_{sy}] \quad (1)$$

式中, N 为轴压长柱的极限承载力, A_c 、 A_s 、 f_c 、 f_{sy} 分别为混凝土和钢管截面面积、混凝土抗压强度和钢管屈服强度, θ 为套箍系数, φ_l 为轴压稳定系数,表达式为

$$\varphi_l = \frac{1}{2\lambda^2} \left[1 + 0.281 \sqrt{\lambda^2 - 0.04 + \bar{\lambda}^2} - \sqrt{(1 + 0.281 \sqrt{\lambda^2 - 0.04 + \bar{\lambda}^2})^2 - 4\lambda^2} \right] \quad (2)$$

式中具体参数计算可参见文献[1]。

文献[7]参考钢管混凝土柱的有关研究成果,建立了如下组合轴压长柱极限承载力的计算公式:

$$N = \varphi_l [(1.14 + 1.02\theta) f_c A_{sc} + (f_{sy} - f_c) A_s] \quad (3)$$

式中, A_{sc} 为组合柱截面面积,轴压稳定系数 φ_l 的计算表达式为

$$\varphi_l = \begin{cases} a\lambda^2 + b\lambda + c\lambda_0 < \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{d}{(\lambda + 35)^2} \lambda > \lambda_p \end{cases} \quad (4)$$

式中具体参数计算可参见文献[7]。

文献[8]基于参数分析和试验研究结果,建立了如下组合轴压长柱极限承载力的计算公式:

$$N = \varphi_l [A_c f_c (1.195 + 1.831\theta) + A_s f_{sy}] \quad (5)$$

式中,轴压稳定系数 φ_l 的计算表达式为

$$\varphi_l = 1 - 0.08 \sqrt{\frac{l_0}{D - 4}} \quad (6)$$

式中, $\frac{l_0}{D}$ 为构件长径比。

2 荷载和抗力统计参数

在对上述钢管-钢管高强混凝土轴压长柱极限承载力计算公式进行可靠度分析前,必须确定有关计算变量的统计参数,决定构件可靠度的因素是荷载效应和构件抗力,而对荷载效应和构件抗力起主要影响的有荷载变异性,计算模式不定性,材料性能不定性及构件几何参数不定性等。

2.1 荷载的统计分析

按照《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068-2001)^[10]的有关规定,在分析结构的可靠度时,取 3 种最常见的荷载效应组合,即: $S_G + S_{L办}$ 、 $S_G + S_{L住}$ 和 $S_G + S_{LW}$ 。这里, S 为荷载效应,下标 G 、 L 和 W 分别代表永久荷载、可变荷载和风荷载,“住”是指住宅建筑的楼面活荷载,“办”是指办公室活荷载。表 1 列出了恒载和各可变荷载的统计参数^[11]。

表 1 随机变量的统计特性

项目	基本变量	符号	分布类型	均值系数	变异系数
荷载 变异性	恒载	S_G	正态分布	1.060	0.070
	办公室活载	$S_{L办}$	极值 I 型分布	0.700	0.290
	住宅活载	$S_{L住}$	极值 I 型分布	0.859	0.233
	风荷载	S_{LW}	极值 I 型分布	0.999	0.193
材料性能 不定性	C40	f_c	正态分布	1.350	0.160
	C60	f_c	正态分布	1.310	0.130
	C80	f_c	正态分布	1.250	0.090
	Q235	f_y	对数正态分布	1.080	0.080
	Q345	f_y	对数正态分布	1.090	0.070

2.2 结构抗力的统计分析

结构构件的抗力是构件材料的力学性能和几何关系的函数。影响结构构件抗力的因素很多,在分析结构构件可靠度时经常考虑的主要因素有3个:材料性能的不定性、几何参数的不定性和构件计算模式的不定性^[12]。这些因素一般都是随机变量,因此结构构件抗力经常是多元随机变量的函数,要直接获得各种结构构件抗力的统计资料并确定起统计参数和分布类型是比较困难的。通常现对影响结构构件抗力的各种主要因素分布进行统计分析,确定其统计参数,然后通过抗力与各有关因素的函数关系推导得所需统计参数。

2.2.1 材料性能及构件几何参数不定性 该文在分析钢骨-钢管高强混凝土轴压长柱的可靠度时,混凝土和钢材的材料性能不定性统计参数可参考有关文献进行取值^[13-15],在此一并在表1中列出。构件几何参数不定性对抗力的影响主要指构件截面几何尺寸的影响,由于钢骨-钢管高强混凝土组合柱截面几何尺寸的精度取决于钢材加工精度,与混凝土浇注质量无关,因此,文中钢骨、钢管及混凝土截面的几何尺寸统计参数统一按钢结构取用,其平均值为1.00,变异系数为0.05^[13-14]。

2.2.2 构件计算模式不定性 构件计算模式不定性须根据钢骨-钢管高强混凝土轴压长柱承载力实测值和计算值的比值来确定,按照概率统计的方法,分别计算出计算模式不定性系数的平均值(μ_{KP})和变异系数(δ_{KP})。文献[1]和文献[8]分别进行了4根和11根钢骨-钢管高强混凝土轴压中长柱的试验研究,混凝土抗压强度设计值 f_c 在36.8~53.1之间变化,长细比 λ 在28~48之间变化,配骨指标 ρ 在0.000~1.102之间变化,套箍系数 θ 在0.363~0.936之间变化^[1,8],通过计算可得本文可靠度分析中组合轴压长柱承载力公式(1)、公式(3)和公式(5)计算模式不定性统计参数的平均值(μ_{KP})分别为1.056,1.130和1.060,变异系数(δ_{KP})分别为0.042,0.040和0.040。

2.2.3 综合的结构抗力随机变量统计参数 钢骨-钢管高强混凝土轴压长柱抗力表达式为:

$$R = K_P \cdot R_P \quad (7)$$

式中, R_P 为前面所列出的轴压长柱抗力函数式,即公式(1)、公式(3)和公式(5),它是钢骨、钢管和混凝土材料性能及截面几何特性的函数,包含了钢骨、钢

管和混凝土3种材料性能的不定性和几何特性不定性; K_P 为组合轴压长柱计算模式的不确定性。

根据随机变量函数数字特征运算规则

$$\mu_R = \mu_{KP} \cdot \mu_{RP} \quad (8)$$

$$\delta_R^2 = \delta_{KP}^2 + \delta_{RP}^2 \quad (9)$$

式中, μ_R , δ_R 分别为组合柱抗力的平均值和变异系数; μ_{KP} , δ_{KP} 分别为组合柱计算模式不定性的平均值和变异系数; μ_{RP} , δ_{RP} 分别为组合柱抗力函数的平均值和变异系数。

由于直接获得结构构件抗力的统计资料,并确定其统计参数和分布类型比较困难,通常应用数学分析方法通过抗力与各有关因素的函数关系,推求出结构构件抗力的统计参数。在推求结构构件抗力及其各项影响因素的统计参数时,通常采用下列近似公式^[12]:

设随机变量 Y 为影响因素随机自变量 X_i ($i=1,2,\dots,n$)的函数,即

$$Y = F(X_i)(i=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

则有

$$\mu_Y \approx F(\mu_{X_i})(i=1,2,\dots,n) \quad (11)$$

$$\sigma_Y^2 \approx \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial F(X_i)}{\partial X_i} \Big|_{\mu} \right]^2 \cdot \sigma_{X_i}^2 (i=1,2,\dots,n) \quad (12)$$

$$\delta_Y = \frac{\sigma_Y}{\mu_Y} \quad (13)$$

其中, μ_{X_i} 、 σ_{X_i} 分别为随机变量 X_i 的平均值和标准差, $\Big|_{\mu}$ 表示函数 $F(\cdot)$ 中的变量在其平均值处取值。这样便可分别求得公式(1)、公式(3)和公式(5)的抗力函数统计参数表达式。

3 可靠度分析

3.1 可靠度分析方法

该文采用以可靠度理论为基础,以分项系数形式表达的概率极限状态设计方法^[12]对钢骨-钢管高强混凝土轴压长柱极限承载力公式进行可靠度校核分析。极限状态方程(功能函数)为

$$Z = R - \gamma_0 S \quad (14)$$

其中, γ_0 为结构重要性系数,结构安全等级按II级考虑, $\gamma_0=1$;S为承载力极限状态的荷载效应组合的设计值(作用效应);R为结构构件的承载力设计值(抗力)。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》^[10],作用效应S可表达为:

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_L S_{Lk} \quad (15)$$

其中 S_{GK} , S_{LK} 分别是恒载效应标准值和可变荷载效应标准值, $\gamma_G = 1.2$, $\gamma_L = 1.4$ 。考虑永久荷载与 3 种可变荷载组合的情况, 即: (1) $S_G + S_{L办}$; (2) $S_G + S_{L住}$; (3) $S_G + S_{Lw}$ 。

由于《建筑结构设计统一标准》仅对明确脆性破坏或延性破坏的结构构件提出了可靠度指标要求, 考虑到钢管-钢管高强混凝土轴压长柱在破坏时, 一般均表现出良好的塑性性质, 借用《建筑结构设计统一标准》对延性材料可靠度指标的要求, 暂规定钢管-钢管高强混凝土轴压长柱的可靠指标要求为 3.2。通过对表 1 中的非正态分布变量进行当量正态化后, 采用验算点法对钢管-钢管高强混凝土轴压长柱各极限承载力公式进行可靠度分析, 可靠度分析计算步骤可参见有关资料^[11-12]。

3.2 计算结果及参数影响分析

考虑工程实际情况, 进行可靠度分析的基本参

数为: 钢管外径为 500 mm, 钢管壁厚有 8 mm、12 mm 及 16 mm 3 种, 钢管型号有工 25b、工 32b 及工 36b 3 种, 钢管及钢管材质有 Q235 及 Q345, 混凝土强度等级有 C40、C60 及 C80 3 种, 长细比 λ 变化范围为 20~140。

表 2 列出了钢管-钢管高强混凝土轴压长柱承载力 β 值计算结果, 表 2 中每个数据均为 2 种钢材材质、3 种钢管壁厚、3 种钢管截面面积、3 种荷载组合和 30 种荷载效应比情况下 720 个可靠度数据的总平均值。结果表明: 按公式(1)、公式(3)和公式(5)计算的组合轴压长柱承载力可靠指标 β 的最小值分别为 2.195、3.059、3.951, 最大值分别为 3.993、4.435、4.248, 均值分别为 3.076、3.713、4.108, 不难看出, 在工程常用长细比范围 ($20 < \lambda < 80$) 内, 各公式的可靠指标均能满足“规范”(GB 50068-2001)要求。

表 2 钢管-钢管高强混凝土轴压长柱承载力 β 计算值

长细比 λ	C40			C60			C80		
	公式(1)	公式(3)	公式(5)	公式(1)	公式(3)	公式(5)	公式(1)	公式(3)	公式(5)
20	3.796	3.362	3.987	3.909	3.961	4.132	3.993	4.435	4.247
40	3.712	3.299	3.988	3.823	3.887	4.133	3.905	4.352	4.248
60	3.435	3.233	3.984	3.538	3.809	4.129	3.614	4.265	4.244
80	2.963	3.167	3.977	3.051	3.732	4.122	3.117	4.179	4.236
100	2.550	3.108	3.970	2.626	3.662	4.114	2.683	4.100	4.228
120	2.307	3.067	3.960	2.376	3.614	4.104	2.427	4.047	4.218
140	2.195	3.059	3.951	2.261	3.604	4.095	2.310	4.035	4.209

图 2—图 7 分别给出了可变荷载类型、混凝土强度等级、钢管壁厚、钢管截面面积、钢材屈服强度及长细比对可靠度指标 β 的影响情况。由图 2 可以看出, 可靠指标 β 随可变荷载组合类型的变化而变化, 在 $S_G + S_{L办}$ 组合下可靠指标 β 值最大, $S_G + S_{L住}$ 次之, $S_G + S_{Lw}$ 最小。由图 3 可以看出, 随混凝土强度等级的提高可靠指标 β 有所增大, 其中按式(3)计算的 β 变化幅度最大。由图 4 可以看出, 长柱可靠指标 β 随钢管壁厚 t 的增加而有所降低, 其中按式(3)计算的 β 降低幅度最大。由图 5 可以看出, 钢管截面面积对长柱的可靠指标 β 无明显影响。由图 6 可以看出, 钢管及钢管屈服强度对按式(1)和式(5)计算的可靠指标 β 影响不明显; 按式(3)计算的可靠

指标 β 随钢管和钢管屈服强度的提高而降低。由图 2—图 6 可知, 按各长柱承载力计算公式计算的可靠指标 β 随荷载效应比 ψ 的增大均呈现为先增加后降低的趋势, 其中按式(3)计算的组合轴压长柱承载力可靠指标 β 随荷载效应比 ψ 的变化幅度明显小于其余 2 式。由图 7 可以看出, 按式(1)计算的可靠指标 β 随构件长细比的增大而呈现出显著降低的趋势, 且长细比 λ 在 60~120 的范围内变化幅度最大; 按式(3)计算的可靠指标 β 随构件长细比的增大而呈现出线性降低的规律, 且可靠指标 β 随钢管壁厚的增加明显减小; 不同构件长细比下按式(5)计算的可靠指标 β 非常接近, 说明长细比对可靠指标 β 的影响不明显, 可靠指标 β 只是随钢管壁厚的增加稍有降低。

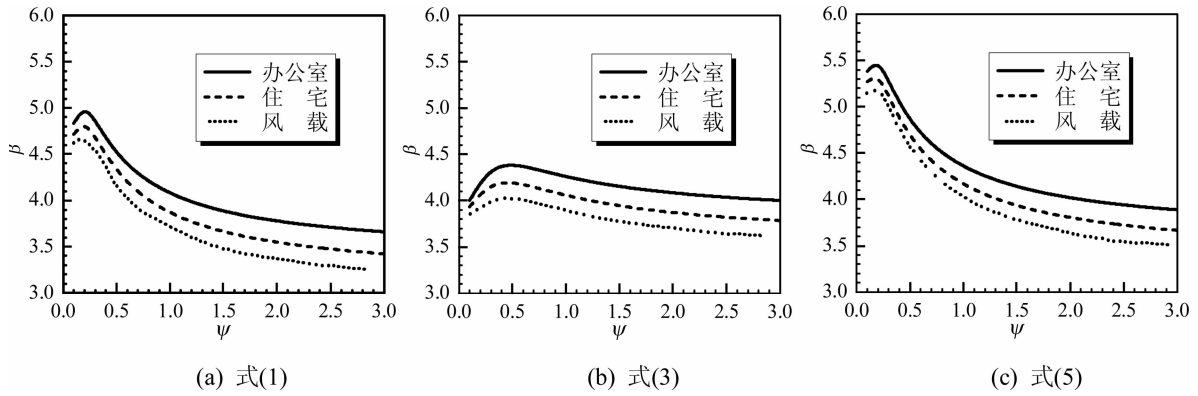


图2 可变荷载组合类型对可靠指标 β 的影响 ($t=12, C60, I32b, Q235$)

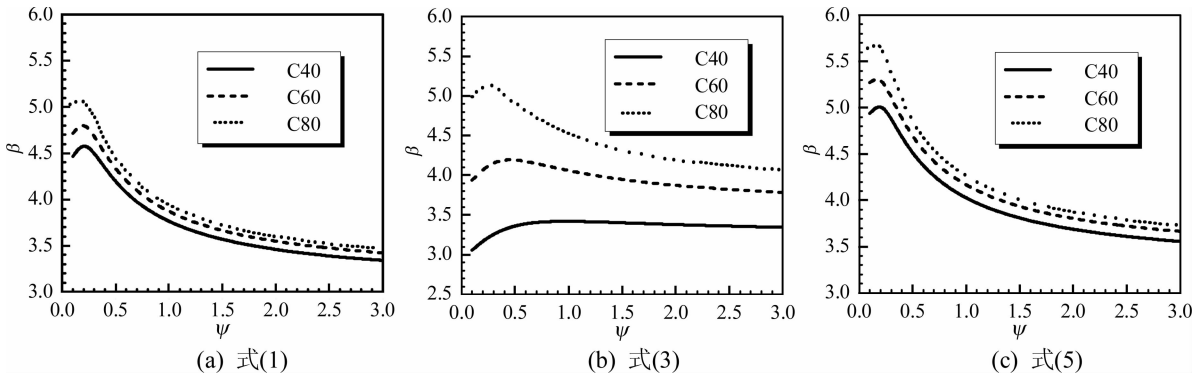


图3 混凝土强度等级对可靠指标 β 的影响 ($t=12, I32b, Q235$)

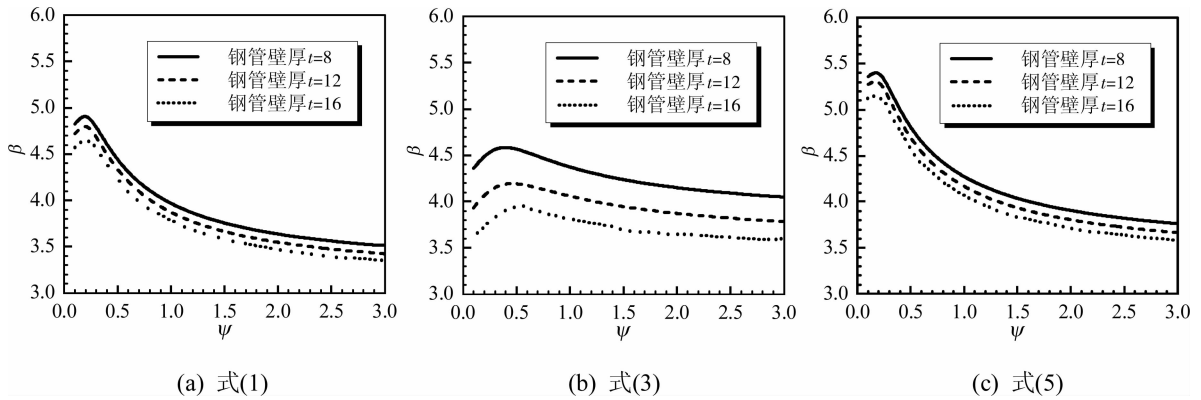


图4 钢管壁厚对可靠指标 β 的影响 ($C60, I32b, Q235$)

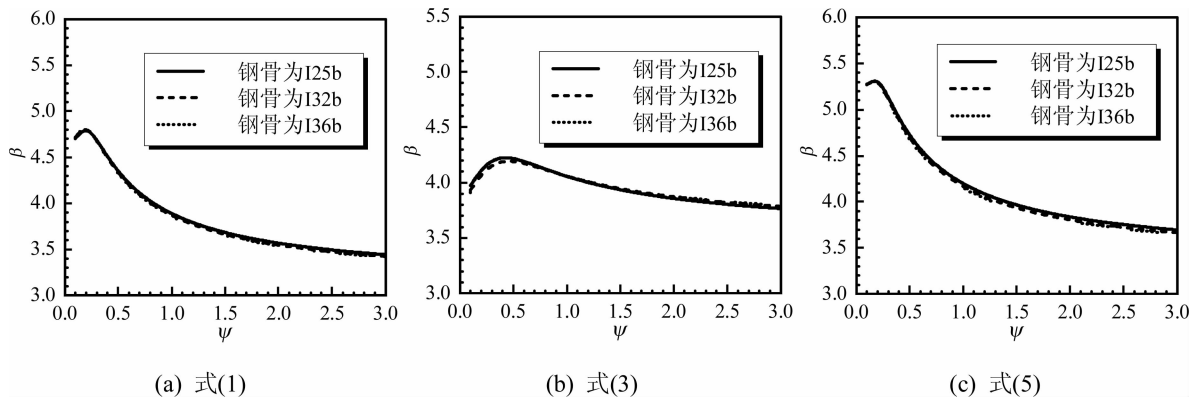
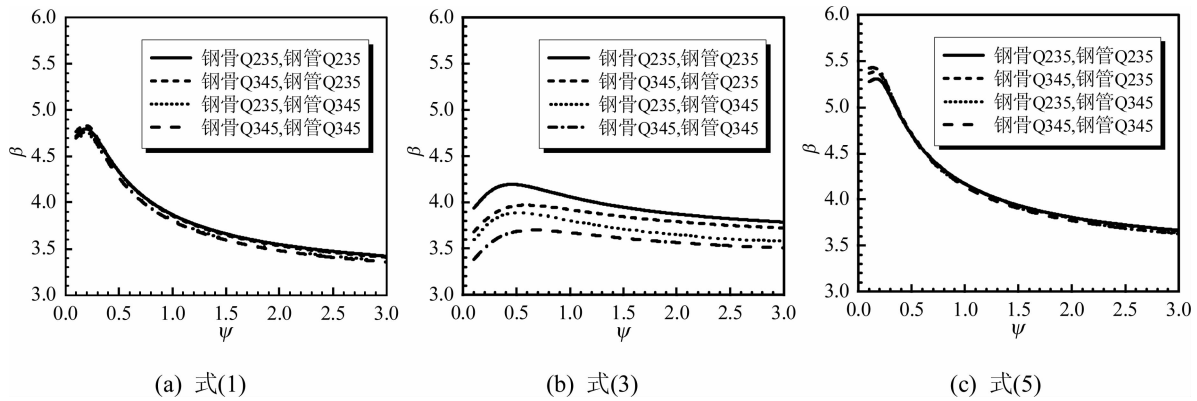
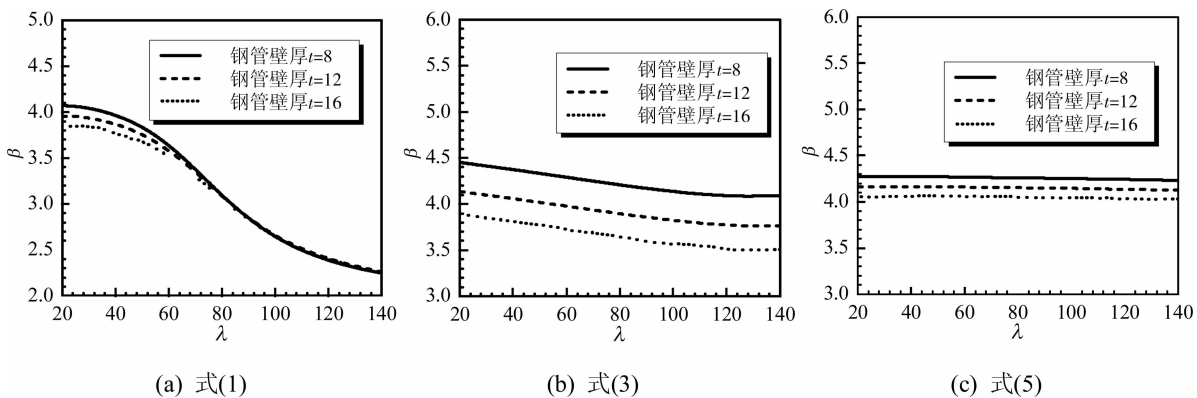


图5 钢骨截面面积对可靠指标 β 的影响 ($t=12, C60, Q235$)

图 6 钢材屈服强度对可靠指标 β 的影响 ($t=12, C60, I32b$)图 7 长细比 λ 对可靠指标 β 的影响 ($C60, I32b, Q235$)

5 结 论

采用一次二阶矩法(JC法)对不同学者提出的钢管-钢管高强混凝土轴压长柱极限承载力公式进行了可靠度分析,研究了可变荷载组合类型、荷载效应比、混凝土强度等级、钢管壁厚、钢管截面面积、钢材屈服强度及长细比对组合柱承载力可靠指标的影响,在所研究参数范围内,得到以下结论:

1)在工程常用长细比范围($20 < \lambda < 80$)内,各公式的可靠指标均能满足《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068-2001)对延性构件可靠度指标的要求。

2)在 $S_G + S_{L_{办}}$ 组合下长柱可靠指标 β 值最大, $S_G + S_{L_{住}}$ 次之, $S_G + S_{L_{w}}$ 最小;各长柱承载力计算公式的可靠指标 β 随荷载效应比 ψ 的增大均呈现出先增加后降低的趋势,其中按式(3)计算的可靠指标 β 随荷载效应比 ψ 的变化幅度明显小于其余 2 式。

3)可靠指标 β 随混凝土强度等级的提高而增大,随钢管壁厚 t 的增加而有所降低,其中按式(3)计算的 β 变化幅度最大;钢管截面面积对长柱的可靠指标 β 无明显影响;钢管及钢管屈服强度对按式

(1)和式(5)计算的可靠指标 β 影响不明显;按式(3)计算的可靠指标 β 随钢管和钢管屈服强度的提高而降低。

4)按式(1)计算的可靠指标 β 随构件长细比的增大而呈现出显著降低的趋势,且长细比 λ 在 60~120 的范围内变化幅度最大;按式(3)计算的可靠指标 β 随构件长细比的增大而呈现出线性降低的规律;不同构件长细比下按式(5)计算的可靠指标 β 非常接近,说明长细比对可靠指标 β 的影响不明显。

参考文献:

- [1] 王清湘,赵大洲,关萍. 钢管-钢管高强混凝土轴压组合柱受力性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 45-49.
WANG QING-XIANG, ZHAO DA-ZHOU, GUAN PING. Study on the mechanical properties of axially loaded steel tubular columns filled with steel-reinforced high-strength concrete [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(6): 44-49.
- [2] 朱美春,王清湘,冯秀峰. 轴心受压钢管-方钢管自密实高强混凝土短柱的力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 35-41.

- ZHU MEI-CHUN, WANG QING-XIANG, FENG XIU-FEN. Behavior of axially-loaded square steel tube short columns filled with steelreinforced self-consolidating high-strength concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(6):35-41.
- [3] WANG QING-XIANG, ZHAO DA-ZHOU, GUAN PING. Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete[J]. Journal of Engineering Structures, 2004, 26(2):907-915.
- [4] 杨包生. 钢管-钢管混凝土组合柱受力性能的研究[D]. 包头:内蒙古科技大学土木工程学院, 2006.
- [5] HE YI-BIN, LIU HU-IHONG, LIU XING-YAN, et al. Mechanics of columns composed of structural steel and concrete-filled steel tube [J/OL]. Sciencepaper Online 2005.5. http://211.68.23.74/downloadpaper.php?serial_number=heyibin-7&type=2
- [6] HE YI-BIN, XIAO A-LIN. Limit analysis of steel tubular columns filled with structural steel [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Steel-Concrete Composite and Hybrid Structures, August 15-17, 2006, Harbin, China; 544-550.
- [7] 尧国皇,孙素文,李秀明. 轴心受压型钢-钢管混凝土柱力学性能的研究[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(6): 26-32.
- YAO GUO-HUANG, SUN SU-WEN, LI XIU-MING. Research on hollow steel tube columns filled with steel-reinforced concrete subjected to axial-compression[J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(6): 26-32.
- [8] 肖阿林. 钢管-钢管高性能混凝土轴压组合柱受力性能与设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2009.
- [9] HE YI-BIN, XIAO A-LIN. Reliability analysis of load-bearing capacity of CFT-encased steel columns [C]// Proceedings of the 10th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts. October 3-6, 2008, Changsha, China; 1354-1359.
- [10] GB 50068-2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [11] 贡金鑫. 工程结构可靠度计算方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2003.
- [12] 张新培. 建筑结构可靠度分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [13] 余志武, 贺飒飒. 钢管混凝土短柱极限承载力可靠度分析[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 139-144.
- YU ZHI-WU, HE SA-SA. Reliability analysis of ultimate bearing capacity of concrete-filled tubular steel stub columns [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 139-144.
- [14] 尧国皇, 韩林海. 《钢管混凝土结构技术规程》(DBJ13-51-2003)设计方法及可靠度[J]. 工业建筑, 2006, 36(1): 66-70.
- YAO GUO-HUANG, HAN LIN-HAI. Design method of technical specification for concrete-filled steel tubular (DBJ13-51-2003) and reliability analysis[J]. Industrial Construction, 2006, 36(1): 66-70.
- [15] 刘红梁, 陆钦年, 欧进萍. 高强混凝土材料性能统计参数的推断[J]. 湖南科技大学学报, 2004, 19(3): 48-52.
- LIU HONG-LIANG, LU QIN-NIAN, OU JIN-PING. Inferred on statistic parameters of material properties of high-strength concrete[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2004, 19(3): 48-52.

(编辑 王秀玲)