

文章编号: 1005-0523(2008)06-0032-05

# 钢管混凝土纯弯构件可靠度分析

蔡小萍<sup>1</sup>, 陈梦成<sup>2</sup>, 陈俊<sup>1</sup>

(1. 江西蓝天学院 建筑工程系, 江西 南昌 330098; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 直接将影响抗力及荷载效应不定性的各变量视为基本变量, 应用可靠度最优化方法, 对《钢管混凝土结构技术规程》DBJ 13-51-2003 中钢管混凝土纯弯构件的承载力公式进行了可靠度分析, 并且研究了不同混凝土标号、钢号、荷载组合、荷载效应比以及含钢率等变异因素对钢管混凝土纯弯构件可靠度的影响。

**关键词:** 优化; 钢管混凝土; 纯弯构件; 可靠度

中图分类号: TU312.1; TU392.3

文献标识码: A

由于钢管混凝土构件承载力计算公式一般较复杂, 其极限状态函数大都呈高次非线性和复杂性, 同时影响抗力和荷载不定性变量较多且并不都服从正态分布, 使得直接利用基本随机变量求解可靠指标和验算点变得十分困难。为了简化钢管混凝土结构可靠度的计算, 文献[1~3]将计算抗力视为一个综合的基本随机变量, 用一次二阶矩法进行求解。这种近似处理的变量代换方法的误差随着非线性化程度的提高而增大。为此, 本文直接将影响抗力及荷载效应不定性的各变量视为基本变量, 即“直接变量法”, 应用可靠度最优化方法, 对钢管混凝土纯弯构件承载力公式进行了可靠度计算, 并研究了不同混凝土标号、钢号、荷载组合、荷载效应比以及含钢率等变异因素对钢管混凝土纯弯构件可靠度的影响。

## 1 可靠度指标优化数学模型的建立

由一次二阶矩理论可知, 可靠度指标的几何意义是: 在标准正态坐标系中原点到极限状态曲面的最短距离<sup>[4]</sup>。因此, 设由  $n$  个相互独立的基本随机变量构成的极限状态方程为

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1)$$

引进相互独立标准正态随机变量  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , 由等概率映射变换原则, 基本随机变量  $X_i (i=1, 2, \dots, n)$  由标准正态随机变量  $Y_i (i=1, 2, \dots, n)$  表示为

$$X_i = F_i^{-1}(\Phi(Y_i)) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中:  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布函数;  $F_i^{-1}(\cdot)$  为分布函数  $F_i(\cdot)$  的反函数。

则可靠度指标计算的优化数学模型可表示为

$$\beta = \min\{\sqrt{Y^T Y} | h(Y) = 0\} \quad (3)$$

其中:  $\beta = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}$  为目标函数;  $h(Y) = 0$  为非线性约束条件。

求解可靠度指标  $\beta$  值的常用方法是 JC 法。JC 法是采用当量正态法将随机变量中非正态分布“当量”化为正态分布, 并将功能函数在验算点作为迭代初始值, 求解结构可靠度时可能存在的迭代不收敛的情况。本

收稿日期: 2008-08-16

基金项目: 江西省高校结构工程重点实验室项目

作者简介: 蔡小萍(1978-), 女, 江西永修人, 助教, 工学硕士, 研究方向为结构安全性性能。

文利用 Matlab 的强大优化功能,通过调用 Matlab 优化工具箱中的优化命令[5],无需对变量求导,计算程序简单,并避免了 JC 法可能出现的不收敛现象.特别是当进行复杂问题的可靠度计算时,本法有明显的优越性.

## 2 钢管混凝土纯弯构件可靠度分析

### 2.1 极限状态函数的建立及其基本变量的选择

由《建筑结构设计统一标准》GB50068-2001 知,结构构件的极限状态函数为

$$Z = R - S_G - S_Q \quad (4)$$

其中:  $R$  为结构构件抗力;  $S_G$ 、 $S_Q$  分别为恒载效应和活载效应.

则相应的设计表达式为

$$R_d = R(f, f_c, a_k, \dots) = S_d = \gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{QK} = (\gamma_G + \gamma_Q \rho) S_{GK} \quad (5)$$

式中:  $R_d$ 、 $S_d$  分别为构件抗力、荷载效应设计值;  $R(\cdot)$  为抗力函数;  $f$ 、 $f_c$ 、 $a_k$  分别为混凝土强度设计值和几何参数标准值;  $S_{GK}$ 、 $S_{QK}$  分别为恒载效应、活载效应标准值;  $\gamma_G$ 、 $\gamma_Q$  分别为恒载、活载分项系数,分别取 1.2、1.4;

$\rho = \frac{S_{QK}}{S_{GK}}$  为荷载效应比,本文按 0.25、0.5、1.0、2.0 分别计算.

由文献[6]给出的钢管混凝土纯弯构件承载力计算公式为

$$R_p = M_u = \gamma_m W_{scm} f_{sc} \quad (6)$$

其中:

$$\gamma_m = \begin{cases} 1.1 + 0.48 \ln(\xi + 0.1) & (\text{圆钢管混凝土}) \\ 1.04 + 0.48 \ln(\xi + 0.1) & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{sc} = \begin{cases} (1.14 + 1.02\xi_0) f_{ck} & (\text{圆钢管混凝土}) \\ (1.18 + 0.85\xi_0) f_{ck} & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases} \quad (8)$$

$W_{scm}$  为构件截面抗弯模量;

$\xi$  为约束效应系数标准值;  $\xi_0$  为约束效应系数计算值;

$f_{ck}$  为混凝土抗压强度标准值;  $f$  为钢材设计值;  $f_c$  为混凝土抗压强度设计值.

将(7)、(8)代入(6)式得

$$R_p = \begin{cases} \left( (1.1 + 0.48 \ln(\alpha \frac{f_y}{f_{ck}} + 0.1)) \right) (1.14 f_c + 1.02 \alpha f) W_{scm} & (\text{圆钢管混凝土}) \\ \left( (1.04 + 0.48 \ln(\alpha \frac{f_y}{f_{ck}} + 0.1)) \right) (1.18 f_c + 0.85 \alpha f) W_{scm} & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  为含钢率,是钢材截面面积与核心混凝土截面面积的比值;  $f_y$  为钢材屈服极限.引入的无量纲基本随机变量如下:

$$X_{R_p} = \frac{R}{R_p}, X_\alpha = \frac{\alpha}{\alpha_d}, X_f = \frac{f}{f_y}, X_{f_c} = \frac{f_c}{f_{ck}}, X_{S_G} = \frac{S_G}{S_{GK}}, X_{S_Q} = \frac{S_Q}{S_{QK}}$$

$\alpha_d$  为含钢率的设计值;各无量纲基本随机变量物理意义及其统计参数均按文献[7]取用.

为了求解方便,文献[1~3]是将  $R_p$  视为一个综合的基本随机变量,其统计参数利用误差传递公式求得.应用一次二阶矩方法,进行可靠计算.这种方法计算结果的误差会随着非线性程度的提高而增大.本文直接将影响抗力及荷载效应不定性的各变量视为基本随机变量并引入极限状态函数,提高计算精度.

把上述各无量纲变量引入(4)式,则得钢管混凝土纯弯构件的极限功能函数为

$$Z = \begin{cases} X_{K_p} \left( 1.1 + 0.48 \ln(\alpha_d X_\alpha \frac{f_y}{f_{ck}} + 0.1) \right) (1.14 f_{ck} X_{f_c} + 1.02 \alpha_d X_\alpha f_y X_f) W_{scm} - S_{GK} X_{S_G} - S_{QK} X_{S_Q} & (\text{圆钢管砼}) \\ X_{K_p} \left( 1.04 + 0.48 \ln(\alpha_d X_\alpha \frac{f_y}{f_{ck}} + 0.1) \right) (1.18 f_{ck} X_{f_c} + 0.85 \alpha_d X_\alpha f_y X_f) W_{scm} - S_{GK} X_{S_G} - S_{QK} X_{S_Q} & (\text{方钢管砼}) \end{cases} \quad (10)$$

在进行钢管混凝土纯弯构件的可靠度分析中选用了 Q235、Q345 两种钢材和 C30、C40、C50 三种混凝土强度等级,取三种最常见的荷载效应组合,即  $S_G + S_{L办}$ 、 $S_G + S_{L住}$ 、 $S_G + S_W$ ,  $S$  为荷载效应,下标  $G$ 、 $L$ 、 $W$  分别代表永久荷载、可变荷载和风荷载,住指住宅楼盖活荷载,办指办公室活荷载。

## 2.2 可靠指标计算结果与分析

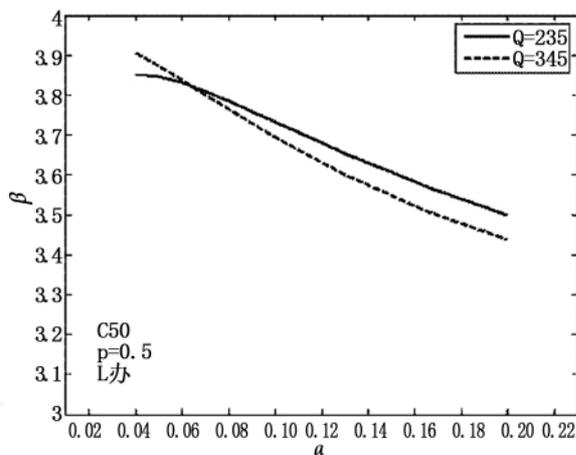
通过上述分析,用 Matlab 编程计算了 Q235、Q345 钢材与 C30、C40、C50 混凝土组合时,在 17 种含钢率(含钢率为 0.04~0.2 且按 0.01 为增量变化)和三种荷载组合时共 51 个可靠指标  $\beta$  数据对应不同的荷载效应比  $\rho$  下的总平均值,表 1 和表 2 分别给出了圆形钢管混凝土和方、矩形钢管混凝土的各种组合  $\beta$  的平均值;并研究了不同钢材类别、混凝土强度等级、荷载组合、荷载效应比以及含钢率等变异因素对钢管混凝土纯弯构件可靠度的影响,如图 1、图 2、图 3、图 4。

表 1 圆钢管混凝土  $\beta$  的总平均值

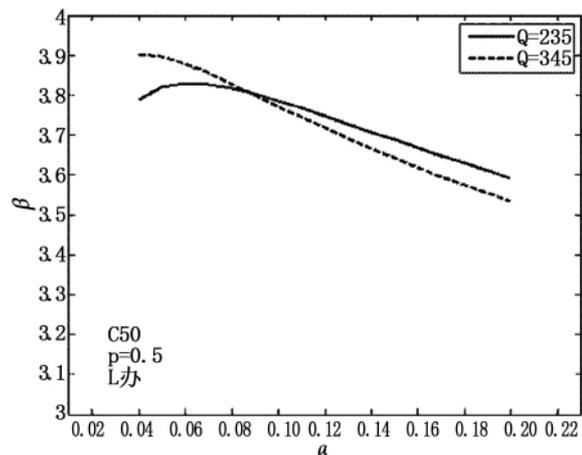
钢号	混凝土标号	荷载效应比 $\rho$			
		0.25	0.50	1.0	2.0
Q235	C30	3.560 9	3.695 1	3.709 7	3.618 3
	C40	3.784 9	3.910 6	3.892 9	3.770 3
	C50	4.014 6	4.129 1	4.075 4	3.921 6
Q345	C30	3.567 1	3.701 0	3.695 9	3.586 3
	C40	3.748 1	3.873 7	3.843 6	3.711 4
	C50	3.935 1	4.051 3	3.994 2	3.838 5

表 2 方钢管混凝土  $\beta$  的总平均值

钢号	混凝土标号	荷载效应比 $\rho$			
		0.25	0.50	1.0	2.0
Q235	C30	3.642 6	3.769 3	3.762 2	3.655 2
	C40	3.937 4	4.048 0	3.986 5	3.833 6
	C50	4.264 8	4.346 2	4.212 6	4.011 0
Q345	C30	3.711 8	3.829 9	3.779 6	3.640 4
	C40	3.957 1	4.057 1	3.960 5	3.787 1
	C50	4.228 8	4.301 1	4.147 1	3.936 8



(a) 圆钢管混凝土



(b) 方、矩形钢管混凝土

图 1 不同钢材强度对  $\beta$  的影响

通过对《钢管混凝土结构技术规程》DBJ 13-51-2003 中钢管混凝土纯弯构件承载力计算公式进行可靠度分析,结果表明:

(1) 当 Q235、C30 材料组合时可靠指标的综合平均值取最小值为 3.168 7,但仍符合《建筑结构设计统一标准》对目标可靠度指标的要求,其它组合均比此值高,完全符合对可靠度的要求。

(2) 由所得结果可知,可靠性指标  $\beta$  值的大小与状态函数中各个不定性参数的变异系数有很大关系。对影响抗力项的材料强度不定性参数随变异系数的增大而减少;而对影响荷载效应的荷载不定性参数随变异系数的增大而增大。由于混凝土变异系数随强度的提高而显著减少,故混凝土强度等级对  $\beta$  的影响较大,且  $\beta$  随着混凝土强度的提高而提高;而钢材强度的变异系数随强度的提高变化不大,故钢材类别对  $\beta$  的影响不大;当恒载和各活载组合时,以与办公室活载组合的情况下  $\beta$  值最高,住宅活载次之,以风荷载最低;荷载效应比  $\rho$  变化对  $\beta$  的影响则没有明显规律,当  $\rho$  较大或较小时  $\beta$  值都较低,这是由于恒载的平均值较活载大,但变异系数要较活载为小的缘故。这与文献 [1~2] 得出的结果和反映的规律是基本一致的,说明了用直接变量法计算的有效性。

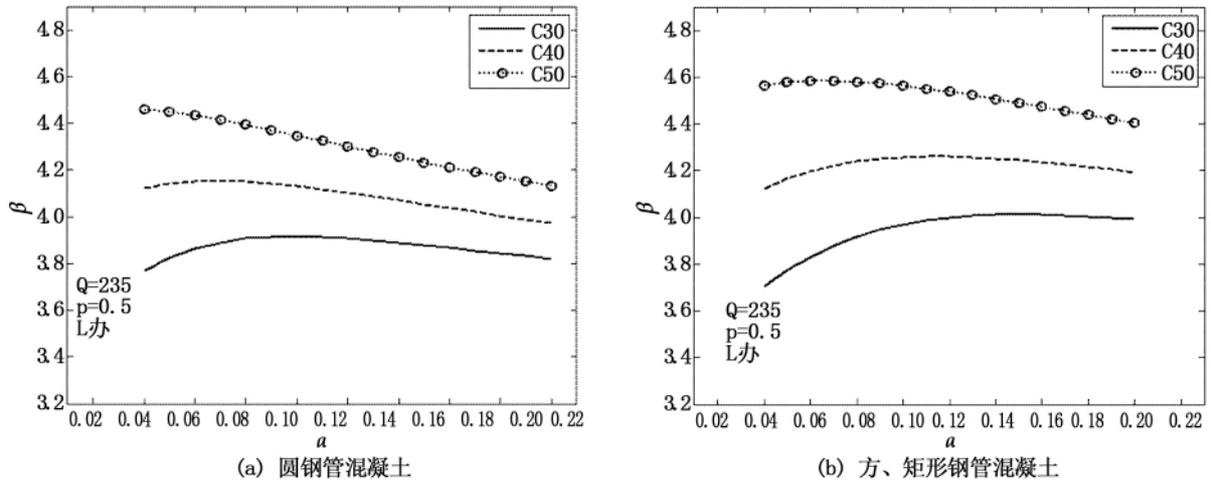


图 2 不同混凝土强度对  $\beta$  的影响

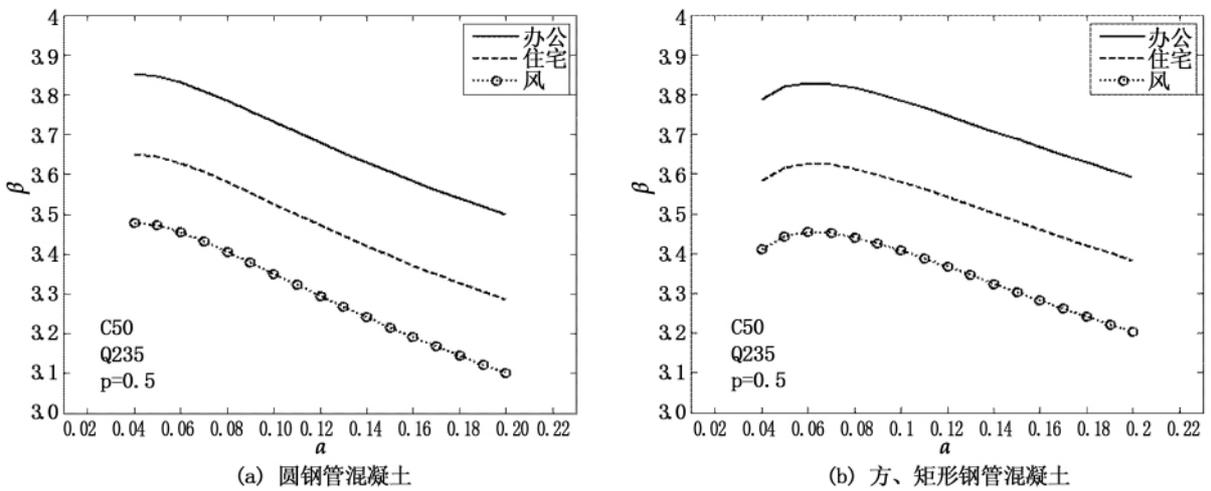


图 3 不同活荷载组合对  $\beta$  的影响

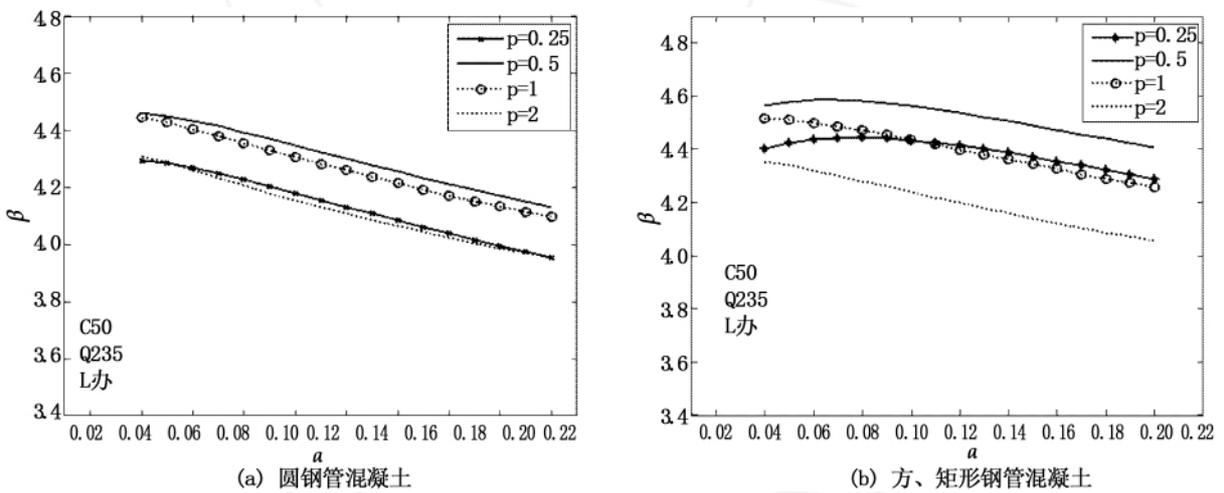


图 4 不同荷载效应比对  $\beta$  的影响

### 3 结 语

(1) 直接将影响抗力及荷载效应不定性的各变量视为基本变量并应用可靠度最优化方法计算可靠指标,在整个求解过程中,只用到了由各基本变量组成的极限状态函数构成的目标函数,既提高了计算精度又简化了计算过程。

(2) 用该法对钢管混凝土纯弯构件可靠度进行分析计算,所反映出的规律与一次二阶矩求得的规律是一致的,说明了该法的有效性和结果的准确性,因此该方法可推广用于钢管混凝土其它的基本构件的可靠度分析。

#### 参考文献:

- [1] 徐晓飞,钟善桐. 钢管混凝土轴压短柱、轴压长柱和弯曲构件可靠度分析[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报,1993,30(26):40-46.
- [2] 陶忠,韩林海,杨华. 钢管混凝土构件设计计算及可靠度分析[J]. 工业建筑,2000,30(6):1-6.
- [3] 涂凌,刘小渝. 公路工程钢管砼压弯构件可靠性分析[J]. 重庆交通学院学报,2005,24(6):48-50.
- [4] 张新培. 建筑结构可靠度分析与设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [5] 薛定宇,陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [6] DBJ13-51-2003. 钢管混凝土结构技术规程[S].
- [7] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2004.

## An Analysis on the Reliability of Concrete Filled Steel Tubular Pure Bending Memembers

CAI Xiao\_ping<sup>1</sup>, CHEN Meng\_cheng<sup>2</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>

(1. Department of Architecture Engineering, Jiangxi Bluesky University, 330098; 2. School of Civil Engineering & Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** By treating all the variables that affect the indeterminacies of resistance and the load effects as fundamental variables and using reliability optimization method, the reliability of the pure bending member formulas adopted in the "Code for technique of concrete filled steel tubular structure" DBJ 13\_51\_2003 is analyzed. At the same time, the influences of the different grades of material strength, ratios of load effect, combination of loads and the change of ratios of steel on the reliability are studied.

**Key words:** optimization; concrete\_filled steel tube; pure bending members; reliability

(责任编辑:刘棉玲)