

圆钢管增强高强混凝土柱正截面承载力计算

刘 洁 ,王正中

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100)

摘要 根据塑性理论下限定理 ,针对工程中常用的对称配筋形式 ,推导出圆钢管增强的钢筋高强混凝土柱正截面承载力解析解。在大量计算分析的基础上 ,提出了当钢管直径与柱截面长边尺寸之比为 1/4 ~ 2/3、钢筋为 HRB335 级、全截面纵筋配筋率在 1% ~ 3% 之间时圆钢管增强钢筋高强混凝土柱正截面承载力的简化计算方法。试验验证和算例计算结果表明 ,采用该简化方法的计算结果与试验值接近 ,偏安全 ,计算过程更加简捷和实用。

关键词 圆钢管 ;高强混凝土 ;正截面承载力 ;承载力计算

中图分类号 :TU375.3 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2006)05-0030-04

Calculation of flexural strength for high-strength concrete columns reinforced with circular steel tubes//LIU Jie ,WANG Zheng-zhong(College of Water Conservancy and Construction Engineering , Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry , Yangling 712100 , China)

Abstract :Based on the lower limit principle of plastic theory , formulas are derived for calculating the flexural strength of high-strength concrete columns reinforced with steel tubes in the form of symmetrical reinforcement which is commonly used in engineering. Through a great deal of calculation and analysis , a simplified method for calculating the flexural strength of high-strength concrete columns is proposed under the condition that the ratio of tube diameter to the size of long side of column section is in the range of 1/4 ~ 2/3 , the grade of steel is HRB335 , and the axial reinforcement ratio is in the range of 1% ~ 3% . A case study shows that the calculated result of the simplified method is close to the experimental data , and that the method is simple in calculation and practical in engineering.

Key words :circular steel tube ;high-strength concrete ;flexural strength ;flexural strength calculation

高强混凝土是脆性材料 ,强度越高脆性越显著。对受压高强混凝土提供侧向约束可以提高其极限变形能力 ,改善其脆性。在 高强混凝土柱中增设一圆钢管 ,组成钢-高强混凝土组合柱的形式(截面形式如图 1 所示) ,这种圆钢管增强高强混凝土柱具有承载能力高、刚度大、抗震性能及防火性能好等优点 ,已被应用于实际工程中。

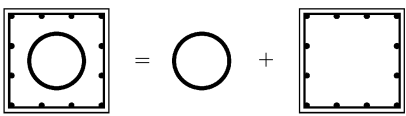


图 1 圆钢管增强高强混凝土柱截面形式

圆钢管增强钢筋高强混凝土压弯柱中 ,钢管混凝土位于组合柱的中央 ,其提供的抗弯承载力十分有限 ,加之内部受力状态极其复杂 :当为大偏心受压时 ,钢管中的内芯混凝土处于部分受拉部分受压的三向异号应力状态 ,大大降低了钢管对内部混凝土的约束作用 ;当为小偏心受压时 ,组合柱大部分截面

受压 ,且截面应力分布不均匀 ,受压区的钢管处于非均匀的纵向受压和环向受拉状态^[1] ,致使管内芯混凝土受到非均匀的套箍约束 ,其强度增长幅度较小。因此 ,在圆钢管增强钢筋高强混凝土柱正截面承载力计算时 ,可将该组合柱视作普通的钢骨混凝土柱 ,即不考虑钢管对内芯混凝土的增强作用 ,将钢管视作普通钢骨 ,从而大大简化计算过程。

目前 ,关于圆钢管增强钢筋高强混凝土构件正截面承载力的计算方法主要有两大类 :①数值方法 :根据材料的本构关系和某些假定 ,利用计算机进行数值分析 ,求得数值解。②实用计算方法 :一类是以数值计算结果为基础的经验公式法 ,该方法为欧洲钢结构协会的组合结构规范所采用 ;一类为类加强度法(也称叠加法) ,为日本建筑学会和土木学会所采用。

1 一般叠加方法计算步骤

圆钢管增强钢筋高强混凝土柱正截面承载力叠

加方法^[2] (见图 1) 的计算公式为

$$N = N_{rc} + N_{sa} \quad (1)$$

$$M = M_{rc} + M_{sa} \quad (2)$$

式中: N 、 M 分别为圆钢管增强高强混凝土柱承受的轴力和弯矩; N_{rc} 、 M_{rc} 分别为钢筋高强混凝土部分承担的轴力和弯矩; N_{sa} 、 M_{sa} 分别为钢管 (即钢骨) 部分承担的轴力和弯矩。其中轴力以压力为正, 拉力为负。

对于刚塑性体, 塑性力学中的下限定理^[3]指出, 在所有与静力可能的应力场相对应的荷载中, 极限荷载为最大。基于此定理, 可用一般叠加法计算圆钢管增强钢筋高强混凝土柱承载力, 其步骤为: 对于给定的轴力 N 值, 根据轴力平衡方程, 任意分配钢管部分和钢筋混凝土部分承担的轴力, 并用试分配给钢管部分和钢筋混凝土部分的轴力分别求得相应各部分的受弯承载力, 从多次试算结果中找出两部分受弯承载力之和的最大值, 即为在该轴力下的受弯承载力。该方法理论上较为完善, 但其计算过程过于复杂, 实际应用很不方便。本文针对工程中常用的对称配筋形式, 依据下限定理和叠加方法, 推导出该组合柱正截面承载力解析解, 解决直接采用一般叠加方法计算其正截面承载力反复试算的困难, 讨论了钢管部分和钢筋混凝土部分所承担轴力比例的影响因素, 并在大量计算分析的基础上, 提出该组合柱正截面承载力计算的简化方法。

2 圆钢管增强钢筋高强混凝土柱正截面承载力解析解

2.1 钢管部分的 $N_{sa} \sim M_{sa}$ 相关关系

钢管部分轴力和弯矩相关曲线如图 2 所示, 其表达式^[4]为

$$\frac{|N_{sa}|}{A_{sa}} + \frac{M_{sa}}{\gamma_s W_{sa}} = f_{ya} \quad (3)$$

式中: A_{sa} 、 W_{sa} 分别为钢管的截面面积和抗弯截面模量; f_{ya} 为钢管材料的强度设计值; γ_s 为钢管截面的塑性发展系数。

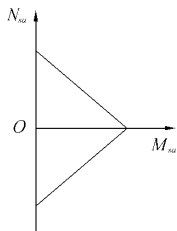


图 2 钢管部分 $N_{sa} \sim M_{sa}$ 相关关系

当 $N_{sa} > 0$ 时 (钢管受压), 将式 (1) 代入式 (3) 得

$$M_{sa} = \gamma_s W_{sa} f_{ya} - N \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa}} + N_{rc} \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa}} \quad (4)$$

当 $N_{sa} < 0$ 时 (钢管受拉), 则

$$M_{sa} = \gamma_s W_{sa} f_{ya} + N \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa}} - N_{rc} \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa}} \quad (5)$$

2.2 钢筋高强混凝土部分的 $N_{rc} \sim M_{rc}$ 相关关系

钢筋高强混凝土部分轴力和弯矩相关曲线如图 3 所示, 分大偏压和小偏压两种情况进行论述。

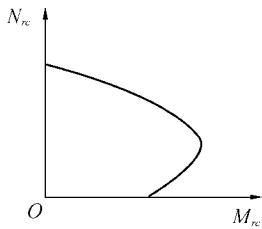


图 3 钢筋混凝土部分 $N_{rc} \sim M_{rc}$ 相关关系

2.2.1 钢筋高强混凝土部分为大偏压

当对称配筋的钢筋高强混凝土为大偏压时, 由承载力公式^[5]联立得

$$M_{rc} = f_y A_s (h_0 - a_s) + \frac{h}{2} N_{rc} - \frac{(N_{rc})^2}{2\alpha_1 f_c b} \quad (6)$$

式中: A_s (A_s') 和 f_y (f_y') 分别为受拉 (压) 钢筋的截面面积和钢筋的抗拉 (抗压) 强度设计值; b 和 h 分别为柱截面的短边和长边尺寸; f_c 为混凝土的抗压强度设计值; α_1 为受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值; h_0 为截面有效高度; a_s 为纵向受拉钢筋合力点至截面近边的距离。

2.2.2 钢筋高强混凝土部分为小偏压

当对称配筋的钢筋高强混凝土为小偏压时, 根据平衡条件, 承载力公式^[5]为

$$N_{rc} = \alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' - \sigma_s A_s \quad (7)$$

$$M_{rc} = \alpha_1 f_c b x (h_0 - 0.5x) + f_y' A_s' (h_0 - a_s) - N_{rc} (0.5h - a_s) \quad (8)$$

式中: σ_s 为正截面承载力计算中纵向钢筋 A_s 的应力; x 为混凝土受压区计算高度。

a. 全截面受压。取 $x = h$, 代入式 (8) 得

$$M_{rc} = \alpha_1 f_c b h \left(\frac{h}{2} - a_s \right) + f_y A_s (h_0 - a_s) - N_{rc} \left(\frac{h}{2} - a_s \right) \quad (9)$$

b. 部分截面受压。将 σ_s 用近似公式 $\sigma_s =$

$$\frac{\xi - \beta_1}{\xi_b - \beta_1} f_y \quad [6]$$

$$M_{rc} = \frac{h_0}{1 + \frac{f_y A_s}{\alpha_1 f_c b (\beta_1 - \xi_b)} h_0} \left(N_{rc} + \frac{f_y A_s \xi_b}{\beta_1 - \xi_b} \right) - \frac{\alpha_1 f_c b}{2 \left[\alpha_1 f_c b + \frac{f_y A_s}{(\beta_1 - \xi_b) h_0} \right]^2} \left(N_{rc} + \frac{f_y A_s \xi_b}{\beta_1 - \xi_b} \right)^2 + f_y A_s (h_0 - a_s) - N_{rc} \left(\frac{h}{2} - a_s \right) \quad (10)$$

式中: ε_c 为混凝土受压区相对高度; β_1 为矩形应力图受压区高度与中和轴高度的比值(取值参考文献[6]); ξ_b 为相对界限受压区高度(表达式见文献[6])

2.3 叠加原理解析解

2.3.1 假设钢筋高强混凝土部分为大偏压

根据叠加原理,对于给定的圆钢管增强钢筋混凝土柱截面参数及轴向力 N ,该柱承受的弯矩 M 将随钢筋高强混凝土部分所承受轴力 N_{rc} 的不同而改变,欲使弯矩 M 最大,令 $\frac{dM}{dN_{rc}} = 0$ 经整理后得

钢管受压时

$$N_{rc} = \left(\frac{h}{2h_0} + \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa} h_0} \right) \alpha_1 f_c b h_0 \quad (11)$$

钢管受拉时

$$N_{rc} = \left(\frac{h}{2h_0} - \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa} h_0} \right) \alpha_1 f_c b h_0 \quad (12)$$

令钢管的位置系数 $\lambda = \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa} h_0} \approx 0.33 \frac{D}{h}$ (D 为钢管的外径),对于工程中的常用截面, $h = 1.1 h_0$,取 $\frac{D}{h} = \frac{1}{4} \sim \frac{2}{3}$ [7-9],则 $\lambda = 0.08 \sim 0.22$,代入式(11)得 $N_{rc} \geq 0.63 \alpha_1 f_c b h_0$,此时钢筋混凝土部分为小偏压,与假设矛盾,说明在该情况下 M 没有极大值;将上述 λ 值代入式(12)得 $N_{rc} \leq 0.47 \alpha_1 f_c b h_0$,可见当钢筋混凝土部分为大偏压,钢管受拉时 M 有极大值。

2.3.2 假设钢筋高强混凝土部分为小偏压

仅考虑钢管受压(即 $N_{sa} > 0$)这种情况。当全截面受压时,将式(4)、式(9)代入式(2), M 为 N_{rc} 的一次函数, M 没有极大值。当部分截面受压时,将式(4)、式(10)代入式(2),令 $\frac{dM}{dN_{rc}} = 0$,并令钢筋混凝土部分的配筋指数 $\eta = \frac{f_y A_s}{\alpha_1 f_c b h_0}$,钢管的位置系数 $\lambda = \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa} h_0}$, $\frac{h_0 - a_s}{h_0} = 0.9$ 对常用的 HRB335 级钢筋,当混凝土等级在 C50 ~ C80 之间时,近似取 ξ_b 及 β_1 的平均值(其计算得到的 N_{rc} 值误差不到 1%), $\xi_b = 0.513$, $\beta_1 = 0.77$ 整理得

$$N_{rc} = \alpha_1 f_c b h_0 [1 + 1.9 \eta - (0.45 - \lambda)(1 + 3.9 \eta)^2] \quad (13)$$

当钢筋高强混凝土部分为小偏压时,由式(13)可知,影响 N_{rc} 值的主要因素有配筋指数 η 和位置系数 λ 。对钢筋高强混凝土柱,钢筋常用 HRB335 级,全截面纵筋配筋率常在 1% ~ 3% 之间[7],考虑施工等因素,一般 $\frac{D}{h} = \frac{1}{4} \sim \frac{2}{3}$,则 $\eta \approx 10 \frac{A_s}{b h_0} = 0.05 \sim$

0.15 , $\lambda \approx 0.33 \frac{D}{h} = 0.08 \sim 0.22$ 。图 4 为小偏压时 N_{rc} 随 η 、 λ 的变化图, N_{rc} 与 η 为二次抛物线关系,当 $\lambda = 0.08 \sim 0.22$ 及 $\eta \geq 0$ 时, N_{rc} 随 η 增大而减小,因此,由式(13)得 $N_{rc} \leq (0.55 + \lambda) \alpha_1 f_c b h_0$ ($\eta = 0$ 时 N_{rc} 最大),可见在小偏压范围内 M 有极值。另外,由于上述讨论为小偏压构件,因此式(13)计算结果应满足 $N_{rc} \geq \xi_b \alpha_1 f_c b h_0$ 。计算结果表明,当 $\lambda \geq 0.14$ 时,按式(13)计算的 N_{rc} 必满足 $N_{rc} \geq \xi_b \alpha_1 f_c b h_0$; $\lambda < 0.14$ 时,根据对满足 $N_{rc} = \xi_b \alpha_1 f_c b h_0$ 这一临界条件的若干 η 和 λ 值进行曲线拟合,得出要使在小偏压范围内 M 有极值,还应满足 $\eta < 0.987 \lambda + 0.005$ 这一条件。

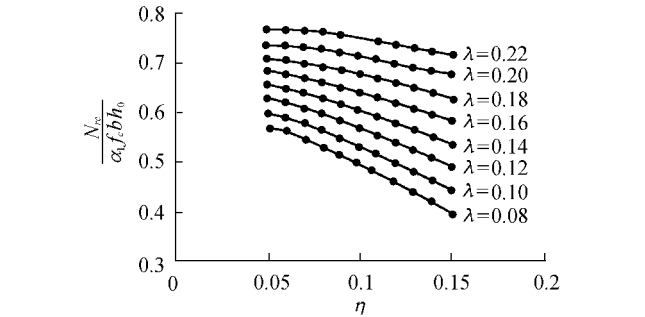


图 4 N_{rc} 与 η 、 λ 的关系

由图 4 可见,当 $\lambda = 0.08 \sim 0.22$ 及 $\eta = 0.05 \sim 0.15$ 时,钢筋混凝土部分承担的轴力 N_{rc} 随 η 单调递减, N_{rc} 值在 $(0.45 + 1.43 \lambda) \alpha_1 f_c b h_0$ ($\eta = 0.05$)及 $\xi_b \alpha_1 f_c b h_0$ 之间变化。若给定组合柱截面尺寸、材料强度、钢管管径和壁厚(λ 可知)及轴向力 N 时, η 越大,按式(13)计算的 N_{rc} 越小,其对应的 M_{rc} 越大;而 N_{rc} 越小, N_{sa} 越大, M_{sa} 越小,因而总弯矩 M 随不同 η 的变化不大。为简化计算,可近似取 N_{rc} 值为 $(0.45 + 1.43 \lambda) \alpha_1 f_c b h_0$ 和 $\xi_b \alpha_1 f_c b h_0$ 的平均值(尽管对 N_{rc} 的影响较大,但对该组合柱总弯矩 M 的误差不到 2%),即

$$N_{rc} = (0.48 + 0.72 \lambda) \alpha_1 f_c b h_0 \quad (14)$$

2.4 正截面强度的简化计算方法

根据上述推导,将计算方法汇总如下:
令 $N_1 = (0.55 - \lambda) \alpha_1 f_c b h_0$ (大偏压时 N_{rc} 的解析式,即式(12)), $N_2 = (0.48 + 0.72 \lambda) \alpha_1 f_c b h_0$ (小偏压时 N_{rc} 的解析式,即式(14))

- 当 $N < N_1$ 时,钢管部分受拉($N_{sa} < 0$):
$$N_{rc} = N_1 \quad N_{sa} = N - N_{rc}$$

若计算得 $|N_{sa}| > N_{sa, \text{t0}}$,应取 $N_{sa} = -N_{sa, \text{t0}}$, $N_{rc} = N + N_{sa, \text{t0}}$, $N_{sa, \text{t0}}$ 为钢管的轴拉极限承载力。
- 当 $N_1 \leq N \leq N_2$ 时,若取 $N_{rc} = N_1$,则 $N_{sa} > 0$,与大偏压时极值存在的前提条件相违背;若取 $N_{rc} = N_2$,则 $N_{sa} < 0$,与小偏压时极值存在的前提条件相违背,可知:

$$N_{rc} = N \quad N_{sa} = 0$$

c. 当 $N_2 < N \leq N_{rc0}$ 时, 钢管部分受压($N_{sa} > 0$):

$$N_{rc} = N_2 \quad N_{sa} = N - N_{rc}$$

若计算结果 $\lambda < 0.14$ 时, 应检验是否满足 $\eta < 0.987\lambda + 0.005$, 否则重新选择截面尺寸并设计计算, N_{rc0} 为钢筋混凝土的轴压极限承载力。

d. $N_{rc0} < N \leq N_{rc0} + N_{sa0}$ 时取 $N_{sa} = N_{sa0}$, $N_{rc} = N - N_{sa0}$, 式中 N_{sa0} 为钢管的轴压极限承载力。

e. 当 $N > N_{rc0} + N_{sa0}$ 时说明截面太小, 应重新拟定截面尺寸。

2.5 试验验证

用上述简化方法对文献 [10] 中的 8 根试件进行计算(见表 1), 试验值与计算值之比的平均值为 1.059, 均方差为 0.031, 变异系数为 0.029, 可见误差不大, 计算精度能满足工程需要。从总的情况来看, 计算值略低于试验值, 这是由于计算中没有考虑对内芯混凝土的增强作用引起的, 但这种偏差对提高结构可靠度是有利的, 因而结果是偏安全的。

表 1 计算结果与试验结果的比较 kN

试件 编码	试验结果		简化方法计算结果		P_t/P_{jt}
	N_t	P_t	$N_{jt}(N_t)$	P_{jt}	
6C1-1	1000	300	1000	285.35	1.051
6B1-2	980	270	980	248.04	1.089
6A1-4	1020	280	1020	253.13	1.106
6A2-1	1100	290	1100	276.18	1.050
6A2-3	990	260	990	260.95	0.996
6B1-3	1000	280	1000	259.38	1.079
6C1-3	1000	300	1000	285.35	1.051
8A1-3a	1100	280	1100	267.02	1.049

注: N 为轴向压力, P 为该柱能抵抗的最大水平力。

3 算例

设一圆钢管增强高强混凝土组合柱, 承受设计轴力 $N = 9000$ kN, 设计弯矩 $M = 2550$ kN·m, $b = h = 850$ mm, 混凝土采用 C60, 钢管采用 Q235 级钢材, 钢筋采用 HRB335 级钢筋, 试对柱截面配筋。

解 假定核心圆钢管截面为 $\varnothing 325 \times 9$, 则

$$\lambda = \frac{\gamma_s W_{sa}}{A_{sa} h_0} = \frac{\gamma_s D}{8 h_0} (1 + \alpha^2) = 0.114$$

$$N_1 = (0.55 - \lambda) \alpha_1 f_c b h_0 = 8090.01 \text{ kN}$$

$$N_2 = (0.48 + 0.72\lambda) \alpha_1 f_c b h_0 = 10429.44 \text{ kN}$$

可知 $N_1 < N < N_2$, 取 $N_{rc} = N$, $N_{sa} = 0$, $M_{sa} = M_{sa0} = \gamma_s W_{sa} f_{sa} = 173$ kN·m, $M_{rc} = M - M_{sa} = 2377$ kN·m, $e_0 = \frac{M_{rc}}{N_{rc}} = 264.11$ mm $> 0.3 h_0$ (243 mm), 按大偏心受压计算, 对称配筋, 计算需纵筋 $A_s = A_s' = 1979$ mm², 每侧实配 8 $\varnothing 18$ ($A_s = A_s' = 2036$ mm²) HRB335 级纵筋。

4 结 语

本文基于塑性力学中的下限定理, 得出圆钢管增强钢筋高强混凝土柱正截面承载力解析解, 给出圆钢管增强钢筋高强混凝土柱正截面强度计算方法, 该方法计算结果与试验值接近, 计算过程较一般叠加法更加简捷和实用。

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: 72-73.
- [2] 李少泉, 沙镇平. 钢管混凝土柱正截面承载力计算的叠加方法 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23(3): 27-31.
- [3] 徐秉业, 陈森灿. 塑性理论简明教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- [4] 李惠. 高强混凝土及其组合结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 163-164.
- [5] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 230-231.
- [6] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范 [S].
- [7] 刘大海, 杨翠如. 型钢钢管混凝土高楼计算和构造 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 118-119.
- [8] YB 9082—97 钢管混凝土结构设计规程 [S].
- [9] 林拥军, 程文灏, 徐明, 等. 配有圆钢管的钢管混凝土柱轴压比限值的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 23-28.
- [10] 陈周熠, 赵国藩, 林立岩. 钢管混凝土增强高强混凝土柱的正截面强度计算 [J]. 建筑结构, 2001, 31(7): 11-13.

(收稿日期: 2005-12-16 编辑: 骆超)

(上接第 29 页)

参考文献:

- [1] MATTHYS S, TAERWE L, AUDENAERT K. Tests on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping [C]//DOLAN C W, RIZKALLA S H, NANNI A. Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures. Farmington Hills Mich: American Concrete Institute, 1998: 217-218.
- [2] SAADATMANESH H, EHSANI M R, JIN L. Seismic strengthening of circular bridge pier models with fiber composite [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(6): 639-647.
- [3] NAGUIB W, MIRMIRAN A. Time-dependent behavior of FRP-confined concrete columns under axial load [J]. ACI Structures Journal, 2002, 99(2): 142-148.
- [4] 陶忠, 于清. FRP 约束混凝土柱徐变特性的理论分析 [J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 12-16.
- [5] 于清, 韩林海, 张铮. 长期荷载作用对 FRP 约束混凝土轴心受压构件力学性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 58-63.
- [6] 周履, 陈永春. 收缩徐变 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 83-90.

(收稿日期: 2005-11-10 编辑: 骆超)