

文章编号:1671-8879(2009)01-0070-05

圆中空夹层钢管混凝土短柱的承载力

赵均海,孟晓健,刘建军,曹文涛

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:针对圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力,应用薄壁圆筒的统一强度理论极限解,考虑内圆与外圆中空夹层钢管混凝土的内外钢管薄壁效应,提出了计算公式,与文献资料的试验结果做了比较。同时分析了钢管的径厚比、拉压强度比以及中间主应力对圆中空夹层钢管混凝土柱承载力的影响规律。结果表明:把内外钢管看成薄壁圆筒,推导的极限承载力计算公式的计算值与试验值误差小;极限承载力随着径厚比及拉压强度比的增大而减小,随中间主应力的增大而增大。

关键词:结构工程;薄壁效应;圆中空夹层钢管混凝土;薄壁圆筒;统一强度理论

中图分类号:TU398

文献标志码:A

Bearing capacity of concrete-filled double-skin steel-tube stub column

ZHAO Jun-hai, MENG Xiao-jian, LIU Jian-jun, CAO Wen-tao

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the unified limit solutions of thin-walled cylinder, the ultimate load calculation formula of concrete-filled double-skin steel-tube stub column under axial loads was derived by considering the internal and external thin-walled steel-tube effect. The results of this calculation formula were compared with the ones of experiment. The influences of steel-tube's parameters, such as the ratio of diameter to thickness, the strength ratio of tension to compression and the intermediate principal stress, on the loading capacity of concrete column, were analyzed. The results show that: the presented formula has a little error compared with the experiment; the ultimate load decreases with the increase of the ratio of diameter to thickness and the strength ratio of tension to compression, increases with the increase of the intermediate principal stress. 3 tabs, 5 figs, 9 refs.

Key words: structure engineering; thin-walled steel-tube effect; concrete-filled double-skin steel-tube; thin-walled cylinder; unified strength theory

0 引言

内圆与外圆中空夹层钢管混凝土柱,是在 2 个同心放置的圆钢管之间灌注混凝土而成的构件。这种构件既保持了钢管混凝土的基本优点,又具有截

面开展、抗弯刚度大、自重轻和防火性能好等特点,其在轴压下的性能极好,在一些大中型旅客站房、体育馆、桥墩等建筑承载能力要求高和构件高大的建筑中得到越来越多的应用。近年来,国内外学者对圆中空夹层钢管混凝土进行了大量的研究工作^[1-6],

收稿日期:2008-04-15

基金项目:陕西省自然科学基金项目(SJ08E204);教育部博士点基金资助项目(20040710001)

作者简介:赵均海(1960-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhaojh@chd.edu.cn.

大部分是把内外钢管看成是厚壁圆筒来分析,实际上大部分钢管是薄壁圆筒。因此,本文从厚壁圆筒和薄壁圆筒的界限出发,采用统一强度理论,应用薄壁圆筒的统一极限解,考虑内圆与外圆中空夹层钢管混凝土的内外钢管薄壁效应,提出了圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力计算公式,并与文献资料的试验结果做比较;同时分析了钢管的径厚比、拉压强度比以及中间主应力对圆中空夹层钢管混凝土短柱承载力的影响。

1 厚壁圆筒和薄壁圆筒的界限

关于厚壁圆筒和薄壁圆筒的界限^[7-8],各个国家的标准不一致。美国、日本、英国、法国等标准将划分圆筒厚、薄壁的界限定为 $D/t=10$ (D 为钢管的外径; t 为钢管的壁厚);《压力容器建造规则》也采用这一标准;现行的《钢制压力容器》将 $D/t=20$ 作为划分圆筒厚、薄壁的界限标准;德国划分标准是 D/t 在 10 和 20 之间。从美国、日本、英国、法国以及《压力容器建造规则》划分标准及其计算原理分析, $D/t=10$ 是区分弹性失稳和塑性失效的分界点,即材料的屈服点。中国现行的《钢制压力容器》将 D/t 定为 20,导致还处在非线性弹性失稳阶段的圆筒采用塑性失效的方法计算,存在着一定的缺陷。在实际应用中,圆中空夹层钢管混凝土柱的圆钢管的 D/t 总是大于 20,不论采用那个标准,圆中空夹层钢管混凝土柱中的钢管都应该是薄壁钢管。因此,按薄壁圆筒分析极限承载力更为合理。

2 轴压短柱极限承载力

在分析计算中,可将内外钢管看成薄壁圆筒,文献[5]对内圆与外圆中空夹层钢管混凝土短柱做如下假设:①平截面假定;②在工程应用中,为避免钢管与混凝土之间的滑移,采用钢板封堵钢管两端,并且在钢管上焊接环向锚固钢筋或栓钉,所以钢管和混凝土之间无滑移,两者之间的变形协调;③屈服后截面形状不变,钢管不发生局部屈曲;④构件的屈服由钢管和核心混凝土的纵向应力引起;⑤只考虑纵向平衡和变形协调条件。

设外钢管外半径为 R_e ,内半径为 R_i ,厚度为 t_e ;内钢管外半径为 r_e ,内半径为 r_i ,厚度为 t_i ;在轴力 N 作用下,外钢管受均匀内压力 p_1 作用,内钢管受均匀外压力 p_2 作用,如图 1 所示。

由于薄壁钢管的屈曲后性能对管壁缺陷的影响十分敏感,所以,在分析计算时应考虑内外钢管的屈曲问题。但是,国内外学者对薄壁钢管混凝土轴压

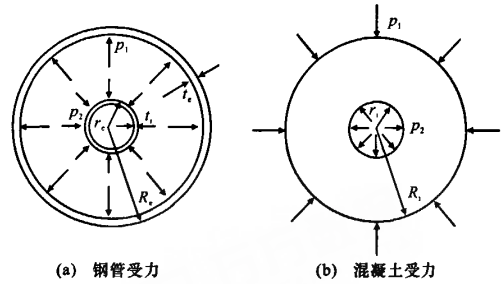


图 1 圆中空夹层钢管混凝土的受力

短柱的试验,均证明填充了混凝土的圆钢管的局部屈曲性能得到很大的改善,且其屈曲后性能对管壁缺陷的影响已不再敏感。试验结果表明,钢管薄壁混凝土均没过早出现局部屈曲现象,达极限承载力时,管壁的全截面均处于屈服状态。因此,圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限抗压承载力 N_{cr} 可由核心混凝土与钢管的两部分强度组成,即

$$N_{cr} = \sigma_{se} A_s + \sigma_{si} A'_s + f'_c A_c \quad (1)$$

式中: σ_{se} 、 σ_{si} 分别为外钢管、内钢管的抗压强度; f'_c 为核心混凝土的抗压强度; A_s 、 A'_s 、 A_c 分别为外钢管、内钢管和混凝土的面积。

达极限承载力时,内外钢管管壁的全截面均处于屈服状态,则外钢管所承受的轴力 N_s 为

$$N_s = \sigma_{se} A_s = \sigma_{se} \pi (R_e^2 - R_i^2) \quad (2)$$

内钢管所承受的轴力 N'_s 为

$$N'_s = \sigma_{si} A'_s = \sigma_{si} \pi (r_e^2 - r_i^2) \quad (3)$$

按文献[7],应用统一强度理论对薄壁圆筒进行分析,得到外钢管的内压力统一极限荷载为

$$p_1 = \frac{2t_e(1+b)}{[2+(2-a)b]R_i + 2t_e\alpha\sigma_{se}} \quad (4)$$

内钢管的外压力统一极限荷载为

$$p_2 = \frac{2t_i(1+b)}{(1+b+2a)r_e + 2t_i\alpha b\sigma_{si}} \quad (5)$$

式中: α 为材料的拉压强度比; b 为中间主应力影响系数。

根据文献[9]可知,围压比为 0.2 是 3 向应力状态下混凝土从有微裂隙发展向理想无裂隙发展状态过渡的分界线。钢管混凝土中的核心混凝土,由于钢管的约束作用,相当于对其施加围压(大量试验表明,其围压比大于 0.2),使单轴受压混凝土的裂缝发展受到限制,从而使混凝土接近无裂纹发展状态下的受压状态,即 3 向受压理想受压状态。核心混凝土受力状态为 $0 > \sigma_1 > \sigma_3$,由文献[4]得出混凝土应力 σ_3 为

$$\sigma_3 = f_c + k\sigma_1 \quad (6)$$

式中: f_c 为混凝土单轴抗压强度; σ_1 为核心混凝土

受钢管的侧压力; $k = (1 + \sin(\varphi))/(1 - \sin(\varphi))$;
 φ 为混凝土的内摩擦角。

国内外学者对混凝土进行大量的三轴压力试验的结果表明,3 向受压理想混凝土的内摩擦角变化范围为 $30^\circ \sim 50^\circ$ (相应地 k 值在 $7.5 \sim 3.0$ 之间变化)。钢管混凝土中的核心混凝土,由于钢管的约束,侧压力较大,考虑到混凝土内部的各种缺陷,因此,计算时理论值一般可取 $k = 1.5 \sim 3.0^{[5]}$,具体数值由试验确定。

核心混凝土受到 p_1 和 p_2 的作用,构件处于极限状态时,内、外层钢管的环向拉应力均达到屈服,此时核心混凝土获得最大约束力,其值为

$$\sigma_1 = \frac{2t_1 p_1}{R_e + R_i} + \frac{2t_2 p_2}{r_e + r_i} \quad (7)$$

当内外钢管所夹混凝土很厚时, σ_1 的值有所变

化,但是幅度不大,可不考虑。

将式(2)~式(7)代入式(1)中,得

$$N_{cr} = \sigma_{se} A_s + \sigma_{st} A'_s + f_c A_c = \\ \pi(R_e^2 - R_i^2)\sigma_{se} + \pi(r_e^2 - r_i^2)\sigma_{st} + \pi \cdot \\ \left\{ f_c + k \left[\frac{4t_1^2(1+b)}{(2+(2-a)b)R_i + 2t_1\alpha}(R_e + R_i)\sigma_{se} + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{4t_2^2(1+b)}{(1+b+2a)r_e + 2t_2\alpha b}(r_e + r_i)\sigma_{st} \right] \right\} (R_i^2 - r_e^2) \quad (8)$$

3 计算结果与影响承载力因素分析

3.1 计算结果比较分析

取文献[3]中的试验数据,且 $f_c = 31.96$ MPa, $\alpha = 0.8$,混凝土强度提高系数 k 依据试验取 1.5,与文献[3]、文献[5]的比较结果见表 1。

表 1 计算结果的比较

试件 编号	外钢管		内钢管		$f_c /$ MPa	$f_s /$ MPa	$f_i /$ MPa	$N_{uc} /$ MPa	$N_e /$ MPa	N_{cr} / MPa			$e_1 /$ %	$e_2 /$ %	$e_3 /$ %
	D_e / mm	t_e / mm	D_i / mm	t_i / mm						$b = 0.0$	$b = 0.5$	$b = 1.0$			
CC2a	180	3	48	3	31.96	275.9	369.1	1 790	1 613	1 749.07 (1 927.43)	1 787.34 (1 965.84)	1 813.44 (1 989.93)	9.8	9.8	0.1
CC2b	180	3	48	3	31.96	275.9	369.1	1 791	1 613	1 749.07 (1 927.43)	1 787.34 (1 965.84)	1 813.44 (1 989.93)	9.9	9.7	0.2
CC3a	180	3	88	3	31.96	275.9	370.2	1 648	1 550	1 631.25 (1 662.95)	1 633.19 (1 671.90)	1 641.06 (1 677.51)	5.9	1.4	1.0
CC3b	180	3	88	3	31.96	275.9	370.2	1 650	1 550	1 631.25 (1 662.95)	1 633.19 (1 671.90)	1 641.06 (1 677.51)	6.1	1.3	1.1
CC4a	180	3	140	3	31.96	275.9	342.0	1 435	1 278	1 372.96 (1 316.09)	1 381.12 (1 317.99)	1 383.59 (1 319.18)	10.9	8.2	3.8
CC4b	180	3	140	3	31.96	275.9	342.0	1 358	1 278	1 372.96 (1 316.09)	1 381.12 (1 317.99)	1 383.59 (1 319.18)	5.8	2.9	1.7
CC5a	114	3	58	3	31.96	294.5	374.5	904	823	882.14 (867.28)	883.67 (875.47)	886.49 (880.59)	8.9	3.2	2.2
CC5b	114	3	58	3	31.96	294.5	374.5	898	823	882.14 (867.28)	883.67 (875.47)	886.49 (880.59)	8.3	2.5	1.6
CC6a	240	3	114	3	31.96	275.9	294.5	2 421	2 340	2 372.73 (2 547.96)	2 381.75 (2 555.89)	2 384.02 (2 560.86)	3.3	5.6	1.6
CC6b	240	3	114	3	31.96	275.9	294.5	2 460	2 340	2 372.73 (2 547.96)	2 381.75 (2 555.89)	2 384.02 (2 560.86)	4.8	3.9	3.1
CC7a	300	3	165	3	31.96	275.9	320.5	3 331	3 220	3 289.03 (3 529.63)	3 295.97 (3 535.60)	3 298.07 (3 539.34)	3.3	6.1	1.0
CC7b	300	3	165	3	31.96	275.9	320.5	3 266	3 220	3 289.03 (3 529.63)	3 295.97 (3 535.60)	3 298.07 (3 539.34)	1.4	8.3	0.9

注: D_e 、 D_i 分别为外、内钢管的外直径; f_s 、 f_i 分别为内、外钢管的屈服强度; N_{uc} 为文献[3]的试验数据; N_e 为文献[3]中推导出的理论公式计算值; N_{cr} 为本文公式计算值,括号里面的数据为文献[5]中把内外钢管看成是厚壁圆筒推导的公式所得的相应计算值; e_1 、 e_2 、 e_3 分别为文献[3]、文献[5]及本文公式理论值与试验值的误差(文献[5]和本文的计算值取 $b = 0.5$ 时进行比较)。

由表 1 中计算结果可以看出,本文推导出的公式计算结果与试验值吻合较好,且计算值更接近试验值。从表 1 中的计算结果还可以看出,当 α 和 k 一定时, N_{cr} 随 b 的增大而增大。

取文献[1]中的 26 组试验参数, $k = 1.5$, $f_c = 0.67 f_{ck}$ (混凝土极限抗压强度) $= 0.67 \times 58.6 = 39.26$ MPa, $\alpha = 0.8$ (对于韧性金属材料, α 一般取

值为 $0.77 \sim 1.00$),与文献[1]的结果相比较,如表 2(见下页)所示。

由表 2 计算结果可知,本文推导出的公式计算值与试验值吻合较好,说明了本文推导的公式的正确性,更进一步说明,当 α 和 k 一定时, N_{cr} 随 b 的增大而增大。

表 2 文献[1]试验与本文计算结果的比较

试件编号	$k=1.5, \alpha=0.8$ 时, 本文计算的 N_{cr}/kN						N'_{ue}/kN	误差 / % ($b=1.0$)
	$b=0.0$	$b=0.2$	$b=0.4$	$b=0.6$	$b=0.8$	$b=1.0$		
A1-1	274.309	274.429	274.529	274.614	274.688	274.753	283	2.914
A1-2	262.160	262.266	262.355	262.431	262.496	262.554	285	7.875
A2-1	322.901	323.071	323.214	323.336	323.442	323.533	348	7.030
A2-2	319.811	319.971	320.106	320.221	320.321	320.408	348	7.928
A3-1	362.046	362.259	362.436	362.584	362.712	362.822	395	8.146
A3-2	363.370	363.577	363.748	363.893	364.016	364.122	395	7.817
B1-1	322.925	323.101	323.249	323.377	323.487	323.583	330	1.944
B1-2	313.960	314.119	314.253	314.368	314.467	314.554	335	6.103
B2-1	361.850	362.080	362.273	362.438	362.581	362.706	386	6.034
B2-2	366.601	366.840	367.041	367.213	367.362	367.492	395	6.964
C1-1	353.200	353.394	353.558	353.698	353.819	353.925	378	6.369
C1-2	349.032	349.224	349.387	349.526	349.647	349.753	385	9.155
C2-1	388.782	389.028	389.234	389.410	389.562	389.694	432	9.793
C2-2	382.245	382.471	382.661	382.823	382.963	383.085	408	6.106
D1-1	291.639	291.685	291.724	291.757	291.786	291.811	283	3.113
D2-1	262.133	262.167	262.196	262.220	262.241	282.260	299	5.598
D3-1	329.689	329.755	329.811	329.859	329.901	329.937	357	7.580
D4-1	358.846	358.937	359.015	359.081	359.139	359.190	380	5.476
D5-1	404.965	405.085	405.188	405.275	405.352	405.419	443	8.483
D6-1	590.714	591.018	591.269	591.480	591.660	591.815	644	8.103
E1-1	326.063	326.264	326.431	326.573	326.696	326.802	357	8.458
E2-1	437.317	437.601	437.839	438.042	438.217	438.369	477	8.098
E3-1	378.036	378.220	378.372	378.502	378.614	378.711	417	9.182
E4-1	587.291	587.677	587.999	588.275	588.513	588.721	598	1.551
E5-1	520.366	520.632	520.854	521.043	521.206	521.348	551	5.381
E6-1	481.630	481.872	482.077	482.252	482.403	482.536	524	7.912

注: N'_{ue} 为文献[1]的试验数据。

3.2 影响承载力的因素分析

由表 1、表 2 数据可知,当材料选定后,影响圆中空夹层钢管混凝土柱承载力的因素主要有:钢管的径厚比 D/t 、拉压强度比 α 以及中间主应力影响系数 b 。现对这些因素进一步讨论。

3.2.1 钢管的径厚比对承载力的影响

以表 1 的 CC2a、CC3a、CC4a 试件为例,并取 $b=0.5$ 时的轴压承载力,分析内钢管的径厚比对圆中空夹层钢管混凝土柱承载力的影响,结果如表 3 所示(D_e/t_e 、 D_i/t_i 分别为外、内钢管的径厚比)。

从表 3 可以看出,对于圆中空夹层钢管混凝土

表 3 径厚比对承载力的影响

试件编号	D_e/t_e	D_i/t_i	N_{ue}/MPa	本文计算的 N_{cr}/MPa
CC2a	60	16.00	1 790.00	1 787.34
CC3a	60	29.33	1 633.19	1 648.00
CC4a	60	46.67	1 381.12	1 435.00

轴压柱,随着内钢管径厚比的增大,其构件轴压承载力减小。

为了更好地说明钢管径厚比对圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力的影响,以表 2 中的试件 E4-1 提供的材料强度数据为基础,根据式 (8),给出 D_e/t_e 、 D_i/t_i 对 N_{cr} 的影响曲线,如图 2、图 3 所示。

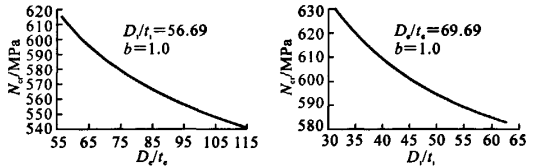


图 2 D_e/t_e 与 N_{cr} 关系 图 3 D_i/t_i 与 N_{cr} 关系

由图 1、图 2 可知,在保持拉压强度比、中间主应力影响系数和 k 不变的情况下,随着钢管的径厚比的增大,构件承载力减小。

3.2.2 b 与 α 对承载力的影响

(1) b 对圆中空夹层钢管混凝土柱承载力的影响

图 4 给出了试件 E4-1 在 $\alpha = 0.8, k = 1.5$ 时, N_{cr} 随 b 的变化情况。从图 4 可看出, 随着 b 的增大, N_{cr} 也是增大的, 说明采用不同的强度准则对承载力计算有很大的影响。

(2) α 对圆中空夹层钢管混凝土柱承载力的影响

图 5 给出了试件 E4-1 在 $b = 1.0, k = 1.5$ 的情况下, N_{cr} 随 α 的变化情况。从图 5 可看出, 随着 α 的增大, N_{cr} 是减小的。

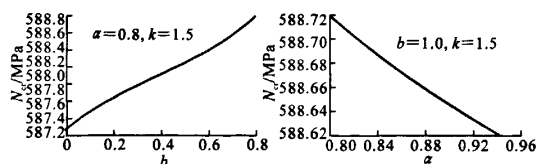


图 4 N_{cr} 与 b 的关系

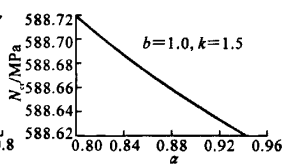


图 5 N_{cr} 与 α 的关系

4 结 语

(1) 将内外钢管看成薄壁圆筒, 采用薄壁圆筒的统一极限解, 推导出的圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱极限承载力计算式的理论值与试验值误差较小, 为图圆中空夹层钢管混凝土的研究提供了可靠的理论依据。

(2) 影响圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱极限承载力的主要因素是材料的拉压强度比、中间主应力和内外钢管的径厚比; 通过对比分析可知, 圆中空夹层钢管混凝土柱的承载力随着内外钢管径厚比的增大而减小, 随着中间主应力影响系数的增大而增大, 随着钢材拉压强度比的增大而减小。

参考文献:

References:

- [1] Wei S, Mau S T, Vipulanandan C, et al. Performance of new sandwich tube under axial loading: analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121 (12): 1806-1821.
- [2] Mohamed E, Zhao X L, Raphael G. Tests on concrete-filled double-skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2002, 40(5): 415-441.
- [3] 李小伟, 赵均海, 朱铁栋, 等. 方钢管混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 77-81.
- [4] 黄 宏, 陶 忠, 韩林海. 圆中空夹层钢管混凝土柱轴压工作机理研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(11): 11-14, 36.
- [5] 赵均海, 郭红香, 魏雪英. 圆中空夹层钢管混凝土承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 50-54.
- [6] 翟 越, 魏雪英, 计 琳, 等. 薄壁圆筒在双剪统一强度理论下的统一解[J]. 长安大学学报: 建筑与环境科学版, 2004, 21(3): 1-3.
- [7] 丁伯民. 外压圆筒设计中的弹、塑性失效界限[J]. 化工设备与管道, 2003, 40(2): 5-10.
- [8] 丁伯民. 外压薄壁和厚壁圆筒的壁厚界限: 析 GB 150—1998 的修订[J]. 化工设备与管道, 1999, 36(3): 39-44.
- [9] 过镇海, 王传志. 多轴应力下混凝土的强度和破坏准则研究[J]. 土木工程学报, 1991, 24(3): 1-14.
- [10] LI Xiao-wei, ZHAO Jun-hai, ZHU Tie-dong, et al. Mechanics behavior of axially loaded short columns with concrete-filled square steel tube[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 77-81.
- [11] HUANG Hong, TAO Zhong, HAN Lin-hai. Mechanism of concrete-filled double-skin steel tubular columns (CHS inner and CHS outer) subjected to axial compression [J]. Industrial Construction, 2006, 36 (11): 11-14, 36.
- [12] ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on bearing capacity of concrete-filled double-skin steel tubes column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 50-54.
- [13] ZHAI Yue, WEI Xue-ying, JI Lin, et al. Unified limit solutions for thin wall cylinder based on twin shear unified strength theory[J]. Journal of Chang'an University: Architecture & Environment Science Edition, 2004, 21(3): 1-3.
- [14] DING Bo-min. Boundary of thin wall and thick wall cylinders subjected to external pressure: analysis of revision of GB 150—1998[J]. Process Equipment & Piping, 1999, 36(3): 39-44.
- [15] GUO Zhen-hai, WANG Chuan-zhi. Investigation of strength and failure criterion of concrete under multi-axial stresses[J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(3): 1-14.