

离心钢管混凝土中心受压柱的研究*

张保善 蒋晓东 李四平 范立群 李明生

(郑州工学院土建系)

摘 要: 本文根据 8 根离心钢管混凝土柱的中心受压试验, 研究了钢管和混凝土的应力—应变关系, 钢管对环形混凝土的约束效应, 以及离心钢管混凝土柱的受压破坏机理。并讨论了混凝土提高钢管刚度及其承载能力的问题。提出了设计钢管混凝土空心柱的强度与挠度的计算公式和方法, 可供工程设计中参考。

关键词: 极限强度, 钢管, 离心混凝土柱

随着工农业建设的迅速发展, 我国基本建设行业也得到了蓬勃发展, 结构工程中新型构件的发展更为迅速。离心钢管混凝土柱, 就是这类新型结构构件中的一种。它具有比钢结构构件稳定、强度高、刚度大的特点, 又比混凝土结构构件轻便、强度高、延性好、有便于连接、自重轻的特点。它综合了钢结构和混凝土结构的优点, 避免了它们的缺点, 更有节约投资、经济坚固的特长, 适用于电力工业中工业厂房、输电线路的建设, 也适用于煤炭工业中高层井塔架的建设, 在民用高层建筑中有广泛的应用前途, 有较好的延性和抗震性能。但是, 由于对这类构件设计理论的研究尚不完善, 工程应用尚少。因此, 目前, 还必须注重研究工作的开展, 逐步积累理论研究和工程实践的经验和资料, 以提出合理的设计方法。本项研究是针对中心受压的情况进行的。

1 试验研究

1.1 试件设计

本次进行的第一批离心钢管混凝土中心受压柱的试件, 主要考虑的因素是长细比、钢管厚、混凝土壁厚及混凝土标号的影响。设计长细比为 3~8, 混凝土壁厚与钢管的比值为 10:1, 采用 3mm 钢板用卷板机成管状, 然后采用对口焊接, 并刨 45° 斜口, 用焊液填满, 且两端设置拉结圆环。混凝土采用离心方式成型, 蒸气养护, 试件形状如图 1 所示。钢材的物理力学性能用母材制出 6 个标准试件, 用标准方法试验确定。混凝土的力学性能由同批混凝土制作的标准试件确定。

1.2 试验手段与方法

* 收稿日期: 1989.06.30

本次试验的试件, 按图2布置仪表及电感元件。首先, 沿两个侧面相对位置布置电测百分表, 以确定柱在受力过程中的挠曲情况; 在中间截面(I-I)处, 两个互相垂直的直径端布置竖向应变片, 以确定钢管纵向受力情况; 且在与其 45° 斜交的两直径端布置环向应变片, 以确定环向受力情况, 混凝土的应变片布置在距端部90mm和400mm处, 上、下端各4片, 以鉴定混凝土端部和中间部位受力情况。

试验时, 将试件立在5000KN的压力机上, 下端为球支座, 上端连以载荷传感器, 端部用50mm厚钢板垫平。进行试加载和物理对中, 然后进行正式试验。加载时, 每级载荷约为破坏载荷的 $\frac{1}{10}$, 直到混凝土压坏为止。试验载荷通过3000KN压力传感器接到放大器和x-y函数记录仪上, 挠度值由位移传感器接到同一台x-y函数仪上。这样, 通过函数仪可以直接测出载荷—挠度曲线, 并可以确定任意时刻的测量值。混凝土和钢管的应变全部由自动记录仪读出。

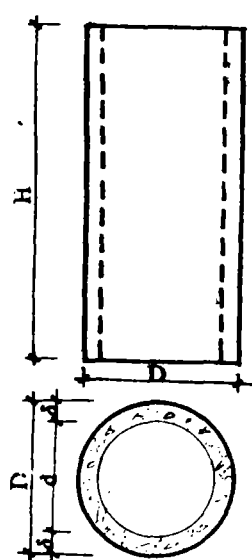


图1 试件简图

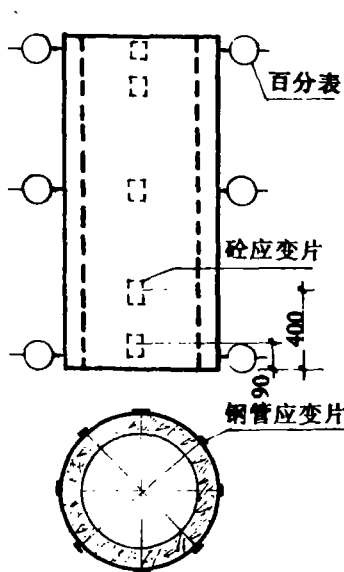


图2 测点布置图

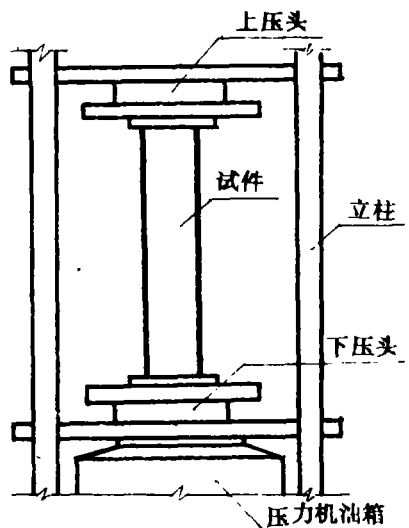


图3 试件装置图

2 主要试验结果分析

按照上述测试技术和试验方法, 我们共进行了8个离心钢管混凝土柱的中心受压试验, 其主要试验结果如表1所示。根据试验中观察到的现象, 现对试验结果分析如表1。

2.1 柱受力特征

8个试件的试验全过程表明, 从加载至破坏, 离心钢管混凝土柱的受力过程可以分为三个阶段, 即弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。当载荷较小时, 钢管和混凝土的应力增长与应变增加基本上呈线性关系, 钢管和混凝土共同承担外力, 相互之间粘结较好, 能共

同工作，处于弹性工作阶段。当载荷达到极限载荷 60%左右时，混凝土首先出现塑性变形，因此，柱的纵向变形增大，变形与载荷不再呈直线关系。随着载荷的增加，柱的纵向变形梯度增大，挠度也开始有明显增加，直到钢管在纵向力作用下达到屈服强度，此时，

表 1 试验主要结果一览表

试样编号	尺寸 H×D(mm)	状态	载荷 (KN)	挠度 (mm)	钢管应变(με)		砼应变 (με)	备注
					纵向	环向		
CZ-1-1	1000×300	极限	1400	1.25	1500	570	1910	端部坏
		屈服	1180	0.12	1310	430	1240	
CZ-1-2	1000×300	极限	1770	1.05	1630	640	1900	
		屈服	1400	0.10	1250	380	1420	
CZ-1-3	1500×300	极限	1420	1.35	1700	540	1800	端部坏
		屈服	1200	0.13	1350	430	1320	
CZ-1-4	1500×300	极限	1500	1.22	1890	560	2100	
		屈服	1200	0.15	1250	350	1216	
CZ-1-5	2000×300	极限	1460	1.73	1680	510	2675	
		屈服	1210	0.35	1211	370	1235	
CZ-1-6	2000×300	极限	1400	1.30	2100	510	2720	
		屈服	1200	0.31	1220	380	1250	
CZ-1-7	2500×300	极限	1230	2.15	1363	405	2430	端部坏
		屈服	1100	0.34	1250	360	1100	
CZ-1-8	2500×300	极限	1310	2.10	1480	410	2500	
		屈服	1120	0.50	1193	340	1500	

注：混凝土壁厚 30mm，强度 37.5KN/mm²，钢管强度 240KN/mm²

载荷约为极限载荷的 80%左右，这个阶段基本处于弹塑性工作中。当钢管达到屈服强度后，柱的纵向变形有显著的增加，混凝土主要承担外来增加的载荷，其变形也增加较快，柱出现较大的挠度。由于钢管已进入屈服状态，混凝土变形增长速度较快，柱的挠曲明显增大，使柱的工作进入破坏阶段，当混凝土达到约 2500με 时，钢管出现皱折，混凝土出现压碎，而柱达到极限承载能力。但是，由于钢管对混凝土的约束作用，混凝土的破坏过程较长，载荷—挠度曲线有较长的水平段。显示出良好的塑性性质。

2.2 载荷—挠度曲线

图 4 为试验柱的典型载荷—挠度曲

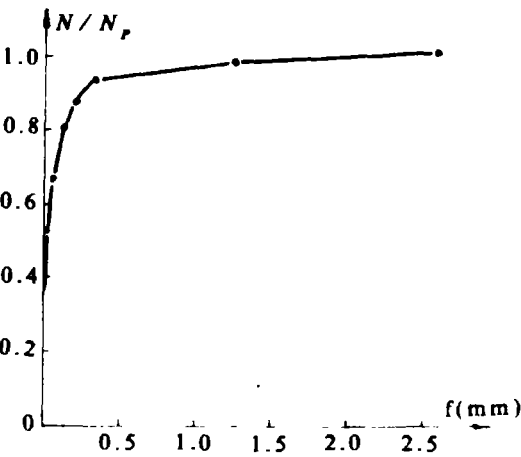


图 4 实验柱典型载荷—挠度曲线

线。由图中可以看出, 离心钢管混凝土柱在加载后直到极限载荷的 60% 左右, 载荷与挠度呈直线关系, 钢管和混凝土共同受力, 并不因截面中的园形孔洞而改变其性能, 与实心园柱受力基本一样。然后随载荷之增加, 挠度增加速度加快, 且构件长细比愈大, 愈明显, 直到钢管中部竖向应变达到屈服应变时, 约为极限载荷的 80% 左右, 变形都比较稳定。此后, 由于钢管达到其极限承载力, 混凝土尚未充分发挥作用, 可以继续加载。继续加载过程中, 钢管纵向变形增长较快, 混凝土也产生相应变形, 柱的挠度就有明显增加。如果混凝土壁较薄, 钢管壁易于皱折, 出现局部失稳, 柱达到极限承载力。如果混凝土壁厚适中, 则可以共同承受外力, 直到混凝土压碎, 柱达到极限承载能力。这个过程中, 柱的挠度发展较快, 因而载荷—挠度曲线上出现明显的转折点。可见, 钢管壁和混凝土壁厚之间应有合理的比值关系, 以防止钢管壁的过早屈曲现象, 并能由钢管壁提供可靠的约束力, 以提高混凝土的强度和变形, 保证它们的共同作用。

由图 4 可以看出, 试验柱的混凝土壁厚与钢管壁厚比值 10: 1, 在长细比较小情况下, 二者能协同工作, 直到钢管壁屈服之后, 随载荷之增加, 挠度才有明显增大, 混凝土应变接近轴向受压极限应变时, 才出现屈曲, 柱达到极限承载能力。所以柱的破坏实质属于强度破坏。

2.3 载荷—应变曲线

图 5 为试验柱实测典型载荷—应变曲线。曲线 1 为距端部 90mm 处混凝土的纵向应变曲线; 曲线 2 为距端部 400mm 处混凝土内壁的纵向应变曲线, 曲线 3 为钢管壁上的应变片在中部截面处测得的纵向应变曲线。由曲线 2 和曲线 3 的比较可知, 混凝土壁和钢管壁在外荷作用下, 其应变曲线的变化基本一致, 可见, 二种不同的材料, 在相同载荷作用下, 变形协调一致, 大小基本相同。除端部大约一倍钢管柱外径的长度范围内有较大差异外, 其余各处在外荷作用下受力是均匀的, 曲线 1 的测点位于端部范围内, 受到的紧箍力较大, 其应变值也较大, 加之端部的不平整及压力机压板与试件端部之间摩阻力的存在, 混凝土受力甚不均匀, 但是, 这种影响也仅反映在约一倍管外径的柱端长度内。

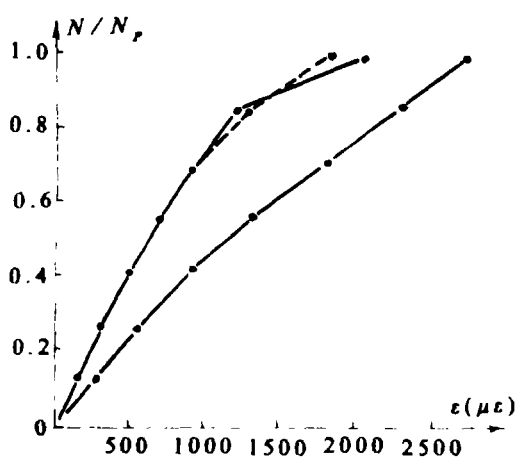


图 5 试验柱典型载荷—应变曲线

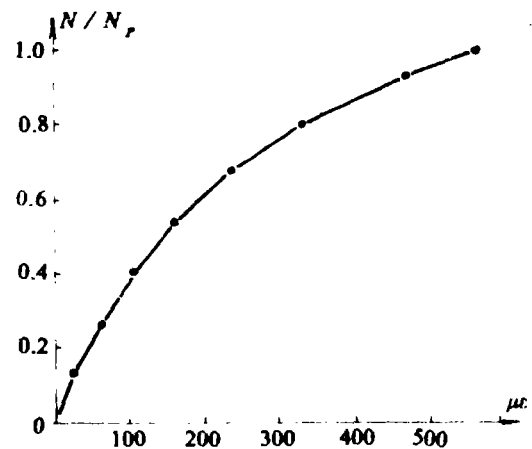


图 6 试验柱典型载荷—环向应变曲线

由图 5 的应变曲线还可以看出, 当钢管壁进入屈服强度之后, 混凝土的应变增加较

大,而且与钢管壁之间的变形出现较明显的差异。显然,钢管即将屈曲,混凝土即将压碎。所以,我们可以认为,在离心钢管混凝土柱的整个工作过程中,二者有较好的协同工作性质,当它们的整体作用受到破坏时,柱进入破坏阶段,随后达到极限承载能力。

2.4 载荷—钢管环向应变曲线

图 6 为实测的载荷—钢管环向应变典型曲线。由图中曲线可以看出,大约 60% 极限载荷之前,载荷与管壁环向应变之间呈线性关系,且其应变值大于无内部混凝土时的测值。此后,随载荷之增加,环向应变增加的速度加大,曲线出现明显的弯曲,此系由于混凝土受到较大压力,横向变形增加,对钢管壁产生较大的径向力,引起钢管环向应变增大。试验的实测值,环向应变最大值约为屈服应变的 50%。可见,钢管对环形混凝土产生了约束力,此约束力随载荷之增加而增大,且沿混凝土外周均匀分布,其大小值受到钢管壁厚、混凝土壁厚及外径、内径大小的影响,另外也与柱的长细比有关。图 7 为试验柱不同长细比与环向应变的关系。可以看出,随柱长细比之增大,钢管的环向应变减小。这说明了柱的挠曲影响钢管对混凝土的约束力。

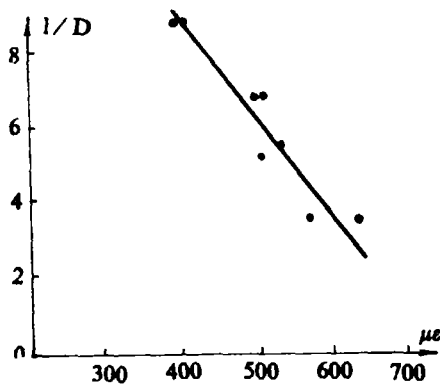


图 7 试验柱长细比—环向应变关系

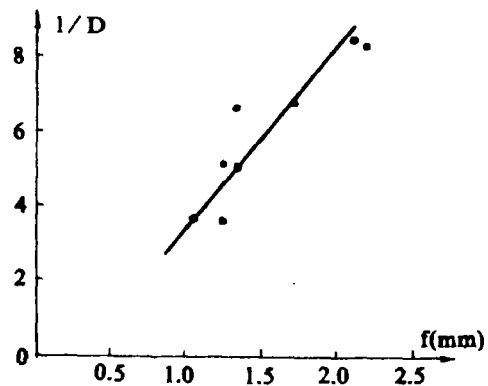


图 8 试验柱长细比—挠度关系

2.5 柱的纵向挠曲

图 8 为试验柱各种长细比情况下,中心受压实测的最大的挠度值与长细比的关系图。可以看出,柱的纵向挠度随着长细比之增大而增加,其承载能力也有相应的减小。由于试验柱长细比都在短柱范围内,所以最大挠度值的数值并不大,在计算离心钢管混凝土柱的承载能力时,长细比的影响是不容忽视的。

3 强度计算的理论分析

根据 8 个中心受压试验结果及初步分析。可以看出,离心钢管混凝土柱虽然是由两种不同材料所组成,而且柱中心还存在园形孔洞,但是,它们共同工作性能较好,都能充分发挥自己的强度。混凝土可以提高钢管的稳定性,钢管又对混凝土提供了紧箍力,使其处于三向应力的复杂应力状态下,不仅能提高强度,而且有较好的变形能力。在极限状态时,钢管能达到屈服强度,混凝土亦达到了极限抗压强度,且由于紧箍力的作用,强度尚有提高。由于离心钢管混凝土柱的材料远离中心区域,使得其刚度有较大提高,因此,较

同样的钢筋混凝土柱有较高和较好的变形能力。虽然, 在极限强度前, 钢管已达到设计强度, 但由于钢管和混凝土的内力重分布, 并不降低它的极限承载能力。因此, 我们可以按照协同工作很好的组合柱建立其强度计算公式。

3.1 正截面强度计算

试验证明, 当离心钢管混凝土柱达到极限承载能力时, 其正截面如图1所示。钢管达到了它的屈服强度, 混凝土也达到了极限抗压强度, 考虑约束作用后, 用 $K_1 f'_c$ 表示。那么参照图1所示截面形状, 根据静力平衡条件, 可以建立正截面强度计算公式如下:

$$KN \leq N_p = \varphi(A_s f'_s + A_c K_1 f'_c) \quad (1)$$

式中: A_s —钢管的截面积, 按下式计算:

$$A_s = \pi D t \quad (t \text{ 为钢管壁厚})$$

A_c —混凝土的环形截面积, 按下式计算:

$$A_c = \delta \pi (D + d) / 2$$

f'_s 、 f'_c —分别为钢管的抗压设计强度和混凝土的轴心抗压强度。

K_1 —混凝土的强度提高系数。

φ —纵向弯曲强度降低系数, 对短柱可取 $\varphi = 1$ 。

3.2 纵向弯曲影响系数 φ

对于中心受压离心钢管混凝土柱来说, 在柱承受中心压力后, 将产生纵向挠曲, 其最大挠度在临界截面处。因此, 临界截面不仅承受中心压力, 还承受由于纵向挠曲而产生的附加弯矩, 在轴力和弯矩共同作用下, 柱子提早达到其极限抗压强度, 承载能力有所下降。如果用 N_l 表示长柱或中长柱承载力, 用 N_{sh} 表示无挠曲的短柱承载力, 那么纵向弯曲影响系数 φ 为:

$$\varphi = \frac{N_c}{N_{sh}} \quad (2)$$

当柱子的纵向挠曲较小而不足以影响柱的承载力, 或影响甚微, 可略去不计, 此时可作为短柱考虑。根据本次实验, 参考已有设计规范的规定, 可以取 $L/D = 10$ 作为区分中长柱和短柱的界限, 在短柱范围内, $\varphi = 1$ 。对于 $L/D > 10$ 的中长柱, 可参考钢筋混凝土设计规范的取值标准, 确定 φ 值。对于 L/D 较大的情况, 可能会产生柱的稳定性破坏, 应在工程实践中加以避免, 可参考稳定理论确定 L/D 的最大界限值。

3.3 约束混凝土强度提高系数 K_1

由试验可知, 当试验柱承受轴力后, 钢管和混凝土共同承受纵向力之同时, 钢管还沿径向产生横向约束力, 使得砼中产生径向的挤压应力和沿环向的应力。因此, 混凝土处于复杂应力状态下。试验中实测混凝土极限压应变为 $2600 \sim 2800 \mu\epsilon$, 较一般情况下的 $2000 \mu\epsilon$ 约提高 $20\% \sim 40\%$, 强度提高约为 $15\% \sim 25\%$, 因此在进行强度计算时, 可用强度提高系数考虑这个影响。根据试验, 暂时建议在短柱强度计算中, 可取 $K_1 = 1.15$ 。

4 结 论

根据对 8 个离心钢管混凝土柱的试验, 及对试验结果的初步分析, 表明:

- 4.1 离心钢管混凝土柱具有较好的变形能力及承载能力, 具有较好的延性。
- 4.2 离心钢管混凝土柱的钢管和混凝土壁有完全一致的协同工作能力, 各自充分发挥它们的作用, 是一种很好的钢—混凝土组合构件, 在工业建筑、高层建筑及抗震工程中能充分应用。
- 4.3 离心钢管混凝土柱具有较钢柱经济、刚度大, 较钢筋混凝土柱自重轻的优点, 便于构件的连接和埋设管道, 节省予埋件, 降低工程造价。
- 4.4 离心钢管混凝土柱有自己的特点, 因此, 纵向弯曲影响系数 φ 和约束混凝土强度提高系数 K_1 尚需进一步研究。

参 考 文 献

- (1) W.F.Chen and T.Atsuta. Theory of Beam-Columns Vol.1,1976
- (2) S.铁摩辛柯著, 张福范译. 弹性稳定理论. 科学出版社, 1985年
- (3) 钟善桐主编. 钢管混凝土结构设计与施工. (修订本) 哈尔滨建筑工程学院科研处, 1984年
- (4) 蔡绍怀, 焦占栓. 钢管混凝土短柱的基本性能和强度. 建筑结构学报, 1984年第6期
- (5) 高伯杨, 胡吕等. 离心螺旋管混凝土轴压短柱在静载作用下变形性能的研究. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1985年第1期
- (6) 高伯杨, 胡吕等. 离心螺旋管混凝土轴压短柱静力承载力的试验研究. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1985年第3期

The Experimental Study of the Centrifugally spun Concrete Steel Tubular Columns under Axial loading

Zhang Baoshang Jiang Xiaodong Li Siping Fan Liquan Li Mingsheng
(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, a load-strain relation Curve of the centrifugally spun Concrete-steel tubular columns subjected to axial loading is obtained from the test results of 8 such columns. The confine effect of steel tube for the ring concrete and the cooperative working mechanism of the centrifugally spun concrete-steel tubular columns are studied and analysed, the influence of the concrete on the stiffness of steel tube and the capacity of subjected loading as well. Furthermore the formulas for calculating the ultimate strength and the deflection of the centrifugally spun concrete steel tubular columns are presented, the suggested formulas and method are given for reference in the engineering design.

Keywords: ultimate strength, Steel tube, centrifugally spun concrete column