

文章编号: 1001-4888(2015)01-0101-10

圆中空夹层钢管混凝土压扭构件试验研究^{*}

黄宏^{1,2}, 郭晓宇¹, 陈梦成¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西南昌 330013; 2. 江西省建筑过程模拟与控制重点实验室, 江西南昌 330013)

摘要: 以轴压比和长细比为主要参数设计了 7 根圆中空夹层钢管混凝土试件, 为了便于对比分析, 同时设计了 2 根圆实心钢管混凝土试件, 对其在压扭复合受力状态下的力学性能进行了试验研究。对试验现象和试验结果进行了描述与分析, 结果表明: 圆中空夹层钢管混凝土压扭构件的扭矩—转角全过程曲线未出现下降段, 试件表现出一定的后期承载潜力, 具有较好的塑性和延性性能; 钢管对混凝土的约束效应在加载后期更为显著; 轴压比、长细比和空心率对压扭试件的初始刚度影响不大, 但轴压比和长细比对试件的抗扭承载力有一定影响。最后, 采用压扭构件承载力相关方程对圆中空夹层钢管混凝土压扭构件的抗扭承载力进行了计算, 计算结果与试验结果基本接近且总体偏于安全, 可为工程设计提供参考。

关键词: 圆中空夹层钢管混凝土; 压扭; 试验; 影响参数; 相关方程

中图分类号: TU398.903

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-029

0 引言

钢管混凝土以其承载力高、塑性和韧性好、耐火性能好和施工方便等优点已被广泛应用于实际工程中, 并展现出良好的发展前景。很多高耸结构和高层建筑当承受较大风荷载和地震作用时, 都要求其竖向构件具有较大的抗弯刚度和抗震能力, 为了能进一步减小钢管混凝土结构的自重, 提高钢管混凝土的抗弯刚度和抗震性能, 采用空钢管取代核心混凝土, 从而得到了中空夹层钢管混凝土这种新型钢管混凝土结构。

近年来国内外学者对中空夹层钢管混凝土构件在轴压、纯弯、压弯、扭转以及往复荷载作用下的受力性能进行了研究, 文献[1]中对此进行了总结。而实际工程中的一些构件往往处于压扭复合受力状态, 例如当中空夹层钢管混凝土用作建筑物的框架角柱、高速公路的曲线形桥和斜交桥的桥墩、海上采油平台的立柱、停机场的定向塔以及螺旋楼梯的中心柱等结构时, 除了承受轴向荷载外, 在风荷载和地震作用下, 还会受到扭矩的作用^[2]。为了与实际工程中复杂的工况相适应, 应对中空夹层钢管混凝土构件的压扭性能做进一步研究。而目前对中空夹层钢管混凝土压扭构件的研究尚少, 鉴于结构形式和受力性能的相似性, 我们可以借鉴实心钢管混凝土纯扭、压扭构件以及中空夹层钢管混凝土纯扭构件的分析方法对其进行研究。陈宝春和李晓辉^[3]通过试验对单圆管钢管混凝土约束扭转问题进行了研究, 描述了空钢管、素混凝土和钢管混凝土不同的扭转特征。王文达等^[4]基于 ABAQUS 软件, 对影响矩形钢管混凝土构件扭转力学性能的主要因素进行了分析, 考虑了钢材强度、混凝土强度、含钢率和截面高宽比等参数的影响。徐积善等^[5]通过试验研究了钢管混凝土构件在压扭复合受力状态下的工作反应及破

^{*} 收稿日期: 2014-02-20; 修回日期: 2014-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378206, 51008122), 江西省青年科学家培养对象(20133BCB23015), 江西省重大科技创新项目(20114ACB01000), 江西省教育厅科技计划落地项目(赣财教[2011]243 号), 江西省自然科学基金项目(20122BAB206006)

通讯作者: 黄宏(1977—), 女, 工学博士, 教授, 主要从事组合结构研究。Email: hhong@ecjtu.jx.cn

坏机理,研究表明,钢管混凝土柱在压扭复合受力作用下,具有较高的强度和延性,能充分发挥两种材料的优点。聂建国等^[6]采用力一位移混合控制加载方法,完成了钢管混凝土柱在压一扭复合作用下的拟静力试验,结果表明,钢管混凝土柱在压一扭荷载作用下,混凝土承担的轴力随扭矩的增加而增大,而钢管承担的轴力将减小,若外加轴力较小时,还可能出现拉力。黄宏等^[7]对 6 根圆中空夹层钢管混凝土和 1 根双层空钢管试件进行了扭转试验研究,分析了名义含钢率、外钢管强度和空心率对试件抗扭承载力的影响。

本文对内外钢管均为圆形的中空夹层钢管混凝土构件在压扭复合受力状态下的力学性能进行试验研究。采用自制的压力—扭矩复合受力加载装置,对 7 根圆中空夹层钢管混凝土试件和 2 根圆实心钢管混凝土试件进行试验,对试验现象和试验结果进行了描述与分析,并采用压扭构件承载力相关方程对圆中空夹层钢管混凝土压扭构件的抗扭承载力进行了计算。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

本文以轴压比和长细比为参数设计了 7 根圆中空夹层钢管混凝土试件,同时设计 2 根圆实心钢管混凝土试件作为对比,试件截面示意如图 1 所示。表 1 列出了设计试件的具体参数,其中 D_i 、 D_o 分别为内外钢管直径, t_i 、 t_o 分别为内外钢管壁厚, L 表示试件长度, f_{yi} 、 f_{yo} 分别为内外钢管屈服强度, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度, n 为轴压比($n = N/N_u$, N 为所施加的轴向荷载, N_u 为试件的轴压强度承载力,按文献[8]中的公式计算), λ 为长细比($\lambda = L/i$, i 为截面回转半径), χ 为空心率($\chi = D_i/(D_o - 2t_o)$), T_{uc} 为试件的抗扭承载力试验值, T_{uc} 为简化公式计算得到的抗扭承载力值。

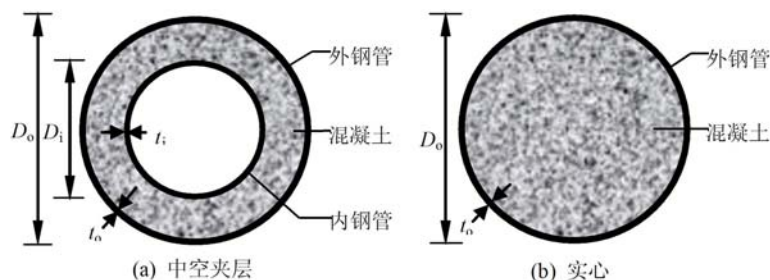


图 1 试件截面示意图

Fig. 1 Cross sections of specimens

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Parameters of specimens

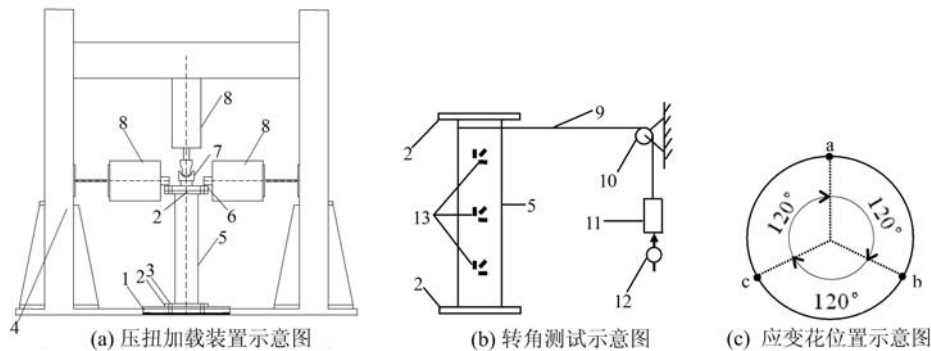
试件 编号	D_o (mm)	t_o (mm)	D_i (mm)	t_i (mm)	L (mm)	f_{yo} (MPa)	f_{yi} (MPa)	f_{cu} (MPa)	n	λ	T_{uc} (kN · m)	T_{uc} (kN · m)	T_{uc}/T_{uc}
Scv1-1	165	2.9	60	2.7	550	391	275	60	0.2	25	34.0	37.82	0.90
Scv1-2	165	2.9	60	2.7	550	391	275	60	0.4	25	32.4	41.95	0.77
Scv1-3	165	2.9	60	2.7	550	391	275	60	0.5	25	30.9	43.68	0.71
Scv1-4	165	2.9	—	—	550	391	—	60	0.4	26	30.6	41.61	0.74
Lcv1-1	165	2.9	60	2.7	1200	391	275	60	0.2	55	34.0	34.43	0.99
Lcv1-2	165	2.9	60	2.7	1200	391	275	60	0.4	55	32.4	37.72	0.86
Lcv1-3	165	2.9	60	2.7	1200	391	275	60	0.5	55	30.9	35.45	0.87
Lcv1-4	165	2.9	60	2.7	1200	391	275	60	0.6	55	28.9	35.86	0.81
Lcv1-5	165	2.9	—	—	1200	391	—	60	0.4	58	30.6	37.82	0.81

注: Scv1-4、Lcv1-5 为圆实心钢管混凝土试件,其余为圆中空夹层钢管混凝土试件。

试件中的钢管均采用直缝焊管,混凝土采用人工搅拌,每立方米混凝土中普通硅酸盐水泥、水、砂、碎石的用量分别为 500kg、190kg、505kg、1178kg。采用刚度较大的钢材制作试件的上下盖板,对于实心钢管混凝土试件,将盖板与外钢管直接焊接,而对于中空夹层钢管混凝土试件,在盖板中心切割出比内管外径稍大的圆孔,将内外钢管分别与盖板焊接。试件制作时,首先将下盖板与钢管焊接,然后在钢管夹层中浇筑混凝土,浇筑时用振捣棒振实,养护后,凿去混凝土表面浮浆,用高强环氧砂浆将混凝土表面与钢管抹平,最后焊接上盖板,并保证盖板表面平整。将两种厚度的钢管分别加工成每组 3 个的标准试件,由拉伸试验确定钢管材性,测试结果取平均值,见表 1。浇筑钢管内混凝土的同时,制作边长为 150mm 的混凝土立方体标准试块,与试件同条件下养护,试件加载完成后,按标准试验方法测得立方体试块的抗压强度 f_{cu} ,取平均值为 60MPa。

1.2 试验装置及加载制度

为了实现对钢管混凝土试件施加压扭复合荷载,对文献[7]中的扭转试验装置进行改进得到压力—扭矩复合受力加载装置,如图 2(a)所示。



1—底座; 2—盖板; 3—高强螺栓; 4—反力架; 5—试件; 6—加载板;
7—球铰; 8—千斤顶; 9—细钢丝; 10—定滑轮; 11—重锤; 12—百分表; 13—应变花

图 2 试验装置和测点布置

Fig. 2 Test setup and measurement points arrangement

试验时,将试件竖直放置于试验装置内,用高强螺栓将试件下盖板与地槽连接,作为固定端,同时将上盖板与加载板相连,作为加载端,加载板由方形钢板、加载刚臂和焊接于其几何中心的球铰组成,并由刚度较大的模具钢材加工而成。加载过程中,首先通过 100t 竖向千斤顶对球铰施加轴力,并保持不变,然后通过两个水平放置的 50t 千斤顶对刚臂施加一对力偶来实现扭矩的加载。



图 3 试验装置照片

Fig. 3 Test equipment photo

试验量测内容及测点布置:轴力 N 即竖向千斤顶所施加的轴向荷载,将千斤顶油表读数换算成所施加力的大小;扭矩 T 为两个水平放置的千斤顶对刚臂施加的力偶矩,即 $T = P \times R$ (P 为两个千斤顶同步施加的荷载, R 为两个千斤顶之间的力臂长度);转角 θ 的量测方法和测点的布置如图 2(b)、(c)所示,详细内容可参考文献[7];剪应变 γ 通过公式 $\gamma = 2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ})$ 求得,其中 ϵ_{0° 、 ϵ_{45° 、 ϵ_{90° 分别为由应变花测得的环向应变、45°方向应变和纵向应变。图 3 给出了试验装置的照片。

加载制度:试验采用分级加载方式,在弹性阶段每级荷载为估算极限荷载的 1/10,当荷载达到 60% 的估算极限荷载后,荷载级差减为估算极限荷载的 1/15,每级荷载持荷时间为 2min,临近估算极限荷载时保持缓慢连续加载直至试验结束(定义水平放置的千斤顶达到最大行程时试验结束)。

2 试验现象及破坏形态

试验中的所有试件均采用先压后扭的加载路径,即先对试件施加轴力,并保持不变,然后再施加扭矩直至试验结束。由于试验过程中施加的轴力较小(轴压比 $n \leq 0.6$),试件均处于轴压弹性阶段,均未发生明显变形;施加扭矩后,试件在加载初期变形较为缓慢,当所施加的扭矩超过 0.7 倍的极限荷载后,试件的扭转角增长迅速,并且其增加的速率要快于荷载增加的速率,此时可以听到清脆的“啪啪”声,接近极限荷载时,扭转角急剧增大,最终直至施加扭矩的千斤顶达到最大伸长量,试验结束。

图 4 为试验后所有试件的破坏形态。可见,试件发生了一定的扭转变形但均未出现明显的破坏特征,上下盖板与试件连接良好且变形协调。对于长细比较大的压扭长柱,由于试件初始缺陷的存在,试验后试件表现出偏压扭的破坏特征,产生了微小的弯曲变形,并且轴压比越大,弯曲变形越明显。

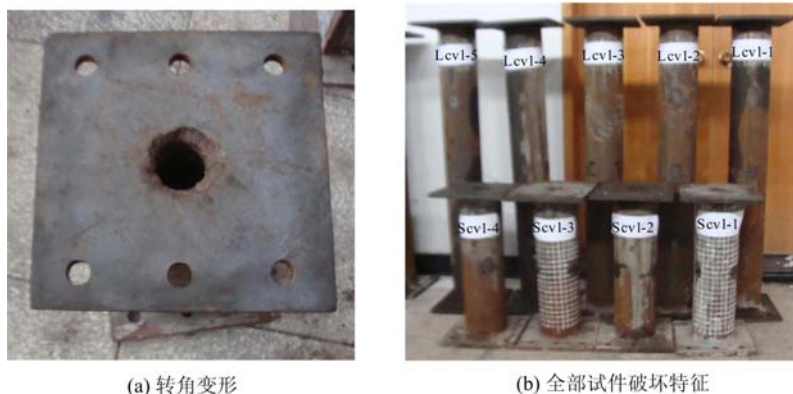


图 4 试件整体破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimens

试验后,剥去典型试件 Scyl-2 的外钢管,未发现钢管内壁有滑痕,说明钢管与混凝土没有出现界面滑移现象,两者协调变形。观察夹层混凝土的破坏情况,如图 5 所示,可见,在混凝土表面出现了与试件纵向轴线约成 30° 角的斜裂缝,但混凝土并未破碎,仍保持为一完整的柱体。

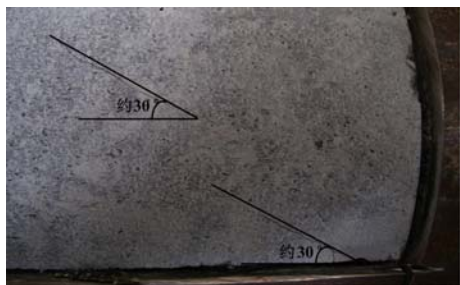


图 5 夹层混凝土破坏形态

Fig. 5 Failure mode of sandwich concrete

已有试验表明,钢管混凝土柱在纯扭作用下,混凝土将产生与柱轴线成 45° 角的斜裂缝^[7,9],而对于本次试验中的压扭受力试件,夹层混凝土出现的裂缝与柱轴线的夹角小于 45° ,对于出现该现象的原因,本文可采用“螺旋效应”^[10]予以解释。试验中,首先对试件施加轴向压力 N ,此时钢管和夹层混凝土将根据各自的抗压刚度分配轴力,施加的轴力较小时,钢管和混凝土单独受力,基本处于单向受压状态。施加扭矩 T 后,试件截面将产生沿环向的切应力,混凝土受到扭矩作用下产生的切应力和轴力作用下产生的压应力的共同作用,将沿垂直于

主拉应力的方向开裂,经应力分析后可知,裂缝与柱轴线的夹角应小于 45° ,并且由于对称性,裂缝将螺旋开展,这与试验中混凝土的破坏形态一致。

3 试验结果与分析

3.1 典型的扭矩—转角和扭矩—切应变曲线

图 6 给出了典型试件(Scyl-2)的扭矩 T —转角 θ 关系曲线。由图可见,当施加的扭矩较小时,扭矩

与转角成线性关系,此时扭转角增加缓慢,扭矩增长较快;随着扭矩的增加,试件进入弹塑性阶段,此时扭转变形较明显,试件抗扭刚度较弹性阶段明显降低;临近极限荷载时,试件变形急剧增大,但扭矩增长幅度不大。整个试验过程中,扭矩—转角关系曲线未出现下降段,并且在加载后期扭矩仍有继续增加的趋势,试件表现出良好的塑性和延性性能,并具有一定的后期承载能力。

图7为试验测得的典型试件(Scv1-2)中部截面各点处的扭矩 T —切应变 γ 关系曲线。由图可见,三条曲线基本重合,其他试件三点的扭矩—切应变关系曲线也出现类似的情况,说明试件中部截面各点的切应变与扭矩的变化关系基本一致,符合平面假设。以下各试件的扭矩—切应变关系曲线均取三条曲线的平均值。

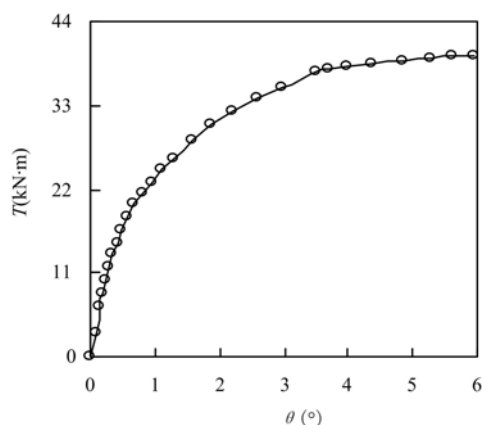


图6 典型的扭矩 T —转角 θ 关系曲线

Fig. 6 Typical torque versus angle curve

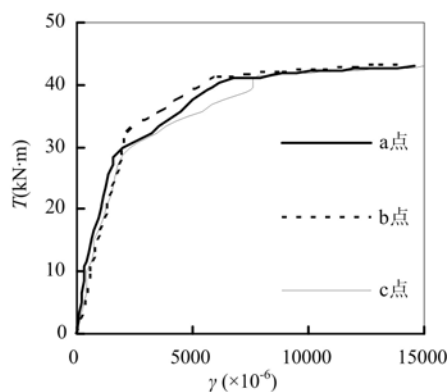


图7 典型试件中部截面处 T — γ 关系曲线

Fig. 7 Torque versus shearing strain curves of the points in middle section

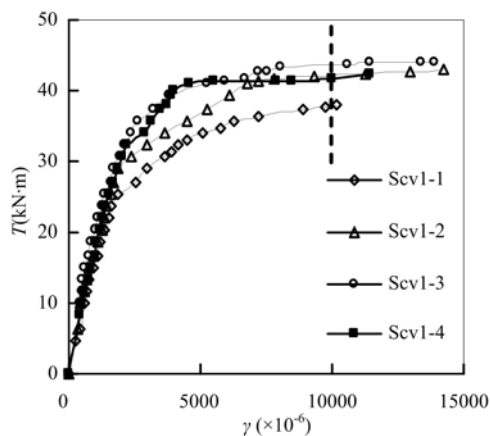


图8 短柱的 T — $\bar{\gamma}$ 关系曲线

Fig. 8 Torque versus average shearing strain curves of short columns

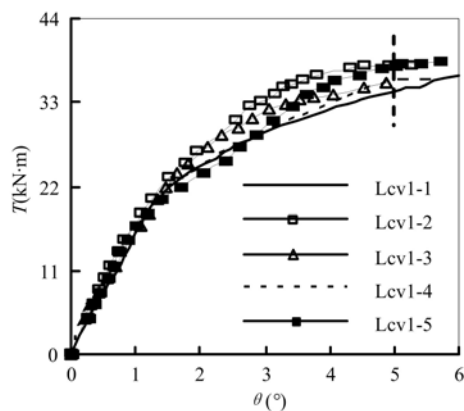


图9 长柱的 T — θ 关系曲线

Fig. 9 Torque versus angle curves of long columns

3.2 抗扭承载力取值

图8给出了各压扭短柱试件的扭矩 T —平均切应变 $\bar{\gamma}$ 关系曲线。由图可知,试件的扭矩随平均切应变的变化情况与扭矩—转角曲线相似,扭矩—平均切应变曲线在加载后期处于缓慢上升状态,未出现下降段,此时取试件边缘剪应变达0.01时对应的扭矩为极限扭矩,这一定义既考虑了构件的受力变形特点,也方便实际应用,并且与钢管进入强化阶段的应变比较接近^[11]。可以看出,当试件边缘剪应变达0.01时,构件的 T — $\bar{\gamma}$ 关系曲线变化平缓,扭矩值变化不大,但构件变形却急剧增大。

对于压扭长柱,当试验中施加扭矩的千斤顶达到最大行程时,试件中部剪应变还未达到0.01,但此时扭矩—转角关系曲线已趋向稳定,增长缓慢,如图9所示,取转角 $\theta=5^\circ$ 时对应的扭矩作为极限承载

力,这与文献[10]中钢管混凝土抗扭承载力的取法类似。试验中各试件的抗扭承载力试验值列于表 1 中。

3.3 外钢管应变分布规律

为了研究压扭试件中外钢管对夹层混凝土的约束效应,各选取了一个轴压比为 0.4 的短柱(Scv1-2)和长柱(Lcv1-2)试件,对比了两者外钢管中部的环向应变(ϵ_{90°)与纵向应变(ϵ_{0°)之比($|\epsilon_{0^\circ}/\epsilon_{90^\circ}|$)随扭矩(T)的变化曲线,如图 10 所示。由于加载初期施加的轴力较小,试件尚处于轴压弹性阶段,此时 $|\epsilon_{0^\circ}/\epsilon_{90^\circ}|$ 约等于 0.3,接近钢材的泊松比,在此阶段,钢管与混凝土单独受力,未产生相互作用;对于压扭复合受力阶段,当施加的扭矩较小时, $|\epsilon_{0^\circ}/\epsilon_{90^\circ}|$ 随着荷载的增加变化不大,此时钢管与混凝土无相互作用或相互作用力很小;此后,随着扭矩的逐渐增加, $|\epsilon_{0^\circ}/\epsilon_{90^\circ}|$ 显著增大,钢管与混凝土之间产生了较明显的相互作用力,此时的钢管和混凝土处于三轴应力状态,混凝土受到外钢管的约束,并且愈到加载后期约束效应愈显著。也正是由于这种约束作用的存在,延缓了混凝土裂缝的扩展速率,使得混凝土的抗剪强度有较大的提高,同时夹层混凝土有效地抑制了内外钢管的局部屈曲,从而使试件达到极限强度后仍具有一定的承载潜力。由图对比可见,压扭短柱与压扭长柱的 $T-|\epsilon_{0^\circ}/\epsilon_{90^\circ}|$ 关系曲线类似。

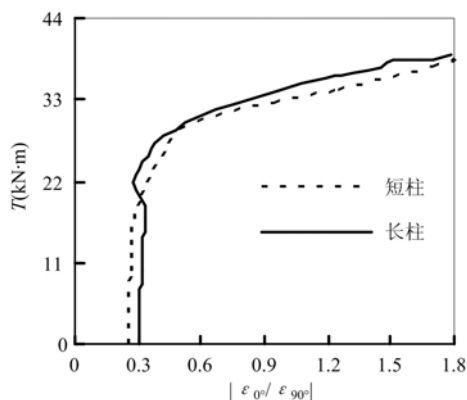


图 10 典型试件的 $T-|\epsilon_{0^\circ}/\epsilon_{90^\circ}|$ 关系曲线

Fig. 10 Torque versus $|\epsilon_{0^\circ}/\epsilon_{90^\circ}|$ curves of typical specimens

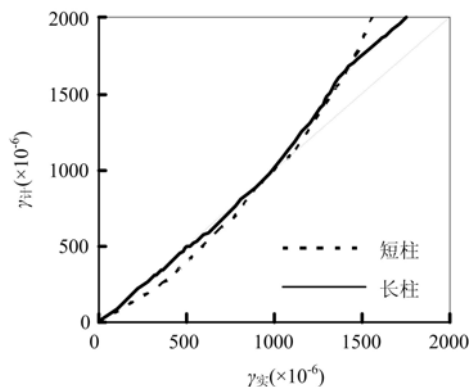


图 11 典型试件 $\gamma_{nt}-\gamma_{at}$ 关系曲线

Fig. 11 γ_{nt} versus γ_{at} curves of typical specimens

对于压扭复合受力时的弹性阶段,由于此时施加的扭矩较小,试件变形微小,理论上,钢管表面的切应变与钢管混凝土柱的扭转角成线性关系。为了验证此理论,以短柱试件(Scv1-2)和长柱试件(Lcv1-2)为例,比较了受荷初期试验实测的剪应变 γ_{at} 与按线性关系计算得到的剪应变 γ_{nt} ($\gamma_{nt} = \theta r/L$, 其中 $r = D_o/2$ 为试件截面半径)间的关系曲线,如图 11 所示。可见,当剪应变约小于 0.001 时试件表面的切应变与扭转角基本成线性关系。

3.4 各参数对扭矩—转角曲线的影响

3.4.1 轴压比

图 12 给出了轴压比对压扭试件扭矩—转角曲线的影响,可见,在本次试验中,轴压比对压扭试件初始抗扭刚度的影响不大。对于压扭短柱,当施加的轴压比不太大时($n=0.2\sim 0.5$),随着轴压比的增加,试件在刚进入弹塑性阶段时的抗扭刚度和最终的抗扭承载力都有所提高。而对于压扭长柱,当轴压比较小时($n=0.2, 0.4$),试件的抗扭承载力随着轴压比的增大而提高,当轴压比较大时($n=0.5, 0.6$),试件的抗扭承载力随着轴压比的增大而降低。有此规律的原因是:在压扭复合受力下,混凝土由于受到钢管的约束作用,随着轴压比的增大,其抗扭承载力逐渐增大,但增加幅度却有所减小;相反,钢管在复合受力下,随着轴压比的增大,其抗扭承载力逐渐减小,且减小的幅度在不断增加。这两者的叠加效果就造成了在轴压比不太大时,由于混凝土的承载力增加的幅度更大一些,使得试件的总体承载力增大;而当轴压比较大时,由于钢管的承载力下降的幅度更大一些,使得试件的总体承载力降低。

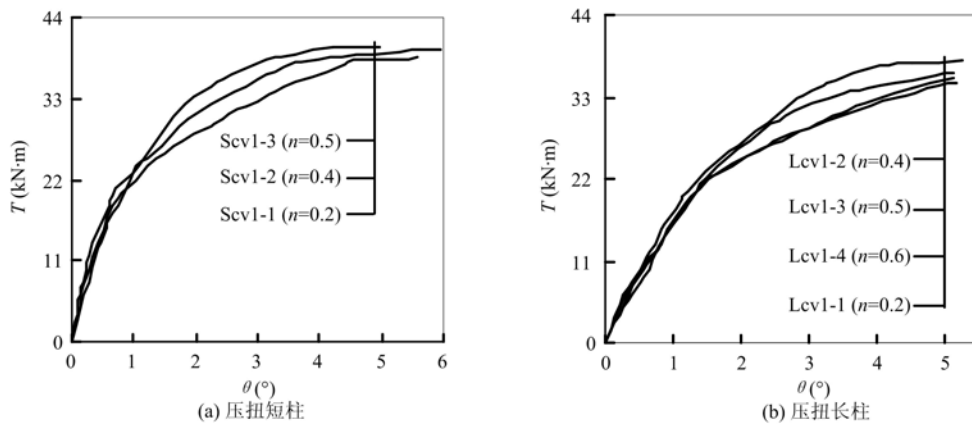
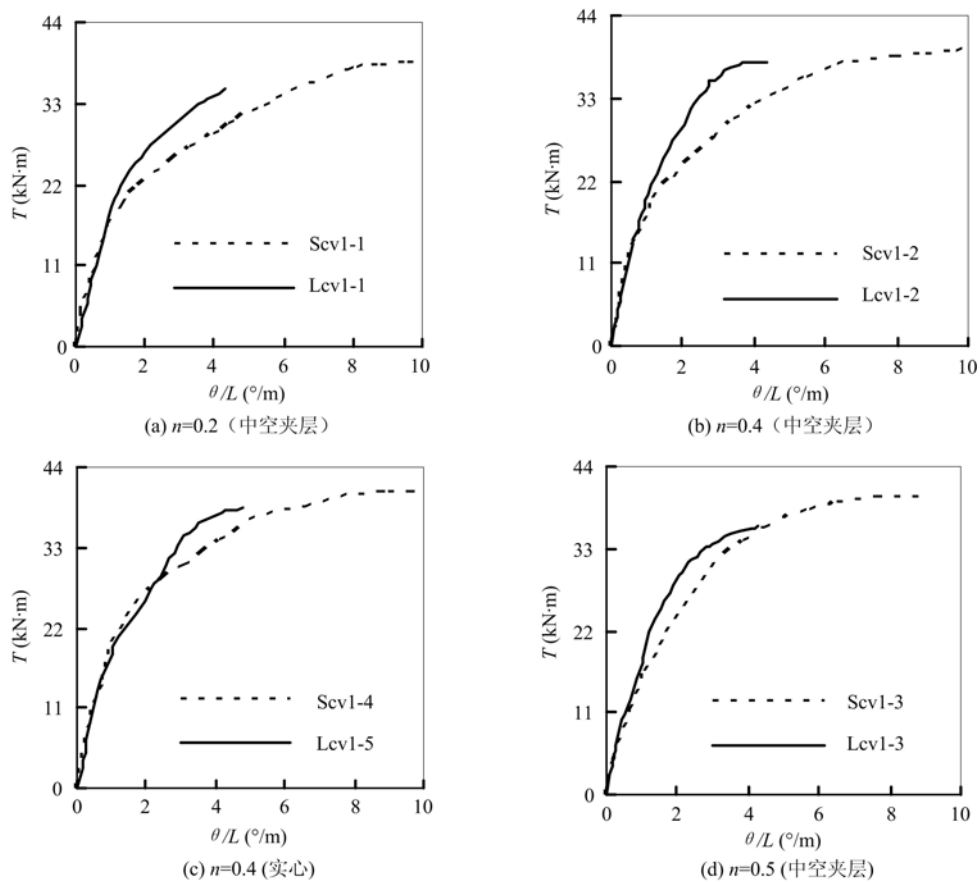


图 12 轴压比对扭矩—转角曲线的影响

Fig. 12 Influence of axial compression ratios on torque versus angle curves

3.4.2 长细比

对于长细比不同的压扭长柱和短柱,图 13 给出了试件扭矩 T —单位长度扭转角 θ/L 关系曲线,以比较不同长细比对扭转刚度和抗扭承载力的影响。由图可知,不同长细比试件的初始扭转刚度相差不大,而对于长细比较大的试件,在弹塑性阶段的初始时刻抗扭刚度较大,当施加的扭矩达到抗扭承载力时对应的 θ/L 较小,即长柱比短柱先一步到达极限承载力,但对于最终的抗扭承载力始终是压扭短柱的更大。

图 13 扭矩 T —单位长度扭转角 θ/L 关系曲线Fig. 13 T versus θ/L curves

3.4.3 空心率

图 14 为实心压扭试件(空心率为 0)与中空夹层压扭试件(空心率为 0.38)的扭矩—转角曲线的对

比。由图可见,在空心率不太大的情况下,空心率对短柱和长柱的扭矩—转角曲线以及抗扭承载力的影响不大。

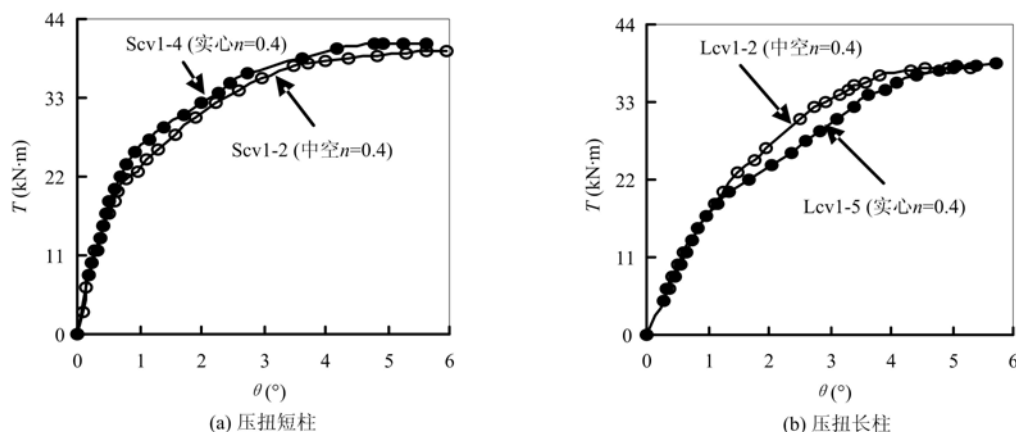


图 14 空心率对扭矩—转角曲线的影响

Fig. 14 Influence of hollow ratios on torque versus angle curves

4 压扭构件承载力相关方程

在试验和大量参数分析的基础上,文献[12]中提出了圆实心钢管混凝土压扭构件的承载力相关方程,由于圆实心钢管混凝土可以看做是圆中空夹层钢管混凝土中空心率为 0 时的一种特殊情况,本文借用实心钢管混凝土压扭构件的承载力相关方程,表达式如下:

$$\left(\frac{N}{\varphi N_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中, φ 为圆中空夹层钢管混凝土轴压稳定系数; N_u 和 T_u 均采用圆中空夹层钢管混凝土所对应的计算方法,分别为轴压强度承载力和受纯扭时的抗扭承载力; φ 和 N_u 参考文献[8]中的公式计算; T_u 按文献[1]进行计算,计算公式中均考虑了空心率、内管强度和尺寸等参数的影响。该方程的适用参数范围为: $f_{yv} = 235 \sim 500 \text{ MPa}$, $f_{yt} = 235 \sim 500 \text{ MPa}$, C30~C90 混凝土,名义含钢率 ($\alpha_n = A_{so}/A_{ce}$, A_{so} 和 A_{ce} 分别为外钢管截面面积和外钢管内部所包含面积) 0.04~0.2,空心率 $\chi = 0 \sim 0.75$ 。

采用公式(1)对试验中的圆中空夹层试件的抗扭承载力进行了计算,并与试验结果作了对比,见表 1,公式计算结果与试验结果比值的平均值和均方差分别为 0.827 和 0.082。图 15 给出了圆中空夹层钢管混凝土压扭构件公式计算值与试验值的比较,可见公式计算结果与试验结果基本接近,且总体偏于安全,用简化公式计算圆中空夹层钢管混凝土压扭构件的承载力是可行的。

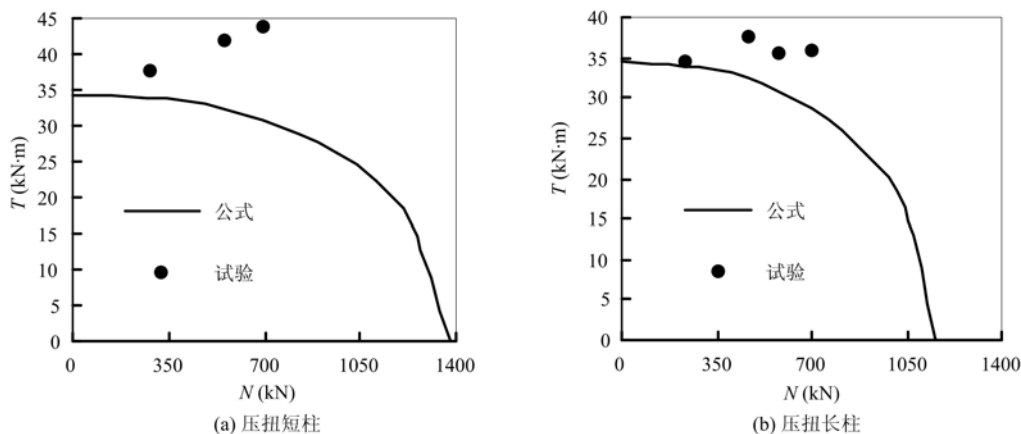


图 15 圆中空夹层钢管混凝土压扭构件公式计算值与试验值的比较

Fig. 15 Comparisons between simplified results and test results of CFST compression-torsion members

5 结论

(1) 试验过程中,圆中空夹层钢管混凝土压扭构件的扭矩—转角关系曲线未出现下降段,在加载后期仍表现出继续增加的趋势,试件表现出良好的塑性和延性性能,并具有一定的后期承载能力,试验结束后,所有试件在外观上均未发生明显破坏,夹层混凝土出现了与轴线约成 30° 角的螺旋裂缝;

(2) 加载初期钢管与混凝土间的相互作用力很小,此后,随着扭矩的增加,钢管与混凝土之间产生了较明显的相互作用,并且愈到加载后期钢管对混凝土的约束效应愈显著;

(3) 轴压比对压扭试件初始扭转刚度的影响不大,在一定范围内,随着轴压比的增大,短柱试件的抗扭承载力有所提高,而对于压扭长柱,当轴压比较小时,试件的抗扭承载力随着轴压比的增大而提高,当轴压比较大时,试件的抗扭承载力随着轴压比的增大而降低;

(4) 在弹塑性阶段的初始时刻,压扭长柱试件的抗扭刚度较大,但对于最终的抗扭承载力始终是短柱的更大,空心率较小时压扭短柱和长柱试件的扭矩—转角曲线和抗扭承载力均相差不大;

(5) 采用圆实心钢管混凝土压扭构件承载力相关方程的形式来计算圆中空夹层钢管混凝土压扭构件的抗扭承载力是可行的。

参考文献:

- [1] Hong Huang, Linhai Han, Xiaolin Zhao. Investigation on Concrete Filled Double Skin Steel Tubes (CFDSTs) under Pure Torsion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 90:221—234.
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践(2版)[M]. 北京:科学出版社, 2007 (HAN Linhai. Concrete-filled Steel Tubular Structure—Theory and Practice(2nd ed.)[M]. Beijing: Science Press, 2007(in Chinese))
- [3] 陈宝春, 李晓辉. 钢管混凝土(单圆管)约束扭转试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2008, 36(5):735—739 (CHEN Baochun, LI Xiaohui. Experimental Study on Restricted Torsion for Concrete Filled Steel Tube (Single Circular)[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2008, 36(5):735—739(in Chinese))
- [4] 王文达, 陈宇超, 张鹏鹏. 矩形钢管混凝土构件扭转性能及设计方法研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10):83—88 (WANG Wenda, CHEN Yuchao, ZHANG Pengpeng. Research on Torsion Behavior and Design Approach of Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Members[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(10):83—88 (in Chinese))
- [5] 徐积善, George Lee, Chang K C 等. 钢管混凝土短柱在压扭共同作用下的试验研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 1991(2):1—10 (Xu Jishan, George Lee, Chang K C, et al. Experimental Studies on Steel Tube, Cored Concrete and Concrete Filled Steel Tube Short Column under Compression and Torsion[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 1991(2):1—10(in Chinese))
- [6] 聂建国, 王宇航, 樊健生. 钢管混凝土柱轴压力—弯矩—扭矩空间复合受力拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9):1—11 (NIE Jianguo, WANG Yuhang, FAN Jiansheng. Experimental Study on Concrete Filled Steel Tubular Columns under Combined Compression, Flexure and Torsion[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9):1—11(in Chinese))
- [7] 黄宏, 陈梦成, 黄斌洁. 圆中空夹层钢管混凝土柱扭转实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3):288—294 (HUANG Hong, CHEN Mengcheng, HUANG Binjie. Experimental Study of Concrete-Filled Double-skin Circular Steel Tube Subjected to Pure Torsion[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3):288—294(in Chinese))
- [8] 黄宏. 中空夹层钢管混凝土压弯构件的力学性能研究[D]. 福州大学, 2006:68—72 (HUANG Hong. Behavior of Concrete Filled Double-Skin Steel Tubular Beam-Columns[D]. Fuzhou University, 2006:68—72(in Chinese))
- [9] 黄宏, 杨建, 张安哥 等. 方中空夹层钢管混凝土纯扭力学性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(4):676—682 (HUANG Hong, YANG Jian, ZHANG Ange, et al. Pure torsion behaviors of concrete filled double-skin (CHS inner and SHS outer) steel tubes[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2012, 37(4):676—682(in Chinese))
- [10] 徐积善, 宫安. 钢管混凝土短柱在压扭复合受力下的试验研究[C]. 哈尔滨建筑工程学院学报(中国钢协钢—混凝土组合结构协会第三次年会论文集), 1991, 24(增刊):34—42 (XU Jishan, GONG An. Experimental Studies

- on Concrete Filled Steel Tubular Short Columns under Compression and Torsion [C]. Journal of Harbin Architectural and Civil Engineering Institute (Proceedings of the third Annual Meeting of China Steel Construction Society Association for Steel-Concrete Composite Structures), 1991, 24(Supp.):34–42(in Chinese))
- [11] HAN Linhai, YAO Guohuang, TAO Zhong. Performance of Concrete-filled Thin-walled Steel Tubes under Pure Torsion[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1):24–36.
- [12] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术(2 版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007 (HAN Linhai, YANG Youfu. Modern Concrete-filled Steel Tubular Structure Technology(2nd ed)[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2007(in Chinese))

Experimental Study of Concrete-filled Double Skin Steel Tube Members (CHS Inner and CHS Outer) Subjected to Compression and Torsion

HUANG Hong^{1,2}, GUO Xiao-yu¹, CHEN Meng-cheng¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Control and Simulation of Construction Process, Nanchang 330013, China)

Abstract: 7 concret-filled double skin steel tube (CFDST) specimens were designed by taking the axial compression ratio and slenderness ratio as main parameters. At the same time, 2 concrete-filled steel tube (CFST) specimens were also designed for comparative analysis. An experimental study was carried out to investigate CFDST mechanical performances under axial compression and torsion composite loading state. Experimental phenomenon and results are described and analyzed respectively in this paper. Results show that in whole loading process, there is no descending segment on torque versus angle curve of the CFDST members subjected to compression and torsion, and CFDST exhibits some potential late bearing capacity due to its good plasticity and ductility. The confinement effect of steel tube on concrete is more significant on the late loading stage. The axial compression ratio, slenderness ratio and hollow ratio have little effect on initial rotational stiffness of specimens, while the axial compression ratio and slenderness ratio have certain effect on the torsional capacity. Finally, the bearing capacity correlation equation for members subjected to compression and torsion was adopted to calculate the torsion capacity of CFDST member. Calculation results are basically close to test results and are somewhat overall on the safe side. The correlation equation can be used as a reference for project design.

Keywords: concrete-filled double skin steel tube (CFDST); compression and torsion; test; influence parameters; correlation equation