

DOI:10.11918/202302046

双层圆钢管混凝土长柱压扭滞回性能试验

周中一^{1,2}, 庞新龙^{1,2}, 王涛^{1,2}, 靳宇航^{1,2}, 罗诒红^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080;

2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080)

摘要: 为研究双层圆钢管混凝土长柱在压、扭荷载作用下的力学性能, 利用研制的 Stewart 六自由度加载平台, 进行了两个普通圆钢管混凝土长柱和两个双层圆钢管混凝土长柱试件在纯扭、压扭作用下的低周往复试验。对比分析了各试件的承载力、扭转变形、耗能、滞回性能, 进行了有限元参数分析。研究表明: 普通圆钢管混凝土长柱和双层圆钢管混凝土长柱均具有较好的抗扭能力; 与普通圆钢管混凝土长柱相比, 双层圆钢管混凝土长柱的初始刚度和承载力略有提升, 滞回曲线更饱满, 耗能能力和延性大幅提升; 参数分析表明含钢率一定时, 内层钢管径厚比越大, 对抗扭越有利; 一定范围内的轴向荷载, 可提高钢管混凝土柱的抗扭能力。

关键词: 钢管混凝土; 纯扭; 压扭; 拟静力往复加载; Stewart 平台

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)01-0117-13

Test on hysteretic behavior of concrete-filled double-skin steel tubular long columns under compression torsion

ZHOU Zhongyi^{1,2}, PANG Xinlong^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, JIN Yuhang^{1,2}, LUO Yihong^{1,2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Key lab of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China)

Abstract: To study the mechanical performance of concrete-filled double-skin steel tubular long columns under compressive and torsional loads, two ordinary circular steel tube reinforced concrete columns and two double-layered steel tube reinforced concrete columns were subjected to low-cycle reciprocating tests under pure torsion and torsion-compression loading using a developed Stewart six-degree-of-freedom loading platform. Based on the tests, the bearing capacity, torsional deformation, energy dissipation, and hysteresis performance of each specimen were compared and analyzed, and finite element parameter analysis was conducted. The study shows that both ordinary circular steel tube reinforced concrete columns and double-layered circular steel tube reinforced concrete columns have good torsional resistance. Compared with ordinary circular steel tube reinforced concrete columns, the initial stiffness and bearing capacity of double-layered steel tube reinforced concrete columns are slightly improved, the hysteresis curve is more full, and the energy dissipation capacity and ductility are greatly improved. Parameter analysis shows that when the steel content is constant, the larger the thickness ratio of the inner steel tube, the more beneficial it is for torsional resistance; and within a certain range of axial loads, the torsional resistance of steel tube reinforced concrete columns can be improved.

Keywords: CFST; pure torsion; compression torsion; quasi-static cyclic loading tests; Stewart platform

双层钢管混凝土柱是指在钢管混凝土中内置圆钢管, 浇筑混凝土后形成的一种钢管混凝土组合柱, 具有承载力高、塑性和延性好等优势^[1], 常用于风力发电机支架、输电塔杆、桥墩等结构。目前的大量研究成果多集中在钢管混凝土柱的轴心受压、偏心

受压、压弯等简单受力方面, 而受扭和压扭荷载下钢管混凝土柱的力学性能研究较少。

徐积善等^[2]对不同截面形式的钢管混凝土柱进行了非比例加载的双轴压扭试验研究, 给出了简化理论计算公式; 韩林海等^[3]进行了4个圆钢管混

收稿日期: 2023-02-21; 录用日期: 2023-04-24; 网络首发日期: 2023-07-31

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/23.1235.T.20230728.1636.002.html>

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2020B05); 黑龙江省头雁行动计划(3016)

作者简介: 周中一(1980—), 男, 副研究员, 硕士生导师; 王涛(1977—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 周中一, zhouzy@iem.ac.cn

凝土柱的抗扭试验研究和有限分析,给出了钢管混凝土抗扭承载力指标的定义方法及其简化公式;史艳莉等^[4]对内置十字型钢骨钢管混凝土柱进行了有限元分析,分析了钢管强度、含钢率、长细比等因素对构件抗扭承载力的影响;聂建国等^[5]以几何方程、材料本构和平衡方程为基础,建立了钢管混凝土柱在轴力-扭矩复合作用下全过程分析的分层简理论模型,弥补了现有关于钢管混凝土柱抗扭性能分析理论的缺陷;黄宏等^[6]对 6 根圆中空夹层钢管混凝土柱和一根双层空钢管柱进行了抗扭试验研究,研究表明钢管和混凝土协同工作性能良好;聂影等^[7]对内嵌 H 型钢的钢管混凝土柱进行了压扭试验,分析了扭转滞回性能,研究表明内嵌 H 型钢的钢管混凝土柱具有良好的扭转耗能能力。

上述研究,多以理论分析和数值模拟为主,试验研究尚少,且研究目标多为短柱,但随着高耸建筑和大跨建筑的发展,钢管混凝土长柱^[8] ($\lambda > 16, \lambda = 4L/D$)的应用也越来越多。基于此,本文采用课题组研制的 Stewart 三向六自由度加载装置,进行了两个圆钢管混凝土长柱和两个双层圆钢管混凝土长柱在纯扭、压扭作用下的拟静力试验研究,对比分析了圆钢管混凝土长柱的承载力、刚度、扭转变形能力、滞回特性和损伤演化规律等。建立了圆钢管混凝土

长柱有限元模型,对压扭工况下的双层圆钢管混凝土长柱进行了考虑结构非线性的弹塑性分析,研究了轴压比、内层圆钢管径厚比等因素对双层圆钢管混凝土长柱压扭性能的影响。

1 试验概况

设计了两个圆钢管混凝土长柱和两个双层圆钢管混凝土长柱试件,试件截面形式和几何尺寸见图 1,具体参数及编号见表 2,其中试件编号中的 1、2 分别表示钢管混凝土长柱和双层圆钢管混凝土长柱两种截面形式,T、NT 分别表示纯扭、压扭试件。钢管钢材等级为 Q345B,实测力学性能指标见表 1;混凝土强度等级为 C40,实测立方体抗压强度为 42.6 MPa,轴心抗压强度 32.3 MPa,弹性模量 3.3×10^4 MPa。

表 1 钢管材性试验结果

Tab.1 Steel material properties

钢材厚度/ mm	极限强度 f_u /MPa	屈服强度 f_y /MPa	弹性模量 $E/10^5$ MPa
2.9	617.1	475.9	1.95
5.0	577.7	451.7	1.89

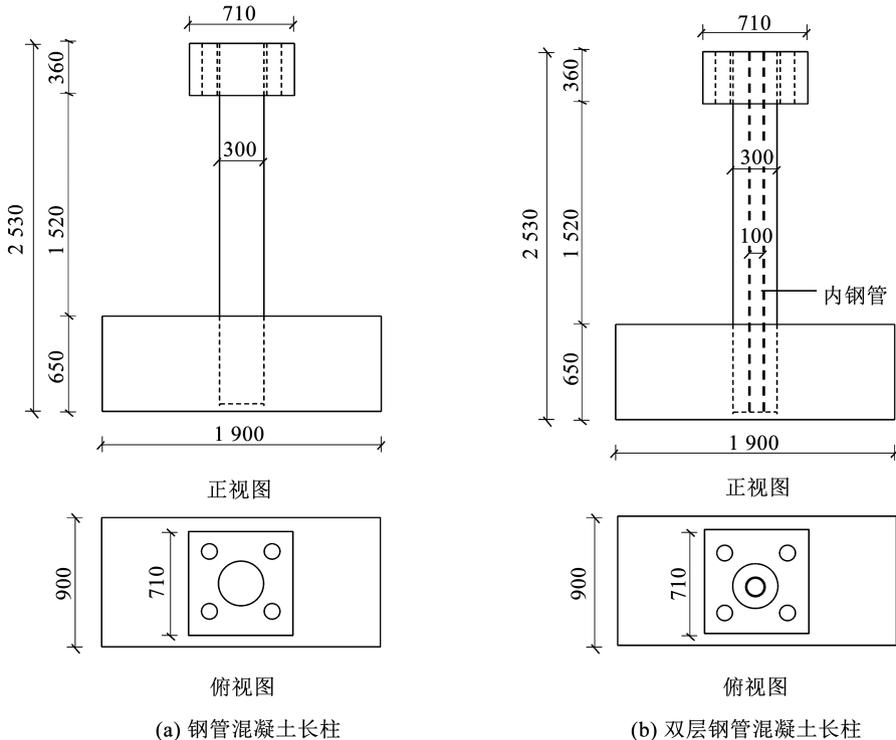


图 1 试件几何尺寸 (mm)

Fig.1 Specific size of specimens (mm)

表 2 试件参数

Tab. 2 Parameters of specimens

试件编号	有效长度 L/mm	外钢管厚度 t_1/mm	内钢管厚度 t_2/mm	外钢管直径 D/mm	内钢管直径 d/mm	长细比 λ	轴压比 n	加载方式
1T	1 520	5		300		20.27	0	纯扭
1NT	1 520	5		300		20.27	0.3	压扭
2T	1 520	5	2.9	300	100	20.27	0	纯扭
2NT	1 520	5	2.9	300	100	20.27	0.3	压扭

注: λ 为长细比, 圆钢管试件 $\lambda = 4L/D$; 轴压比 $n = N/N_0$, N 为试验轴向荷载加载值, 轴压承载力 N_0 采用计算公式 $N_0 = f_c A_c (1 + \alpha\theta + \rho)^{[9]}$ 计算, 其中 f_c 为混凝土轴心抗压强度; A_c 为混凝土的截面面积; α 为与混凝土强度等级有关的系数, C50 及其以下的混凝土取 2, C80 混凝土取 1.7, C50 ~ C80 之间线性插值取用; θ 为套箍指标 (约束效应系数); ρ 为配骨指标。

2 试验加载与测量方案

2.1 试验装置

Stewart 三向六自由度加载装置^[10]的上平台固定, 下平台具有沿 x 、 y 、 z 方向平动和绕 x 、 y 、 z 方向转动等 6 个方向的自由度, 加载平台通过侧挂铰与试验室反力墙连接。该装置具有刚度大、承载力高、位置误差累计等特点, 可以在空间六维实现运动和力的输出, 能够准确模拟构件的实际受力状态, 已在航空、航天、海底作业、地下开采、制造装配等行业的运动模拟领域广泛应用。

本文试验的试件安装见图 2, 试件顶部加载头通过锚固螺栓与下平台连接, 侧限螺杆加强柱顶加载头的约束。试件与反力地板之间通过刚性底座连接, 刚性底座与反力地板、试件基础与刚性底座之间均通过锚固螺栓连接。在刚性底座四周安装千斤顶, 防止基础侧向滑动。

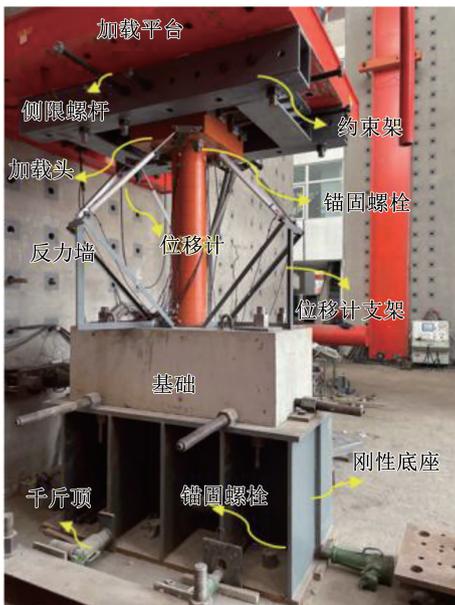


图 2 试件安装示意

Fig. 2 Connection between specimens and loading devices

2.2 加载制度

试验前先对钢管混凝土长柱扭转试验进行有限元试算, 估算出钢管混凝土柱的屈服扭转角 Δ_0 在 4° 左右。纯扭试验采用位移角控制加载, 按照估算屈服扭转角的倍数分级加载, 每级往复加载两次; 压扭工况的试件先按照相应轴压比施加轴向荷载, 然后再施加扭转位移角, 扭转加载制度见图 3。

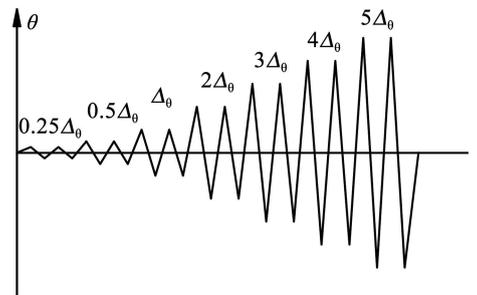


图 3 扭转试验加载制度

Fig. 3 Torsional test loading program

2.3 测量方案

2.3.1 控制点位移测量

位移测量采用外环多自由度位移测量方法^[11], 具体测量原理见图 4, 通过 6 个位移计从初始长度 l_0 到终止长度 $l_j (j = 1, \dots, 6)$ 的伸长量反算测量点 Q_0 移动到 Q 时, x 、 y 、 z 方向的平动位移和 3 个方向的转角。本次试验中 6 个位移计的两端分别连接至基础和试件加载头的位移计支架, 位移计支架两端分别与试件加载头和基础连接, 可直接测量柱顶和基础之间的相对位移, 避免了由于基础和加载头滑动带来的测量误差。

2.3.2 钢管应变测量

在外钢管布置应变片花, 在内钢管底部布置应变片, 具体位置见图 5。

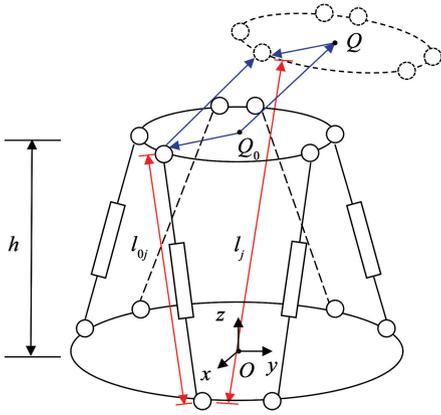


图 4 外环多自由度位移测量原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the displacement measurement

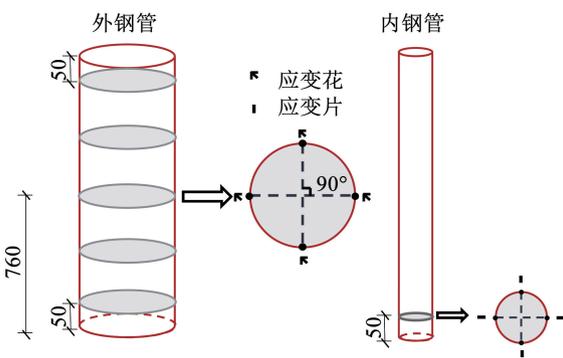


图 5 应变测点布置 (mm)

Fig. 5 Arrangement of strain measurement points

3 试验分析

3.1 试验现象

3.1.1 纯扭试验

各试件的损伤发展过程见图 6。圆钢管混凝土长柱试件 1T 的扭转角加载至 12° 之前钢管壁无明显现象。当加载到扭转角至 16° ，反向卸载至 14° 时，钢管外壁撕裂，外钢管对核心混凝土的约束力减弱，核心混凝土裂缝发展迅速，反向加载至 -16° 时出现明显斜向扭剪裂缝，局部混凝土剥落，卸载至 0° 时，钢管外壁撕裂残余变形较大，见图 6(a)。

双层圆钢管混凝土长柱试件 2T 与普通圆钢管混凝土长柱试件 1T 相比，双层圆钢管混凝土长柱试件在试验过程中无明显现象，仅钢管外表面的网格发生明显的倾斜，见图 6(b)；说明内层钢管提高了钢管混凝土长柱的抗扭能力。

3.1.2 压扭试验

与纯扭试验相比，轴压比为 0.3，扭转角加载至 20° 时，普通圆钢管混凝土长柱试件 1NT 和双层圆钢管混凝土长柱试件 2NT 均无明显现象，表明轴压的存在一定程度上抑制了钢管拉应力的发展，提高了钢管混凝土长柱的抗扭能力，见图 6(c) 和图 6(d)。



(a) 1T



(b) 2T



(c) 1NT



(d) 2NT

图 6 试件破坏过程

Fig. 6 Failure modes of specimens

3.2 扭矩-扭转角关系

扭矩-扭转角滞回曲线见图 7，曲线上的数字 1、2、3 分别表示等效屈服点、峰值点和极限点。等效屈服点通过最远点法^[12]确定，峰值点定义为扭矩承

载力最大点，极限点定义为试验结束时的最大位移点。

由图 7 可见：1) 所有的试件扭矩-扭转角曲线均表现出双折线特征。试件 1NT、2T、2NT 没有下降段，峰值点即为极限点；2) 除了焊缝开裂的试件 1T

外,其余纯扭、压扭试件的滞回曲线都较饱满,纯扭试件 1T、2T 加载后期扭转角过大时滞回曲线轻微捏缩,卸载时的刚度近似等于初始刚度,强度和刚度的退化较少,表明其具有良好的变形能力;3) 压扭试件的滞回曲线较纯扭试件饱满,且无捏缩现象,表明一定范围内轴压可提高钢管混凝土长柱的扭转耗

能能力;4) 双层钢管混凝土长柱中内部钢管的存在延缓了外钢管损伤,当外钢管损伤时,内部钢管进一步加强了外钢管对混凝土约束作用,截面内应力重分布,原外钢管损伤部分承担的内力由混凝土和内钢管共同承担。

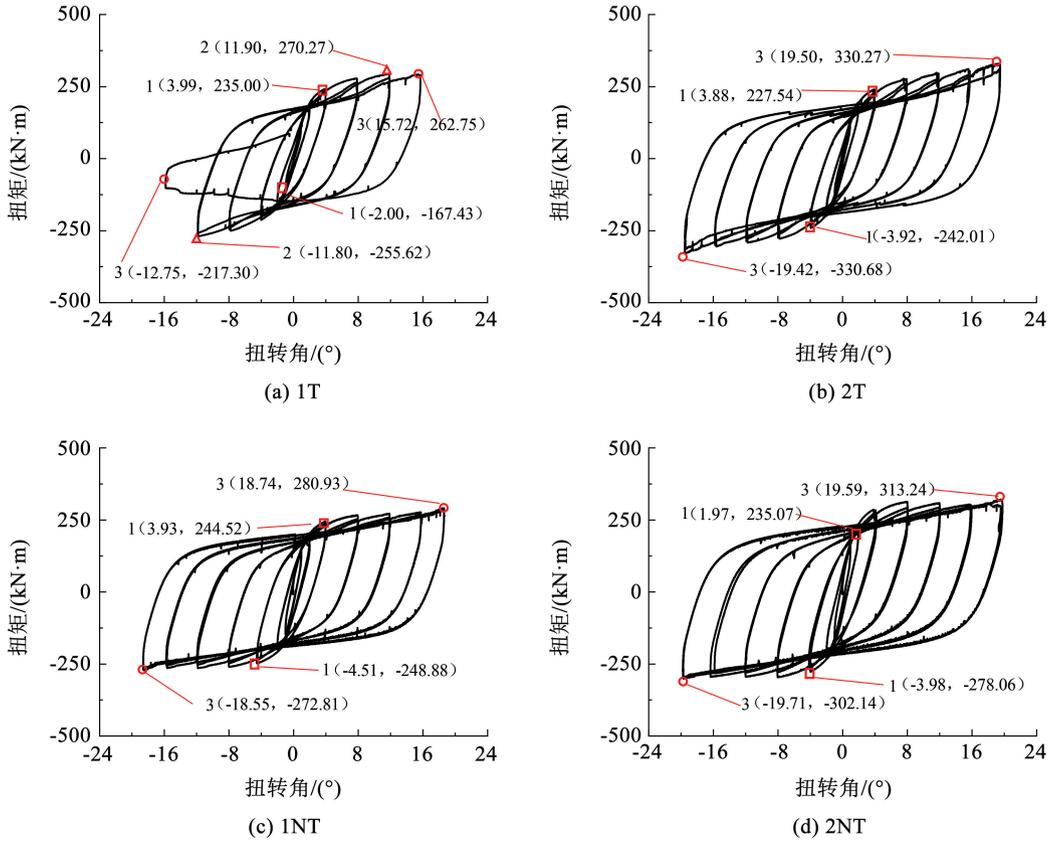


图 7 扭矩-扭转角滞回曲线

Fig. 7 Torsion moment-rotation angle hysteresis loops

3.3 骨架曲线与刚度退化

3.3.1 骨架曲线

实测扭矩-扭转角骨架曲线见图 8。由图 8 可知:1) 骨架曲线呈 S 形,由于加载设备扭转幅度的限制,骨架曲线并没有产生明显的下降段,单方向骨架曲线近似双折线;2) 各试件的初始刚度比较接近,双层钢管混凝土长柱试件的承载力和屈服后刚度,均比普通钢管混凝土长柱试件大;施加轴向荷载后,钢管混凝土长柱的承载力和屈服后的刚度也有明显提升;3) 双层钢管混凝土长柱试件和压扭试件的骨架曲线的水平段较长,表明内置钢管和增加轴压能够提高延性和弹塑性变形能力。

3.3.2 刚度退化

采用等效割线刚度方法计算各试件刚度,等效割线刚度为每级循环加载正负向峰值承载力绝对值之和与正负向连梁转角绝对值之和的比值,见式(1),各试件刚度退化曲线见图 9。

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\theta_i| + |-\theta_i|} \quad (1)$$

式中: $+P_i$ 和 $-P_i$ 分别为第 i 级循环加载在正负向的峰值承载力, $+\theta_i$ 和 $-\theta_i$ 分别为第 i 级循环加载正负向峰值承载所对应的扭转角。

由图 9 可见:1) 与普通圆钢管混凝土试件 1T 相比,双层圆钢管混凝土长柱试件 2T 初始扭转刚度提高了 31%,试件 2NT 的初始刚度较 1NT 提高了 8%,且双层钢管混凝土长柱 2T、2NT 后期刚度下降较缓慢,表明双层钢管混凝土长柱中的内层钢管对抗扭刚度有一定的贡献;2) 试件 1NT 较 1T 而言,轴压的存在使得扭转刚度提高 31%,试件 2NT 的初始扭转刚度较 2T 提高了 19%,试件 2NT 的初始刚度较 1NT 提高了 8%,屈服之后扭转刚度退化速度变慢。表明一定范围内轴压会提高钢管混凝土长柱的初始刚度,而对于后期刚度退化影响不大。

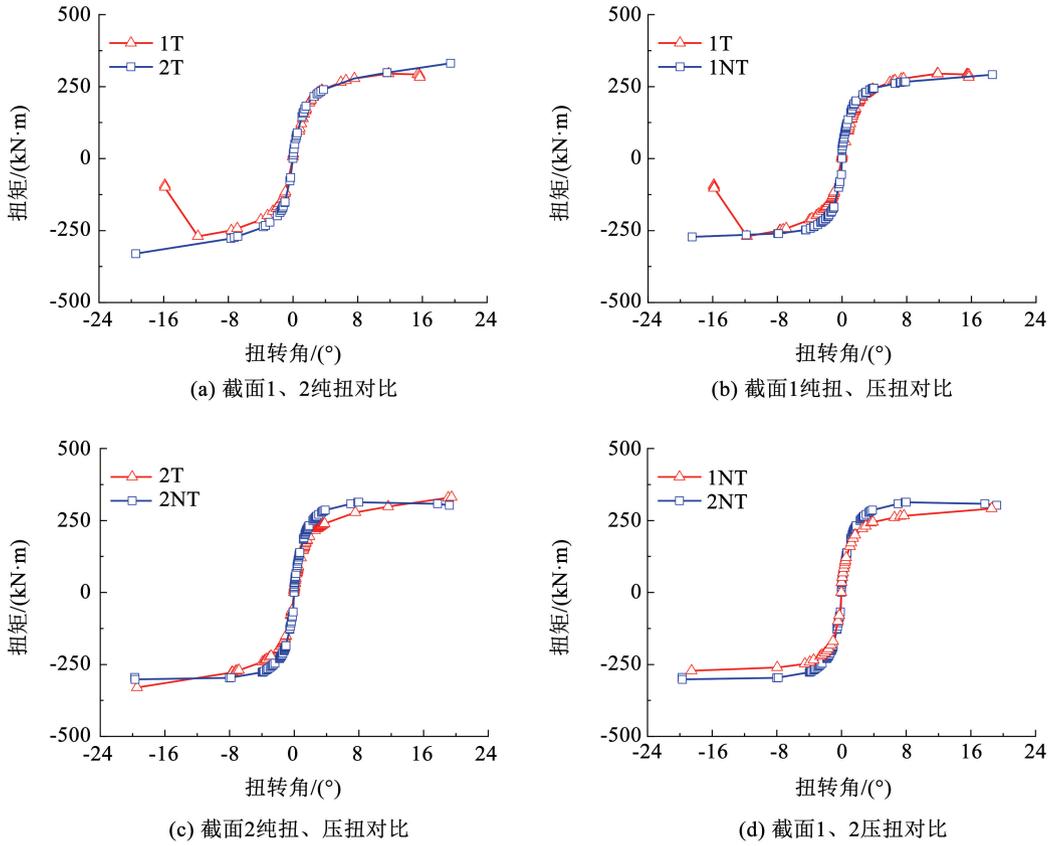


图 8 扭矩-扭转角骨架曲线

Fig. 8 Torsion moment-rotation angle skeleton curves

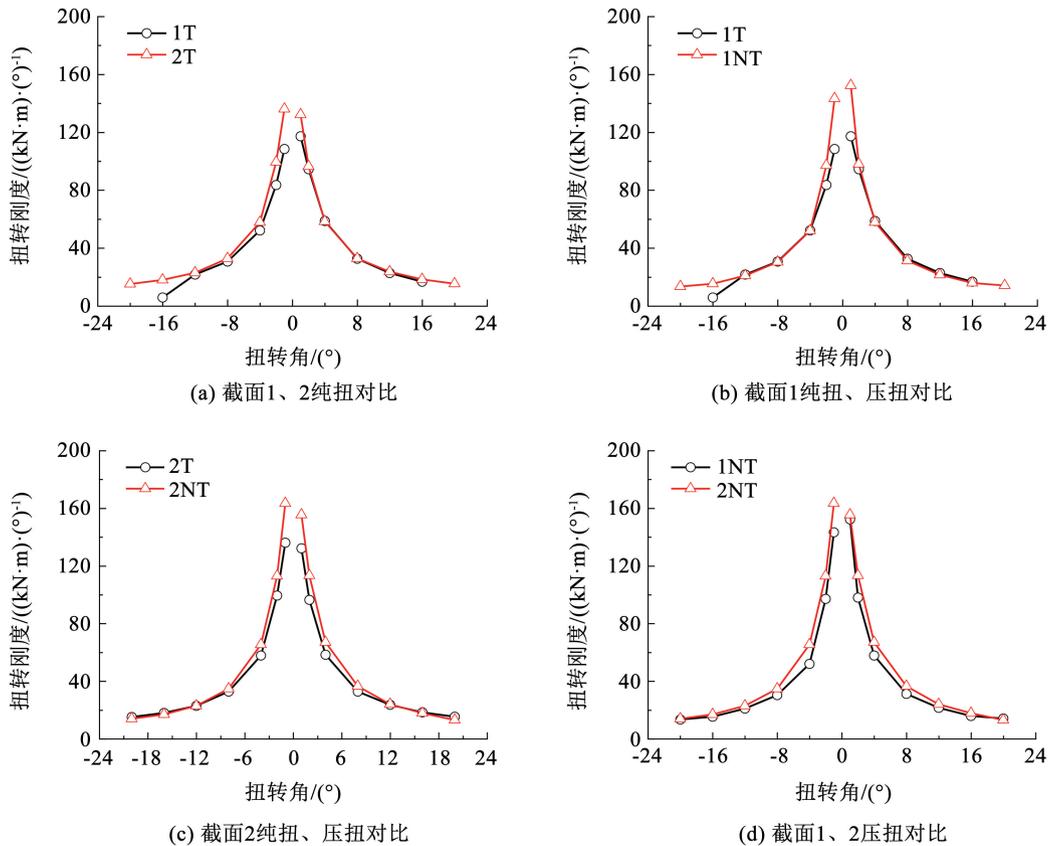


图 9 扭转刚度退化曲线

Fig. 9 Rigidity degradation versus displacement curves of specimens

3.3.3 承载力与变形

根据骨架曲线, 采用最远点法^[12] 确定屈服扭转角, 极限扭转角定义为承载力下降至峰值承载力的 85% 或试验终止时的扭转角度, 将极限扭转角和等

效屈服扭转角的比值定义为扭转延性系数。实测各试件的初始刚度、屈服扭矩、极限扭矩、屈服扭转角、极限扭转角以及扭转延性系数见表 3。表中相对值是对比件相对于标准件在各个不同指标下的比值。

表 3 试件关键点受力特征

Tab.3 Mechanical characteristics of specimens

试件编号	K_0	相对值	$T_y/(kN \cdot m)$	相对值	$\theta_y/(^\circ)$	相对值	$T_u/(kN \cdot m)$	相对值	$\theta_u/(^\circ)$	相对值	μ
1T	112.80	1.00	199.18	1.00	3.80	1.00	245.91	1.00	15.45	1.00	4.06
2T	134.25	1.19	234.78	1.18	3.90	1.03	330.48	1.34	19.46	1.26	4.99
1NT	147.90	1.31	246.70	1.24	4.22	1.11	276.60	1.12	18.19	1.18	4.32
2T	134.25	1.00	234.78	1.00	3.90	1.00	330.48	1.00	19.46	1.00	4.99
2NT	159.53	1.19	256.57	1.09	2.98	0.76	307.69	0.93	19.65	1.01	6.59
1NT	147.90	1.00	246.70	1.00	4.22	1.00	276.60	1.00	18.19	1.00	4.31
2NT	159.53	1.08	256.57	1.09	2.98	0.71	307.69	1.11	19.65	1.08	6.59

注: K_0 表示试件屈服前的初始刚度; T_y 、 T_u 分别表示屈服扭矩和极限扭矩; θ_y 和 θ_u 分别表示屈服扭转角和极限扭转角; 扭转延性系数 $\mu = \theta_u / \theta_y$ 。

由表 3 可见: 1) 与钢管混凝土长柱试件 1T 相比, 双层钢管混凝土长柱试件 2T 的初始刚度提高了 19%, 屈服扭矩提高了 18%, 极限扭矩提高了 34%, 屈服扭转角提高了 3%, 极限扭转角提高了 26%, 延性系数提升较大; 2) 与无轴压长柱试件 1T 相比, 轴压比为 0.3 的试件 1NT 的初始刚度提高了 31%, 屈服扭矩提高了 24%, 极限扭矩提高了 12%, 屈服扭转角提高了 11%, 极限扭转角提高了 18%, 延性系数略有提升; 与无轴压双层圆钢管混凝土长柱试件 2T 相比, 轴压比为 0.3 的双层圆钢管混凝土长柱试件 2NT 的初始刚度提高了 19%, 屈服扭矩提高了 9%, 极限扭矩略有降低, 屈服扭转角降低了 24%,

极限扭转角相差不大, 延性系数大幅提升; 3) 与轴压比为 0.3 的普通圆钢管混凝土长柱试件 1NT 相比, 轴压比为 0.3 的双层圆钢管混凝土长柱试件 2NT 的初始刚度提高了 8%, 屈服扭矩提高了 9%, 极限扭矩提高了 11%, 屈服扭转角降低了 29%, 极限扭转角提高了 8%。延性系数大幅提升。

3.4 耗能能力

结构的耗能能力是指结构在地震作用下发生塑性变形, 吸收和耗散能量的能力。以每级循环加载的滞回曲线所包围的面积作为试件耗能能力的评价标准。各试件的扭转变形累积耗能随加载级别数的变化见图 10。

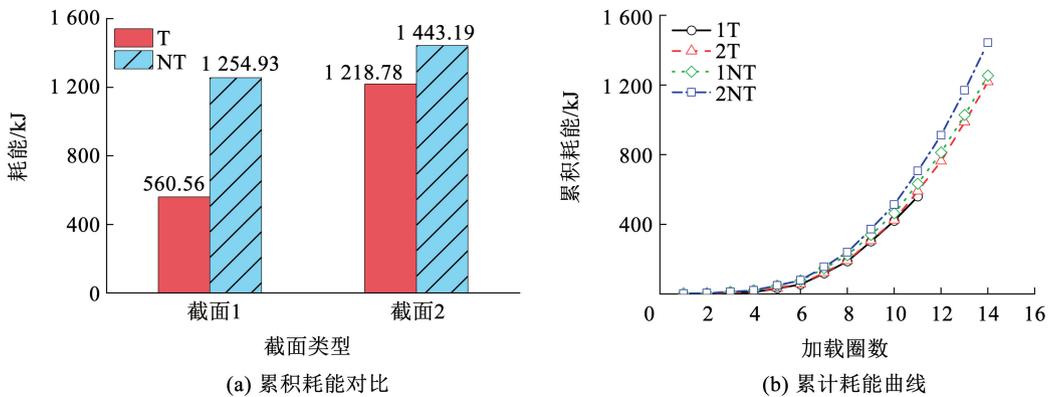


图 10 累积耗能

Fig. 10 Energy dissipation of specimens

由图 10 可见: 1) 各试件在第四级加载循环 (扭转角小于 2°) 前, 扭转耗能与加载级数为线性关系, 且各试件的耗能能力接近。第 5 次加载循环 (扭转角达到屈服点 4° 左右) 时, 各试件的累积耗能开始

迅速增加; 2) 与普通圆钢管混凝土长柱试件 1T 相比, 双层圆钢管混凝土长柱试件 2T 的扭转累积耗能提高了 4%, 表明纯扭工况下内层圆钢管对钢管混凝土长柱的耗能能力提升有限; 3) 与无轴压试件相

比,轴压比为 0.3 的普通圆钢管混凝土长柱试件 1NT 的扭转累积耗能比无轴压普通圆钢管混凝土长柱试件 1T 提高了 13%,轴压比为 0.3 的双层圆钢管混凝土长柱试件 2NT 的扭转累积耗能比无轴压双层圆钢管混凝土长柱试件 2T 提高 21%,轴向荷载可显著提升圆钢管混凝土长柱的扭转耗能能力; 4)轴压比均为 0.3 时,双层圆钢管混凝土长柱试件 2NT 的累积耗能比普通圆钢管混凝土长柱试件 1NT 提高了 11%,施加轴压后,双层圆钢管混凝土长柱的扭转耗能能力较普通圆钢管混凝土长柱有一定幅度的提升。

综上,普通圆钢管混凝土长柱和双层圆钢管混凝土长柱的扭转耗能能力均较强,其中双层圆钢管混凝土长柱的扭转耗能能力优于普通圆钢管混凝土长柱;一定范围内轴向荷载可显著提高圆钢管混凝土长柱试件的扭转耗能能力。

3.5 应变分析

选取各外钢管底层测点的应变进行分析。测点的剪应变根据应变花测量的数据,计算方法为

$$\gamma = \varepsilon_a + \varepsilon_b - 2\varepsilon_c \quad (2)$$

式中: ε_a 为测点的水平环向正应变, ε_b 为测点的竖向正应变, ε_c 为测点的斜向 45° 正应变。

外钢管底层峰值剪应变在不同加载级下的分布见图 11。图中横坐标 1 至 4 分别表示外钢管圆周四等分点的位置。本文所有钢管混凝土试件的外钢管均为直缝焊接钢管,其中 1 号位置为钢管焊缝所在位置,钢材在焊接后内部存在残余应力,且塑性和韧性降低。故试件 2T、1NT、2NT 在 1 号位置的剪应变略低于同一截面其他位置的剪应变。试件 1T 钢管焊缝位置在 4 号位置,故试件 1T 的 4 号位置加载后期剪应变偏小。

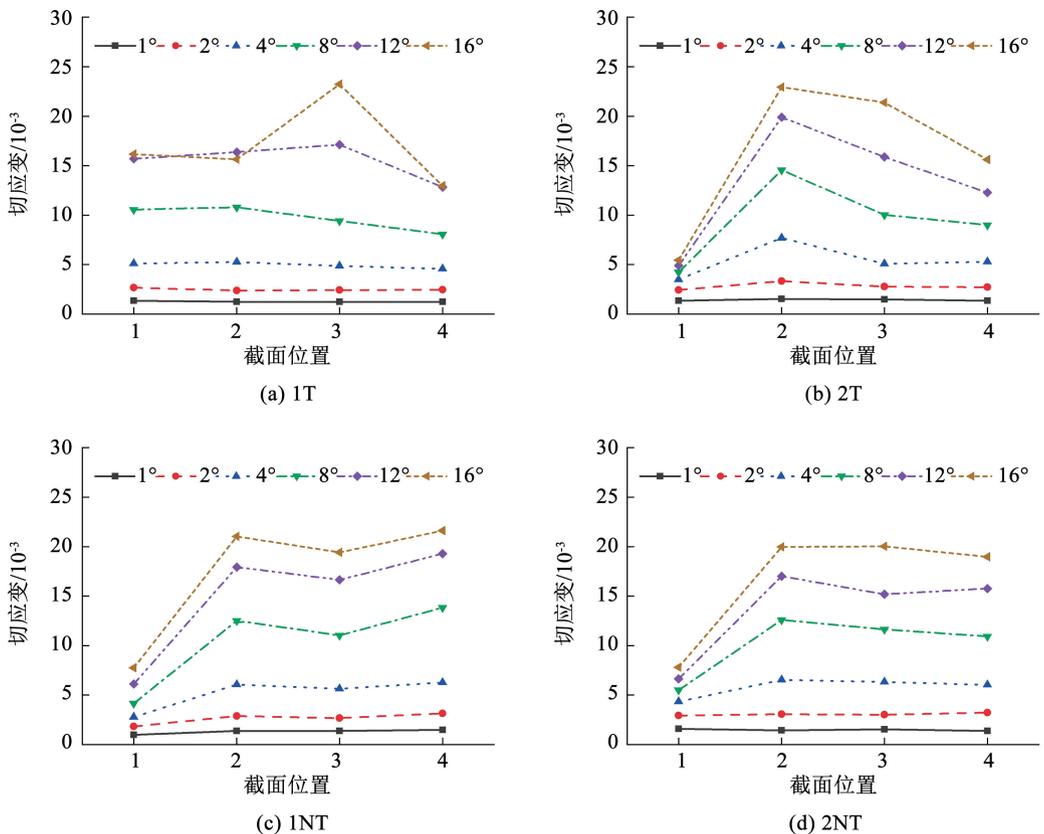


图 11 峰值应变分布

Fig. 11 Peak strain distribution

由图 11 可见:1)各试件在加载达到屈服之前剪应变分布均匀,屈服之后由于截面焊缝的存在以及钢管本身的不均匀性和内部混凝土缺陷等原因导致同一截面的剪应变分布有所差别;2)普通圆钢管混凝土长柱试件 1T 扭转角加载至 8° 之前截面各位

置剪应变相差不大,表明扭转角较小时截面受扭均匀;3)试件 1T 中 4 号位置、试件 2T、1NT、2NT 中 1 号位置为外钢管焊缝所在位置,各级加载的峰值应变均略小于截面平均剪应变水平;4)双层圆钢管混凝土长柱试件,内部钢管直径较小,对截面抗扭的贡

献不大, 致使剪应变变化不明显。

4 有限元分析

4.1 有限元模型

采用有限元软件 Abaqus 建立了双层圆钢管混凝土长柱试件的弹塑性有限元模型。混凝土和外钢管采用实体单元, 内部钢管采用壳单元。钢管与混凝土的法向接触采用硬接触, 切向力传递时采用库仑摩擦模型; 内部圆钢管在混凝土中定义为内置区域。将试件加载头表面耦合到参考点 rp_1 , 在 rp_1 点施加轴向荷载和扭转位移。

4.1.1 材料参数

钢管采用弹塑性本构, 依据材性试验实测屈服强度以及应力-应变关系。韩林海^[1]研究了大量国内外钢管混凝土轴压试验后, 对试验结果进行分析整理后基于约束效应系数 ξ 提出了韩林海本构。

$$\xi = (A_s f_y) / (A_c f_c) \quad (3)$$

式中: A_s 、 A_c 分别为钢管面积和核心混凝土面积, f_c 、 f_y 分别为核心混凝土抗压强度和钢材屈服强度。

刘威^[13]对韩林海本构进行修正后, 提出了下列本构关系:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta(x-1)^\eta + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x = \varepsilon / \varepsilon_0$; $y = \sigma / \sigma_0$; $\sigma_0 = f_c$ (N/mm^2); $\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 0.0008\xi^{0.2}$; $\varepsilon_c = (1300 + 12.5f_c) \times 10^{-6}$ (N/mm^2);

$$\eta = \begin{cases} 2, & \text{圆钢管混凝土} \\ 1.6 + 1.5/x, & \text{方钢管混凝土} \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^{0.7}]} \times f_c^{0.5} \times 0.5 \geq 0.12, & \text{圆钢管} \\ \frac{f_c^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}}, & \text{方钢管} \end{cases}$$

4.1.2 边界条件

在柱端参考点 rp_1 输入扭转位移进行加载, 并约束 x 、 y 方向的平动和转动自由度, 模型底部为固结。纯扭工况下在参考点 rp_1 输入转角, 压扭工况分两个荷载步, 首先在参考点 rp_1 施加竖向轴力, 然后施加扭转位移, 模型示意图见图 12。

4.2 模型验证

采用与试验相同的加载制度, 试验与数值模拟结果对比见图 13。由图 13 可见: 1) 普通圆钢管混凝土长柱试件 1T 的数值模拟与试验结果差异较大,

这是由于该试件的破坏发生在正向 16° , 外钢管焊缝撕裂严重导致承载力突降; 2) 试件 1NT、2T、2NT 在整个加载过程中钢管焊缝未开裂, 钢管整体工作性能良好, 数值模拟结果与试验实测结果吻合较好, 表明本文采用的建模方式可以较好地模拟钢管混凝土构件扭转试验中的扭矩-扭转角关系。

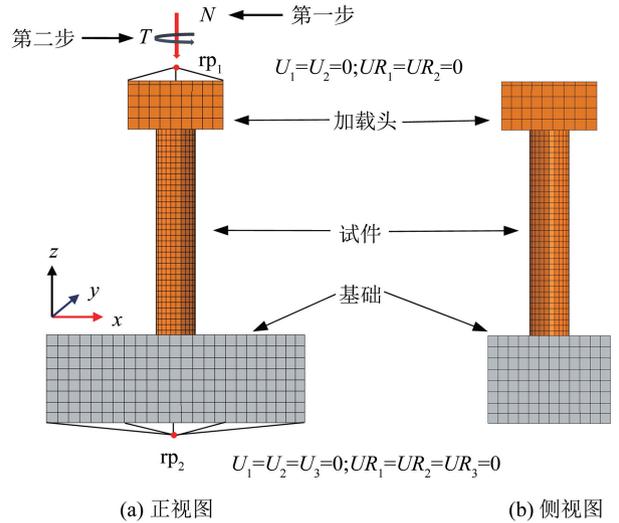


图 12 有限元模型示意

Fig. 12 Numerical models

4.3 参数分析

采用有限元模型, 对双层圆钢管混凝土长柱进行了参数分析, 研究了内钢管径厚比和轴压比对抗扭性能的影响。

4.3.1 内钢管径厚比影响

试验结果表明双层圆钢管混凝土长柱的抗扭刚度高于普通圆钢管混凝土长柱, 内层钢管对承载力的影响并不明显。考虑是由于内钢管径厚比较小, 内钢管对整体扭转承载力的贡献较小。因此, 通过有限元分析了内层钢管面积一定, 直径分别为 50、100、150、200、250 mm, 对应的径厚比分别为 8、35、80、144、220 时, 双层圆钢管混凝土长柱试件在纯扭和压扭工况下的承载力, 分析结果见图 14。

由图 14 可见: 1) 内层钢管径厚比不同时, 圆钢管混凝土长柱试件屈服前, 各试件的刚度基本相同; 2) 双层圆钢管混凝土长柱的承载力和延性, 均随径厚比的增大而增大, 表明考虑扭转影响时, 应尽量增大双层钢管混凝土长柱内层钢管的径厚比。

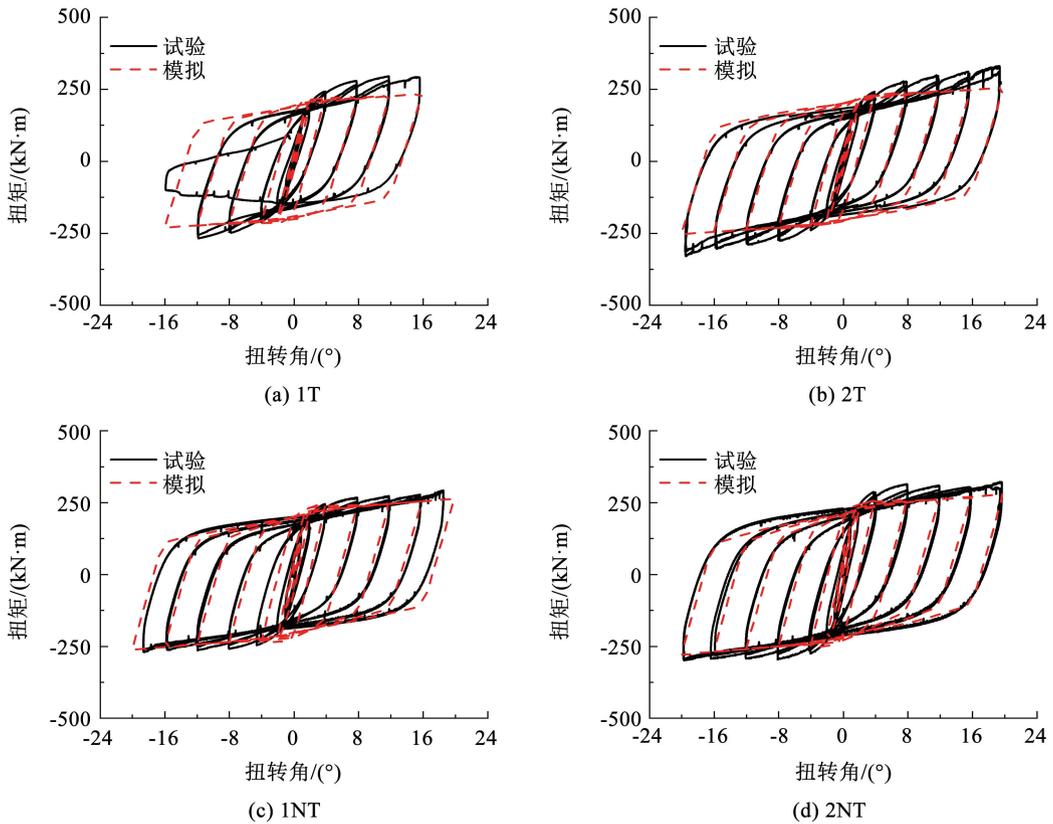


图 13 有限元模拟验证

Fig. 13 Validation of finite element model

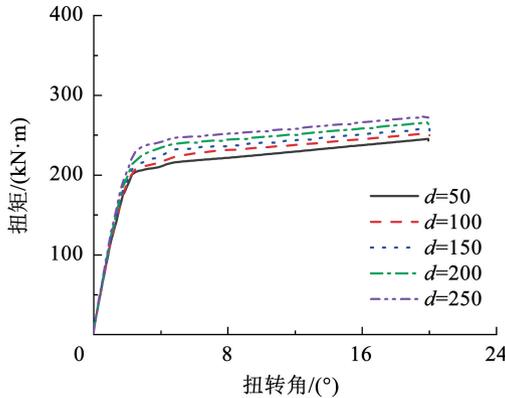
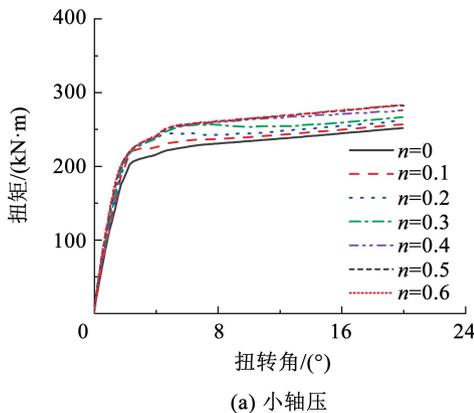
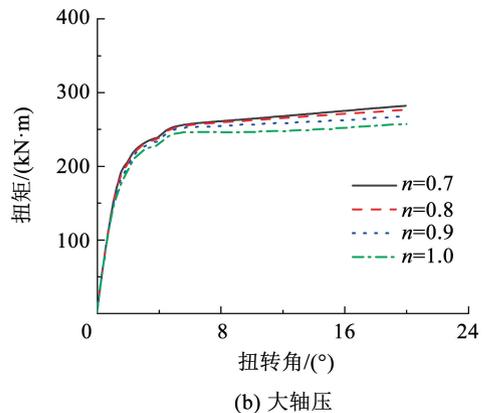


图 14 内钢管径厚比的影响

Fig. 14 The influence of diameter-to-thickness ratio of the inner steel tube



(a) 小轴压



(b) 大轴压

图 15 轴压的影响

Fig. 15 The influence of axial pressure

4.3.2 轴压比影响

由于试件数量的限制,双层钢管混凝土长柱扭转试验仅对压扭工况下轴压比 $n = 0$ (纯扭) 和 $n = 0.3$ (压扭) 两种工况进行了试验研究。为进一步研究轴压大小对压扭试件的影响,分别进行了轴压比从 0 至 1 等不同轴压水平下的数值模拟,数值模拟结果见图 15。

由图 15 可见:1)轴压比从 0 增加至 0.6 时,随着轴压的增大,双层钢管混凝土的抗扭承载力逐渐增大;当轴压比从 0.7 增加至 1 时,随着轴压的增大,双层圆钢管混凝土长柱的抗扭承载力逐渐减小;2)轴压比从 0 增加至 0.6 时,随着轴压的增大,双层

圆钢管混凝土长柱的抗扭刚度逐渐增大,当轴压比从 0.7 增加至 1 时,双层圆钢管混凝土长柱试件的初始刚度逐渐增大,但屈服后刚度逐渐减小。

5 扭转恢复力简化模型

试验数据和数值模拟的结果表明纯扭和压扭受力状态下,往复扭转的扭矩-扭转角关系可以近似划分为弹性阶段和强化阶段,曲线呈双折线状,故考虑采用双折线模型建立扭转恢复力模型,见图 16。

弹性阶段钢管混凝土的扭转刚度 $K_T'^{[14]}$ 为

$$K_T' = (2\alpha + 0.42) G_{sc} I_p \quad (5)$$

式中: α 为截面含钢率, G_{sc} 为钢管混凝土的组合剪切模量, I_p 为钢管混凝土的极惯性矩。

本文在式(5)基础上引进轴压影响系数 m 和内钢管影响系数 n ,得到弹性阶段扭转刚度 K_0 的计算公式为

$$K_0 = mn(2\alpha + 0.42) G_{sc} I_p \quad (6)$$

式中 m 和 n 通过试验数据以及有限元模型拟合后分别取 1.12 和 1.08。

对试验结果和有限元结果拟合后,取强化段刚度 $K_1 = 0.1m_1n_1K_0$,其中 m_1 、 n_1 分别表示强化阶段

二次刚度的轴压衰减系数和内钢管衰减系数。试验结果表明内部钢管对于二次刚度的影响不明显,而轴压会明显降低二次刚度,故对试验数据拟合后 m_1 取为 0.7, n_1 取为 1;卸载刚度近似等于初始刚度,故将卸载刚度定义为弹性阶段的刚度;往复扭转时扭矩-扭转角曲线呈对称分布,故反向加载时的刚度也取为 K_1 。

利用上述简化模型对试验结果进行验证,对比结果见图 17。

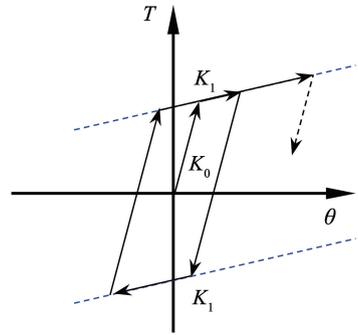
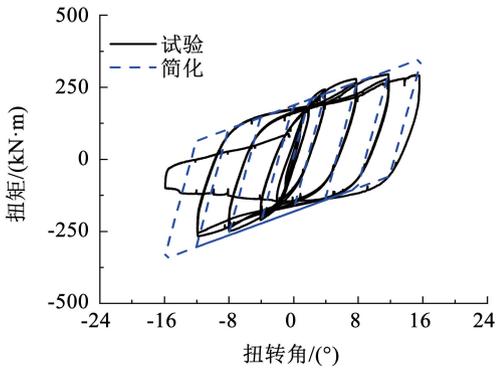
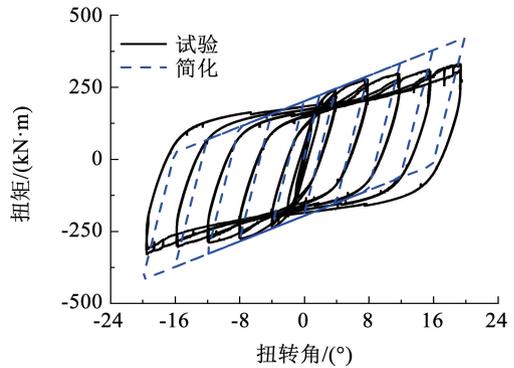


图 16 扭矩-扭转角恢复力模型

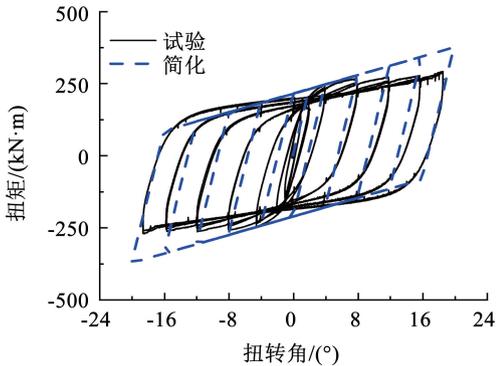
Fig. 16 Simplified formula model of torque-torsion angle curve



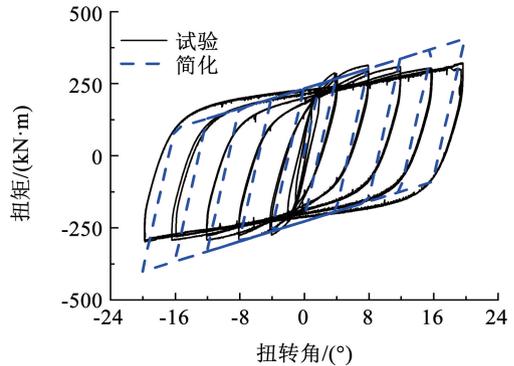
(a) 1T



(b) 2T



(c) 1NT



(d) 2NT

图 17 恢复力模型验证

Fig. 17 Comparison between test results and simplified formula results

6 抗扭承载力计算公式验证

构件的承载力一般定义为峰值荷载点,已有大量文献表明钢管混凝土的扭矩-扭转角曲线没有下降段,进入塑性阶段后,随着扭转角的增大,扭矩值仍缓慢上升。本次试验结果也验证了这一现象。因此,在对钢管混凝土的抗扭承载力计算公式进行研究时,首先需要对其进行定义。韩林海等^[3]考虑了受力和变形的特点,将钢管混凝土扭转试件边缘剪应变达到 0.01 时对应的扭矩值作为钢管混凝土抗扭承载力。本文将利用试验中的 1T 试件对已有的抗扭承载力计算公式进行验证。由于试验数据有限,对于双层钢管混凝土的抗扭承载力以及压扭相关方程的研究将在后续研究中进行。

1) 尧国皇^[15]通过大量参数分析对韩林海等^[3]提出的抗扭承载力公式的抗扭强度计算系数进行修正,得到了抗扭承载力计算公式(7),其中 γ^t 为抗扭强度计算系数, W_{sc}^T 为截面抗扭惯性矩, τ_{sc}^y 为抗扭屈服极限指标。

$$T_u = \gamma^t W_{sc}^T \tau_{sc}^y \quad (7)$$

2) 王宇航等^[16]基于分层筒模型分析了大量算例,并通过回归分析,将钢管混凝土的抗扭承载力分解为钢管抗扭承载力和混凝土抗扭承载力的叠加,提出了公式(8),其中 α 为含钢率, ξ 为套箍系数, f_c 为混凝土轴心抗压强度, D 为钢管外直径。

$$T_u = T_{cu} + T_{su} = \left(\frac{1}{0.216e^{8.7\alpha} + 0.235\alpha + 12.25} + \frac{\xi}{16.47\alpha^2 + 2.94\alpha + 4.9} \right) f_c D^3 \quad (8)$$

3) 谢先义等^[17]通过理论推导,得到了钢管混凝土柱的抗扭承载力理论计算公式(9),其中 A_s 为钢管面积, f_y 为钢材屈服强度, r 为钢管混凝土的外半径。

$$T_u = 0.7 A_s f_y r \quad (9)$$

表 4 为钢管混凝土抗扭承载力计算值验证,3 种钢管混凝土柱的抗扭承载力计算值与 1T 的试验值相比均偏于安全,其中文献[16-17]的计算方法与试验值更接近,文献[15]的计算方法与试验值有一定偏差。

表 4 钢管混凝土抗扭承载力计算值验证

Tab. 4 Comparing calculated and experimental values of torsional capacity

$T_0/(kN \cdot m)$	$T_1/(kN \cdot m)$	$T_2/(kN \cdot m)$	$T_3/(kN \cdot m)$	T_1/T_0	T_2/T_0	T_3/T_0
246.94	187.33	218.08	219.67	0.76	0.88	0.89

注: T_0 表示纯扭试件 1T 的抗扭承载力试验值, T_1 、 T_2 、 T_3 分别表示本节中抗扭承载力计算公式的计算值。

7 结 论

1) 普通圆钢管混凝土长柱和双层圆钢管混凝土长柱均具有较好的抗扭能力,一定范围内的轴向荷载会减小钢管产生的拉应力,从而提高钢管混凝土长柱的抗扭能力。

2) 与普通圆钢管混凝土长柱相比,双层钢管混凝土长柱的初始刚度和承载力略有提升,滞回曲线更饱满,耗能能力提升明显。

3) 含钢率一定时,随着内层钢管径厚比的增大,双层圆钢管混凝土长柱抗扭能力逐渐增强。

4) 轴压比小于 0.6 时,随着轴压比增大,圆钢管混凝土长柱的抗扭能力逐渐增强;轴压比大于 0.7 时,随着轴压比增大,圆钢管混凝土长柱的抗扭能力逐渐降低。

5) 利用双折线恢复力模型可以较好地拟合钢管混凝土扭矩-扭转角关系。

6) 利用已有的抗扭承载力计算公式计算了本文扭转试件的抗扭承载力,并与试验结果进行对比,验证了已有计算公式的正确性。

参 考 文 献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007: 5
HAN Linhai, Concrete filled steel tubular structures—theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007: 5
- [2] 徐积善, LEE G, 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
XU Jishan, LEE G, 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
- [3] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土纯扭转问题研究[J]. 工业建筑, 1995(1): 7
HAN Linhai, ZHONG Shantong. The studies of pure torsion problem for concrete filled steel tube[J]. Industrial Construction, 1995(1): 7. DOI: 10.13204/j.gyjz199501002
- [4] 史艳莉, 张海龙, 王文达. 内置钢管圆钢管混凝土纯扭构件力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊1): 327
SHI Yanli, ZHANG Hailong, WANG Wenda. Research on mechanical behavior of concrete-filled steel tubular member with encased profiled steel under pure torsion[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Sup. 1): 327. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.049
- [5] 聂建国, 王宇航, 樊健生. 用于分析钢管混凝土柱在轴力-扭矩

- 复合作用下非线性反应的“分层筒”模型[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 16
- NIE Jianguo, WANG Yuhang, FAN Jiansheng. Laminated tubes model for non-linear analysis on concrete filled steel tubes under combined action of axial force and torsion [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1): 16. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2013.01.011
- [6] 黄宏, 陈梦成, 黄斌洁. 圆中空夹层钢管混凝土柱扭转试验研究[J]. 试验力学, 2012, 27(3): 288
- 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
- [7] 聂影, 皮正波, 陶修, 等. 轴压、压扭荷载作用下内嵌 H 型钢钢管混凝土柱的受力性能研究[J]. 特种结构, 2022, 39(3): 15
- NIE Ying, PI Zhengbo, TAO Xiu, et al. Mechanical behaviors of h-shaped steel encased in concrete-filled steel tube columns under axial loads and torsion loads[J]. Special Structures, 2022, 39(3): 15
- [8] 蔡绍怀, 焦占拴. 钢管混凝土短柱的基本性能和强度计算[J]. 建筑结构学报, 1984, 5(6): 13
- CAI Shaohuai, JIAO Zhanquan. Behavior and ultimate strength of short concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Building Structures, 1984, 5(6): 13. DOI:10.14006/j.jzjgxb.1984.06.002
- [9] 赵大洲. 钢管-钢管高强混凝土组合柱力学性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003
- ZHAO Dazhou. Study on the mechanical properties of steel tubular columns filled with steel-reinforced high-strength concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003
- [10] STEWART D. A platform with six degrees of freedom [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1965, 180(15): 371. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02
- [11] DU C, WANG T, ZHOU H, et al. Development of an integrated load testing device for a substructure hybrid test of a curved bridge [J]. Experimental Techniques, 2022(46): 398. DOI: 10.1007/s40799-021-00492-y
- [12] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36
- FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192
- [13] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005
- LIU Wei. Research on mechanism of concrete filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005
- [14] 谢先义. 钢管混凝土构件抗剪抗扭性能和标准的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
- XIE Xianyi. Research on shear and torsion behavior of concrete filled steel tubular members and the application in national standard [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011
- [15] 尧国皇. 钢管混凝土构件在复杂受力状态下的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2006
- YAO Guohuang. Research on behaviour of concrete filled steel tubes subjected to complicated loading states [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006
- [16] 王宇航, 聂建国, 樊健生. 圆钢管混凝土柱的受扭性能研究[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 222
- WANG Yuhang, NIE Jianguo, FAN Jiansheng. Study on the torsion behavior of concrete filled steel tube column with circular section [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 222
- [17] 谢先义, 查晓雄. 空、实心钢管混凝土构件抗扭抗剪性能的研究 II: 强度的理论研究[J]. 建筑钢结构进展, 2012, 14(3): 8
- XIE Xianyi, ZHA Xiaoxiong. Torsion and shear behavior study of hollow and solid concrete filled steel tubular (CFST) members II: Theoretical research on strength [J]. Progress in Steel Building Structures, 2012, 14(3): 8

(编辑 赵丽莹)