

# 方中空夹层钢管混凝土叠合构件受弯性能试验研究与有限元分析

李明伦<sup>1</sup>,任庆新<sup>2</sup>,王庆贺<sup>1\*</sup>,丁纪楠<sup>1,3</sup>

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168; 2. 佛山大学 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528225;  
3. 沈阳建筑大学 管理学院, 沈阳 110168)

**摘要:** 本文介绍了一种方形中空夹层钢管混凝土叠合(CECFDST)构件,通过对3组不同剪跨比的6个试件进行受弯试验,分析了其破坏模式、受力过程、变形规律以及剪跨比的影响。之后本文建立了有限元模型,并开展了受弯构件内力和参数分析,将有限元计算结果与试验结果进行了对比验证。研究结果表明CECFDST构件具有良好的受弯性能,各部件间协同工作;剪跨比对构件受弯过程和受弯性能的影响不明显,受弯承载力变化不到4.5%;增大含中空夹层钢管混凝土(CFDST)率 $D_o/B$ 和名义含钢率 $\alpha_n$ 能够有效提高其力矩占比和强度发挥效率,外部配筋率 $\rho$ 和 $\alpha_n$ 应分别与 $D_o/B$ 保持正向和反向协调配置,建议 $0.50 \leq D_o/B \leq 0.75$ 、 $0.25 \leq \chi \leq 0.75$ 、 $0.06 \leq \alpha_n \leq 0.20$ 。

**关键词:** 中空夹层钢管混凝土叠合构件; 受弯性能; 受弯试验; 剪跨比; 有限元分析; 构造要求

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0023-12

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20231230001

## Experimental Study and Finite Element Analysis on Flexural Performance of Square Concrete-Encased Concrete-Filled Double-Skin Steel Tubular Members

LI Minglun<sup>1</sup>, REN Qingxin<sup>2</sup>, WANG Qinghe<sup>1\*</sup>, DING Jinan<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. School of Transportation and Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan 528225, China; 3. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

\*Corresponding author: wangqinghe@sjzu.edu.cn

**Abstract:** This paper proposes a novel composite member, namely a square concrete-encased concrete-filled double-skin steel tubular (CECFDST) member. Bending tests were first carried out on 3 groups of 6 CECFDST specimens under different shear-span ratios, to explore the failure modes, mechanical response processes, deformation laws, and influence of shear-span ratio. Then, a finite element model was developed to conduct the stress analysis and parametric analysis of the flexural members, and its accuracy was verified. The research results reveal that the

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(51808351), 辽宁省应用基础研究计划(2022JH2/101300130), 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902027), 辽宁省教育厅博士启动项目(LJ212410153011), 辽宁省科学技术计划(2024-BS-121)

作者简介:

李明伦(1992—),男,博士,讲师,主要从事钢与混凝土组合结构方面的研究。E-mail: liminglun07@163.com。

任庆新(1978—),男,博士,教授,主要从事组合结构和混合结构方面的研究。

通信作者:

王庆贺(1987—),男,博士,教授,主要从事组合结构和混合结构方面的研究。E-mail: wangqinghe@sjzu.edu.cn。

CECFDST members exhibit good flexural behavior, showcasing good cooperation between the components. The influence of shear-span ratio on bending process and flexural performance was not significant, in which the change in  $M_u$  was less than 4.5%. Increasing the concrete-filled double-skin steel tube (CFDST) ratio ( $D_o/B$ ) and nominal steel ratio ( $\alpha_n$ ) of the CFDST component could effectively improve the moment ratio and strength utilization efficiency. The external reinforcement ratio ( $\rho$ ) and  $\alpha_n$  should be coordinated with  $D_o/B$  in a positive and inverse relationship, respectively. It is recommended that  $0.50 \leq D_o/B \leq 0.75$ ,  $0.25 \leq \chi \leq 0.75$  and  $0.06 \leq \alpha_n \leq 0.20$ .

**Keywords:** concrete-encased concrete-filled double-skin steel tube; flexural behavior; bending test; shear-span ratio; finite element analysis; configuration requirement

随着经济社会发展对高层、高耸、大跨度等大型建筑的需求,近年来,围绕高性能新型钢-混凝土组合构件的研究得以蓬勃发展。其中,钢管混凝土叠合构件(CECFST)和中空夹层钢管混凝土(CFDST)构件作为近年来新兴钢-混凝土组合构件的代表,现已逐渐在实际工程中得到有效应用,并取得了良好的经济效益<sup>[1-2]</sup>。例如,钢管混凝土叠合构件用作高层建筑结构柱能够进一步减小柱截面积,从而获得更大空间使用率<sup>[3]</sup>; CFDST 构件用作大型桥墩和输电塔杆能够提供较高承载力和抗弯、抗扭刚度<sup>[4]</sup>。实心钢管混凝土叠合构件是在钢筋混凝土芯部置入钢管混凝土形成的结构形式,如图1a)所示。中空夹层钢管混凝土构件是在钢管混凝土芯部置入空心钢管形成的结构形式,如图1b)所示。基于钢和混凝土间良好的组合效应<sup>[2]</sup>,将上述截面进一步组合,即采用中空夹层钢管混凝土替代实心钢管混凝土置于钢筋混凝土芯部形成的一种新型组合构件——中空夹层钢管混凝土叠合构件(CECFDST),如图1c)所示。该新型组合方式旨在保留实心钢管混凝土叠合构件抗压和抗剪承载力高、抗弯和抗扭刚度大、防火与耐腐蚀性好等优势的基础上,进一步发挥中空夹层钢管混凝土构件抗弯承载力高、塑性和韧性强、经济效果好、施工便捷的优点,具备一定的技术先进性和经济合理性。

在实际工程中,组合构件多承受压弯组合作用,因此,有必要研究新型组合构件的受弯性能。其中受弯承载力是压弯构件  $N-M$  曲线的重要组成部分,而抗弯刚度也是反映构件压弯性能的关键指标。现有研究中 CECFST 和 CFDST 构件均表现出了较高的抗弯强度和刚度<sup>[5-8]</sup>。因此,本文开展了方形 CECFDST 构件的受弯性能试验,研究不同剪跨比下 CECFDST 构件的破坏模式、受力过程与变形规律;然后利用有限元软件,进一步分析受弯构件的受力机理与部件强度发挥效率,最后结合参数分析提出设计构造建议。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

试验设计制作了3组(共6个)不同剪跨比( $a_v/B$ )的方形中空夹层钢管混凝土叠合试件,每组为2个相同参

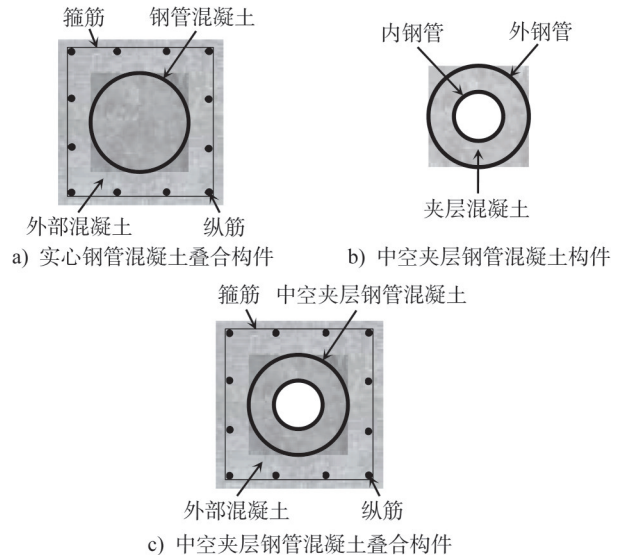


图1 新型组合构件截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-section of a new composite component

数对比试件,试件截面边长( $B$ )为180 mm,试件长度( $L$ )和计算跨度( $l_0$ )分别为2.0 m和1.8 m。CECFDST 试件基本尺寸如图2所示,试件其它信息和实测性能指标如表1所示。

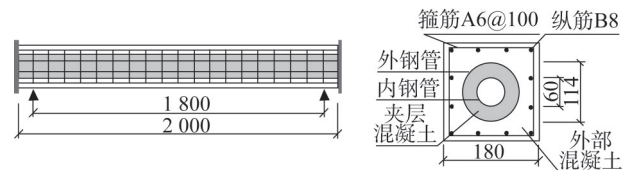


图2 CECFDST 试件基本尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of CECFDST specimens (unit:mm)

制作 CECFDST 试件时,首先将内外钢管直立对中,底部与10 mm厚端部钢板焊接固定;直立钢管间夹层混凝土分层振捣浇筑,待夹层混凝土终凝后将顶面磨平,并焊接顶部钢端板,顶部钢端板中心开孔以便与内钢管焊接;之后绑扎钢筋笼并粘贴钢材应变片;最后将试件水平放置三面支模后浇筑外部混凝土,并按养护标准进行室温养护<sup>[9]</sup>。图3为试件制作过程。

1.2 试验选材及其性能

混凝土分外部混凝土和钢管间夹层混凝土两批拌制浇筑,选用粒径约5~10 mm的碎石、中砂河砂、P.O42.5级普通硅酸盐水泥、II级粉煤灰、普通自来水加聚羧酸减

水剂,每批浇筑混凝土时制作标准试块,并按照标准试验方法测定其抗压强度及弹性模量<sup>[10]</sup>。混凝土配合比和实测力学指标如表2所示。

表1 试件信息

Table 1 Details of specimens

试件编号	$a_v/mm$	$V_{ue}/kN$	$M_{ue}/(kN\cdot m)$	$M_{ue}$ 平均值/ ( $kN\cdot m$ )	$K_e/(kN\cdot m^2)$	$K_e$ 平均值/ ( $kN\cdot m^2$ )	$\mu_{\varphi e}$	$\mu_{\varphi e}$ 平均值
CECFDST-1.5-I	270	188.81	50.98	51.96	1 602.35	1 581.93	2.679	2.688
CECFDST-1.5-II	270	196.07	52.94		1 561.50		2.697	
CECFDST-2.5-I	450	110.16	49.57	51.21	1 513.45	1 604.03	2.465	2.546
CECFDST-2.5-II	450	117.44	52.85		1 694.60		2.626	
CECFDST-3.5-I	630	83.54	52.63	53.64	1 601.05	1 642.45	2.705	2.850
CECFDST-3.5-II	630	86.71	54.63		1 683.84		2.994	

注:试件编号中的“1.5,2.5,3.5”表示剪跨比, $a_v$ 为剪跨(加载点至相近支座的长度), $V_u$ 、 $M_u$ 、 $K$ 、 $\mu_{\varphi}$ 分别代表最大剪力、受弯承载力、抗弯刚度和曲率延性系数,下标“e”表示试验值。



a) 内、外钢管对中与夹层混凝土浇筑



b) 钢筋笼绑扎、模板支护与外部混凝土浇筑

图3 试件加工工序

Fig. 3 Processing procedures of specimens

试件纵筋选用直径为8 mm的HRB400螺纹钢;箍筋采用直径为6 mm的HPB300光圆钢筋,箍筋间距为100 mm。内、外钢管选用Q235热轧直缝黑皮钢管。钢

材均加工标准试样进行单向拉伸试验<sup>[12]</sup>。钢材实测力学指标如表3所示。

1.3 试验方案

使用5 000 kN压力试验机进行加载,试验装置如图4所示。试样一端置于铰支座上,另一端置于滚轴支座上,支座间距( $l_0$ )为1 800 mm。油压千斤顶施加的竖向荷载通过刚性分配梁作用于试件上。在试件支座、加载点及跨中处布置竖向位移计,测量试件沿跨度的竖向挠度。在试件跨中外部混凝土、纵筋、外钢管表面粘贴应变片采集相应纵向应变。正式加载前按预估极限荷载的10%进行预加载,来检测试验加载装置和数据采集设备是否正常。正式加载按照10%预估极限荷载的加载级值分级加载,每级持载约2分钟,接近预估极限荷载时慢速连续加载。达到峰值荷载后,采用跨中竖向挠度控制继续加载,加载级值为10 mm,加载至跨中竖向挠度达到 $l_0/20$ 时停止加载<sup>[13]</sup>。

表2 混凝土配合比和实测力学指标

Table 2 Mix proportioning and measured mechanical properties of concrete

混凝土浇筑批次	混凝土配合比/( $kg\cdot m^{-3}$ )						混凝土力学指标				
	水	水泥	粉煤灰	砂	石子	减水剂	$f_{cu}/MPa$	$f'_c/MPa$	$f_{cu,test}/MPa$	$E_c/GPa$	$\mu_c$
夹层混凝土	193	624	188	770	830	11.7	59.9	47.3	63.5	35.9	0.21
外部混凝土	216	450	150	800	850	6.8	52.3	41.3	54.9	35.4	0.22

注: $f_{cu}$ 为混凝土标准试块养护28天时测得的立方体抗压强度, $f'_c$ 为按照文献[11]计算的混凝土抗压强度, $f_{cu,test}$ 为试验时测得的混凝土立方体抗压强度, $E_c$ 和 $\mu_c$ 分别为混凝土弹性模量和泊松比。

表3 钢材实测力学指标

Table 3 Measured mechanical properties of steel

钢材	$D \times t / \text{mm}$	$f_y / \text{MPa}$	$f_u / \text{MPa}$	$E_s / \text{GPa}$	$\mu_s$
外钢管	114×3	383.4	495.8	209.9	0.29
内钢管	60×3	382.4	523.6	207.4	0.29
Φ8纵筋	—	408.9	684.3	200.0	0.27
Φ6箍筋	—	396.5	705.4	196.0	0.29

注： $D$ 、 $t$ 分别为钢管的直径和壁厚； $f_y$ 、 $f_u$ 分别为钢材的屈服强度和极限强度； $E_s$ 和 $\mu_s$ 分别为钢材的弹性模量和泊松比。

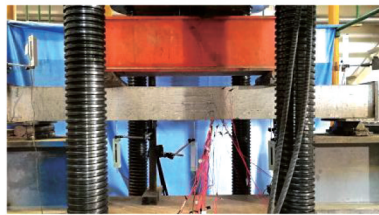
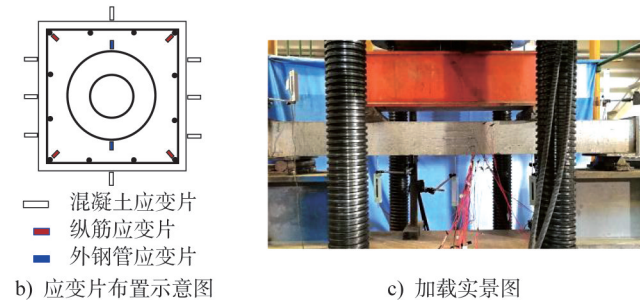
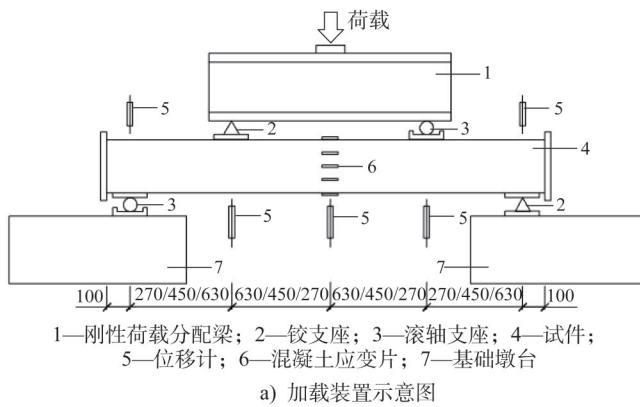


图4 受弯试验加载

Fig. 4 Bending test loading

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试件的破坏形态和裂缝开展情况

如图5所示,6个受弯试验件的破坏模态均为破坏区位于纯弯段的受弯破坏,加载点间纯弯段内,竖向弯曲裂

缝分布较均匀,破坏区受压侧混凝土呈倒三角式压碎,破坏区受拉侧可见明显弯曲主裂缝;加载点与支座间剪切段可见腹剪斜裂缝,其顶端向加载点发展,底端与底部竖向裂缝顶端相接。CECFDST试件受弯破坏时外部混凝土被压碎,与普通钢筋混凝土受弯构件的破坏模态类似。



图5 受弯试件破坏模态

Fig. 5 Failure modes of flexural specimens

不同剪跨比CECFDST试件试验后裂缝统计如表4所示。由表可知,由于剪跨比 $a_v/B$ 决定了纯弯段长度,纯弯段竖向弯曲裂缝的数量与占总弯曲裂缝的比例随 $a_v/B$ 的增大而减少;剪切段斜裂缝数随 $a_v/B$ 的增大而增加, $a_v/B=1.5$ 的试件产生斜裂缝时的荷载等级明显更低。纯弯段竖向弯曲裂缝平均长度随 $a_v/B$ 的增大略有增大, $a_v/B=1.5$ 和2.5的试件平均裂缝间距相近(分别为

表4 裂缝统计

Table 4 Statistics of cracks

试件编号	弯曲裂缝总数	纯弯段弯曲裂缝数	纯弯段主要弯曲裂缝长度/mm	纯弯段主要弯曲裂缝间距/mm	剪切段斜裂缝数	剪切斜裂缝产生时荷载等级
CECFDST-1.5- I	35	29	78~145	25~71	3	0.60 $V_{ue}$
CECFDST-1.5- II	36	32	70~140	23~65	5	0.50 $V_{ue}$
CECFDST-2.5- I	30	20	87~135	18 - 65	7	0.75 $V_{ue}$
CECFDST-2.5- II	31	23	90~130	15 - 67	6	0.70 $V_{ue}$
CECFDST-3.5- I	28	13	112~145	35~63	9	0.70 $V_{ue}$
CECFDST-3.5- II	33	15	95~133	22~62	8	0.80 $V_{ue}$

41 mm和42 mm),略大于 $a_v/B=3.5$ 的试件(39 mm)。

不同剪跨比试件试验后内部破坏形态如图6所示。对比破坏区钢筋笼,可见跨中受压侧纵筋明显压曲,其中剪跨比为1.5和3.5的试件受拉侧纵筋被拉断,各典型试件破坏区箍筋均未拉开。对比破坏区外钢管,各典型试件可见明显的弯曲变形,但未产生明显的局部屈曲。对比破坏区夹层混凝土,各典型试件纯弯段受拉侧观察到均匀分布的竖向裂缝, $a_v/B=1.5$ 的试件裂缝分布区段长度明显大于 $a_v/B=2.5$ 和3.5的试件;破坏区受压侧夹层混凝土保持完整,仅小剪跨比( $a_v/B=1.5$ )试件受压侧可见混凝土被轻微压碎,从而体现出外钢管对夹层混凝土塑性变形的有效约束。各典型试件的内钢管发生弯曲变形,但亦未发生局部屈曲。

### 2.2 试件的破坏形态和裂缝开展情况

试验实测的跨中弯矩-挠度( $M-u_m$ )关系曲线如图7

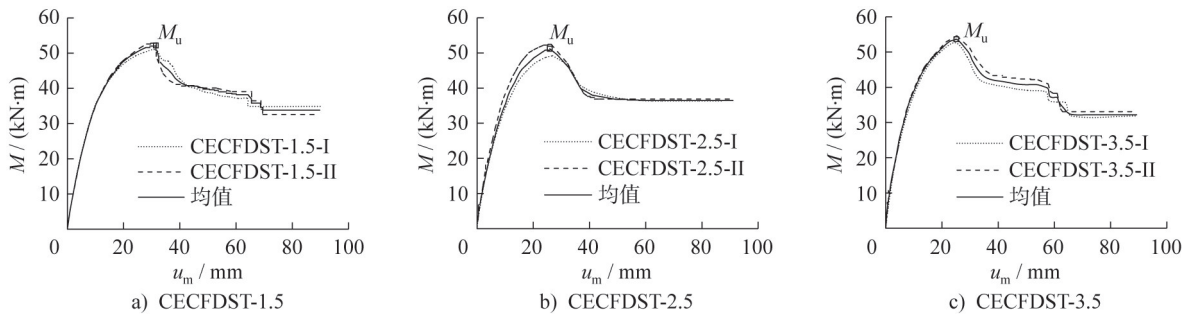


图7 实测 $M-u_m$ 关系曲线

Fig. 7 Measured  $M-u_m$  relationship curves

不同剪跨比试件剪力-跨中挠度( $V-u_m$ )关系曲线如图8所示。图中标记了受力特征点和不同受力阶段竖向裂缝最大宽度( $w$ ),其中, $L_t$ 代表受拉纵筋屈服,此时试件刚度开始明显降低,跨中挠度快速增大; $S_{ot}$ 代表外钢管受拉侧屈服,试件刚度进一步降低; $L_c$ 代表受压纵筋屈服; $Q_u$ 代表受弯极限状态, $M_u$ 为受弯极限承载力,之后试件破坏,承载力下降; $S_{oc}$ 代表外钢管受压侧屈服,之后试件受力趋于平稳;不同剪跨比试件的受力过程均为 $L_t$ 、 $S_{ot}$ 、 $L_c$ 、 $Q_u$ 、 $S_{oc}$ 。此外,图中定义A、B、C、D四个特征点将CECFDST试件受弯过程分为五个特征阶段,分别为A点前的近弹性变形阶段、AB点间的弹塑性变形阶段、BC点间的塑性变形阶段、CD点间的破坏阶段、以及D点后的负载稳定阶段。

比较不同剪跨比试件的裂缝发展情况, $L_t$ 时, $w$ 随 $a_v/B$ 的增大而减小,表明剪跨比越小,受力前期裂缝开展越快; $Q_u$ 时,剪跨比为1.5和2.5的试件 $w$ 相近且明显大于剪跨比为3.5的试件; $S_{oc}$ 时, $w$ 随 $a_v/B$ 的增大而增大,表明试件破坏后裂缝的开展随剪跨比增大而加快,与受

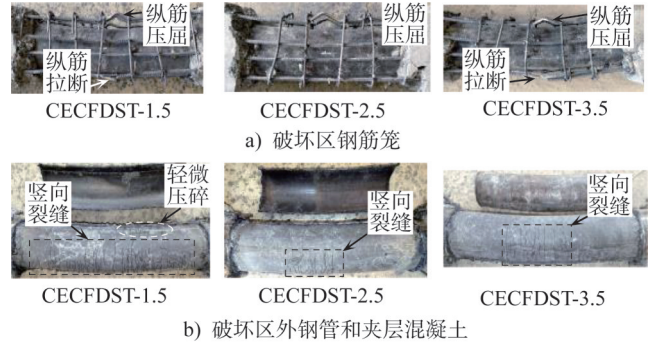


图6 典型试件跨中区域内部破坏形态

Fig. 6 Failure modes of inner parts in mid-span area

所示。由图可知,每组试件的两条试验曲线相近,各组 $M_u$ 的最大差异为6.6%。CECFDST试件在达到极限状态前大致分为近弹性、弹塑性和塑性变形阶段;达到极限状态后,挠度随承载力快速增大,承载力降至 $0.75M_u$ 左右趋于稳定。

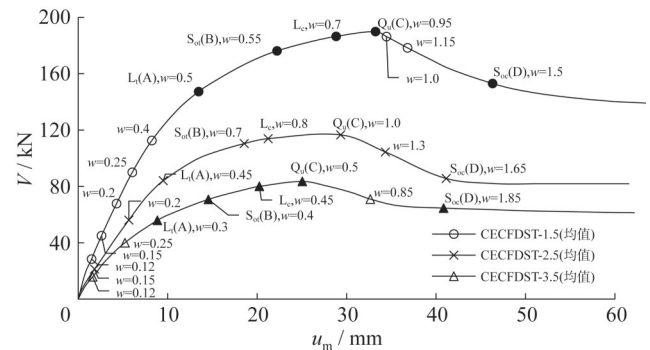


图8 剪力-跨中挠度关系图

Fig. 8  $V-u_m$  relationships

力前期相反。

最大剪力( $V_u$ )与 $a_v/B$ 的关系曲线如图9所示, $V_u$ 随 $a_v/B$ 增大而明显减小,且降幅亦明显减小,剪跨比为2.5和3.5的同组试件 $V_{uc}$ 均值分别比 $a_v/B=1.5$ 的试件减小40.3%和55.8%。可以看出,剪力主要存在于小剪跨比试件中,并能在一定程度上影响试件的破坏形态,使得试

件破坏区靠向加载点,如图5b)所示。不同剪跨比试件的实测受力性能指标如表1所示,剪跨比对试件受弯承载力的影响不明显( $M_u$ 未因剪跨比减小出现显著降低)。通常发生在小剪跨比钢筋混凝土构件中的剪切效应未体现在CECFDST构件中,表现出其具有良好的抗剪能力,同时证明各试件破坏模式确为受弯破坏。试件抗弯刚度随剪跨比增大而略微增大。

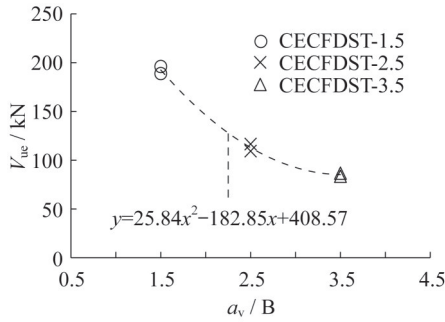


图9 实测最大剪力-剪跨比关系曲线

Fig. 9 Measured maximum shear force-shear-span ratio relationship curve

### 2.3 应变分布

图10显示了不同剪跨比CECFDST试件跨中截面在不同应力特征阶段的最大纵向应变分布。由图可知,试件在不同阶段的纵向应变大致呈平面分布,表明各部件(包括混凝土、钢筋和钢管)间变形协调一致,未发生明显相对滑移;相比剪跨比为1.5和3.5时,剪跨比为2.5的试件极限状态跨中各部件最大纵向应变最小。

### 2.4 变形分析

不同剪跨比试件在不同弯矩水平下(从上至下依次为 $0.2M_u$ 、 $0.4M_u$ 、 $0.6M_u$ 、 $0.8M_u$ 、 $1.0M_u$ )沿跨度实测垂直挠度曲线(实线)如图11所示。每条曲线由同组两试件实测平均值绘制,同时根据文献[14]绘制了相应的半正弦曲线(虚线)。由图可知,半正弦曲线能够较好地模拟CECFDST构件受弯挠度曲线。试件挠度约在 $0.6M_u$ 后加速增长,在 $0.8M_u$ 后大幅增长。不同弯矩水平下挠度随剪跨比减小而增大,在剪跨比由2.5降至1.5时尤为明显。

## 3 有限元数值模拟

### 3.1 模型建立

利用ABAQUS有限元软件建立的受弯构件精细化模型如图12所示。

(1) 单元类型:混凝土、端板、加载板和垫板采用8节点实体单元,钢筋和钢管分别采用2节点桁架单元和4节点壳单元,壳单元厚度方向上采用9节点积分的Simpson积分以提高计算精度。

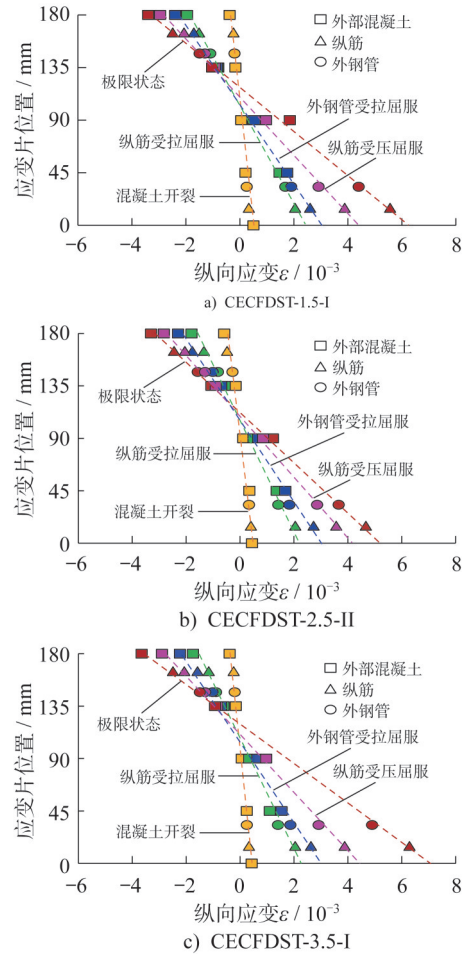


图10 不同受力阶段各部件跨中纵向应变分布

Fig. 10 Longitudinal strain distribution of the components in the mid-span section at different stress stages

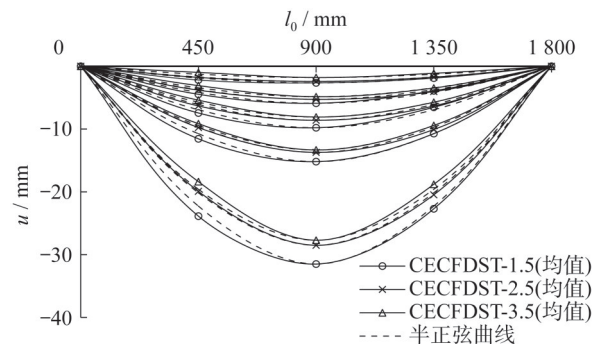


图11 不同持载阶段试件竖向挠度分布

Fig. 11 Vertical deflection along the specimens at different moment levels

(2) 材料本构关系:钢管本构模型采用文献[4]推荐的五段式应力-应变模型,钢筋本构模型采用文献[15]建议的简化两折线式应力-应变模型,强化段的弹性模量取 $0.01 E_s$ ,钢材泊松比取 $0.3^{[3]}$ ;混凝土本构通过塑性损伤模型描述,外部混凝土的应力-应变关系曲线和弹性模量按文献[16]中的规定计算;钢管间夹层混凝土的应力-应

变相关曲线和弹性模量采用文献[1]建议的方法计算,混凝土弹性阶段泊松比取0.2;端板、加载板和垫板均设为刚体,其弹性模量和泊松比分别取109 GPa和 $10^{-5}$ 。

(3) 界面接触:钢筋笼骨架整体嵌入外部混凝土中;钢管与混凝土接触面间法向处理为“硬接触”,切向采用“罚”函数并设为“有限滑移”,摩擦系数取0.6<sup>[3]</sup>;端板与混凝土端部设为“绑定”,与钢管端部进行“壳-实体耦合”。

(4) 加载方式及边界条件:通过加载点加载竖向位移,将加载点与加载板顶面加载线耦合;通过支座垫板底面中线设置边界条件,一端限制 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的位移及 $y$ 、 $z$ 方向的转动以模拟固定铰支座,另一端限制 $x$ 、 $y$ 方向的位移及 $y$ 、 $z$ 方向的转动以模拟滑动铰支座。

(5) 网格划分:使用“结构化”网格划分功能,保证网格均匀对称且各接触部件间单元节点相对应,确保传力效果良好;网格划分点的精度结合敏感度和效率分析设为部件宽度方向的1/8、圆周方向的1/16、以及长度方向的1/100。

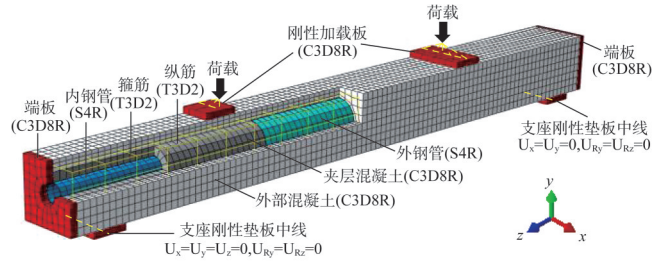


图12 CECFDST受弯构件有限元模型

Fig. 12 FEM of CECFDST members subjected to bending

静力分析,计算得到的 $M-u_m$ 曲线与同组试验均值曲线对比如图13所示。达到极限状态前,模拟与试验曲线走势吻合良好,下降段模拟曲线斜率比试验曲线小,且曲线更平滑,原因在于有限元模型中材料本构关系曲线的理想化,以及模拟对加载过程的控制更加理想。试件力学性能指标试验和模拟结果如表5所示,包括受弯承载力、抗弯刚度和曲率延性系数。表5中除了本文受弯试验试件外,还包括文献[7]中的受弯CFDST试件。 $M_u$ 、 $K$ 、 $\mu_\varphi$ 模拟与试验结果比值的平均值分别为0.984、1.045和1.057,标准差分别为0.060、0.038和0.075,吻合良好。

### 3.2 模型验证

采用Standard模块隐式求解器对构件进行单调加载

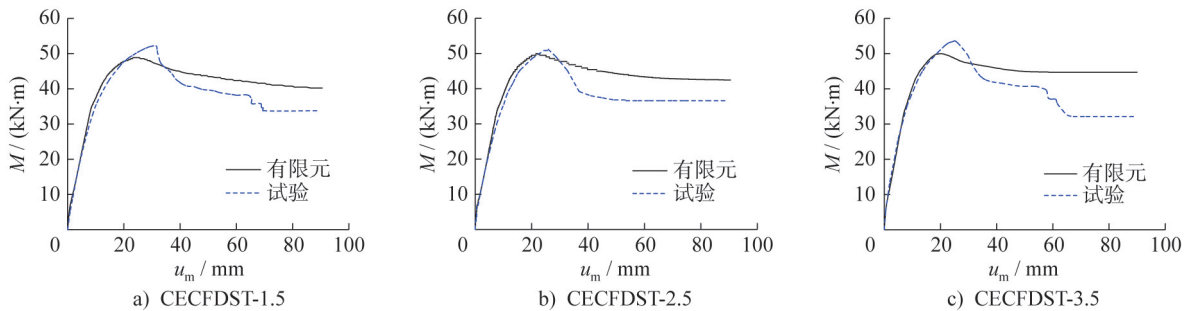


图13 试验和有限元模拟的 $M-u_m$ 曲线比较

Fig. 13 Comparison of the  $M-u_m$  relationships between test and FEA

表5 试件性能指标的试验和数值计算结果

Table 5 Test and numerical calculation results of the properties of the specimens

试件来源	试件编号	$M_{u,e}/$ (kN·m)	$M_{u,FEM}/$ (kN·m)	$M_{u,FEM}/$ $M_{u,e}$	$K_e/$ (kN·m <sup>2</sup> )	$K_{FEM}/$ (kN·m <sup>2</sup> )	$K_{FE}/K_e$	$\mu_{\varphi,e}$	$\mu_{\varphi,FEM}$	$\mu_{\varphi,FE}/$ $\mu_{\varphi,e}$
本试验	CECFDST-1.5-I	50.98	48.87	0.959	1 602.35	1 705.02	1.064	2.679	2.901	1.083
	CECFDST-1.5-II	52.94	48.87	0.923	1 561.50		1.092	2.697		1.076
	CECFDST-2.5-I	49.57	49.95	1.008	1 513.45	1 682.94	1.112	2.465	2.810	1.140
	CECFDST-2.5-II	52.85	49.95	0.945	1 694.60		0.993	2.626		1.071
	CECFDST-3.5-I	52.63	50.02	0.950	1 601.05	1 678.21	1.048	2.705	2.993	1.106
	CECFDST-3.5-II	54.63	50.02	0.916	1 683.84		0.997	2.994		1.000
文献[7]	bcc2	14.07	15.36	1.092	424.83	438.49	1.032	4.440	4.197	0.945
	bcc3	17.40	17.78	1.022	440.75	461.26	1.047	4.814	4.509	0.937
	bcc4	18.90	19.64	1.039	528.95	541.16	1.023	3.056	3.532	1.156
	平均值			0.984			1.045			1.057
标准差			0.060			0.038			0.075	

### 3.3 不同剪跨比试件受力分析

#### 3.3.1 内力分配

极限状态时,外部钢筋混凝土(HRC)部件达到自身受弯承载力( $M_{uf,hrc}$ )发生破坏,而内部CFDST部件尚未达到自身受弯承载力( $M_{uf,cfdst}$ ),其强度发挥效率 $SI'_{cfdst}$  ( $SI'_{cfdst} = M'_{uf,cfdst} / M_{uf,cfdst}$ ,  $M'_{uf,cfdst}$ 为试件极限状态时CFDST部件弯矩)介于0.89~0.95。不同剪跨比试件极限状态HRC与CFDST部件力矩分配如图14所示,由图可知,减小剪跨比,弯矩将更多地分配于CFDST部件,即承受更大剪力, $a_v/B$ 由3.5减至2.5和1.5时, $M'_{uf,cfdst} / M_{u,FEM}$ 增长4.7%和8.9%。

#### 3.3.2 跨中混凝土最大纵向压应力

在受力阶段特征点A、B、C时跨中混凝土最大纵向压应力值( $S_{33,u}$ )见表6。从表中可以看出,A、B点时外部和夹层混凝土 $S_{33,u}$ 随剪跨比增大而减小。C点极限状态时,剪跨比为2.5的构件外部混凝土 $S_{33,u}$ 明显大于剪跨比为1.5和3.5的构件,夹层混凝土 $S_{33,u}$ 则明显较

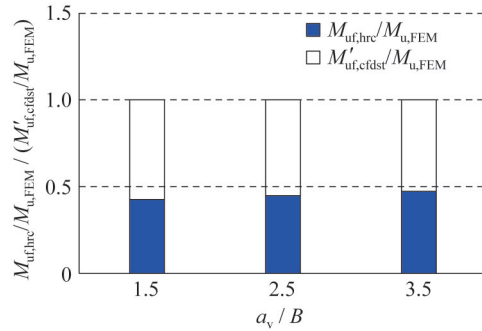


图14  $a_v/B$ 对HRC和CFDST部件力矩分配的影响

Fig. 14 Influence of  $a_v/B$  on moment distribution between HRC and CFDST components

小;此时不同剪跨比构件外部混凝土 $S_{33,u}$ 均处于达到最大抗压强度后的下降阶段,而不同剪跨比构件夹层混凝土 $S_{33,u}$ 介于 $0.80f'_c \sim 1.12f'_c$ ,除试件CECFDST-2.5外,均超过其自身抗压强度( $f'_c = 50.11\text{MPa}$ ),其值在加载末期达到 $1.27f'_c \sim 1.33f'_c$ ,从而体现出外钢管对夹层混凝土的约束效应<sup>[4]</sup>。

表6 不同受力阶段混凝土最大纵向压应力

Table 6  $S_{33,u}$  of concrete at different stress stages

$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$

混凝土类型	CECFDST-1.5			CECFDST-2.5			CECFDST-3.5		
	A点( $L_t$ )	B点( $S_{ot}$ )	C点( $Q_u$ )	A点( $L_t$ )	B点( $S_{ot}$ )	C点( $Q_u$ )	A点( $L_t$ )	B点( $S_{ot}$ )	C点( $Q_u$ )
外部混凝土	34.98	48.99	35.60	34.21	46.94	49.73	32.44	44.11	37.23
夹层混凝土	16.53	27.04	56.23	15.89	24.04	39.95	15.02	21.40	51.61

#### 3.3.3 跨中接触面最大接触应力

定义外钢管与外部混凝土间界面接触应力为 $p_1$ ,外钢管与夹层混凝土间界面接触应力为 $p_2$ ,内钢管与夹层混凝土间界面接触应力为 $p_3$ 。极限状态时跨中钢管-混凝土接触面最大接触应力值见表7。整体而言, $p_{2,max} > p_{1,max} > p_{3,max}$ ,表明外钢管对夹层混凝土的约束明显,外部钢筋混凝土对外钢管亦具有一定约束。极限状态时,随剪跨比增大, $p_{1,max}$ 略微增大而 $p_{2,max}$ 明显减小,呈相反变化趋势。有限元计算结果显示各接触面最大接触应力所在位置均位于受压侧顶部,其原因在于,外钢管的压屈变形小于受拉侧的横向变形,且受压侧夹层混凝土的体积应变高于受拉侧,因此接触应力更大。

### 3.4 $M-u_m$ 曲线分析

基于上述建模方法建立方中空夹层钢管混凝土叠合构件的典型有限元模型,其典型构件具有更大截面尺寸以便开展参数分析,具体参数信息为: $L=2\ 000\text{mm}$ , $B=220\text{mm}$ ,内外钢管直径 $D_i$ 和 $D_o$ 分别为88mm和154mm,内外钢管壁厚 $t_i$ 和 $t_o$ 均为3mm,纵筋直径为

表7 跨中接触面最大接触应力

Table 7 Maximum contact stress on the mid-span contact surface

$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$

接触应力类型	CECFDST-1.5	CECFDST-2.5	CECFDST-3.5
$p_{1,max}$	1.16	1.24	2.09
$p_{2,max}$	4.48	3.45	2.84
$p_{3,max}$	1.34	1.39	1.58

12mm,外部配筋率 $\rho = A_{si} / A_{co} = 3.04\%$ ( $A_{si}$ 和 $A_{co}$ 分别为全部纵筋截面积和外部混凝土截面积),箍筋直径和间距分别为8mm和100mm,外部和夹层混凝土强度分别为40MPa和60MPa,钢管、纵筋和箍筋的屈服强度分别为355MPa、400MPa和300MPa,空心率 $\chi = D_i / (D_o - 2t_o) = 0.59$ ,含CFDST率 $D_o/B = 0.7$ , $a_v/B = 2.5$ 。典型构件受力全过程 $M-u_m$ 关系曲线如图15所示。图中受力特征点 $L_t$ 、 $S_{ot}$ 、 $L_c$ 、 $Q_u$ 、 $S_{oc}$ 定义同试验试件,其余受力特征点以及受力阶段特征点按如下定义。 $C_t$ 表示外部混凝土达到开

裂应变,此时曲线由弹性转为近弹性发展; $L_t$ 对应点A,构件刚度开始明显降低,曲线进入塑性发展阶段; $C_c$ 对应点B,表示外部混凝土边缘达到极限压应变(3 300  $\mu\epsilon$ )<sup>[17]</sup>,构件变形明显增大,刚度进一步降低; $S_{it}$ 代表内钢管受拉侧屈服;峰值点 $Q_u$ 对应点C,曲线进入下降段; $S_{ot,0.01}$ 对应点D,表示外钢管受拉侧边缘纤维应变达到0.01,曲线变化趋于平缓; $S_{ic}$ 代表内钢管受压侧屈服。

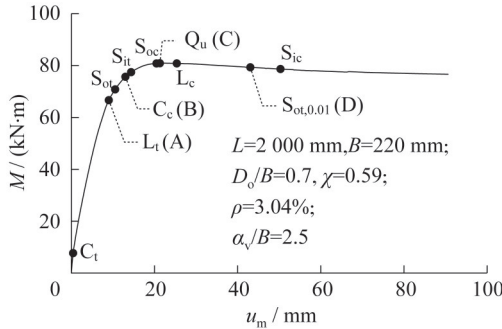


图 15 典型构件的  $M-u_m$  关系曲线

Fig. 15 The  $M-u_m$  response curve of the typical member

### 3.5 参数分析及截面设计构造建议

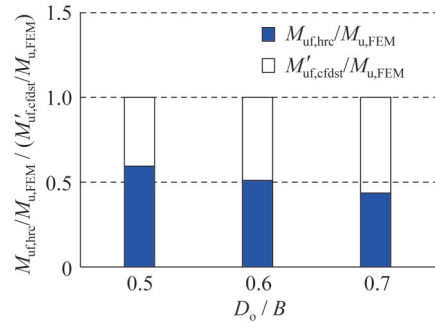
#### 3.5.1 含中空夹层钢管混凝土率与空心率的影响

研究  $D_o/B$  和  $\chi$  对 HRC 和 CFDST 部件力矩分配及强度发挥的影响,参数范围为: $D_o/B=0.5\sim 0.7$ ,  $\chi=0.37\sim 0.83$ ,其余参数同 3.4 节建立的模型。不同  $D_o/B$  和  $\chi$  对 CECFDST 构件极限状态内力分配的影响如图 16 所示。由图可知, $D_o/B$  由 0.5 增至 0.6 和 0.7 时( $\chi=0.60$ ),  $M'_{uf,cfdst}/M_{u,FEM}$  由 0.406 增至 0.490 和 0.564,增幅明显; $\chi$  由 0.37 增至 0.60 和 0.83 时( $D_o/B=0.7$ ),  $M'_{uf,cfdst}/M_{u,FEM}$  由 0.541 增至 0.564 和 0.595,增幅比较明显;CFDST 部件内力分配占比提高的原因在于 CFDST 部件截面抗弯模量的增大。

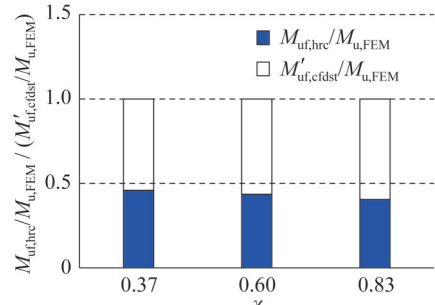
$D_o/B$  和  $\chi$  对极限状态 CFDST 部件强度发挥效率  $SI_{cfdst}$  的影响如图 17 所示。由图可知,当  $D_o/B$  由 0.5 增至 0.7 ( $\chi=0.37\sim 0.83$ ) 时,  $SI_{cfdst}$  的增幅在 11.6%~12.5% 之间,增大  $D_o/B$  能明显提升  $SI_{cfdst}$ ,但增幅逐渐减小,当  $\chi$  由 0.37 增至 0.60 再增至 0.83 时,不同  $D_o/B$  (0.5、0.6、0.7) 下  $SI_{cfdst}$  的增幅分别在 0~1.2% 和 2.3%~3.2% 之间,  $\chi$  对  $SI_{cfdst}$  的影响小。截面设计时  $D_o/B$  和  $\chi$  可分别按文献[18]和文献[19]中相关规定,取  $0.50\leq D_o/B\leq 0.75$ 、 $0.25\leq\chi\leq 0.75$ 。

#### 3.5.2 外部配筋率与内部名义含钢率的影响

不同  $D_o/B$  下  $\rho$  对 CECFDST 构件极限状态力矩分配的影响如图 18 所示。由图可知,随  $D_o/B$  增大,CFDST



a)  $D_o/B$  的影响



b)  $\chi$  的影响

图 16  $D_o/B$  和  $\chi$  对力矩分配的影响

Fig. 16 Influence of  $D_o/B$  and  $\chi$  on moment distribution

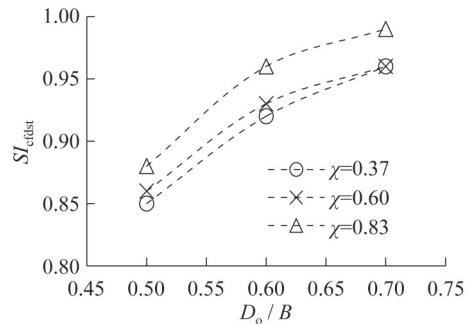


图 17  $D_o/B$  和  $\chi$  对  $SI_{cfdst}$  的影响

Fig. 17 Influence of  $D_o/B$  and  $\chi$  on  $SI_{cfdst}$

部件力矩占比显著增加;增大  $\rho$  能够明显提升 HRC 部件力矩占比,其增幅在  $D_o/B$  由 0.5 增至 0.6 时有所提升(由 14.0% 和 36.0% 增至 15.6% 和 42.2%),在  $D_o/B$  增至 0.7 时增幅变化不明显(增幅为 18.0% 和 42.0%)。因此, $\rho$  与  $D_o/B$  应保持正向协调以实现良好的力矩分配,同时满足文献[18]中的配筋率要求。

不同  $D_o/B$  下内部名义含钢率  $\alpha_n$  对 CECFDST 构件极限状态力矩分配的影响如图 19 所示。由图可知,随  $D_o/B$  增大,CFDST 部件力矩占比显著增加;增大  $\alpha_n$  能够明显提升 CFDST 部件力矩占比,其增幅在  $D_o/B$  由 0.5 增至 0.6 时明显降低(由 17.9% 和 44.7% 减至 12.1% 和 33.8%),在  $D_o/B$  增至 0.7 时增幅进一步下降(增幅为 10.8% 和 28.5%)。因此, $\alpha_n$  与  $D_o/B$  应保持反向协调以实现良好的力矩分配。

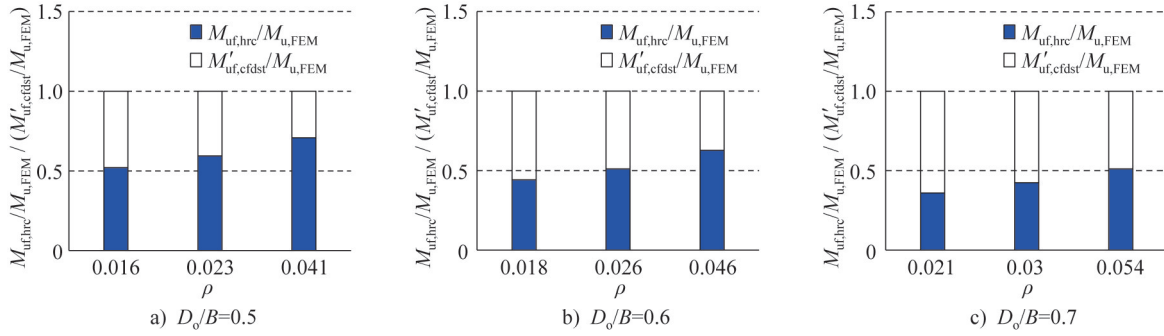


图 18 不同  $D_o/B$  下  $\rho$  对力矩分配的影响

Fig. 18 Influence of  $\rho$  on moment distribution under different  $D_o/B$

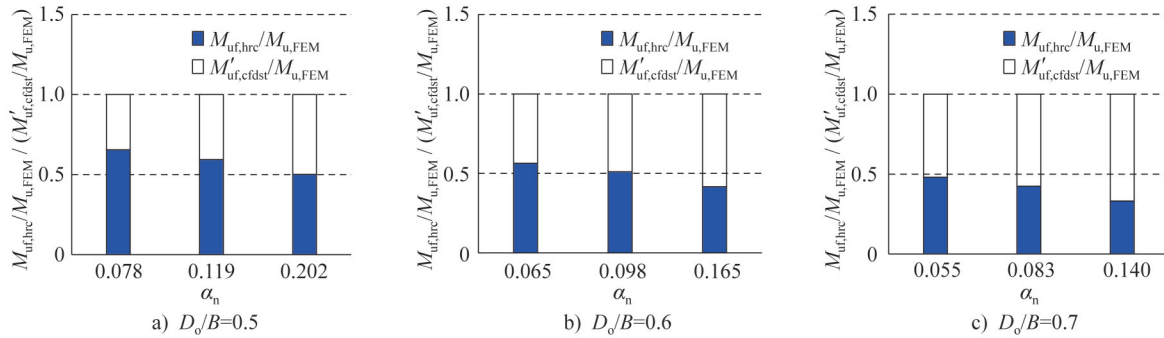


图 19 不同  $D_o/B$  下  $\alpha_n$  对力矩分配的影响

Fig. 19 Influence of  $\alpha_n$  on moment distribution under different  $D_o/B$

不同  $D_o/B$  下  $\rho$  和  $\alpha_n$  对  $SI_{cfdst}$  的影响如图 20 所示。由图可知,  $SI_{cfdst}$  随  $D_o/B$  增大而提高,  $D_o/B$  由 0.5 增至 0.6 和 0.7 时,  $SI_{cfdst}$  变化区间下限由 0.805 提高至 0.873 和 0.910, 上限由 0.909 提高至 0.937 和 0.963;  $SI_{cfdst}$  大体随  $\rho$  增大而

提高; 不同  $D_o/B$  和  $\rho$  下  $SI_{cfdst}$  随  $\alpha_n$  增大均呈先增后降形式, 因此, 为尽可能发挥 CFDST 部件受弯性能,  $\alpha_n$  不建议过大或过小, 截面设计时可按照文献 [18-19] 中相关规定, 取  $0.06 \leq \alpha_n \leq 0.20$ 。

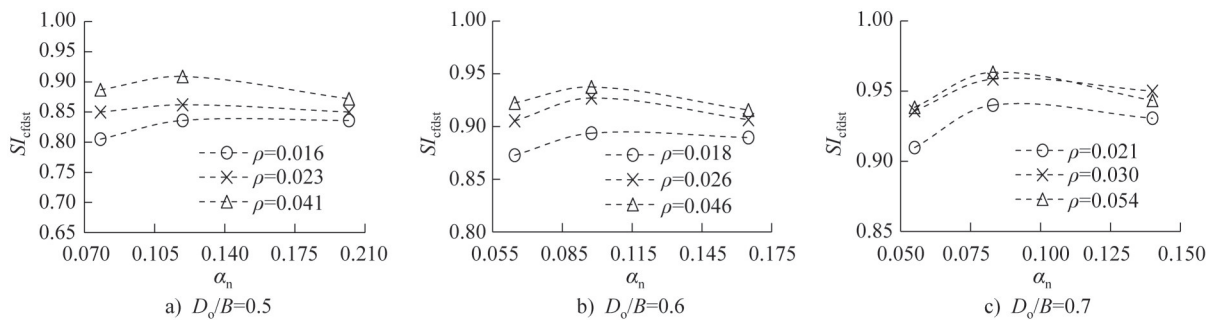


图 20 不同  $D_o/B$  下  $\rho$  和  $\alpha_n$  对  $SI_{cfdst}$  的影响

Fig. 20 Influence of  $\rho$  and  $\alpha_n$  on  $SI_{cfdst}$  under different  $D_o/B$

### 4 结论

本文通过试验和有限元计算, 研究了不同剪跨比方中空夹层钢管混凝土叠合 (CECFDST) 构件的破坏模式、受弯性能与受力机理, 得出如下结论:

(1) CECFDST 试件各组成部件在受弯过程中协同工作, 部件间未发生明显相对滑移; 不同剪跨比试件均发生受弯破坏, 试件破坏对应于外部钢筋混凝土 (HRC) 的

破坏, 其纵筋和外钢管屈服, 夹层混凝土保持完整, 内钢管无局部屈曲现象。

(2) CECFDST 试件具有良好的抗弯性能。剪跨比对试件受弯承载力的影响不明显,  $M_u$  变化小于 4.5%, 小剪跨比 ( $\alpha_v/B=1.5$ ) 试件受弯前期裂缝开展较快。破坏前受弯试件经历了近弹性、弹塑性、塑性变形 3 个阶段, 其挠度曲线可近似用半正弦曲线模拟。

(3) 建立的有限元模型适用于CECFDST受弯构件受力分析。受弯过程中,外钢管对夹层混凝土具有明显约束作用,外部HRC对外钢管具有一定程度的约束作用。中空夹层钢管混凝土(CFDST)部件在小剪跨比试件中承担更大弯矩。

(4) 增大 $D_o/B$ 和 $\alpha_n$ 能够有效提高CFDST部件在构件极限状态下的力矩占比和强度发挥效率, $\rho$ 和 $\alpha_n$ 应分别与 $D_o/B$ 保持正向和反向协调配置以实现良好的力矩分配,建议 $0.50 \leq D_o/B \leq 0.75$ 、 $0.25 \leq \chi \leq 0.75$ 、 $0.06 \leq \alpha_n \leq 0.20$ 。

### 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, 2016: 30-273.  
HAN Linhai. Concrete Filled Steel Tubular Structures—Theory and Practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016: 30-273. (in Chinese)
- [2] 韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 1-24. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.20200413.001.  
HAN Linhai, MU Tingmin, WANG Facheng, et al. Design theory of CFST (concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 1-24. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.20200413.001. (in Chinese)
- [3] 安钰丰. 方形钢管混凝土叠合压弯构件力学性能 and 设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.  
AN Yufeng. Performance and design method of square concrete-encased CFST members under combined compression and bending[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [4] ZHAO H, WANG R, LAM D, et al. Behaviours of circular CFDST with stainless steel external tube: Slender columns and beams[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 158: 107172. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107172.
- [5] LI W, WANG D, HAN L H. Behaviour of grout-filled double skin steel tubes under compression and bending: Experiments [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 116: 307-319. DOI: 10.1016/j.tws.2017.02.029.
- [6] AN Y F, HAN L H, ROEDER C. Flexural performance of concrete-encased concrete-filled steel tubes [J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 66 (5) : 249-267. DOI: 10.1680/mac.13.00268.
- [7] 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: 福州大学, 2006.  
HUANG Hong. Behavior of concrete filled double-skin steel tubular beam-columns [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006. (in Chinese)
- [8] 刘涵, 史艳莉, 范家浩, 等. 圆锥形中空夹层钢管混凝土纯弯构件受力性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(5): 9-17. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.05.002.
- [9] LIU Han, SHI Yanli, FAN Jiahao, et al. Research on the mechanical properties of tapered concrete-filled double skin steel tubular members subjected to pure bending load [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23 (5) : 9-17. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.05.002. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构工程施工质量验收规范: GB 50204—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Quality Acceptance of Concrete Structure Construction: GB 50204—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [11] European Committee for Standardization. Eurocode 2. Design of Concrete Structures: BS EN 1992-1-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials - Tensile Testing- Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Test Method of Concrete Structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [14] HAN L H. Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(2) : 313-337. DOI: 10.1016/j.jcsr.2003.08.009.
- [15] REN Q X, DING J N, WANG Q H, et al. Flexural behavior of square hollow steel-reinforced concrete members [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022, 22(1) : 34. DOI: 10.1007/s43452-021-00361-w.

- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures:GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [17] REN Q X, DING J N, WANG Q H, et al. Behavior of slender square hollow steel-reinforced concrete columns under eccentric compression[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103133. DOI:10.1016/j.jobee.2021.103133.
- [18] 中国工程建设标准化协会标准. 钢管混凝土加劲混合结构技术规程:T/CECS 663—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.  
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Concrete-encased Concrete-filled Steel Tubular Structures:T/CECS 663—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [19] 中国土木工程学会. 中空夹层钢管混凝土结构技术规程:T/CCES 7—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.  
China Civil Engineering Society. Technical Specification for Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Structures:T/CCES 7—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)