

W-LCFST 柱抗震性能及弯矩-曲率关系研究

张旺^{1,2}, 李格², 熊清清^{1,2}, 李海云^{1,2}, 邹薇²

(1. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要 目的 研究 L 形宽肢钢管混凝土组合柱(W-LCFST 柱)的抗震性能及弯矩-曲率计算方法, 为工程应用提供设计依据。方法 应用 ABAQUS 有限元分析软件建立考虑混凝土塑性损伤和延性金属损伤的有限元模型, 在验证模型合理准确的基础上, 对比分析等肢截面、不等肢截面、轴压比及钢管厚度等参数对抗震性能的影响; 基于 W-LCFST 柱的参数化分析结果和破坏现象, 提出柱截面屈服、峰值和极限状态弯矩-曲率的简化计算方法。结果 等肢 W-LCFST 柱截面高宽比从 4.0 增至 5.0 时, 初始刚度和正向峰值承载力分别提高了 16.9% 和 35.0%; X 向截面高宽比从 4.0 增至 5.0 时, 初始刚度和正向峰值承载力分别提高了 15.3% 和 31.8%; Y 向截面高宽比从 4.0 增至 5.0 时, 初始刚度提高了 9.4%, 正向峰值承载力提高了 18.0%; 轴压比从 0.2 增至 0.6 时, 正向峰值承载力和延性分别降低了 13.8% 和 6.8%; 钢板厚度从 6 mm 增至 10 mm 后, 峰值承载力和延性分别提升了 25.7% 和 4.9%。结论 有限元模拟、试验和理论计算的结果吻合度较好, 误差在 10% 以内, 验证了弯矩-曲率计算方法的准确性; 等肢截面高宽比增加, 增大 X 向肢长和增加钢管厚度使柱的承载力、初始刚度和延性有明显提高。

关键词 宽肢钢管混凝土组合柱; 抗震性能; 有限元模拟; 弯矩-曲率关系

中图分类号 TU398

文献标志码 A

引用格式: 张旺, 李格, 熊清清, 等. W-LCFST 柱抗震性能及弯矩-曲率关系研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 636-646. (ZHANG Wang, LI Ge, XIONG Qingqing, et al. Study of seismic performance and moment-curvature relationship of W-LCFST columns[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(4): 636-646.)

Study of Seismic Performance and Moment-Curvature Relationship of W-LCFST Columns

ZHANG Wang^{1,2}, LI Ge², XIONG Qingqing^{1,2}, LI Haiyun^{1,2}, ZOU Wei²

收稿日期: 2023-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008270, 52308185); 河北省省级科技计划项目(22375409D); 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2022040); 石家庄铁道大学研究生创新项目(YC2023049)

作者简介: 张旺(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事装配式钢结构建筑抗震及抗连续倒塌性能等方面研究。

(1. Key Laboratory of Safety and Security for Road and Railway Engineering of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, China, 050043; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, China, 050043)

Abstract: In order to study the seismic performance of the wide-leg L-shaped CFST column (W-LCFST column), ABAQUS was used to establish the finite element model considering the plastic damage of concrete and ductile metal damage, on the basis of verifying the reasonableness and accuracy of the model, comparison and analysis the effect on seismic performance of parameters such as equal limb section, unequal limb section, axial compression ratio, steel thickness. The results showed that height-width ratio of W-LCFST column with equal limb from 4.0 to 5.0, the initial stiffness and peak positive load capacity increased by 16.9% and 35.0% respectively, The height to width ratio of X-direction increasing from 4.0 to 5.0, the initial stiffness and peak positive load capacity of column has increased by 15.3% and 31.8%. When the height to width ratio of Y-direction increased from 4.0 to 5.0, the initial stiffness and positive peak load capacity increased by 9.4% and 18.0% respectively. The load carrying capacity and ductility has decreased by 13.8% and 6.8% respectively with axial compression ratio from 0.2 to 0.6. Peak carrying capacity and ductility increased by 25.7% and 4.9% respectively after steel thickness from 6mm to 10 mm. The results of finite element simulation, experiment, and theoretical calculation are in good matching degree with an error of within 10%, verified the accuracy of the bending moment curvature calculation method. Increasing the equal limb section ratio, X-direction limb length and steel thickness improve the bearing capacity, initial stiffness and ductility of column.

Key words: W-CFST column; seismic performance; finite element analysis; moment-curvature relationship

我国《矩形钢管混凝土组合异形柱结构技术规程》(CECS 825—2021)将由矩形钢管混凝土柱相互连接而成的L形、T形和十字形的柱定义为组合异形柱,其截面高宽比不大于4。众多学者针对其力学性能开展了一系列研究^[1-2]。随着建筑高度的增加,常规异形柱截面尺寸难以满足较大的轴压承载力需求,同时需额外增设支撑或剪力墙等抗侧力构件以抵抗风荷载及地震作用下的结构响应,此时截面高宽比大于4的宽肢钢管混凝土组合柱^[3]能更好地满足高层建筑结构对更高强度及抗侧刚度的需求。但随着柱肢截面高宽比的增加,连接板宽度增加,在较大侧向位移作用下,连接板在承受侧向力的过程中极易发生局部屈曲,从而导致钢板过早退出工作。

为了防止钢板在水平荷载作用下过早的屈曲变形,增强钢板与混凝土的协同工作性能,众多学者研究了设置纵向加劲肋^[4]、对

拉钢筋^[5]、约束拉杆^[6]、栓钉^[7-8]钢管混凝土异形柱的偏压和抗震性能。另外,抗震性能化设计是结构抗震领域重要的研究与应用方向,而结构构件的变形性能研究是其中的重要内容^[9-10],开展L形宽肢钢管混凝土组合柱(W-LCFST柱)弯矩-曲率的研究对补充相关标准规范具有重要意义。

综上所述,笔者对W-LCFST柱的抗震性能及弯矩-曲率关系进行研究,在考虑钢材延性断裂失效和混凝土塑性损伤影响的基础上,建立有限元分析模型并与试验结果进行对比;在验证模型合理准确的基础上,研究轴压比、钢管厚度、柱等肢截面和不等肢截面高宽比等参数对W-LCFST柱抗震性能的影响规律;基于试验中W-LCFST柱截面应变的实际分布,提出屈服状态、峰值状态和极限状态的弯矩-曲率简便计算公式,为W-LCFST柱的工程应用及抗震设计提供数据和理论支撑。

1 试 验

将 W-LCFST 柱按 2:3 缩尺制作了 3 个试件。试件 SJ-1 和 SJ-2 连接板内部设置交错栓钉,试件 SJ-3 未采取加强措施。试件钢材均采用 Q355B,栓钉直径为 10 mm,抗拉强度 $f_u=538.8\text{ MPa}$,混凝土试块的立方体抗压强度 $f_{cu,k}=31.8\text{ MPa}$ 。材料特性如表 1 所示。

表 1 钢材材料特性

Table 1 Material behavior of the steel				
材料	截面长×宽/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	伸长率/%
钢管	100×100	382.2	560.3	23.33
连接板	250×6	368.1	524.8	25.35

注: f_y 为屈服强度。

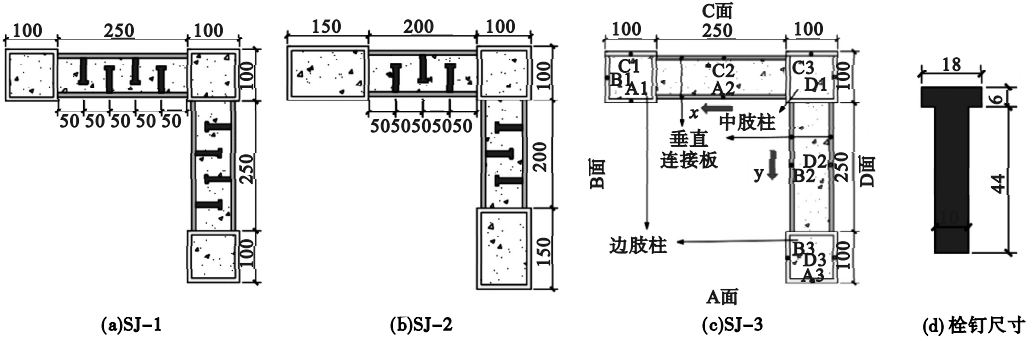


图 1 试件几何尺寸及构造

Fig. 1 Dimension and details of the specimens

具体试件参数如表 2 和图 1 所示。为便于描述,采用图 1(c)所示的命名方法对构件不同截面位置进行定义。

表 2 试件参数

试件编号	$b \times h \times t/\text{mm}$	连接板	
		内部构造	长×宽/mm
SJ-1	100×100×6	栓钉 Φ10	250×6
SJ-2	150×100×6	栓钉 Φ10	200×6
SJ-3	100×100×6	无	250×6

注: b 、 h 和 t 分别表示端柱截面的长、宽和厚。

试验加载装置如图 2 所示。试验加载时^[11],在 W-LCFST 柱截面的形心施加 0.2 倍轴压比对应的竖向力。

交错栓钉的试件中柱底部局部屈曲严重,如图 3 所示。

2 有限元模型的建立

2.1 材料本构关系及建模

W-LCFST 柱模型采用钢材的真实应力-应变关系曲线^[12]。混凝土受拉本构关系采用规范^[13]中的公式,约束混凝土受压本构关系根据韩林海^[14]提出的塑性损伤本构模型进行计算。

2.2 边界条件及接解关系

在柱顶耦合点 RP1 上施加轴力 N ,并控制 X 向位移以外的位移和角度 ($U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$),柱底耦合点 RP2 完

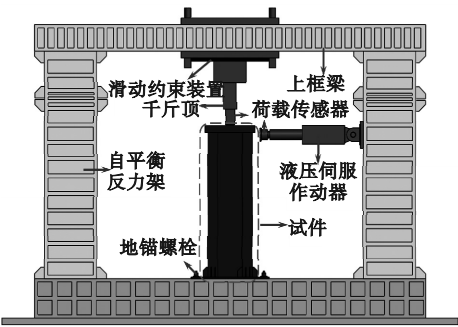


图 2 加载装置

Fig. 2 The test setup

所有试件在 X 向边柱柱底加劲肋上方边缘处均发生撕裂,随着荷载增加,裂缝继续在 X 向连接板中沿水平方向发展,并且中柱柱底发生不同程度的鼓曲。连接板内未增设

全固结($U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$),模拟实际加载的边界条件,如图4所示。建立接触关系时,采用法向硬接触、切向摩擦

约束来模拟钢面与混凝土面的相互作用,栓钉与混凝土采用 Embedded Region 关系。

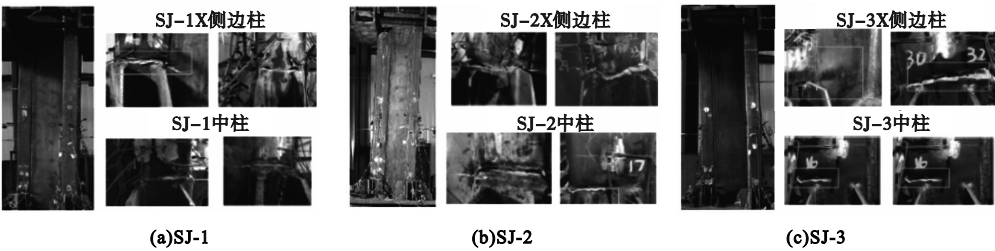


图3 试件典型破坏形态

Fig. 3 Typical failure of the specimens

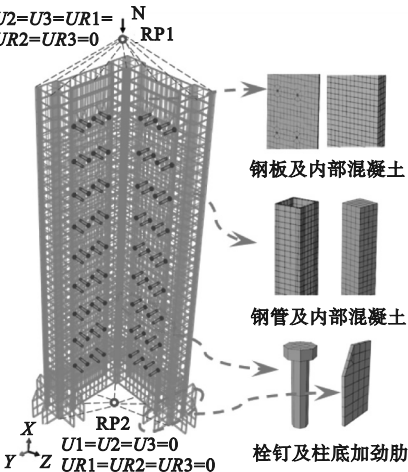


图4 有限元模型

Fig. 4 The finite element model

2.3 有限元结果验证

试验和有限元模拟峰值荷载结果对比如图5所示。由图可以看出, SJ-1、SJ-2 和 SJ-3 的正、负向峰值承载力平均误差均在 10% 以内, 试验与有限元滞回曲线结果基本吻合。试件的典型破坏特征表现一致, 如图6所示, X 向边肢柱和连接板在柱脚处破坏严重, Y 向边肢柱和连接板未发生屈曲变形, 中肢柱底部发生翘曲, 柱底靠近边肢柱侧抗剪栓钉发生变形。结果表明, 笔者采用的建模方法能准确地预测 W-LCFST 柱的抗震性能, 可以在此基础上开展进一步研究。

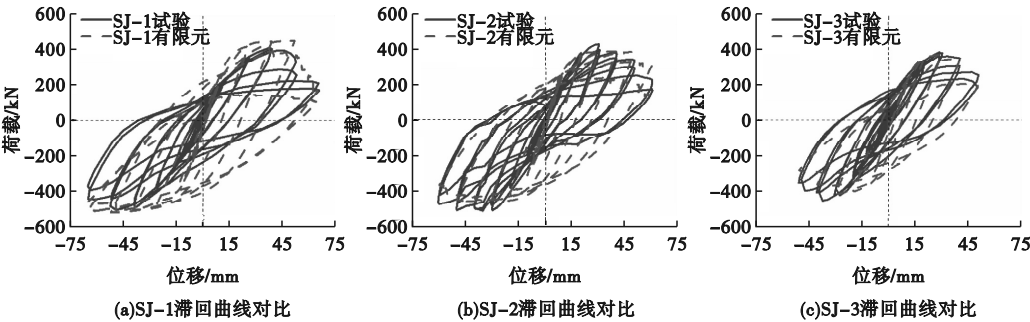


图5 试验与有限元滞回曲线对比

Fig. 5 The comparison between test and finite element hysteretic curves

3 有限元参数化分析

笔者进一步分析等肢截面高宽比、不等肢截面高宽比、轴压比、钢管厚度等参数对

W-LCFST 柱抗震性能的影响规律, 设计了 4 组共 11 个有限元模型, 具体构造尺寸如表 3 所示。

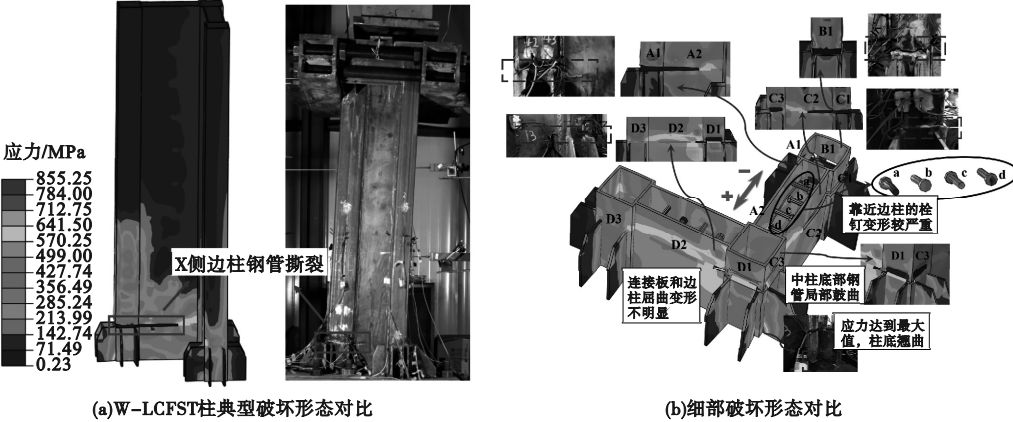


图6 试验破坏图与有限元结果对比

Fig. 6 The comparison between test failure diagrams of specimens and finite element analysis results

表3 有限元模型参数及结果对比

Table 3 The comparison results of finite element model

编号	肢高宽比		栓钉 型号	轴 压 比	钢管 厚度/ mm	初始 刚度/ (kN·mm ⁻¹)	正向峰值点		负向峰值点		屈服位移/mm		位移延 性系数
	X向	Y向					荷载/ kN	位移/ mm	荷载/ kN	位移/ mm	正向	负向	
C-HT4.0	4.0	4.0	Φ10	0.2	6	7.37	384.0	58.0	-442.0	-56.0	26.6	-23.8	2.47
C-XHT4.0	4.0	4.5	Φ10	0.2	6	8.57	394.0	61.0	-461.0	-60.0	26.8	-24.0	2.43
C-YHT4.0	4.5	4.0	Φ10	0.2	6	9.61	411.2	52.0	-478.2	-59.0	25.5	-22.7	2.56
C-HT4.5	4.5	4.5	Φ10	0.2	6	11.36	445.4	52.0	-517.1	-52.0	24.5	-20.4	2.34
C-YHT5.0	4.5	5.0	Φ10	0.2	6	19.81	501.0	55.0	-612.1	-60.0	27.7	-24.7	2.31
C-XHT5.0	5.0	4.5	Φ10	0.2	6	17.44	578.0	47.6	-696.0	-50.0	24.1	-20.7	2.30
C-HT5.0	5.0	5.0	Φ10	0.2	6	18.54	591.0	47.5	-713.3	-50.0	24.9	-20.7	2.30
C-N0.4	4.5	4.5	Φ10	0.4	6	45.41	299.6	26.0	-479.2	-61.0	20.8	-18.7	2.25
C-N0.6	4.5	4.5	Φ10	0.6	6	62.66	140.3	25.9	-401.2	-52.0	14.7	-17.3	2.18
C-T8	4.5	4.5	Φ10	0.2	8	20.20	545.9	61.7	-653.6	-60.4	27.7	-22.4	2.44
C-T10	4.5	4.5	Φ10	0.2	10	21.99	599.6	61.9	-710.1	-52.0	28.9	-21.8	2.46

3.1 等肢 W-LCFST 柱截面高宽比的影响

等肢 W-LCFST 柱截面高宽比分别为 4.0、4.5、5.0 的骨架曲线如图 7 所示,应力云图如图 8 所示。由表 3 可知,截面高宽比从 4.0 增至 4.5 时,初始刚度提高了 19.9%,正、负向峰值荷载分别提高了 13.8% 和 14.5%,位移延性系数降低了 5.3%;从 4.0 增至 5.0 时,初始刚度提高了 16.9%,正、负向峰值荷载分别提高了 35.0% 和 38.0%,位移延性系数降低了 6.9%。

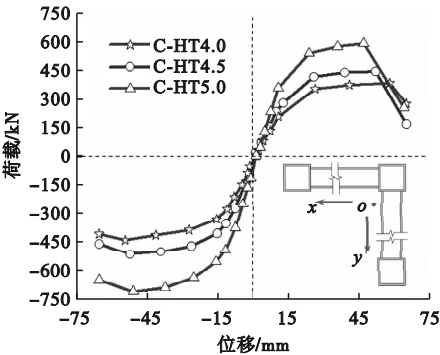


图7 不同等肢截面高宽比对骨架曲线的影响

Fig. 7 Influence of height-width ratio on the skeleton curve for equal limb section

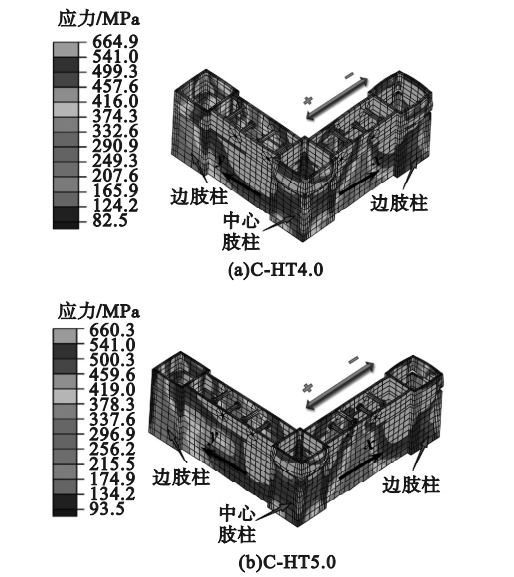


图8 不同等肢柱截面高宽比应力云图

Fig.8 The stress clouds of equal limb section with different height-width ratio

由图7可见,截面高宽比从4.0增至5.0时,有效改善了边柱的局部屈曲,使柱正、负向峰值承载力分别提高了35.0%和38.0%。这是由于截面高宽比增加后,柱肢截面惯性矩变大,边柱受到的应力减小,在X向边柱应变达到断裂应变时,柱能承担较大弯矩作用,因此峰值承载力显著提高。当边柱出现开裂,峰值承载力急剧下降,随着截面高宽比的增加,峰值位移逐渐减小,位移延性系数从2.47降至2.30。

3.2 不等肢W-LCFST柱截面高宽比影响

仅改变X向W-LCFST柱截面高宽比的骨架曲线如图9所示,应力云图如图10所示。由表3可知,当X向截面高宽比从4.0增至4.5时,初始刚度提高了19.8%,正、负向峰值荷载分别提高了11.5%和10.8%,位移延性系数降低了3.7%;从4.0增至5.0时,初始刚度提高了15.3%,正、负向峰值荷载分别提高了31.8%和33.8%,位移延性系数降低了5.3%。

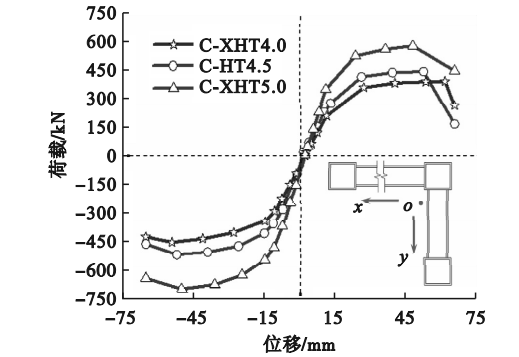


图9 不同X向截面高宽比对骨架曲线的影响

Fig.9 Influence of height-width ratio for different limb section at X-direction on the skeleton curve

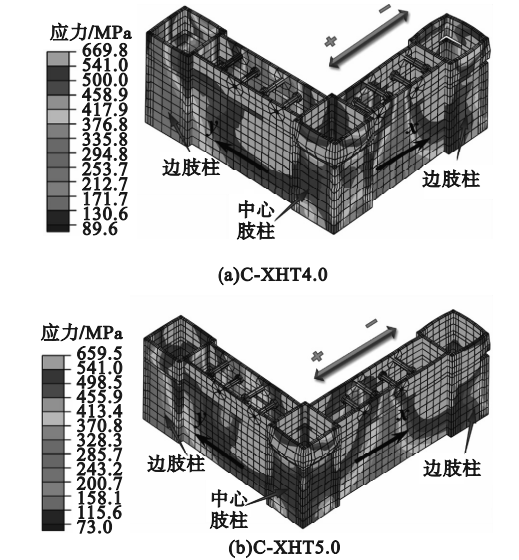


图10 不同X向截面高宽比应力云图

Fig.10 The stress clouds of limb section with different height-width ratio at X-direction

X向肢长从400mm增至500mm,X向边柱所受应力变小,柱初始刚度和峰值承载力明显提高,而且边柱开裂推迟。因为柱肢长度增加,增大了柱的截面惯性矩,从而使初始刚度和峰值承载力显著提高,而且X向作为柱的加载方向对柱的承载力起到决定作用。柱负向加载时的延性系数比正向大。因为在X向肢长增加的情况下,负向加载时开裂区域在柱肢截面中占比较小,曲线在达到峰值点后下降相对平缓,负向延性系数大。

仅改变Y向W-LCFST柱截面高宽比的骨架曲线如图11所示,应力云图如图12所示。

由表3可知,当Y向截面高宽比从4.0增至4.5时,初始刚度提高了9.4%,正、负向峰值荷载分别提高了7.7%和7.5%,位移延性系数降低了8.6%;从4.0增至5.0时,初始刚度提高了13.5%,正、负向峰值荷载分别提高了18.0%和21.9%,位移延性系数降低了9.8%。

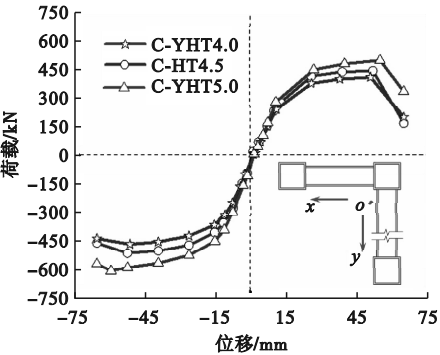


图 11 不同Y向截面高宽比对骨架曲线的影响
Fig. 11 Influence of height-width ratio for different limb section at Y-direction on the skeleton curve

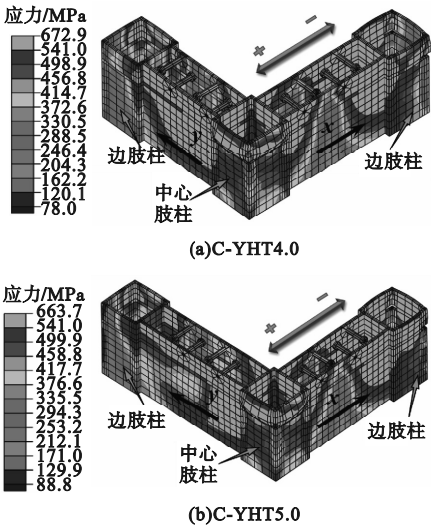


图 12 不同Y向截面高宽比应力云图
Fig. 12 The stress clouds of limb section with different height-width ratio at Y direction

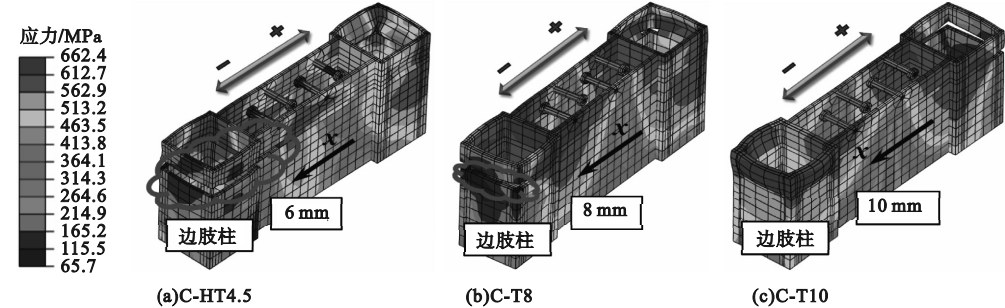


图 14 不同钢管厚度的柱应力云图
Fig. 14 The stress clouds of column with different steel tube thicknesses

由图11可知,Y向肢长从400 mm增至500 mm时,对初始刚度的影响不明显。X向和Y向截面高宽比从4.0增至5.0时,柱正向峰值承载力分别提高了31.8%和18.0%。这是由于X向肢长未增加,使受力方向的截面惯性矩没有明显提高。在此情况下正向加载时X向边柱的拉应力依然较大,从正向峰值位移可以看出,模型几乎同时发生开裂。在Y向肢长增加后,负向峰值荷载增加不多,因为负向加载过程中,中柱最先出现开裂,开裂区域相对Y向肢长来说,占比很小,因此开裂引起的承载力损失相对峰值承载力较小,曲线下降较为平缓。

3.3 钢管厚度的影响

不同钢管厚度的W-LCFST柱的骨架曲线如图13所示,应力云图如图14所示。

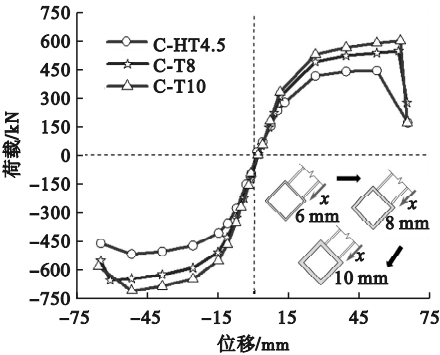


图 13 不同钢管厚度对骨架曲线的影响
Fig. 13 Influence of steel tube thickness on the skeleton curve

由表3可知,钢管厚度由6 mm增至8 mm时,正、负向峰值荷载分别提高了18.4%和20.9%,位移延性系数提高了4.1%;钢板厚度从8 mm增至10 mm时,初始刚度提高了8.0%,正、负向峰值荷载分别提高了9.0%和8.0%。

由图13可知,随钢管厚度增加,初始刚度在弹性阶段提高较为明显,从11.36增加至21.99。增大边柱钢管厚度可以提高含钢率和对核心混凝土的约束作用,因此可以有效增强柱的抗侧刚度和承载力,使峰值荷载显著提高。钢管厚度从6 mm增至10 mm,边柱钢管的局部屈曲和撕裂得到改善,连接板开裂速度得到延迟,位移延性系数从2.34增至2.46。

3.4 轴压比的影响

不同轴压比的W-LCFST柱的骨架曲线如图15所示,应力云图如图16所示。由表3可知,轴压比从0.2增至0.4时,正、负向峰值荷载分别降低了32.7%和7.4%,轴压比从0.4增至0.6时,正、负向峰值荷载分别降低了25.3%和16.3%。

由图15可以看出,随轴压比增大,柱底的屈曲变形明显加大;轴压比增大使柱内部产生的压应力增加,柱底钢管更易发生局部屈曲,使柱底过早出现开裂,连接板提前退出工作发生撕裂,对混凝土的约束作用减弱,导致承载力下降,位移延性系数从2.34降至

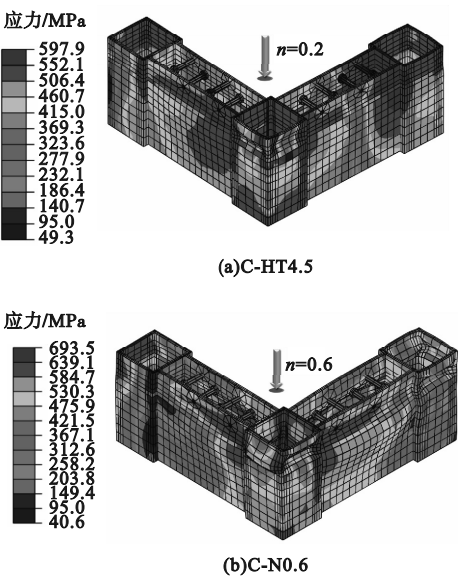


图16 不同轴压比的柱应力云图

Fig. 16 The stress clouds of column with different axial compression ratio

2.18;提高轴压比增加了混凝土受压面积,使钢板和混凝土的协同作用略有增强,初始刚度得到提高;当轴压比为0.6时,柱底破坏严重,引起承载力迅速下降,构件在位移为52 mm处直接拉断。

4 弯矩-曲率方程的建立

基于试验和有限元分析的结果可知,栓钉能使柱的承载力及侧向刚度均有明显提升。因此笔者建立其特征状态下对应的弯矩-曲率方程,为工程设计提供参考。

4.1 屈服弯矩和曲率

图17为实测柱截面屈服点应变分布图。

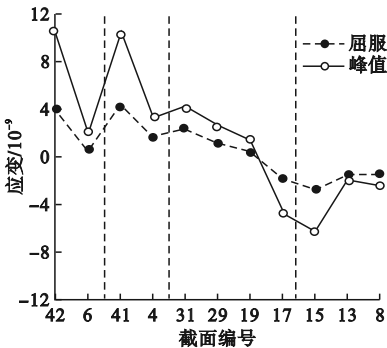


图17 不同状态截面应变分布

Fig. 17 The strain distribution of section at different state

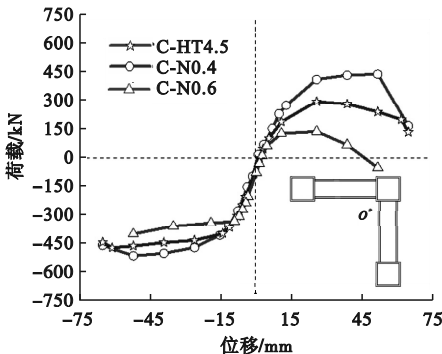


图15 不同轴压比对骨架曲线的影响

Fig. 15 Influence of axial compression ratio on the skeleton curve

变分布如图 19 所示。

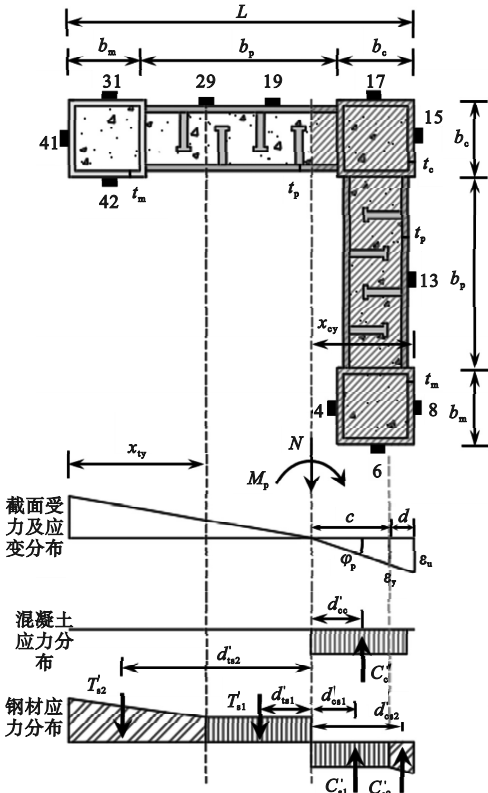


图 19 峰值状态应力和应变分布

Fig. 19 The stress-strain distribution at peaking state
截面峰值曲率为

$$\varphi_p = \varepsilon_p / x_{cp}. \quad (11)$$

式中: ε_p 为钢材峰值应变; x_{cp} 为整个截面受压区高度。

峰值状态时, W-LCFST 柱截面各部分受力如式(12) ~ (16)所示:

$$C'_c = f_c (b_c - 2t_c - 2t_p) (b_p + x_{cp} - b_c) + 2f_c (b_c^2 - 4t_c b_c + 4t_c^2). \quad (12)$$

$$C'_{s1} = 2f_y t_c (3b_c - 2d - 2t_c) + f_y t_p (b_p + 2x_{cy} - 2b_c). \quad (13)$$

$$C'_{s2} = \frac{1}{2} (f_y + f_u) [2t_c (2d + b_c - 2t_c) + b_p t_p]. \quad (14)$$

$$T'_{s1} = 2f_y t_p (L - x_{tp} - x_{cp}). \quad (15)$$

$$T'_{s2} = (f_y + f_u) (2b_m t_m - 2t_m^2 - b_m t_p + x_{tp} t_p). \quad (16)$$

式中: C'_c 和 C'_{s1} 、 C'_{s2} 分别为达到抗压强度区域

混凝土的受压合力和达到屈服强度区域、极限强度区域钢材的受压合力; T'_{s1} 和 T'_{s2} 分别为达到屈服强度区域和极限强度区域钢材的受拉合力; x_{tp} 为受拉钢材达到极限强度的高度; c 和 d 分别为峰值状态下柱截面受压区塑性区域和应变强化区域的距离。

峰值状态时, W-LCFST 柱截面力平衡方程:

$$C'_c + C'_{s1} + C'_{s2} = T'_{s1} + T'_{s2} + N. \quad (17)$$

对中性轴取矩, 截面峰值弯矩:

$$M_p = C'_c d'_{cc} + C'_{s1} d'_{cs1} + C'_{s2} d'_{cs2} + T'_{s1} d'_{ts1} + T'_{s2} d'_{ts2}. \quad (18)$$

式中: M_p 为峰值弯矩; d'_{cc} 和 d'_{cs1} 、 d'_{cs2} 分别为达到抗压强度混凝土区的受压合力到中性轴的距离和达到屈服强度、极限强度钢材区的受压合力到中性轴的距离; d'_{ts1} 和 d'_{ts2} 分别为达到屈服强度和极限强度时钢材区的受拉合力到中性轴的距离。

联立式(11) ~ (18), 即可确定 φ_p 和 M_p 。

4.3 极限弯矩和曲率

当柱承载力降到 85% 峰值承载力时, 柱到达破坏状态, 此时极限弯矩 $M_u = 0.85 M_p$, 极限曲率取极限弯矩对应的曲率。即:

$$\varphi_u = \varepsilon_u / x_{cu}. \quad (19)$$

截面边缘混凝土压应变达到混凝土峰值应变后, 截面受压区高度基本保持不变^[18], 即 $x_{cu} = x_{cp}$ 。

4.4 弯矩 - 曲率公式的验证

有限元模拟、理论计算及试验结果的对比如图 20 所示。由图可知, 三者关键特征点

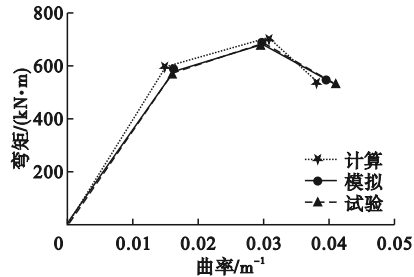


图 20 计算、模拟和试验的弯矩 - 曲率曲线对比

Fig. 20 Comparison of moment-curvature curves obtained from calculation, simulation and experiment

吻合程度较好,结果误差在 10% 以内,说明采用该方法建立 W-LCFST 柱弯矩 - 曲率模型的准确性较好。

5 结 论

(1)有限元模拟与试验结果基本吻合,采用延性金属损伤准则和混凝土塑性损伤准则进行有限元模拟结果准确性较好。

(2)等肢截面高宽比增加时,钢板受压区面积变大,边柱局部屈曲得到改善;仅 X 向肢长增加,截面惯性矩增加,柱顶承受同样弯矩作用时,应力减小;仅 Y 向肢长增加,对柱截面惯性矩的增加影响有限;轴压比增至 0.6 时,钢管和钢板过早退出工作,承载力迅速下降;增加钢管厚度对柱的承载力、延性都有明显提高。

(3)有限元模拟、计算及试验三者的结果在各特征状态下的吻合程度较好,误差在 10% 以内,验证了笔者建立的 W-LCFST 柱弯矩 - 曲率计算方法的准确性。

参考文献

- [1] XU M Y,ZHOU T,CHEN Z H,et al. Experimental study of slender LCFST columns connected by steel linking plates [J]. Journal of constructional steel,2016,127:231 - 241.
- [2] XIONG Q Q,CHEN Z H,KANG J F,et al. Experimental and finite element study on seismic performance of the LCFST-D columns [J]. Journal of constructional steel,2017,137: 119 - 134.
- [3] ZHANG W,LI G,XIONG Q Q,et al. Seismic behavior of wide-limb special-shaped columns composed of concrete-filled steel tubes [J]. Journal of constructional steel research,2023, 205:107 - 887.
- [4] YANG Y L,WANG Y Y,FU F,et al. Static behavior of T-shaped concrete-filled steel tubular columns subjected to concentric and eccentric compressive loads [J]. Thin-walled structures,2015,95(8):374 - 388.
- [5] YANG Y L,WANG Y Y,FU F. Effect of reinforcement stiffeners on square concrete-filled steel tubular columns subjected to axial compressive load [J]. Thin-walled structures, 2014,82(4):132 - 144.
- [6] ZUO Z L,CAI J,YANG C,et al. Eccentric load behavior of L-shaped CFT steel tube columns with binding bars [J]. Journal of constructional

- steel research,2012,72:105 - 118.
- [7] QI J,HU Y,WANG J,et al. Behavior and strength of headed stud shear connectors in ultra-high performance concrete of composite bridges [J]. Frontiers of structural and civil engineering,2019,13(5):1138 - 49.
- [8] WANG X L,LIU Y Q,CHEN A R,et al. Autotuning ensemble models for estimating shear resistance of headed studs in concrete [J]. Journal of building engineering,2022,52:104470.
- [9] MASSONE L M,ALFARO J I. Displacement and curvature estimation for the design of reinforced concrete slender walls [J]. The structural design of tall and special buildings, 2016,25(16):823 - 841.
- [10] NIE X,DUAN L,ZHUANG L,et al. Experimental and numerical study on steel-concrete composite frames with engineered cementitious composites [J]. Engineering structures, 2022, 265:114 - 489.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程:JGJ 101—2015 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Specification of testing methods for earthquake resistant building:JGJ 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2015.)
- [12] ZHANG W,XIONG Q Q,CHEN Z H,et al. Analysis of a more ductile connection between steel beams and concrete-filled tube columns [J]. Structures and buildings, 2021, 176: 114 - 130.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures:GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.)
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构 - 理论与实践[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2007.
(HAN Linhai. Theory and practice of concrete-filled steel tubular structures [M]. 2th ed. Beijing:Science Press,2007.)
- [15] 李嗣昌,西志远,李晓. 内置工字型 CFRP 型材高强圆钢管高强混凝土轴压短柱组合效应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):1 - 9.
(LI Guochang,XI Zhiyuan,LI Xiao. Analysis of combined effect of high strength circular steel tube and high strength concrete short columns under axial compression with I-shaped CFRP profiles [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):1 - 9.)
- [16] THOMSEN J H,WALLACE J. Displacement-based design of slender reinforced concrete walls experimental verification [J]. Journal of structure engineering,2004,130(4):618 - 630.
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)