

配筋空心方钢管高强混凝土纯弯构件 受力性能有限元分析

杨志坚,张 澍,李帼昌

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究配筋空心钢管高强混凝土构件的抗弯性能,推动其在建筑结构中的应用。方法 采用有限元分析软件 ABAQUS 建立配筋空心钢管混凝土构件有限元模型,在验证模型准确的基础上,分析构件的受力全过程及钢材屈服强度、混凝土抗压强度、钢管壁厚、钢筋直径、普通钢筋数量对构件受弯性能的影响。结果 纯弯试件在荷载作用下受力过程可分为3个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段;试件破坏形态均为受弯破坏,表现出较好地延性。结论 组合构件在弯矩作用下可以很好地协同工作;钢材屈服强度和钢管壁厚的增加对构件承载力的提高影响最显著,建议配置普通钢筋数量在6~8根为最优。

关键词 空心方钢管混凝土;高强混凝土;纯弯构件;分担荷载

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式:杨志坚,张澍,李帼昌.配筋空心方钢管高强混凝土纯弯构件受力性能有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):21-28.(YANG Zhijian,ZHANG Shu,LI Guochang. Finite element analysis on flexural performance of reinforced hollow high strength concrete filled steel tube members[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):20-28.)

Finite Element Analysis on Flexural Performance of Reinforced Hollow High Strength Concrete Filled Steel Tube Members

YANG Zhijian,ZHANG Shu,LI Guochang

(School of Civil Engineering,Shenyang Jianzhu University,Shenyang,China,110168)

Abstract: Flexural properties of concrete elements with reinforced hollow steel tubes(RHCFST) was studied to provide some reference for practical engineering. ABAQUS was used to build a finite element model of RHCFST members, and test results were used to verify the accuracy of the model. Based on this, the whole process of loading and the influence of the yield strength of steel, compressive strength of concrete, wall thickness of steel tube, diameter of deformed bars and

收稿日期:2022-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(52178148, 51808353);辽宁省优秀青年基金项目(2021-YQ-10);辽宁省教育厅基金面上项目(LJKZ0598)

作者简介:杨志坚(1984—),男,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究。

deformed bars number on the flexural behavior of the member are analyzed. Purely bending elements can be separated into 3 phases under load: the elastic phase, the elastoplastic phase and the strengthening phase. The specimens were all damaged by bending and showed fine ductility. Combined members can work well together under bending moments. Increasing the yield strength of the steel and the wall thickness of the steel tube has the most noticeable improvements in the load carrying capacity of the component. It is recommended to configure the number rebar roots in the range of 6 to 8 is optimal.

Key words: hollow concrete filled square steel tube; high strength concrete; pure bending member; load sharing

钢管混凝土 (Concrete-Filled Steel Tube, CFST) 具有承载力高和延性好等优点, 大量用作高层建筑、大跨桥梁等结构的竖向承重构件^[1-2]。在实际工程中, 钢管混凝土柱在风荷载、水平地震作用下会产生一定的弯矩^[3-4], 因此有必要对其受弯性能进行研究。

近年来, 国内外学者对钢管混凝土受弯构件进行了深入研究。A. A. M. Al-Shaar 等^[5]对轻骨料混凝土与自密实方钢管混凝土的受弯性能进行试验研究, 结果表明, 中空钢管混凝土或自密实混凝土显著提高了中空钢管截面的弯矩、抗弯刚度和延性。丁发兴^[6]对带拉筋的中空夹层钢管混凝土试件的抗弯性能进行研究, 结果表明, 配置拉筋可以对极限弯矩和抗弯刚度有一定的提高。邓宗才等^[7]对 8 个高强钢管约束 UHPC 梁进行纯弯试验, 采用叠加法建立了高强钢管约束 UHPC 梁抗弯刚度的计算公式。W. M. Ghossein 等^[8]进行了高强矩形钢管高强混凝土纯弯试验, 并将试验结果与 EC4、ACI 和 AISC 规范计算公式进行对比, 表明规范计算值较为保守。李幅昌等^[9-10]研究了高强方钢管高强混凝土构件的受弯性能, 并提出了承载力计算公式。M. Yu 等^[11]结合以前提出的平均温度法, 首次提出了圆截面和多边形钢管混凝土空心柱和实心柱在常温下极限弯矩的统一计算公式, 并给出了室温和高温的统一计算公式。查晓雄等^[12]对 19 根截面形状不同的空心钢管混凝土构件进行纯弯试验, 结果表明, 圆形截面构件受压边缘通常出现

单波屈曲, 对于正方形截面构件则为多波屈曲。王宏伟^[13]对空心钢管混凝土构件进行弯、剪、压试验研究, 提出了受弯、受剪、受压的强度和刚度计算公式。A. Y. Jiang 等^[14]建立了有限元模型对纯弯荷载作用下的离心钢管混凝土进行分析, 并以 AISC 标准提出了构件抗弯承载力设计公式。张凤亮^[15]进行空心的钢管混凝土性能的研究, 结果表明, 空心圆钢管混凝土柱的延性低于实心圆钢管混凝土的延性。

与普通钢管混凝土相比, 空心钢管混凝土具有自重轻、施工方便、节约材料等优点^[16], 但是承载力相对较低^[17], 限制了其在建筑工程中的应用。为了改善空心钢管混凝土构件的受力性能, 解决空心钢管混凝土因工艺限制导致空心率较大的问题, 杨志坚等^[18]提出了一种配筋空心方钢管高强混凝土柱, 将高强混凝土管柱放入钢管内, 并在管柱和钢管间浇注高强混凝土, 形成一组新型的配筋空心高强混凝土结构, 并对轴压、偏压性能进行了试验研究, 对其受弯性能进行了有限元分析。笔者对配筋空心方钢管高强混凝土在受弯作用下的力学性能展开研究, 通过有限元分析软件建立合理的有限元模型, 研究了钢材屈服强度、钢管壁厚、混凝土抗压强度、普通钢筋直径及数量等参数对构件受弯性能的影响。通过研究得出了配筋空心方钢管高强混凝土构件在弯矩作用下的工作机理, 给出了普通钢筋配置数量的最优范围, 为配筋空心钢管混凝土的实际工程应用提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 建立模型

笔者建立了 17 个受弯构件有限元模型, 典型构件 SBM-1 柱长 2 800 mm, 钢管壁厚 5 mm, 方钢管的截面宽度 400 mm, 钢材屈服强度 235 MPa, 管柱混凝土抗压强度为 80 MPa。管柱中布置 $\Phi 4@45$ 的箍筋, 强度为 650 MPa, $6\Phi 7.1$ 的预应力筋, 强度为 1 420 MPa。构件截面尺寸见图 1。

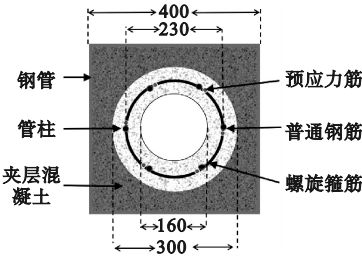


图 1 试件截面尺寸
Fig. 1 Cross section of specimen

钢材的应力 - 应变关系曲线采用文献 [19] 的五折线模型。普通钢筋、预应力筋、螺旋箍筋采用文献 [20] 中的双折线模型。管柱选择过镇海^[21]提出的混凝土受压应力 - 应变关系。夹层混凝土受压应力 - 应变关系采用文献 [22] 中考虑约束效应系数的修正简化模型。预应力筋采用降温法施加预应力。

模型中混凝土、盖板及钢管均采用三维

六面体实体单元。盖板与钢管之间为绑定接触, 夹层混凝土与钢管为面与面接触, 法向为硬接触, 切向采用库伦摩擦模型, 摩擦系数为 0.6。在钢管三分点处采用位移加载, 边界条件及网格划分如图 2 所示。

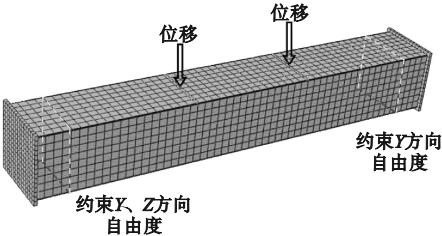


图 2 边界条件及网格划分

Fig. 2 Boundary conditions and mesh configuration
1.2 模型验证

为了对配筋空心方钢管高强混凝土纯弯构件模型的准确性进行验证, 验证模型夹层混凝土强度为 60 MPa, 钢管壁厚为 5 mm, 其中, 试件 BRHCFST-1 配置 $6\Phi 6$ mm 的普通钢筋, 强度为 400 MPa, 试件 BRHCFST-2 未配置普通钢筋。

1.2.1 弯矩 - 挠度曲线对比

试验与有限元模拟的弯矩 - 挠度曲线如图 3 所示, 弯矩与达到极限荷载时所对应的挠度值结果见表 1。从图 3 和表 1 可以看出, 模拟结果与试验结果^[23]吻合较好, 弯矩值最大误差为 8.06%, 最小误差为 1.6%, 误差均在 10% 以内, 表明笔者建立的模型可以对试件进行准确地模拟分析。

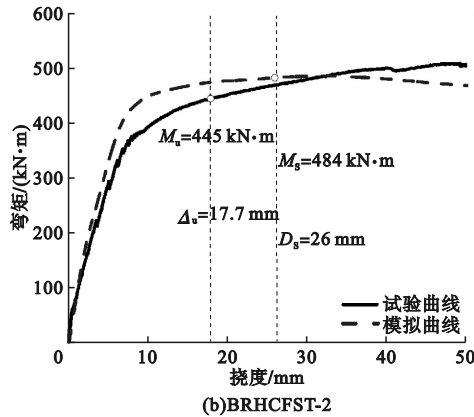
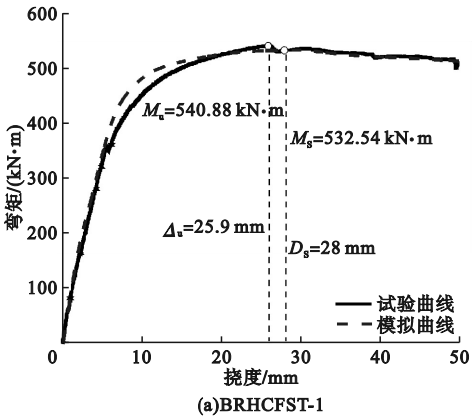


图 3 模拟与试验的弯矩 - 挠度曲线对比

Fig. 3 Comparison of the moment-deflection curves

表 1 极限弯矩与挠度

Table 1 The ultimate bending moments and deflections

试件名称	$M_s/(kN\cdot m)$	$M_u/(kN\cdot m)$	D_s/mm	Δ_u/mm	M_s/M_u	D_s/Δ_u
RHCFST-1	533	541	28	25.9	0.98	1.1
BRHCFST-2	484	445	26	17.7	1.09	1.4

注: M_u 、 M_s 为钢管跨中截面拉应变达到 10 000 时对应的试验弯矩值与有限元模拟弯矩值; Δ_u 、 D_s 为试件达到极限弯矩时所对应的试验挠度值与有限元模拟挠度值。

1.2.2 破坏形态对比

试验试件 BRHCFST-1 与有限元构件 SBM-1 的破坏形态对比如图 4 所示。从图 (a)可以看出构件的整体应力分布,两者的破坏形态比较吻合,均在跨中位置出现挠曲变形。夹层混凝土受压区的应力如图 4(c)所示,在加载点处应力最大达到68 MPa,最小为 44 MPa;在跨中处最小应力为15 MPa。核心混凝土受压区的应力如图4(e)所示,在加载点处应力最大达到63.8 MPa,最小为 8.7 MPa;对于核心混凝土来说,最大压应力存在于跨中位置,为 70 MPa。

2 受力全过程分析

为了研究配筋空心方钢管高强混凝土构件的纯弯性能,对夹层混凝土强度为 80 MPa、钢管壁厚为 5 mm、配置 6Φ16 mm 普通钢筋的典型构件 SBM-1 进行受力全过程分析。

2.1 弯矩 - 挠度曲线分析

典型构件 SBM-1 的弯矩 - 挠度曲线如图 5 所示,曲线可分为三个阶段。

(1)弹性阶段(OA 段)。加载初期,可以看出构件的变形较小,构件无明显变化。特征点 A 的挠度值为极限弯矩时所对应挠度值的 3.8%,弯矩值为极限弯矩值的 21.5%。此时,钢管与混凝土之间的相互作用较小,两种材料变形协调一致。

(2)弹塑性阶段(AC 段)。特征点 B 时弯矩值为极限弯矩值的 59.1%。B 点夹层混凝土发生塑性应变,此时夹层混凝土所承担的弯矩占极限弯矩的 17.2%。混凝土纵向压应力随着荷载的增大而增大,混凝土与钢管间产生接触应力且逐渐增大。钢管的横向变形系数小于混凝土,因此钢管与混凝土间的紧箍力随之增长。特征点 C 时,夹层混凝土进入塑性阶段,弯矩值为极限弯矩值的 79.7%。夹层混凝土弯矩占比达到最大,占极限弯矩的 16.9%。

(3)强化阶段(CD 段)。在此阶段,构件发生明显变形。钢管对混凝土套箍作用增强,构件中截面挠度增长速率快速增加,侧向挠度迅速增大,曲线达到 D 点时,弯矩达到极限弯矩 M_u ($M_u = 540.2\text{ kN}\cdot\text{m}$)。

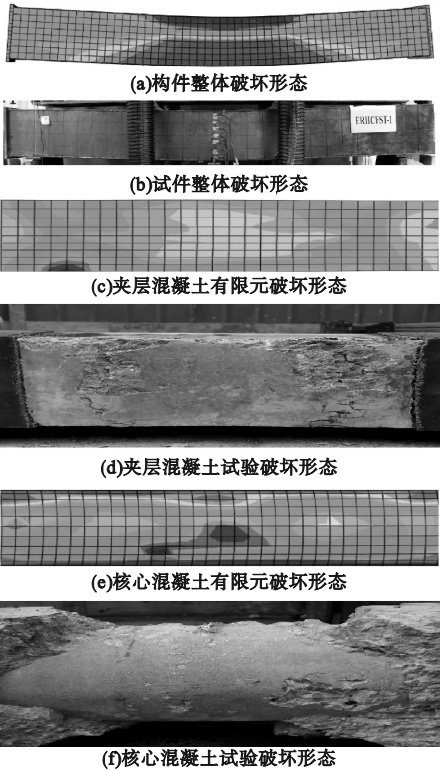


图 4 有限元与试验破坏形态对比

Fig. 4 Comparison of the destruction patterns between finite element and test specimen

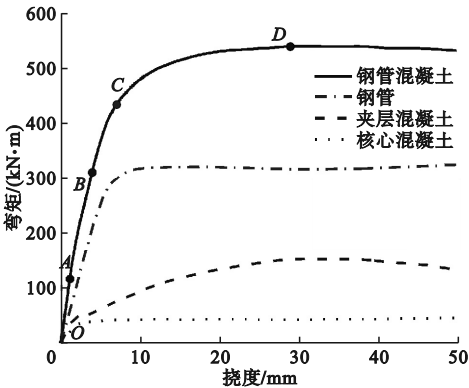


图5 各部分弯矩-挠度曲线

Fig. 5 The moment-deflection curves of each part

表2为典型构件SBM-1的钢管、夹层混凝土和核心混凝土在整个加载过程当中各部分弯矩所占百分比。从表中可以看出,在整个加载过程中,钢管承担主要弯矩,占比最高

表2 各部分弯矩所占百分比

Table 2 Percentage of moment of each part %

特征点	钢管的弯矩占比	夹层混凝土的弯矩占比	核心混凝土的弯矩占比
A	57.10	32.46	14.91
B	67.64	17.21	12.20
C	68.61	16.86	9.41
D	58.86	27.95	7.83

为68.6%;夹层混凝土承担的弯矩在D点时达到最大。在整个过程中,夹层混凝土的承担弯矩比例均高于核心混凝土,夹层混凝土承担弯矩占比最高为32.5%;核心混凝土承担弯矩占比最高为14.9%,在峰值之后基本保持不变,表现出良好的延性。

2.2 应力分析

2.2.1 钢管 Mises 应力云图分析

钢管在各特征点处的 Mises 应力云图如图6所示。从图中可以看出,加载初期,纵向应力沿跨中向两侧逐渐减小,特征点A时,对应的弯矩为极限弯矩的20%,钢管跨中受压区 Mises 应力分布均匀,应力值为83 MPa。受拉区最大应力出现在铰支座处,应力值为162.7 MPa。从特征点A到特征点B的过程中,加载位置与铰支座处应力显著增加,中性轴出现向受压侧移动的趋势,受压区到受拉区的钢管应力呈梯形发展。到达特征点C时,受压区钢管已经达到屈服。特征点D时,应力最大为301.2 MPa,钢管受压区屈服区域向受拉区发展趋势明显,中性轴进一步上移。在此阶段,钢管对混凝土套箍作用增强,受拉区钢管应力随之上升。

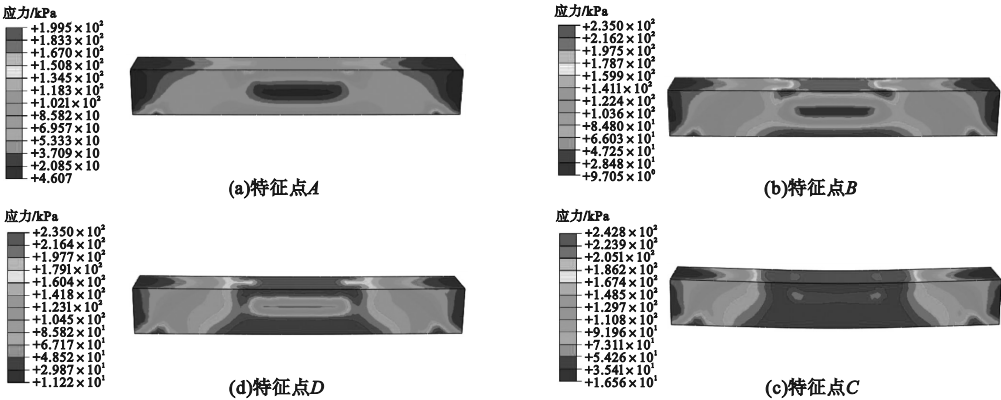


图6 钢管 Mises 应力分布图

Fig. 6 Mises stress distributions of steel tube

2.2.2 夹层混凝土纵向应力分析

夹层混凝土在各个特征点处的应力分布如图7所示。从图中可以看出,加载初期,应力集中出现在构件的三分点处,应力值为7.6 MPa;受拉区混凝土应力分布均匀,应力

值为4.1 MPa。特征点B时,混凝土受拉区域向上部发展,呈双峰状;受压区的应力随之增加,应力值为17.8 MPa。特征点C时,受压区应力逐渐增大,加载点处应力达到25.7 MPa。特征点D时,受压区应力逐渐向两个加载点

处集中,应力值为 64.5 MPa;受拉区应力逐渐减小,受力的区域由中间向两端发展。

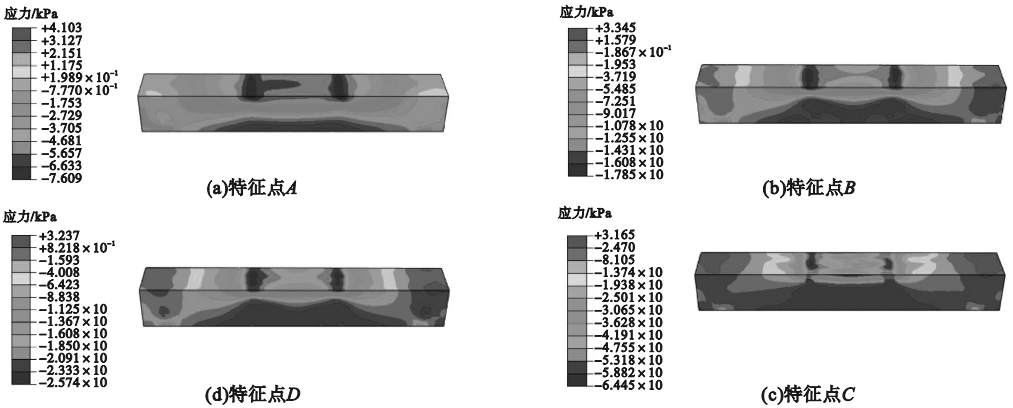


图 7 夹层混凝土纵向应力分布图

Fig. 7 Longitudinal stress distributions diagram of sandwich concrete

2.2.3 PHC 管柱纵向应力分析

PHC 管柱混凝土纵向应力分布如图 8 所示。从图中可以看出,加载初期,PHC 管

柱跨中受压区应力均匀分布,应力值为 16.4 MPa。特征点 D 点时,PHC 管柱纵向应力应力最大值为 82.9 MPa。

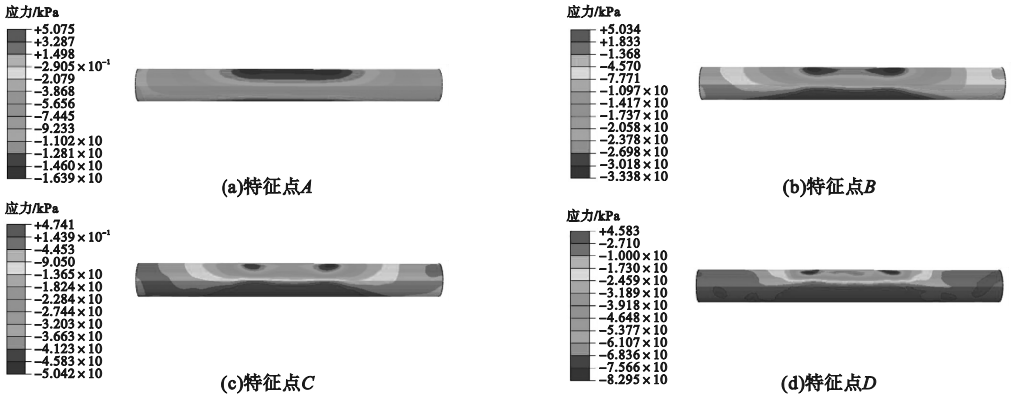


图 8 PHC 管柱纵向应力分布图

Fig. 8 PHC tube pile longitudinal stress distributions diagram

3 参数分析

为研究配筋空心方钢管高强混凝土构件的受弯性能,笔者分析了钢管壁厚、夹层混凝土强度、钢管屈服强度、普通钢筋直径及普通钢筋数量对纯弯构件受力性能的影响。

3.1 钢管壁厚的影响

钢管壁厚对构件荷载 - 位移曲线影响如图 9 所示。钢材屈服强度为 235 MPa,混凝土抗压强度为 80 MPa,普通钢筋直径为 16 mm,普通钢筋数量为 6 根。构件 SBM-1、SBM-2、SBM-3、SBM-4、SBM-5 的钢管壁厚

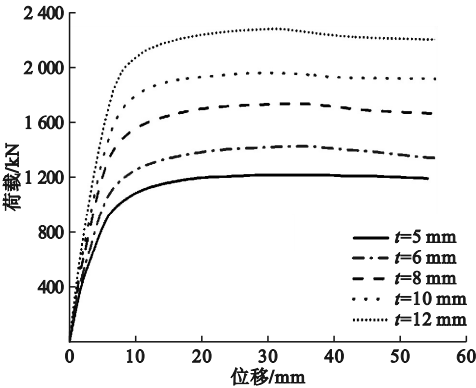


图 9 钢管壁厚对荷载 - 位移曲线的影响

Fig. 9 Effect of steel tube wall thickness on load-displacement curves

分别为5 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm。构件所对应的极限承载力分别为1 219.5 kN、1 423.8 kN、1 738.7 kN、1 962.3 kN、2 282.9 kN。与构件SBM-1相比,构件SBM-2、SBM-3、SBM-4和SBM-5的极限承载力分别提高了16.7%、42.6%、61%、87.2%。在弹性阶段,钢管壁厚与抗弯刚度呈正相关;增大钢管壁厚,构件的极限承载力与抗弯刚度随之增大。

3.2 钢材屈服强度的影响

钢材屈服强度对构件荷载-位移曲线影响如图10所示。钢管壁厚为5 mm,混凝土抗压强度为80 MPa,普通钢筋直径为16 mm,普通钢筋数量为6根。模型SBM-1、SBM-6、SBM-7、SBM-8的钢材屈服强度分别为235 MPa、355 MPa、390 MPa、460 MPa。构件所对应的极限承载力分别为1 219.5 kN、1 649.4 kN、1 773.4 kN、2 012.7 kN。与构件SBM-1相比,构件SBM-6、SBM-7、SBM-8的极限承载力分别提高了35.3%、45.4%、65%。可以看出,钢材屈服强度对构件极限承载力影响较大,对初始抗弯刚度影响较小。钢材强度对构件承载力影响较大是因为在构件加载过程中,钢管承担了大部分弯矩。

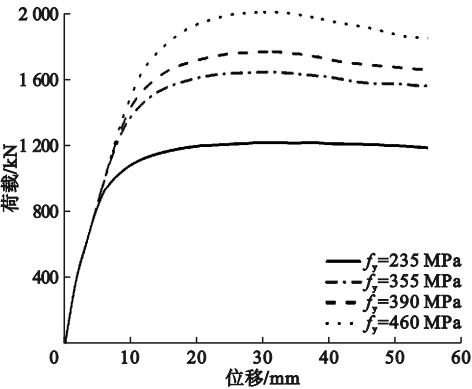


图10 钢材强度对荷载-位移曲线的影响

Fig. 10 Effect of steel strength on load-displacement curves

3.3 混凝土强度的影响

夹层混凝土抗压强度对构件荷载-位移

曲线影响如图11所示。钢管壁厚为5 mm,钢材屈服强度为235 MPa,普通钢筋直径为16 mm,数量为6根。模型SBM-1、SBM-9、SBM-10、SBM-11混凝土抗压强度分别为80 MPa、60 MPa、70 MPa、100 MPa。构件所对应的极限承载力分别为1 219.5 kN、1 198.2 kN、1 213.3 kN、1 222.7 kN。与构件SBM-1相比,构件SBM-9、SBM-10的极限承载力分别降低了1.7%、0.5%;构件SBM-11的极限承载力提高了2.6%。可以看出,混凝土抗压强度对构件极限弯矩影响较小,改变混凝土抗压强度对初始刚度无明显影响。

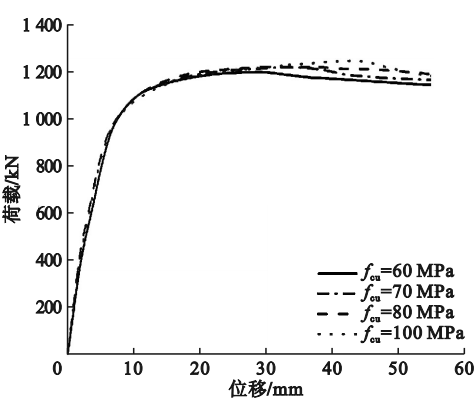


图11 混凝土强度对荷载-位移曲线的影响

Fig. 11 Effect of concrete strength on load-displacement curves

3.4 钢筋直径的影响

钢筋直径对构件荷载-位移曲线影响如图12所示。钢管壁厚为5 mm,混凝土抗压

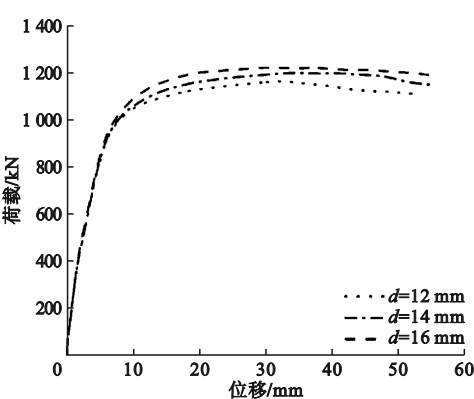


图12 钢筋直径对荷载-位移曲线的影响

Fig. 12 Effect of reinforcement diameter on load-displacement curves

强度为 80 MPa, 钢材屈服强度为 235 MPa, 普通钢筋数量为 6 根。构件 SBM-1、SBM-12、SBM-13 的钢筋直径分别为 16 mm、14 mm、12 mm。构件所对应的极限承载力分别为 1 219.5 kN、1 188.2 kN、1153.4 kN。与构件 SBM-1 相比, 构件 SBM-12 和 SBM-13 的极限承载力分别降低了 2.5%、5.4%。从图中可以看出, 改变钢筋直径对初始刚度没有明显影响。

3.5 钢筋数量的影响

钢筋数量对构件荷载 - 位移曲线影响如图 13 所示。钢管壁厚为 5 mm, 混凝土抗压强度为 80 MPa, 钢材屈服强度为 235 MPa, 普通钢筋直径为 16 mm。模型 SBM-1、SBM-14、SBM-15、SBM-16、SBM-17 的钢筋数量分别为 6 根、4 根、8 根、配置预应力筋和箍筋、未配置任何钢筋。构件所对应的极限承载力分别为 1 219.5 kN、1 196.6 kN、1 274.2 kN、1 115.5 kN、1 022.2 kN。钢筋配置数量从 4 根增加到 8 根的时候, 构件极限承载力逐渐提高, 延性变好, 初始刚度无明显变化。与未配置任何钢筋的构件相比, 配置预应力筋和箍筋的构件极限承载力提高了 8.3%; 与未配置普通钢筋的构件相比, 钢筋数量为 4 根、6 根、8 根的构件的极限承载力分别提高了 7.3%、9.3%、14.2%。因此, 建议配置普通钢筋数量在 6~8 根为最优。

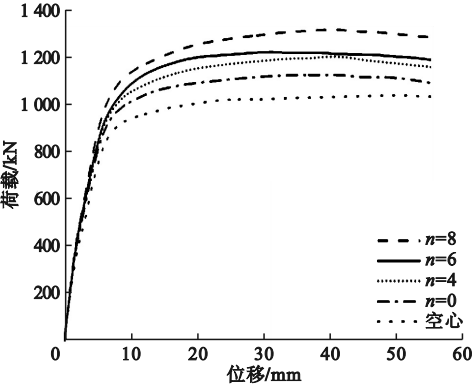


图 13 钢筋数量对荷载 - 位移曲线的影响

Fig. 13 Effect of reinforcement quantity on load-displacement curves

4 结 论

(1) 有限元模型弯矩 - 挠度曲线与试验曲线吻合良好, 构件的整体应力分布、破坏形态与试验结果表现一致, 挠曲变形均出现在跨中位置, 验证了模型的准确性。

(2) 配筋空心方钢管高强混凝土构件受力全过程可分为 3 个阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段以及强化阶段。在整个加载过程中, 弯矩主要由钢材承担; 在 C 点时, 钢材的弯矩占比达到最大, 占极限弯矩的 68%; 夹层混凝土的弯矩占比高于管柱混凝土的弯矩占比。

(3) 钢材屈服强度和钢管壁厚的增加对配筋空心方钢管高强混凝土构件承载力的提高影响较大, 夹层混凝土的强度、钢筋直径及钢筋数量对其影响较小; 与空心钢管混凝土相比, 配置箍筋与预应力筋对构件的极限承载力提高有限, 建议配置普通钢筋数量在 6~8 根为最优。

参考文献

[1] CAI J, PAN J, TAN J, et al. Behavior of ECC-encased CFST columns under eccentric loading [J]. Journal of building engineering, 2020, 30: 101 - 188.

[2] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 100(9): 211 - 228.

[3] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论: 研究与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. (ZHONG Shantong. Concrete-filled steel tube united theory: research and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.)

[4] 徐礼华, 刘胜兵, 温芳, 等. T 形钢管混凝土组合构件抗弯性能 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2009, 37(2): 117 - 120. (XU Lihua, LIU Shengbing, WEN Fang, et al. Flexural behavior of composite members of T-section concrete-filled steel tubes [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science edition), 2009, 37(2): 117 - 120.)

[5] AL-SHAAR A A M, GOGUS M T. Flexural behavior of lightweight concrete and self-compacting concrete-filled steel tube beams [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 149: 153 - 164.

- [6] 丁发兴, 卢得仁, 张涛, 等. 带拉筋中空夹层钢管混凝土纯弯构件试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(4): 25-34.
(DING Faxing, LU Deren, ZHANG Tao, et al. Experiment study on the flexural behavior of stirrup-confined concrete-filled double-skin steel tubular stub columns [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2020, 40(4): 25-34.)
- [7] 邓宗才, 孙彤, 李佳跃. 高强钢管约束超高性能混凝土梁抗弯性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(11): 1111-1120.
(DENG Zongcai, SUN Tong, LI Jiayue. Flexural performance of ultra-high performance concrete-filled high-strength steel tube beams [J]. Journal of Tianjin university (natural science and engineering technology edition), 2021, 54(11): 1111-1120.)
- [8] GHO W M, LIU D. Flexural behaviour of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow sections [J]. Journal of constructional steel research, 2004, 60(11): 1681-1696.
- [9] 李幅昌, 尚柯, 杨志坚, 等. 高强方钢管高强混凝土构件纯弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊1): 292-298.
(LI Guochang, SHANG Ke, YANG Zhijian, et al. Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube members under pure bending [J]. Journal of building structure, 2019, 40(S1): 292-298.)
- [10] LI G C, LIU D, YANG Z, et al. Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 128(1): 732-744.
- [11] YU M, PEI X, XU L, et al. A unified formula for calculating bending capacity of solid and hollow concrete-filled steel tubes under normal and elevated temperature [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 141(2): 216-225.
- [12] 查晓雄, 刘习超, 钟善桐, 等. 《空心钢管混凝土结构技术规程》CECS254: 2009 内容和新进展[C]//2010 全国钢结构学术年会论文集. 北京: 工业建筑杂志社, 2010.
(ZHA Xiaoxiong, LIU Xichao, ZHONG Shantong, et al. Brief introduction of "technical specification of hollow concrete-filled steel tubular structures" CECS 254: 2009 Content and new developments [C]//Proceedings of the 2010 national steel structure academic conference. Beijing: Industrial Construction Magazine Agency, 2010.)
- [13] 王宏伟. 空心钢管混凝土构件试验与统一理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
(WANG Hongwei. Research on unified theory and experiment of hollow concrete filled steel tube (H-CFST) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.)
- [14] JIANG A Y, CHEN J, JIN W L. Bending strength of thin-walled centrifugal concrete-filled steel tubes [J]. Engineering and technology, 2013, 5(3): 801-811.
- [15] 张凤亮. 空心圆钢管混凝土压弯构件骨架曲线和延性系数的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
(ZHANG Fengliang. Research on unified theory and experiment of hollow concrete filled steel tube (H-CFST) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.)
- [16] 钟善桐, 查晓雄. 《空心钢管混凝土结构技术规程》CECS 254: 2009 简介[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(3): 49-62.
(ZHONG Shantong, ZHA Xiaoxiong. Brief introduction of "technical specification of hollow concrete-filled steel tubular structures" CECS 254: 2009 [J]. Progress in steel building structures, 2010, 12(3): 49-62.)
- [17] 王宏伟, 徐国林, 钟善桐. 空心率对空心钢管混凝土轴压短柱工作性能及承载力影响的研究[J]. 工程力学, 2007(10): 112-118.
(WANG Hongwei, XU Guolin, ZHONG Shantong. Study on influence of hollow ratio to bearing capacity of H-CFST [J]. Engineering mechanics, 2007(10): 112-118.)
- [18] 杨志坚, 韩嘉明, 雷岳强, 等. 一种新型的配筋空心钢管高强混凝土柱: 中国, CN208533868U P7 [P]. 2019-02-22.
(YANG Zhijian, HAN Jiaming, LEI Yueqiang, et al. A new type of reinforced hollow high strength concrete-filled steel tube column: China, CN208533868U P7 [P]. 2019-02-22.)
- [19] HAN L H, ZHAO X L, ZHONG T. Tests and mechanics model of concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns [J]. Steel and composite structures, 2001, 1(1): 51-74.
- [20] KHAN M, UY B, TAO Z, et al. Concentrically loaded slender square hollow and composite columns incorporating high strength properties [J]. Engineering structures, 2017, 131(15): 69-89.
- [21] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系-原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
(GUO Zhenhai. Strength and constitutive relationship of concrete-principles and applications. [M]. Beijing: China Construction Industrial Press, 1994.)
- [22] LHH A, GHYB C, ZHONG T B. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion [J]. Thin-walled structures, 2007, 45(1): 24-36.
- [23] 张澍. 配筋空心方钢管高强混凝土纯弯构件受力性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2023.
(ZHANG Shu. Mechanical behavior of reinforced hollow high strength concrete filled square steel tube members under pure bending [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2023.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)