

引用本文:任志刚,肖 萌.圆端形钢管混凝土构件纯弯力学性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(2):44-53.

REN Zhi-gang, XIAO Meng. Mechanical Behaviors of Concrete-filled Round End Steel Tubular Members Under Pure Bending[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 44-53.

DOI:10.19815/j.jace.2019.03019

圆端形钢管混凝土构件纯弯力学性能

任志刚,肖 萌

(武汉理工大学 建筑与土木工程学院,湖北 武汉 430070)

摘要:为研究圆端形钢管混凝土构件的纯弯力学性能,对 4 个构件进行了纯弯试验,分析了高宽比和含钢率对纯弯曲作用下圆端形钢管混凝土构件破坏形态、挠度曲线、截面应变、抗弯承载力的影响。基于 ABAQUS 建立有限元模型对圆端形钢管混凝土构件纯弯性能进行模拟,试验结果与模拟结果吻合良好,利用验证后的模型对圆端形钢管混凝土构件进行了受力全过程分析以及参数分析。最后基于 ABAQUS 参数分析结果提出了圆端形钢管混凝土构件抗弯承载力计算公式,公式计算结果与试验结果吻合良好。结果表明:圆端形钢管混凝土构件在纯弯曲作用下发生了明显的挠度变形,当跨中挠度达到 $L/25$ (L 为试件长度) 时,试件仍能承受较大的荷载,表现出良好的延性;圆端形钢管混凝土构件的挠度曲线可假设为正弦半波曲线,其跨中截面基本保持为平截面;当构件达到抗弯承载力时,钢管承受了大部分弯矩,圆弧段钢管相较于平直段钢管对混凝土的约束作用更强;圆端形钢管混凝土构件的抗弯承载力随钢材强度的增大而增大,而混凝土强度的改变对其抗弯性能影响较小。

关键词:圆端形钢管混凝土构件;纯弯;力学性能;抗弯承载力

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)02-0044-10

Mechanical Behaviors of Concrete-filled Round End Steel Tubular Members Under Pure Bending

REN Zhi-gang, XIAO Meng

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the flexural behavior of concrete-filled round end steel tubular (RCFST) members, 4 members were tested under pure bending. The effects of sectional aspect ratios and steel ratios on failure mode, deflection curve, section strain and bending capacity of RCFST members under pure bending were analyzed. The flexural behavior of RCFST members was simulated by the finite element model based on the software ABAQUS. The experimental results were in good agreement with the simulation results. The verified model was used to analyze the whole process and the effects of parameters. Finally, based on ABAQUS simulation analysis, a formula for calculating the bending capacity of RCFST members was proposed. The calculation results agreed well with the experimental results. The results show that RCFST members have obvious deflection deformation under pure bending. When the mid-span deflection

收稿日期:2019-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51178179)

作者简介:任志刚(1974-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:whut.ren@163.com。

reaches $L/25$ (L is the length of specimen), the specimens can bear large load and perform good ductility. The deflection curve of RCFST members can be assumed to be a sinusoidal half-wave curve, and the mid-span section is substantially maintained as a flat section. When the members reach the bending capacity, the steel tube bears most of the moment, and the round end steel tube has stronger confinement effect on the concrete than the rectangular part of the steel tube. The bending capacity of RCFST members increases with the increase of the steel strength, while the change of the concrete strength has little effect on the flexural behavior.

Key words: concrete-filled round end steel tubular member; pure bending; mechanical behavior; bending capacity

0 引言

圆端形钢管混凝土(RCFST)构件不仅具有与传统钢管混凝土构件相同的优点(承载力高,塑性和韧性好,施工方便等^[1]),并且其建筑美学效果好,流体阻力系数小,能够合理利用主次轴。圆端形钢管混凝土构件广泛应用于工程实践中,如武汉市后湖大桥的塔柱、厦门市杏林湾路段平台的边墩等,在高层建筑及市政工程中也具有广阔的应用前景。

目前国内外对于圆端形钢管混凝土构件力学性能的研究主要集中于轴压、偏压方面。文献[2]~[4]开展了圆端形钢管混凝土轴压短柱的试验研究以及数值分析。文献[5]采用 ABAQUS 分析了 4 种不同加筋方式对圆端形钢管混凝土构件轴压性能的影响,发现双向对拉箍筋方式具有最佳的约束效果。文献[6],[7]通过数值分析研究了圆端形钢管混凝土短柱的轴压性能,发现圆弧段钢管对混凝土有较强的约束作用。文献[8]~[10]对圆端形钢管混凝土构件的偏压性能进行了研究,分析了偏心率对承载力的影响并进行了参数分析。文献[11]通过数值分析研究了圆端形钢管混凝土构件的受扭性能,并提出了抗扭承载力计算方法,但是,对于圆端形钢管混凝土构件纯弯力学性能的研究还未见相关的报道。

对圆端形钢管混凝土构件纯弯力学性能的研究有利于分析其抗震性能、压弯性能,因此本文对 4 个圆端形钢管混凝土构件进行了纯弯试验,并采用有

限元法对圆端形钢管混凝土纯弯构件进行受力全过程分析及参数分析,最后基于大量的有限元计算结果提出了圆端形钢管混凝土构件的抗弯承载力计算公式。

1 试验研究

1.1 试验概况

圆端形钢管混凝土构件的横截面如图 1 所示,其中 H 为圆端形高, B 为圆端形宽, t 为钢管壁厚。为研究高宽比 H/B 、含钢率 $\rho(\rho=A_s/A_c$,其中 A_s , A_c 分别为钢管及混凝土的截面面积)对圆端形钢管混凝土构件抗弯性能的影响,共进行了 4 个纯弯构件的试验研究,4 个试件的实际长度 L 均为 1 500 mm,有效计算长度 L_0 均为 1 300 mm,构件基本参数、尺寸及编号见表 1。

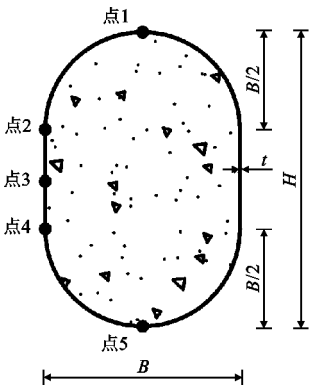


图 1 圆端形钢管混凝土构件横截面
Fig.1 Cross-section of RCFST Members

表 1 构件基本参数

Tab.1 Basic Parameters of Specimens

构件编号	H/mm	B/mm	t/mm	H/B	ρ	f_{cu}/MPa	f_y/MPa	$M_{ue}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{uc}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	M_{ue}/M_{uc}
RCFST1	145	106	4	1.37	0.11	30.1	366.0	32.28	28.51	1.13
RCFST2	149	104	6	1.43	0.22	30.1	354.6	50.38	45.63	1.10
RCFST3	197	106	4	1.86	0.12	30.1	366.0	55.89	55.64	1.00
RCFST4	245	107	4	2.29	0.11	30.1	366.0	86.44	82.60	1.05

注: f_y 为钢管屈服强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; M_{ue} , M_{uc} 分别为圆端形钢管混凝土构件的抗弯承载力实测值和有限元计算值。

钢管两端的半圆形部分是由圆管切割而成,矩形部分按设计尺寸下料,然后将 4 个部分焊接在一起,确保焊缝质量。圆端形钢管加工完成后,在钢管下端焊上厚 10 mm 的端板。将混凝土从钢管未焊接端板的上端灌入,为保证混凝土的密实性,每加入 30~40 cm 高的混凝土后采用振捣棒插入混凝土中振捣 10~20 s,同时制作 3 个边长为 150 mm 的标准立方体试块,同条件下自然养护。混凝土浇筑 15 d 后,用高强水泥砂浆将上端的混凝土与钢管抹平,最后在上端焊接上同样大小的端板。

1.2 试验方法

试验前,按文献[12]中的方法将试验所使用的 4 mm 和 6 mm 厚的钢材各制作成 3 个拉伸试样进行拉伸试验,钢材的材料性能见表 2,其中 f_u 为钢材的极限抗拉强度, E_s 为钢材的弹性模量, μ_s 为钢材的泊松比。按照文献[13]中的方法测试混凝土立方体试块的力学性能,混凝土的力学性能见表 3,其中 E_c 为混凝土的弹性模量。

表 2 钢材材料性能

Tab. 2 Material Properties of Steel

t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa	μ_s
4	366.0	549	229 135	0.31
6	354.6	530	221 805	0.27

表 3 混凝土力学性能

Tab. 3 Mechanical Properties of Concrete

材料	f_{cu}/MPa	E_c/MPa
混凝土	30.1	29 336

试验采用四分点加载方式,试验装置如图 2 所示,加载设备为武汉理工大学结构实验室内的 500 t 压力机,荷载通过刚性梁加载到试件上。为了准确地测量试件受力过程中应变的变化,在跨中截面钢管的外表面设置了纵向及横向应变片共 8 组,贴应变片前先将贴片位置处打磨光滑,以消除钢管表面不平整带来的影响。为测量构件挠度的变化,在试件的加载点及支座处各布置了 1 个量程为 50 mm 的位移计,跨中位置处布置了 1 个量程为 100 mm 的位移计。

正式加载前进行预加载,预加载的最大荷载为有限元计算得到抗弯承载力的 1/20。正式加载采用位移加载制度,加载速度为 $0.02\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,当焊缝开裂或跨中挠度达到 $L/25$ 时,停止加载。

1.3 试验结果与分析

1.3.1 破坏形态

试件破坏形态如图 3 所示,4 个构件的破坏形

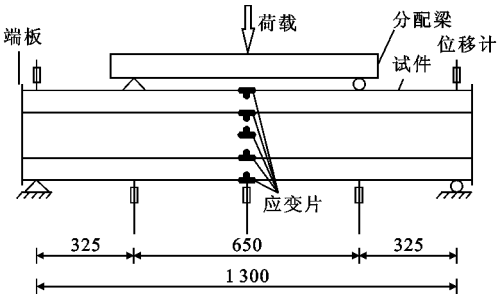
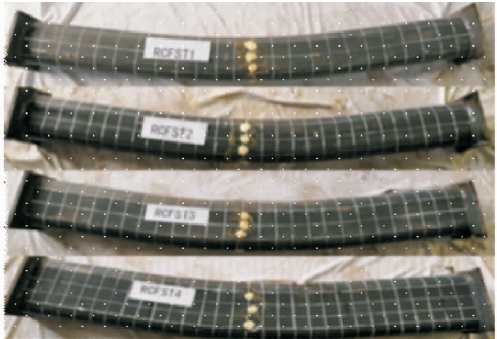


图 2 试验加载装置(单位:mm)

Fig. 2 Loading Setup of Test (Unit:mm)



(a) 试件整体破坏形态



(b) 核心混凝土破坏形态

图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure Form of Specimen

态基本相同,均出现了明显的挠度变形,整体呈现为弓形。试验结束后为了观察混凝土的破坏情况将跨中区域的部分钢管切开,可以发现受压区的混凝土无明显破坏特征,混凝土未被压碎,受拉区混凝土被拉裂,竖向裂缝分布较均匀并且基本延伸到 $H/2$ 高度处。

1.3.2 挠度曲线

图 4 为不同荷载等级下各构件挠度沿构件长度的分布图,其中横坐标 L' 为各测点距左端铰支座的距离,纵坐标 U 为各测点的挠度值。从图 4 中可以看出,在不同荷载等级下各构件支座处的挠度均无明显变化;当弯矩小于 $0.8M_{uc}$ 时,随着弯矩的增长,加载点及跨中位置处的挠度变化较均匀;当弯矩大于 $0.8M_{uc}$ 后,加载点及跨中位置处挠度增长速度加

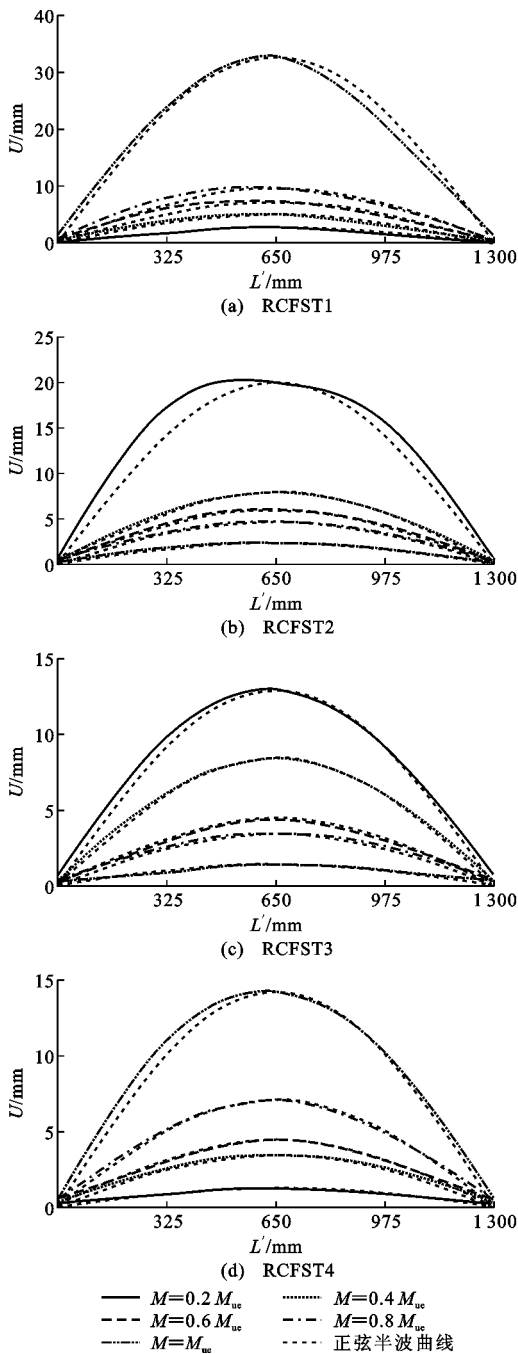


图 4 挠度曲线

Fig. 4 Deflection Curves

快,挠度增长明显。为了更好地分析构件挠度变化情况,图中画出了正弦半波曲线,可以看出构件挠度曲线与正弦半波曲线基本吻合,这说明对于圆端形钢管混凝土纯弯试件,其挠度曲线可假设为正弦半波曲线。

1.3.3 截面应变

图 5 为跨中截面弯矩-拉区(压区)纵向应变($M-\epsilon$)曲线。 M_{uc} 取跨中截面钢管受拉区最外边缘应变达到 0.01 时所对应的弯矩值,各试件钢材屈服

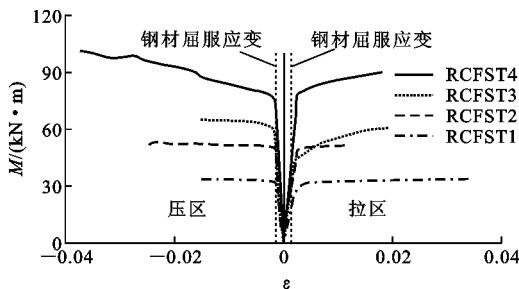


图 5 弯矩-纵向应变曲线

Fig. 5 Moment-longitudinal Strain Curves

应变约为 0.001 6。从图 5 可以看出:当钢管的纵向应变小于屈服应变时,弯矩与应变成正比;当钢管的纵向应变大于屈服应变后,纵向应变增长速度逐渐加快,钢管的塑性逐渐发展。

图 6 为不同荷载等级下跨中截面钢管纵向应变-截面高度($\epsilon-H$)关系曲线,其中压应变为负,拉应变为正。当弯矩不大于 $0.8M_{uc}$ 时,构件各测点的应变随着弯矩的增加大致呈等比例增长,构件跨中截面基本保持为平截面,即符合平截面假定,并且此时应变为 0 的位置基本保持不变,即中和轴在此 4 个荷载等级下的位置大致保持不变。从图 6 可以看出,当弯矩从 $0.8M_{uc}$ 增加到 M_{uc} 过程中应变增量最大,增加速度最快,与弹性阶段的应变增长速度相比,弹塑性阶段的应变增长速度更快。

1.3.4 抗弯承载力

图 7 为试验和有限元计算得到的各构件跨中弯矩-挠度($M-U$)曲线,曲线分为 3 个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段。构件抗弯承载力见表 1,当钢管壁厚一样时,与高宽比为 1.5 的构件相比,高宽比为 2,2.5 的构件抗弯承载力分别提高了 73%和 168%;与钢管壁厚为 4 mm 的构件相比,钢管壁厚为 6 mm 的构件抗弯承载力提高了 56%。因此可得,圆端形钢管混凝土构件的抗弯性能受高宽比及钢管壁厚的影响较大,并且随着高宽比及钢管壁厚的增加,其抗弯承载力也会得到提升。

2 有限元建模与计算

2.1 模型的建立

应用有限元分析软件 ABAQUS 建立了精细化模型,对圆端形钢管混凝土纯弯构件进行了深入的受力分析。

2.1.1 混凝土本构关系

混凝土的受压本构关系采用 Han 等^[14]提出的考虑外部钢管对混凝土约束作用的本构模型。

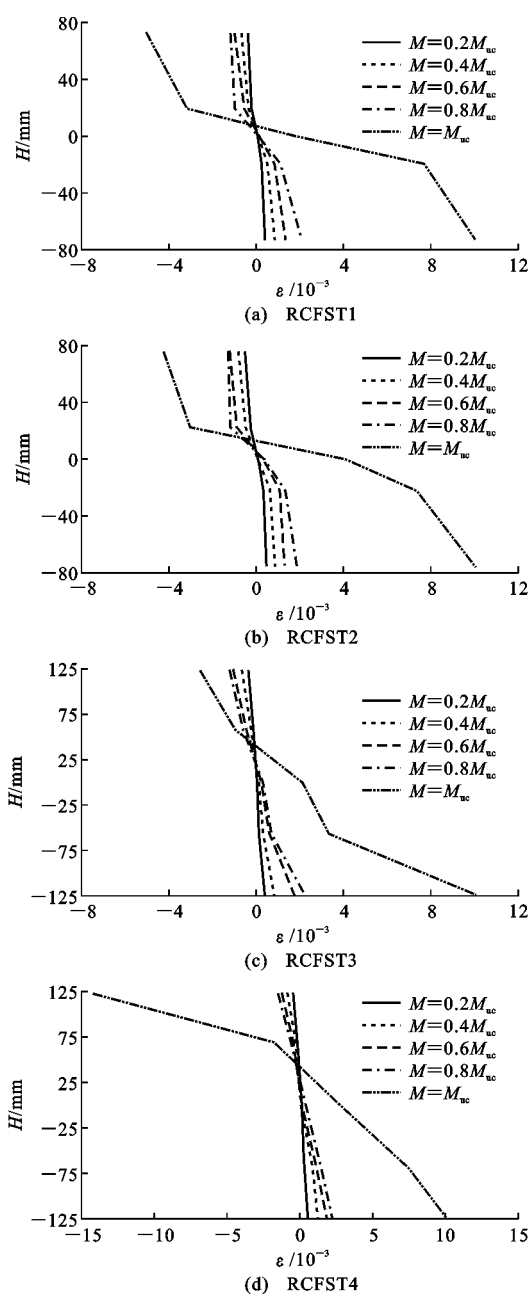


图 6 跨中截面钢管纵向应变-截面高度曲线
Fig. 6 Longitudinal Strain-section Height Curves at Mid-span Section of Steel Tube

混凝土受拉软化性能采用能量破坏准则定义,混凝土应力-裂缝宽度(σ_f - U_1)关系如图 8 所示。参考文献[15],对于 C20 混凝土,断裂能 G_f 取为 $40 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$;对于 C40 混凝土, G_f 取 $120 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,中间插值计算。开裂应力 σ_{t0} 参考沈聚敏等[16]提供的混凝土抗拉强度计算公式,表达式如下

$$\sigma_{t0} = 0.26(1.25f'_c)^{2/3} \quad (1)$$

2.1.2 钢材本构关系

钢管采用了 Han[17]提出的弹塑性模型,应力-应变关系曲线分为 5 个阶段,包括弹性阶段、弹塑性

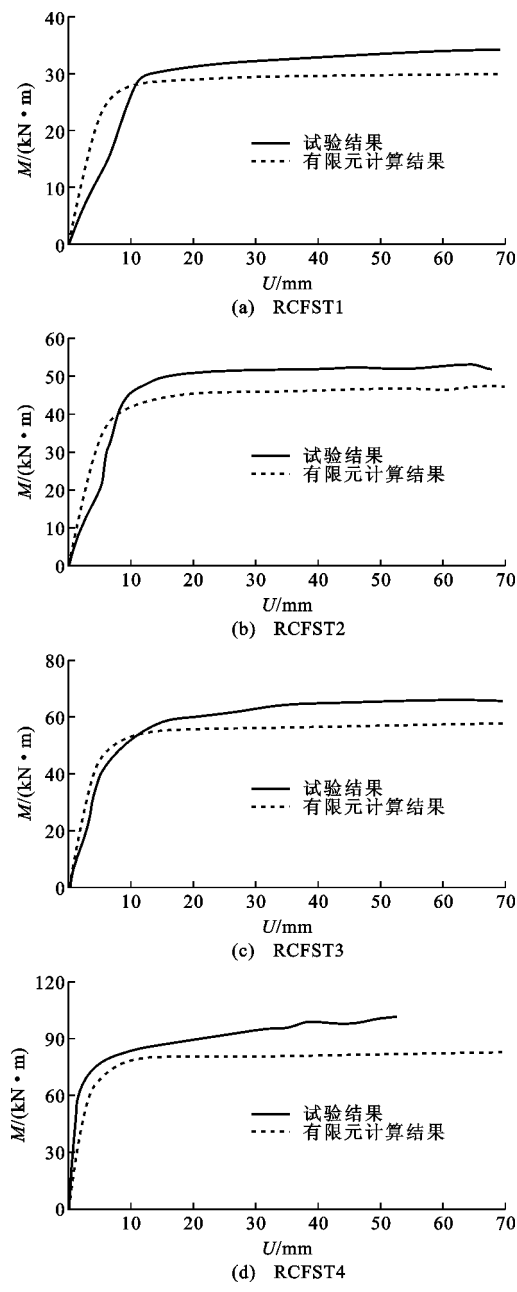


图 7 各试件弯矩-挠度曲线
Fig. 7 Moment-deflection Curves of Specimens

阶段、塑性阶段、应变强化阶段、二次塑流阶段。

2.1.3 单元类型的选取

钢管采用四节点减缩积分的壳单元(S4R)来模拟,支座和加载垫块以及核心混凝土采用八节点减缩积分的三维实体单元(C3D8R)来模拟。混凝土与钢管界面法线方向采用硬接触,切线方向采用库仑摩擦模型来模拟界面切向力的传递,界面摩擦因数 μ 取 0.6 [18]。有限元计算模型见图 9,采用全构件模型进行模拟计算,约束左端支座底部中线的 x , y , z 方向上的位移,约束右端支座底部中线的 x , y 方向上的位移,2 个加载垫块分别与 2 个参考点耦

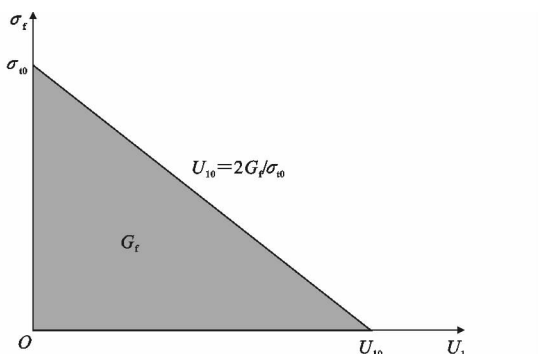


图 8 混凝土受拉软化模型

Fig. 8 Tensile Softening Model of Concrete

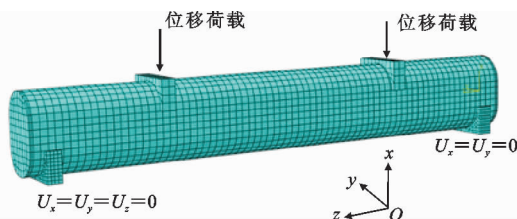


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite Element Model

合,位移加载施加于 2 个参考点上。

2.2 模型验证

为了验证有限元模型的正确性,采用本文的有限元模型对 4 个纯弯试件进行了模拟,有限元计算得到的抗弯承载力 M_{uc} 见表 1, M_{uc} 取钢管受拉区最外边缘应变达到 0.01 时所对应的弯矩值。表 1 中 M_{uc}/M_{uc} 的平均值和均方差分别为 1.07 和 0.002,说明有限元计算结果具有良好的准确性。图 7 中弯矩-挠度曲线的试验结果与有限元结果较为吻合,证明此有限元模型能够较好地模拟圆端形钢管混凝土受弯全过程,因此该模型能够用于受力分析以及参数分析。

2.3 受力分析

在有限元模型得到验证的基础上,本文对典型试件进行有限元模拟,对圆端形钢管混凝土构件的受弯全过程进行了深入的受力分析。典型试件具体参数为: $L=4\,000\text{ mm}$, $H=300\text{ mm}$, $B=150\text{ mm}$, $t=4\text{ mm}$, $f_y=235\text{ MPa}$, $f_{cu}=30\text{ MPa}$ 。图 10 为位移荷载作用下典型试件跨中截面的弯矩-挠度曲线以及钢管和混凝土的弯矩-挠度曲线。当达到抗弯承载力时,钢管和核心混凝土分别承担了极限弯矩的 63% 和 37%,可见大部分的弯矩由钢管承受,因此钢材的力学性能对圆端形钢管混凝土构件的抗弯性能有较大的影响。加载后期随着挠度的增加,混凝土承受的弯矩不断减小,而钢管所承受的弯矩缓

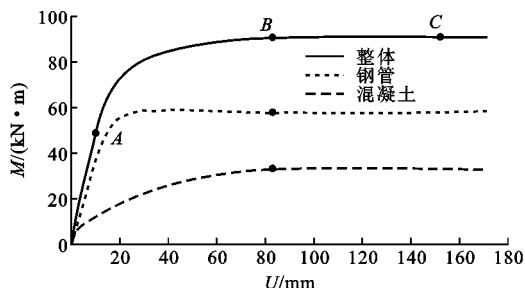


图 10 典型试件受力过程

Fig. 10 Stress Process of Typical Specimens

慢增长,从整体上看圆端形钢管混凝土纯弯构件所能承受的弯矩保持平稳的发展趋势,当挠度达到 $L/25$ 时,构件仍承受了较大的弯矩,构件表现出了良好的延性。

为了方便描述各受力过程,在图 10 弯矩-挠度曲线上取了 3 个特征点: A 点为受拉区钢管应力达到比例极限时的点, B 点为抗弯承载力的取值点, C 点为跨中挠度达到 $L/25$ 左右时的点。通过各特征点处混凝土和钢管的受力情况深入分析圆端形钢管混凝土构件的受弯机理。图 11 为各特征点跨中截面混凝土纵向应力分布云图,图 12 为各特征点跨中截面混凝土纵向应力沿高度分布,图 13 为跨中截面钢管的纵向应力沿高度分布。

圆端形钢管混凝土构件受弯全过程分为以下 3 个阶段:

OA 段,构件所承受的弯矩和跨中挠度呈线性增加关系。此阶段混凝土的纵向应力较小,受压区混凝土的最大纵向应力为 $0.39f_{cu}$,钢管纵向应力与截面高度线性相关,此阶段钢管和混凝土处于弹性工作状态。

AB 段,曲线斜率不断变小,挠度增长速度逐渐大于弯矩增长速度。与 A 点相比,受拉区混凝土的纵向应力变化较小,受压区混凝土纵向应力增长较明显,受压区混凝土最大纵向应力达到 $1.34f_{cu}$,已超过混凝土立方体抗压强度标准值,说明此时受压区混凝土已得到充分的利用。受压区钢管未进入屈服状态,受拉区钢管大部分已经进入强化阶段,受压区和受拉区钢管的最大纵向应力分别为 $0.86f_y$ 和 $1.11f_y$,此阶段钢管的塑性不断发展,圆端形钢管混凝土构件处于弹塑性工作阶段。

BC 段,加载后期构件承受的弯矩仍缓慢增长,挠度迅速增加。与 B 点相比,受压区混凝土的纵向应力仍有所增长,说明此时钢管对混凝土还存在较强的约束作用。此阶段钢管的纵向应力仍有小幅度的增长,钢管的纵向压应力始终小于其屈服强度。

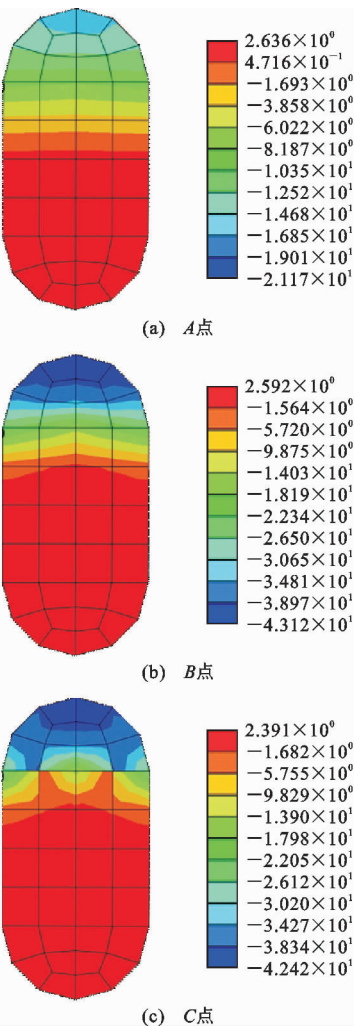


图 11 跨中截面混凝土纵向应力云图(单位:MPa)
Fig. 11 Longitudinal Stress Nephogram of Concrete at Mid-span Section (Unit:MPa)

构件表现出了良好的延性,此阶段为塑性阶段。

图 14(a)为跨中截面不同位置处钢管和混凝土法向接触应力随挠度变化曲线,图 14(b)为当弯矩达到抗弯承载力(B 点)时跨中截面法向接触应力分布,图 14(c)为跨中挠度达到 $L/25$ 左右(C 点)时跨中截面法向接触应力分布。

从整个受力过程上看,圆弧段接触应力大于平直段的接触应力,点 2 的接触应力一直小于点 4 的接触应力,且平直段中点的接触应力始终为 0。OA 段各点接触应力普遍很小;AB 段圆弧段中点相对于平直段接触应力增长速度更快,点 5 的接触应力大于点 1 的接触应力,点 5 的接触应力增长速度由快变慢,点 1 接触应力增长速度基本保持不变。当进入 BC 段后,点 1 接触的最大接触应力达到了 6.88 MPa,超过了点 5 的接触应力 5.41 MPa,并且两者都保持缓慢的增长趋势。圆弧段钢管对端部混

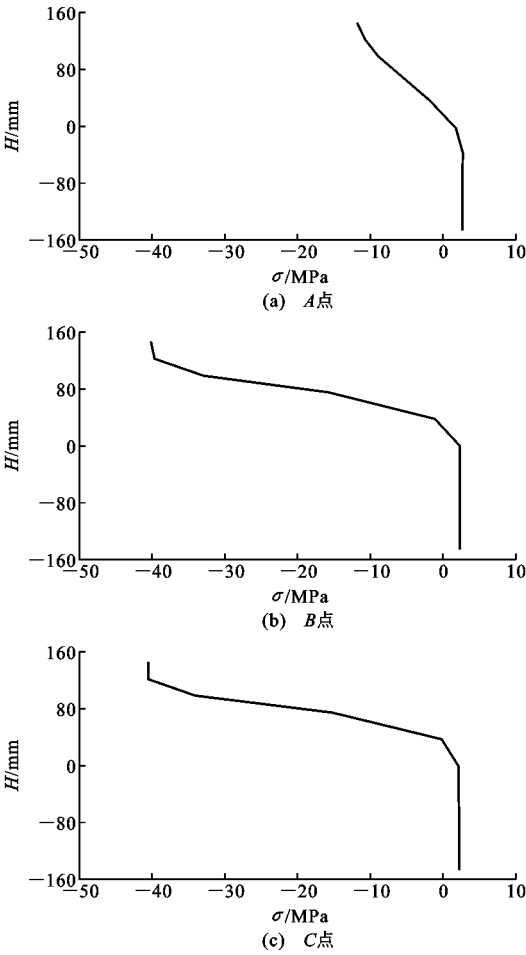


图 12 跨中截面混凝土纵向应力沿高度分布
Fig. 12 Longitudinal Stress Distribution of Concrete Along Height at Mid-span Section

凝土产生了较强的约束作用,而平直段钢管产生的约束作用较小。

2.4 参数分析

利用有限元软件 ABAQUS 分析了含钢率 ρ 、高宽比 H/B 、钢材强度 f_y 、混凝土强度 f_{cu} 对圆端形钢管混凝土构件抗弯性能的影响,见图 15。分析可得,圆端形钢管混凝土构件的抗弯承载力随含钢率、钢材强度、高宽比的增大而增大,而混凝土强度的改变对其抗弯性能的影响较小。

3 抗弯承载力计算公式

目前国内外尚未出现有关圆端形钢管混凝土构件纯弯性能的研究报道,利用基于 ABAQUS 建立的数值模型对 128 个圆端形钢管混凝土纯弯构件的抗弯承载力进行计算,其中 Q235, Q345 钢管分别和 C30, C50 混凝土匹配; Q390 钢管和 C70, C90 混凝土匹配; Q420 钢管和 C70, C90 混凝土匹配;试件的高宽比 $H/B=1.5, 2, 2.5, 3$, 钢管厚度 $t=2, 4, 6, 8$

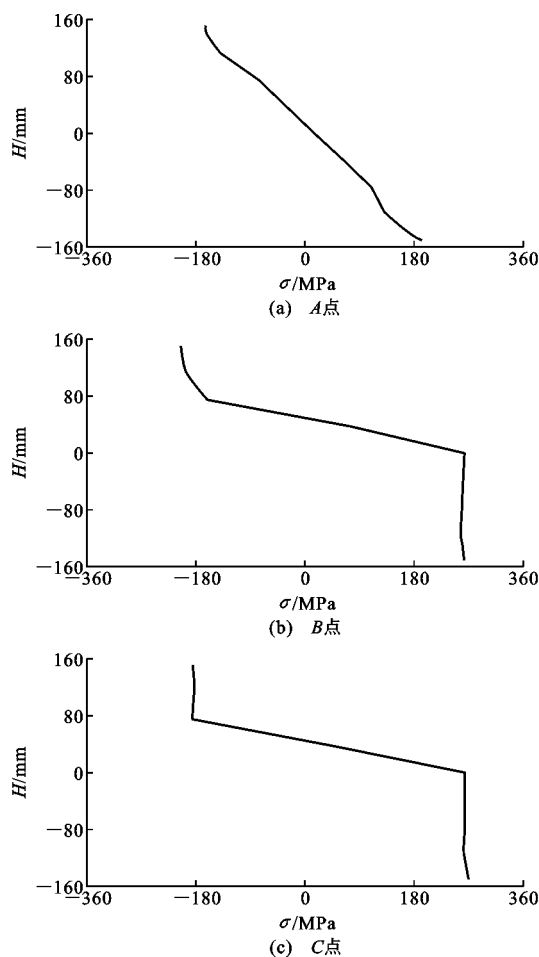


图13 跨中截面钢管的纵向应力沿高度分布

Fig. 13 Longitudinal Stress Distribution of Steel Tube Along Height at Mid-span Section

mm,构件长度 $L=1\ 500$ mm。参考矩形、圆形钢管混凝土构件抗弯承载力的计算方法^[19],通过回归分析,提出圆端形钢管混凝土构件抗弯承载力计算公式,即

$$M_1 = \gamma_m W_{sc} f_{scy} \quad (2)$$

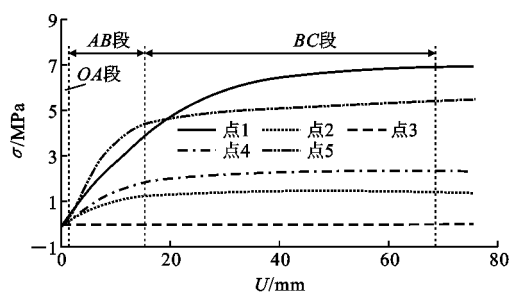
$$\gamma_m = 1.09\xi + 0.43\ln(\xi + 0.1) \quad (3)$$

$$f_{scy} = (1.33 + 0.81\xi + 0.041\xi^2) f_{ck} \quad (4)$$

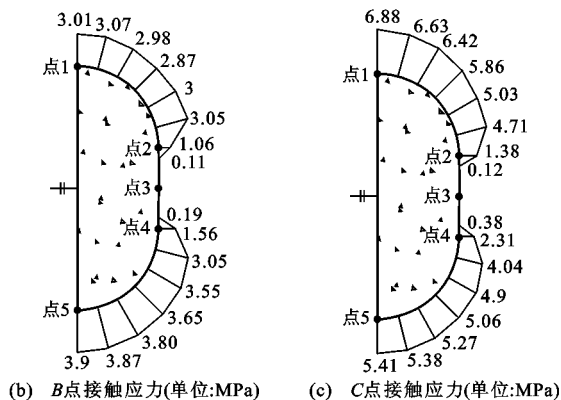
$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (5)$$

式中: M_1 为圆端形钢管混凝土抗弯承载力; γ_m 为截面塑性发展系数; W_{sc} 为组合截面模量; f_{scy} 为统一理论强度; ξ 为约束系数^[20]; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值。

将4个试验构件的抗弯承载力及128个有限元模型计算得到的抗弯承载力与公式(2)的计算结果进行比较可得: M_{uc}/M_1 的均值和均方差分别为1.07和0.002; M_{uc}/M_1 的均值和均方差分别为1.03和0.006。公式计算结果与试验结果及有限元计算



(a) 不同位置处的接触应力



(b) B点接触应力(单位:MPa)

(c) C点接触应力(单位:MPa)

图14 接触应力

Fig. 14 Contact Stress

结果均吻合良好。

4 结 语

(1)本文建立的有限元模型能够较好地模拟试验结果,可用于圆端形钢管混凝土构件的纯弯性能分析。

(2)圆端形钢管混凝土纯弯构件表现出良好的延性破坏特征,圆弧段钢管对核心混凝土产生了较强的约束作用。

(3)圆端形钢管混凝土构件抗弯承载力随钢管壁厚、钢材强度以及高宽比的增加而增加,混凝土强度的改变对其抗弯性能影响较小。

(4)本文提出的抗弯承载力计算公式对于圆端形钢管混凝土纯弯构件具有较高的精度。

参考文献:

References:

- [1] 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: 211-228.
- [2] 丁发兴,傅强,方常靖.圆端形耐候钢管混凝土轴压短柱力学性能研究[J].铁道工程学报, 2017, 34(11): 33-38.

DING Fa-xing, FU Qing, FANG CHANG-jing. Re-

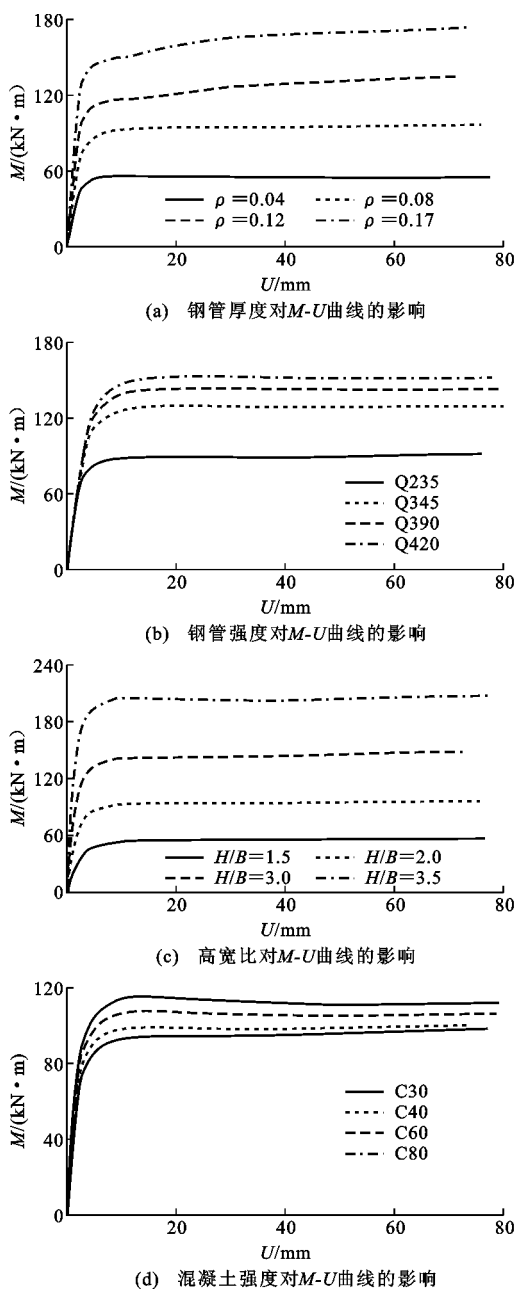


图 15 各参数对 $M-U$ 曲线的影响

Fig. 15 Effect of Different Parameters on $M-U$ Curves

search on the Mechanical Behavior of Concrete-filled Round-ended Weathering Steel Tubular Stub Columns Under Axially Compressive Loading[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(11): 33-38.

- [3] 王志滨, 陈靖, 谢恩普, 等. 圆端形钢管混凝土柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 123-130.

WANG Zhi-bin, CHEN Jing, XIE En-pu, et al. Behavior of Concrete-filled Round-end Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 123-130.

- [4] 谷利雄, 丁发兴, 付磊, 等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 57-63.

GU Li-xiong, DING Fa-xing, FU Lei, et al. Mechanical Behavior of Concrete-filled Round-ended Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 57-63.

- [5] 付磊, 丁发兴, 谷利雄, 等. 圆端形钢管内约束混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(11): 113-120.

FU Lei, DING Fa-xing, GU Li-xiong, et al. Mechanical Properties of Stirrups Confinement Concrete-filled Round-ended Steel Tubular Stub Short Columns Under Axial Compression[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(11): 113-120.

- [6] 谢恩普, 王志滨, 林盛, 等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱的机理分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2015, 43(4): 517-522.

XIE En-pu, WANG Zhi-bin, LIN Sheng, et al. Mechanism Analysis on Concrete-filled Round-end Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2015, 43(4): 517-522.

- [7] HASSANEIN M F, PATEL V I. Round-ended Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Short Columns: FE Investigation Under Axial Compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 140: 222-236.

- [8] 王二磊. 圆端形钢管混凝土塔柱受压力学性能与可靠度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

WANG Er-lei. Research on Compressive Behavior and Reliability of Round-ended Steel Tube-filled Concrete Column[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.

- [9] 李锦华, 王二磊. 圆端形钢管混凝土偏压构件受力性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(4): 50-53.

LI Jin-hua, WANG Er-lei. Mechanical Behavior of Round-ended Steel Tube Under Eccentric Load[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(4): 50-53.

- [10] 李德山, 池思源, 王志滨. 圆端形钢管混凝土柱偏压力学性能研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2016, 44(4): 538-542.

LI De-shan, CHI Si-yuan, WANG Zhi-bin. Mechanical Behavior of Round-end Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Eccentric Load[J]. Journal of

- Fuzhou University; Natural Science Edition, 2016, 44(4): 538-542.
- [11] 王静峰, 於忠华, 沈奇罕, 等. 圆端形椭圆钢管混凝土受扭性能数值分析及抗扭承载力计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3): 7-15.
WANG Jing-feng, YU Zhong-hua, SHEN Qi-han, et al. Torsional Behavior Numerical Analysis and Torsion Bearing Capacity Calculation of Circular-end Elliptical Concrete-filled Steel Tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 7-15.
- [12] GB/T 228—2002, 金属材料室温拉伸试验方法[S].
GB/T 228—2002, Metallic Materials — Tensile Testing at Ambient Temperature[S].
- [13] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2002, Standard for Method of Test Mechanical Properties on Ordinary Concrete[S].
- [14] HAN L H, YAO G H, TAO Z. Performance of Concrete-filled Thin-walled Steel Tubes Under Pure Torsion[J]. Steel Construction, 2007, 45: 24-36.
- [15] 杨有福, 马国梁. 不锈钢管再生混凝土弯曲性能[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(4): 572-578.
YANG You-fu, MA Guo-liang. Flexural Performance of Recycled Aggregate Concrete Filled Stainless Steel Tube[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(4): 572-578.
- [16] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
SHEN Ju-min, WANG Chuan-zhi, JIANG Jian-jing. Finite Element Method of Reinforced Concrete and Limite Analysis of Plates and Shells[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [17] HAN L H. Test on Stub Columns of Concrete-filled RHS Section[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58: 353-372.
- [18] 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.
- [19] 于 清, 陶 忠, 陈志波, 等. 钢管约束混凝土纯弯构件抗弯力学性能研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 187-193.
YU Qing, TAO Zhong, CHEN Zhi-bo, et al. Flexural Behavior of Steel Tube Confined Concrete Members Under Pure Bending[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 187-193.
- [20] 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.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.