

文章编号: 1673-5196(2020)02-0138-07

内配型钢圆钢管混凝土构件受弯性能分析计算

史艳莉, 李兴国, 王 凤

(兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 采用有限元软件 ABAQUS 建立内配型钢圆钢管混凝土受弯构件力学模型, 借助已有试验验证模型的合理性, 在此基础上研究该类构件在弯矩作用下的变形规律、受力过程和破坏模式, 分析构件材性、型钢含钢率、型钢截面形式等参数对内配型钢圆钢管混凝土受弯构件极限承载力及抗弯刚度的影响; 引用欧洲规范中组合柱抗弯承载力计算公式进行计算, 并将计算结果与已有试验结果及有限元模拟结果进行对比, 二者吻合良好, 说明欧洲规范中组合柱抗弯承载力计算公式可用于该类构件的设计计算. 研究结果可为内配型钢圆钢管混凝土受弯构件设计提供参考.

关键词: 有限元; 弯矩; 应力; 应变; 计算公式

中图分类号: TU31; TU37 **文献标志码:** A

Analysis and calculation of bending performance of concrete-filled circular steel tubular component with encased profile steel

SHI Yan-li, LI Xing-guo, WANG Feng

(Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Finite element software ABAQUS was used to establish a mechanical model of concrete-filled steel tubular component with encased profile steel subjected to the action of the bending. With the help of the rationality of experimental verification models available, based on checking the accuracy of those, the deflection regularity, stressing process, and failure mode of this kind of components under action of bending moment influence of component parameters such as material property, steel inclusion rate in profile steel, and its sectional form on the ultimate bearing capacity and flexural stiffness of the bent component was analyzed, also. Its evaluation was carried out by means of introduction of calculation formula of flexural bearing capacity of integral column in European Code, and its calculation result was compared with the results of experiment and finite element simulation available. Their agreement was fine enough, showing that that formula of composite columns in European Code can be used for the design of that category of component. The result of this investigation can provide certain reference for the design of the concrete-filled steel tubes with encased profile steel under bending load.

Key words: finite element; bending moment; stress; strain; computation formula

内配型钢圆钢管混凝土构件是在型钢混凝土构件和钢管混凝土构件基础上发展起来的组合结构构件, 它不仅继承了二者承载力高、塑性韧性好的特点, 还具有耐火性能好的优点, 在实际工程中具有良好的应用前景^[1].

内配型钢圆钢管混凝土构件作为一种新型组合

结构构件, 到目前为止国内外研究者对其力学性能研究较少, 且多集中于轴压和压弯方面^[2], 受弯性能研究不足. 研究其受弯力学性能有助于认识该类构件在压弯和压弯剪等复杂受力状态下的工作机理. 得出其抗弯刚度和抗弯承载力等关键性力学指标, 可为实际工程提供相应理论和参考依据, 并推动和促进内配型钢圆钢管混凝土构件在实际工程中的应用. 现有研究者关萍等^[3]、刘晓等^[4-6]、赵同峰等^[7]、史艳莉等^[8]虽然对内配型钢圆钢管混凝土构件的受弯

收稿日期: 2019-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(51768038, 51268035)

作者简介: 史艳莉(1977-), 女, 河北涿州人, 博士, 副教授.

性能进行了研究,给出了其抗弯承载力计算公式,但是上述公式计算过程复杂,适用范围有限,不适合工程应用.因此,探究该类构件工程实用设计计算方法仍具有重要意义.

1 有限元模型

1.1 有限元模型建立

参考已有钢管混凝土建模方法,运用有限元软件 ABAQUS 建立内配型钢钢管混凝土受弯构件数值分析模型,具体过程如下.

1.1.1 材料本构关系模型

混凝土采用韩林海^[9]提出的考虑约束效应系数影响,适用于被动约束状态下的钢管混凝土应力-应变关系模型.混凝土受拉软化利用混凝土的能量破坏准则来实现.

钢管和型钢均采用韩林海^[9]提出的钢材本构关系模型.钢材在单调荷载作用下,采用等向弹塑性模型、等向强化法则和相关流动法则,在多轴应力状态下满足 von Mises 屈服准则.

1.1.2 单元接触类型选取

钢管、型钢、混凝土、夹具和加载板都采用 C3D8R 单元.钢管与混凝土之间,型钢与混凝土之间,加载板与混凝土之间均为面面接触,其界面法线方向采用硬接触,界面切线方向采用库伦摩擦模型,摩擦系数取 0.25.钢管、型钢与加载板之间为绑定.

1.1.3 边界条件设定和网格划分

图 1 为该类构件进行四分点加载试验时加载装置图^[10].图 2 为四分点加载时该类构件的弯矩图.构件在加载点之间为纯弯段.

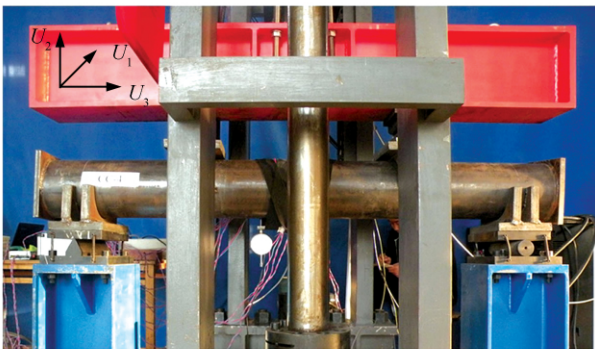


图 1 加载装置
Fig.1 Loading device

选取夹具 1 和 2 顶面水平中线进行位移加载,约束夹具 3 底面水平中线上 U_1 和 U_2 方向位移来模拟滚轴支座,约束夹具 4 底面水平中线上 U_1 、 U_2 和 U_3 方向位移来模拟铰支座.有限元模型见图 3.

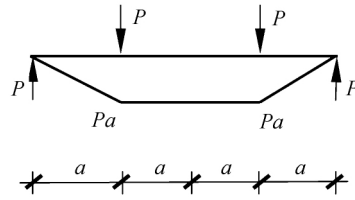


图 2 试件弯矩

Fig.2 Bending moment on specimen

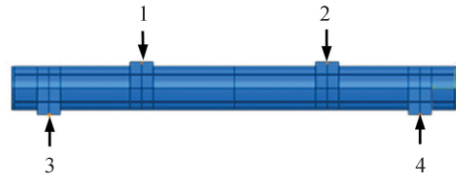


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

采用全局与局部布种相结合细化网格的方法进行网格试验,至 2 次计算结果近似相等时结束网格细化.网格划分如图 4 所示.

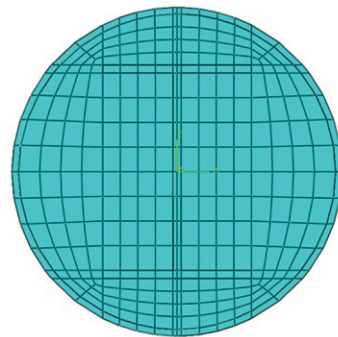


图 4 网格划分

Fig.4 Mesh division

1.2 有限元模型验证

为验证本文建模方法合理性,选取现有部分钢管混凝土受弯构件试验和内配型钢钢管混凝土受弯构件试验进行模拟,并将试验结果与模拟结果进行对比,如图 5 所示.图中, D 为钢管直径, t 为钢管壁厚, L 为构件长度, f_{ty} 为钢管屈服强度, f_{sy} 为型钢屈服强度, f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; M 为试件跨中弯矩, N 为试件跨中荷载, u 为试件跨中位移, ϕ 为试件跨中曲率.

本次模型验证共选取 6 个试件进行建模,模拟所得有限元极限承载力与试验极限承载力比值均值为 0.98,方差为 0.03,说明数值计算结果与试验结果吻合良好,该建模方法能够应用于内配型钢钢管混凝土受弯构件建模分析和研究.

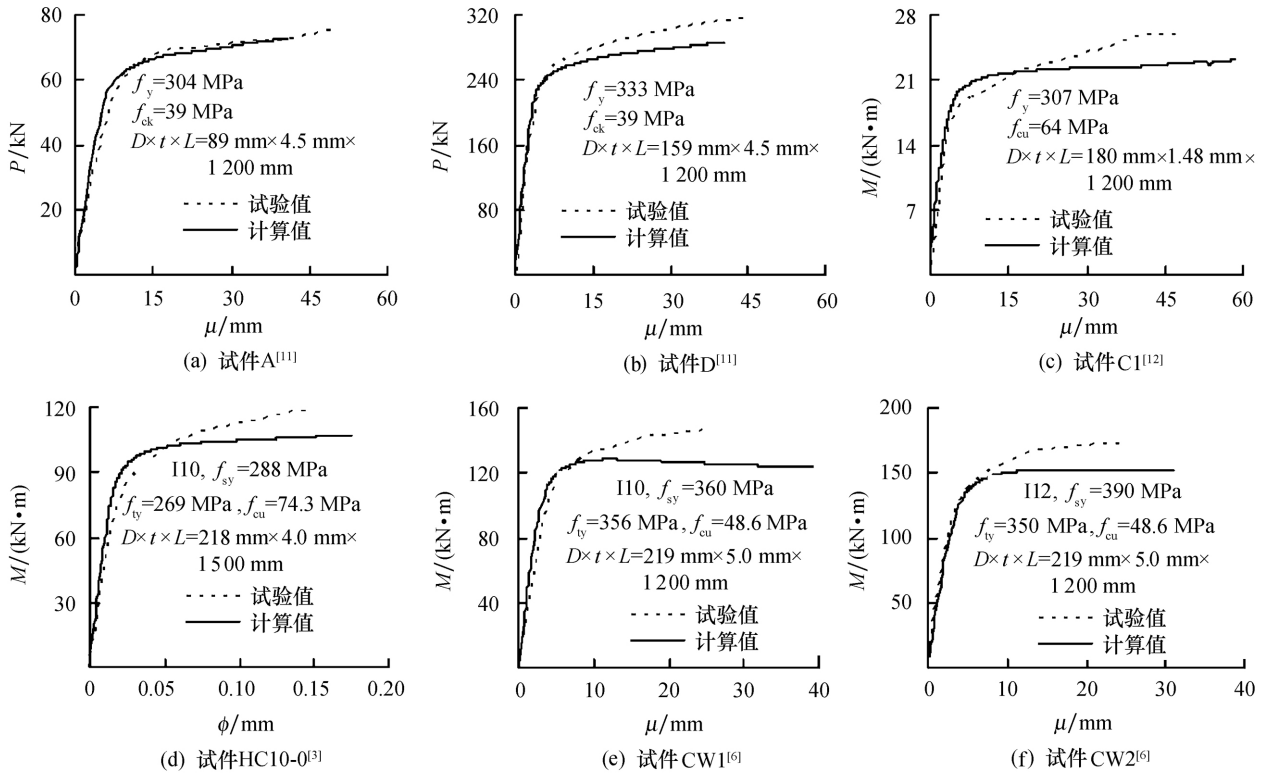


图 5 试验结果与模拟结果对比

Fig.5 Comparison of test result to simulation result

2 受力过程及破坏模态分析

在常用工程参数范围内设计典型构件, 典型构件参数如下: 钢管直径 $D = 200$ mm, 钢管壁厚 $t = 4$ mm, 长度 $L = 1\ 600$ mm, 混凝土强度 $f_{cu} = 50$ MPa, 钢管和型钢钢材屈服强度 $f_y = 235$ MPa, 型钢为 $130\ \text{mm} \times 90\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ 工字钢, 钢管含钢率 $\alpha_{st} = 0.09$, 型钢含钢率 $\alpha_{ss} = 0.05$.

2.1 变形曲线分析

图 6 所示为构件在不同比例极限荷载 P_u 作用下的变形曲线. 图中横轴表示到左侧支座距离, 竖轴表示竖向位移, 实线为构件变形曲线, 虚线为对应的正弦半波曲线. 从图中可以看出, 在达到构件极限承

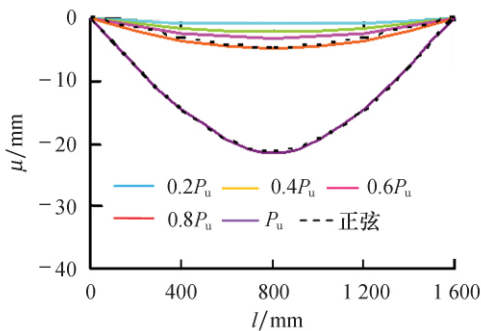


图 6 变形曲线

Fig.6 Deformation curves

载之前, 随着荷载增大, 构件变形增大, 构件变形近似为正弦半波曲线.

2.2 部件承载力分析

图 7 为构件中各部分跨中弯矩-挠度曲线. 横轴表示跨中挠度, 纵轴表示跨中弯矩. 在跨中弯矩较小时, 混凝土、型钢和钢管三者都处于弹性阶段, 各自抗弯刚度近似保持不变. 随着弯矩增大, 型钢和钢管同时达到各自极限承载力. 混凝土由于受拉侧开裂其抗弯刚度减小, 达到极限承载力时明显迟于型钢和钢管. 在混凝土达到极限承载力之后, 混凝土承载力降低, 构件截面发生应力重分布, 钢管钢材强化承载力提高.

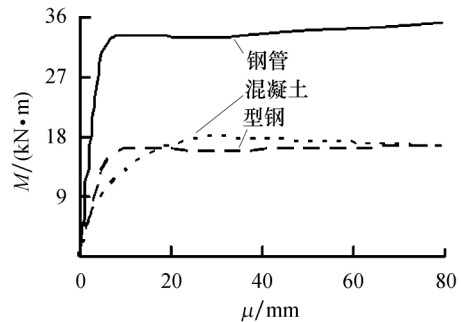


图 7 部件跨中弯矩-挠度曲线

Fig.7 Bending moment vs deflection curves at span middle of component

在本典型构件中,混凝土、型钢和钢管承载力分别占构件总承载力的 26.5%、23.5%和 50%,这主要是由于钢管的截面惯性矩及抗弯刚度均大于混凝土的和型钢的所导致。

2.3 试件受力全过程分析

图 8 所示为跨中弯矩-曲率曲线.为了便于说明,根据构件跨中截面上各点应力状态,在该曲线上提取 6 个特征点:A 点之前,构件抗弯刚度几乎保持不变,B 点时,混凝土开裂,构件抗弯刚度明显减小.C 点时,受拉区钢管屈服.D 点时,受压区钢管屈服.E 点时,钢管受拉侧纤维达到 $10 \times 10^{-4} \mu\epsilon$.考虑到试件受力状态和正常使用要求,将 E 点对应弯矩作为该类构件的极限抗弯承载力 M_u .此时钢管和型钢均屈服而构件并没有软化,这既使得材料性能充分发挥,也可以保证构件延性.F 点时,构件变形过大,不宜继续承载。

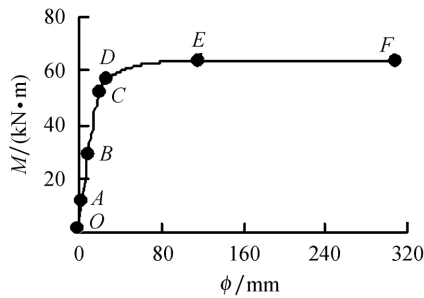


图 8 跨中弯矩-曲率曲线

Fig.8 Bending moment vs curvature curve at span middle

图 9、图 10 和图 11 分别给出了各特征点时刻跨中截面型钢、钢管和混凝土纵向应力分布,图中虚线所示为各特征点时刻中截面中和轴位置.将图 8 中弯矩-曲率曲线根据特征点分为 3 个阶段:弹性阶段 OA、弹塑性阶段 AD 和塑性阶段 DF.

在弹性阶段 OA,构件截面中和轴基本与截面形心轴重合.构件中钢材和混凝土均处于弹性阶段,构件抗弯刚度几乎保持不变,构件跨中挠度随荷载增大线性增大,此时 $M_a = 0.2M_u$.

在弹塑性阶段 AD,随着荷载增大,构件中和轴上移,受拉区最外侧混凝土拉应力大于其极限拉应力而导致混凝土开裂,受拉区钢管和型钢承担的构件拉应力开始增大.由于材料分布原因,受拉侧钢管较型钢先屈服,受压侧混凝土承担了一部分压应力,受压侧钢管屈服迟于受拉侧,此时 $M_d = 0.8M_u$.

在塑性阶段 DF,钢材和混凝土大部分均处于塑性阶段.一方面由于混凝土的存在,防止了钢管和型钢过早局部屈曲,钢材性能得到充分发挥;另一方面钢管和型钢使核心混凝土处于一个复杂受力状态,使其由脆性破坏转变为塑性破坏,改善了整个构件延性.在 E 点后,中和轴略有下移,这是因承载后期受压区混凝土破坏承载力降低,钢管和型钢钢材强化,钢管和型钢承载力提高所引起的。

2.4 试件破坏模态分析

图 12 为该典型构件达到 F 点时刻的试件破坏

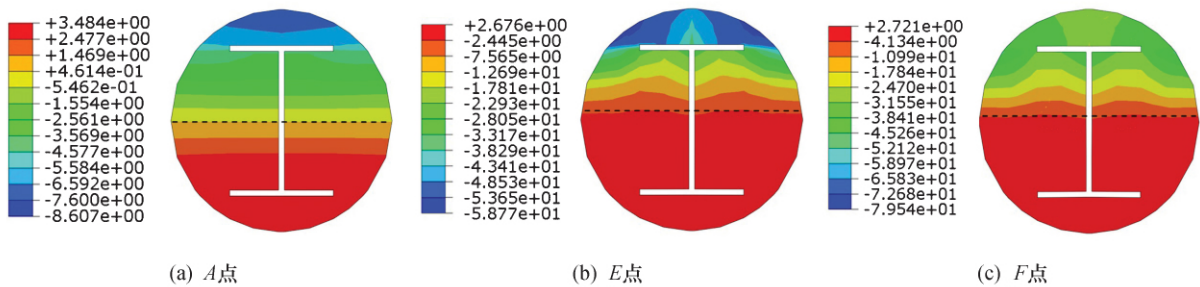


图 9 中截面混凝土特征点时刻纵向应力

Fig.9 Longitudinal stress in middle section of concrete at characteristic instant

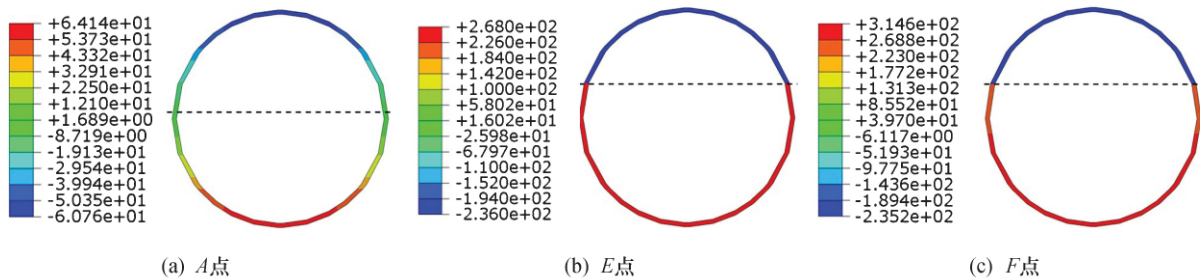


图 10 中截面钢管特征点时刻纵向应力

Fig.10 Longitudinal stress in mid-span section of steel tube at characteristic instant

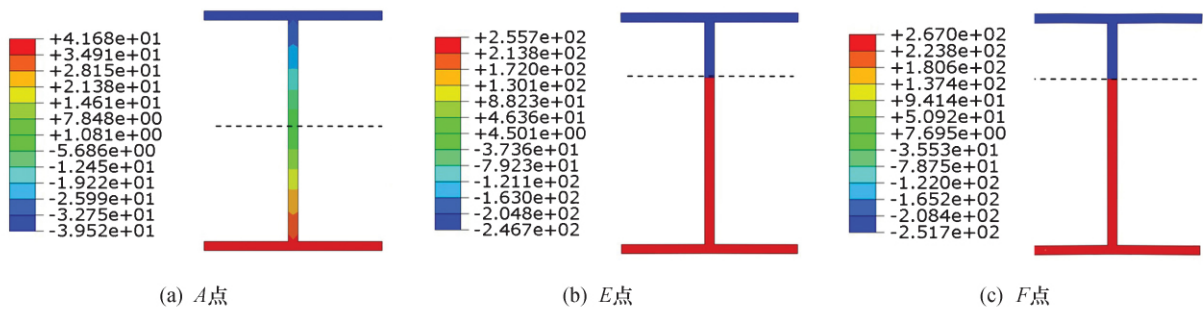


图 11 中截面型钢特征点时刻纵向应力

Fig.11 Longitudinal stress in mid-span section of profile steel at characteristic instant



图 12 试件变形破坏

Fig.12 Deformation-induced failure of specimen

图.从图中可以看出试件跨中变形达到 $L/20 = 80$ mm,试件因跨中变形过大而失去继续承受荷载的能力,呈现弯曲破坏.

图 13 为该典型构件达到 F 点时刻的试件纯弯段混凝土损伤图.混凝土裂缝开展情况可参考混凝土受拉塑性损伤结果,图中受拉塑性损伤值越大表示混凝土损伤程度越严重,该值为 1 时表示混凝土完全受拉损伤.混凝土受拉损伤均匀分布于纯弯段内.

3 参数分析

为了确定不同因素对内配型钢圆钢管混凝土受弯构件力学性能的影响大小及影响规律,便于在进行该类构件设计时合理选取构件参数,需要采用前文所述建模方法对该类构件进行参数分析.参数分析结果如图 14 所示.

3.1 材料强度的影响

3.1.1 混凝土强度的影响

图 14a 给出了混凝土强度对于内配型钢圆钢管混凝土构件受弯力学性能的影响.混凝土强度从 f_{cu} 分别为 30、40、50、60 MPa 依次提高至 70 MPa 时,构件极限承载力增幅分别为 4.1%、2.2%、1.9%和1.3%.在实际工程中,在不改变截面尺寸的情况下,仅提高混凝土强度对提高构件抗弯承载力意义不大.

3.1.2 钢管强度的影响

图 14b 给出了钢管钢材强度对于内配型钢圆钢管混凝土构件受弯力学性能的影响.钢管钢材强度从 f_{ly} 分别为 235、345、390 MPa 依次提高至 420

MPa 时,构件的极限承载力增幅分别为 26%、7.9%和 4.3%.

在实际工程中,在不改变截面尺寸的情况下,提高钢管钢材强度对提高构件抗弯承载力意义明显.

3.1.3 型钢强度的影响

图 14c 给出了型钢钢材强度对于内配型钢圆钢管混凝土构件受弯力学性能的影响.型钢钢材强度从 f_{sy} 分别为 235、345、390 MPa 依次提高至 420 MPa 时,构件的极限承载力增幅分别为 13%、4.4%和 2.7%.在实际工程中,在不改变截面尺寸的情况下,提高型钢钢材强度对提高构件抗弯承载力意义较提高混凝土强度明显.

综上所述,对于实际工程中内配型钢圆钢管混凝土受弯构件,在不改变构件截面尺寸,仅提高材料强度的情况下,需要提高设计构件极限抗弯承载力时,宜优先考虑提高钢管钢材强度,其次为型钢钢材强度,混凝土强度最次.

3.2 型钢含钢率的影响

图 14d 给出了型钢含钢率对于内配型钢圆钢管混凝土构件受弯力学性能的影响.从图中可以看出,随着型钢含钢率 α_{ss} 分别从 0.01、0.02、0.03、0.04 依次增大到 0.05 时,构件抗弯刚度变化不大,而极限抗弯承载力呈非线性增大.在实际工程中,单纯提高型钢含钢率可以在一定程度上提高构件的抗弯承载力.型钢含钢率提高需要在一定参数范围内,否则会影响到构件经济性.

3.3 型钢强弱轴的影响

整个构件截面尺寸相同,内配型钢截面面积相等时,型钢强弱轴方向会影响构件受弯性能.图 14e 给出了型钢强弱轴方向对于内配型钢圆钢管混凝土构件受弯力学性能的影响.从图中可以看出,沿型钢不同强弱轴方向加载时,构件抗弯刚度变化不大,极限抗弯承载力则相差较大.在实际工程中,对于单向

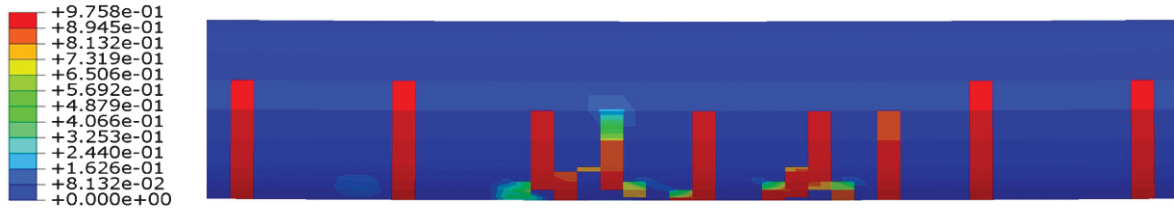


图 13 混凝土受拉损伤

Fig.13 Tensile-induced damage of concrete

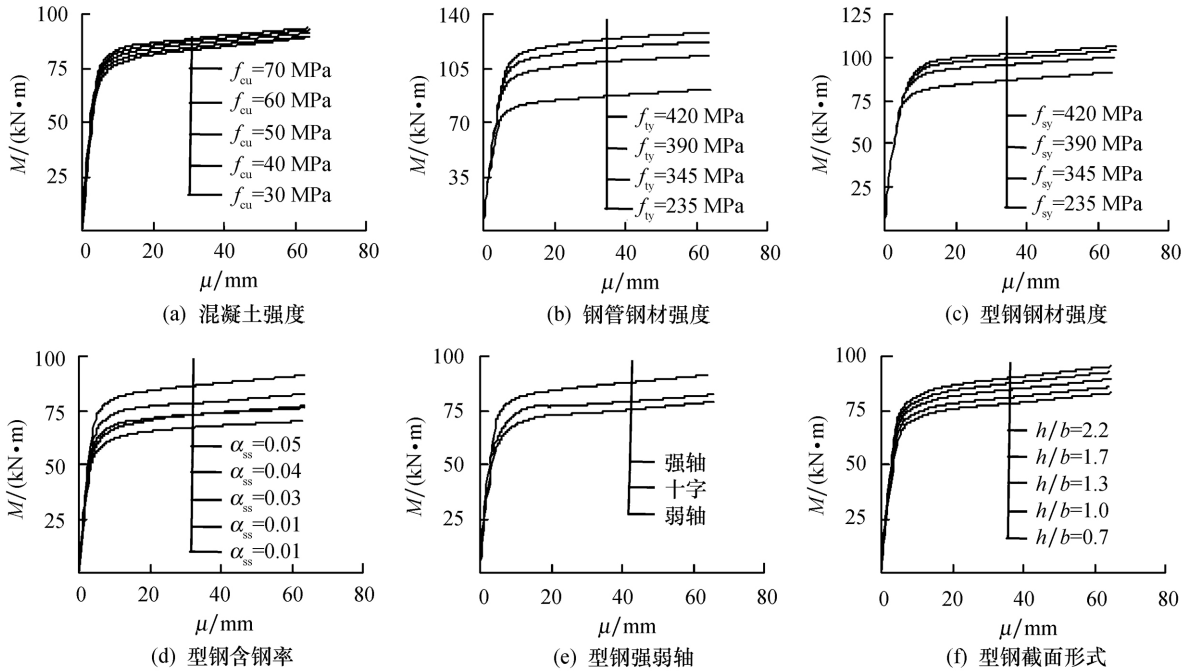


图 14 参数分析

Fig.14 Parameter analysis

受弯构件宜采用内配工字型型钢构件按型钢强轴受弯的方式承载,双向受弯构件则宜采用内配十字型型钢构件承载.

3.4 型钢截面形式的影响

整个构件截面尺寸相同,内配型钢截面面积相等时,型钢截面形式也会影响构件受弯性能.图 14f 给出了型钢截面形式对于内配型钢圆钢管混凝土构件受弯力学性能的影响.从图中可以看出,随着型钢腹板翼缘高宽比 h/b 分别从 0.73、1.00、1.33、1.75 依次增大到 2.29 时,构件的抗弯刚度变化不大,而极限抗弯承载力非线性增大.在实际工程中,型钢宜腹板高而翼缘窄.

4 承载力计算方法讨论

在现有研究中,对于内配型钢钢管混凝土构件承载力计算方法探究都是在型钢混凝土构件和钢管混凝土构件基础上进行的,目前国内还没有关于该

类构件的规范和计算公式可供实际工程参考应用.根据前述分析可知,当该类构件达到极限承载力时,钢管和型钢均屈服进入塑性阶段.考虑到截面塑性发展,引用 Eurocode4^[13] 中组合柱计算公式进行计算,公式如下:

$$M = W_{pa} \frac{f_y}{\gamma_a} + W_{ps} \frac{f_s}{\gamma_s} + \frac{1}{2} W_{pc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

式中: W_{pa} 、 W_{ps} 和 W_{pc} 分别是钢管、型钢和混凝土的塑性截面模量; f_y 和 f_s 分别是钢管和型钢钢材屈服强度; f_{ck} 为混凝土棱柱体抗压强度标准值; γ_a 、 γ_s 和 γ_c 分别为钢管、型钢和混凝土材料分项系数,本次将计算值与试验值进行对比,故取 1.0.

将现有试验结果进行整理后与上述 Eurocode4^[13] 中组合柱计算公式计算结果进行比较,见表 1.表中, M_{uc} 、 M_{uf} 和 M_{ue} 分别是计算得到的极限承载力、有限元模型得到的极限承载力及试验得到的极限承载力.

表 1 抗弯承载力对比

Tab.1 Comparison of flexural bearing capacity

试件	$M_{uc}/$ (kN·m)	$M_{uf}/$ (kN·m)	$M_{uc}/$ (kN·m)	$M_{uc} \cdot$ M_{uf}^{-1}	$M_{uc} \cdot$ M_{uf}^{-1}
HC1	108.48	100.90	106.40	1.08	1.02
HC2	119.05	118.30	131.50	1.01	0.91
CW1	120.25	118.52	118.80	1.01	1.01
CW2	133.26	130.90	129.90	1.02	1.03
CW3	147.78	149.90	158.20	0.99	0.93
CW4	123.73	120.36	118.20	1.03	1.05
CW5	134.75	133.65	137.90	1.01	0.98

注: HC1、HC2 数据来自文献[3], CW1、CW2、CW3、CW4、CW5 数据来自文献[6].

由于现有试验试件数量有限,因此通过建立有限元模型来验证公式,验证对比结果如图 15 所示.图中横轴为有限元模拟计算所得极限抗弯承载力,竖轴为上述公式计算所得极限抗弯承载力.

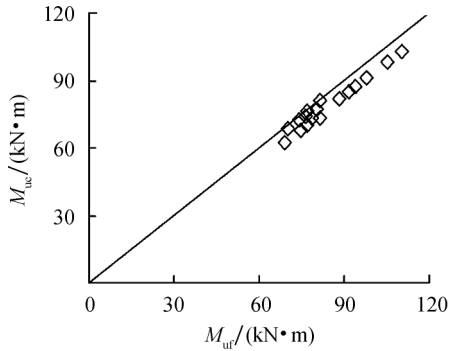


图 15 计算结果与模拟结果对比

Fig.15 Comparison of calculation result to simulation result

根据数理统计原理,认为上述计算结果服从正态分布,即 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$.利用样本观察值估计整体期望的方法可以得到,上述计算中 M_{uc}/M_{uf} 比值期望置信水平为 0.95 时的置信区间为 (0.985, 1.027).因此,上述计算公式可供工程参考运用.

5 结论

根据该类构件受力过程分析、影响参数分析和计算方法讨论,可以得出如下结论.

1) 内配型钢圆钢管混凝土典型受弯构件在承受弯矩荷载作用时,具有较好的承载能力和延性,受力过程可以分为 3 个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和

塑性阶段.

2) 在整个构件达到极限承载力之前,构件变形近似为正弦半波曲线.钢管承受了 3 者之中大部分荷载,混凝土由于受拉侧开裂抗弯刚度减小,达到极限承载力时迟于钢管和型钢.

3) 型钢本身截面惯性矩大小会影响构件承载力.沿强轴方向加载时,构件极限承载力远大于弱轴方向,型钢腹板翼缘高宽比越大,极限承载力越强.

4) Eurocode4^[13] 中组合柱计算方法可以参考运用到该类构件设计中.

参考文献:

[1] 张月,徐亚丰,武行.我国钢管混凝土组合结构在工程实践中的应用和发展 [C]//天津钢结构学会.第十六届全国现代结构工程学术研讨会.北京:《工业建筑》编辑部,2016.

[2] 史艳莉,陈彦玉,王文达.长期荷载作用下内置型钢钢管混凝土轴压短柱受力性能研究 [J].建筑科学,2016,32(9):61-68.

[3] 关萍,王清湘,吴寅.钢管-钢管高强混凝土组合构件抗弯承载力的计算 [J].工程建设与设计,2005(11):28-29.

[4] 刘晓,王连广,张晓范.钢管-钢管高强混凝土抗弯承载力理论研究 [J].东北大学学报,2007,28(8):1198-1201.

[5] 刘晓,王兵,王连广.钢管-钢管混凝土抗弯承载力计算方法 [J].工业建筑,2008,38(7):95-97.

[6] 刘晓,王连广,王兵.钢管-钢管高强混凝土抗弯构件试验研究 [J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(10):1651-1655.

[7] 赵同峰,王连广.方钢管-钢管高强混凝土抗弯承载力分析 [J].工业建筑,2008,38(3):27-30.

[8] 史艳莉,张海龙,王文达.内置十字型钢圆钢管混凝土构件受弯性能有限元分析 [J].建筑结构学报,2015,36(增刊 1):318-323.

[9] 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.

[10] 李兴国.内配型钢的钢管混凝土构件受弯性能研究 [D].兰州:兰州理工大学,2018.

[11] 王庆利,董志峰,高建志.圆截面钢管混凝土受弯构件试验研究 [J].四川建筑科学研究,2007,33(3):9-12.

[12] 吴颖星,于清.钢管约束高性能混凝土纯弯力学性能实验研究 [J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(增刊):276-279.

[13] European Committee for Standardization.Design of composite steel and concrete structures: Eurocode4: ENV 1994-1-1: 2004(E) [S].London, UK: European Committee for Standardization,1994:26-50.