

DOI: 10.15886/j.cnki.hdxzbk.2024012003

CSTR: 32403.14.hndk.2024012003

热带海岛工程



引用格式: 曾伟哲, 宁春珍, 曾翔. 圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合截面受弯承载力 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2025, 43(1): 41-49.

Citation: ZENG Weizhe, NING Chunzhen, ZENG Xiang. Flexural bearing capacity of circular aluminium-concrete-steel double skin tubular cross-sections[J]. Natural Science of Hainan University, 2025, 43(1): 41-49.

圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管 组合截面受弯承载力

曾伟哲, 宁春珍, 曾翔*

(海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

摘要: 为建立新型圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合构件(简称“ACSDST”)截面受弯承载力的准确计算方法, 以塑性应力分布方法(PSDM)为基础, 通过理论推导得到一组可精确考虑不同受力区域面积的截面受弯承载力计算公式。通过计算承载力与 168 根 ACSDST 构件的试验与有限元数据的对比分析表明, 公式计算值的平均相对误差不超过 5.5%, 该计算公式可以较好地对 ACSDST 组合截面的受弯承载力进行预测, 可为 ACSDST 组合构件的应用与设计提供依据。

关键词: ACSDST; 受弯承载力; 塑性应力分布法; 承载力计算

中图分类号: TU398+9

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2025)01-0041-09

Flexural bearing capacity of circular aluminium-concrete-steel double skin tubular cross-sections

ZENG Weizhe, NING Chunzhen, ZENG Xiang*

(School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In order to create a precise method for calculating the flexural bearing capacity of the new-type circular aluminium-concrete-steel double skin tubular (termed “ACSDST”), in the report, based on the plastic stress distribution method (PSDM), the theoretical derivation was performed to obtain a group of formulas for the flexural bearing capacity calculation, which can accurately account for the areas of different stress zones across the cross-section. A comparative analysis results of the obtained flexural bearing capacity of 168 ACSDST specimens and the finite element data demonstrated that the average error of the calculated values does not exceed 5.5%. Thus, these formulas can provide a good prediction for flexural bearing capacity of ACSDST sections, and which can provide the basis for their application and design.

Keywords: ACSDST; flexural bearing capacity; plastic stress distribution method; calculation of flexural bearing capacity

收稿日期: 2024-01-20

基金项目: 海南省自然科学基金项目(521RC504); 国家自然科学基金项目(52268024); 海南省研究生创新科研课题(Qhys2022-171)

作者简介: 曾伟哲(1997—), 男, 海南海口人, 海南大学土木工程专业 2021 级硕士研究生, E-mail: 875629332@qq.com

通信作者: 曾翔(1983—), 男, 湖南邵东人, 博士, 博士生导师, 教授, 研究方向: 新型组合结构, E-mail: zengxce@hainanu.edu.cn

0 引言

中空夹层钢管混凝土是由两根同心的钢管和中间的夹层混凝土组成的,这种组合结构既具有实心钢管混凝土的优点,比如强度高、延性好等等,还优化了传统钢管混凝土结构^[1],自重更轻,使其更适合大型建筑。但钢管耐腐蚀性差,造成结构耐久性差和维护成本高,因而采用耐腐蚀材料替代外钢管形成新型的中空夹层混凝土组合结构是提高结构的耐久性、降低维护成本且同时继承这种优异力学性能的重要途径之一。铝合金是一种广泛使用的建筑材料,具有自重轻,大约是同体积钢材重量的30%,强重比高,耐腐蚀性好,易成形等优点,且铝合金的强度能达到钢材的强度^[2]。铝合金-混凝土组合结构已经应用于桥梁等实际工程中^[3]。基于铝合金良好的耐腐蚀性,采用铝合金管替换中空夹层钢管混凝土的外钢管形成新型的中空夹层铝合金-混凝土-钢管组合构件,可提高结构的耐久性。

目前,国内外学者对钢管混凝土、铝合金管混凝土和中空夹层钢管混凝土的受压和受弯性能已有不少研究。Shafayat等^[4]为研究中空夹层铝管混凝土构件受弯承载力的影响因素,进行了相关的试验和数值模拟研究,并提出了其受弯承载力计算公式,但该公式对于受压区和受拉区面积计算的误差较大。曾翔等^[5]对圆实心铝合金管混凝土短柱的受压性能进行研究,提出了铝合金管混凝土的轴心受压抗压强度计算公式。陈宗平等^[6]对CFRP铝合金复合管海洋混凝土柱的轴压性能进行了研究。Wang等^[7]研究了现有的钢管混凝土承载力设计方法对铝管混凝土短柱的适用性。查晓雄等^[8]对3种金属管混凝土构件轴压力学性能进行研究,提出了铝管混凝土短柱轴压设计方法并验证其准确性。Gkantou等^[9]对由铝合金结构与一种低碳聚合物混凝土所构成的新型铝管混凝土的受弯和受压承载力进行了研究,并提出了相关的承载力设计方法。Qiao等^[10]对一种由内外钢管、核心混凝土和夹层混凝土组成的新型钢管混凝土的受压力学性能进行了研究。左勇^[11]对圆中空夹层钢管再生陶瓷混凝土压弯构件的力学性能进行了研究,并提出了设计建议。湛扬宇等^[12]对中空夹层圆钢管混凝土短柱在轴压状态下的力学性能进行研究,并提出了一种应力积分算法用于计算短柱构件的极限承载力。杨琥宇等^[13]对CFRP约束的圆铝合金管混凝土短柱的轴压力学性能进行研究,提出了轴压承载力计算公式并利用试验结果进行了对比验证。任子健^[14]对铝合金管混凝土桥墩抗震性能进行了研究。陈鼎等^[15]研究了不同长径比和径厚比对圆铝合金管-海水海砂混凝土柱轴压性能的影响。高子豪^[16]对矩形截面铝合金管混凝土短柱构件在轴压状态下的性能进行研究。Mi等^[17]对不同截面形状的铝合金圆管混凝土长柱的偏心受压性能进行了研究,并提出设计建议。目前,对圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合构件(下文简称“ACSDST”构件)的力学性能研究极少^[18]。

圆形截面构件在实际应用中常用作受压构件,但因为偏心、风荷载等因素的影响而存在受弯的情况,所以其正截面承载力由弯矩-轴力相互作用决定,其承载力设计表达式往往与截面轴心受压与受弯承载力有关^[9]。基于此,课题组开展了圆形截面中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合构件的弯曲试验及截面受弯承载力影响因素分析,并提出了其受弯承载力简化计算公式^[18],但其计算从逻辑上存在明显不足(见1.1节阐述)。目前,对圆形截面中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合构件受弯承载力计算的研究还不充分。本文在基于AISC^[20]中的塑性应力分布法(简称PSDM)的基础上,采用一种精确地计算截面不同受力区域面积的方法,用于预测ACSDST梁的截面受弯承载力。通过对文献[21]中关于实心钢管混凝土受弯截面的不同受力区域面积计算方法的进一步发展,建立了ACSDST梁的各受力区域截面面积计算方法,并介绍了结合PSDM方法计算承载力的具体算法,最后将该算法计算所得的承载力与文献[18]的试验数据和有限元模拟数据进行对比,验证了该方法的准确性。

1 ACSDST截面抗弯承载力计算方法

1.1 钢管混凝土受弯承载力常用计算方法分析 常用的圆实心钢管混凝土受弯承载力计算时,外钢管受压区面积计算的误差如图1所示。图1中左侧两扇形面积(阴影部分)相减获得外钢管受压区面积,从而产生图1中右侧图阴影部分所示的面积计算误差。ACSDST截面的钢管与铝合金管受拉及受压区和混凝土受压区的面积计算误差同理。文献[22]结合图1及PSDM方法推导实心钢管混凝土受弯承载力计算公式,其计算结果相对于试验结果的误差为-4%~20%之间。文献[21]取长条微元用定积分计算各受力区面积的方法(以外管受压区为例,如图2所示)可得到更准确的钢管混凝土截面受弯承载力计算值。

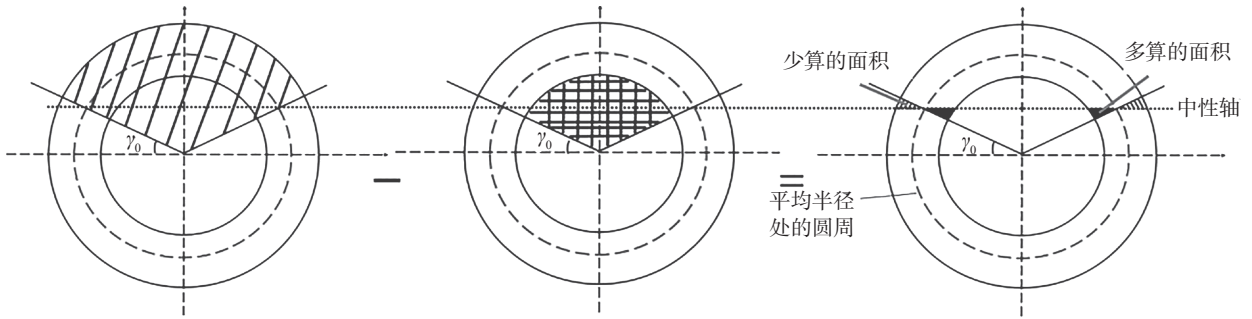


图 1 常用钢管混凝土外管受压区面积计算误差区域

圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合构件由同心的圆铝合金管、圆钢管及夹层混凝土 3 个环形构件构成,若参考图 1 所示方法进行各圆环受拉与受压区截面面积的计算,3 个圆环的面积计算误差叠加,会影响承载力计算结果的准确性。相比之下文献 [21] 的方法对圆环不同受力区面积的计算误差更小,因此本文参考文献 [21] 中的积分方法计算各受力区面积,并建立 ACSDST 截面受弯承载力计算公式。

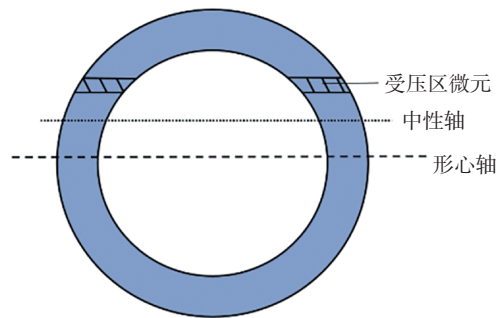


图 2 文献 [21] 外管受压区面积计算方法

1.2 基于 PSDM 的 ACSDST 截面受弯承载力计算 如图 3 所示, PSDM 假定截面达到受弯承载力时处于塑性,即钢管与铝管截面完全达到屈服,混凝土受压区完全达到其强度,不考虑混凝土拉应力。对于圆钢管混凝土,EC4 规范^[19]取混凝土强度为 f_c ,而 AISC 规范^[20]取混凝土强度为 $0.95f_c$ 。本文将在第 3 节对 2 种规范不同强度取值的计算结果进行比较,以评估其对计算结果的影响。

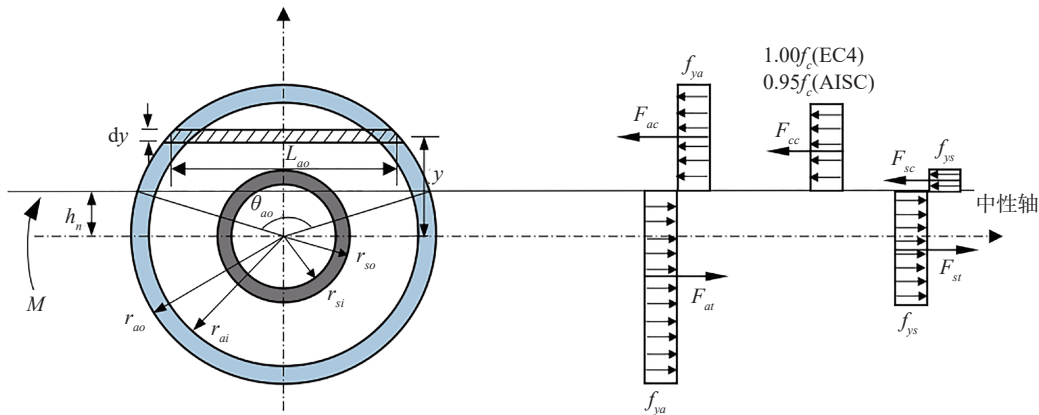


图 3 ACSDST 截面应力分布

图 3 中 f_c 为混凝土圆柱体抗压强度, f_{ya} 为铝合金的屈服强度, f_{ys} 为钢材的屈服强度, F_{ac} 、 F_{cc} 、 F_{sc} 分别为铝合金管、混凝土、钢管受压区压应力合力, F_{at} 、 F_{st} 分别为铝合金管、钢管受拉区拉应力合力, r_{ao} 为铝合金管外半径, r_{so} 为钢管外半径, r_{ai} 为铝合金管内半径, r_{si} 为钢管内半径, h_n 为中性轴到截面中线的距离, θ_{ao} 为铝合金管受压区所对应的扇形圆心角。

根据截面力的平衡,可得方程:

$$F_{cc} + F_{ac} + F_{sc} = F_{at} + F_{st} \quad (1)$$

根据截面弯矩的平衡,可得方程:

$$M_{u,prop} = M_{cc} + M_{ac} + M_{sc} + M_{at} + M_{st} \quad (2)$$

其中, M_{cc} 、 M_{ac} 和 M_{sc} 分别为混凝土、铝合金管和钢管受压区压应力的合力对截面形心的弯矩。 M_{at} 和

M_{st} 分别为铝合金管和钢管受拉区拉应力的合力对截面形心的弯矩。根据式(1),通过迭代分析可确定中和轴高度 h_n 的值,进而可算出式(2)中各部分的弯矩,从而得到截面抗弯承载力 $M_{u,prop}$ 。式(1)和式(2)中各项内力及 h_n 的求解计算方法见1.3节。

1.3 基于PSDM考虑受力区面积精确计算的ACSDST截面受弯承载力算法 结合受力区面积精确的积分算法(1.1节)与基于PSDM的ACSDST截面受弯承载力计算原理(1.2节),对ACSDST中各环形截面(铝管、混凝土及钢管)进行分析时,采用直径为环形截面外径的实心圆截面(以下称为总截面)分析结果减去直径为环形截面内径的实心圆截面(以下称为内芯截面)分析结果,从而得到环形截面的分析结果(以铝合金管受压区计算为例,如图4所示)。基于此,铝合金管、钢管和混凝土的各部分内力计算具体表达式分别如表1、表2和表3所示。

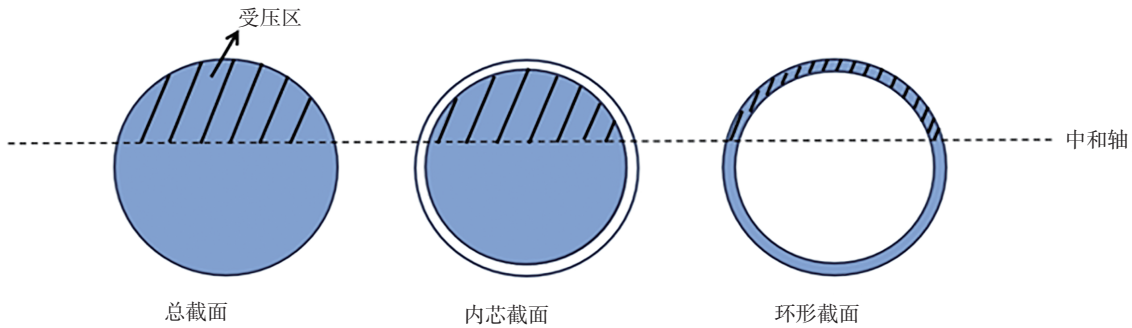


图4 铝合金管受压区计算示意图

表1 铝合金管受压与受拉区弯矩和合力计算表达式

受力区	总截面	内芯截面	环形截面
受压区	$F_{ac,total} = f_{ys} S_{ac,total}$ $M_{ac,total} = f_{ys} \int_{h_n}^{r_{ao}} y L_{ao} dy$	$F_{ac,inner} = f_{ys} S_{ac,inner}$ $M_{ac,inner} = f_{ys} \int_{h_n}^{r_{ai}} y L_{ai} dy$	$F_{ac} = F_{ac,total} - F_{ac,inner}$ $M_{ac} = M_{ac,total} - M_{ac,inner}$
受拉区	$F_{at,total} = f_{ys} (\pi r_{ao}^2 - S_{ac,total})$ $M_{at,total} = f_{ys} \int_{-r_{ao}}^{h_n} y L_{ao} dy$	$F_{at,inner} = f_{ys} (\pi r_{ai}^2 - S_{ac,inner})$ $M_{at,inner} = f_{ys} \int_{-r_{ai}}^{h_n} y L_{ai} dy$	$F_{at} = F_{at,total} - F_{at,inner}$ $M_{at} = M_{at,total} - M_{at,inner}$

表2 钢管受压与受拉区弯矩和合力计算表达式

受力区	总截面	内芯截面	环形截面
受压区	$F_{sc,total} = f_{ys} S_{sc,total}$ ($h_n r_{so}$ 时, $S_{sc,total} = 0$, 受拉区同理) $M_{sc,total} = f_{ys} \int_{h_n}^{r_{so}} y L_{so} dy$	$F_{sc,inner} = f_{ys} S_{sc,inner}$ ($h_n r_{si}$ 时, $S_{sc,inner} = 0$, 受拉区同理) $M_{sc,inner} = f_{ys} \int_{h_n}^{r_{si}} y L_{si} dy$	$F_{sc} = F_{sc,total} - F_{sc,inner}$ $M_{sc} = M_{sc,total} - M_{sc,inner}$
受拉区	(对于 $M_{sc,total}$, 当 $h_n r_{so}$ 时, $h_n = r_{so}$, 受拉区同理) $F_{st,total} = f_{ys} (\pi r_{so}^2 - S_{sc,total})$ $M_{st,total} = f_{ys} \int_{-r_{so}}^{h_n} y L_{so} dy$	(对于 $M_{sc,inner}$, 当 $h_n r_{si}$ 时, $h_n = r_{si}$, 受拉区同理) $F_{st,inner} = f_{ys} (\pi r_{si}^2 - S_{sc,inner})$ $M_{st,inner} = f_{ys} \int_{-r_{si}}^{h_n} y L_{si} dy$	$F_{st} = F_{st,total} - F_{st,inner}$ $M_{st} = M_{st,total} - M_{st,inner}$

表3 混凝土受压区弯矩和合力计算表达式

受力区	总截面	内芯截面	环形截面
受压区	$F_{cc,total} = f_c S_{cc,total}$ $M_{cc,total} = f_c \int_{h_n}^{r_{so}} y L_{so} dy$	$F_{cc,inner} = f_c S_{cc,inner}$ ($h_n r_{so}$ 时, $S_{cc,inner} = 0$) $M_{cc,inner} = f_c \int_{h_n}^{r_{so}} y L_{so} dy$ (对于 $M_{cc,inner}$, 当 $h_n r_{so}$ 时, $h_n = r_{so}$)	$F_{cc} = F_{cc,total} - F_{cc,inner}$ $M_{cc} = M_{cc,total} - M_{cc,inner}$

表1、表2和表3中, $L(L_{ao}$ 、 L_{ai} 、 L_{so} 及 L_{si})为计算各受力区面积时微元长度,采用式(3)~(6)计算。以铝合金管总截面受压区面积计算为例, L_{ao} 如图3所示。

$$L_{ao} = 2\sqrt{r_{ao}^2 - y^2} \tag{3}$$

$$L_{ai} = 2\sqrt{r_{ai}^2 - y^2} \tag{4}$$

$$L_{so} = 2\sqrt{r_{so}^2 - y^2} \quad (5)$$

$$L_{si} = 2\sqrt{r_{si}^2 - y^2} \quad (6)$$

表 1、表 2 和表 3 中, $S(S_{ac,total}、S_{ac,inner}、S_{cc,total}、S_{cc,inner}、S_{sc,total}$ 及 $S_{sc,inner}$) 为各受压区面积, 表达式如下:

$$S_{ac,total} = \frac{\theta_{ao} r_{ao}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{ao}^2 - h_n^2} \quad (7)$$

$$S_{ac,inner} = \frac{\theta_{ai} r_{ai}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{ai}^2 - h_n^2} \quad (8)$$

$$S_{cc,total} = S_{ac,inner} \quad (9)$$

$$S_{cc,inner} = S_{sc,total} \quad (10)$$

$$S_{sc,total} = \begin{cases} \frac{\theta_{so} r_{so}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{so}^2 - h_n^2} & (h_n \leq r_{so}) \\ 0 & (h_n > r_{so}) \end{cases} \quad (11)$$

$$S_{sc,inner} = \begin{cases} \frac{\theta_{si} r_{si}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{si}^2 - h_n^2} & (h_n \leq r_{si}) \\ 0 & (h_n > r_{si}) \end{cases} \quad (12)$$

式(7)~(12)中, $\theta(\theta_{ao}、\theta_{ai}、\theta_{so}$ 及 $\theta_{si})$ 为各受压区面积对应的圆心角。以铝合金管总截面受压区面积计算为例, θ_{ao} 如图 3 所示。各圆心角的表达式如下:

$$\theta_{ao} = 2 \arccos \frac{h_n}{r_{ao}} \quad (13)$$

$$\theta_{ai} = 2 \arccos \frac{h_n}{r_{ai}} \quad (14)$$

$$\theta_{so} = 2 \arccos \frac{h_n}{r_{so}} \quad (15)$$

$$\theta_{si} = 2 \arccos \frac{h_n}{r_{si}} \quad (16)$$

将式(3)~(16)代入表 1、表 2 和表 3 中相应公式, 得各部分合力与弯矩具体计算式如下:

混凝土受压区合力:

$$F_{cc} = \begin{cases} f_c \left[\frac{\theta_{ai} r_{ai}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{ai}^2 - h_n^2} - \left(\frac{\theta_{so} r_{so}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{so}^2 - h_n^2} \right) \right] & (0 \leq h_n \leq r_{so}) \\ f_c \left(\frac{\theta_{ai} r_{ai}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{ai}^2 - h_n^2} \right) & (r_{so} < h_n < r_{ai}) \end{cases} \quad (17)$$

铝合金管受压区合力:

$$F_{ac} = f_{ya} \left[\frac{\theta_{ao} r_{ao}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{ao}^2 - h_n^2} - \left(\frac{\theta_{ai} r_{ai}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{ai}^2 - h_n^2} \right) \right] \quad (18)$$

钢管受压区合力:

$$F_{sc} = \begin{cases} f_{ys} \left[\frac{\theta_{so} r_{so}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{so}^2 - h_n^2} - \left(\frac{\theta_{si} r_{si}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{si}^2 - h_n^2} \right) \right] & (0 \leq h_n \leq r_{si}) \\ f_{ys} \left(\frac{\theta_{so} r_{so}^2}{2} - h_n \sqrt{r_{so}^2 - h_n^2} \right) & (r_{si} < h_n < r_{so}) \\ 0 & (r_{so} < h_n < r_{ai}) \end{cases} \quad (19)$$

铝合金管受拉区合力:

$$F_{at} = f_{ya}(\pi r_{ao}^2 - \pi r_{ai}^2) - F_{ac} \quad (20)$$

钢管受拉区合力:

$$F_{st} = f_{ys}(\pi r_{so}^2 - \pi r_{si}^2) - F_{sc} \quad (21)$$

混凝土受压区弯矩:

$$M_{cc} = \begin{cases} \frac{2}{3}f_c \left[(r_{ai}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} - (r_{so}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} \right] & (0 \leq h_n \leq r_{so}) \\ \frac{2}{3}f_c (r_{ai}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} & (r_{so} < h_n < r_{ai}) \end{cases} \quad (22)$$

铝合金管受压区弯矩:

$$M_{ac} = \frac{2}{3}f_{ya} (r_{ao}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} - (r_{ai}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} \quad (23)$$

钢管受压区弯矩:

$$M_{sc} = \begin{cases} \frac{2}{3}f_{ys} \left[(r_{so}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} - (r_{si}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} \right] & (0 \leq h_n \leq r_{si}) \\ \frac{2}{3}f_{ys} (r_{so}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} & (r_{si} \leq h_n \leq r_{so}) \\ 0 & (r_{so} < h_n < r_{ai}) \end{cases} \quad (24)$$

铝合金管受拉区弯矩:

$$M_{at} = \frac{2}{3}f_{ya} \left[(r_{ao}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} - (r_{ai}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (25)$$

钢管受拉区弯矩:

$$M_{st} = \begin{cases} \frac{2}{3}f_{ys} \left[(r_{so}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} - (r_{si}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} \right] & (0 \leq h_n \leq r_{si}) \\ \frac{2}{3}f_{ys} (r_{so}^2 - h_n^2)^{\frac{3}{2}} & (r_{si} \leq h_n \leq r_{so}) \\ 0 & (r_{so} < h_n < r_{ai}) \end{cases} \quad (26)$$

将式(17)~(21)代入式(1)得到关于中和轴高度 h_n 的截面力平衡方程。通过编制迭代数值程序求解式(1),可得到 h_n 值,其计算流程如图5所示。图5中,选择不同规范的区别是其混凝土抗压强度不同,见2.1节所述。将求解的 h_n 值代入式(22)~(26)获得截面各部分对弯矩的贡献,最后求和式(2)可得截面受弯承载力 $M_{u,prop}$ 。

2 计算结果与讨论

参考钢管混凝土截面受弯承载力常用的两种定义^[23]:取截面极限受拉纤维应变为0.01时所对应的弯矩(M_{u1});取截面所能承受的最大弯矩(M_{max}),利用本文计算方法对ACSDST截面 M_{u1} 与 M_{max} 进行预测,并采用文献[18]中6个试验数据与162个有限元分析数据(参数范围如表4所示)对本文计算的截面受弯承载力的准确性进行评估。其中 f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。

表5给出了试验构件^[18]的具体参数,其中 D_o 、 t_o 、 D_i 和 t_i 分别为外管直径、外管厚度、内管直径和内管厚度。表6给出了分别基于AISC与EC4规范混凝土强度取值计算的截面受弯承载力 $M_{u,prop}$ 和试验数据 M_{u1} 、 M_{max} 的比较。 $M_{u,prop}/M_{u1}$ 在0.97~1.09之间,其均值为1.032,平均误差为3.2%。 $M_{u,prop}/M_{max}$ 在

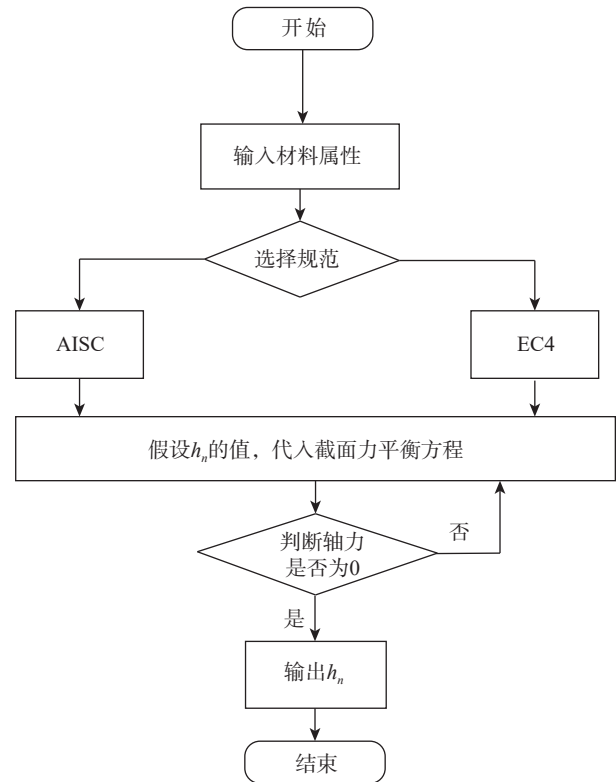


图5 中性轴位置 h_n 计算流程

0.91 ~ 0.98 之间, 均值为 0.95, 平均误差为 5%。由此可见, 该方法得出的计算结果与试验值很接近, 因此该公式的预测值具有可靠性。

表 4 试验和有限元模拟构件参数表

材料	强度/MPa	外径/mm	径厚比
铝合金管	f_{ya} : 213、244	160 ~ 332	20 ~ 120
混凝土	f_{cu} : 30 ~ 70.2	—	—
钢管	f_{ys} : 235 ~ 355	36 ~ 234	25 ~ 73

表 5 试验试件参数^[18]

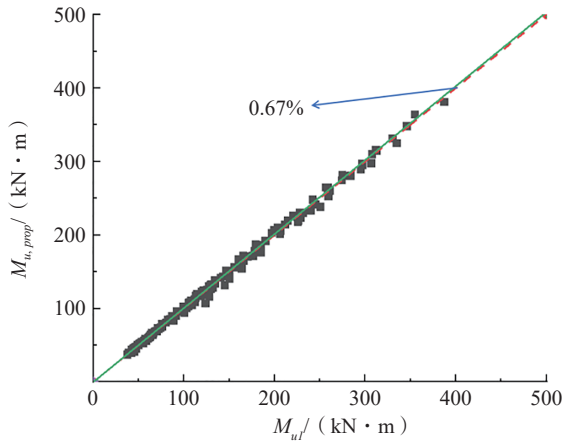
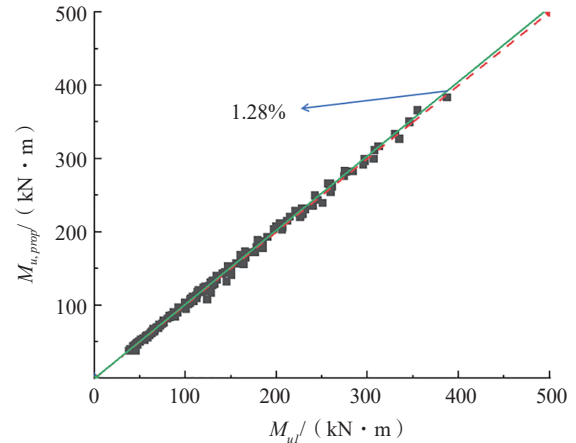
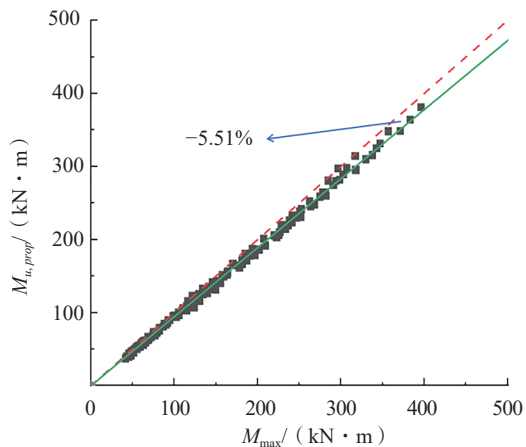
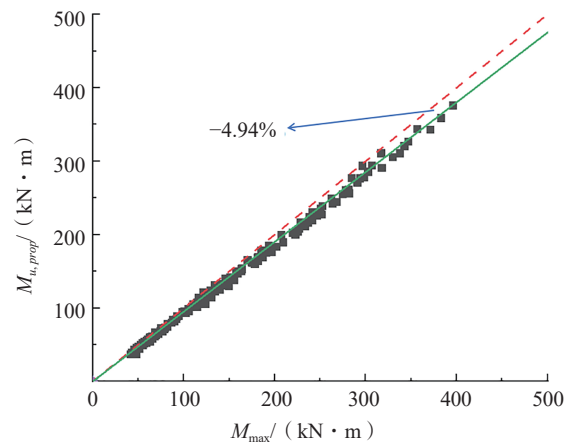
试件编号	外管外径×壁厚/ (mm×mm)	f_{ya} /MPa	内管外径×壁厚/ (mm×mm)	f_{ya} /MPa	f_{cu} /MPa
B-A240×5-S76×3	239.7×4.88	213	74.7×2.61	328	70.2
B-A240×5-S114×3	239.7×4.88	213	113.4×2.77	284	70.2
B-A240×5-S165×3	239.7×4.88	213	164.5×3.17	310	70.2
B-A332×6-S76×3	332.5×5.78	244	74.7×2.61	328	70.2
B-A332×6-S165×3	332.5×5.78	244	164.5×3.17	310	70.2
B-A332×6-S219×3	332.5×5.78	244	218.4×3.17	341	70.2

表 6 试验数据和 $M_{u,prop}$ 的对比分析

试件编号	M_{u1} /(kN·m)	M_{max} /(kN·m)	$M_{u,prop}$ /(kN·m)		$M_{u,prop}/M_{u1}$		$M_{u,prop}/M_{max}$	
			EC4	AISC	EC4	AISC	EC4	AISC
B-A240×5-S76×3	79.8	92.2	86.9	85.1	1.09	1.07	0.94	0.92
B-A240×5-S114×3	89.5	94.3	91.5	89.5	1.02	1.00	0.97	0.95
B-A240×5-S165×3	107.9	109.5	106.4	104.8	0.99	0.97	0.97	0.96
B-A332×6-S76×3	206.1	229.6	214.2	209.7	1.04	1.02	0.93	0.91
B-A332×6-S165×3	230.3	252.1	240.4	235.0	1.04	1.02	0.95	0.93
B-A332×6-S219×3	244.8	269.5	262.9	258.2	1.07	1.05	0.98	0.96

图 6 与图 7 给出了分别基于 AISC 与 EC4 规范混凝土强度取值计算的截面受弯承载力 $M_{u,prop}$ 与试验及有限元分析承载力 M_{u1} 比较。采用 AISC 规范混凝土强度 ($0.95f_c$) 计算时, $M_{u,prop}/M_{u1}$ 在 0.87 ~ 1.06 之间, 其均值为 1.007, 平均误差为 0.67%, 方差为 0.000 9。采用 EC4 规范混凝土强度 (f_c) 计算时, $M_{u,prop}/M_{u1}$ 在 0.86 ~ 1.07 之间, 其均值为 1.012, 均值平均误差为 1.28%, 方差为 0.001 1。由此可见, 采用两种不同规范的混凝土强度取值对本文方法计算的结果影响很小, 且对截面受弯承载力 M_{u1} 计算结果较准确, 离散性较小。文献 [18] 的简化计算公式对 M_{u1} 的计算平均误差为 -8.6%。相比于文献 [18], 本文计算公式对 M_{u1} 的预测误差更小。

图 8 与图 9 给出了基于 AISC 与 EC4 规范混凝土强度取值计算的截面受弯承载力 $M_{u,prop}$ 与试验及有限元分析承载力 M_{max} 的比较。采用 AISC 规范混凝土强度计算时, $M_{u,prop}/M_{max}$ 在 0.87 ~ 1.01 之间, 其均值为 0.945, 均值与试验模拟值误差为 -5.51%, 方差为 0.000 6。采用 EC4 规范混凝土强度计算时, $M_{u,prop}/M_{max}$ 在 0.80 ~ 1.02 之间, 其均值为 0.951, 均值与试验模拟值误差为 -4.94%, 比值的方差为 0.000 8。同上, 采用两种不同规范的混凝土强度取值对本文方法计算的结果影响很小, 且对截面受弯承载力 M_{max} 的预测总体上均偏保守, 预测值平均比试验及有限元结果低约 5%, 计算结果离散性较小。文献 [18] 的简化计算方法对 M_{max} 的计算平均误差为 4.7%。本文计算公式与文献 [18] 计算公式对 M_{max} 的预测误差接近。

图6 基于 AISC 规范计算结果与 M_{u1} 比较图7 基于 EC4 规范计算结果与 M_{u1} 比较图8 基于 AISC 规范计算结果与 M_{max} 比较图9 基于 EC4 规范计算结果与 M_{max} 比较

3 结论

(1) AISC 规范与 EC4 规范的不同混凝土强度取值对 ACSDST 截面受弯承载力计算结果的影响可忽略。

(2) 本文计算方法对 M_{u1} 的预测结果总体上略微偏大, 预测值比试验值和模拟值高出约 0.98%。而对 M_{max} 的预测结果总体上略微偏保守, 预测值低于试验值和模拟值约 5%。

(3) 本文提出的受弯承载力计算方法对 M_{u1} 与 M_{max} 预测结果具有较小的离散性, 方差不超过 0.001 1, 且计算误差较小, 最大平均误差绝对值不超过 5.51%, 可用于 M_{u1} 或 M_{max} 定义的截面受弯承载力的计算或截面设计中。

(4) 本文受弯承载力计算方法对 M_{u1} 的预测结果比现有圆 ACSDST 截面受弯承载力计算公式的预测结果更准确性, 但两者对 M_{max} 预测结果的准确性基本相当。

参考文献:

- [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] 李振宇, 王衬心, 李进军, 等. 7A04 铝合金圆管构件轴压稳定性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(10): 1036–1044.
- [3] 胡涛, 曾翔, 刘红波, 等. 铝合金-混凝土组合结构研究综述[J]. 混凝土, 2020(4): 5–8.
- [4] BIN ALI S, KAMARIS G S, GKANTOU M. Flexural behaviour of concrete-filled double skin aluminium alloy tubes[J]. Engineering Structures, 2022, 272: 114972.
- [5] 曾翔, 吴晚博, 霍静思, 等. 圆铝合金管混凝土短柱轴心受压承载力研究[J]. 工程力学, 2021, 38(2): 52–60.

- [6] 陈宗平, 徐炜圣, 周济. CFRP 铝合金复合管海洋混凝土柱轴压性能试验及承载力计算 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(6): 25-37.
- [7] WANG F C, ZHAO H Y, HAN L H. Analytical behavior of concrete-filled aluminum tubular stub columns under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 140: 21-30.
- [8] 查晓雄, 宫永丽. 新型金属管混凝土柱力学性能研究 I: 轴压短柱强度承载力的研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2012, 14(3): 12-18, 35.
- [9] GKANTOU M, GEORGANTZIA E, KADHIM A, et al. Geopolymer concrete-filled aluminium alloy tubular cross-sections[J]. *Structures*, 2023, 51: 528-543.
- [10] QIAO Q Y, PENG J, CAO W L, et al. Behavior of concrete-filled double steel tube stub columns under partial compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 214: 108451.
- [11] 左勇. 圆中空夹层钢管再生陶瓷混凝土压弯构件力学性能研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
- [12] 谌扬宇, 宁寄慧, 张永鑫, 等. 中空夹层圆钢管混凝土短柱的压弯承载力计算法 [J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(12): 85-93.
- [13] 杨琥宇, 蒋华. CFRP 约束铝合金圆管混凝土短柱轴压性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊 2): 1362-1368.
- [14] 任子健. 铝合金管混凝土桥墩抗震性能研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [15] 陈鼎, 曲慧, 李伟, 等. 圆铝合金管-海水海砂混凝土柱的轴压力学性能 [J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2022, 35(4): 467-475.
- [16] 高子豪. 矩形铝合金管混凝土短柱轴压性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
- [17] MI Q X, SHU Q J, WANG F Y, et al. Experimental study on eccentric compressive behaviors of 6061-T6 aluminum tubular long columns filled with concrete[J]. *Engineering Structures*, 2024, 299: 117040.
- [18] ZENG X, NING C Z, ZENG W Z, et al. Numerical and experimental studies on bending behavior of circular aluminium-concrete-steel double skin tubular cross-sections and bending capacity design approach[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 91: 109524.
- [19] European Committee. Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings: EN 1994—1—1: 2004[S]. Brussels: [s. n.], 2004.
- [20] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360—10[S]. Chicago: [s. n.], 2010.
- [21] LEE M, KANG T H K. Flexural strength of circular concrete-filled tubes[J]. *Advances in Computational Design*, 2016, 1(4): 297-313.
- [22] ELCHALAKANI M, ZHAO X L, GRZEBIETA R H. Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57(11): 1141-1168.
- [23] GUNAWARDENA Y K R, ASLANI F, UY B, et al. Review of strength behaviour of circular concrete filled steel tubes under monotonic pure bending[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 158: 460-474.

(责任编辑: 陈 俊)