

DOI:10.11918/202407006

圆铝合金管混凝土短柱轴压力学性能 与承载力计算模型研究

闫仕朝^{1,2}, 方勇^{1,2,3}, 杨华^{1,2}, 郭兰慧^{1,2}, 耿悦^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090;

2. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;

3. 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室, 南宁 530004)

摘要:为明晰铝合金管混凝土的工作机理,验证并提升圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算模型的可靠性,本文对现有圆铝合金管混凝土的短柱轴压试验进行了统计和分析,建立了试验数据库。在此基础上进一步分析了其短柱轴压力学性能,验证了现有5种典型承载力计算模型的适用性,并提出了更为准确的短柱轴压承载力计算模型。研究结果表明:现有研究的部分参数已超出“组合结构”的研究范畴,在相应分析中应予以单独考虑;相比于同条件的钢管混凝土,铝合金管混凝土的界限约束效应系数更高,初步可取为1.75;本文所列举的5种典型计算模型均可较好地预测圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力,但所收集试件中仍有5.6%~32.4%的承载力预测偏差超过20%,且主要集中于低约束效应系数($\xi < 1.0$)范围内;本文所提出的承载力计算模型对所收集试件的承载力预测偏差大于20%的占比低于3%。

关键词:组合结构;铝合金管混凝土;轴压短柱;工作机理;承载力计算模型

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)01-0161-10

Research on mechanical properties and bearing capacity calculation models of concrete-filled circular aluminum alloy tubular stub columns under axial compression

YAN Shichao^{1,2}, FANG Yong^{1,2,3}, YANG Hua^{1,2}, GUO Lanhui^{1,2}, GENG Yue^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology),

Ministry of Education, Harbin 150090, China; 3. State Key Laboratory of Featured

Metal Materials and Life-cycle Safety for Composite Structure, Nanning 530004, China)

Abstract: This study aims to clarify the working mechanism of concrete-filled circular aluminum alloy tubular columns and verify/improve the reliability of the bearing capacity calculation models. The available experimental tests for concrete-filled circular aluminum alloy tubular stub columns under axial compression were collected and analyzed in this paper, with the experimental database established. The mechanical properties of the concrete-filled circular aluminum alloy tubular stub columns under axial compression were further investigated, and the applicability of the existing five typical bearing capacity calculation models was evaluated. A new calculation model with higher accuracy for predicting the compressive bearing capacity of concrete-filled circular aluminum alloy tubular stub columns was proposed. The investigated results indicate that some of the test variables of the existing studies may be beyond the scope of “steel-concrete composite structures”, which should be analyzed individually. The boundary confinement factor of concrete-filled circular aluminum alloy tubular columns is higher than that of conventional concrete-filled circular steel tubular columns under the same condition which can be taken as 1.75, approximately. The five typical existing calculation models can be used to provide an approximate prediction of the compressive bearing capacity of concrete-filled circular aluminum alloy tubular stub columns. However, there are still 5.6% to 32.4% of the collected specimens with predicted deviations exceeding 20%, which are mainly concentrated in the range of lower confinement factors ($\xi < 1.0$). The proportion of the collected test specimens with deviations beyond 20% in the compressive bearing capacity predicted by the proposed calculation model in this

收稿日期: 2024-07-01; 录用日期: 2024-08-12; 网络首发日期: 2025-09-16

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250916.1346.002>

基金项目: 广西科技重大专项(桂科AA23073017); 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室开放课题(MMCS2023OF12)

作者简介: 闫仕朝(2000—), 男, 硕士研究生; 杨华(1976—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 方勇, fangyong@hit.edu.cn

paper is less than 3%.

Keywords: composite structures; concrete-filled aluminum alloy tubular columns; axial compression of stub columns; working mechanism; calculation modes of bearing capacity

钢管混凝土 (concrete-filled steel tube, CFST) 因其优越的力学性能已在工业厂房、高层建筑、桥梁工程、海洋工程等领域得到广泛应用^[1]。然而, 外露钢管在潮湿空气、酸性土壤、沿海区域等复杂环境下的腐蚀问题愈发严峻。20 世纪以来, 铝合金材料因轻质高强、耐腐蚀性良好、资源储备丰富、易回收等特点受到广泛关注^[2]。将传统钢管混凝土中的外钢管替换为铝合金管形成的铝合金管混凝土, 可有效解决钢管混凝土中外露钢管的腐蚀问题, 在复杂腐蚀环境下具有一定的应用前景。然而, 铝合金材料的弹性模量约为钢材的 1/3, 其结构刚度较低, 稳定性较差, 相同侧向膨胀下铝合金管提供的环向约束应力相对更小, 使其与核心混凝土的组合作用机理与传统钢管存在区别。

如图 1 所示, 铝合金管混凝土柱截面类型主要为圆形、方形和矩形。其中, 圆形截面柱中的核心混凝土受到均匀的侧向约束应力, 而非圆形截面柱的核心混凝土受到的侧向约束应力存在显著的非均匀性, 其由角部向中心逐渐衰减^[1]。因此, 从受力性能角度出发, 圆铝合金管混凝土柱的截面形式最为合理, 其对混凝土的约束效果最为显著。

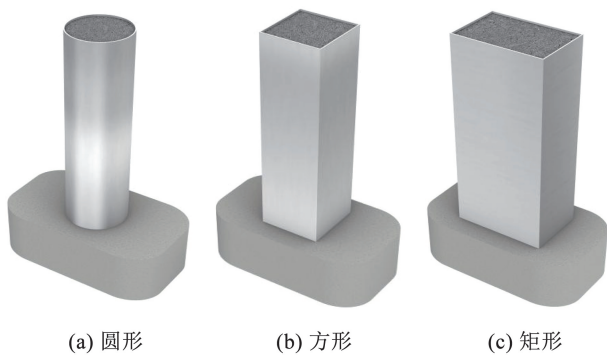


图 1 铝合金管混凝土柱常见截面类型

Fig. 1 Normal cross-sections of CFATs

目前, 国内外学者已对铝合金管混凝土的基本力学性能进行了试验研究和理论分析, 并取得了较为丰富的研究成果。国外学者 Kadhim 等^[3]、Resan^[4]、Georgantzia 等^[5]、Ali 等^[6]、Fayed 等^[7]对圆形、方形铝合金管混凝土柱进行了轴压、偏压试验及有限元分析, 得到了铝合金管混凝土的破坏模式、荷载-位移曲线和铝合金管的应力发展规律, 提出了其截面承载力以及构件稳定承载力计算方法。在国内, 周锋等^[8-25]多位学者对铝合金管混凝土的轴压和偏压力学性能进行了大量研究, 研究参数包括

含铝率、截面形状、长细比、铝合金类别、混凝土强度等, 并基于“极限平衡理论”、“统一理论”、“叠加理论”等适用于钢管混凝土的相关理论^[1]提出了铝合金管混凝土的短柱轴压承载力计算模型。此外, 陈宗平等^[26]、龚文志等^[27]、张纪刚等^[28]对铝合金管混凝土的纯弯力学性能与压-弯滞回性能也开展了初探性研究。

针对铝合金管混凝土柱的研究表明^[8-9]: 铝合金管与混凝土有较好的匹配性, 通过合理设计, 二者组合后可实现“1 + 1 > 2”的组合效果。然而, 现有针对铝合金管混凝土的相关研究尚处在起步阶段, 主要集中在轴压、偏压等基本静力性能, 而针对铝合金管混凝土的承载力计算公式主要集中于轴压短柱。事实上, 现有针对铝合金管混凝土柱的试验参数范围较广, 部分试件的含铝率 $\alpha > 30\%$, 已超出“组合结构”的研究范畴^[1], 在相应分析中应予以单独考虑, 且不同学者提出的承载力计算模型差异较大, 其适用性有待进一步验证和分析。

鉴于圆形截面铝合金管混凝土受力的合理性以及试验样本的充足性, 本文以圆铝合金管混凝土柱为研究对象, 聚焦于其短柱轴压力学性能和相应的承载力计算模型, 收集并整理针对圆铝合金管混凝土的已有研究成果, 建立了圆铝合金管混凝土的短柱轴压试验数据库; 分析了现有试验的参数范围、铝合金管混凝土短柱的典型破坏模式以及工作机理; 总结了现有针对圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力计算模型; 采用所建立的试验数据库对各计算模型进行了验证与分析, 并提出了准确度更高的承载力计算模型。本文研究成果可为圆铝合金管混凝土的进一步研究、分析与设计提供参考。

1 圆铝合金管混凝土短柱轴压性能试验研究

1.1 圆铝合金管混凝土短柱轴压试件汇总

本文共统计了 129 个圆铝合金管混凝土短柱轴压试件 (表 1), 具体参数如下: 铝合金管厚度 (t) 范围为 2.0 ~ 12.0 mm; 试件外径 (D) 范围为 38.0 ~ 180.5 mm; 径厚比 (D/t) 范围为 6.8 ~ 59.3; 长径比 (L/D) 范围为 2.5 ~ 4.0; 含铝率 (α) 范围为 7% ~ 59%; 混凝土强度等级为 C25 ~ C100。

如图 2(a) 所示, 已统计的圆铝合金管混凝土短柱轴压试件按径厚比范围可分为 3 类: 40 ~ 60、20 ~

40、1~20, 对应含铝率分别为 $\alpha < 10\%$ 、 $10\% < \alpha < 20\%$ 、 $\alpha > 20\%$, 3 类试件数量占比分别为 32%、33%、35%。通常, 钢管混凝土的含钢率范围为 5%~20%^[1]; 然而, 已统计的圆铝合金管混凝土试件中含铝率 $\alpha > 20\%$ 的占比超过 30%, 这主要是因为铝合金管的弹性模量相对较低(约为钢材的

1/3), 为避免其出现稳定问题, 工厂生产的铝合金管壁厚往往较大, 最终导致已开展的铝合金管混凝土试件的含铝率较高。考虑到铝合金管的密度和弹性模量均较小, 本文暂定铝合金管混凝土的含铝率上限为 25%。因此, 在后文分析中, 剔除了含铝率 $\alpha > 25\%$ 的试件。

表 1 试件汇总表

Tab. 1 Summary of the specimens

数据来源	试件数量	试件直径 D/mm	铝合金管壁厚 t/mm	径厚比 D/t	长径比 L/D	含铝率 α	铝合金屈服强度 f_y/MPa	混凝土强度		试件承载力 $N_{u,\text{test}}/\text{kN}$
								f'_c/MPa	f_{co}/MPa	
Zhou 等 ^[8] (2009)	31	38.0~180.5	2.0~5.0	9.7~59.3	3.0	0.07~0.41	216.9~264.9	44.8~106.0	43.1~102.0	158.9~3 139.2
徐孟暉等 ^[14] (2009)	22	38.0~102.0	3.0~12.0	6.8~34.0	3.0	0.12~0.59	157.0~365.0	32.8~57.8	31.5~55.6	139.7~1 594.5
官永丽等 ^[11] (2011)	6	100.0~120.0	2.0~4.0	30.0~50.0	3.0	0.08~0.13	170.8~188.8	39.7	38.6	443.6~829.7
Kadhim 等 ^[3] (2012)	8	38.0~100.0	3.0~4.4	11.9~22.7	3.0~4.0	0.18~0.34	241.4~254.8	24.1	23.2	145.8~566.7
吴鹏等 ^[15] (2018)	3	160.0	3.0	53.3	3.8	0.08	110.0	29.5~31.9	28.3~30.7	1 040.4~1 082.4
武健锋等 ^[16] (2019)	2	120.2	3.0~5.0	24.0~40.0	2.5	0.10~0.17	209.4~231.3	28.5	27.4	679.9~792.8
胡涛等 ^[19] (2019)	10	100.0~140.0	3.3~8.0	12.8~33.6	3.0	0.12~0.31	72.5~230.5	21.7~44.5	23.4~39.4	455.0~1 490.0
昌魏等 ^[29] (2020)	3	160.0	3.0	53.3	3.8	0.08	265.8	49.0	47.1	1 400.1~1 500.0
刘玉强等 ^[30] (2020)	5	150.0~180.0	3.0~10.0	15.0~30.0	3.0	0.08~0.27	251.1~284.6	36.0~41.3	34.7~39.7	1 930.0~3 132.0
王炜等 ^[17] (2021)	6	160.0	3.0~10.0	16.0~53.3	3.0	0.08~0.25	244.6~252.1	32.2	31.0	1 259.7~2 438.3
陈宗平等 ^[12] (2022)	3	150.0	3.0	50.0	4.0	0.08	190.0	39.1	33.2	2 438.3
王兰等 ^[31] (2023)	2	150.0	5.3~5.6	28.5~26.9	3.0	0.14~0.15	214.0	70.4	64.4	2 000.5~2 030.1
Gao 等 ^[32] (2023)	4	130.0	5.0~10.0	13.0~26.0	3.0	0.15~0.31	269.0	26.3~38.4	24.9~36.5	1 146.7~1 822.9
He 等 ^[33] (2024)	9	150.0	3.0~7.0	21.4~50.0	4.0	0.08~0.19	184.0	17.7~33.6	20.7~39.1	808.5~1 641.0
Yan 等 ^[23] (2024)	9	130.0~150.0	3.2~5.0	30.0~46.9	3.0	0.09~0.13	105.0~129.0	34.6~67.9	33.3~65.3	812.0~1 508.0
Jiang 等 ^[18] (2024)	6	160.0	3.0~10.0	16.0~53.3	3.0	0.08~0.25	240.7~253.8	33.9	32.6	1 226.7~2 460.1

由于不同学者进行研究时采用了不同的混凝土强度指标, 为便于对比分析, 本文对所收集试件的混

凝土强度指标进行了换算统一(详见 3.1 节)。如图 2(b)所示, 经过强度换算后, 已有针对圆铝合金

管混凝土短柱轴压试件的混凝土棱柱体抗压强度 (f_{co}) 范围主要集中在 20 ~ 50 MPa, 该区间的试件数量占收集试件总数的 71.3%, 说明现有针对圆铝合金管混凝土的研究主要采用的是普通强度混凝土 (C60 等级以下)。考虑到高强混凝土脆性显著, 其

与铝合金管的组合作用受其侧向膨胀程度与峰值后延性的影响, 应单独对其进行分析和讨论。因此, 下文分析中去掉了混凝土强度等级在 C60 及以上 ($f_{co} \geq 47.0$ MPa) 的试件。

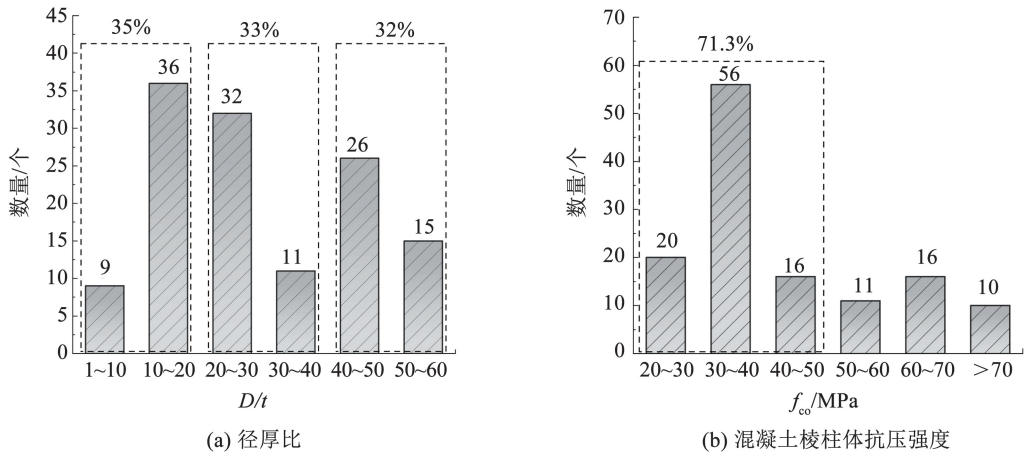


图 2 不同径厚比和混凝土强度下的试件数量

Fig. 2 Number of the specimens under different D/t and f_{co}

1.2 铝合金管基本情况

目前市场上的铝合金材料根据对应牌号可分为 8 个类型, 依次分别为 $1 \times \times \times \sim 8 \times \times \times$ 。其中 $6 \times \times \times$ 系列主要的合金元素为镁 (Mg) 和硅 (Si), 其力学性能、抗腐蚀性能、可塑性能及可焊性能均较为突出, 以 6061-T6 为代表的铝合金强度接近于 Q235 钢材, 在建筑结构领域中应用广泛。

本文所建立的试验数据库主要涉及 6061、6063 两种牌号的铝合金, 试件材料的屈服强度 (f_y) 与抗拉强度 (f_u) 范围分别为 72.5 ~ 365.0 MPa、118.0 ~ 450.0 MPa、弹性模量 (E) 范围为 55.5 ~ 92.5 GPa、断后伸长率为 5.0% ~ 19.5%。

1.3 圆铝合金管混凝土短柱典型破坏模式

圆铝合金管混凝土短柱轴压试验的加载与测量装置与传统的钢管混凝土一致^[10-11], 不同的是, 试验中需注意避免铝合金管混凝土在端部提前破坏。如果铝合金管端部与端板采用焊接连接, 考虑到焊接热影响带来的强度削弱, 端部可采用 FRP 加强或者抱箍加强; 如果采用非焊接连接, 可采用带端板的保护钢套或环氧树脂粘接^[11]。

与钢管混凝土相近, 圆铝合金管混凝土短柱通常有两种破坏模式: 腰鼓破坏和剪切破坏, 且主要取决于铝合金管对核心混凝土的侧向约束应力大小。在钢管混凝土短柱中, 此侧向约束力大小可用约束效应系数表示^[1]。刘玉强等^[30]针对铝合金管混凝土短柱轴压力学性能的研究发现: 当约束效应系数

$\xi > 1.22$ 时 (计算方法同钢管混凝土), 试件呈腰鼓破坏; 当 $\xi \leq 1.22$ 时, 试件呈剪切破坏, 即可认为圆铝合金管混凝土的界限约束效应系数为 1.22。而胡涛等^[19]的试验结果表明: 圆铝合金管混凝土的界限约束效应系数约为 1.5。可见, 由于铝合金管弹性模量较低, 相同条件下其对混凝土的约束效应相比传统钢管更低, 使得铝合金管混凝土的界限约束效应系数理论上大于传统钢管混凝土的界限约束效应系数 (钢管混凝土的界限约束效应系数通常取 1.12^[1])。

基于所建立的试验数据库, 对破坏模式明确的试件按照约束效应系数和破坏模式进行统计分类。如图 3 所示, $\xi > 1.92$ 时, 试件均发生腰鼓破坏; $\xi < 1.57$ 时, 试件均发生剪切破坏; 当约束效应系数在 1.57 ~ 1.92 范围内, 两种破坏模式均有出现, 可初步推断界限约束效应系数在此范围内, 本文初步取 1.57 ~ 1.92 范围的均值 1.75 作为界限约束效应系数。当取二者均值 1.75 作为界限约束效应系数时, 约束效应系数小于 1.75, 但破坏模式为腰鼓破坏的试件数量为 1, 占试件总数的 2%; 约束效应系数大于 1.75, 但破坏模式为剪切破坏的试件数量为 2, 占试件总数的 4%; 因此, 取该值时引起的误差相对较小, 可初步作为铝合金管混凝土短柱破坏模式的判定依据。事实上, 除了约束效应系数外, 铝合金管混凝土短柱的破坏模式还与混凝土强度、铝合金管材料性能等相关, 后续研究将进一步细化其破坏模式的判定准则, 优化其界限约束效应系数的取值。

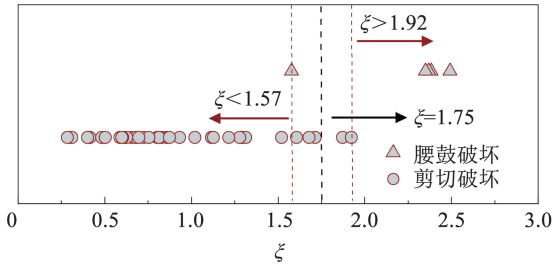


图 3 试件破坏模式与约束效应系数的关系

Fig. 3 Relationship between the failure mode and confinement factor of the specimens

1.4 圆铝合金管混凝土的工作机理

圆铝合金管混凝土短柱的轴压承载能力主要取决于两点:材料强度和铝合金管与核心混凝土之间的相互作用。如图 4(a)所示,铝合金管对核心混凝土

提供侧向约束应力使其处于三向受力状态,避免或减少了核心混凝土纵向裂缝的产生和发展;同时,核心混凝土对铝合金管提供的支撑作用也延缓或避免了铝合金管向内屈曲。

然而,由于工程常用铝合金材料的弹性模量约为钢材的 1/3,使得在相同的侧向膨胀下,铝合金管对核心混凝土的约束作用小于普通钢管。中南大学丁发兴等^[34]在对有限元模型进行充分验证的基础上,保证核心混凝土与外金属管强度相同的前提下,对比了钢管和铝合金管对核心混凝土的约束作用。如图 4(b)~(c)所示,在极限状态下铝合金管混凝土短柱和钢管混凝土短柱的约束效应均发生在整个截面,但钢管混凝土截面高应力范围要大于铝合金管混凝土,即钢管对核心混凝土的约束作用相对更强。

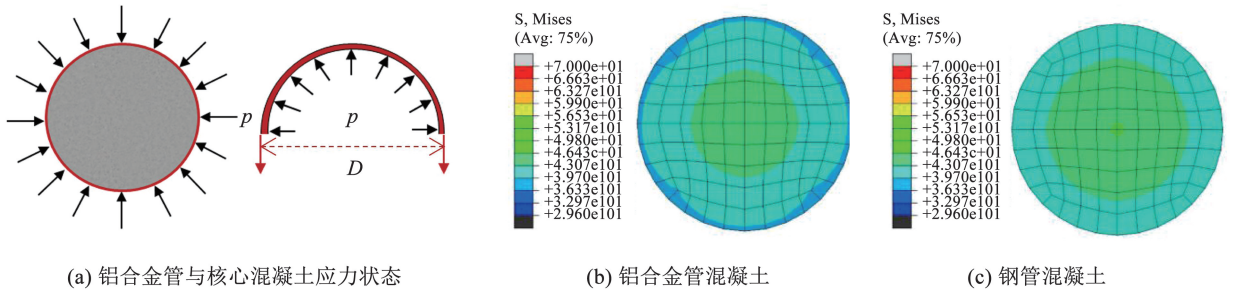


图 4 构件中截面应力状态^[31]

Fig. 4 State of stress in the mid-height section of the specimens^[31]

为进一步量化铝合金管的环向与纵向应力水平,王法承等^[35]开展了有限元量化分析。如图 5 所示,在受压初期,构件处于弹性阶段,此时铝合金管基本处于单轴应力状态,铝合金管与核心混凝土各自分担荷载,两者间无接触与相互作用。当铝合金管纵向微应变达到 1 671 $\mu\epsilon$ 时(A 点),铝合金管与核心混凝土开始接触并产生相互作用力,环向应力 f_t 开始产生并逐渐增大。当纵向微应变为 4 573 $\mu\epsilon$

时(B 点),铝合金管达到 Mises 屈服强度(f_M),此时,其环向应力(f_t)与纵向应力(f_l)分别为 0.3 f_y 与 0.8 f_y (f_y 是铝合金管的单向拉伸屈服强度)。相同条件的空铝合金管在纵向应力达到 0.75 f_y 时,构件因局部屈曲丧失了承载能力。上述研究进一步佐证了铝合金管与核心混凝土之间存在相互作用,但由于铝合金材料弹性模量较低,其环向约束水平低于传统钢管(钢管的环向应力约为其屈服应力的一半)。

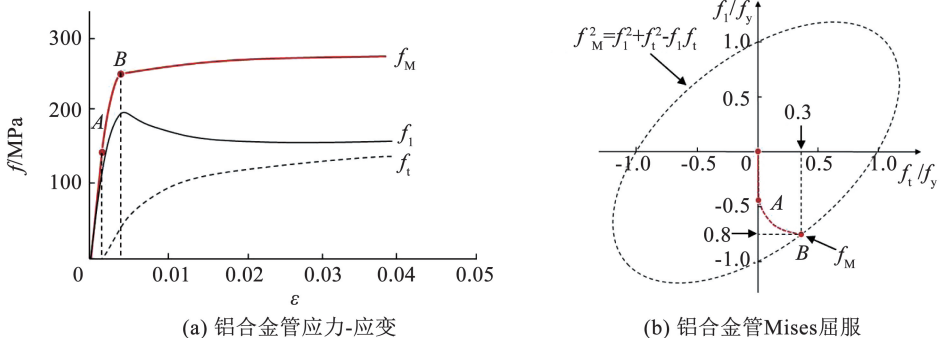


图 5 铝合金管受力状态

Fig. 5 Stress condition of aluminum alloy tube

2 圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算模型

考虑到铝合金管混凝土与钢管混凝土受力模式的相似性,学者们以适用于钢管混凝土的“极限平衡理论”、“统一理论”、“叠加理论”等为基础,提出了圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力计算模型。本文基于公式的合理性与简洁性选取了查晓雄等^[10]、Zhou 等^[9]、胡涛^[19]、Wang 等^[35]和 Ding 等^[34]学者提出的典型计算模型,利用已建立的数据库对其适用性进行验证和分析。

2.1 查晓雄等^[10]提出的模型

查晓雄等考虑到铝合金材料弹性模量约为钢材的 1/3,会影响侧向约束应力的大小,因此,引入了影响系数 k 对约束效应系数 ξ 进行折减,在“统一理论”的基础上,提出了圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力计算模型:

$$N_u = f_{sc} A_{sc} \quad (1)$$

$$f_{sc} = \frac{1 + 1.5(k\xi)}{1 + B\xi} f_{co} \quad (2)$$

$$k = \frac{2}{3} k_e + \frac{1}{3} \quad (3)$$

$$k_e = \frac{412\alpha + 1.82}{415\alpha + 5.46} \quad (4)$$

式中: N_u 为计算承载力; f_{sc} 为组合截面强度; $A_{sc} = A_s + A_c$ 为组合截面面积; A_s 为铝合金管截面面积; A_c 为核心混凝土截面面积; k 为套箍影响系数; k_e 为弹性模量折减系数; $\xi = (A_s f_y) / (A_c f_{co})$, 为约束效应系数,其中 f_y 为铝合金材料屈服强度; $\alpha = A_s / A_c$, 为铝合金管与核心混凝土的截面面积比; $B = f_{co} / f_y$, 为核心混凝土与铝合金管的强度比。

2.2 Zhou 等^[9]提出的模型

Zhou 等基于“叠加理论”,在美国和澳大利亚/新西兰规范建议的计算公式上引入 η , 考虑铝合金管和核心混凝土的组合作用,提出了圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力计算模型:

$$N_u = A_s f_y + 0.85 A_c f'_c + \eta A_c f_y \quad (5)$$

$$\begin{cases} \eta = 0.3 - 0.0055 \frac{D}{t} & 9 \leq \frac{D}{t} \leq 50m \\ \eta = 0.045 - 0.0002 \frac{D}{t} + 0.1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) & 50m \leq \frac{D}{t} \leq 160 \end{cases} \quad (6)$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; η 为组合作用影响系数; $m = 1 - 0.38 f'_c / f_y$, 为径厚比影响系数。

2.3 胡涛等^[19]提出的模型

胡涛等基于“极限平衡理论”,考虑铝合金管对核心混凝土的约束作用,引入承载力提高系数 λ , 提

出了圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力计算模型:

$$N_u = A_c f_{co} [1 + (1 + \lambda) \xi] \quad (7)$$

$$\lambda = [\xi (f_y / 108)]^{-0.737} \quad (8)$$

2.4 Wang 等^[35]提出的公式

Wang 等基于“统一理论”^[1] 提出的组合截面名义屈服强度 f_{scy} , 通过参数分析,提出了圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力计算模型:

$$N_u = f_{scy} (A_s + A_c) \quad (9)$$

$$\frac{f_{scy}}{f_{co}} = 1.14 + 1.02\xi \quad (10)$$

2.5 Ding 等^[34]提出的模型

Ding 等考虑核心混凝土对外层铝合金管的支撑作用,引入了增强因子 $K = 1.47$, 提出了圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力计算模型:

$$N_u = f_{co} A_c + K f_y A_s \quad (11)$$

3 圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算结果对比分析

3.1 混凝土强度换算

表 1 所收集试件的混凝土强度指标存在差异,为使后续的对比分析具有可比性和统一性,对所收集试件的混凝土强度进行换算统一。本文利用混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 对棱柱体抗压强度 f_{co} 和圆柱体抗压强度 f'_c 进行换算,其中,混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 与棱柱体抗压强度 f_{co} 采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[36] 中提供的换算方式 ($f_{co} = 0.76 f_{cu}$), 立方体抗压强度 f_{cu} 与圆柱体抗压强度 f'_c 则采用叶列平等^[37] 提出的换算公式 ($f'_c = 0.79 f_{cu}$), 换算后各学者所采用混凝土强度如表 1 所示。

3.2 计算结果对比及分析

3.2.1 计算结果对比

将表 1 中收集的试件参数(剔除含铝率 $\alpha > 25\%$ 和混凝土棱柱体抗压强度 $f_{co} \geq 47.0$ MPa 的试件)分别带入 5 个计算模型,计算承载力与试验承载力的比值 ($N_{u,cal} / N_{u,test}$), 结果如图 6 所示,其中 $N_{u,cal}$ 为模型计算结果, $N_{u,test}$ 为试验实测承载力。对各计算模型所得 $N_{u,cal} / N_{u,test}$ 进行准确性和稳定性分析,结果如表 2 所示。

3.2.2 适用性分析

结合表 2 和图 6 可以看出,本文所列举的 5 种典型模型对圆铝合金管混凝土短柱的轴压承载力的计算结果与试验实测承载力基本吻合,比值平均值误差均在 10% 以内。其中, Wang 等提出的计算模型承载力比值平均值最接近 1.0 且标准差最小。但统计分析发现,所建立试验数据库中仍有 5.6% ~ 32.4% 的试件的承载力预测偏差大于 20%。

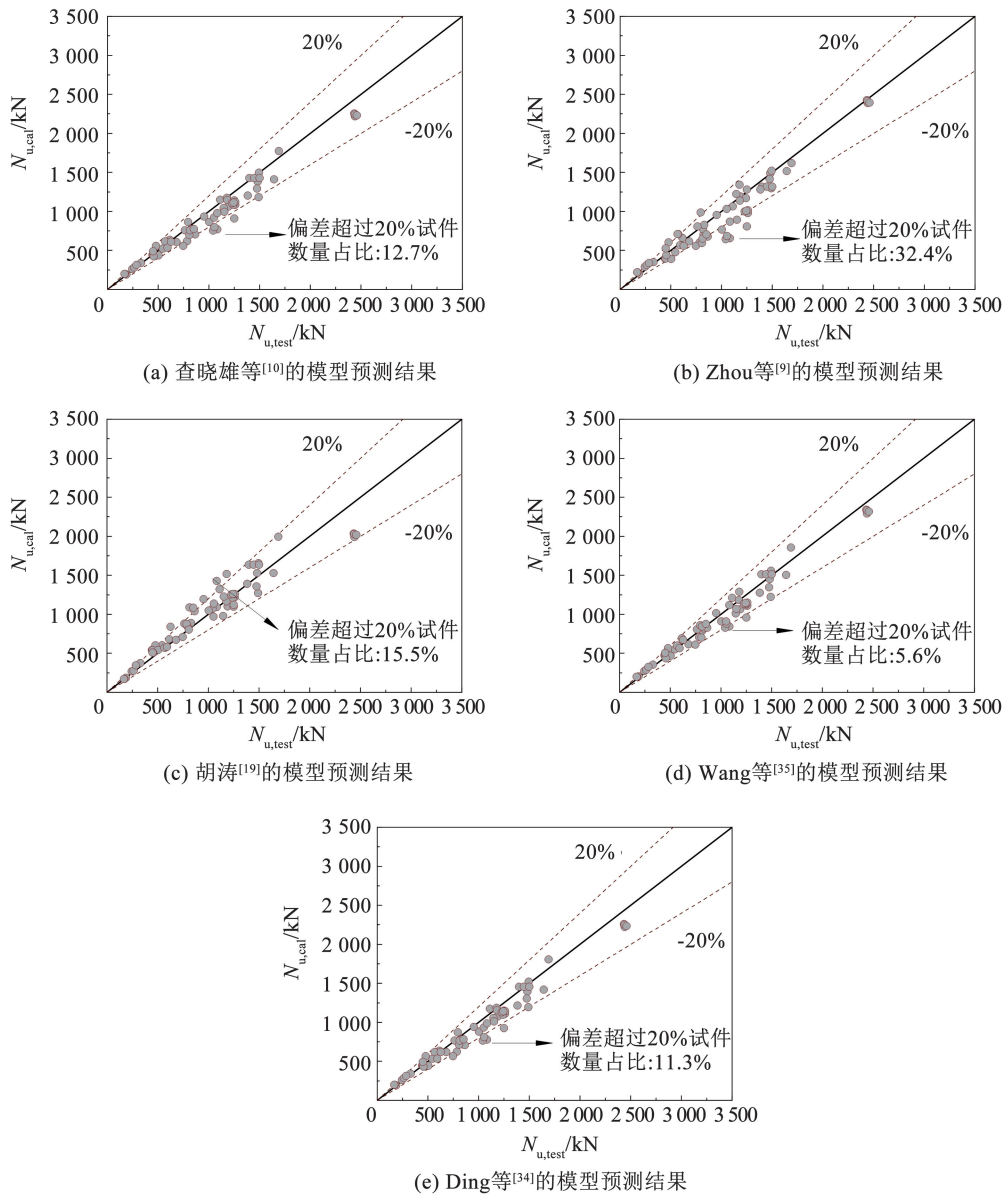


图 6 承载力计算模型预测结果

Fig. 6 Prediction results of the bearing capacity calculation models

表 2 计算模型对比统计

Tab. 2 Comparison among the calculation models

对比结果	$N_{u,cal}/N_{u,test}$					本文模型
	查晓雄等模型	Zhou 等模型	胡涛模型	Wang 等模型	Ding 等模型	
Mean	0.93	0.94	1.05	0.98	0.94	1.01
Sd	0.11	0.17	0.13	0.11	0.11	0.11
Max	1.18	1.30	1.34	1.19	1.19	1.25
Min	0.71	0.61	0.82	0.77	0.72	0.81
Error/%	12.7	32.4	15.5	5.6	11.3	2.8

注: Mean 为平均值, Sd 为标准差, Max 为最大值, Min 为最小值; Error 表示本文试验数据库中承载力预测误差超过 20% 的试件占比

为进一步明确约束效应系数 ξ 对 $N_{u,cal}/N_{u,test}$ 的影响, 以约束效应系数为横坐标, 将 5 种计算模型的预测结果进行对比分析, 结果如图 7 所示。由图 7

可以看到, 当 $\xi \geq 1.0$ 时, 5 种计算模型均可较粗略地预测圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力。但当 $\xi < 1.0$ 时, 计算模型的预测误差相对较大, 主要原

因在于,现有计算模型主要以钢管混凝土的 3 种计算理论为基础,未充分考虑铝合金管与核心混凝土之间组合作用机理与传统钢管混凝土的差异。铝合金管在约束效应系数低于 1.0 时,其与核心混凝土的组合作用相比于同条件的钢管混凝土更低,且弱约束试件的铝合金管通常较薄或混凝土强度常较高,其发生铝合金管撕裂或剪切脆性破坏的可能性更大。因此,现有承载力计算模型的预测精度通常较低,其中,查晓雄等、Zhou 等、胡涛的模型对弱约束铝合金管混凝土的承载力预测误差甚至大于 25%;且现有计算模型的验证主要基于自身试验数据点,其适用性有待进一步验证并提升。因此,亟待开展相关研究,量化铝合金管的受力贡献,提出可充分考虑铝合金管混凝土工作机理的短柱轴压承载力计算模型。

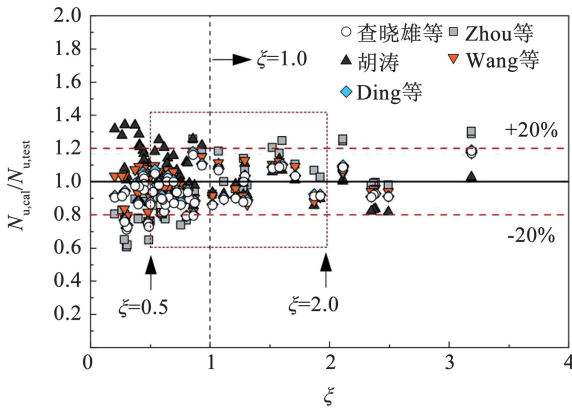


图 7 ξ 对 $N_{u,cal}/N_{u,test}$ 的影响

Fig. 7 Relationship of ξ on $N_{u,cal}/N_{u,test}$

4 圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算模型

为进一步提高圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算模型的准确性及适用性,本文以“统一理论”为基础,仍采用式(1)进行圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算,在充分考虑约束效应系数 ξ 的影响后,优化了组合截面强度 f_{sc} 与混凝土棱柱体抗压强度 f_{co} 之间的关系,提出了圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算模型。对所建立的试验数据库进行分析发现: f_{sc}/f_{co} 与约束效应系数 ξ 满足二次多项式关系(图 8)。通过回归拟合可得到 f_{sc}/f_{co} 与 ξ 关系为

$$\frac{f_{sc}}{f_{co}} = -0.1\xi^2 + 1.22\xi + 1.15 \quad (12)$$

利用收集的试件承载力对提出的计算模型进行校核,如图 9 所示, $N_{u,cal}/N_{u,test}$ 的误差几乎均小于 20%,误差高于 20% 的试件数量占比由 5.6% ~ 32.4% 减小至 2.8%。如表 2 所示, $N_{u,cal}/N_{u,test}$ 的平均值为

1.01,标准差为 0.11,新提出的计算模型具有良好的准确性和适用性。需要说明的是,提出的圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算模型的使用范围如下:铝合金管牌号为 6061 与 6063,混凝土等级强度低于 C60,试件含铝率 $\alpha \leq 25\%$ 。

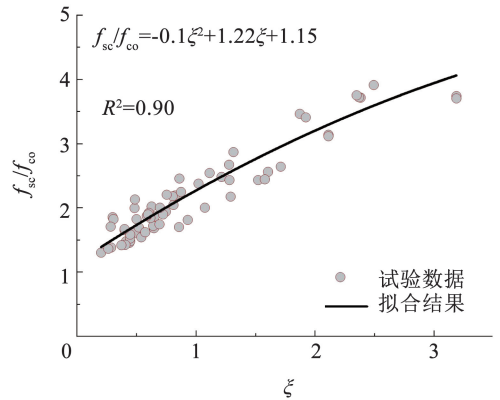


图 8 f_{sc}/f_{co} 与 ξ 的关系

Fig. 8 Relationship between f_{sc}/f_{co} and ξ

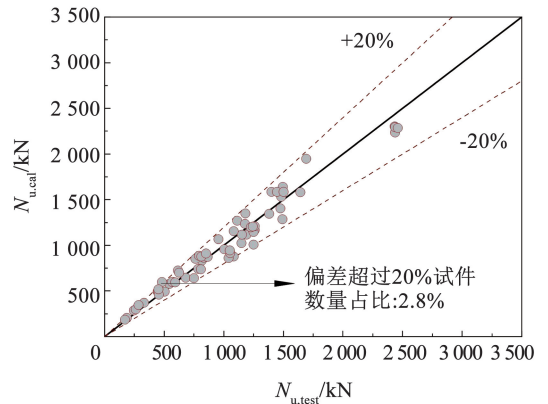


图 9 本文提出的承载力计算模型预测结果

Fig. 9 Prediction results of the proposed bearing capacity calculation model in this study

5 结论

本文对圆铝合金管混凝土短柱轴压试验进行了收集和整理,并对其轴压力学性能和相应的短柱轴压承载力计算模型进行了讨论与分析,主要结论如下。

1) 目前已开展的圆铝合金管混凝土短柱轴压试验研究参数范围较广,含铝率 $\alpha > 25\%$ 的试件占比 45%,一定程度上已超出“组合结构”研究范畴;超过 70% 的试件所用混凝土为普通强度混凝土。

2) 铝合金管混凝土的破坏模式与钢管混凝土类似,但由于铝合金管弹性模量较低,相同条件下其对核心混凝土的约束作用较钢管而言较低,其界限约束效应系数大于钢管混凝土,可初步取值为 1.75,后续可进一步明确其取值。

3) 本文列举的 5 种典型计算模型均可较粗略

地预测圆铝合金管混凝土的短柱轴压承载力,但由于现有计算模型未充分考虑铝合金管与核心混凝土的相互作用,其对所建立试验数据库的承载力预测偏差超过20%的试件占比仍有5.6%~32.4%。

4) 基于钢管混凝土“统一理论”,充分考虑了约束效应系数的影响,提出了圆铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算模型,经验证本文模型具有良好的准确性和适用性,后续研究可进一步补充和完善试验数据库,以进一步验证和拓展本文所提承载力计算模型的适用性。

参考文献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第3版)[M]. 北京: 科学出版社, 2016
HAN LinHai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice (Third Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2016
- [2] 王誉瑾. 6082-T6 铝合金轴心受压构件稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015
WANG Yujin. Investigation on the stability of aluminium alloy 6082-T6 members in axial compression[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. DOI:10.7666/d.D01102723
- [3] KADHIM Z, NASER K. Structural behavior of concrete filled aluminum tubular columns[J]. Basrah Journal for Engineering Science, 2012, 12(1): 46
- [4] RESAN S F. Experimental investigation of aluminum-lightweight concrete composite columns[J]. Basrah Journal for Engineering Science, 2014, 14(1): 13
- [5] GEORGANTZIA E, ALI S B, GKANTOU M, et al. Structural response of aluminium alloy concrete filled tubular columns[J]. Ce/Papers, 2021, 4(2.4): 614. DOI:10.1002/cepa.1339
- [6] ALI S B, KAMARIS G S, GKANTOU M, et al. Numerical study of concrete-filled aluminium alloy tubular columns under eccentric compression[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1058(1): 012010. DOI:10.1088/1757-899X/1058/1/012010
- [7] FAYED S, MANSOUR W. Structural performance of seasand recycled aggregate concrete filled solid/hollow aluminum tubular columns: An experimental work[J]. Structures, 2023, 47: 1323. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.002
- [8] ZHOU F, YOUNG B. Concrete-filled aluminum circular hollow section column tests[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(11): 1272. DOI: 10.1016/j.tws.2009.03.014
- [9] ZHOU F, YOUNG B. Numerical analysis and design of concrete-filled aluminum circular hollow section columns[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 50(1): 45. DOI: 10.1016/j.tws.2011.10.002
- [10] 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
ZHA Xiaoxiong, GONG Yongli. Behavior study of new-type concrete filled metal tubular (CFMT) columns I: Strength capacity of axially compressed short columns[J]. Progress in Steel Building Structures, 2012, 14(3): 12. DOI:10.3969/j.issn.1671-9379.2012.03.004
- [11] 宫永丽. 常用金属管混凝土柱力学性能的试验和理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
GONG Yongli. Experimental and theoretical research on mechanical property of common concrete filled metal tubes columns[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. DOI:10.7666/d.D260264
- [12] 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
CHEN Zongping, XU Weisheng, ZHOU Ji. Axial compression experiment and bearing capacity calculation of marine concrete filled CFRP aluminum alloy tube columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(6): 25. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.22010029
- [13] CHEN Z P, ZHOU Z F, SONG C M, et al. Axial compressive performance and finite element analysis on spirally reinforced seawater sea-sand concrete-filled aluminum alloy tube columns[J]. Construction and Building Materials, 2024, 436: 136927. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136927
- [14] 徐孟暉. 鋁合金管內填充混凝土之軸壓行為[D]. 中国台北: 台湾交通大學, 2009. DOI: 10.6842/NCTU.2009.01189
- [15] 吴鹏. 冻融循环作用后铝合金管混凝土轴心受压构件力学性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018
WU Peng. Study on axial compression performance of concrete filled aluminum alloy tube columns after being exposed to freezing and thawing[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. DOI: CNKI: CDMD:2.1018.149914
- [16] 武健锋. 高温后铝管混凝土短柱轴心受压力学性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019
WU Jianfeng. Study on axially compressive behavior of concrete-filled aluminum tube after exposure to high temperature[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019
- [17] 王炜. 铝管混凝土中长柱受压力学性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021
WANG Wei. Study on mechanical properties of concrete-filled aluminum tubular medium long columns under compression[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.002121
- [18] JIANG M Y, SHU Q J, LIU P X, et al. Testing and numerical simulation of concrete-filled 6061-T6 aluminum tubular stub columns[J]. Structures, 2024, 60: 105855. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.105855
- [19] 胡涛. 圆形铝合金管混凝土轴压力学性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2019
HU Tao. Study on concentric compressive behavior of concrete-filled aluminum alloy circular tubular stub columns[D]. Haikou: Hainan University, 2019. DOI: 10.27073/d.cnki.ghadu.2019.000301
- [20] 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
ZENG Xiang, WU Wanbo, HUO Jingsi, et al. The axial strength of concrete-filled aluminum alloy circular tubular stub columns[J]. ENGINEERING MECHANICS, 2021, 38(2): 52
- [21] YE Y, WANG L, ZHANG S J, et al. Compressive behavior of concrete-filled aluminum alloy tube (CFAAT) stub column with inner carbon steel tube[J]. Structures, 2021, 32: 701. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.026
- [22] RONG B, ZHAI X, LI Z, et al. Study on axial compression behavior of 7A04-T6 concrete-filled aluminum tubular columns[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107118. DOI: 10.

- 1016/j. jobe. 2021. 103654
- [23] YAN X F, LIN S, ZHAO Y G. Behaviour and confinement mechanism of circular concrete-filled aluminum alloy tubular stub columns under axial compression [J]. *Marine Structures*, 2024, 95: 103600. DOI: 10. 1016/j. marstruc. 2024. 103600
- [24] YAN X F, HE M N, HAO J P, et al. Theoretical model of circular concrete-filled aluminum alloy tubular short columns under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2024, 303: 117549. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2024. 117549
- [25] GUO J H, WANG Y M, DENG Z H, et al. Research on the axial compression performance of coral concrete-filled aluminum alloy tube columns [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02952. DOI: 10. 1016/j. cscm. 2024. e02952
- [26] CHEN Z P, XU W S, LIANG Y H, et al. Flexural behavior of novel marine concrete filled CFRP-aluminum alloy tube member [J]. *Structures*, 2024, 62: 106184. DOI: 10. 1016/j. istruc. 2024. 106184
- [27] 龚文志. 铝合金管(混凝土)受弯构件的静力性能试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2016
- GONG Wenzhi. Experimental study on flexural behavior of concrete filled aluminum alloy tube [D]. Quanzhou: HUAQIAO University, 2016. DOI: CNKI: CDMD; 2. 1016. 919099
- [28] 张纪刚, 刘菲菲, 刘康利. 新型铝合金管混凝土组合海洋平台抗震性能分析[J]. *结构工程师*, 2018, 34(S1): 37
- ZHANG Jigang, LIU Feifei, LIU Kangli. The seismic analysis of novel aluminum offshore platform [J]. *Structure Engineers*, 2018, 34(S1): 37. DOI: 10. 15935/j. cnki. jggcs. 2018. s1. 006
- [29] 昌魏. CFRP 加强铝合金管-混凝土轴心受压短柱力学性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020
- CHANG Wei. Research on behaviour of CFRP reinforced concrete filled aluminum alloy tube stub columns under axial compression [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. DOI: 10. 27671/d. cnki. gcjtc. 2020. 001079
- [30] 刘玉强. 铝合金管(圆)混凝土轴压短柱力学性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020
- LIU Yuqiang. Experimental study on mechanical properties of aluminum alloy tubular (circular) concrete short columns under axial compression [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020. DOI: 10. 27809/d. cnki. gsjgc. 2020. 000667
- [31] 王兰, 姜航, 谢文超, 等. CFRP-铝合金复合管高强混凝土短柱轴压性能研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2024, 26(4): 1
- WANG Lan, JIANG Hang, XIE Wenchao, et al. Study on axial compressive behavior of high-strength concrete-filled CFRP-aluminum composite tube stub columns [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2024, 26(4): 1. DOI: 10. 13969/j. cnki. cn31-1893. 2024. 04. 001
- [32] GAO X F, ZHANG Z Y, XU J, et al. Mechanical behavior of CFRP confined seawater sea-sand recycled concrete-filled circular aluminum-alloy tube columns under axial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 397: 132355. DOI: 10. 1016/j. conbuildmat. 2023. 132355
- [33] HE Z Y, DENG Z H, HU S W, et al. Axial compression performance of coral concrete-filled aluminum alloy tube (CCFAT) circular short columns [J]. *Engineering Structures*, 2024, 303: 117552. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2024. 117552
- [34] DING F X, LIAO C B, WANG E, et al. Numerical investigation of the composite action of axially compressed concrete-filled circular aluminum alloy tubular stub columns [J]. *Materials*, 2021, 14(9): 2435. DOI: 10. 3390/ma14092435
- [35] 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. DOI: 10. 1016/j. tws. 2019. 03. 019
- [36] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [37] 叶列平, 赵作周. 混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- YE Lieping, ZHAO Zuozhou. *Concrete structures* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005

(编辑 吕雪梅)