

Finite element analysis of axial compression performance of aluminum alloy tube concrete after freeze-thaw cycle

Hongyang Zeng

College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400041, China

Abstract

To investigate the bearing capacity of aluminum alloy tube concrete columns under axial compression after freeze-thaw cycles, this study uses ABAQUS finite element software to create a three-dimensional model. The model simulates the axial compression process of the components under different parameter combinations, including the number of freeze-thaw cycles, the diameter-to-thickness ratio, and the slenderness ratio. The results show that when the number of freeze-thaw cycles is the parameter variable, the bearing capacity of the specimens shows little variation after 50 and 100 cycles, but significantly decreases after 150 cycles. This indicates that the mechanical properties of concrete and aluminum alloy materials are significantly reduced after freeze-thaw cycles. When the diameter-to-thickness ratio is the parameter variable, an increase in the ratio leads to a significant decrease in peak load, indicating a significant impact of the diameter-to-thickness ratio on the mechanical properties of aluminum alloy tube concrete. When the slenderness ratio is the parameter variable, changes in the slenderness ratio have a relatively minor effect on the bearing capacity of the specimens, with specimens having a slenderness ratio of 3 being more capable of bearing loads compared to those with a slenderness ratio of 6.

Keywords

aluminum alloy concrete pipe; finite element analysis; freeze-thaw cycle; axial compression

冻融循环作用后铝合金管混凝土轴压性能有限元分析

曾弘扬

重庆交通大学土木工程学院, 中国 · 重庆 400041

摘 要

为深入探究冻融循环作用后铝合金管混凝土柱在轴压作用下的承载能力, 本文以冻融循环次数、径厚比和长细比为参数, 采用ABAQUS有限元软件建立三维模型, 模拟不同参数组合工况下构件的轴压受力过程。结果表明, 当以冻融循环次数为参数变量时, 试件在冻融循环50、100次后承载力变化差异较小, 在冻融循环150次后, 其承载力明显下降。说明经受冻融循环后混凝土与铝合金材料的力学性能明显下降; 当以径厚比为参数变量时, 试件径厚比增大其峰值荷载随之明显下降, 径厚比对铝合金管混凝土力学性能影响显著; 当以长细比为参数变量时, 长细比的变化对试件承载力的影响相对较小, 长细比为3的试件较长细比为6的试件承载力更大。

关键词

铝合金管混凝土; 有限元分析; 冻融循环; 轴心受压

1 引言

在现代建筑工程领域, 结构材料的高性能化与多功能化已成为推动行业技术革新的关键驱动力^[1]。铝合金管混凝土 (Aluminum Alloy-Concrete Composite, 简称 AAC) 凭借其轻质高强、优异的耐腐蚀性能、施工便捷、加工性能良好以及良好的耗能能力等优势, 在大跨度桥梁、高层建筑、海洋工程等领域展现出巨大的应用潜力^[2]。铝合金具备优异的低温力学性能, 在低温环境中不会出现明显的脆韧转变温度及低温脆性现象^[3]。由于铝合金的热膨胀系数大于混凝土,

低温环境会增强铝合金对核心混凝土的约束作用, 从而弥补因温度因素可能导致的混凝土强度下降问题。外包铝合金的存在大幅减少了内部混凝土与自然环境的接触面积, 使空气中的水分、雨水等无法直接与内部混凝土接触并渗入其内部, 进而减少了混凝土内的自由水量。因此, 在低温环境下, 混凝土受冻融循环作用的影响会大幅降低, 其抗冻耐久性能得到显著提高。

目前对于钢管混凝土的研究已非常广泛, 韩林海和杨有福^[4]进行了 24 个矩形截面钢管混凝土轴心受压短柱的试验研究, 分析了约束效应系数和截面长宽比对矩形钢管混凝土力学性能和强度承载力的影响。杨有福、曹凯、杨志泉、林俊^[5]进行了冻融循环作用后钢管混凝土轴压短柱的试验研究, 经过分析对比最终得出经过冻融循环作用后的钢管混

【作者简介】曾弘扬 (2000-), 男, 中国四川达州人, 在读硕士, 从事结构工程研究。

凝土柱在轴压作用下应力 - 应变趋势和未经冻融的试件趋势大致相同, 但经过冻融循环处理后的试件在承载力和组合弹性模量上随着冻融循环周期的增多而呈下降趋势。Brauns^[6]开展了相关实验研究, 获取了钢管混凝土短柱的弹性模量和泊松比这两项指标, 明确了试件的应力 - 应变关系。

但对于冻融循环作用后铝合金管混凝土柱的研究还相对较少, Jiang^[7] 等对圆形和方形铝合金管混凝土短柱开展试验研究和数值模拟, 发现圆形截面柱比方形截面柱具有更好的延性和更高的承载力。王景玄、刘芳玲、王文达^[8] 对方形和圆形截面轴压短柱开展轴压试验, 对比了方形和圆形截面铝合金管对核心混凝土的横向约束效应计算了两种截面短柱的等效约束力, 计算结果与试验结果吻合良好。因此, 本文使用 ABAQUS 软件建立铝合金管混凝土轴压模型, 模拟不同冻融循环次数、径厚比和长细比对铝合金管混凝土轴压性能的影响。

2 试件设计参数

为分析冻融循环作用后铝合金管混凝土轴心受压构件的力学性能, 考虑了冻融循环次数、径厚比、长细比 3 个参数的影响, 设计了 20 个铝合金管混凝土轴心受压试件, 试件参数设计见表 1。

表 1 试件设计参数

试件编号	D/mm	t/mm	L/mm	F/次	数量
F-25-3	150	6	450	0、50、100、150	4
F-50-3	150	3	450		4
F-75-3	150	2	450		4
F-25-6	150	6	900		4
F-50-6	150	3	900		4

注: 试件编号 F0-25-3, “F” 代表冻融循环次数, “25” 代表径厚比 (D/t), “3” 代表长细比 (L/D)。

3 有限元模型的建立

本文基于本课题组实验数据进行铝合金管混凝土轴心受压数值模拟。

3.1 混凝土本构关系

混凝土材料的本构采用韩林海钢管约束混凝土本构模型^[9], 考虑到钢管内混凝土处于多轴受力状态, 采用与约束效应系数 ξ 有关的函数式, 核心混凝土受压的应力 - 应变关系模型:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0^0(x-1)^\eta + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $y = \sigma / f_c$; $x = \varepsilon / \varepsilon_0$; $\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$; $\varepsilon_c = (1300 + 12.5f_c) \times 10^{-6}$; $\eta = 2$; $\beta_0 = (2.36 \times 10^{-6})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]}$ $\times (f_c) \times 0.5 \geq 0.12$ 单轴受拉应力 - 应变关系模型:

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & x \leq 1 \\ \frac{x}{0.31f_t^2(x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

3.2 铝合金本构关系

铝合金材料的本构基于文献^[10] 采用 Ramberg-Osgood 本构模型模拟, 该模型由弹性模量 (E)、屈服强度 (σ) 和硬化指数 (n) 3 个参数确定, 通过该模型求出的本构关系和铝合金材料的实际性质十分接近。该模型的表达式如下:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{B}\right)^n \quad (3)$$

E 为原点处的弹性模量, n 和 B 为文献 [10] 中试验所测定的参数。

3.3 有限元模型

本文核心混凝土和铝合金管均采用 8 节点减缩积分的三维实体单元 (C3D8R), 为了保证计算精度以及提高计算效率, 划分混凝土和铝合金管的网格单元尺寸为 10mm。铝合金管与混凝土柱粘结界面采用接触属性定义, 法向设置为“硬接触”, 切向采用“罚参数”, 摩擦系数取 0.3, 铝合金管的弹性模量大于混凝土的弹性模量, 选取铝合金管内壁为主表面, 混凝土柱外壁为从表面, 并将铝合金管混凝土上下表面与参考点进行耦合。边界条件如下: 铝合金管混凝土下端采用完全固定的方式 ($U_1=U_2=U_3=0$, $UR_1=UR_2=UR_3=0$), 上端约束其 X、Y 方向上的位移以及三个方向上的转动自由度, 仅允许其沿 Z 方向位移。采用以位移控制的方式加载, Z 向目标位移设置为 20mm ($U_1=U_2=0$, $U_3=-20$, $UR_1=UR_2=UR_3=0$)。

4 数值模拟结果分析

4.1 冻融循环次数

当径厚比与长细比保持不变, 只改变冻融循环次数时, 发现随着冻融次数的增加试件极限承载力降低。与未经受冻融循环的试件相比, 径厚比为 25、长细比为 3 的试件经受 50、100、150 次冻融循环的试件极限承载力分别下降了 2.15%、4.58%、19.38%; 径厚比为 50、长细比为 6 的试件经受 50、100、150 次冻融循环的试件极限承载力分别下降了 1.09%、5.67%、24.41%。模拟结果表明经受 50、100 次冻融循环后承载力下降较小, 而经受 150 次冻融循环后承载力下降明显。具体位移荷载图见图 1。

4.2 径厚比

观察图 2 发现当冻融循环次数与长细比保持不变, 只改变径厚比时, 从数值模拟结果发现径厚比越大的试件其极限承载力越小。与径厚比为 25 的试件相比, 径厚比为 50 的试件在冻融循环 0、50 次后承载力分别下降了 27.78%、28.15%; 径厚比为 75 的试件在冻融循环 0、50 次后承载力分别下降了 36.66%、37.98%。结果表明径厚比从 25 增大至 75 即铝合金管管壁从 6mm 变薄至 2mm, 铝合金管对核心

混凝土的约束作用减弱,导致混凝土三向受压强度提升效果降低,导致其整体承载力显著下降。

4.3 长细比

当冻融循环次数与径厚比保持不变,只改变试件长细比时,从图3可以看出长细比从3增加到6对其承载力影响

较为明显。与长细比为3的试件相比,长细比为6的试件在冻融循环0、50次后承载力分别下降了3.24%、3.43%。数据表明长细比增大会导致铝合金管混凝土承载力小幅度降低,这是由于长细比增大会削弱铝合金管对核心混凝土的横向约束作用,进而造成其整体承载力的下降。

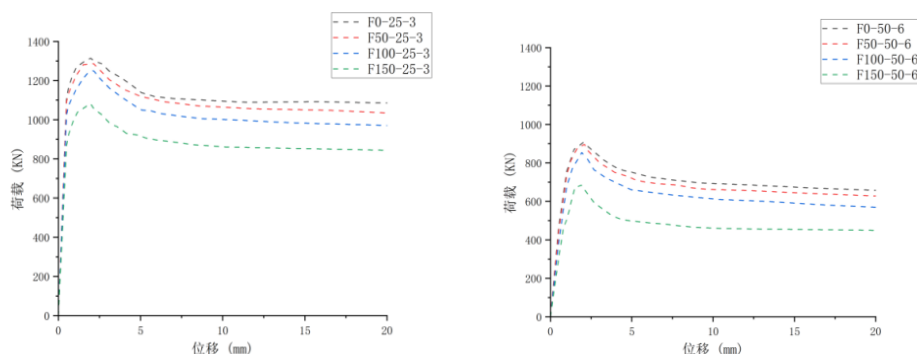


图1 不同冻融循环次数下的位移-荷载曲线

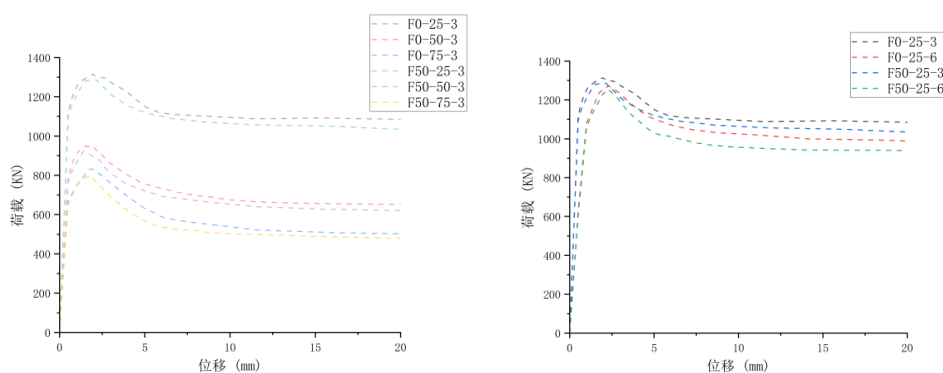


图2 不同径厚比下位移-荷载曲线

图3 不同长细比下位移荷载曲线

5 结论

通过对铝合金管混凝土柱进行有限元模拟分析得到以下结论:

当以冻融循环次数为参数变量时,试件在冻融循环50、100次后承载力变化差异较小,在冻融循环150次后,其承载力明显下降。说明经受冻融循环后混凝土与铝合金材料的力学性能明显下降;当以径厚比为参数变量时,试件径厚比增大其峰值荷载随之明显下降,径厚比对铝合金管混凝土力学性能影响显著;当以长细比为参数变量时,长细比的变化对试件承载力的影响相对较小,长细比为3的试件较长细比为6的试件承载力更大。

参考文献

- [1] 邢国华,王晓盼,李翔宇等.铝合金材料在建筑结构中的应用研究进展[J].2021,37(5):214-221.
- [2] 方志刚.铝合金防腐技术问答[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [3] Guo X N, Tao L, Zhu S J, et al.Experimental investigation of mechanical properties of aluminum alloy at high and low

temperatures[J].Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 32(2): 45-57.

- [4] 韩林海,杨有福.矩形钢管混凝土轴心受压构件强度承载力的试验研究[J].土木工程学报,2001,34(4):22-31.
- [5] 杨有福,曹凯,杨志泉,等.冻融循环作用后钢管混凝土轴压短柱力学性能[J].中国公路学报,2014,27(3):51-58.
- [6] Brauns J.Analysis of stress state in concrete-filled steel column. Journal of Structural Engineering, 1999, 49(2): 189-196.
- [7] 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.
- [8] 王景玄,刘芳玲,王文达.铝合金管约束钢筋混凝土柱轴压性能研究[J].建筑结构学报,2025,46(4):210-222.
- [9] 刘威,韩林海.ABAQUS分析钢管混凝土轴压性能的若干问题研究[C].中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十次年会论文集,2005:4.
- [10] 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.