

文章编号:1673-9469(2025)02-0012-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.02.002

## 冻融后 L 形型钢混凝土柱轴压试验与模拟

李文,王星卓\*,葛楠,滕振超,张云峰,王桐

(东北石油大学 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318)

**摘要:** 为研究冻融循环作用对型钢混凝土(SRC)异形柱结构受力性能的影响,基于5根L形SRC异形柱冻融后轴压试验研究与14根L形SRC异形柱模拟研究,进行了混凝土强度、配箍率、含钢率参数分析,依据结果建立了冻融后承载力计算公式。研究表明:冻融循环作用对SRC构件耐久性与结构性能均有显著影响,表现为构件损伤由内而外依次加深,轴压极限承载力在50次冻融后降低明显;根据有限元模拟结果提出的承载力计算公式计算值误差在5%以内,能反映极限承载力变化情况,为该结构在寒区应用提供参考。

**关键词:** 冻融循环;型钢混凝土结构;异形柱;极限承载力;ABAQUS

**中图分类号:** TU398

**文献标识码:** A

## Axial Compression Test and Simulation of L-Shaped Steel Reinforced Concrete Columns After Freeze-Thaw Cycles

LI Wen, WANG Xingzhuo\*, GE Nan, TENG Zhenchao, ZHANG Yunfeng, WANG Tong

(School of Civil Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of freeze-thaw cycles on the mechanical performance of steel-reinforced concrete (SRC) irregular-shaped column structures, based on the axial compression tests of five L-shaped SRC columns after freeze-thaw and the simulation study of 14 L-shaped SRC columns, the parameters including concrete strength, reinforcement ratio and steel content were analyzed. According to the results, the calculation formula for the post-freeze-thaw bearing capacity was established. The research results show that the freeze-thaw cycles have a significant impact on the durability and structural performance of SRC components, manifested as the damage of the components gradually deepening from the inside to the outside, and the ultimate axial compression bearing capacity decreases significantly after 50 freeze-thaw cycles. The calculation values of the bearing capacity formula proposed based on the finite element results have an error within 5%, which can reflect the change of ultimate bearing capacity and provide a reference for the application of this structure in cold regions.

**Key words:** freeze-thaw cycle; steel-reinforced concrete; special-shaped column; ultimate bearing capacity; ABAQUS

采用型钢混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)异形柱取代钢筋混凝土矩形截面柱作为受力构件,不仅具有异形柱在建筑布局灵活性和空间利用率的优点,还拥有优秀的结构性能与施工效益<sup>[1-2]</sup>。然而在寒区工程中,冻融循环导致的混凝土性能劣化可能严重削弱SRC异形柱的长期耐久性,这使得结构设计需同步考虑其短期力学性能

与全寿命周期内的耐久性<sup>[3]</sup>保障。研究高寒地区SRC异形柱在冻融循环作用下的受力性能,对确保SRC异形柱的安全性具有重要意义。

目前学者对结构冻融损伤的机理研究取得了许多成果<sup>[4-7]</sup>。冻融循环作用同时破坏界面过渡区与水泥基质,这一过程中水泥砂浆产生体积变形,导致骨料与砂浆的分离<sup>[8]</sup>,影响混凝土的受力

收稿日期:2024-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578120);黑龙江自然科学基金联合引导项目(LH2020E018)

第一作者:李文(1969—),男,河北唐山人,硕士,教授,从事组合结构方面的研究。

\* 通信作者:王星卓(1999—),男,辽宁抚顺人,硕士研究生,从事组合结构方面的研究。

性能。随着冻融循环次数的增加,混凝土的相对动弹性模量、抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度均降低<sup>[9]</sup>。有学者对如何量化冻融循环后的混凝土损伤进行了研究<sup>[10]</sup>。Wawrzeńczyk 等<sup>[11]</sup>通过改进的损伤评价模型,实现了临界冻融循环次数的定量预测,为耐久性设计提供了新方法。

除了材料性能<sup>[12]</sup>以外,结构在冻融损伤下的力学性能也受到了很大关注<sup>[13]</sup>。但针对 SRC 异形柱这类钢混组合构件,其特有的型钢约束效应与界面传力机制可能显著改变冻融损伤演化路径。特别是异形截面带来的应力集中现象,可能进一步加剧冻融环境下的界面剥离风险,这尚未在现有研究中得到充分阐释。

基于此,本文对 5 根 L 形 SRC 异形柱开展系统性研究:首先通过冻融循环后的轴压试验,揭示不同冻融次数下构件的破坏模式演化规律与承载力衰减特征;继而建立考虑冻融损伤本构的精细化有限元模型,量化分析混凝土强度损失率、型钢配钢率等参数对构件力学性能的影响。研究成果可为寒区 SRC 异形柱的耐久性设计与评估提供理论支撑。

## 1 试验

### 1.1 试验概况

设计等肢 L 形 SRC 异形柱,柱高 600 mm,浇筑同规格 5 根试件,试件编号分别为 SRCFT-0、SRCFT-25、SRCFT-50、SRCFT-75、SRCFT-100,编号中数字代表冻融循环次数。试件混凝土强度等级为 C30,型钢强度为 Q235,配箍率 1.83%,试件截面形式见图 1。

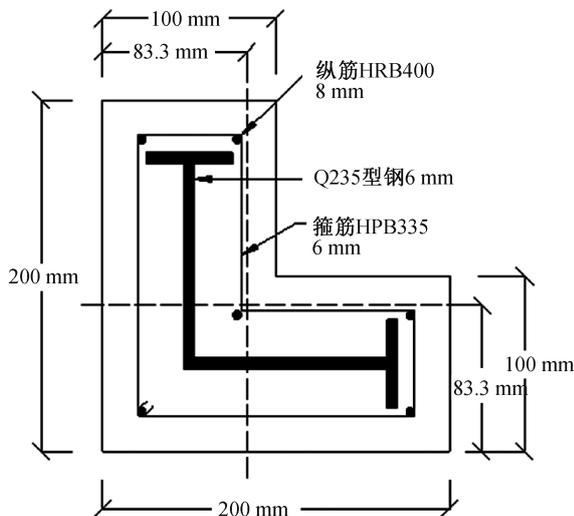


图 1 构件截面形式

Fig. 1 Cross-sectional shape of component

### 1.2 试件制作

本试验采用大庆市产油龙牌 P·O 32.5 普通硅酸盐水泥,细骨料采用天然河砂,粗骨料为粒径 5~20 mm 的碎石。根据配合比选取适当的原料,现场搅拌混凝土,一次浇筑完成,所有混凝土经过振捣密实,试件浇筑完成后,放入养护箱养护 28 d。

型钢翼缘与腹板厚度均为 6 mm,出厂时焊接为 L 形并对型钢表面进行喷砂处理,增大其表面摩擦。试件箍筋采用直径 6 mm HPB335 型钢筋,纵筋采用直径 8 mm HRB400 型钢筋。浇筑立方体试块 (150 mm×150 mm×150 mm)、棱柱体 (100 mm×100 mm×400 mm) 与构件同时进行冻融循环,进行钢材、混凝土材性试验,材性试验结果见表 1。

表 1 材性试验

Tab. 1 Tests of material property

材料类型	抗压强度 /MPa	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa
C30	32.8	—	—
HPB335	—	338.4	454.8
HRB400	—	420.4	553.2
Q235	—	248.2	401.1

### 1.3 试验现象与结果分析

#### 1.3.1 快速冻融试验

试验采用 HC-HDK9/Y 型快速冻融试验机,温度范围为±20℃,控制精度为±0.5℃,满载运转时冻融箱内各点之间的最大温差不超过±2℃。试验前 5 d 将试验柱、棱柱体与立方体试块放入 (20±2)℃ 水中浸泡 5 d 达到饱水效果,每次冻融循环时间控制在 4 h。

#### (1) 立方体试块

图 2 为不同冻融循环次数的立方体试块,可以看出,未冻融试块表面较为光滑,而冻融循环次数增加后,试块表面砂浆层脱落,露出粗骨料。这是由于混凝土是多孔材料,在结构微孔隙中存在孔隙水,冻融循环作用下结构存在温度差。冻融循环导致的固-液相转换会使其体积变化,引起微孔隙发展,导致下一次冻融循环变化过程中更多的孔隙水侵入,引起砂浆的脱落。

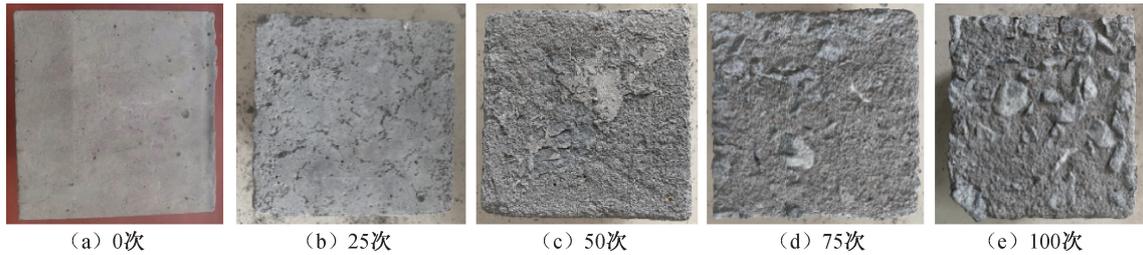


图2 不同冻融循环次数立方体试块

Fig. 2 Cube specimens with different freeze-thaw cycles

对冻融后立方体混凝土试块进行抗压强度试验,见表2。冻融循环25次试块抗压强度平均值下降幅度仅为8.48%,而100次冻融循环时试块抗压强度平均值下降了43.53%,这表明随着冻融循环次数的增加,混凝土试块内部结构破坏显著。

表2 冻融后混凝土试块抗压强度值

Tab. 2 Compressive strength values of concrete specimens after freeze-thaw cycles

冻融循环次数	抗压强度平均值/MPa	抗压强度下降值/%
0	32.80	—
25	30.02	8.48
50	26.68	18.66
75	21.67	33.90
100	18.52	43.53

### (2) 棱柱体试件

测定不同冻融循环次数的棱柱体的相对动弹模量,评价其内部损伤程度,采用动弹模量测定仪进行相对动弹模量采集,结果见表3。试件100次冻融时,相对动弹模量平均为64%,下降明显,可以认为其内部结构受到破坏。

表3 棱柱体相对动弹模量

Tab. 3 Relative dynamic modulus of elasticity of prism specimens

冻融循环次数	试件1 相对动弹模量/%	试件2 相对动弹模量/%	试件3 相对动弹模量/%	相对动弹模量 平均值/%
0	100	100	100	100
25	90	90	88	89
50	83	84	82	83
75	74	75	70	73
100	63	65	64	64

### (3) L形SRC异形柱

冻融循环结束后,对不同冻融循环次数的试件进行对比,结果见图3。可以看出,冻融循环次

数高的试件出现棱角缺失现象。随着冻融循环次数的增加,SRC异形柱表面剥蚀情况加剧;冻融循环次数达到50次后,混凝土粗骨料露出明显,并有脱落现象;冻融循环100次后,更多粗骨料露出,试件边缘及边角受损严重。



图3 不同冻融循环次数试件对比图

Fig. 3 Comparison of specimens after different numbers of freeze-thaw cycles

未冻融的构件结构致密,冻融作用使混凝土胶凝体逐渐流失而形成孔结构。随着冻融循环次数增加,结构表面孔隙由零星分布扩展至连通,导致粗骨料脱落,在冻融循环次数高的构件表面存在粗骨料脱落后的坑洞,表层混凝土变酥松。

### 1.3.2 轴心受压试验

试验采用分级加载。在前期每级加载值为预估极限承载力的1/10,每级保持时间为1min;当荷载达到预估极限荷载值时,加载值改为预估极限承载力的1/15,每级保持时间为2min。当试件荷载降为极限荷载的80%时停止加载。观察并记录现象,采集数据后卸载。

#### (1) 试验现象分析

试件破坏形态如图4所示,不同冻融循环次数试件破坏形态基本相似。以经历100次冻融循环的构件轴压破坏过程为例:开始加载后,裂缝首先从中部出现,呈放射状由构件中部向端部扩展,酥化的混凝土开始脱落;此时继续加载,当荷载达到极限承载力85%时,被压碎的混凝土不断掉落;继续加载至极限承载力后,随着位移持续增大,荷载呈现缓慢下降的趋势,试件最终出现贯通裂缝并

丧失承载能力,表现为典型的混凝土劈裂破坏。试验结束后观察发现,钢筋与型钢均已屈服。对于 SRC 异形柱来说,结构受力性能由型钢与混凝土两部分共同决定。随着冻融循环次数增加,混凝土材料性能显著劣化,表现为柱端部呈现“一压即碎”的状态,影响结构受力性能。而所有试件破坏均沿试件界面过渡区劈裂,这表明冻融循环主要影响混凝土以及型钢-混凝土界面过渡区性能。



图 4 构件破坏对比图

Fig. 4 Comparison of failure mode of component

(2) 承载力分析

图 5 为实测试件极限承载力与荷载-位移曲线。不同冻融循环次数试件极限承载力呈非线性下降趋势,50 次冻融循环后构件极限承载力下降 7.25%;100 次冻融循环后构件极限承载力下降 19.94%;总体呈现极限承载力下降速度加快的趋势,见表 4。构件荷载位移曲线简图如图 6 所示。

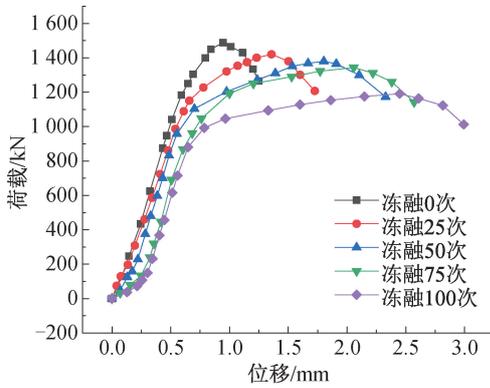


图 5 构件荷载位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of component

表 4 构件极限承载力

Tab. 4 Ultimate bearing capacity of component			
试件编号	冻融循环次数	极限承载力/kN	承载力下降值/%
SRCFT-0	0	1 488. 17	—
SRCFT-25	25	1 420. 31	-4. 56
SRCFT-50	50	1 380. 33	-7. 25
SRCFT-75	75	1 343. 44	-9. 73
SRCFT-100	100	1 191. 50	-19. 94

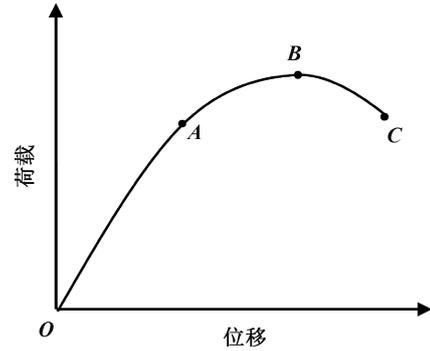


图 6 构件荷载位移曲线简图

Fig. 6 Simplified diagram of load-displacement curve of component

不同冻融循环次数构件轴压荷载下位移曲线与图 6 近似,构件变形可分为线性变形阶段、弹性变形阶段与破坏阶段;屈服点 A 后构件进入弹塑性变形阶段,荷载达到构件极限承载力后,构件进入破坏阶段。冻融循环次数提高后,屈服点 A 与荷载峰值点 B 对应的位移均增大,构件线性变形阶段缩短,而弹塑性变形阶段曲线斜率更小,荷载变化较小情况下位移明显增加。

(3) 延性分析

为了量化冻融循环对试件延性影响,引入无量纲的延性指标  $\lambda$ , 计算如式 (1) 所示,计算方式是 80% 构件极限荷载对应的破坏位移  $\Delta y_1$  与构件极限荷载对应的极限位移  $\Delta y$  的比值,用以评价结构变形能力。

$$\lambda = \frac{\Delta y_1}{\Delta y} \quad (1)$$

由表 5 可知,随着冻融循环次数增加,试件的延性降低,且冻融循环次数提高后,延性下降速度加快,原因是混凝土冻融后“脆性”增强,导致结构塑性变形能力减弱,体现了冻融循环作用对构件变形能力的影响,说明冻融循环作用影响构件抗震性能。

表 5 试件延性计算表

Tab. 5 Ductility calculation table for all specimens			
试件编号	破坏位移 $\Delta y_1$	极限位移 $\Delta y$	延性系数 $\lambda$
SRCFT-0	1. 247	0. 945	1. 32
SRCFT-25	1. 726	1. 317	1. 31
SRCFT-50	2. 328	1. 802	1. 29
SRCFT-75	2. 571	2. 057	1. 25
SRCFT-100	2. 993	2. 448	1. 22

## 2 有限元模拟

### 2.1 模型建立

模型几何尺寸与试验相同,建立 14 根 SRC 异形柱构件进行轴压模拟,考虑将冻融循环次数、混凝土强度、配箍率、含钢率作为变量进行分析,具体设计参数见表 6。

表 6 试验设计参数

Tab. 6 Design parameters of tests

试件编号	混凝土强度等级	含钢率%	配箍率%
L-01	C30	5.88	1.83
L-02	C30	5.88	2.86
L-03	C30	5.88	3.30
L-04	C40	5.88	1.83
L-05	C50	5.88	1.83
L-06	C30	3.97	1.83
L-07	C30	7.73	1.83
L-08	C40	7.73	1.83
L-09	C50	7.73	1.83
L-10	C50	3.97	1.83
L-11	C40	5.88	2.86
L-12	C50	5.88	2.86
L-13	C40	5.88	3.30
L-14	C50	5.88	3.30

模型中型钢与混凝土采用实体单元 C3D8R,网格尺寸选取为 25 mm;钢筋笼采用桁架单元 T3D2,网格尺寸设置为 20 mm。混凝土采用曹大富等<sup>[14]</sup>提出的冻融循环后混凝土本构,型钢、钢筋本构选择理想弹塑性双折线本构。有限元模型示意图见图 7。

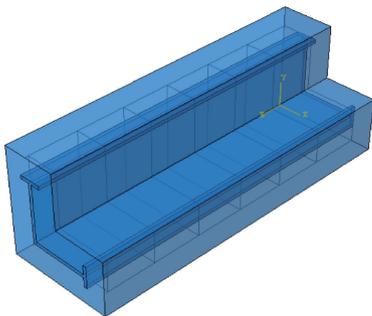


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

本次试验对型钢进行处理以增大其与混凝土之间的摩擦力,来降低冻融循环对其影响,本模拟主要研究 L 形 SRC 异形柱轴压极限承载力,因此,不考虑型钢与混凝土之间黏结滑移,考虑将型钢、

钢筋笼“内置”于混凝土中。在构件形心处设置参考点并施加荷载,使构件均匀受力。构件边界条件为底面约束所有自由度,采用位移加载。

### 2.2 模型验证

建立与试验基本参数相同的有限元模型并进行轴压试验模拟,与试验数据的对比结果见表 7。

表 7 试验与有限元对比结果

Tab. 7 Comparison between experimental and finite element results

试件编号	试验极限承载力/kN	模拟值/kN	误差/%
SRCFT-0	1 488.17	1 422.64	4.40
SRCFT-25	1 420.31	1 368.97	3.61
SRCFT-50	1 380.33	1 308.78	5.18
SRCFT-75	1 343.44	1 230.64	8.40
SRCFT-100	1 191.50	1 135.45	4.70

数值模拟结果与试验相差不大,轴心受压极限承载力最大误差为 8.40%,模型的正确性得以验证。存在误差的原因是忽视了型钢与钢筋笼对核心区混凝土的加强作用,这种作用会减弱冻融循环对构件受力性能的影响。

### 2.3 不同参数下构件极限承载力分析

采用控制变量法进行分组分析,并对不同组别进行横向对比,结果见图 8。

#### 2.3.1 配箍率分析

第一组、第二组是不同配箍率下冻融循环后极限承载力随冻融循环次数变化情况的曲线。第一组中 L-01 和 L-03 冻融循环 100 次后构件极限承载力分别下降了 20.18%、19.30%,差值仅为 0.88 个百分点;对于第二组中的 L-04 和 L-13 构件,其极限承载力分别下降了 16.35%、15.20%,差值为 1.15 个百分点。可以看出,增加箍筋在一定程度上能改善结构的抗冻融能力,但改善程度较弱。

#### 2.3.2 含钢率

第三组、第四组是以含钢率为变量分析冻融循环后极限承载力随冻融循环次数变化情况的曲线,如第三组中 L-09 和 L-10 试件冻融循环 100 次后构件极限承载力分别下降了 10.40%、15.90%;第四组中 L-06 和 L-07 试件冻融循环 100 次后构件极限承载力分别下降了 15.9%、22.6%,说明增大含钢率能很好地提高构件极限承载力。

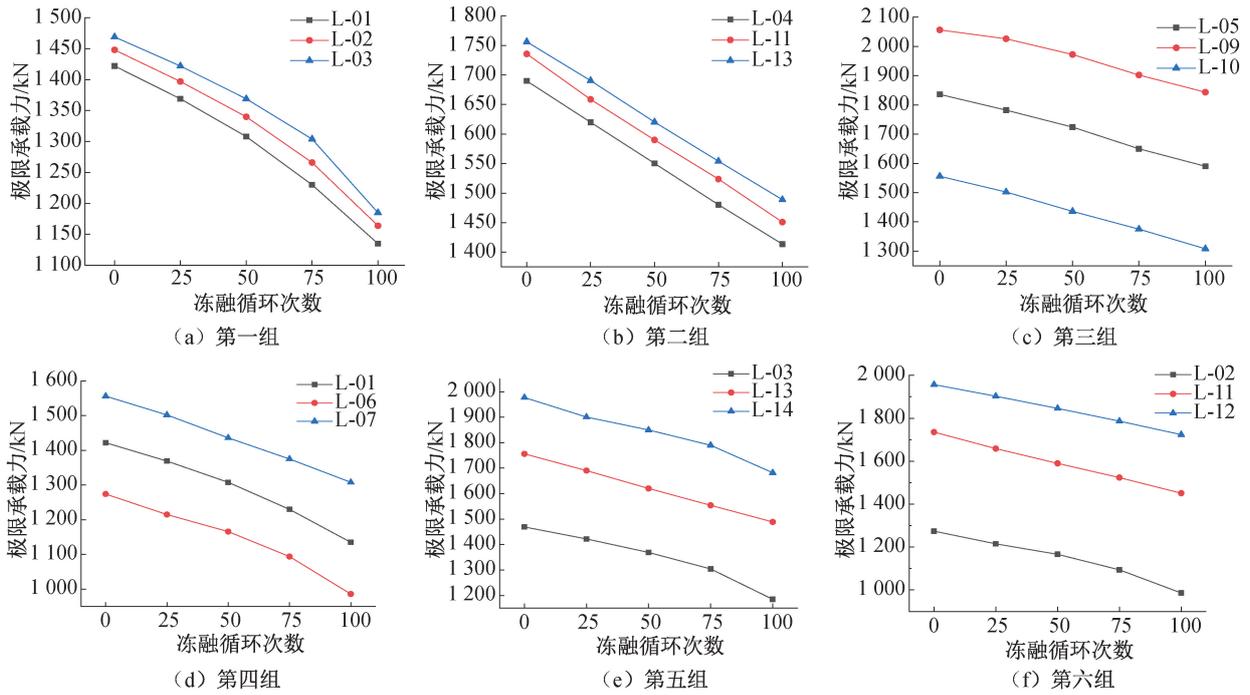


图 8 轴压极限承载力有限元模拟

Fig. 8 Finite element simulation of the ultimate bearing capacity in axial compression

### 2.3.3 混凝土强度分析

第五组、第六组分别是采用不同混凝土强度的试件冻融循环后极限承载力随冻融循环次数变化情况的曲线,结果显示:第五组中 L-03 和 L-14 试件冻融循环 100 次后构件极限承载力分别下降了 19.30%、10.00%。而第六组 L-02 和 L-12 试件承载力分别下降了 19.60%、10.70%,这说明强度更高的混凝土抗冻性更好。

对比可知,对于该 SRC 构件来说,增大配箍率对结构极限承载力意义不大,而采用高等级的混凝土或增加含钢率能有效地抵御冻融循环作用。

### 2.4 承载力公式

结合试验与有限元模拟结果可知,冻融循环作用会导致柱的轴压极限承载力降低,为了量化这种效应,参考文献[15]引入退化系数 $\mu$ 。退化系数 $\mu$ 为第  $T$  次冻融循环后构件极限承载力  $P_{FC-T}$  与未冻融循环构件极限承载力  $P_{FC-0}$  的比值:

$$\mu = \frac{P_{FC-T}}{P_{FC-0}} \quad (2)$$

冻融循环后 SRC 异形柱极限承载力退化系数  $\mu$  预估公式为

$$\mu = \ln[(0.002682f_c - 0.24193) \times T] / \{100 \times [(5.09957 \times n - 31.3816) \times \rho_{sv} \times T + 1]\} \quad (3)$$

式中: $n$  为含钢率; $\rho_{sv}$  为配箍率; $T$  为冻融循环次

数; $f_c$  为混凝土强度,MPa。公式相关系数  $R = 0.98$ ,说明拟合度较好,将 70 种工况下模拟值与公式计算值按极限承载力由低到高排列并进行对比,结果见图 9。

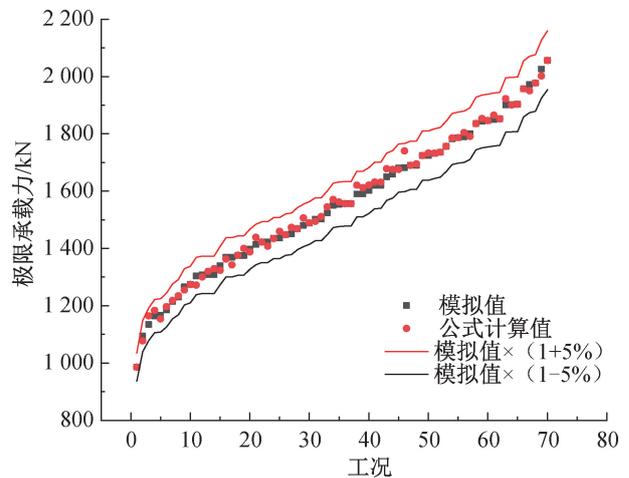


图 9 有限元模拟与公式计算对比图

Fig. 9 Comparison of finite element simulation and formula calculation results

## 3 结论

1) 冻融循环作用会影响 L 形 SRC 异形柱的力学性能与耐久性能,这种影响并不是线性的,随着冻融循环次数增加,结构的劣化程度会迅速增加。

2)冻融循环使 SRC 异形柱峰值荷载显著降低,在加载后期,由于混凝土失效,结构承载力大部分由型钢提供。结合有限元模拟结果,提高型钢强度与混凝土强度均可以改善冻融循环作用对结构的破坏。

3)通过延性变化可以侧面反映结构抗震性能受损情况,建议采用试验方式得出冻融循环后该类构件地震作用下的力学行为。

4)对有限元模拟结果进行回归分析,得到冻融循环作用下构件极限承载力退化系数计算式。通过此公式能较好地预测构件极限承载力随冻融循环次数变化情况,对实际工程具有参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 薛建阳,刘祖强,赵鸿铁,等. 型钢混凝土异形柱结构受力性能研究的发展现状[J]. 工业建筑,2014,44(3):134-146.
- [2] 张爱林,武保焕,刘学春. 实腹式配钢 L 形截面异形柱轴心受压承载力分析[J]. 工业建筑,2021,51(6):123-132+164.
- [3] 李克非,廉慧珍,邸小坛. 混凝土结构耐久性设计原则、方法与标准[J]. 土木工程学报,2021,54(10):64-71+96.
- [4] 何倍,杨振东,扬帆,等. 极端低温环境下混凝土力学性能及其演变机制研究进展[J]. 硅酸盐学报,2024,52(5):1698-1709.
- [5] LUO Q, LIU D, QIAO P, et al. Microstructural damage characterization of concrete under freeze-thaw action[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 27(10):1551-1568.
- [6] 董方方,朱谭谭,屈子健. 基于颗粒流的富水岩石冻融后拉伸力学行为研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(3):22-29.
- [7] 卢智,谢波,宋飞,等. 冻融循环作用下砂质黄土强度劣化特性及影响因素研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(4):106-112.
- [8] 张恺,王茂华,尹志刚,等. 冻融循环下混凝土力学性能及孔隙损伤劣化研究[J]. 建筑结构,2023,53(S2):1342-1346.
- [9] ZHANG K, ZHOU J, YIN Z G. Experimental study on mechanical properties and pore structure deterioration of concrete under freeze-thaw cycles[J]. Materials, 2021, 14(21):6568-6568.
- [10] NILI M, AZARIOON A, HOSSEINIAN M S. Novel internal-deterioration model of concrete exposed to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9):04017132.
- [11] WAWRZEŃCZYK J, MOLENDOWSKA A. Evaluation of concrete resistance to freeze-thaw based on probabilistic analysis of damage[J]. Procedia Engineering, 2017, 193:35-41.
- [12] LU J, ZHU K, TIAN L, et al. Dynamic compressive strength of concrete damaged by fatigue loading and freeze-thaw cycling[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152:847-855.
- [13] GAO S, PENG Z, GUO L, et al. Compressive behavior of circular concrete-filled steel tubular columns under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 166:105934.
- [14] 曹大富,富立志,杨忠伟,等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. 建筑材料学报,2013,16(1):17-23+32.
- [15] 蔡巍,李俊华,张森奇,等. 冻融循环后型钢混凝土柱轴压性能模拟分析[J]. 混凝土,2022(12):33-37+43.

(责任编辑 王利君)