

引用本文:吕学涛,张力强,张童,等.冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(2):40-49.

LYU Xuetao, ZHANG Liqiang, ZHANG Tong, et al. Analysis on axial compressive mechanical behavior of circular concrete-filled steel tube stub column under alternation of freeze-thaw cycle and acid rain corrosion[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 40-49.

DOI:10.19815/j.jace.2021.10043

冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析

吕学涛^{1,2}, 张力强³, 张童², 张玉琢⁴, 王锦力²

(1. 佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528000; 2. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 3. 甘肃电通电力工程设计咨询有限公司, 甘肃 兰州 730030; 4. 沈阳建筑大学 管理学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:基于材料强度折减及钢管壁厚折减的方法,对冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后圆钢管混凝土轴压力学性能采用有限元法进行了研究。基于合理的有限元分析模型,对冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后圆钢管混凝土柱的破坏模态、轴向荷载-位移关系、钢管与混凝土相互作用进行了分析,研究了含钢率、截面尺寸、钢管屈服强度、混凝土轴心抗压强度以及冻融循环-酸雨交替次数对试件轴压极限承载力的影响。结果表明:有限元模拟结果与试验结果吻合良好,验证了模型的有效性;冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后轴压圆钢管混凝土短柱的破坏模态与普通试件相似,轴向荷载-位移曲线变化趋势一致,试件均为塑性破坏;圆钢管混凝土轴压短柱随冻融循环-酸雨锈蚀交替次数的增加,材料性能劣化严重,外钢管对核心混凝土约束作用减弱,试件极限承载力明显下降。

关键词:冻融循环;酸雨锈蚀;圆钢管混凝土短柱;有限元分析

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)02-0040-10

Analysis on axial compressive mechanical behavior of circular concrete-filled steel tube stub column under alternation of freeze-thaw cycle and acid rain corrosion

LYU Xuetao^{1,2}, ZHANG Liqiang³, ZHANG Tong², ZHANG Yuzhuo⁴, WANG Jinli²

(1. School of Transportation, Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 3. Gansu Diantong Power Engineering Design Consulting Co., Ltd, Lanzhou 730030, Gansu, China; 4. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: Based on the methods of material strength reduction and steel tube thickness reduction, the axial compressive mechanical behavior of circular concrete-filled steel tube (CFST) stub columns under the alternation of freeze-thaw cycle and acid rain corrosion were studied by finite element method. Based on the reasonable finite element analysis model, the failure mode, axial

收稿日期: 2021-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808352, 51208246); 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室开放基金项目(XJKFJJ201902)

作者简介: 吕学涛(1979-), 男, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, E-mail: lxtwww30@sina.com。

load-displacement relationship and the interaction between the steel tube and concrete of circular CFST stub columns under the alternation of freeze-thaw cycle and acid rain corrosion were analyzed. The effects of steel ratio, section size, yield strength of steel tube, axial compressive strength of concrete and alternating time of freeze-thaw cycle and acid rain on the axial compressive ultimate bearing capacity were studied. The results show that the finite element simulation results are in good agreement with the experimental results, which verifies the validity of the model. The failure mode of axially loaded circular CFST stub column under the alternating action of freeze-thaw cycle and acid rain corrosion is similar to that of ordinary specimen. The variation trends of the axial load-displacement curves are consistent, and all specimens are plastic failure. With the increase of alternating time of freeze-thaw cycle and acid rain corrosion, the material properties deteriorate seriously and the restraint effect of steel tube on core concrete weakens, which causes the ultimate bearing capacity of specimen decreases significantly.

Key words: freeze-thaw cycle; acid rain corrosion; circular concrete-filled steel tube stub column; finite element analysis

0 引言

钢管混凝土结构是在钢管中填充混凝土形成且以钢管和核心混凝土共同承担荷载的一种组合结构^[1]。这种组合结构完美地发挥了钢材和混凝土材料各自的优异性能,使其具有很好的抗震性能、经济效益以及施工效益。基于其各方面优异的性能,钢管混凝土柱被广泛应用于大跨度组合桥梁、重工业厂房、大型输电塔等结构中^[2]。但是,当服役于桥梁、输电塔等结构的钢管混凝土柱长期处于外部环境侵蚀影响时,严重的表面锈蚀会导致外部钢管的力学性能下降^[3],在低温严寒地区服役的钢管混凝土柱虽然外部有钢管的包裹,但是由于内部核心混凝土中自由水的冻融破坏也会引起钢管混凝土柱的低温破坏^[4]。根据目前研究数据显示,自 2000 年以来,中国的酸雨污染情况由南向北逐渐扩大,并在大多城市变得比较严重^[5-6],而处于高纬度区域的东北、华北、西北地区每年的冻融循环次数基本都在百次以上^[7]。

因此,越来越多的学者对环境影响下的钢管混凝土柱展开了相关研究。Hou 等^[8-12]对 17 根方钢管混凝土柱在持续荷载和氯离子腐蚀作用下的性能退化进行了试验研究和理论分析,其腐蚀条件分别为无腐蚀、半浸入腐蚀和全浸入腐蚀,具体性能包括钢管混凝土柱的拉伸、压缩和弯曲,最后提出了氯离子腐蚀后钢管混凝土柱承载力简化计算公式。高山等^[13]对盐雾腐蚀后的 18 根圆钢管混凝土短柱进行了轴压试验,结果表明,盐雾腐蚀会减小钢管混凝土柱含钢率,改变钢材的力学性能。Yuan 等^[14-19]对江西酸雨腐蚀下钢管混凝土短柱进行了轴压试验研

究和理论分析,提出了酸雨腐蚀后钢管混凝土轴压短柱承载力简化计算公式。杨有福等^[20]设计了 20 根钢管混凝土短柱,考虑冻融循环次数和核心混凝土强度影响对试件进行轴压试验,提出了冻融循环作用后核心混凝土的本构关系,分析了冻融循环作用后钢管混凝土轴压短柱的承载力和组合弹性模量随冻融循环次数的变化关系。沈小盛等^[21]以钢管壁厚、冻融循环作用次数以及混凝土强度等级为设计参数,对冻融循环作用后圆钢管混凝土短柱的受力性能进行试验研究,结果表明:经冻融循环作用后的圆钢管混凝土短柱的轴压破坏形态与相应未经冻融循环作用短柱类似;提高混凝土强度等级能增加圆钢管混凝土短柱的初始刚度。

目前对于环境影响下的钢管混凝土柱的研究是基于单一因素,而钢管混凝土柱在服役阶段受复杂外部因素影响,多因素影响下钢管混凝土柱的研究报道较少。为此,本文以圆钢管混凝土短柱为研究对象,采用有限元分析方法,通过对外部钢管屈服强度和钢管壁厚的修正以及考虑冻融循环对核心混凝土的影响,建立冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后钢管混凝土短柱有限元模型。通过典型模型算例对冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后圆钢管混凝土短柱轴心受压全过程进行分析,深入研究其在冻融-锈蚀交替作用后的力学性能,揭示其受力机理,探讨影响其极限承载力的主要因素及其变化规律。

1 有限元模型的建立

1.1 材料的应力-应变关系模型

圆钢管混凝土柱由钢材和混凝土两种材料构成。在酸雨作用下,外部钢管因锈蚀不仅有效厚度

减少,而且其力学性能也会降低,因此采用文献[18]提出考虑外钢管锈蚀损伤影响的钢材应力-应变关系模型。冻融循环作用后,核心混凝土冻胀破坏,强度降低,但由于外部钢管的保护作用,酸雨锈蚀对核心混凝土没有影响。因此,本文以文献[1]中提出的混凝土的本构模型为基础,参考《普通混凝土长期性能和耐久试验方法》(GB/T 50082—2009)^[22]进行冻融循环试验时,试件的芯温和冻融循环时间与循环次数直接相关,且已有的文献^[20-21,23]研究中对于冻融循环后混凝土的本构模型建立基本都是考虑循环次数的影响,因此参照文献[23]中对混凝土本构的修正方法,提出考虑冻融循环次数作用的核心混凝土单轴应力-应变关系模型。

(1) 钢材应力-应变(σ_s - ϵ_s)关系模型

$$\sigma_s = \begin{cases} E_{se} & \epsilon_s \leq \epsilon_e \\ -A\epsilon_s^2 + B\epsilon_s + C & \epsilon_e < \epsilon_s \leq \epsilon_{e1} \\ f_{ye} & \epsilon_{e1} < \epsilon_s \leq \epsilon_{e2} \\ f_{ye} [1 + 0.6(\epsilon_s - \epsilon_{e2}) / (\epsilon_{e3} - \epsilon_{e2})] & \epsilon_{e2} < \epsilon_s \leq \epsilon_{e3} \\ 1.6f_{ye} & \epsilon_s > \epsilon_{e3} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\epsilon_e = 0.8f_{ye}/E_{se}$; $\epsilon_{e1} = 1.5\epsilon_e$; $\epsilon_{e2} = 10\epsilon_{e1}$; $\epsilon_{e3} = 100\epsilon_{e1}$; $A = 0.2f_y(\epsilon_{e1} - \epsilon_e)^2$; $B = 2A\epsilon_{e1}$; $C = 0.8f_{ye} + A\epsilon_e^2 - B\epsilon_e$; $E_{se} = (1 - 0.955\gamma)E_e$; $f_{ye} = (1 - 1.007\gamma) \cdot f_y$; $\gamma = \Delta t/t$, $\Delta t = t - t_e$; E_e 为钢材初始弹性模量; E_{se} 为锈蚀后钢材有效弹性模量; f_y 为钢材初始屈服强度; f_{ye} 为锈蚀后钢材有效屈服强度; γ 为锈蚀率; Δt 为因锈蚀钢管壁厚的减少值; t 为钢管初始壁厚; t_e 为锈蚀后钢管有效壁厚。

(2) 混凝土应力-应变关系模型

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

$$\left. \begin{aligned} x &= \epsilon/\epsilon_0, y = \sigma/\sigma_0 \\ \sigma_0 &= f'_c(1 - 0.065N_{ft}/100) \\ \epsilon_0 &= (1300 + 12.5f'_c + 800\zeta_e^{0.2}) \times 10^{-6} \\ \eta &= 2 \\ \beta &= (2.36 \times 10^{-5})^{0.25 + (\zeta_e - 0.5)^7} f'_c{}^{0.5} \times 0.5 \geq 0.12 \\ f'_c &= [0.76 + 0.2 + \lg(\frac{f_{cu}}{19.6})] f_{ck} \\ \zeta_e &= \alpha_e f_{ye} / f_{ck} \\ f_{ck} &= 0.88 \times 0.76 f_{cu} \\ \alpha_e &= A_{se} / A_c \end{aligned} \right\} (3)$$

式中: σ_0 和 ϵ_0 分别为混凝土应力-应变(σ - ϵ)关系的峰值应力及峰值应变; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强

度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; ζ_e 为钢管混凝土有效约束效应系数; α_e 为钢管有效含钢率; A_{se} 为钢管有效截面面积; A_c 为混凝土截面面积; N_{ft} 为构件所经历的冻融循环次数。

混凝土泊松比 ν 取 0.2, 混凝土弹性模量 E_c 、膨胀角 Ψ 、拉压子午面上第二应力不变量之比的值 K_c 及混凝土双轴抗压强度与单轴抗压强度的比值 f_{b0}/f_{c0} 的取值方法参考文献[24], 具体如式(4)~(7)所示, 流动偏角 e 取 0.1, 为提高收敛性, 黏度参数 μ 取 0.0005。

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

$$\Psi = \begin{cases} 56.3(1 - \zeta_e) & \zeta_e \leq 0.5 \\ 6.672e^{\frac{7.4}{\zeta_e}} & \zeta_e > 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

$$K_c = \frac{5.5}{5 + 2(f'_c)^{0.075}} \quad (6)$$

$$f_{b0}/f_{c0} = 1.5(f'_c)^{-0.075} \quad (7)$$

1.2 建模基本信息及参数选取

本文采用有限元软件 ABAQUS 进行建模分析。钢管采用三维壳单元 S4R, 网格为四边形单元, 在保证计算精度的前提下, 壳单元的厚度方向采用 9 个积分点的 Simpson 积分方法; 混凝土采用三维实体单元 C3D8R, 网格为六面体单元; 钢管与混凝土的接触方式采用面-面接触 (Surface-to-surface), 选择刚度较大的混凝土做主面 (Master surface), 相对变形较大的钢管做从面 (Slave surface), 其中法向为硬接触 (Hard contact), 切向摩擦因数 (Friction coeff) 取 0.3^[25]; 对于边界条件, 一端设为固接, 即约束全部 6 个自由度, 另一端采用位移加载方式, 即在 Z 方向上施加竖直位移, 同时约束其他 5 个自由度; 为提高计算收敛性, 防止应力集中, 模型的两端均设置成刚性面 (Rigid body), 其中分别选择每个端面的几何中心点 RP-1 及 RP-2 作为其参考点 (Reference point), 区域类型 (Region type) 分别选择每个参考点对应的端面。有限元模型网格划分和边界条件如图 1 所示。

1.3 模型验证

目前对于冻融循环和酸雨锈蚀两种因素共同作用后钢管混凝土柱的研究鲜有报道, 且冻融循环和酸雨锈蚀仅分别对混凝土和钢材的材料力学性能产生劣化影响, 因此从简化建模分析的角度出发, 模型验证时采用单一影响因素进行, 对于这两种因素的相互制约或者相互促进会在后续研究中开展试验分析研究。通过建立的模型, 分别对相关文献^[18,20]中

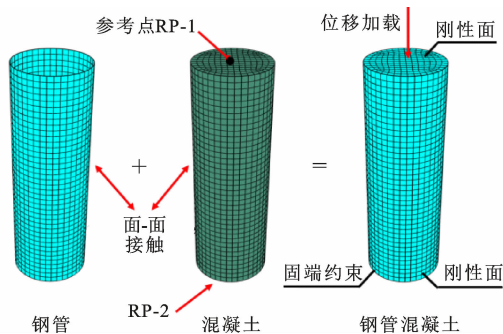


图 1 有限元模型网格划分和边界条件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mesh generation and boundary conditions of finite element model

单一因素影响的圆钢管混凝土轴压短柱进行冻融循环和酸雨锈蚀模拟验证,文献中冻融试验试件相关设计参数如表 1 所示,锈蚀试验试件相关设计参数如表 2 所示,其中 D 、 L 分别为试件截面直径及柱长, α 为初始含钢率, N_c 为试件承载力试验值。冻融和锈蚀分别作用后试件的极限承载力计算结果如表 3、4 所示,其中 N_c 为文献中有限元模拟值, N_b 为采用本文提出的本构关系得出的有限元模拟值。从计算结果可以看出,试件的 N_u/N_b 误差均控制在 10% 以内,而且 N_e/N_b 的平均值与 N_e/N_c 的平均值基本相等,证明本模型建立的合理性。

表 1 文献[20]冻融试件主要设计参数

Table 1 Main design parameters of freeze-thaw specimens in literature [20]

模型编号	D/mm	L/mm	t/mm	N_{ft}/mm	f_{cu}/MPa	f_y/MPa	α	N_c/kN
Cc2-0	89	270	1.89	0	63.7	396.3	0.091	588.5
Cc2-50	89	270	1.89	50	63.7	396.3	0.091	571.0
Cc2-100	89	270	1.89	100	63.7	396.3	0.091	579.0
Cc2-200	89	270	1.89	200	63.7	396.3	0.091	545.6
Cc2-300	89	270	1.89	300	63.7	396.3	0.091	560.0

表 2 文献[18]锈蚀试件主要设计参数

Table 2 Main design parameters of corroded specimens in literature [18]

模型编号	D/mm	L/mm	t/mm	$\Delta t/\text{mm}$	f_{cu}/MPa	f_y/MPa	$\gamma/\%$	N_c/kN
C-114-0	114	342	2.65	0.00	41.5	336.6	0.0	750
C-114-1	114	342	2.65	0.25	59.9	336.6	9.5	834
C-114-2	114	342	2.65	0.54	59.9	336.6	20.5	775
C-140-0	140	342	2.59	0.00	41.5	362.5	0.0	1 030
C-140-2	140	342	2.59	0.51	59.9	362.5	19.6	1 055

表 3 文献[20]冻融相关试件计算结果

Table 3 Calculation results of freeze-thaw related specimens in literature [20]

模型编号	D/mm	L/mm	t/mm	N_e/kN	N_c/kN	N_b/kN	N_e/N_c	N_e/N_b
Cc2-0	89	270	1.89	588.5	576.4	586.4	1.02	1.00
Cc2-50	89	270	1.89	571.0	574.5	573.9	0.99	1.00
Cc2-100	89	270	1.89	579.0	569.7	559.0	1.02	1.00
Cc2-200	89	270	1.89	545.6	555.1	556.2	0.98	0.99
Cc2-300	89	270	1.89	560.0	434.3	572.2	1.23	1.00
平均值							1.04	1.00
方差							0.012 0	0.000 4

表 4 文献[18]锈蚀相关试件计算结果

Table 4 Calculation results of corrosion related specimens in literature [18]

模型编号	D/mm	L/mm	t/mm	$\Delta t/\text{mm}$	N_e/kN	N_c/kN	N_b/kN	N_e/N_c	N_e/N_b
C-114-0	114	342	2.65	0.00	750	768.6	755.0	0.96	0.98
C-114-1	114	342	2.65	0.25	834	750.0	846.1	1.11	0.98
C-114-2	114	342	2.65	0.54	775	684.6	794.2	1.13	0.98
C-140-0	140	342	2.59	0.00	1 030	1 016.7	1 048.2	1.02	0.99
C-140-2	140	342	2.59	0.51	1 055	1 005.6	1 069.1	1.04	0.98
均值								1.05	0.98
方差								0.005 00	0.000 02

试件轴压荷载 N 与竖向应变 ε 以及轴压荷载 N 与轴向位移 Δ 曲线的验证如图 2、3 所示。可以看出,模拟曲线的走势与试验曲线基本吻合,试验曲线的峰值荷载和模拟曲线的峰值荷载基本一致。但一些试件的初始刚度值存在显著差异,主要体现在锈蚀试件模拟曲线的初始刚度值略高于试验曲线的初始刚度值,这是因为有限元建模是假定各材料均为理想状态,试件的锈蚀程度是理想的均匀锈蚀。而在试验过程中,试件的核心混凝土浇筑时可能会出现振捣不密实的情况,导致试件的性能降低;试验时轴向位移亦可能存在测量误差或者试验前试件存在不同程度的初始缺陷都会造成试件的力学性能降

低。从模拟曲线的下降段可以看出,与文献[18]、[20]中模拟曲线相比,本模型的有限元模拟曲线更接近于试验的实测曲线。

2 冻融循环-锈蚀交替作用后圆钢管混凝土轴压性能分析

2.1 典型算例模型

为研究冻融循环-酸雨锈蚀交替作用对圆钢管混凝土短柱轴压承载力的影响,设计一组圆钢管混凝土短柱有限元分析模型。模型的基本计算参数为:截面直径 D 为 400 mm,柱长 L 为 1 200 mm,核心混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}=40$ MPa,钢管屈服

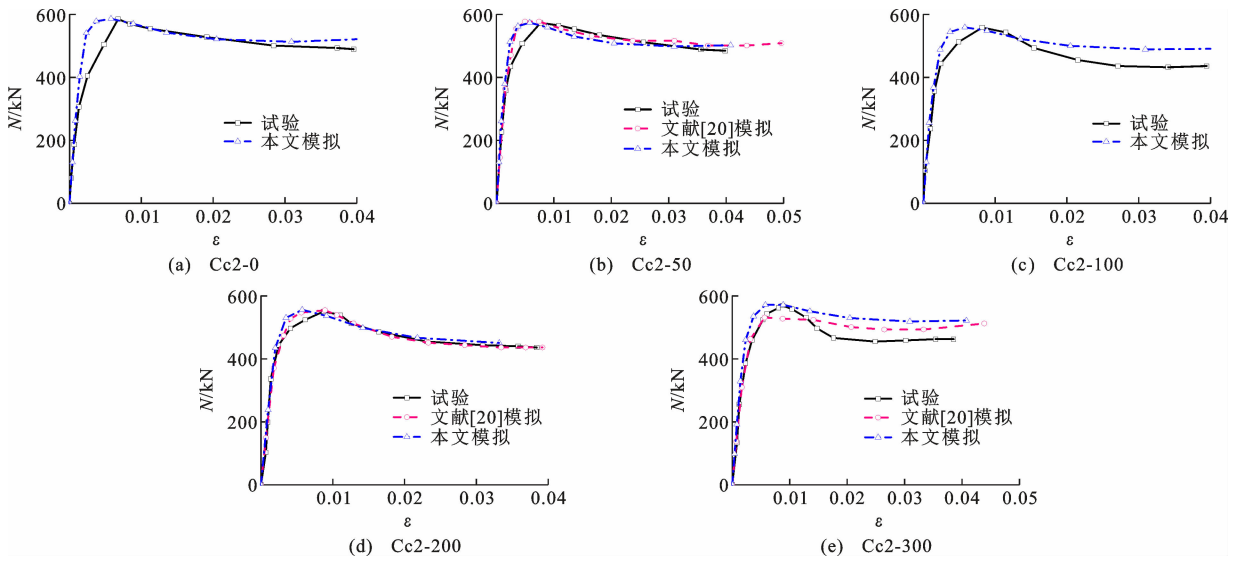


图 2 文献[20]冻融试件模拟验证

Fig. 2 Simulation verification of freeze-thaw specimens in literature [20]

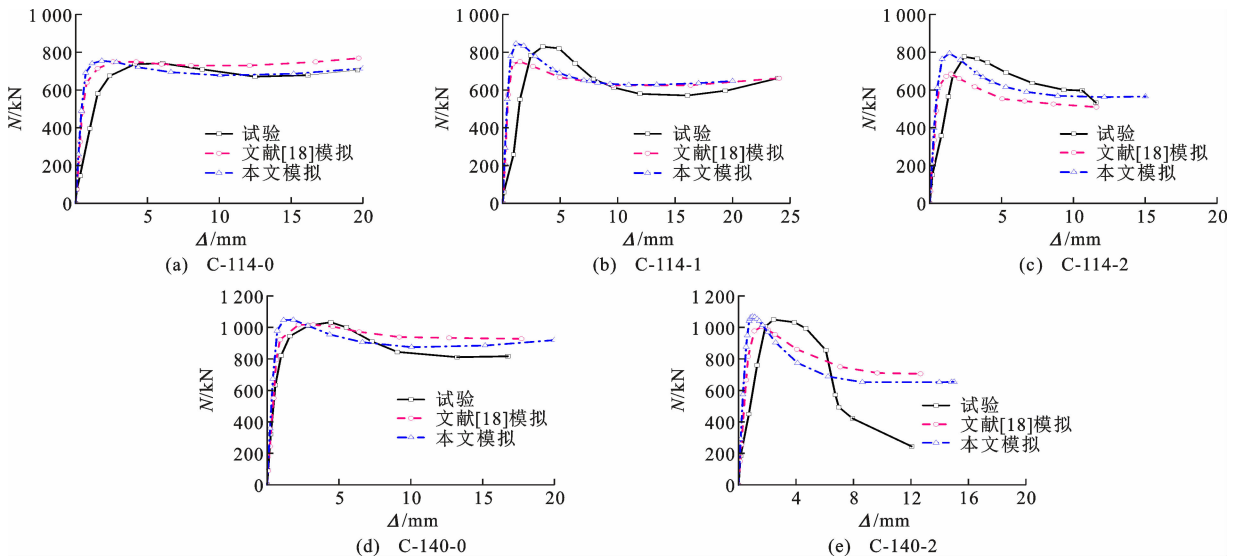


图 3 文献[18]锈蚀试件模拟验证

Fig. 3 Simulation verification of corroded specimens in literature [18]

强度 $f_y=345$ MPa,混凝土和钢材的泊松比分别取 0.2 和 0.3,冻融循环-酸雨锈蚀交替次数 $P=1\sim 5$ 。为了方便计算和验证,假设在一个交替过程中的锈蚀率 γ 为 10%,冻融次数 N_m 为 100,即交替模拟中试件受酸雨锈蚀 10%,同时冻融循环 100 次。

2.2 破坏形态分析

通过建立的有限元模型,对冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后圆钢管混凝土短柱的轴压力学性能进行分析,试件的破坏模态如图 4 所示。可以看出,由于外部圆形钢管对整个柱子的有效约束作用较强,冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后圆钢管混凝土短柱的轴压破坏形式和普通圆钢管混凝土短柱的轴压破坏形式基本一致,都是典型的腰鼓形破坏。但是随着交替次数的增加,冻融循环和酸雨锈蚀作用逐渐增大,导致试件外包钢管壁厚的减少和核心混凝土的性能降低,钢管对核心混凝土的约束效应降低,导致试件的横向变形逐渐增大。从图 4 中可以看出,当交替次数从 $P=1$ 逐渐增大到 $P=5$ 时,试件的横向变形也越来越大,横向变形从开始的 37.01 mm 增加到 62.36 mm,增幅达到 68.4%。由此可以看出,冻融循环-酸雨锈蚀交替作用对圆钢管混凝土的横向变形影响较大。

2.3 钢管与核心混凝土承载力分析

利用有限元软件计算得到试件的轴向荷载-位移曲线以及核心混凝土和钢管单独承担荷载时位移变化曲线如图 5 所示。试件的荷载-位移曲线基本可以分为 4 个阶段,弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和软化阶段,对应图 5 中的 OA 、 AB 、 BC 、 CD ,其中 A 点为钢管达到弹性极限, B 点为钢管达到屈服极限, C 点为试件达到峰值承载力, D 点为轴向位移达到 20 mm。从图 5 中可以看出,试件和核心混凝土的荷载-位移曲线都有很好的下降段,核心混凝土的变形曲线和试件的变形曲线走势基本一致,在试件达到峰值荷载时,核心混凝土也达到峰值承载力。钢管在达到屈服极限进入塑性阶段以后,钢管的应力开始逐渐降低,达到软化阶段后,钢管的应力逐渐保持不变。试件轴向位移达到 D 点时,基本达到了轴向变形极限,在 D 点后,试件的荷载-位移曲线基本一致,保持平滑状态,随着位移的增长,荷载降低幅度减小。总体来看,随着交替次数的增加,试件的极限承载力逐渐降低,同时核心混凝土和钢管单独承载力也逐渐降低,钢管的承载力降低幅度相比较核心混凝土的承载力降低较快,同时随着交替次数的增大,钢材的屈服点逐渐提前。

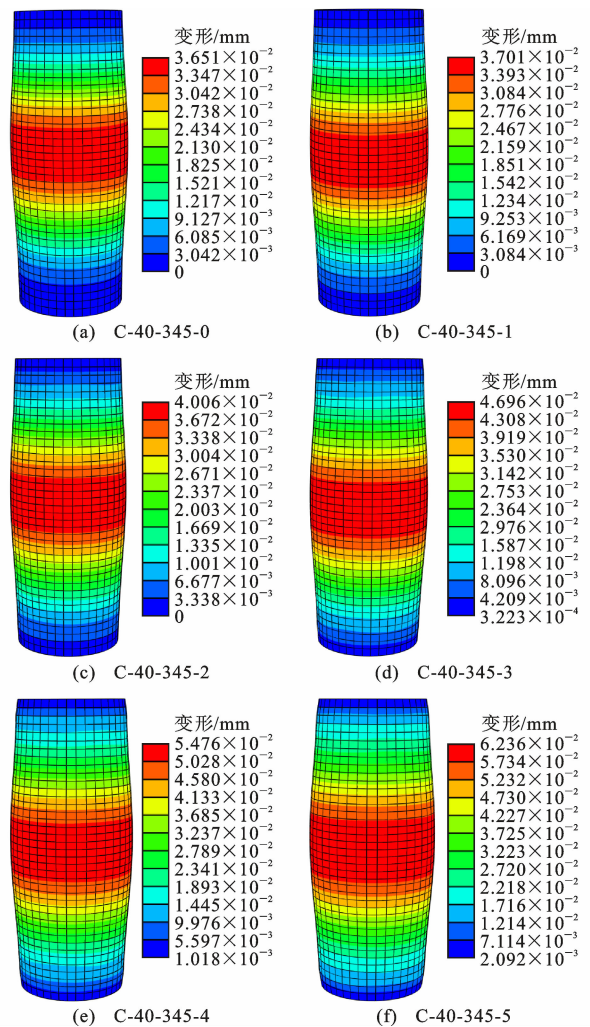


图 4 不同交替次数后试件破坏模态

Fig. 4 Failure mode of specimens after different alternating times

在试件达到峰值荷载时,核心混凝土和钢管的承重占比如表 5 所示。试件在经历冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后,钢管和核心混凝土的性能逐渐降低,导致试件的整体承载力逐渐降低。随着交替次数从 0 次增加到 5 次,钢管的承载力占比逐渐降低,从 34.1% 减小到 11.9%,降低幅度较大,主要因为交替作用后,外部钢管的力学性能降低较大,导致钢管的承载力下降;而核心混凝土在交替作用后,承载力占比逐渐增大,主要因为核心混凝土受外部钢管的包裹,交替作用后混凝土的力学性能降低较小,由于外部钢管的承载力下降,从而使核心混凝土在试件的总承载力占比逐渐增大。

2.4 钢管与核心混凝土相互作用

图 6 为试件加载至峰值荷载时钢管的法向约束力分布情况,由图 6 可知,随着试件经受冻融循环-酸雨锈蚀交替次数的增加,钢管对核心混凝土的约

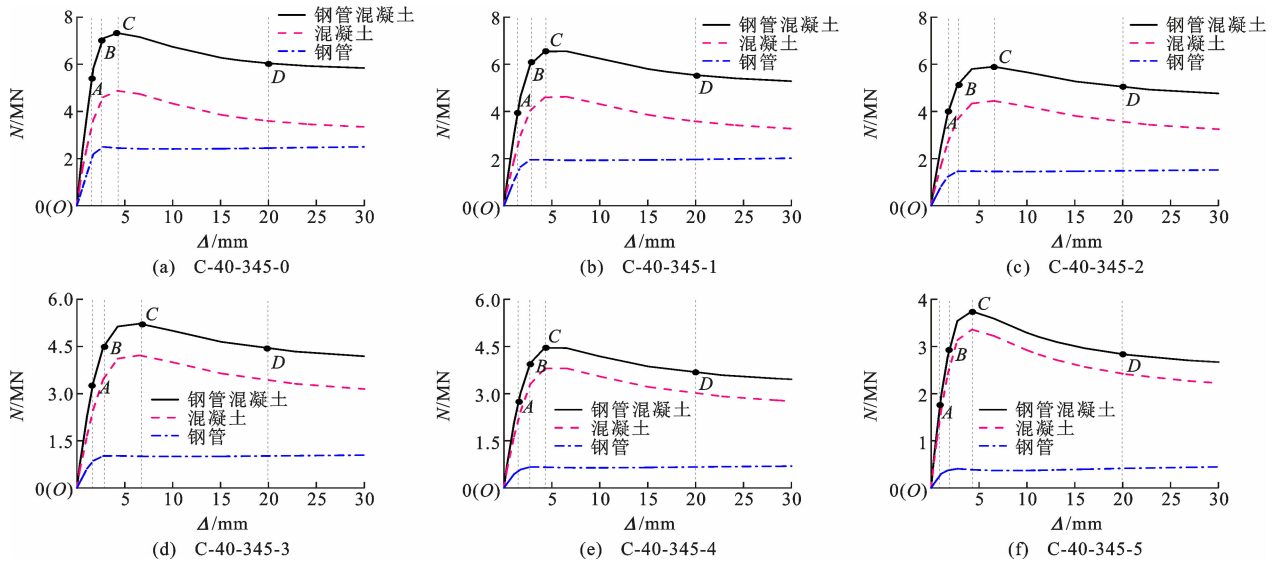


图5 核心混凝土和钢管荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of core concrete and steel tube

表5 峰值荷载时混凝土和钢管承重占比

Table 5 Proportion of bearing capacity of concrete and steel tube under peak load

试件编号	$(N_{uc}/N_u)/\%$	$(N_{us}/N_u)/\%$
C-40-345-0	66.6	34.1
C-40-345-1	70.5	30.1
C-40-345-2	75.4	25.7
C-40-345-3	80.7	20.0
C-40-345-4	85.4	15.6
C-40-345-5	89.7	11.9

注: N_{uc} 为达到极限荷载时混凝土承载力; N_u 为钢管混凝土极限承载力; N_{us} 为达到极限荷载时钢管承载力。

束力逐渐减小, 主要是因为锈蚀导致钢管壁厚减小, 其力学性能降低, 对核心混凝土的约束效应降低。试件在经受 0 次到 2 次交替作用后, 钢管的约束力变化较小, 基本在试件的半高位置约束力较大, 但随着交替次数的增加, 3 次到 5 次交替作用后, 钢管的约束力减少较大, 最大约束力集中在试件的端部。主要是因为随着交替次数的增加, 外部钢管的壁厚和力学性能降低, 核心混凝土在冻融循环作用后收缩膨胀, 导致钢管对核心混凝土的约束力下降。

3 参数分析

利用建立的有限元模型进行参数分析, 研究含钢率 α 、截面直径 D 、钢管屈服强度 f_y 、混凝土轴心抗压强度 f_{cu} 及交替次数 P 对试件极限承载力的影响。为方便参数分析及后续设计方法的提出, 特假定在本参数分析中, 一个交替循环次数 (P) 由冻融循环 ($N_{fi}=100$) 和酸雨锈蚀 ($\gamma=10\%$) 构成。试件

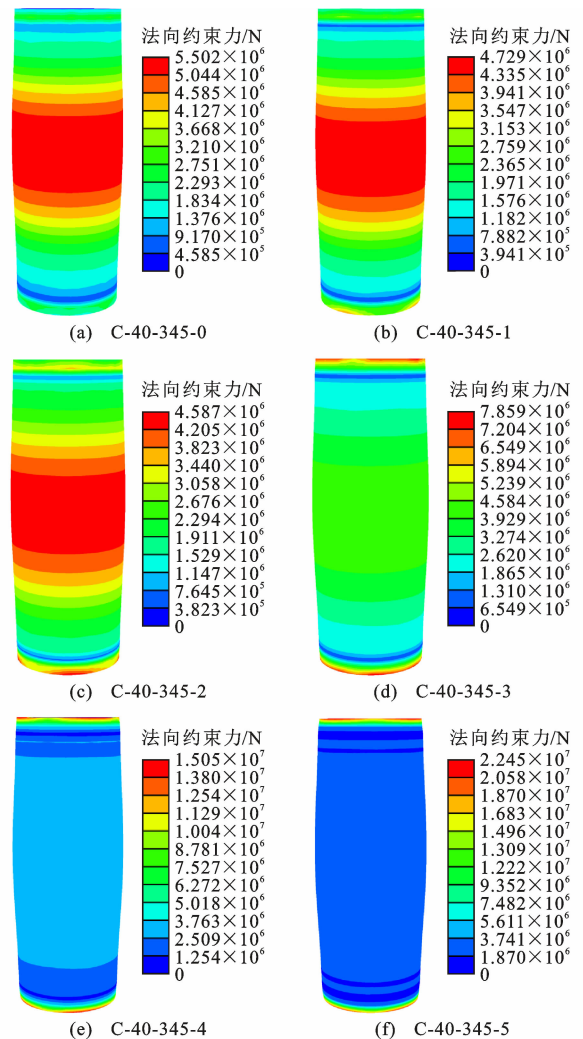


图6 峰值荷载时钢管与混凝土法向约束力分布

Fig. 6 Distribution of normal binding force between steel tube and concrete under peak load

基本参数为: $D=400\text{ mm}$, $t=4\text{ mm}$, $L=1\ 200\text{ mm}$, $\alpha=0.04$, $f_{cu}=40\text{ MPa}$, $f_y=345\text{ MPa}$ 。计算参数的范围分别为: $D=200\sim 500\text{ mm}$, $\alpha=0.02\sim 0.09$, $f_{cu}=30\sim 60\text{ MPa}$, $f_y=235\sim 420\text{ MPa}$, $P=0\sim 5$ 。

图7为不同因素对试件极限承载力的影响规律。由图7(a)可以看出,在不同的冻融循环-酸雨锈蚀交替次数作用后,含钢率的变化对试件的极限承载力影响较大,具体表现为随着试件含钢率的增大,试件的极限承载力增大,这主要是因为含钢率增大,导致试件的套箍系数增大,钢管混凝土柱外表面的钢材对核心混凝土的约束效应增强,试件的极限承载力也随之增大。由图7(b)~(d)可以看出,在不同的交替次数作用后,试件的极限承载力随着试件截面尺寸、材料强度的增大而增大。但是它们的影响效应又有所不同,具体体现在曲线的上升幅度差距较大,截面尺寸的变化对试件的承载力影响比材料强度的影响大,尤其是在交替次数较大时,材料强度的影响明显比截面尺寸小,主要是因为随着冻融循环-酸雨锈蚀交替次数的增大,材料性能发生劣化,强度下降。因此,材料强度已经不是影响试件极限承载力的主要因素。由图7(e)可以看出,随着交替次数的增大,试件的极限承载力基本呈线性下降,主要是因为随着交替次数的增大,核心混凝土和外部钢管的材料性能降低,钢管壁厚减小,实际约束效应系数减小,导致钢管对核心混凝土的约束效应较低,从而使得试件的整体力学性能降低。

4 结语

(1)根据本文提出的酸雨锈蚀作用后钢材本构关系和冻融循环作用后混凝土的本构关系,建立了冻融和锈蚀作用后圆钢管混凝土轴压短柱有限元模型,通过模型验证,数值模拟结果与已有试验结果总体吻合良好。

(2)圆钢管混凝土轴压短柱在经受冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后的破坏模态与正常作用后的破坏模式基本类似,试件的破坏形式均呈沿柱高的腰鼓式破坏,钢管沿着柱高向两端逐渐鼓曲,核心混凝土压溃破坏。

(3)冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后圆钢管混凝土轴压短柱荷载-位移曲线走势基本一致,分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和软化阶段。随着交替次数的增大,外部钢管的屈服点提前,核心混凝土承担的承载力逐渐增大,试件的极限承载力降低;无论试件是否承受冻融循环-酸雨锈蚀交替作用,后期均

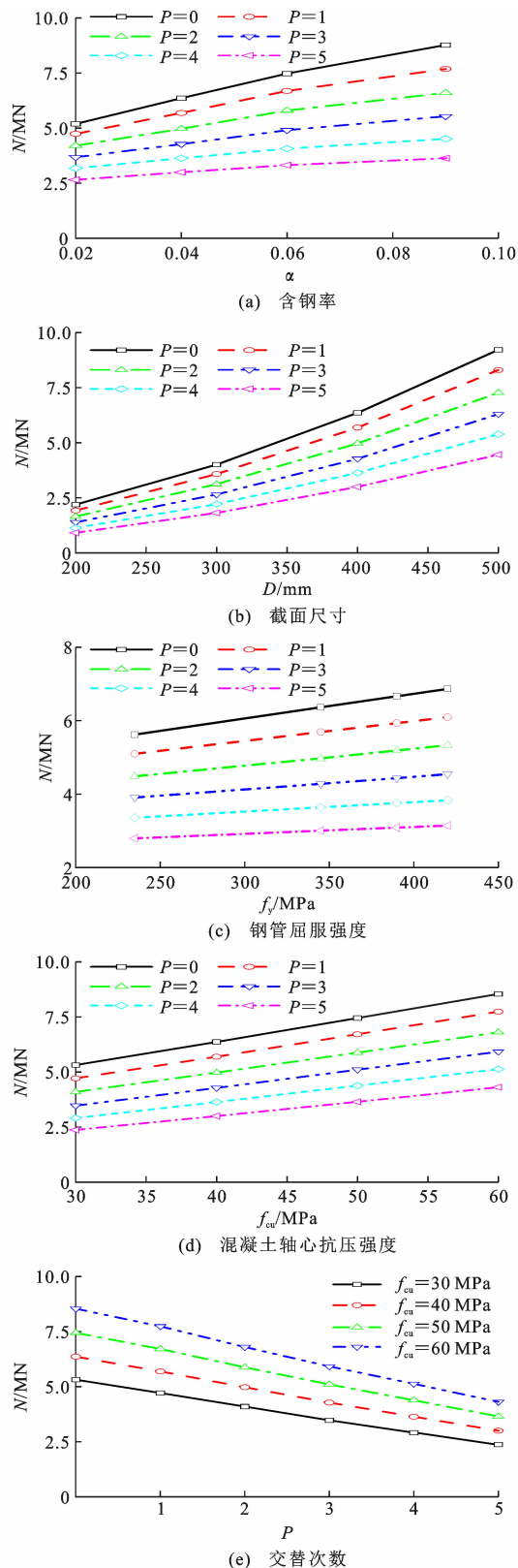


图7 不同参数对极限承载力影响规律

Fig. 7 Influence law of different parameters on ultimate bearing capacity

具有稳定的承载力,破坏均属于塑性破坏。

(4)对冻融循环-酸雨锈蚀交替作用后影响圆钢

管混凝土轴压短柱极限承载力的参数进行分析,发现含钢率、截面尺寸、材料强度、交替次数对试件的极限承载力影响很大,具体表现为随着截面尺寸、含钢率的增加,试件极限承载力增强,随着冻融循环-酸雨锈蚀交替次数的增大,试件极限承载力降低。

参考文献:

References:

- [1] 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.
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures — theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press,2016.
- [2] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R, et al. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures; members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 211-228.
- [3] WANG Y D, XU S H, WANG H, et al. Predicting the residual strength and deformability of corroded steel plate based on the corrosion morphology[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 777-793.
- [4] 王玉银, 王庆贺, 刘昌永. 钢管混凝土柱低温开裂典型事故分析[C]//中国钢结构协会. 中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十三次学术会议论文集. 广州:中国钢结构协会, 2011: 19-23.
WANG Yuyin, WANG Qinghe, LIU Changyong. Analysis of typical frost heave accidents of concrete filled steel tubes[C]// China Steel Construction Society. Proceedings of the 13th academic conference of steel-concrete composite structure branch of China steel construction society. Guangzhou: China Steel Construction Society, 2011: 19-23.
- [5] ZHANG X Y, JIANG H, ZHANG Q X, et al. Chemical characteristics of rainwater in northeast China, a case study of dalian[J]. Atmospheric Research, 2012, 116: 151-160.
- [6] LIU M X, SONG Y, ZHOU T, et al. Fine particle pH during severe haze episodes in northern China[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(10): 5213-5221.
- [7] 李金玉, 彭小平, 邓正刚, 等. 混凝土抗冻性的定量设计[J]. 混凝土, 2000(9): 61-65.
LI Jinyu, PENG Xiaoping, DENG Zhenggang, et al. Quantitative design on the frost-resistance of concrete [J]. Concrete, 2000(9): 61-65.
- [8] HOU C C, HAN L H, WANG Q L, et al. Flexural behavior of circular concrete filled steel tubes (CFST) under sustained load and chloride corrosion[J]. Thin-walled Structures, 2016, 107: 182-196.
- [9] HAN L H, HUA Y X, HOU C, et al. Circular concrete-filled steel tubes subjected to coupled tension and chloride corrosion[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(10): 04017134.
- [10] HAN L H, HOU C C, WANG Q L. Behavior of circular CFST stub columns under sustained load and chloride corrosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103: 23-36.
- [11] HOU C, HAN L H, ZHAO X L. Full-range analysis on square CFST stub columns and beams under loading and chloride corrosion [J]. Thin-walled Structures, 2013, 68: 50-64.
- [12] HAN L H, HOU C, WANG Q L. Square concrete filled steel tubular (CFST) members under loading and chloride corrosion; experiments [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 71: 11-25.
- [13] 高山, 彭震, 郭兰慧. 盐雾腐蚀下钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增1): 214-219.
GAO Shan, PENG Zhen, GUO Lanhui. Experimental study on axial performance of concrete-filled steel tubular stub column under salt spray corrosion [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (S1): 214-219.
- [14] YUAN F, CHEN M C, HUANG H. Square CFST columns under cyclic load and acid rain attack; experiments [J]. Steel and Composite Structures, 2019, 30(2): 171-183.
- [15] YUAN F, et al. Circular concrete filled steel tubular (CFST) columns under cyclic load and acid rain attack: test simulation [J]. Thin-walled Structures, 2018, 122: 90-101.
- [16] XIE L, CHEN M C, SUN W, et al. Behaviour of concrete-filled steel tubular members under pure bending and acid rain attack; test simulation[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(1): 240-253.
- [17] CHEN M C, WEN Q Q, ZHU Q, et al. Simulation of corrosion process for concrete filled steel tubular columns with the cellular automata method [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 82: 298-307.
- [18] 陈梦成, 林博洋, 黄宏. 锈蚀圆钢管混凝土短柱轴压承载力研究[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(1): 73-81.
CHEN Mengcheng, LIN Boyang, HUANG Hong. Research on the bearing capacity of corroded circular concrete filled steel tubular short columns [J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(1): 73-81.
- [19] 陈梦成, 方苇, 黄宏, 等. 锈蚀圆钢管再生混凝土

- 轴压短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12):138-146.
- CHEN Mengcheng, FANG Wei, HUANG Hong, et al. Axial compressive behavior of recycled concrete filled corroded circular steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (12): 138-146.
- [20] 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.
- YANG Youfu, CAO Kai, YANG Zhiquan, et al. Mechanical properties of concrete-filled steel tubular stubs after freezing and thawing cycles under axial loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3):51-58.
- [21] 沈小盛,张晓勇,方 焰,等. 冻融循环后圆钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5):105-114.
- SHEN Xiaosheng, ZHANG Xiaoyong, FANG Yan, et al. Experimental research on axial compression behavior of circular CFST short columns after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5):105-114.
- [22] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete; GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [23] YANG Y F, CAO K, WANG T Z. Experimental behavior of CFST stub columns after being exposed to freezing and thawing [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 89:7-21.
- [24] TAO Z, WANG Z B, YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89:121-131.
- [25] HAN L H, YAO G H, TAO Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion [J]. Thin-walled Structures, 2007, 45(1):24-36.