

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220105004

氯盐腐蚀圆钢管再生混凝土短柱轴压承载力分析*

惠存^{1,2}, 李永刚¹, 李克¹, 曹源菁¹, 海然^{1,2}

(1. 中原工学院建筑工程学院, 河南 郑州 450007; 2. 河南省环境岩土工程与地下工程灾害控制工程研究中心, 河南 郑州 450007)

摘要: 为研究氯盐腐蚀圆钢管再生混凝土短柱轴压承载性能的变化规律, 设计了16个试件并完成轴压试验。在试验研究的基础上根据极限平衡条件, 提出了氯盐腐蚀条件下钢管再生混凝土短柱轴压承载力的计算公式, 选取不同的侧压系数进行对比优化; 采用国内外常用规范对试件承载力进行计算, 将计算值与试验值进行对比并提出使用建议。结果表明给出的侧压系数建议值与试验结果吻合较好, 通过折减壁厚的方法计算承载力是可靠的, 对氯盐腐蚀圆钢管再生混凝土柱的理论研究和工程应用有一定的指导意义。

关键词: 圆钢管再生混凝土; 氯盐腐蚀; 轴压承载力; 极限平衡理论; 承载力计算方法

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1092-08

Analysis on Axial Compressive Load Bearing Capacity of Circle Recycled Concrete Filled Steel Tube Short Columns with Chloride Salt Corrosion

HUI Cun^{1,2}, LI Yonggang¹, LI Ke¹, CAO Yuanjing¹, HAI Ran^{1,2}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

2. Research Center of Environmental Geotechnical Engineering and Underground Engineering Disaster Control Engineering in Henan Province, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to study the change rule of axial compressive load bearing capacity of recycled concrete filled with steel tube short columns with chloride salt corrosion, the authors designed 16 specimens and completed the axial compression test. Based on the tests, the calculation formula of the axial compressive load bearing capacity of the specimens was put forward according to the limit equilibrium condition, and different lateral pressure coefficients were selected and optimized. The load bearing capacity of the specimens is calculated according to the commonly used codes at home and abroad, and the calculated value is compared with the test value, and the application suggestions are put forward. The results show that the recommended value of the lateral pressure coefficient is in good agreement with the test results, and the load bearing capacity calculated by reducing the wall thickness is reliable. The finding has certain guiding significance for the theoretical research and engineering application of circle recycled concrete filled steel tube short columns with chloride salt corrosion.

* 收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(52208226)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2019GGJS147)资助

作者简介: 惠存(1987—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事高性能混凝土材料和结构性能研究。

E-mail: hcun@zut.edu.cn

Keywords: circle recycled concrete filled steel tube short columns; chloride salt corrosion; axial compressive load bearing capacity; limit equilibrium theory; load bearing capacity calculation method

0 引言

再生混凝土是将老旧建筑物拆除之后对废弃的混凝土进行破碎加工,再按照一定比例替代天然骨料的新型环保建筑材料^[1];这种材料不仅可以实现建筑垃圾资源化利用,减少天然骨料使用,还为建筑垃圾处理提供了新途径。然而在实际使用过程中,再生混凝土往往会受到腐蚀介质侵蚀,产生不利的影响。基于此,Y. G. Tian等^[2]研究了氯化物腐蚀条件下再生骨料混凝土的力学和界面性能,结果表明氯盐溶液对再生骨料和新拌砂浆的早期界面粘结性有一定的促进作用,但随着龄期增加,混凝土内部腐蚀产物增加,导致后期强度降低,界面粘结性变差。F. Xie等^[3]研究了硫酸盐侵蚀下现浇再生骨料混凝土(CRAC)的力学性能和耐久性,结果表明再生骨料取代率对CRAC的力学性能和抗硫酸盐侵蚀性能有显著影响,氯化物的存在会显著阻碍硫酸盐的扩散,延缓CRAC的劣化。钢管混凝土是一种组合结构,钢管对内部混凝土形成有效约束,使混凝土处于三向受力状态,具有更高的承载和变形性能,同时混凝土的存在可以有效阻止钢管屈曲,充分发挥钢管和再生混凝土的优势^[4-5]。总的来说,再生混凝土符合我国所倡导的绿色环保理念,相对于普通钢管混凝土结构,钢管再生混凝土的力学性能和破坏形态相似,承载性能良好,钢管再生混凝土结构应用前景广泛。

基于钢管混凝土结构良好的力学性能和当前绿色环保的发展要求,结合结构可能遭受的外界环境影响,国内外已有专家学者对受到不利作用的钢管混凝土结构进行较多研究。L. H. Han等^[6]和Y. X. Hua等^[7]研究了方形钢管混凝土短柱在持续荷载和氯离子腐蚀作用下的力学性能,发现腐蚀程度和持续荷载对钢管混凝土试件的极限强度和延性有显著影响,较高的持续荷载或腐蚀程度导致试件的承载能力和延性大幅度降低。黄宏等^[8-9]研究了酸雨腐蚀后圆钢管再生混凝土柱的偏压性能,结果表明采用壁厚折减方法来考虑酸雨腐蚀对圆钢管混凝土偏压构件承载力的影响是合理的,有限元模型

与实际现象吻合较好。陈宗平等^[10]研究了高温后钢管再生混凝土短柱的轴压性能,探讨了高温后钢管再生混凝土轴压极限承载力的计算方法。陈梦成等^[11]研究了酸雨环境下的方钢管再生混凝土短柱轴压性能,并采用折减壁厚对其承载力进行验算,计算结果与试验吻合度较高。杨有福等^[12]研究了不同长宽比和再生骨料取代率的矩形钢管再生混凝土短柱的轴压性能,并利用有限元软件进行分析,模拟结果与试验结果吻合较好。陈鹏等^[13]进行了圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压性能试验,并利用有限元软件建立静力计算模型,两者吻合较好。尽管已有专家学者对钢管混凝土结构进行了较多的试验研究和分析,但其在氯盐腐蚀环境下的轴压承载性能研究还不够系统,仍需深入研究。

为研究钢管再生混凝土短柱在不同程度氯盐腐蚀下的力学性能变化,完成了16个钢管再生混凝土柱试件轴压试验。在试验的基础上对氯盐腐蚀后钢管再生混凝土短柱的轴压极限承载能力进行研究,推导了其轴压承载力计算的公式,并采用规范公式对其承载能力进行计算和对比分析,为其工程应用提供理论支撑。

1 试验概况

1.1 试验设计及试验材料

为研究不同腐蚀程度下钢管再生混凝土短柱轴压承载性能变化,本文设计了16根轴心受压试件,包括1根圆空钢管试件和15根圆钢管再生混凝土试件。所有试件长280 mm,钢管外径114 mm,再生骨料取代率为50%,其他参数见表1,其中试件编号为RCM-N,RC代表再生混凝土(M代表强度等级,N代表理论腐蚀程度), f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度, η_w 为理论腐蚀率, η_{w1} 为实测腐蚀率,混凝土配合比见表2。

本文腐蚀率为实测钢管损失质量除以钢管总质量,壁厚折减是将钢管损失质量通过近似计算折减为壁厚损失量,即壁厚折减量,故腐蚀率是依据壁厚折减量来确定的^[14]。本文结合两种方式综合

表1 试件设计参数

Table 1 List of specimen design parameters

试件编号	f_{cu}/MPa	$\eta_w/\%$	$\eta_{wi}/\%$
ST-4	0	0	0
RC30-00	37.66	0	0
RC45-00	46.23	0	0
RC60-00	54.88	0	0
RC30-05	37.66	5	4.93
RC45-05	46.23	5	5.07
RC60-05	54.88	5	4.93
RC30-10	37.66	10	9.98
RC45-10	46.23	10	9.96
RC60-10	54.88	10	9.99
RC30-15	37.66	15	15.02
RC45-15	46.23	15	15.10
RC60-15	54.88	15	15.01
RC30-20	37.66	20	20.01
RC45-20	46.23	20	19.97
RC60-20	54.88	20	19.98

表2 再生混凝土配合比

Table 2 Mix ratio of recycled concrete

编号	水灰比	砂率	减水剂	各组分材料配合比/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)				
				水泥	水	天然骨料	再生骨料	砂
RC30	0.60	0.38	6/1 000	400	240	545	545	670
RC45	0.41	0.36	6/1 000	485	200	543	543	612
RC60	0.36	0.36	5/1 000	530	185	537	537	610

取值,一种是通过试件腐蚀前、后质量损失量与原始质量的比值推算均匀腐蚀后试件的壁厚损失量,见下式(1);另一种是通过游标卡尺直接测量腐蚀前、后的钢管直径,进而得到钢管壁厚的损失量,见式(2)。

$$\beta = \frac{\Delta m}{m} = \frac{2R \cdot \Delta t - (\Delta t)^2}{2R \cdot t - t^2} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\Delta t}{t} \quad (2)$$

式中, m 为钢管初始质量; Δm 为腐蚀后钢管质量的减少量; R 为钢管初始半径; t 为钢管初始壁厚; Δt 为腐蚀后钢管壁厚的减少量。

本文钢管采用壁厚为4 mm的Q235无缝钢管,参考规范[15]对其进行材性试验,弹性模量为 2.07×10^5 MPa,屈服强度为330.74 MPa,极限强度为415.04 MPa,伸长率为28.80%。本试验所采用的粗骨料由天然骨料和再生骨料组成,二者占比均

为50%,其中天然骨料为5~20 mm连续级配的碎石(表观密度为 2.61 g/cm^3 、堆积密度为 1.56 g/cm^3 、吸水率为0.6%、含水率为0.5%),再生粗骨料为许昌金科资源再生股份有限公司生产的5~20 mm连续级配的再生骨料(表观密度为 2.55 g/cm^3 、堆积密度为 1.46 g/cm^3 、吸水率为4.1%、含水率为1.8%)。

1.2 加载方案

先通过通电加速腐蚀完成各试件的腐蚀试验,如图1所示,本试验采用全浸泡法进行通电腐蚀,试验前将不需要腐蚀的部位(如盖板等)采用环氧树脂密封,待环氧树脂干燥后称重并记录,然后将试件完全浸入预先配制的腐蚀溶液中,试验过程中严格控制电流为5.1 A,并使用氢氧化钠溶液调整保持腐蚀液pH值,使其稳定在8.2,理论通电时间根据法拉第定律确定(腐蚀程度为5%、10%、15%、20%的试件理论通电时间分别为75.35、151.17、226.52、301.89 h),为避免过度腐蚀,在试验过程中定期取出试件,去除表面浮锈,待清洗干燥后测量试样重量,并测量预设的5个参考点直径变化,以试件重量的变化为主要参考,直径的变化为次要参考,综合考虑得出腐蚀程度。腐蚀试验完成后进行轴压试验,如图2所示;测点布置如图3所示。加载分为预加载和正式加载:根据规范公式计算出极限荷载,预加载计算极限荷载5%,保持1 min;正式加载时直接加载至极限荷载的30%,之后每级增加量为极限荷载的5%并保持1 min,70%极限荷载前为荷载控制,加载速率为3 kN/s;70%极限荷载后采用位移加载控制,每级增加位移2 mm,加载速度为0.6 mm/min,直到试件破坏或荷载值下降至极限荷载的85%,试验结束。



图1 腐蚀试验

Fig.1 Corrosion test

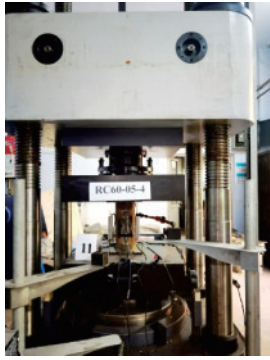


图2 轴压试验

Fig.2 Axial compression test

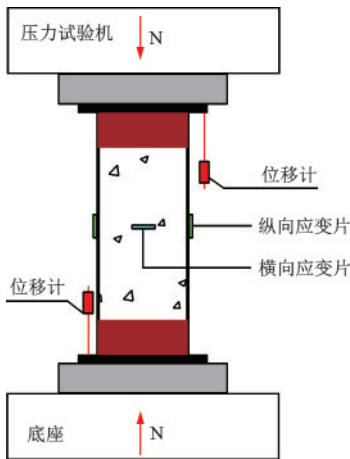


图3 测点布置

Fig.3 Layout of measuring points

2 极限平衡理论及计算结果分析

2.1 基本假定

分析过程中采用如下假定：

- (1)符合平截面假定,且其应变场轴向对称；
- (2)考虑到钢管壁厚较薄,径向应力不大,可忽略其径向应力,并假设横向应力沿壁厚均匀分布；
- (3)钢材服从 Von Mises 屈服条件。对于约束状态下再生混凝土材料的应力应变关系,本文采用 Richart 模型^[16]：

$$\begin{cases} f'_c = f_c + k_1 p \\ \epsilon'_{co} = \epsilon_{co} + k_2 p / f_c \end{cases} \quad (3)$$

式中, f_c 、 ϵ_{co} 分别为再生混凝土无侧压轴心抗压强度及其极限应变； f'_c 、 ϵ'_{co} 分别为再生混凝土有侧压的轴心抗压强度及其极限应变； k_1 、 k_2 均为侧压系数； p 为外套钢管约束力。

相关研究表明 k_1 取值范围为 3~6, 一般取 $k_1 =$

4^[17], 本文对 k_1 取值进行优化分析。

参考文献[4], 根据极限平衡理论推导, 考虑壁厚折减的钢管再生混凝土柱轴压承载力计算公式如下：

$$N = A_c f_c \left(1 + \frac{(k_1 - 1)^2 + 6}{\sqrt{36 + 3(k_1 - 1)^2}} \xi \right) \quad (4)$$

式中, $\xi = A_s f_y / (A_c f_c)$ 为构件的约束效应系数； A_c 为混凝土截面面积。

2.2 参数分析

由式(4)可知, 钢管再生混凝土短柱的轴压承载力主要和再生混凝土面积与强度以及侧压系数有关, 另外, k_1 值不同对计算结果影响较大, 本文对其取值进行优化分析, 结果见表 3, 由表 3 可知：

(1)随着腐蚀程度的提高, 同一强度等级下的钢管再生混凝土短柱轴压承载力下降幅度逐渐增大。这种情况在腐蚀程度由 15% 向 20% 转变时尤为显著, 再生混凝土强度等级为 C30 时最大值达到了 21.4%, 而在强度等级为 C45 和 C60 时均在 10% 左右；三种强度等级的钢管再生混凝土柱腐蚀率为 20% 时相对于未腐蚀构件承载力损失均达到 15% 以上, 说明氯盐腐蚀对构件承载力有着较强的损害作用, 试件的腐蚀程度越高剩余承载力越低, 应采取有效应对措施。

(2)随着内部再生混凝土强度等级的提升, 试件的轴压承载力也随之提升。随着钢管腐蚀程度增加, 内部混凝土强度等级较低的构件剩余承载力损失相对更快, 说明提高混凝土强度等级能有效提高构件在较高腐蚀环境下的剩余承载力, 保证结构的安全性。

(3)基于极限平衡理论, 计算结果随着侧压系数的增大而增大, 当 k_1 在 3~4 二者间取值时, 公式计算结果与试验结果吻合程度相对较好, 可以为实际工程应用提供参考；当 $k_1 = 3$ 时, 计算结果与试验结果比值的均值为 0.956, 标准差为 0.074, 变异系数为 0.078, 计算结果略微保守, 有一定的安全储备；当 $k_1 = 4$ 时, 计算结果与试验结果比值的均值为 1.153, 标准差为 0.091, 变异系数为 0.079, 应用于实际工程中应适当折减。

(4)侧压系数为定值的情况下, 随着腐蚀程度提高, 其理论计算值变化幅度相较于试验值小, 会使按照侧压系数计算结果偏小, 腐蚀程度越高, 误差越明显。以侧压系数 $k_1 = 3$, 再生混凝土强度等级

表3 各试件计算值与试验值

Table 3 Calculated and test values of each specimen

编号	N_u /kN	$N_{c1}(k_1=3)$ /kN	N_{c1}/N_u	$N_{c2}(k_1=4)$ /kN	N_{c2}/N_u	$N_{c3}(k_1=3.25)$ /kN	N_{c3}/N_u
RC30-00	977.24	870.30	0.891	1 070.77	1.096	916.48	0.938
RC30-05	937.68	840.69	0.897	1 031.48	1.100	884.65	0.943
RC30-10	885.10	817.73	0.924	1 000.89	1.131	859.92	0.972
RC30-15	821.01	790.74	0.963	965.03	1.175	830.89	1.012
RC30-20	644.69	763.27	1.184	928.55	1.440	801.35	1.243
RC45-00	981.39	951.69	0.970	1 152.15	1.174	997.87	1.017
RC45-05	961.30	922.68	0.960	1 113.46	1.158	966.63	1.006
RC45-10	962.54	900.27	0.935	1 083.41	1.126	942.46	0.979
RC45-15	891.20	873.86	0.981	1 048.12	1.176	914.01	1.026
RC45-20	809.19	846.98	1.047	1 012.20	1.251	885.05	1.094
RC60-00	1 130.38	1 002.49	0.887	1 202.90	1.064	1 048.66	0.928
RC60-05	1 070.03	973.98	0.910	1 164.73	1.089	1 017.92	0.951
RC60-10	1 047.71	951.70	0.908	1 134.73	1.083	993.87	0.949
RC60-15	1 030.12	925.87	0.899	1 100.07	1.068	966.00	0.938
RC60-20	919.19	899.57	0.979	1 064.80	1.158	937.63	1.020
均值			0.956		1.153		1.001
标准差			0.074		0.091		0.078
变异系数			0.078		0.079		0.078

注： N_u 为试验值， N_c 为计算值

为C60时，腐蚀程度为5%、10%、15%、20%的试件相较于未腐蚀的试件，计算承载力的下降幅度分别为2.84%、5.07%、7.64%、10.27%；而实际试验结果的下降幅度分别为5.34%、7.31%、8.87%、18.68%。

(5)当 $k_1=3.25$ 时计算结果与试验结果比值的均值为1.001，标准差为0.078，变异系数为0.078，此时计算结果较为稳定，试验值与计算值吻合程度更好，建议其取值3.25。

3 各国规范计算结果及分析

目前国内外关于钢管混凝土的设计规范有：《钢管混凝土结构技术规范》^[18]、《钢管混凝土结构技术规程》^[19]、美国规范AISC(2010)^[20]、日本规范AIJ(1997)^[21]、欧洲规范EC4(2004)^[22]及英国规范BS5400(2005)^[23]等。对于本文氯盐腐蚀条件下圆钢管再生混凝土短柱，可采用折减壁厚的方式计算承载力。本文采用3种常用规范中钢管混凝土短柱轴压承载力的计算方法，将其分别与试验结果和氯盐腐蚀下圆钢管再生混凝土柱轴压承载力的计算方法进行对比分析。

3.1 规范计算公式

3.1.1 《钢管混凝土结构技术规范》^[18]

规范GB 50936—2014是根据极限平衡理论推导建立钢管混凝土柱的承载力，并考虑混凝土强度和钢管约束效应的影响。计算方法如下：

$$N_1 = \begin{cases} 0.9f_c A_c (1 + \alpha\xi), & \xi \leq \frac{1}{(\alpha - 1)^2} \\ 0.9f_c A_c (1 + \sqrt{\xi} + \xi), & \xi > \frac{1}{(\alpha - 1)^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中， N_1 为钢管混凝土短柱轴心受压承载力； α 为混凝土强度等级有关的系数； ξ 为钢管混凝土的约束系数。

3.1.2 美国规范AISC 2010^[20]

美国规范采用塑性应力分布法来计算钢管混凝土组合截面强度，并同时考虑钢管混凝土的局部屈曲。对于轴压短柱，规范的设计承载力表示为：

$$N_2 \leq \begin{cases} \varphi_c [0.658^{(P_{no}/P_e)}] P_{no}, & P_{no}/P_e \leq 2.25 \\ \varphi_c 0.877 P_{no}, & P_{no}/P_e > 2.25 \end{cases} \quad (6)$$

式中， N_2 为构件轴力设计值； φ_c 为折减系数，本文取0.75； $P_{no} = f_y A_s + C_1 f_c' A_c$ ； $P_e = \pi^2 EI_{eff} / (KL)^2$ ； $EI_{eff} = E_s I_s + C_2 E_c I_c$ ； C_1 、 C_2 为系数，对于圆钢管混凝土， $C_1 = 0.95$ ， $C_2 = 0.6 + 2\alpha \leq 0.9$ 。

3.1.3 欧洲 EC4(2004)^[22]

欧洲 EC4 中对钢管的屈曲及结构柱的缺陷进行了考虑,对于圆钢管混凝土,当同时满足 $\bar{\lambda} \leq 0.5$ 和荷载偏心距 $e \leq D/10$ 时,应考虑钢管对核心混凝土的约束作用,其轴压承载力按下式进行计算:

$$N_3 = \eta_s f_y A_s / \gamma_s + (1 + \eta_c t f_y / (D f_c')) f_c' A_c / \gamma_c \quad (7)$$

式中, γ_s, γ_c 分别为钢管和混凝土的材料分项系数,分别取 1.0 和 1.5; η_s 和 η_c 为系数,根据规范取值。

中国规范和欧洲规范都考虑了钢管对混凝土

的约束作用,不同的是中国引入了约束系数,欧洲规范考虑了钢管屈曲效应;美国规范并未考虑钢管对混凝土的约束作用。

3.2 计算结果对比分析

采用以上 3 种钢管混凝土结构设计规范计算氯盐腐蚀下圆钢管再生混凝土短柱的轴压承载力,将计算值与试验值和推导公式理论计算值($k_1=3.25$)分别进行对比分析,对比结果见表 4 和表 5。

表 4 各试件规范计算结果与试验值

Table 4 Standard calculation results and test values of each specimen

编号	N_u/kN	N_1/kN	N_1/N_u	N_2/kN	N_2/N_u	N_3/kN	N_3/N_u
RC30-00	977.24	901.56	0.923	709.26	0.726	974.60	0.997
RC30-05	937.68	872.59	0.931	685.45	0.731	936.80	0.999
RC30-10	885.10	843.51	0.953	661.72	0.748	899.07	1.016
RC30-15	821.01	814.32	0.992	638.08	0.777	861.40	1.049
RC30-20	644.69	784.98	1.218	614.52	0.953	823.79	1.278
RC45-00	981.39	978.06	0.997	765.93	0.780	1 027.09	1.047
RC45-05	961.30	948.28	0.986	742.12	0.772	989.29	1.029
RC45-10	962.54	918.36	0.954	718.39	0.746	951.56	0.989
RC45-15	891.20	888.31	0.997	694.74	0.780	913.89	1.025
RC45-20	809.19	858.10	1.060	671.18	0.829	876.28	1.083
RC60-00	1 130.38	1 052.47	0.931	823.12	0.728	1 080.07	0.955
RC60-05	1 070.03	1 021.93	0.955	799.31	0.747	1 042.28	0.974
RC60-10	1 047.71	991.26	0.946	775.58	0.740	1 004.54	0.959
RC60-15	1 030.12	960.42	0.932	751.94	0.730	966.87	0.939
RC60-20	919.19	929.40	1.011	728.38	0.792	929.26	1.011
均值			0.986		0.772		1.023
标准差			0.072		0.056		0.078
变异系数			0.073		0.072		0.076

表 5 各试件规范计算结果与理论计算值

Table 5 Standard calculation results and theoretical calculation values of each specimen

编号	$N_{c3}(k_1=3.25)/\text{kN}$	N_1/kN	N_1/N_{c3}	N_2/kN	N_2/N_{c3}	N_3/kN	N_3/N_{c3}
RC30-00	916.48	901.56	0.984	709.26	0.774	974.60	1.063
RC30-05	884.65	872.59	0.986	685.45	0.775	936.80	1.059
RC30-10	859.92	843.51	0.981	661.72	0.770	899.07	1.046
RC30-15	830.89	814.32	0.980	638.08	0.768	861.40	1.037
RC30-20	801.35	784.98	0.980	614.52	0.767	823.79	1.028
RC45-00	997.87	978.06	0.980	765.93	0.768	1 027.09	1.029
RC45-05	966.63	948.28	0.981	742.12	0.768	989.29	1.023
RC45-10	942.46	918.36	0.974	718.39	0.762	951.56	1.010
RC45-15	914.01	888.31	0.972	694.74	0.760	913.89	1.000
RC45-20	885.05	858.10	0.970	671.18	0.758	876.28	0.990
RC60-00	1 048.66	1 052.47	1.004	823.12	0.785	1 080.07	1.030
RC60-05	1 017.92	1 021.93	1.004	799.31	0.785	1 042.28	1.024
RC60-10	993.87	991.26	0.997	775.58	0.780	1 004.54	1.011
RC60-15	966.00	960.42	0.994	751.94	0.778	966.87	1.001
RC60-20	937.63	929.40	0.991	728.38	0.777	929.26	0.991
均值			0.985		0.772		1.023
标准差			0.010		0.008		0.022
变异系数			0.011		0.011		0.021

由表4可知:

(1)承载力计算值和试验值的比值在0.726~1.278之间,且多集中在0.8~1.0之间,表明氯盐腐蚀下的钢管再生混凝土柱采用折减壁厚的方式计算承载力的方法是可行的。

(2)中国规范的计算结果均值为0.986,标准差为0.072,变异系数为0.073;欧洲规范计算结果均值为1.023,标准差为0.078,变异系数为0.076。二者均考虑钢管的约束效应,计算值与试验值吻合程度较高,可以充分发挥组合结构的优势。

(3)美国规范计算结果均值为0.772,标准差为0.056,变异系数为0.072,由于未考虑钢管的约束效应,而是直接进行强度折减,计算结果偏于保守,未充分利用组合结构的优势,材料强度未得到充分发挥,存在浪费。

(4)三种规范的计算结果的标准差和变异系数相差不大,说明针对本文试件,计算结果具有一定的稳定性,可用于腐蚀后圆钢管再生混凝土柱承载力的计算。

由表5可知:

(1)各规范计算值与推导公式理论计算值吻合较好,比值变化规律和规范计算值与试验值的比值变化规律相近,验证了该公式的准确性。

(2)中国规范和欧洲规范的计算值与推导公式理论计算值误差均不超过10%,美国规范计算结果与推导公式理论计算值误差偏大但均小于25%,与美国规范未考虑钢管的约束效应有关,得出的规律与表4规律接近,说明该公式计算结果合理。

(3)计算得出的变异系数分别为0.011,0.011和0.021,计算结果稳定可靠,可以为相关工程提供一定的理论支撑。

4 结 论

本文对氯盐腐蚀条件下圆钢管再生混凝土短柱轴压承载力进行了对比分析和研究,得出以下结论:

(1)各试件腐蚀程度的高低对其极限承载能力影响较大,且腐蚀程度较低时试件承载力损失较小,在本次试验范围内,随着腐蚀率的增加承载力损失越来越大,与未腐蚀构件相比承载力损失最大为18.7%。

(2)通过提高再生混凝土强度等级,可以提高

试件在较高腐蚀程度时的剩余承载力,在实际工程中可以通过提升再生混凝土强度等级来保证结构在长期腐蚀环境中的安全性。

(3)采用极限平衡理论对试件极限承载能力进行计算时,侧压系数对计算结果的影响较大,通过优化分析,建议取值3.25。

(4)采用不同规范对氯盐腐蚀条件下圆钢管再生混凝土短柱承载力进行计算分析,其结果与规范吻合度较好,可为工程应用提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 郝敬力.再生粗骨料循环利用对再生混凝土强度及耐久性影响研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2016. Hao J L. Study on the effect of recycled aggregate cyclic utilization on the strength and durability of recycled concrete[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016. (in Chinese)
- [2] Tian Y G, Jiang J, Wang S F, et al. The mechanical and interfacial properties of concrete prepared by recycled aggregates with chloride corrosion media[J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122653.
- [3] Xie F, Li J P, Zhao G W, et al. Experimental investigations on the durability and degradation mechanism of cast-in-situ recycled aggregate concrete under chemical sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2021, 297(5): 123771.
- [4] 薛继锋,卢亦焱,梁鸿俊,等.钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形短柱承载力研究[J].武汉大学学报(工学版),2014,47(6):769-773. Xue J F, Lu Y Y, Liang H J, et al. Research on bearing capacity of RC circular stub column strengthened with self-compacting concrete-filled circular steel tube under axial loading[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(6): 769-773. (in Chinese)
- [5] 李艳,占美森,熊进刚.圆形薄壁钢管混凝土柱轴压性能的试验研究[J].南昌大学学报(工科版),2009,31(1):99-102. Li Y, Zhan M S, Xiong J G. Experimental research on properties of concrete filled thin walled steel tube column under axial compression[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2009, 31(1): 99-102. (in Chinese)
- [6] 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.

- [7] Hua Y X, Han L H, Wang Q L, et al. Behaviour of square CFST beam-columns under combined sustained load and corrosion: Experiments [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 136: 353-366.
- [8] 黄宏, 周璐, 陈梦成, 等. 酸雨腐蚀圆钢管再生混凝土柱偏压承载力计算[J]. *混凝土*, 2018(9): 14-17.
Huang H, Zhou L, Chen M C, et al. Load carrying capacity of recycled concrete-filled circular steel tubes subjected to compression-bending under acid rain[J]. *Concrete*, 2018(9): 14-17. (in Chinese)
- [9] 黄宏, 周璐, 陈梦成, 等. 酸雨腐蚀后圆钢管再生混凝土柱偏压试验研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(2): 290-298.
Huang H, Zhou L, Chen M C, et al. Experimental study on eccentric compression of recycled concrete filled circular steel tubular columns corroded by acid rain [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(2): 290-298. (in Chinese)
- [10] 陈宗平, 赵科军, 经承贵, 等. 高温后钢管再生混凝土轴压性能试验及承载力计算[J]. *实验力学*, 2019, 34(6): 991-1002.
Chen Z P, Zhao K J, Jing C G, et al. Axial compression performance test and bearing capacity calculation of recycled steel tube concrete after high temperature [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(6): 991-1002. (in Chinese)
- [11] 陈梦成, 王超, 黄宏, 等. 酸雨环境下方钢管再生混凝土短柱轴压力学性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2017, 47(6): 35-40.
Chen M C, Wang C, Huang H, et al. Experimental study on mechanical properties of the recycled concrete filled steel square tube short column under acid rain environment [J]. *Building Structure*, 2017, 47(6): 35-40. (in Chinese)
- [12] 杨有福, 黄翔宇. 矩形钢管再生混凝土短柱的轴压性能[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(12): 121-127.
Yang Y F, Huang X Y. Compressive behavior of rectangular recycled aggregate concrete-filled steel-tubular stub columns [J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2017, 45(12): 121-127. (in Chinese)
- [13] 陈鹏, 张兆强, 撒燕茹, 等. 圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压性能有限元分析[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(11): 47-53.
Chen P, Zhang Z Q, Sa Y R, et al. Finite element analysis on axial bearing properties of circular steel tubular reinforced recycled concrete short columns [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2018(11): 47-53. (in Chinese)
- [14] 黄宏, 胡志慧, 杨超, 等. 模拟酸雨环境下圆钢管再生混凝土纯弯试验研究[J]. *应用力学学报*, 2019, 36(1): 97-103.
Huang H, Hu Z H, Yang C, et al. Experimental study of recycled concrete-filled circle steel tubes subjected to pure bending under the environment of acid rain [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(1): 97-103. (in Chinese)
- [15] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [16] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1988, 114(8): 90-95.
- [17] Baltay P, Gjelsvik A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1990, 2(1): 46-49.
- [18] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [19] 钢管混凝土结构技术规程: DBJ/T 13-51—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [20] Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360-10, 2010[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction (AISC), 2010.
- [21] Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures: AIJ, 1997[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan (AIJ), 1997.
- [22] Design of steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings: Eurocode 4 (EC4), 2004[S]. Brussels, EN 1994-1-1: 2004, European Committee for Standardization, 2004.
- [23] Steel, concrete and composite bridges, Part 5, Code of practice for design of composite bridges: British Standards Institutions BS 5400, 2005[S] London: BS Institute, 2005.

(本文编辑: 苏泽云)