

文章编号: 1001-4888(2024)04-0495-12

# 硫酸盐侵蚀后型钢混凝土短柱 轴压性能及退化规律研究\*

马辉<sup>1,2</sup>, 方蕾<sup>2</sup>, 黄坤涛<sup>3</sup>, 强佳琪<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西西安 710048;

2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西西安 710048; 3. 中国启源工程设计研究院有限公司, 陕西西安 710018)

**摘要:** 为研究硫酸盐侵蚀环境下型钢混凝土短柱的轴压性能退化规律, 开展了腐蚀后混凝土试块的抗压性能试验和型钢混凝土短柱试件的轴压性能试验; 通过试验观察了短柱试件的轴压破坏特征, 并获取了短柱试件的承载力及延性等性能指标。结果表明, 短柱试件在轴压荷载作用下整体破坏形态基本一致, 型钢、纵筋和箍筋相继发生屈服, 混凝土剥落严重, 最终试件发生破坏; 随着侵蚀龄期或硫酸钠溶液浓度的增大, 短柱试件的承载力和延性呈现先增后减的规律; 在侵蚀120d时增幅达到最大, 短柱的承载力增大14.90%, 延性增大21.44%; 当溶液浓度达到10%时, 短柱的承载力和延性降幅达到最大, 分别降低8.04%和10.72%, 故在高浓度硫酸钠溶液中长期浸泡会对试件轴压性能产生较大的不利影响。基于本文试验研究和现有规范公式, 建立了考虑不同侵蚀龄期及硫酸钠溶液浓度影响下, 型钢混凝土短柱的轴压承载力修正计算模型, 并验证了该计算模型对硫酸钠溶液环境下型钢混凝土短柱的适用性。

**关键词:** 硫酸盐侵蚀; 型钢混凝土柱; 轴压性能; 退化规律; 承载力计算

**中图分类号:** TU398

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-23-251

## 0 引言

我国西北盐渍土和盐湖分布广泛, 而盐碱地土壤和盐湖中存在的大量硫酸盐, 对基础设施安全服役产生不利影响<sup>[1]</sup>。因此, 混凝土结构在此环境下承受荷载的同时, 还需承受硫酸盐等不同的环境介质所带来的各种腐蚀作用, 严重影响混凝土结构的安全性和耐久性<sup>[2-3]</sup>。现有研究表明<sup>[4]</sup>, 钢筋混凝土结构受硫酸盐侵蚀后承载力退化较为严重, 尤其是在高烈度抗震设防区域, 腐蚀后的钢筋混凝土结构存在结构安全隐患。另外, 型钢混凝土结构因其优良的力学特性在我国西北基础设施建设中得到了广泛应用, 由于地域盐碱环境的影响, 型钢混凝土结构受到硫酸盐腐蚀而导致性能退化的问题仍然存在, 而目前为止对型钢混凝土结构方面的硫酸盐腐蚀研究甚少。

目前, 国内外学者对硫酸盐腐蚀环境下混凝土结构的力学性能开展了相关研究, 文献[5-6]研究表明, 硫酸盐侵入混凝土内部会生成钙矾石、石膏等侵蚀产物, 在荷载和硫酸盐环境等不同因素耦合作用下, 大量侵蚀产物使得混凝土内部产生膨胀应力进而导致混凝土的强度降低。文献[7-8]通过试验研究揭示了内外复合硫酸盐侵蚀对现浇混凝土的腐蚀机理。文献[9]对酸雨腐蚀后的圆钢管再生混凝土

\* 收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408485); 西安市科技计划项目(24GXFW0063); 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室开放课题(HJGZ2022105)

通信作者: 马辉(1985-), 男, 副教授, 博士, 硕士。主要从事钢与混凝土组合结构及再生混凝土结构研究。Email: mahuiwell@163.com

柱的偏压性能进行研究发现,随着腐蚀程度的增大,试件的承载力与刚度均有所降低。文献[4]对荷载和硫酸盐作用下钢筋混凝土柱的应力分布进行了研究发现,随腐蚀时间的增加,截面损伤区由外向内逐渐延伸,且损伤区混凝土应力先增后减。文献[10-12]对硫酸盐腐蚀下不同的钢筋混凝土构件进行了试验研究,结果表明,在单一硫酸镁溶液侵蚀下要比在干湿循环和硫酸镁侵蚀耦合作用下的钢筋混凝土梁抗弯承载能力下降更多,且随着硫酸盐腐蚀时间的增加,钢筋混凝土梁的强度和刚度先增大后减小。由以上研究可知,目前开展的大多数硫酸盐腐蚀试验大多集中于混凝土或者钢筋混凝土构件,而对于硫酸盐腐蚀环境下型钢混凝土构件的力学性能腐蚀损伤规律尚不清楚,亟待开展研究。

轴心受压短柱是一种结构工程中较为常见的受力构件<sup>[13-14]</sup>,为此,本文以型钢混凝土短柱为研究对象,考虑不同侵蚀龄期和硫酸钠溶液浓度环境,对硫酸盐溶液侵蚀后的型钢混凝土短柱试件进行轴压性能试验研究,观察其破坏过程及破坏现象,并分析侵蚀龄期和溶液浓度对短柱试件轴压性能指标的影响,以揭示其轴压力学性能的退化规律。在此基础上,建立考虑硫酸盐侵蚀影响的型钢混凝土短柱的轴压承载力预测模型,研究结果可为型钢混凝土结构在我国盐碱腐蚀环境中的工程应用提供技术参考。

## 1 硫酸盐腐蚀后型钢混凝土短柱的轴压性能试验研究

### 1.1 混凝土试块硫酸盐腐蚀试验

硫酸盐侵蚀后的混凝土在对材料性能产生影响的同时,也会进一步影响构件力学性能的发挥,因此有必要首先对混凝土进行硫酸盐侵蚀试验研究。本次试验制备了 33 个混凝土立方体试块,设计参数与分组情况见表 1。配置 C30 混凝土,水泥为 42.5R 级普通硅酸盐水泥,其性能符合《通用硅酸盐水泥》<sup>[15]</sup>的规定,试块制作符合《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》<sup>[16]</sup>相关规定。混凝土配合比和基本力学性能指标见表 2 和表 3。硫酸钠溶液由无水硫酸钠粉末按比例溶解于水中配制获得。经标准养护后的混凝土试块放入硫酸钠溶液中进行浸泡试验,达到预定侵蚀龄期后从溶液中取出,根据规范相关要求<sup>[16]</sup>,对硫酸钠溶液浸泡后的混凝土试块进行立方体抗压试验研究,以获取其基本力学性能指标。

表 1 混凝土试块的硫酸盐侵蚀试验分组

Tab. 1 Sulfate attack test group of concrete test blocks

试块编号	混凝土强度等级	溶液浓度 $c/\%$	侵蚀龄期 $t/d$	因素	立方体个数
A1	C30	0	0	空白对照	3
A2			30		3
A3			60		3
A4			90		3
A5			120		3
A6	C30	5	180	侵蚀龄期	3
A7			240		3
A8			300		3
A9			360		3
A10		1			3
A11	C30	10	180	溶液浓度	3

表 2 混凝土材料的配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete materials

混凝土强度等级	单位体积用量/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					砂率/ $\%$	水灰比
	水	石	砂	水泥	减水剂		
C30	215	1129	532	524	5.24	32	0.41

表 3 混凝土的基本力学性能指标

Tab. 3 Basic mechanical property indexes of concrete

混凝土强度等级	$E_c$ /MPa	$f_{cu,k}$ /MPa	$f_{ck}$ /MPa	$f_{tk}$ /MPa
C30	$2.98 \times 10^4$	29.99	20.06	2.56

注： $f_{cu,k}$ 为立方体抗压强度标准值； $f_{ck}$ 为轴心抗压强度标准值； $f_{tk}$ 为轴心抗拉强度标准值； $E_c$ 为弹性模量。

1.2 硫酸盐腐蚀后型钢混凝土短柱轴压性能试验

1.2.1 型钢混凝土短柱试件的设计制作

结合现有混凝土硫酸盐侵蚀试验研究成果<sup>[12]</sup>，为探究型钢混凝土短柱在不同侵蚀龄期和硫酸钠溶液浓度下的轴压性能退化规律，本文设计制作了 11 个型钢混凝土短柱试件，型钢混凝土短柱试件的设计参数见表 4。短柱的纵筋和箍筋均采用 HRB400 级且直径分别为 14mm 和 8mm，型钢采用 Q235 工字钢，配钢率为 4.98%，短柱试件的截面配筋及制作过程如图 1 和图 2 所示，钢材的基本力学性能指标见表 5。本文试验按照预定的侵蚀龄期采用长期自然浸泡的侵蚀方法，试验所用混凝土及硫酸钠试剂与上述混凝土腐蚀试验所用材料一致，将型钢混凝土短柱试件浸泡到特定浓度的硫酸钠溶液中，为保持溶液浓度变化不大，每隔 30d 更换一次硫酸钠溶液。型钢混凝土短柱试件腐蚀过程及所用试剂如图 3 所示。

表 4 型钢混凝土短柱的试件设计参数

Tab. 4 Design parameters of steel reinforced concrete short column specimen

试件编号	混凝土强度等级	柱高 /mm	柱截面 $h \times b$ / (mm × mm)	14 号工字钢				侵蚀龄期 $t/d$	溶液浓度 $c/\%$
				B/mm	H/mm	$t_1$ /mm	$t_2$ /mm		
SRCC-1	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	0	0
SRCC-2	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	30	5.0
SRCC-3	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	60	5.0
SRCC-4	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	90	5.0
SRCC-5	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	120	5.0
SRCC-6	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	180	5.0
SRCC-7	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	240	5.0
SRCC-8	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	300	5.0
SRCC-9	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	360	5.0
SRCC-10	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	180	1.0
SRCC-11	C30	500	240 × 180	80	140	5.5	9.1	180	10.0

表中  $H$  为型钢的总高度； $B$  为型钢翼缘宽度； $t_1$  为型钢腹板厚度； $t_2$  为型钢翼缘厚度。

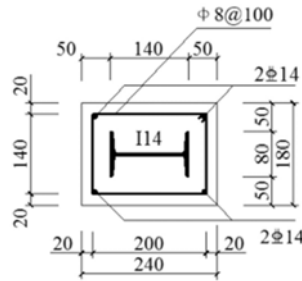


图 1 型钢混凝土短柱试件的几何尺寸及截面配筋图(单位: mm)

Fig. 1 Geometry and cross-section reinforcement of steel reinforced concrete short column specimens(unit: mm)



图2 型钢混凝土短柱试件的制作过程

Fig. 2 The manufacturing process of steel reinforced concrete short column specimens

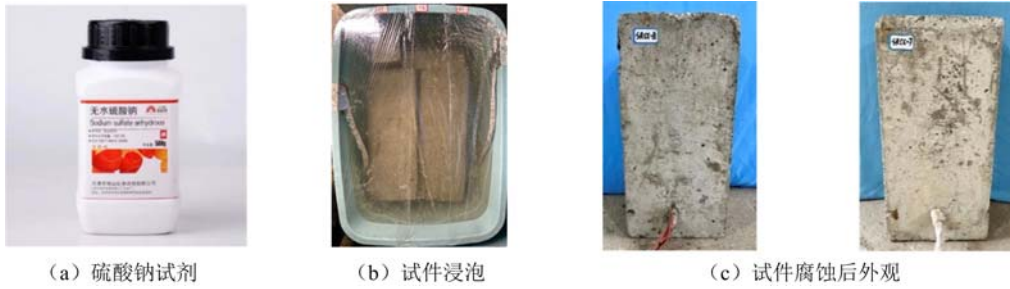


图3 型钢混凝土短柱试件的腐蚀过程

Fig. 3 Corrosion process of steel reinforced concrete short column specimens

表5 钢材的基本力学性能指标

Tab. 5 Basic mechanical property indexes of steel materials

钢材类型	$d$ 或 $t/mm$	$E_s/MPa$	$f_y/MPa$	$\epsilon/\mu\epsilon$	$f_u/MPa$
纵筋	14.0	$2.00 \times 10^5$	472.83	2364.15	635.74
箍筋	8.0	$2.00 \times 10^5$	487.51	2437.55	665.79
型钢翼缘	9.1	$2.06 \times 10^5$	275.37	1336.75	407.85
型钢腹板	5.5	$2.06 \times 10^5$	357.84	1737.09	494.40

表中  $d$  或  $t$  为钢材直径或厚度;  $E_s$ 、 $f_y$ 、 $\epsilon$  和  $f_u$  分别为弹性模量、屈服强度、屈服应变和极限强度。

1.2.2 加载方法与试验装置

本文采用 500t 电液伺服压力试验机对硫酸钠溶液腐蚀后的型钢混凝土短柱进行轴压试验,试验加载装置如图 4 所示。依据《混凝土结构试验方法标准》<sup>[17]</sup>,型钢混凝土短柱试件的位移计与电阻应变片的布置如图 5 和 6 所示。全程由计算机控制试验加载进度并自动采集不同位移与荷载下的实测数据,试验正式开始之前先预加载至 30kN 后再卸载,以消除试件与加载装置承压板之间的接触空隙;试验加载全程以位移进行控制,每级位移取 0.2mm,在达到峰值荷载前,加载速率为 0.5mm/min;达到峰值荷载后,加载速率增至 1mm/min,当试件荷载下降到 0.85 倍的峰值荷载以下或短柱试件变形急剧增大时,可以判定试件已经发生破坏进而停止试验加载。



图4 短柱试件的试验加载装置

Fig. 4 Test loading device

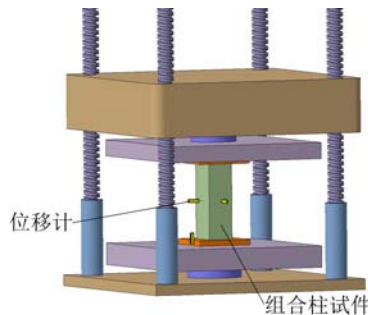


图5 位移计布置

Fig. 5 Displacement meter arrangement

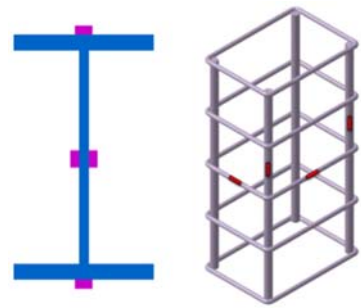


图6 应变测点布置

Fig. 6 Strain measuring point arrangement

## 2 试验结果分析

### 2.1 硫酸盐侵蚀后混凝土的抗压强度变化规律

图 7 为不同侵蚀龄期及硫酸钠溶液浓度影响下混凝土抗压强度( $f_c$ )的变化规律曲线,由图 7(a)可知,混凝土的抗压强度变化规律可分为 2 个阶段:强度上升阶段(0~120d)和强度下降阶段(120~360d),与未侵蚀混凝土相比,硫酸盐侵蚀 120d 时强度提升幅度达到最大,强度提升了 15.80%,当硫酸盐侵蚀混凝土达到 300d 和 360d 时,抗压强度分别降低了 5.06%、13.25%;由图 7(b)可知,在侵蚀龄期一定的条件下,溶液浓度为 5% 时,与未侵蚀混凝土相比,抗压强度提高了 9.81%;当溶液浓度为 10% 时,混凝土抗压强度降低了 11.27%。根据文献[18-19]的研究结果可知,在硫酸盐腐蚀环境下,混凝土强度上升原因主要是当  $SO_4^{2-}$  浓度较小时, $SO_4^{2-}$  和熟石灰发生反应,产生  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ,随即与  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 12H_2O$  反应生成钙矾石,钙矾石能提高混凝土的早期强度和密实度。而混凝土强度下降的主要原因是随着侵蚀程度的增加,表层混凝土中  $SO_4^{2-}$  浓度不断增大, $SO_4^{2-}$  与水泥的水化产物反应不只生成钙矾石晶体,还不断析出石膏晶体,钙矾石、石膏等内部侵蚀产物不断生成使得混凝土内部微观结构不断发生变化,最终导致混凝土出现裂缝发生开裂,削弱了混凝土的力学性能。

由图 7 可知,硫酸盐侵蚀后的混凝土抗压强度衰减规律基本符合二次多项式关系,故可由混凝土抗压强度数据拟合得到混凝土轴心抗压强度  $f_c$  与侵蚀龄期  $t$  及硫酸钠溶液浓度  $c$  的关系,从而获得硫酸盐侵蚀下混凝土轴心抗压强度衰减模型的拟合数学表达式如下:

当硫酸钠溶液浓度  $c=5\%$  时,不同侵蚀龄期  $t$  情况下:

$$f_{c1} = 0.974 f_{c0} (1 + 0.002t - 6.216 \times 10^{-6} t^2) \quad (30d \leq t \leq 360d) \quad (1)$$

当侵蚀龄期  $t=180d$  时,不同硫酸钠溶液浓度  $c$  情况下:

$$f_{c2} = 0.979 f_{c0} (1 + 0.058c - 0.007c^2) \quad (1\% \leq c \leq 10\%) \quad (2)$$

式中:  $f_{c0}$  为未腐蚀环境下的混凝土轴心抗压强度,取  $f_{c0} = 20.06MPa$ ;  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$  为不同侵蚀龄期、不同硫酸钠溶液浓度腐蚀下修正后的混凝土轴心抗压强度。

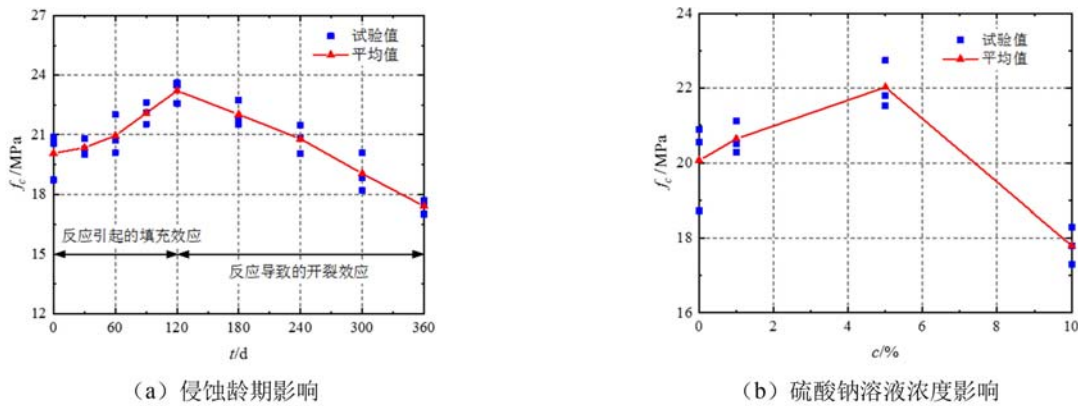


图 7 硫酸盐侵蚀后混凝土抗压强度的变化规律

Fig. 7 Variation laws of compressive strength of concrete after sulfate attack

### 2.2 硫酸盐侵蚀后型钢混凝土短柱轴压性能试验结果分析

#### 2.2.1 试验现象及破坏特征

不同侵蚀龄期和硫酸钠溶液浓度影响下型钢混凝土短柱的轴压破坏形态如图 8 所示,由图可知,短柱试件的破坏模式大致相同,首先在试件中部出现竖向裂缝,最终导致试件发生轴压破坏。

由图 8 还可知,开始加载时,短柱试件荷载-位移曲线呈线性变化,短柱试件仍处于弹性工作阶段;继续加载至峰值荷载的 30%~50% 时,短柱试件表面开始出现竖向微裂缝与斜裂缝,试验现象仍不明显;当荷载达到约 70% 的峰值荷载时,裂缝明显增多且不断向短柱试件两端延伸,短柱试件开始进入弹塑性阶段;加载至峰值荷载的 80% 左右时,短柱试件裂缝宽度增大明显,同时伴随有少量混凝土碎渣剥

落;荷载达90%左右的峰值荷载时,型钢、纵筋和箍筋相继发生屈服;达到峰值荷载后,试件承载力逐渐下降,裂缝宽度不断增大,逐渐出现贯穿短柱试件两端的主裂缝,混凝土剥落现象愈加明显;继续加载后,短柱试件混凝土受压破坏严重,导致试件丧失承载力而破坏。当侵蚀龄期在120d之前且溶液浓度一定时(SRCC-1~SRCC-5),随侵蚀龄期的增大,与未侵蚀试件相比,试件破坏时裂缝相对减少,混凝土保护层剥落程度减轻,而侵蚀龄期在120d后且溶液浓度继续增大时,试件在发生破坏过程中裂缝宽度相对增大,裂缝数量增多,混凝土保护层剥落严重。显然,腐蚀龄期越长且溶液浓度越高,会使得试件混凝土中产生的膨胀应力越大,导致试件承载力下降加快,试件破坏愈加明显,脆性增加。



图8 腐蚀后短柱试件的轴压破坏形态

Fig. 8 The axial compression failure morphology of corroded short column specimens

### 2.2.2 荷载-位移曲线

图9为硫酸盐腐蚀后型钢混凝土短柱试件的轴压荷载-位移曲线,图10为试验设计参数对试件轴压承载力的影响规律。根据图9可知,在不同的试验参数影响下,所有短柱试件的轴压荷载-位移曲线的走势总体上相似,可分为弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段3个阶段。

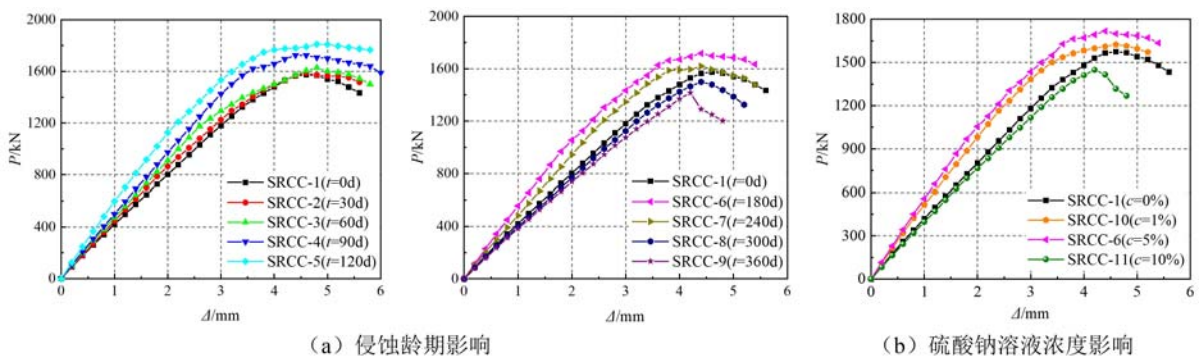


图9 型钢混凝土短柱试件的轴压荷载-位移曲线

Fig. 9 Axial compressive load-displacement curve of steel reinforced concrete short column specimens

(1)由图9(a)及图10(a)可知,加载前期,侵蚀龄期的变化对型钢混凝土短柱试件的承载力影响较为明显,试件承载力随侵蚀龄期的增加呈现先增后减的趋势。侵蚀120d时,短柱试件曲线弹性段斜率明显增大,短柱试件的承载力提升幅度达到最大,承载力比未侵蚀试件增大了14.90%;当侵蚀龄期为120~360d时,随着侵蚀龄期的增加,短柱试件曲线弹性段斜率不断减小,表明试件刚度逐渐下降,其承载力也明显降低,360d降幅最大,与未侵蚀试件相比降幅达到10.06%。不同侵蚀龄期影响下组合柱试

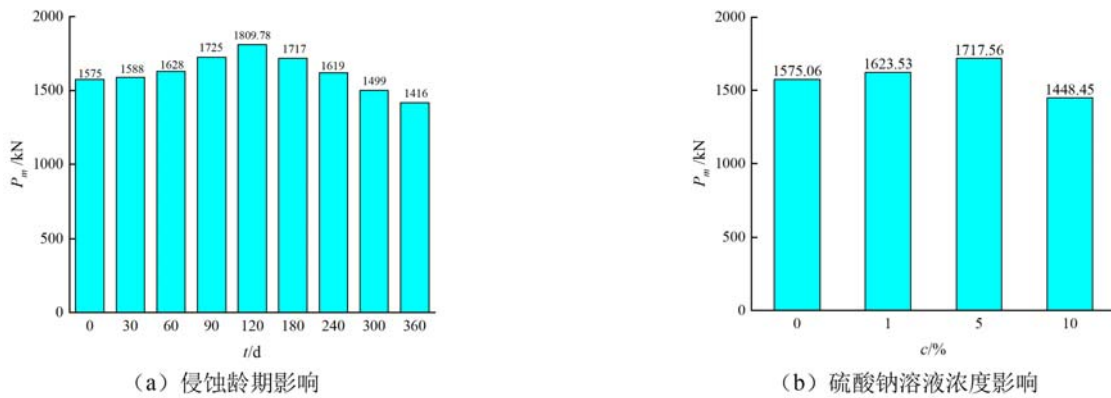


图 10 不同试验参数影响下型钢混凝土短柱试件的轴压承载力

Fig. 10 The axial compressive bearing capacity of steel reinforced concrete short column specimens under different experimental parameters

件的峰值承载力有所差异,在侵蚀前中期,硫酸盐侵蚀使得试件混凝土的密实性暂时提高,强度略有增加,从而试件的峰值承载力得到提升;在侵蚀后期,试件表层混凝土的硫酸盐浓度明显增大,侵蚀产物大量析出使得混凝土内部产生膨胀应力,导致混凝土强度降低。

(2)由图 9(b)及图 10(b)可知,不同硫酸钠溶液浓度影响下短柱试件的峰值承载力相差较大,与未侵蚀试件相比,浓度为 1%和 5%的短柱试件峰值承载力分别提高了 3.08%和 9.05%,而浓度为 10%的短柱试件峰值承载力降低了 8.04%,这表明侵蚀龄期一定时,较低硫酸钠溶液浓度腐蚀对短柱试件的承载力能起到一定的增强作用,但较高浓度的硫酸钠溶液则会加速短柱试件承载力退化;短柱试件承载力提高主要是由于硫酸盐浓度不高时,前期 $SO_4^{2-}$ 与水泥浆体发生反应产生钙矾石,钙矾石的生成能够填充混凝土的内部孔隙,进而提高混凝土的早期强度和密实度。但随着硫酸盐溶液浓度的增大,混凝土内部析出大量石膏晶体使得内部产生膨胀应力,最终会削弱试件的承载力。

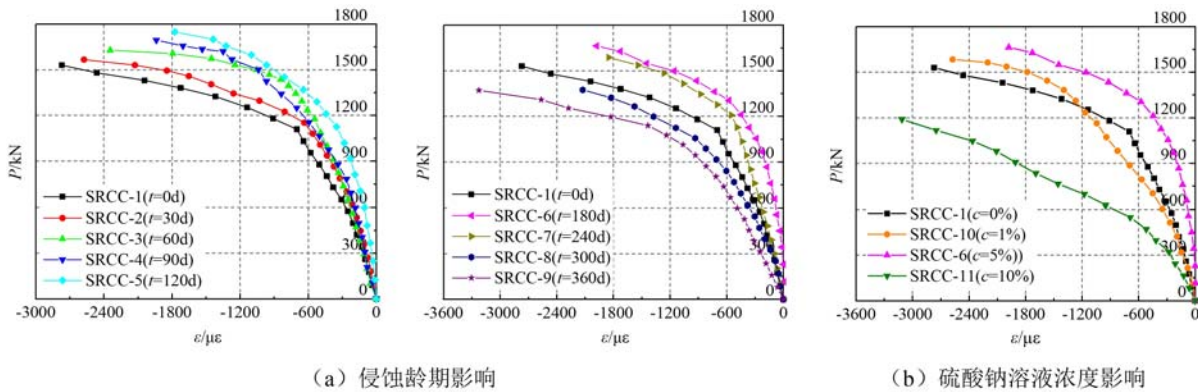


图 11 混凝土的荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain relationship curves of concrete

### 2.2.3 荷载-应变分析

#### (1)混凝土应变

图 11 为型钢混凝土短柱试件的混凝土荷载-应变关系曲线。根据图 11(a)可知,在侵蚀 120d 之前,混凝土荷载-应变曲线的弹性段斜率随侵蚀龄期的增大而不断增大,表现为混凝土荷载-应变曲线弹性段斜率不断增大,试件轴压承载力逐渐提升,且达到相同承载力时混凝土应变不断减小;当试件腐蚀达到 120d(SRCC-5),荷载达到 1100kN 左右时,混凝土发生屈服,应变大致为 450 $\mu\epsilon$  左右;当试件腐蚀超过 120d,混凝土的荷载-应变曲线弹性段斜率随侵蚀龄期的增大逐渐减小;当试件腐蚀 360d 时(SRCC-9),荷载达到 500kN 左右时混凝土达到屈服,应变大致为 500 $\mu\epsilon$  左右,表明试件受腐蚀影响较为严重,混凝土达到同一荷载时,应变增长速率增大。根据图 11(b),硫酸盐溶液浓度为 10%时(SRCC-11),短

柱试件的混凝土荷载-应变曲线弹性段斜率下降明显,应变发展速率增大明显,因此,高浓度硫酸钠溶液长期腐蚀后混凝土变形能力降低明显,脆性破坏更为严重。

## (2) 钢筋与型钢应变

钢筋与型钢的荷载-应变关系曲线如图 12 所示,根据图 12 可知,不同侵蚀龄期及硫酸钠溶液浓度影响下钢筋与型钢的荷载-应变曲线整体变化趋势大致相同,加载初期,钢筋和型钢的应变与荷载近似为线性关系,整体变形不明显,轴向荷载主要由混凝土承担,通过对比图中各材料的屈服应变可知,型钢先屈服,纵筋次之,最后箍筋才屈服;当试件未受到侵蚀(SRCC-1)且荷载达 1200kN 左右时,型钢基本达到屈服,屈服应变大致为  $1500\mu\epsilon$ ,继续加载至 1350kN 左右时,纵筋达到屈服,屈服应变为  $2400\mu\epsilon$ ,荷载达 1500kN 左右箍筋屈服,屈服应变在  $2500\mu\epsilon$  左右;而当侵蚀龄期为 90d(SRCC-5),且荷载达到 1500kN 左右时,型钢达到屈服,继续加载至 1600kN 左右时,纵筋达到屈服状态;荷载达 1700kN 左右箍筋达到屈服;与未侵蚀件相比,钢材达到屈服时,对应的荷载增大,表明在侵蚀前期  $\text{SO}_4^{2-}$  与水泥浆体发生反应产生钙矾石,钙矾石的产生有利于混凝土内部密实性的提升,因此使得混凝土所能承担的轴力增大,从而使试件整体承载力都得到提升;当硫酸钠溶液浓度达到 10%(SRCC-11),且荷载达 900kN 左右时,型钢达到屈服,继续加载至 1100kN 左右时,纵筋达到屈服,荷载约为 1200kN 时箍筋达到屈服;与未侵蚀件相比,钢材达到屈服时,对应的荷载减小,且钢筋与型钢应变曲线的弹性段斜率变小;达到屈服应变后,钢筋荷载-应变曲线下降段较未侵蚀试件的钢筋应变曲线下降段更陡,间接表明腐蚀后的试件延性变差,这主要是由于混凝土受到硫酸盐的腐蚀作用,使得部分混凝土抗压强度降低,导致钢材承担的轴力增大。

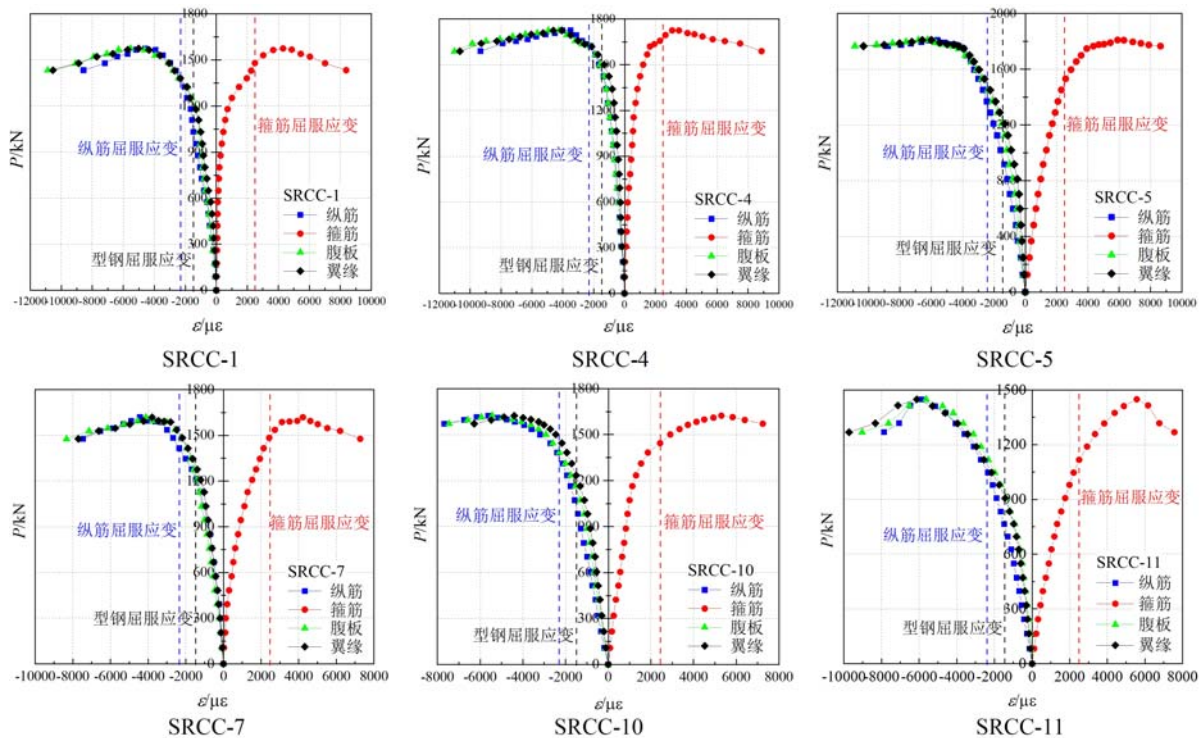


图 12 部分短柱试件的钢筋与型钢荷载-应变关系曲线

Fig. 12 Load-strain relationship curves of reinforcing bar and profile steel for some short column specimens

### 2.2.4 延性分析

位移延性系数是衡量构件延性的重要指标,本文短柱试件的延性用位移延性系数来表示,位移延性系数  $\mu$  按式(3)计算:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$

式中:  $\Delta_u$  为构件的极限位移;  $\Delta_y$  为构件的屈服位移,可采用等能量法来确定构件的屈服位移。



试验参数对硫酸盐侵蚀后型钢混凝土短柱试件位移延性系数的影响如图 13 所示。由图 13(a)可知,在硫酸钠溶液浓度一定的条件下,短柱试件的延性系数随侵蚀龄期增大,整体呈先增大后减小的趋势。与未侵蚀件的延性相比,侵蚀 120d 时试件延性提高了 21.44%,延性提升幅度达到最大;当试件侵蚀龄期达到 360d 时,短柱试件的延性系数降低了 12.43%,延性降低幅度达到最大。根据图 13(b)可知,在侵蚀龄期一定的条件下,短柱试件的延性系数随溶液浓度增大呈先增大后减小的趋势,与未侵蚀件延性相比,溶液浓度为 10% 时,试件延性降低最大,达到 10.72%;当侵蚀时间较长或硫酸钠溶液浓度较大时,主要侵蚀产物为石膏,石膏型侵蚀破坏消耗了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  这一重要成分, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  转化为石膏后体积增大,使得孔隙膨胀开裂,对试件的变形能力产生不利影响,导致试件延性变差。

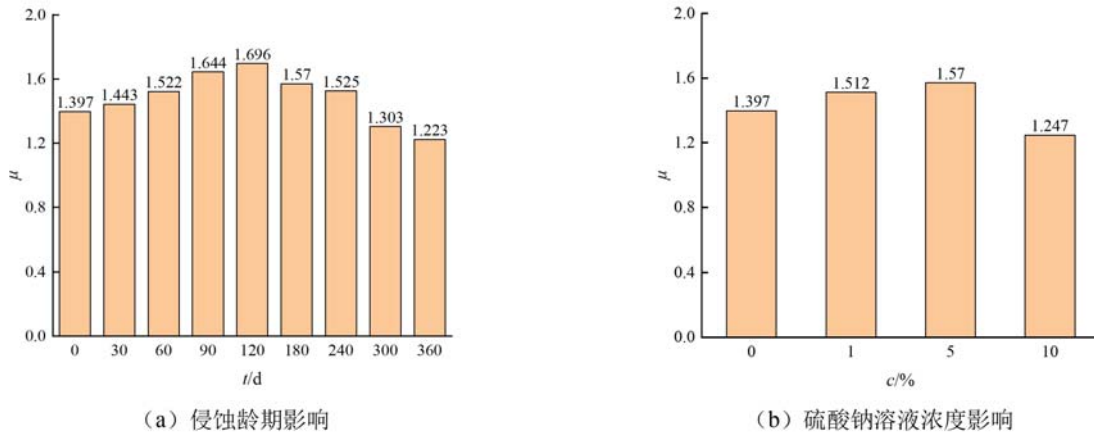


图 13 试验参数对短柱试件延性系数的影响

Fig. 13 Influence of test parameters on ductility coefficient of composite columns

### 3 硫酸盐腐蚀后型钢混凝土短柱的轴压承载力计算方法

通过本文试验结果可知,型钢混凝土短柱试件的轴压承载力主要由混凝土、型钢以及钢筋三者共同承担。硫酸盐侵蚀后型钢混凝土短柱的轴压破坏为强度破坏,因此可按材料强度来计算其承载力,考虑到硫酸盐侵蚀作用对型钢混凝土短柱的影响主要表现为对混凝土轴心抗压强度的降低,进而削弱短柱的轴压承载力,本文参考现有《组合结构设计规范》<sup>[20]</sup>中的计算方法,并结合前文所得到的混凝土轴心抗压强度衰减模型,基于叠加原理建立硫酸盐侵蚀型钢混凝土短柱的承载力计算公式。

《组合结构设计规范》在不考虑型钢屈曲影响的前提下,将型钢混凝土柱的轴压承载力分为型钢、钢筋和混凝土 3 部分,将三者承载力进行叠加,并考虑长细比的影响,因此型钢混凝土短柱轴压承载力计算公式为

$$N_u = 0.9\varphi(f_c A_c + f_y A_s + f_a A_a) \quad (4)$$

式中:  $N_u$  为型钢混凝土短柱轴压承载力;  $A_c$ 、 $A_s$ 、 $A_a$  分别为混凝土、钢筋、型钢的截面面积;  $f_c$ 、 $f_y$ 、 $f_a$  分别为混凝土、钢筋、型钢的强度设计值;  $\varphi$  为构件轴心受压稳定系数,按规范查取,对于短柱来说,  $\varphi$  取 1.0。

参考《组合结构设计规范》中的轴压承载力计算公式,结合前文所得到的修正后的混凝土轴心抗压强度计算公式(1)和(2)进行组合柱轴压承载力的计算,最终得到型钢混凝土短柱的轴压承载力计算模型,具体表达式如下:

(a) 当硫酸钠溶液浓度  $c=5\%$  时,不同侵蚀龄期  $t$  情况下:

$$N_J = 0.9(f_{c1} A_c + f_y A_s + f_a A_a) \quad (5)$$

(b) 当侵蚀龄期  $t=180\text{d}$  时,不同硫酸钠溶液浓度  $c$  情况下:

$$N_J = 0.9(f_{c2} A_c + f_y A_s + f_a A_a) \quad (6)$$

式中:  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$  分别为不同侵蚀龄期、不同硫酸钠溶液浓度影响下修正后的混凝土轴心抗压强度,可由本文建立的混凝土抗压强度衰减模型计算公式(1)和(2)得到;  $N_J$  为短柱轴压承载力计算值。

表 6 短柱试件轴压承载力试验结果与理论计算结果的对比

Tab. 6 Comparison between experimental results and theoretical calculation results of axial compression bearing capacity of short column specimens

试件编号	$N_i$	$N_j$	$N_j/N_i$
SRCC-1	1575.06	1524.75	0.97
SRCC-2	1588.32	1541.42	0.97
SRCC-3	1628.17	1569.37	0.96
SRCC-4	1725.24	1589.36	0.92
SRCC-5	1809.78	1601.40	0.88
SRCC-6	1717.56	1601.62	0.93
SRCC-7	1619.43	1570.02	0.97
SRCC-8	1499.66	1506.62	1.00
SRCC-9	1416.56	1411.40	1.00
SRCC-10	1623.53	1546.64	0.95
SRCC-11	1448.45	1444.46	1.00

表 6 为采用修正计算公式计算得到的型钢混凝土短柱试件轴压承载力试验结果与理论计算结果的对比。由表 6 可知,考虑硫酸盐腐蚀影响的型钢混凝土短柱的轴压承载力理论计算值与试验值比值的均值为 0.96,比值的均方差为 0.04,表明理论计算值与试验值较为接近,说明本文建立的硫酸盐腐蚀型钢混凝土短柱的轴压承载力计算公式具有一定的适用性。但由于试件数量有限,本文建立的计算公式还存在一定的局限性,后续需要更多的试验数据进一步完善上述计算方法。

## 4 结论

本文主要通过对硫酸盐侵蚀后的型钢混凝土短柱进行轴压试验研究,以侵蚀龄期和硫酸钠溶液浓度为设计参数主要研究了型钢混凝土短柱的轴压承载力退化规律,主要结论如下:

(1) 随着侵蚀龄期与溶液浓度的增大,混凝土材料抗压强度均呈先增后减的趋势,与未腐蚀的混凝土材料相比,侵蚀龄期 120d 时抗压强度提升幅度最大,增幅达 15.80%;而侵蚀龄期一定且溶液浓度达到 10%时,混凝土抗压强度降低幅度达到最大,降幅达 11.27%;通过本文试验所得的混凝土抗压强度数据拟合得到了不同侵蚀龄期和硫酸钠溶液浓度影响下的混凝土轴心抗压强度衰减模型。

(2) 型钢混凝土短柱试件在轴压荷载作用下整体破坏形态基本一致,内部型钢先屈服,随后纵筋、箍筋相继屈服,短柱试件横向变形增大,使得短柱试件表面混凝土开裂剥落严重,最终导致试件整体发生破坏;随着侵蚀龄期与硫酸钠溶液浓度的不断增大,与未侵蚀试件相比,试件发生破坏时裂缝逐渐增多,试件脆性更为明显。

(3) 当硫酸钠溶液浓度一定时,与未侵蚀试件相比,型钢混凝土短柱的承载力和延性随侵蚀龄期的增大先增大后减小,在 120d 时增幅最大,承载力和延性分别增大了 14.90%和 21.44%。

(4) 当侵蚀龄期一定时,与未侵蚀试件相比,型钢混凝土短柱的承载力和延性随溶液浓度的增大先增大后减小,当硫酸钠溶液浓度达到 10%时,短柱的承载力降低 8.04%,延性降低 10.72%,表明高浓度且中长期腐蚀龄期条件下对型钢混凝土柱的轴压性能最为不利。

(5) 基于本文试验结果与现有规范公式,考虑硫酸盐腐蚀影响对混凝土轴心抗压强度进行了修正,建立了考虑不同侵蚀龄期及硫酸钠溶液浓度影响下的型钢混凝土短柱的轴压承载力修正计算模型,并通过将试验值与理论计算值进行对比,验证了该计算模型在硫酸盐侵蚀环境下对型钢混凝土短柱的适用性。

## 参考文献:

- [1] 孟祥晖, 冯琼, 张云升, 等. 盐渍土环境下钢筋混凝土腐蚀劣化行为及竞争失效分析[J]. 材料导报, 2023, 37(14):40-49 (MENG Xianghui, FENG Qiong, ZHANG Yunsheng, et al. Corrosion deterioration behavior and competitive failure analysis of reinforced concrete in saline soil environment[J]. Materials Reports, 2023, 37(14): 40-49 (in Chinese))
- [2] JIANG L, NIU D T. Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2016, 117(8):88-98.
- [3] 姚明博, 李镜培. 混凝土灌注桩中混含硫酸盐的时变分布规律[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5):95-100 (YAO Mingbo, LI Jingpei. Time-varying distribution of mixed sulfate in concrete cast-in-place piles[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2015, 37(5):95-100 (in Chinese))
- [4] 王佳林, 左晓宝, 马强, 等. 硫酸盐侵蚀下轴心受压钢筋混凝土柱应力时变过程的数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(1):30-38 (WANG Jialin, ZUO Xiaobao, MA Qiang, et al. Numerical analysis of the stress time-varying process of reinforced concrete columns under axial compression under sulfate attack[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018, 40(1):30-38 (in Chinese))
- [5] YU D M, GUAN B W, HE R, et al. Sulfate attack of portland cement concrete under dynamic flexural loading: a coupling function[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115(7):478-485.
- [6] TAN Y S, YU H F, MA H Y, et al. Study on the micro-crack evolution of concrete subjected to stress corrosion and magnesium sulfate[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141(6):453-460.
- [7] ZHAO G W, LI J P, SHI M, et al. Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal-external combined sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248(7):118683.
- [8] LONG Z F, ZHANG R L, WANG Q C, et al. Mechanism analysis of strength evolution of concrete structure in saline soil area based on 15-year service[J]. Construction and Building Materials, 2022, 332(5):127281.
- [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 Hong, ZHOU Lu, CHEN Mengcheng, et al. Experimental study on eccentric compression of recycled concrete columns with circular steel pipes corroded by acid rain[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(2):290-298 (in Chinese))
- [10] TIN H X, THANG D D, THUY N T, et al. Effect of sulfate attack on reinforced concrete columns confined with CFRP sheets under axial compression[J]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25(6):04021049.
- [11] RAHMANI H, ALIPOUR S, MANSOORKHANI A A. Durability of CFRP strengthened RC beams under wetting and drying cycles of magnesium sulfate attack[J]. Advances in Concrete Construction, 2019, 8(1):39-45.
- [12] ZANG X M, WANG G H, ZHANG Z C, et al. Study on mechanical behavior of reinforced concrete beams under sulfate attack[J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 22(4):3465281.
- [13] 刘成清, 邓佑毅, 方登甲, 等. 新型五螺箍矩形短柱轴压承载力计算分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6):1157-1164, 1174 (LIU Chengqing, DENG Youyi, FANG Dengjia, et al. Calculation and analysis of the axial compressive bearing capacity of a new type of rectangular short column with five screw clamps[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6):1157-1164, 1174 (in Chinese))
- [14] 刘成清, 周聪. 五螺箍圆形短柱轴压性能研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(5):97-102 (LIU Chengqing, ZHOU Cong. Research on axial compression performance of circular short columns with five screw hoops[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(5):97-102 (in Chinese))
- [15] GB175-2007, 通用硅酸盐水泥[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007 (GB175-2007, General purpose portland cement[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007 (in Chinese))
- [16] GB/T50082-2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009 (GB/T50082-2009, Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009 (in Chinese))
- [17] GB/T50152-2012, 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014 (GB/T50152-2012, Standard for test method of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014 (in

Chinese))

- [18] 曹杰荣, 金祖权, 王鹏刚. 海洋环境下混凝土的硫酸盐腐蚀机理[J]. 土木与环境工程学报, 2019, 41(1):104—109 (CAO Jierong, JIN Zuquan, WANG Penggang. Mechanism of sulfate corrosion of concrete in marine environment[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1):104—109(in Chinese))
- [19] 张晓佳, 张高展, 孙道胜, 等. 水泥基材料硫酸盐侵蚀机理的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(7):1174—1180 (ZHANG Xiaojia, ZHANG Gaozhan, SUN Daosheng, et al. Research progress of sulfate attack mechanism on cement-based materials[J]. Materials Reports, 2018, 32(7):1174—1180 (in Chinese))
- [20] JGJ138—2016, 组合结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016 (JGJ138—2016, Code for design of composite structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016 (in Chinese))

## Study on the axial compression performance and degradation law of steel reinforced concrete short columns after sulfate corrosion

MA Hui<sup>1, 2</sup>, FANG Lei<sup>2</sup>, HUANG Kuntao<sup>3</sup>, QIANG Jiaqi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. China Qiyuan Engineering Corporation, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

**Abstract:** To study the degradation law on the axial compressive properties of steel reinforced concrete short columns under the sulfate attack environment, the compressive performance test of concrete specimens and axial compressive performance test of short column specimens of steel reinforced concrete were carried out after corrosion. The axial compression damage characteristics of short column specimens were observed through the tests, and the performance indexes of bearing capacity and ductility of short column specimens were obtained. The results show that the overall failure mode of short column specimens is basically the same as under the axial compressive loads. The profile steel, longitudinal bars, and stirrups yield one after another, which leads to the severe peeling of concrete and the failure to specimens finally. The bearing capacity and ductility of short column specimens increase firstly and then decrease with the increase of the erosion age or the concentration of sodium sulfate solution. At the erosion age of 120 days, the bearing capacity and ductility of short columns increase 14.90% and 21.44% respectively. When the solution concentration reaches to 10%, the maximum reduction in bearing capacity and ductility of the short column is achieved, which are reduced by 8.04% and 10.72%, respectively. Therefore, the long-term immersion in the high concentration sodium sulfate solution has a great adverse effect on the axial compression performance of specimens. Based on the experimental study in this paper and the existing standard formulas, a modified calculation model on the axial compressive capacity of steel reinforced concrete short columns under the influence of different erosion ages and the sodium sulfate solution concentration is established, and the applicability of the model to this type of member in this environment is verified.

**Keywords:** sulfate attack; steel reinforced concrete column; axial compression performance; degradation law; bearing capacity calculation