

盐冻腐蚀试件受弯极限承载力演化模型分析

韩栋栋¹, 张 军^{1,2}

(1. 甘肃省交通科学研究院集团有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 甘肃省桥梁隧道健康监测与安全评估技术重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为了研究西北典型地区钢筋混凝土试件抵抗盐溶液、冻融腐蚀作用对受弯极限承载力的影响规律, 采用室内抗弯承载力试验对腐蚀后的试件进行测试, 选取不同水胶比、纵筋布筋形式、钢筋保护层厚度3种参数进行腐蚀试件的抗弯性能对比分析, 结果表明冻融腐蚀破坏远大于盐溶液腐蚀破坏, 水胶比是影响试件极限承载力的主要因素。随着保护层厚度的增大, 试件耐久性提高, 而试件易发生开裂, 从而提出盐溶液腐蚀和冻融循环作用下钢筋混凝土试件受弯斜截面极限承载力的演化模型函数。

关键词: 钢筋混凝土; 盐溶液腐蚀; 冻融腐蚀; 极限承载力; 演化模型

中图分类号: TU528.571

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0327-06

Analysis on Evolving Model of Ultimate Bearing Capacity in Bending of Salt-freezing Corrosion Specimens

HAN Dongdong¹, ZHANG Jun^{1,2}

(1. Gansu Provincial Transportation Research Institute Group Co., Ltd, Lanzhou 730030, China; 2. Key Laboratory of Bridge and Tunnel Health Monitoring and Safety Assessment Technology of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study the effect of salt solution, freeze-thaw corrosion on the flexural ultimate bearing capacity of reinforced concrete specimens in a typical region of Northwest China, the indoor bending bearing capacity test is used to test the corroded specimens. Three different parameters of water-adhesive ratio, longitudinal bar distribution form and reinforced protective layer thickness are selected to compare and analyze the bending performance of corroded specimens. The results conclude that the freeze-thaw corrosion damage is much larger than the salt solution corrosion damage, and the water-adhesive ratio is the main factor affecting the ultimate bearing capacity of the specimen. As the durability of the specimen increases with the increase in the thickness of the protective layer, and the specimen is prone to cracking. Therefore, the evolution model function of the ultimate bearing capacity of the flexural inclined section of reinforced concrete specimens under the action of salt solution corrosion and freeze-thaw cycles is proposed.

Keywords: reinforced concrete; salt solution corrosion; freeze-thaw corrosion; ultimate bearing capacity; evolution model

0 引 言

钢筋混凝土结构在不同盐溶液环境介质下遭受不同程度的腐蚀影响, 导致材料质量下降、结构强度降低及材料性能劣化等, 从而影响结构物的服役寿命。对此, 加强对钢筋混凝土环境介质腐蚀作用机理综合评估及防腐措施研究已成为目前面临的技术

问题。针对此问题, 许多国内外专家学者从不同层面对钢筋混凝土结构腐蚀环境下微观与宏观、表象与渗透的模型进行预测研究。

由于保护层厚度不足造成外界腐蚀性介质更容易侵入内部混凝土中, 发生碳化的速率加快。当腐蚀介质到达内置钢筋表面时, 会发生不同程度的电化学反应, 在其表面形成一种松散的薄锈层, 这种薄锈层随着时间变长锈蚀程度越严重^[1]。张新博等采用不同水胶比对混凝土结构抗硫酸盐腐蚀性的影响研究, 结果发现抗腐蚀性能与水胶比呈反比, 水胶比越大, 混凝土的抗腐蚀性能越弱^[2]。强腐蚀地区混凝土承受着干湿循环及腐蚀介质的共同影响, 导致混凝土表面不同程度的损伤破坏, 钢筋混凝土结构

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 甘肃省公路交通建设集团有限公司科技项目(2022-ZH-061)

作者简介: 韩栋栋(1994—), 男, 本科, 工程师, 从事公路工程试验检测工作。

通信作者: 张军(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事工程试验检测研究工作。电子信箱: 1656884155@qq.com

的承载力下降,耐久性进一步降低^[3]。程珍珍通过室内试验对某一建筑物在高盐环境下混凝土中SO₄²⁻、Cl⁻含量以及电位水平变化规律进行研究^[4]。魏栋学采用电化学修复技术对钢筋混凝土结构的耐腐蚀性能和剪切性能进行分析研究,研究结果可为纵筋锈蚀梁抗剪性能分析提供理论基础及参考价值^[5]。

总之,钢筋混凝土结构的腐蚀作用对结构耐久性和适用性影响尤为显著,加强对钢筋混凝土结构防腐技术及修复措施显得极为重要。本文主要通过水胶比、纵筋布筋形式、钢筋保护层厚度三种参数对钢筋混凝土试件抗硫酸盐腐蚀和抗冻融循环性能对

比研究,提出了盐溶液腐蚀和冻融循环作用下钢筋混凝土试件受弯斜截面极限承载力的演化模型。

1 试件模型设计

本文腐蚀试验中水胶比采用0.26、0.34、0.40三类,纵筋直径选用10、14、20 mm三类,钢筋保护层选用3.0、4.5、6.0 cm三类。

1.1 原材料性能指标

试件材料用水泥选取祁连山水泥厂生产的P.O 42.5级普通硅酸盐水泥。其各项规范值参考国标《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)的有关规定^[6],针对水泥材料的各项技术指标如表1所列。

表1 普通硅酸盐水泥性能指标^[6]

检测指标	细度/(m ² ·kg)	凝结时间/min		体积安定性	力学强度/MPa			
					抗折		抗压	
		初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
规范值	≥300	≥45	≤390	合格	≥4.0	≥6.5	≥17.0	≥42.5
实测值	320	125	230	合格	4.9	8.1	25.9	46.5

试件材料用钢筋为HRB400E具有抗震性能的普通热轧带肋钢筋,其符合标准《钢筋混凝土用钢-第2部分:热轧带肋钢筋》(GB 1499.2—2024)的相关规定^[7]。此类钢筋所含化学成分如表2所列,混凝土拌合和养护用水采用试验室饮用水。

表2 普通钢筋主成分组成表^[7]

主成分	C	V	Mn	P	S	Si
含量/%	0.21	0.08	1.40	0.01	0.01	0.54

试件材料用粗骨料为6~20 mm连续级配Ⅱ类碎石。参照标准《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)的要求^[8]对粗骨料进行试验,其各项参数指标如表3所列。

表3 粗骨料性能指标表^[8]

名称	质量损失值/%	压碎值/%	泥粉值/%	泥块值/%	表观密度/(kN·m ⁻³)
实测值	5	12	0.9	0.2	2 620
规范值	≤8	≤20	≤1.5	≤0.2	≥2 600

试件材料用细骨料根据《建设用砂》(GB/T 14684—2022)的有关规定^[9]检测细集料级配指标,如表4所列。通过检测结果可知,细集料表观密度为2 600 kg/m³,松散堆积密度为1 515 kg/m³、紧密堆积密度为1 764 kg/m³,该细集料为2区中砂。相关天然砂级配图如图1所示。

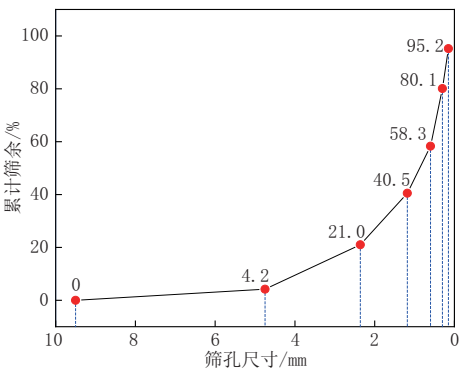


图1 天然砂级配图

表4 天然砂级配表

不同筛孔尺寸的累积筛余/%							细度模数	含泥量/%
9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.60 mm	0.30 mm	0.15 mm		
0	4.2	21.0	40.5	58.3	80.1	95.2	2.9	0.7

试件材料用减水剂为江苏苏博特新材料有限公司生产的聚羧酸高效减水剂,通过减水剂用量来调节混凝土的工作性。依据标准《混凝土外加剂》(GB 8076—2008)^[10]和《聚羧酸系高性能减水剂》(JG/T 223—2007)^[11]的有关说明对其性能指标进行检测,结果如表5所列。

表5 减水剂性能指标表^[11]

含固量/%	酸碱度	减水率/%	碱含量/%	氯离子含量/%	含气量/%
30	6.8	27	3.5	0.2	1

1.2 配合比设计与工况划分

为了更好地掌握西北地区大温差、恶劣气候环

境下结构物使用情况,试验采取设计强度等级为 C50 的混凝土配比,变化量是不同水胶比,其配比设计如表 6 所列。

表 6 混凝土配比设计表				
试件分类	水胶比	水/ (kg·m ³)	水泥/ (kg·m ³)	粗集料/ (kg·m ³)
A 组	0.26	139	536	791
B 组	0.34	158	465	764
C 组	0.40	152	380	737

根据水胶比、钢筋直径和钢筋保护层厚度三种变量不同,各设置 3 个不同规格尺寸试件进行室内

试验,试件工况划分见表 7 所列。

2 试验方案

2.1 试验加载方案

试件极限承载力试验使用实验室反力架,通过加载量程为 20 t 的千斤顶进行四点弯曲加载,加载方式采用分级加载,每级加载 20 kN,达到每级加载完成时稳压 5 min,然后对试件进行外观检查,标记裂缝走向、记录跨中挠度,直到加载至试件破坏失去承载能力,停止试验。试件抗弯极限承载力试验加载如图 2 所示。

表 7 试件工况划分表								
试件编号	AYI	BYI	CYI	BXI	BXII	BXIII	BYII	BZII
水胶比	0.26	0.34	0.40	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
纵筋直径/mm	14	14	14	10	10	10	14	20
保护层厚度/cm	3.0	3.0	3.0	3.0	4.5	6.0	4.5	4.5

注:水胶比 A、B、C 分别代表 0.26、0.34、0.40;纵筋直径 X、Y、Z 分别代表 10、14、20 mm;保护层厚度 I、II、III 分别代表 3.0、4.5、6.0 cm。

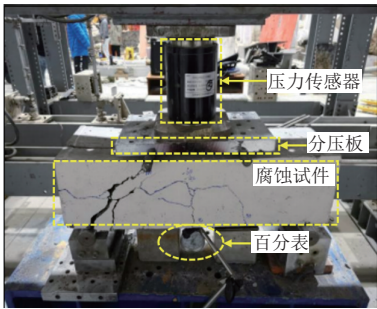
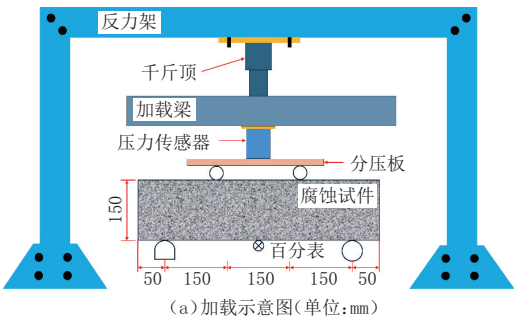


图 2 试件极限承载力试验图示

2.2 试件制作与养护

试件成型试模为 100 mm×100 mm×100 mm、100 mm×100 mm×400 mm、150 mm×150 mm×550 mm 三种,主要用于检测抗弯极限承载力。试件制作与养护主要依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[12]的相关规定进行现场浇筑成型。为保证钢筋位置准确,通过试模端部内设置专用钢片来固定住纵筋位置,针对直径 10、14、20 mm 钢筋设置了三种不同规格的固定钢片。

2.3 试验内容

2.3.1 盐腐蚀试验

在该项试验中所用的腐蚀溶液浓度,主要依据实际复杂环境中及大西北区域内盐渍土分类,综合实验室环境特性来考虑,由此确定盐腐蚀试验中硫酸盐溶液浓度为 6.0%,氯化钠溶液浓度为 1.5%^[13]。

试件尺寸是 100 mm×100 mm×100 mm、100 mm×100 mm×400 mm 的需经过全浸泡法,分析试件在盐溶液介质下的腐蚀性能;试件尺寸是 150 mm×150 mm×550 mm 的需经过单面浸泡法,如图 3 所示。

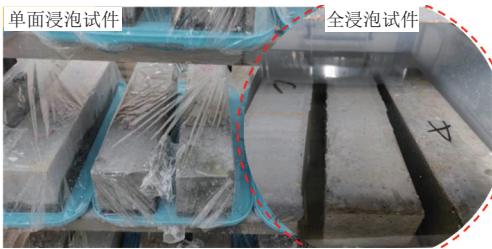


图 3 盐腐蚀试件图

针对全浸泡试件,将养生好后的试件放进盛液箱中,并加入配置好的腐蚀液,液面超出试件表面至少 25 mm。对于单面浸泡试件,只浸泡试件下底面混凝土。全浸泡试件的性能测试周期为每隔 30 d,单面浸泡试件的性能测试周期为 d=30、60、120、180、300 d 共 5 个龄期。

2.3.2 冻融腐蚀试验

温度循环值按照敦煌地区年平均温度变化设定,通过查阅资料显示,每年里,月最低气温在敦煌

地区为-29℃、月最高气温为41℃。按照月最低气温,确定冻融温度循环界限为-30~40℃,一循环24 h含有12阶段(7个降温,5个升温段)。

冻融腐蚀试验与盐腐蚀试验相同,将试件放置于温控箱中,经过设定箱内温度来模拟实际环境温度状况,进而达到正负温交替来实现冻融循环,如图4所示。



图4 冻融腐蚀试件图

冻融腐蚀试验共设置5个龄期,分别为*n*=50、75、100、125、150次时最佳。

3 试件斜截面受弯极限承载力演化模型

通过对试件在腐蚀作用下的不同水胶比、钢筋保护层厚度受弯极限承载力分析,对试件腐蚀先后斜截面处受弯极限承载力的比值作为相对值,得出相对系数 δ_s ,则极限承载力可用式(1)表示:

$$Z = \delta \times Z_0 \tag{1}$$

式中:*Z*为腐蚀后受弯极限承载力变化; δ 为相对系数;*Z*₀为腐蚀前受弯极限承载力变化。

3.1 盐腐蚀影响的试件极限承载力演化模型

3.1.1 水胶比变化对相对值的作用

通过试件单面腐蚀后的极限承载力实测值来计算相对系数 δ_s ,这时保护层厚度取3.0 cm、纵筋直径取14 mm作为定值,计算结果如表8所列。

表8 水胶比变化对试件极限承载力影响表

龄期	实测值/kN			相对系数 δ_s		
	AYI	BYI	CYI	AYI	BYI	CYI
0	149	134	119	1.000	1.000	1.000
30	152	137	125	1.020	1.022	1.050
60	165	154	133	1.107	1.149	1.118
120	176	160	143	1.181	1.194	1.202
180	184	148	128	1.235	1.104	1.076
300	172	135	108	1.154	1.007	0.908

根据水胶比对试件斜截面受弯承载力在不同龄期下的影响,成立相对系数与腐蚀龄期之间的函数关系,用式(2)表示:

$$\delta_s = ad^2 + bd + c \tag{2}$$

式中:*d*为腐蚀龄期。

将表8中的数据带到式(2)中进行多项式曲线拟合,如图5所示,得到3种水胶比下对应试件的拟合关系式为:

AYI组试件拟合关系式为:

$$\delta_s = -6.24 \times 10^{-6} d^2 + 0.0025 d + 0.979 \tag{3}$$

BYI组试件拟合关系式为:

$$\delta_s = -7.29 \times 10^{-6} d^2 + 0.0022 d + 1.002 \tag{4}$$

CYI组试件拟合关系式为:

$$\delta_s = -8.72 \times 10^{-6} d^2 + 0.0023 d + 1.004 \tag{5}$$

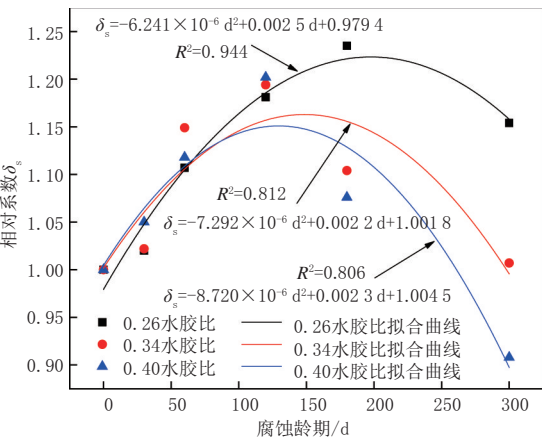


图5 盐腐蚀作用下不同水胶比拟合图

按照水胶比不同,把自变量水胶比带入相对系数方程中,推出包含自变量水胶比 ω 的拟合曲线。各项系数见式(6~8):

$$a = -1.75 \times 10^{-5} \omega - 1.60 \times 10^{-6} \tag{6}$$

$$b = -0.002\omega + 0.003 \tag{7}$$

$$c = 0.185\omega + 0.934 \tag{8}$$

从而推出含有变量水胶比作用的相对系数方程见式(9):

$$\delta_s = (-1.75 \times 10^{-5} \omega - 1.60 \times 10^{-6}) d^2 + (-0.002\omega + 0.003) d + 0.185\omega + 0.934 \tag{9}$$

式中:*d*为腐蚀龄期; ω 为水胶比。

3.1.2 保护层变化对相对值的作用

关注到保护层对试件在腐蚀环境下的极限承载力作用较大,因而提出一个基于保护层厚度的修正参数 γ 来对相对系数方程进行修正。这时水胶比取0.34、纵筋直径取14 mm作为定值,于是计算结果如表9所列。

对不同保护层厚度数据进行归一化处理,以保护层厚度与腐蚀龄期为自变量,修正系数作为因变量,进一步对方程实行二元非线性曲面拟合,考虑保护层厚度的修正系数函数关系,得出修正系数 γ_s 的拟合方程见式(10),其拟合系数*R*²=0.931。

表9 保护层厚度变化对试件极限承载力影响表

龄期	实测值/kN			相对系数 γ_s		
	BYI	BYII	BYIII	BYI	BYII	BYIII
0	129	122	108	1.000	0.946	0.837
30	134	126	111	1.000	0.940	0.828
60	147	132	113	1.000	0.898	0.769
120	160	140	123	1.000	0.875	0.769
180	158	152	138	1.000	0.962	0.873
300	141	144	133	1.000	1.021	0.943

$$\gamma_s = -0.07\text{EXP}[-\text{EXP}[\frac{-(c - 45.42)}{6.46}]] + 0.03\text{EXP}[-\text{EXP}[\frac{-(d - 165.79)}{27.02}]] - \text{EXP}[\frac{-(d - 165.79)}{27.02}] + 0.98 \quad (10)$$

式中: d 为腐蚀龄期; c 为钢筋保护层厚。

于是推出考虑钢筋保护层厚、水胶比、腐蚀龄期 3 者下的试件受弯极限承载力演化模型关系用式 (11)表示。

$$Z = \gamma_s \times \delta_s \times Z_0 \quad (11)$$

3.2 冻融循环影响的试件极限承载力演化模型

3.2.1 水胶比变化对相对值的作用

通过试件冻融循环后的极限承载力实测值来计算相对系数 δ_d ,这时保护层厚度取 3.0 cm、纵筋直径取 14 mm 作为定值,计算结果如表 10 所列。

表10 水胶比变化对试件极限承载力影响表

龄期	实测值/kN			相对系数 δ_d		
	AYI	BYI	CYI	AYI	BYI	CYI
0	172	151	125	1.000	1.000	1.000
50	167	145	117	0.971	0.960	0.936
75	156	132	106	0.907	0.874	0.848
100	149	123	88	0.866	0.815	0.704
125	132	102	67	0.767	0.675	0.536
150	109	74	58	0.634	0.490	0.464

试件斜截面受弯极限承载力在不同冻融次数下的作用,依据水胶比不同建立了相对系数与水胶比、冻融循环次数之间的关系,用式(12)表示:

$$\delta_d = an^2 + bn + c \quad (12)$$

式中: n 为冻融循环次数。

将表 10 中的数据带到式 (12) 中进行多项式曲线拟合,如图 6 所示,得到 3 种水胶比下对应试件的拟合关系式如下:

AYI 组试件拟合关系式为:

$$\delta_d = -1.85 \times 10^{-5}n^2 + 3.96 \times 10^{-4}n + 0.997 \quad (13)$$

BYI 组试件拟合关系式为:

$$\delta_d = -2.61 \times 10^{-5}n^2 + 6.09 \times 10^{-4}n + 0.996 \quad (14)$$

CYI 组试件拟合关系式为:

$$\delta_d = -1.89 \times 10^{-5}n^2 - 0.002n + 1.012 \quad (15)$$

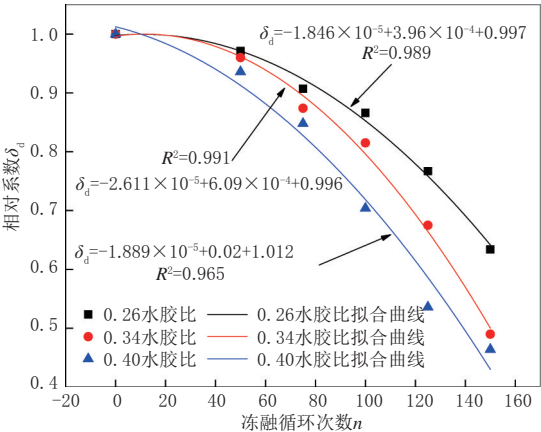


图6 冻融作用下不同水胶比拟合曲线图

按照水胶比不同,把自变量水胶比带入相对系数方程中,推出包括自变量水胶比 ω 的拟合曲线。各项系数见式 (16) ~ (18):

$$a = -8.07 \times 10^{-6}\omega - 1.85 \times 10^{-5} \quad (16)$$

$$b = -0.016\omega + 0.006 \quad (17)$$

$$c = 0.101\omega + 0.968 \quad (18)$$

从而推出含有水胶比作用的相对系数方程见式(19):

$$\delta_d = (-8.07 \times 10^{-6}\omega - 1.85 \times 10^{-5})n^2 + (-0.016\omega + 0.006)n + 0.101\omega + 0.968 \quad (19)$$

公式(19)中的各参数含义同上式。

3.2.2 保护层变化对相对值的作用

关注到保护层对试件在腐蚀环境下的极限承载力作用较大,因而提出一个基于保护层厚度的修正系数 γ 来对相对系数方程进行修正。这时水胶比取 0.34、纵筋直径取 14 mm 作为定值,于是计算结果如表 11 所列。

表11 不同保护层厚度试件极限承载力表

龄期	实测值/kN			相对系数 γ_d		
	BYI	BYII	BYIII	BYI	BYII	BYIII
0	133	125	112	1.000	0.940	0.842
50	160	143	134	1.000	0.894	0.838
75	151	137	129	1.000	0.907	0.854
100	136	125	110	1.000	0.919	0.809
125	116	117	96	1.000	1.009	0.828
150	92	100	79	1.000	1.087	0.859

对不同保护层厚度数据进行归一化处理,以保护层厚度与冻融循环次数为自变量,修正系数作为因变量,进一步对方程实行二元非线性曲面拟合,考虑保护层厚度的修正系数函数关系,得出修正系数 γ_d 的拟合方程见式 (20),其拟合系数 $R^2=0.928$ 。

$$\gamma_d = (2.18 \times 10^{-6}n - 1.75 \times 10^{-5})n + (-2.23 \times 10^{-5}c - 0.01)c + 1.09 \quad (20)$$

式中: n 为冻融循环次数; c 为钢筋保护层厚度。

于是推出考虑钢筋保护层厚、水胶比、冻融循环次数三者下的试件受弯极限承载力演化模型关系式(21)表示。

$$Z = \gamma_d \times \delta_d \times Z_0 \quad (21)$$

4 结 语

本文通过不同水胶比、纵筋布筋形式、钢筋保护层厚度三种参数对钢筋混凝土试件抗盐溶液腐蚀和抗冻融循环作用下试件抗弯极限承载力时变模型对比研究,研究结果如下。

(1)盐腐蚀与冻融腐蚀试验中,钢筋混凝土试件的力学性能改变,主要呈现出先增后降的态势,随着水胶比变大,材料性能发生突变的时间越早,后期性能降低速率越显著。

(2)试件受弯破坏时,冻融腐蚀耦合试验要大于盐溶液试验。对不同参数腐蚀试件进行数据拟合及归一化处理,得到相应的参数变化的函数关系式。

(3)依据耐久性实验里钢筋混凝土试件极限承载力的材料劣化程度,建立极限承载力的相对系数修正模型,从而推出试件在盐腐蚀作用及冻融腐蚀作用下的极限承载力演化模型函数。

参考文献:

- [1] 洪乃丰. 腐蚀与混凝土耐久性预测的发展和难点讨论[J]. 混凝土, 2006(10): 10-16.
- [2] 张新博, 张戎令, 宁贵霞, 等. 水胶比对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 6(18): 1471-1478.
- [3] 李华. 强腐蚀地区混凝土硫酸盐腐蚀机理及剩余寿命评判[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [4] 程珍珍. 高盐环境下铜矿渣混凝土结构抗腐蚀性能试验研究[J]. 福建建材, 2023(10): 14-17.
- [5] 魏栋学. 纵筋锈蚀混凝土梁电化学修复后的耐腐蚀性及抗剪试验研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- [6] GB 175—2023, 通用硅酸盐水泥[S].
- [7] GB 1499.2—2024, 钢筋混凝土用钢—第2部分: 热轧带肋钢筋[S].
- [8] GB/T 14685—2022, 建设用卵石、碎石[S].
- [9] GB/T 14684—2022, 建设用砂[S].
- [10] GB 8076—2008, 混凝土外加剂[S].
- [11] JG/T 223—2007, 聚羧酸系高性能减水剂[S].
- [12] GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
- [13] 张坤. 西北地区腐蚀和冻融耦合作用对钢筋混凝土构件抗弯性能影响的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

