

文章编号:1007-9629(2021)04-0788-06

氯盐环境下钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变本构模型

钟小平^{1,2}, 戴仁礼¹, 袁承斌², 夏 晋³, 彭蓝鸽¹

(1.扬州大学 建筑科学与工程学院,江苏 扬州 225127; 2.扬州大学 水利科学与工程学院,
江苏 扬州 225009; 3.浙江大学 结构工程研究所,浙江 杭州 310058)

摘要:采用加速腐蚀试验,对氯盐环境下钢筋锈蚀损伤混凝土棱柱体试件的破坏形态、应力-应变全曲线、峰值应力、峰值应变、极限应变及弹性模量进行了试验研究.结果表明:钢筋锈蚀损伤混凝土试件的破坏多为微柱失稳破坏,大致平行于受力方向的锈胀裂缝是主要的破裂面;钢筋锈蚀损伤混凝土实测应力-应变全曲线与未锈蚀损伤混凝土相似,但是随着钢筋锈蚀率的增加,其应力-应变全曲线上段斜率逐渐减小,峰值应变增大;钢筋锈蚀率越大的试件,脆性越明显;钢筋锈蚀损伤混凝土试件的峰值应力均低于未锈蚀损伤试件,峰值应变、极限应变随钢筋锈蚀率增加而增大,弹性模量随钢筋锈蚀率增加而减小;建立了钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变本构模型,模型计算值与实测值吻合较好.

关键词:氯盐环境;钢筋锈蚀;损伤混凝土;力学性能;应力-应变全曲线

中图分类号:TU528.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.016

Stress-Strain Constitutive Model of Concrete Damaged by Rebar Corrosion in Chloride Environment

ZHONG Xiaoping^{1,2}, DAI Renli¹, YUAN Chengbin², XIA Jin³, PENG Lange¹

(1.College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2.College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

3.Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Adopting accelerated corrosion method, the failure mode, stress-strain curves, peak stress, peak strain, ultimate strain and elastic modulus of the prismatic concrete specimens damaged by rebar corrosion were studied experimentally. Results show that the failure of corrosion-damaged concrete specimens is mainly caused by the instability failure of micro-column. The corrosion-induced cracks which are roughly parallel to the direction of force are the main fracture surface. The measured stress-strain curves of concrete damaged by corrosion are similar to that of uncorroded concrete, however, the slope of stress-strain curve decreases gradually and the peak strain increases with the increase of corrosion ratio, the higher the corrosion rate of specimen is, and the more obvious the brittleness is. The peak stress of concrete specimens damaged by corrosion is lower than that of the uncorroded specimens, the peak strain and ultimate strain increases with the increase of corrosion rate, the elastic modulus decreases with the increase of corrosion rate. A stress-strain constitutive model of concrete damaged by rebar corrosion is established, the calculated value of the model agrees well with the measured value.

Key words: chloride environment; rebar corrosion; damaged concrete; mechanical property; stress-strain curve

收稿日期:2020-05-06; 修订日期:2020-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678513,51278444,51778566);江苏高校优势学科建设工程资助项目;浙江省交通运输厅科研项目(2018016)

第一作者:钟小平(1969—),女,四川资中人,扬州大学教授,硕士生导师,博士. E-mail:zhongxiaoping@zju.edu.cn

对于氯盐环境下的钢筋混凝土结构,氯盐侵蚀及由此引起的钢筋锈蚀膨胀力都将使混凝土产生损伤^[1-3].混凝土受到损伤后,其应力-应变本构关系将发生改变,而钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变本构关系是研究服役钢筋混凝土结构剩余承载力和变形性能的基础,也是服役结构非线性有限元分析时必不可少的本构关系.

然而,目前有关氯盐环境下钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变本构关系的研究还很少.先前的研究主要关注了不同环境条件下(温度、湿度、干湿交替等)氯盐单因素作用对混凝土的侵蚀特性^[4-5]、损伤机理^[6-7]、抗压强度^[8]、抗折强度^[9]、动力学特性^[10-11]及变形性能^[12]等方面.研究表明,氯盐腐蚀初期对混凝土抗压强度有一定益处,但后期抗压强度、抗折强度、动力学特性等均有明显降低.这些研究成果为深入分析氯盐腐蚀混凝土的损伤机理及力学性能退化规律提供了理论基础.然而,实际氯盐环境中的混凝土结构损伤尤其是钢筋混凝土梁、柱等的损伤,除了氯盐腐蚀造成的损伤以外,由氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀膨胀力作用于混凝土,也会导致混凝土产生开裂、剥落等损伤^[13-14],即混凝土损伤是氯盐腐蚀及由此引起的钢筋锈蚀膨胀损伤共同作用的结果,仅考虑氯盐腐蚀损伤部分不能真实反映混凝土力学性能的退化规律.鉴于此,本文通过实验室加速腐蚀试验,对氯盐环境下钢筋锈蚀损伤混凝土的力学性能进行试验研究,建立氯盐环境下钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变本构模型,以期为服役钢筋混凝土结构抗力退化及结构非线性有限元分析提供准确的材料性能参数.

1 试验

1.1 原材料及试件设计

水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥;粗骨料采用粒径为5~20 mm连续级配的碎石;细骨料为天然河砂,细度模数为2.49;水为普通自来水.混凝土配合比见表1.

表1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of concrete kg/m³

| Water | Cement | Sand | Stone |
|-------|--------|------|-------|
| 195 | 433 | 569 | 1 156 |

采用150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体试件.根据钢筋混凝土构件的布筋特点,在试件的4个角上内置直径为16 mm、长度为240 mm的HRB400级钢筋,如图1所示.钢筋锈蚀对混凝土试

件造成的损伤程度以钢筋锈蚀率来表征,设计钢筋理论锈蚀率 ρ 为0%(未锈蚀,对照组)、3%、6%、9%,每组制作6个试件,其中3个用于测定混凝土的轴心抗压强度和应力-应变全曲线(A组),另外3个用于测定混凝土的弹性模量(B组).浇筑试件之前,在钢筋末端接上导线,用于对试件进行通电加速腐蚀试验.试件浇筑成型24 h后拆模,在(20±2)℃和相对湿度95%以上的标准养护室中养护至28 d,之后进行加速腐蚀试验.

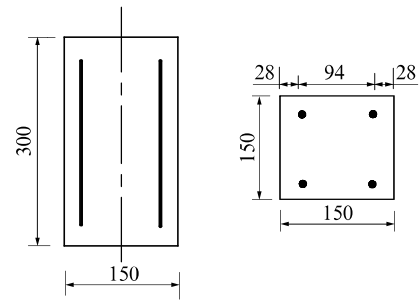


图1 钢筋布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steel bar arrangement(size: mm)

1.2 加速腐蚀试验

将试件放置于质量分数为5%的氯化钠溶液中进行“恒电流-氯盐干湿循环”加速腐蚀试验.干湿循环周期采用14 d,干湿循环比例为1:1,即干7 d湿7 d,干燥时室内平均气温15℃,平均相对湿度70%左右.加速锈蚀过程中将稳压直流电源的负极连接于包裹在试件表面的不锈钢网上,待锈蚀钢筋与电源的正极连接,湿态时通电开始,干态时通电停止.腐蚀电流密度采用 $i=0.2$ mA/cm²,锈蚀钢筋表面积选取所有待锈蚀钢筋表面积之和,计算得到每个试件所需的通电电流大小 $I=0.11$ A.根据设计的钢筋理论锈蚀率 ρ ,采用Faraday腐蚀定律计算得到预期的通电时间 t 、干湿循环时间 t_w 及干湿循环次数 N ,结果见表2.分别达到各自的通电时间后,加速腐蚀试验结束.

表2 钢筋锈蚀损伤混凝土试件加速腐蚀参数计算结果
Table 2 Calculation results of accelerated corrosion parameters of corrosion damage specimens

| $\rho/\%$ | I/A | t/d | t_w/d | N |
|-----------|-------|-------|---------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0.11 | 17.1 | 34.2 | 2.4 |
| 6 | 0.11 | 34.2 | 68.4 | 4.9 |
| 9 | 0.11 | 51.4 | 102.8 | 7.3 |

1.3 加载试验及钢筋锈蚀率测定

钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变全曲线及弹性

模量测试在 YAW-G3000kN 微机控制电液伺服高刚度岩石混凝土试验机上进行. 试件上、下端安装激光位移计, 采用等变形加载. 应力-应变全曲线测试时, 上升段以 0.2 mm/min 的速率加载, 达到峰值应力后, 下降段以 0.15 mm/min 的速率进行卸载, 直至曲线逐渐平稳试验结束; 弹性模量测试时, 弹性阶段以 0.15 mm/min 的速率加载至变形为 0.3 mm, 然后以同样的速率卸载至变形为 0.1 mm, 如此进行 3 次加载, 在最后一次加载完成后, 以 0.2 mm/min 的速率加载至峰值, 达到峰值应力后, 下降段以 0.15 mm/min 的速率进行卸载, 直至曲线逐渐平稳试验结束. 试件荷载及总变形等数据由计算机自动采集并记录.

应力-应变全曲线及弹性模量测试完成后, 取出锈蚀钢筋, 除锈、烘干处理后, 测定钢筋锈蚀后质量, 然后采用失重法计算获得全曲线组试件(A组)和弹性模量组试件(B组)的实测平均锈蚀率 ρ_c , 结果如表 3 所示.

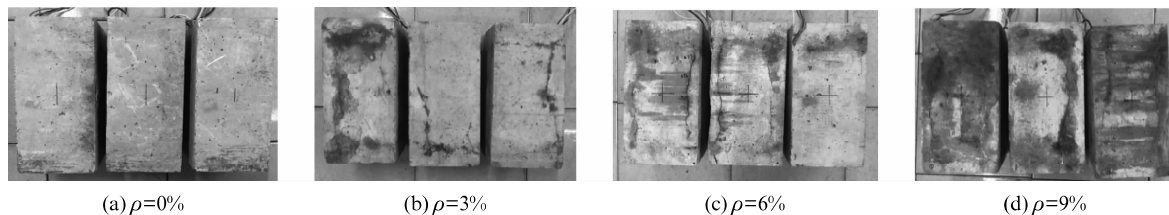


图2 损伤试件表面状况

Fig. 2 Surface conditions of damaged specimens

2.2 破坏过程与形态

观察未锈蚀和锈蚀损伤混凝土试件的加载过程, 发现二者的破坏过程与破坏形态并不完全相同. 未锈蚀损伤试件加载初期应力-应变按一定比例增长, 随着荷载的增大, 试件逐渐进入弹塑性阶段, 当接近峰值应力时, 试件中部出现少量竖向细微裂缝, 达到峰值应力后, 承载力缓慢下降, 试件出现多条不连续的竖向裂缝, 裂缝尖端逐渐贯通形成斜向破坏面.

对于锈蚀损伤混凝土试件, 由于加载前已经受到损伤, 存在与受力方向大致平行的锈胀裂缝, 因此, 从开始加载到试件破坏的整个受力过程中, 锈胀裂缝宽度逐渐增大, 应变增长较快. 临近峰值荷载时, 棱柱体试件中部相继出现了竖向细微加载裂缝, 并向试件两端发展, 试件端部的混凝土开始剥落. 达到峰值应力后, 锈胀裂缝和试件中部的加载裂缝宽度发展迅速, 横向变形加剧, 棱柱体沿锈胀裂缝和加载裂缝被劈裂成几个小柱体, 这些微小柱体继续失稳破坏, 棱柱体的承载力逐渐降低, 核心混凝土被压

表3 钢筋实测平均锈蚀率统计表

Table 3 Statistical table of the measured average corrosion ratio of steel bars

| $\rho / \%$ | $\rho_c / \%$ | |
|-------------|---------------|---------|
| | Group A | Group B |
| 0 | 0 | 0 |
| 3 | 2.88 | 1.30 |
| 6 | 5.05 | 4.40 |
| 9 | 7.60 | 9.80 |

2 结果与分析

2.1 钢筋锈蚀损伤混凝土试件外观

氯离子侵入混凝土内部, 在使混凝土遭到腐蚀的同时引发钢筋锈蚀, 当钢筋锈蚀膨胀力超过混凝土抗拉强度后, 混凝土被胀裂. 观察损伤试件表面状况(如图 2 所示)发现, 沿钢筋长度方向, 试件表面均出现了不同程度的顺筋锈胀裂缝, 并且随着钢筋锈蚀率的增加, 锈胀裂缝逐渐贯通, 裂缝宽度逐渐增大, 裂缝处有锈蚀产物溢出.

坏, 最后形成以锈胀裂缝为主的破坏面.

2.3 应力-应变全曲线

2.3.1 实测应力-应变全曲线

将实测荷载和纵向位移分别换算为应力 σ_c 和应变 ϵ_c , 得到不同钢筋锈蚀率试件的应力-应变全曲线(见图 3), 每条曲线均取自 3 个试件的平均值. 由图 3 可见: 不同钢筋锈蚀率试件应力-应变全曲线形状及特征大体相同, 均由上升段和下降段组成; 在应力-应变全曲线上, 随着钢筋锈蚀率的增加, 应力-应变曲线的斜率逐渐减小, 峰值应变增大, 峰值应力降低, 说明锈蚀损伤对混凝土的强度和变形均产生了一定的影响; 当应力超过峰值应力后, 曲线进入下降段, 不同钢筋锈蚀率试件的强度并不完全消失, 随着应力的减小(卸载), 应变仍然增加.

2.3.2 力学性能指标

表 4 给出了各混凝土试件的峰值应力 $\sigma_{0,c}$ 、峰值应变 $\epsilon_{0,c}$ 和极限应变 $\epsilon_{cu,c}$. 其中, 极限应变 $\epsilon_{cu,c}$ 取钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变全曲线下降段 0.85 倍峰值应力处对应的应变值^[15-16].

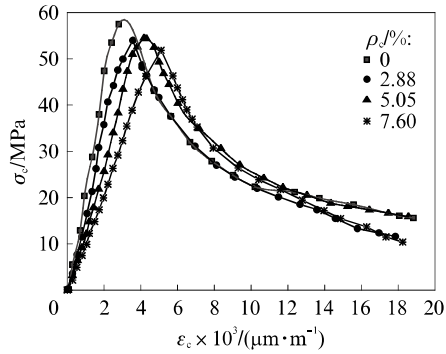


图 3 不同钢筋锈蚀率试件的应力-应变全曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of specimens with different corrosion ratios

表 4 各混凝土试件的峰值应力、峰值应变和极限应变
Table 4 Peak stress, peak strain and ultimate strain of specimens damaged by rebar corrosion

| $\rho_c / \%$ | $\sigma_{0,c} / \text{MPa}$ | $\epsilon_{0,c} \times 10^3 / (\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$ | $\epsilon_{cu,c} \times 10^3 / (\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$ |
|---------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0 | 57.47 | 2.808 | 3.563 |
| 2.88 | 53.99 | 3.569 | 4.718 |
| 5.05 | 54.48 | 4.180 | 5.342 |
| 7.60 | 51.83 | 5.102 | 5.863 |

由表 4 可见,钢筋锈蚀损伤混凝土的峰值应力 $\sigma_{0,c}$ 均低于未锈蚀损伤试件,当钢筋实测平均锈蚀率 ρ_c 从 0 增加到 2.88% 时,峰值应力 $\sigma_{0,c}$ 降低速率较快,较未锈蚀损伤试件降低了 6.1%; 随着 ρ_c 的增加, $\sigma_{0,c}$ 降低速率减小,当 ρ_c 达到 7.60% 时,钢筋锈蚀损伤混凝土的峰值应力 $\sigma_{0,c}$ 较未锈蚀损伤试件降低了 9.8%. 分析原因:钢筋锈蚀作用初期,锈蚀膨胀力使混凝土内部产生了微裂缝,并已发展到试件表面形成了可见的锈胀裂缝,见图 2(b),试件由里及表受到损伤,外围胀裂部分混凝土对核心混凝土的横向约束能力快速减弱,其受力状态基本上相当于核心区域混凝土的受力状态,因而峰值应力降低较快;随着腐蚀时间延长, ρ_c 增加,抗压强度主要由核心混凝土提供,由于锈胀力尚未使面积较大的核心混凝土胀裂,锈蚀对核心混凝土强度降低的影响减小,因而峰值应力降低速率减小. 由表 4 还可以看出,试件峰值应变和极限应变随着 ρ_c 的增加,基本呈线性增长. 当 ρ_c 达到 7.60% 时,试件峰值应变和极限应变较未锈蚀损伤试件分别增长了 81.7% 和 64.6%. 可见,钢筋锈蚀损伤对试件峰值应力、峰值应变、极限应变均有较大的影响. 通过对表 4 中试验数据进行拟合,得到了峰值应力、峰值应变、极限应变与实测平均锈蚀率之间的关系:

$$\sigma_{0,c} = 57.047 - 0.6708\rho_c, \rho_c \leq 7.6\% \quad (1)$$

$$\epsilon_{0,c} = 0.0028 + 0.0003\rho_c, \rho_c \leq 7.6\% \quad (2)$$

$$\epsilon_{cu,c} = 0.0037 + 0.0003\rho_c, \rho_c \leq 7.6\% \quad (3)$$

式(1)~(3)的拟合相关系数分别为 0.8684、0.9937、0.9756,可见拟合结果较好.

2.3.3 应力-应变全曲线方程

对实测的应力-应变全曲线进行无量纲化处理,横坐标采用 $\epsilon_c / \epsilon_{0,c}$ 表示,纵坐标采用 $\sigma_c / \sigma_{0,c}$ 表示,如图 4 所示.

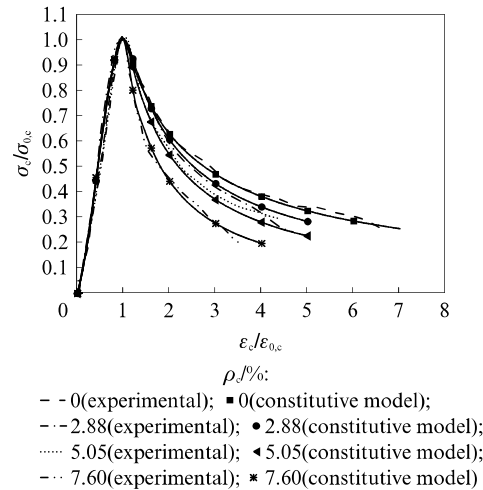


图 4 本构模型与实测曲线对比

Fig. 4 Comparison of constitutive models with experimental curves

由图 4 可见,实测曲线的上升段和下降段有明显的区别,上升段各曲线基本重合,近似线性发展;达到峰值应力后,随钢筋实测平均锈蚀率增加,曲线下降段坡度变陡,说明钢筋实测平均锈蚀率越大,试件脆性越明显. 根据曲线上升段和下降段各自的特点,分别选用不同的函数,采用最小二乘法拟合试验结果,得到应力-应变全曲线本构模型.

上升段^[17]:

$$y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, 0 \leq x \leq 1 \quad (4)$$

下降段:

$$y = bx^\beta, x > 1 \quad (5)$$

式中: $y = \sigma_c / \sigma_{0,c}$; $x = \epsilon_c / \epsilon_{0,c}$; a 为曲线上升段控制参数; b 、 β 为曲线下降段控制参数.

通过拟合分析,得到曲线上升段和下降段控制参数 a 、 b 和 β 随 ρ_c 变化的表达式:

$$a = 0.0035\rho_c^2 - 0.017\rho_c + 0.641 \quad (6)$$

$$b = -0.0043\rho_c^2 + 0.0271\rho_c + 1.0297 \quad (7)$$

$$\beta = -0.0043\rho_c^2 - 0.026\rho_c - 0.7182 \quad (8)$$

为了验证本文给出的应力-应变全曲线本构模

型的适用性,图4给出了本构模型与实测曲线的比较.由图4可见,应力-应变全曲线本构模型计算结果与实测结果吻合较好,将此模型应用于分析服役结构剩余承载力、变形性能以及非线性有限元模拟

是可行的.

2.4 弹性模量

采用反复加载、卸载的方式对不同钢筋锈蚀损伤混凝土弹性模量进行测试,结果如图5所示.

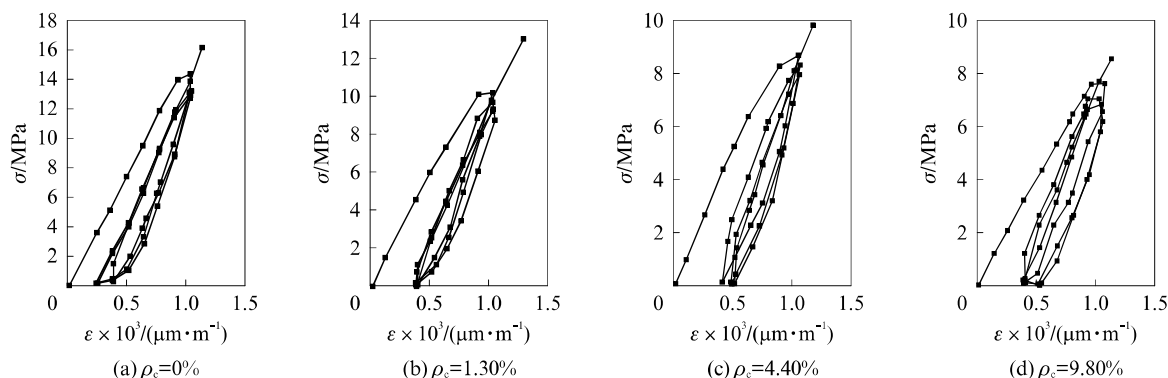


图5 钢筋锈蚀损伤混凝土弹性模量测试结果

Fig. 5 Elastic modulus test results of concretes damaged by rebar corrosion

由图5可见,由于钢筋锈蚀损伤混凝土的非弹性性质,每次卸载至零时,变形不能完全恢复,存在残余应变,且随着钢筋实测平均锈蚀率的增加,残余应变增大.当荷载重复3次后,不同锈蚀损伤混凝土的应变基本趋于稳定,应力-应变曲线接近于直线.取最后一次加载的应力-应变全曲线上应力 $\sigma = 0.4\sigma_{0,c}$ 处割线的斜率作为混凝土弹性模量的取值^[18],得到锈蚀损伤混凝土弹性模量 $E_{c,c}$ 与钢筋实测平均锈蚀率的关系:

$$E_{c,c} = 21.604 - 1.3364\rho_c, \rho_c \leq 10\% \quad (9)$$

式(9)的拟合相关系数 $R^2 = 0.9033$,拟合结果较好,用其预测氯盐环境下钢筋锈蚀损伤混凝土的弹性模量是可行的.

3 结论

(1)钢筋锈蚀损伤混凝土试件的破坏多为微柱失稳破坏,大致平行于受力方向的锈胀裂缝是主要的破裂面.

(2)钢筋锈蚀损伤混凝土实测应力-应变曲线与未锈蚀损伤混凝土相似.但是,随着钢筋锈蚀率的增加,应力-应变全曲线上上升段的斜率逐渐减小,峰值应变增大.当曲线进入下降段后,钢筋锈蚀率越大的试件,曲线下降段坡度相对越陡,脆性越明显.

(3)钢筋锈蚀损伤试件的峰值应力均低于未锈蚀损伤试件,峰值应变、极限应变随着钢筋锈蚀率的增加而增大,弹性模量随着钢筋锈蚀率的增加而减小.

(4)所建立的钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变本

构模型计算值与实测值吻合较好,可为氯盐环境下服役钢筋混凝土结构承载力、变形性能以及非线性有限元分析提供理论依据.

参考文献:

- [1] 金伟良,袁迎署,卫军,等.氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M].北京:科学出版社,2011:1-17.
JIN Weiliang, YUAN Yingshu, WEI Jun, et al. Durability theory and design method of concrete structure under chloride environment [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-17. (in Chinese)
- [2] GJCRV O E. Durability design of concrete structures in severe environments [M]. Norway: Taylor & Francis, 2009: 13-43.
- [3] 钟小平,金伟良.钢筋混凝土结构基于耐久性的可靠度设计方法[J].土木工程学报,2016,49(5):31-39.
ZHONG Xiaoping, JIN Weiliang. Reliability design method for reinforced concrete structure based on durability [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 31-39. (in Chinese)
- [4] WANG Y Z, WU L J, WANG Y C, et al. Effects of coarse aggregates on chloride diffusion coefficients of concrete and interfacial transition zone under experimental drying-wetting cycles [J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 230-245.
- [5] YE H L, JIN X Y, FU C Q, et al. Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 457-463.
- [6] 范颖芳,张英姿,胡跃东,等.氯化钠侵蚀混凝土力学性能的试验研究[J].大连海事大学学报,2008,34(1):125-128.
FAN Yingfang, ZHANG Yingzi, HU Yuedong, et al. Experimental study on property of concrete corroded by NaCl [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(1): 125-128.

- (in Chinese)
- [7] 李永强,巴明芳,柳俊哲,等.干湿循环作用下水泥基复合材料抗氯离子侵蚀性能及其微观结构变化[J].复合材料学报,2017,34(12):2856-2865.
LI Yongqiang,BA Mingfang,LIU Junzhe, et al. Resistance to chloride erosion of cement matrix composite materials under dry-wet cycling and their micro-structural changes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(12): 2856-2865. (in Chinese)
- [8] 张晓,闫涛.氯离子腐蚀环境下混凝土力学性能研究[J].金陵科技学院学报,2012,28(1):38-41.
ZHANG Xiao,YAN Tao. Mechanical properties of concrete in chloride corrosion environment[J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2012, 28(1): 38-41. (in Chinese)
- [9] 李隽,高培伟,刘宏伟,等.混凝土在浸泡和干湿循环作用下的抗氯盐侵蚀性能[J].南京理工大学学报,2017,41(5):666-670.
LI Jun,GAO Peiwei,LIU Hongwei, et al. Study on concrete resistance to chloride salt corrosion under full soaking and dry-wet cycling condition[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(5): 666-670. (in Chinese)
- [10] 聂良学,许金余,刘志群,等.盐腐蚀后混凝土的动态本构模型[J].爆炸与冲击,2017,37(4):712-718.
NIE Liangxue,XU Jinyu,LIU Zhiqun, et al. Dynamic constitutive model of concrete after salt corrosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(4): 712-718. (in Chinese)
- [11] 邢小光,陈震,许金余,等.混凝土受氯盐腐蚀后动力学特性损伤研究[J].硅酸盐通报,2017,36(2):589-594.
XING Xiaoguang,CHEN Zhen,XU Jinyu, et al. Damage and deterioration research on dynamic properties of concrete after chloride corrosion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2): 589-594. (in Chinese)
- [12] 马勇.氯盐侵蚀混凝土结构高温后力学性能的试验研究[D].广州:广州大学,2017.
MA Yong. Experimental study on mechanics properties of concrete corroded by chlorine salt after high temperature[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017. (in Chinese)
- [13] 赵羽习.钢筋锈蚀引起混凝土结构锈裂综述[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(5):1122-1134.
ZHAO Yuxi. State-of-art of corrosion-induced cracking of reinforced concrete structures[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(5): 1122-1134. (in Chinese)
- [14] ZHANG R J, CASTEL A, FRANCOIS R. Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(3): 415-425.
- [15] 曹万林,朱可睿,姜玮,等.高强再生混凝土应力-应变全曲线试验研究[J].自然灾害学报,2016,25(2):167-172.
CAO Wanlin, ZHU Kerui, JIANG Wei, et al. Experimental study on stress-strain constitutive relationship of high strength recycled concrete[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(2): 167-172. (in Chinese)
- [16] 肖建庄.再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1445-1449.
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(11): 1445-1449. (in Chinese)
- [17] 过镇海,张秀琴.混凝土在反复荷载作用下的应力-应变全曲线[J].工业建筑,1981,11(9):14-17,13.
GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin. Experimental study on stress-strain full curves of concrete under cyclic loading[J]. Industrial Construction, 1981, 11(9): 14-17, 13. (in Chinese)
- [18] 陈宗平,徐金俊,郑华海,等.再生混凝土基本力学性能试验及应力-应变本构关系[J].建筑材料学报,2013,16(1):24-32.
CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai, et al. Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 24-32. (in Chinese)