

盐雾环境下疲劳损伤混凝土氯离子扩散性能

牛荻涛, 陆炫毅, 苗元耀, 周艳霞

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:针对沿海地区桥梁结构实际服役情况,开展了盐雾环境下弯曲疲劳损伤混凝土的氯离子侵蚀试验研究.研究表明:弯曲疲劳荷载对混凝土造成损伤,劣化了混凝土抗氯离子侵蚀性能.氯离子在混凝土中的扩散系数随疲劳损伤变量的增加而增大,并且氯离子在弯曲疲劳受拉区的扩散系数大于受压区.最后引入疲劳荷载影响系数反映疲劳损伤对氯离子扩散系数的影响,拟合得到疲劳荷载影响系数与损伤变量的关系式,为沿海地区桥梁混凝土结构的耐久性研究提供参考.

关键词: 盐雾; 疲劳损伤; 氯离子; 混凝土

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)05-0617-04

Diffusion of chloride ions into fatigue-damaged concrete in salt spray environment

NIU Ditao, LU Xuanyi, MIAO Yuanyao, ZHOU Yanxia

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: According to the actual service conditions of bridge structures in coastal areas, a research on diffusion of chloride ions into bending fatigue-damaged concrete in salt spray environment was carried out. It is shown that bending fatigue causes the damage of concrete and deteriorates the performance of resistance to chloride ion corrosion of the concrete. The chloride diffusion coefficient in the concrete increases with the increase of fatigue damage variables. Besides, chloride diffusion coefficient in tensile region is larger than that in the compressive region. The fatigue load effect coefficient is introduced to reflect the impact of fatigue damage on chloride diffusion coefficient. At last an equation of the fatigue load effect coefficient with the damage variable is simulated which provides reference for the study on the durability of bridge concrete structures in coastal areas.

Key words: salt spray; fatigue damage; chloride ions; concrete

沿海地区的桥梁在长期承受循环车辆荷载的同时还受到盐雾侵蚀作用.盐雾环境中的氯离子会引起桥梁混凝土中钢筋的锈蚀,进而劣化结构的承载能力和使用性能^[1].可见沿海地区桥梁结构性能退化,除了车辆疲劳荷载作用外,氯离子侵蚀导致的钢筋腐蚀也是不容忽视的重要因素.因此研究沿海地区桥梁混凝土结构耐久性时,应考虑疲劳荷载和氯离子侵蚀的双重作用.

目前国内外对静态荷载作用下混凝土抵抗氯离子侵蚀的性能已经做了大量的研究,但是关于疲劳荷载和氯离子侵蚀协同作用下混凝土耐久性的研究还比较少.Mitsuru^[2]通过轴向压缩疲劳荷载的方式研究了疲劳荷载与混凝土氯离子渗透性的关系,研究表明在应力水平大于 0.6 时,疲劳造成的混凝土损伤使氯离子渗透性明显增大,氯离子的渗透速率随疲劳损伤后混凝土残余应变的增大而加快.Gontar 等^[3]采用荷载和位移两种疲劳控制方式,

研究了弯曲疲劳荷载作用下混凝土的抗氯离子侵蚀性能,研究发现疲劳荷载能显著降低混凝土的抗氯离子侵蚀性能.李炜等^[4]采用轴向压缩的疲劳荷载形式,使混凝土试件获得不同的损伤量,用电迁移加速法测得氯离子扩散系数随疲劳损伤的增加而增大.蒋金洋等^[5]用残余应变定义混凝土损伤变量,研究了弯曲疲劳作用下混凝土的抗氯离子扩散性能,阐述了氯离子扩散系数随混凝土残余应变增加而增大的规律.

以上研究考虑了疲劳荷载和氯离子侵蚀两个因素,但均未很好模拟沿海地区桥梁混凝土实际服役状态.从实际出发,用盐雾模拟桥梁所处的滨海大气环境,对弯曲疲劳损伤后的混凝土试件进行盐雾侵蚀实验.研究盐雾环境下疲劳损伤变量对混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响,为沿海地区桥梁混凝土结构的耐久性研究提供参考.

收稿日期: 2015-06-01

修改稿日期: 2015-10-12

基金项目: 交通运输部应用基础研究基金资助项目 (2013319223110)

作者简介: 牛荻涛 (1963-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事混凝土结构耐久性与寿命预测方面研究. E-mail: niuditao@163.com

1 试验概况

1.1 原材料、配合比及试件制作

水泥: 陕西泾阳声威牌 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥。粉煤灰: 西安宏源粉煤灰有限责任公司生产的 I 级粉煤灰。细骨料: 渭河细砂, 细度模数 2.0。粗集料: 连续级配富平卵石, 粒径 5~31.5mm。外加剂: 陕西锐新有限公司生产的 JDB-T₂ 型外加剂。水: 符合国家标准的自来水。混凝土配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比设计
Tab.1 Mix proportion of concrete

强度等级	水泥	粉煤灰	砂	石	水	外加剂	水胶比
C40	350	90	675	1103	170	14.08	0.39

弯曲疲劳试验采用素混凝土试件, 尺寸为 150mm×150mm×550mm。试件成型后带模标养 24h, 拆模后标养至预定龄期 28h, 然后自然养护 60d。

1.2 混凝土弯曲疲劳试验

试验在西安建筑科技大学结构与抗震实验室进行, 混凝土试件在 PMW800-1000 电液式脉动疲劳试验机进行弯曲疲劳试验。疲劳采用 3 分点加载的形式, 如图 1 所示。试验采用的加载波形为无间歇时间的正弦波, 应力水平为 0.5, 加载频率为 4Hz。

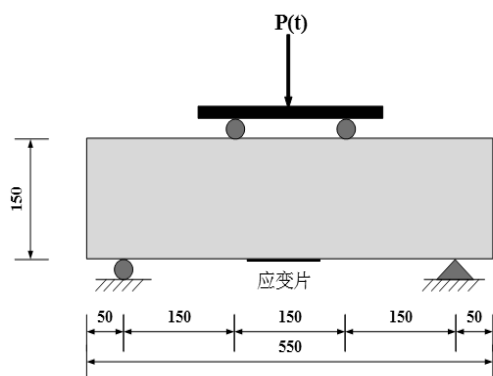


图 1 弯曲疲劳加载示意图

Fig.1 Bending fatigue load device

大量研究表明^[6-8]: 混凝土的疲劳变形分三个不同阶段, 其中第二阶段占总寿命的 80%, 且第二阶段混凝土的变形随疲劳荷载重复次数线性增长。混凝土的损伤发展规律与变形发展规律是一致的, 且疲劳破坏时残余应变几乎为定值^[9]。可见混凝土疲劳损伤的发展在占其疲劳寿命的大部分时间内线性增加, 而混凝土的残余变形规律反映了其内部疲劳损伤积累的规律, 因此混凝土的残余变形的大小

可以表征混凝土疲劳损伤的程度, 可用残余应变的比值作为损伤变量。实验疲劳加载时测得试件接近破坏时的残余应变较为稳定, 均值为 265×10^{-6} , 以此作为极限残余应变。将疲劳试验过程中测得的残余应变和疲劳破坏极限残余应变的比值定义为损伤变量:

$$P = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{max}} \quad (0 \leq P \leq 1) \quad (1)$$

式中: P 为损伤变量; ε_n 为疲劳 n 次后测得的残余应变; ε_{max} 为极限残余应变。

弯曲疲劳试验时, 通过控制疲劳循环次数获得残余应变为 0 、 53×10^{-6} 、 106×10^{-6} 、 159×10^{-6} 、 212×10^{-6} 的混凝土试件。即试件获得 0 、 0.2 、 0.4 、 0.6 、 0.8 等 5 个损伤变量, 然后进行下一步试验。

1.3 盐雾试验

试验考虑不同疲劳损伤变量对混凝土氯离子扩散性能的影响, 按上述 5 个损伤变量将试件分成 5 组, 每组 4 个, 然后将试件放入气候模拟试验室进行盐雾侵蚀试验, 模拟滨海大气环境下疲劳损伤桥梁混凝土的氯离子侵蚀。盐雾时间为 30d, 采用间歇式喷雾的方式, 即喷雾 12h、间歇 12h 为一个循环。盐雾试验主要技术参数: 5 %NaCl 盐溶液; pH 值为 6.5~7.2; 温度为 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$; 盐雾沉降率为 $1 \sim 2 \text{ mL}/80 (\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。达到相应的盐雾试验周期时, 取出试件并在试件纯弯段的受拉面和受压面进行钻孔取样。采用混凝土打磨机从试样的暴露面开始, 由表及里以 2 mm 为单位分层取粉。将混凝土粉样过 0.63 mm 孔径筛, 并立即装入塑封袋内, 然后测试混凝土中水溶性氯离子质量分数。水溶性氯离子质量分数测试按照《水运工程混凝土试验规程》(JTJ270-98) 的标准方法进行。

2 试验结果分析

2.1 疲劳损伤对自由氯离子含量的影响

不同疲劳损伤变量的混凝土试件盐雾 30d 后, 受拉区和受压区不同深度处自由氯离子含量分别如图 2, 图 3 所示。

由图 2、3 可以看出, 不同疲劳损伤变量混凝土试件受拉区和受压区自由氯离子含量均随深度的增加而减小, 这表明混凝土中氯离子从高浓度区向低浓度区传输, 间接验证了氯离子在混凝土中的传输方式主要为扩散和渗透; 受疲劳荷载作用后的混凝土试件, 无论受拉区还是受压区自由氯离子含

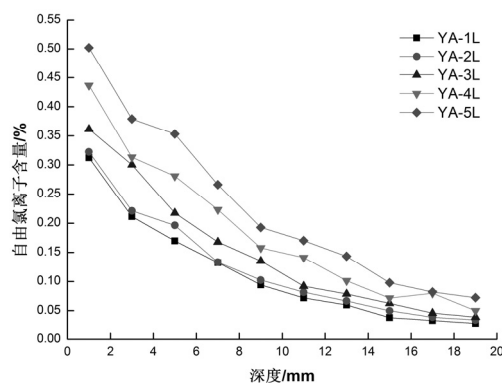
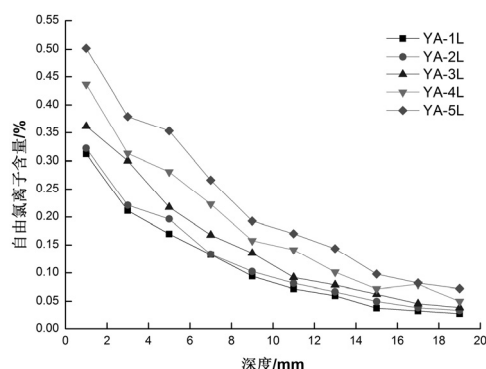


图2 受拉区混凝土氯离子含量

Fig.2 Chloride ion content of the concrete in tensile region



注: YA-1L 表示损伤变量为 0 的试件的受拉区; YA-1Y 表示损伤变量为 0 的试件的受压区. 2, 3, 4, 5 分别表示损伤变量为 0.2、0.4、0.6、0.8

图3 受压区混凝土氯离子含量

Fig.3 Chloride ion content of the concrete in compressive region

量总体上要高于未受到疲劳作用的混凝土试件,这说明疲劳荷载劣化了混凝土抗氯离子侵蚀的能力,会加速由于氯离子侵蚀引起的混凝土结构性能退化进程.

在弯曲疲劳荷载作用的受拉区混凝土各深度处自由氯离子含量随着疲劳损伤变量的增大而增加,在疲劳损伤变量大于 0.4 时,这种规律更加明显,并且自由氯离子含量的增幅比较显著. 疲劳损伤变量为 0.2 时,各深度处自由氯离子的增量不明显,与无损伤的混凝土试件的自由氯离子含量接近. 这是由于混凝土的疲劳损伤尚小,混凝土内部还未产生较大的裂缝和空隙,混凝土还具有较好的抗氯离子侵蚀能力.

在弯曲疲劳荷载作用的受压区混凝土各深度处自由氯离子含量随着疲劳损伤变量的增大而增加,但是这种趋势没有受拉区明显. 此时在损伤变量大于 0.6 时自由氯离子含量随疲劳损伤变量的增

大而增加的规律才开始凸显. 产生这种差异的主要原因是混凝土是一种多相混合材料,其抗拉性能较差,而抗压性能很好,即使在相同的损伤变量下,同一混凝土试件受拉区内积累的损伤也要大于受压区. 受压区混凝土在损伤变量大于 0.6 以后其内部微裂缝才充分地演化和扩张,致使混凝土的密实度降低,氯离子在混凝土中的扩散随之加快,氯离子的含量随损伤变量增大而增加的规律开始变得明显.

2.2 疲劳损伤对氯离子扩散系数的影响

海洋环境下,扩散作用仍被认为是氯离子的主要侵入方式^[10]. 因此可以应用 fick 第二定律对试验数据进行回归分析. 当边界条件为: $C(0,t)=C_s$, $C(\infty,t)=C_0$; 初始条件为: $C(x,0)=C_0$ 时,可以得到 fick 第二定律的解析解为^[11]:

$$C_{x,t}=C_0+(C_s-C_0)\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right] \quad (2)$$

式中: $C_{x,t}$ 为 t 时刻深度为 x 时的氯离子浓度, C_0 为氯离子初始浓度, C_s 为氯离子表面浓度, D 为氯离子扩散系数, t 为渗透时间, erf 为误差函数,即

$$\operatorname{erf}(z)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^ze^{-u^2}du \quad (3)$$

根据混凝土试件自由氯离子浓度的实测结果,按照公式(2),采用软件 MATLAB2013a 进行曲线拟合,求得不同损伤变量混凝土试件受拉区和受压区的氯离子扩散系数 D . 图 4 为不同损伤变量混凝土弯曲疲劳受拉区和受压区氯离子扩散系数直方图.

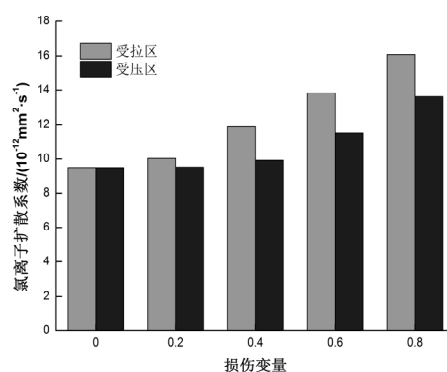


图4 拉、压区氯离子扩散系数

Fig.4 Chloride diffusion coefficient in tensile and compression region

从图 4 可以得出:混凝土弯曲疲劳受拉区氯离子扩散系数均大于受压区. 随着疲劳损伤变量的增加,混凝土试件受拉区和受压区的氯离子扩散系数都增大. 在受拉区,当损伤变量大于 0.4 时,这种

增长幅度变得显著;而在受压区,在损伤变量大于 0.6 时,这种增幅才开始凸显.这与上面分析的规律相符合,并且从混凝土氯离子扩散系数直方图中可以更加直观看出这种规律.综上分析可知,可以将疲劳损伤变量 0.4 作为影响混凝土受拉区氯离子扩散的起劣点,而损伤变量 0.6 作为影响混凝土受压区氯离子扩散的起劣点.

2.3 疲劳荷载影响系数

混凝土在承受弯曲疲劳荷载时,不同疲劳损伤变量对混凝土的氯离子扩散性能影响显著.随着疲劳损伤的积累,混凝土内部原始裂缝不断的扩展、延伸;新的微裂缝也开始产生,混凝土密实度不断下降,氯离子在混凝土中的扩散速度加快,氯离子扩散系数增大.为此引入疲劳荷载影响系数 k 反映疲劳损伤变量对混凝土氯离子扩散系数的影响:

$$D(P)=D_0k \quad (4)$$

式中: $D(P)$ 为疲劳损伤变量为 P 时的氯离子扩散系数; D_0 为未损伤时氯离子扩散系数.

用 OriginPro8.5 拟合弯曲疲劳混凝土拉、压区相对氯离子扩散系数与疲劳损伤变量之间的关系,见图 5.

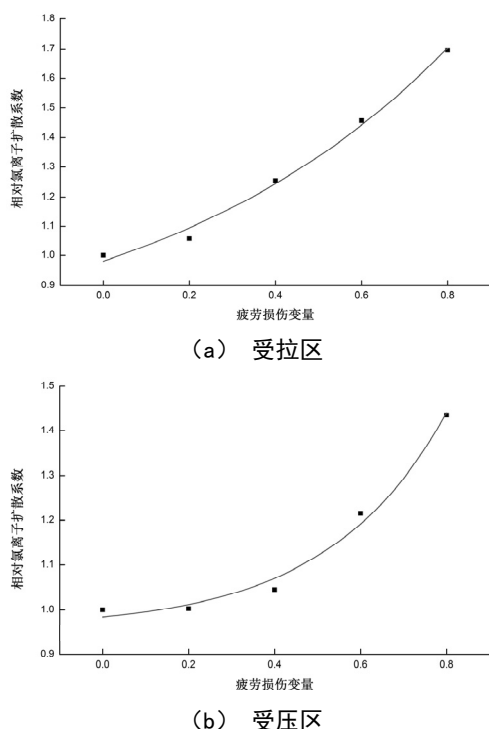


图 5 疲劳损伤变量与相对氯离子扩散系数的关系
Fig.5 Relationship between fatigue damage variable and relative chloride diffusion coefficient

根据图 5 的拟合结果,有弯曲疲劳受拉区

$$k=0.624\ 9+0.355\ 7e^{1.385\ 4P} \quad (5)$$

弯曲疲劳受压区

$$k=0.956\ 6+0.027\ 0e^{3.606\ 9P} \quad (6)$$

式中: P 为疲劳损伤变量, k 为疲劳荷载影响系数.

3 结论

(1) 弯曲疲劳荷载对混凝土内部造成损伤,劣化了混凝土抗氯离子侵蚀性能.混凝土中自由氯离子含量随疲劳损伤变量的增大而增加.

(2) 疲劳损伤后混凝土受拉区自由氯离子含量高于受压区.因此在同一损伤变量的条件下,混凝土受拉区的损伤要比受压区严重.

(3) 随着疲劳损伤变量的增大,混凝土中的氯离子扩散系数增大.损伤变量 0.4 是混凝土受拉区氯离子扩散的起劣点,而损伤变量 0.6 是混凝土受压区氯离子扩散的起劣点.

(4) 在疲劳损伤混凝土中引入疲劳荷载影响系数,通过拟合得到疲劳荷载影响系数与疲劳损伤变量的关系式.

参考文献 References

- [1] 伟平,张庆章,顾祥林,等.环境条件和应力水平对混凝土中氯离子传输的影响[J].江苏大学学报:自然科学版,2013,34(1):101-106.
ZHANG Weiping, ZHANG Qingzhang, GU Xianglin, et al. Effects of environmental conditions and stress level on chloride ion transport in concrete [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2013,34(1):101-106.
- [2] MITSURU S. Chloride permeability of concrete under static and repeated compressive loading [J]. Cem Concr Res.1995,25(4):803-808.
- [3] ONTAR W A, MARTIN J P, POPOVICS J S. Effects of cyclic loading on chloride permeability of plain concrete [C]// ANSARI F ed. Condition Monitoring of Materials and Structures. Austin: Texas American Society of Civil Engineering, 2000.
- [4] 李炜,蒋林华,王永亮,等.疲劳作用对混凝土中氯离子扩散系数影响[J].混凝土,2014(1),31-34.
LI Wei, JIANG Linhua, WANG Yongliang, et al. Research on the effect of fatigue on chloride diffusion coefficient in concrete [J]. Concrete, 2014(1),31-34.
- [5] 蒋金洋,孙伟,王晶,等.弯曲疲劳荷载作用下结构混凝土抗氯离子扩散性能[J].东南大学学报,2010,40(2):362-366.
JIANG Jinyang, SUN Wei, WANG Jing, et al. Resistance to chloride ion diffusion of structural concrete under bending fatigue load [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010,40(2):362-366.
- [6] 王瑞敏,宋玉普,赵国藩.混凝土疲劳累积损伤准则[J].水利学报,1992(5):72-76.

(下转第 648 页)

- WANG Ruimin, SONG Yupu, ZHAO Guofan. Fatigue accumulative damage rules of concrete [J]. Journal of hydraulic engineering, 1992(5):72-76.
- [7] 洪锦祥. 含气量与冻融损伤对混凝土疲劳性能的影响[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- HONG Jinxiang. Effect of air content and freezing-thawing damage on concrete fatigue properties [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [8] 李永强, 车惠民. 混凝土弯曲疲劳累积损伤性能研究[J]. 中国铁道科学, 1998, 19(2):52-59.
- LI Yongqiang, CHE Huimin. A study on the cumulative damage to plain concrete due to flexural fatigue [J]. China Railway Science, 1998, 19(2):52-59.
- [9] 宋玉普. 混凝土结构的疲劳性能及设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- SONG Yupu. Fatigue behavior and design principle of concrete structures [M]. Beijing: China Mechine Press, 2006.
- [10] 王元战, 周海峰. 盐雾环境下受荷混凝土中氯离子扩散试验[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(5):645-650.
- WANG Yuanzhan, ZHOU Haifeng. Chloride ion diffusion experiment in loaded concrete under salt spray environment [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2013, 31(5):645-650.
- [11] 白敏. 氯盐与冻融环境下钢纤维混凝土耐久性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- BAI Min. Research on durability of steel fiber concrete under the chloride salt and freeze-thaw environment [D]. Xi'an: Xi'an University of Arch. & Tech., 2012.