

弯曲疲劳载荷作用下 HPC 和 HPFRCC 抗氯离子扩散性能研究

孙 伟, 蒋金洋, 王 晶, 王彩辉

(东南大学, 江苏 南京 210096)

摘 要: 在疲劳和环境因素耦合作用下, 混凝土材料与结构易于加速损伤劣化, 从而影响到混凝土结构的服役寿命。针对混凝土损伤发展的第 II 阶段, 采用残余拉应变来表征损伤变量, 研究了疲劳载荷与氯离子协同作用下对高性能混凝土(HPC)和高性能纤维混凝土(HPFRCC)耐久性的影响。研究结果表明: 随着残余拉应变的增加, 氯离子在 HPC 和 HPFRCC 扩散系数均增大, 而且当残余拉应变超过 60×10^{-6} 时, 这种增加幅度开始更加明显; 在疲劳载荷与氯盐耦合作用下, HPC 和 HPFRCC 的服役寿命均低于单一环境因素作用下的混凝土服役寿命。因此, 疲劳载荷会加速因环境因素作用引起混凝土损伤劣化进程。文章还从混凝土内部微结构的演变来解释这种损伤耦合效应。

关键词: HPC; HPFRCC; 疲劳载荷; 氯离子扩散; 服役寿命

中图分类号: TV431⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2009)11-0019-07

Resistance to Chloride Ion Diffusion of HPC and HPFRCC under Bending Fatigue Load

SUN Wei, JIANG Jinyang, WANG Jing, WANG Caihui

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The performance of concrete under fatigue loading is easily deteriorated due to long-time eroding, which badly influences the service life of concrete structure. According to the analysis of fatigue damage mechanism, the damage variable was defined by relevant residual tensile strain. And the durability of concrete under the influence of multi-factors of fatigue loading and chloride ion environment was mainly investigated. The experimental results showed that the diffusion coefficient of chloride ion for both of the high performance concrete(HPC) and the high performance fiber reinforced cement composites(HPFRCC) increased with the increase of residual tensile strain. As the residual tensile strain exceeded 60×10^{-6} , the ingress of chloride ions into concrete increased. It was also shown that the multi-damage of fatigue loading and sea environmental loading relatively shortened the service lives of HPC and HPFRCC, showing more damage than that under single factor. Therefore, service lives of concrete were obviously shortened by fatigue loading. In addition, the potential way to solve the coupling effects was proposed from the point of combining the coupling effect of fatigue and erosive ions related to microstructure properties of concrete with fatigue effect.

Key words: HPC; HPFRCC; fatigue loading; diffusion performance; service life

1 前 言

混凝土结构长期承受重复荷载作用将引发疲劳问题。20 世纪 70 年代前, 混凝土结构的疲劳性能没有得到充分的重视。这主要是由于混凝土结构设计所采用的容许应力比较低, 很少引发混凝土结构因疲劳而断裂破

坏的事件。但是, 随着高强混凝土和高强钢筋的采用(500 MPa 级细晶粒铁路用钢筋已在京津城际铁路项目中应用), 许多构件处于高应力状态下工作; 同时, 由于混凝土结构已扩大应用到循环次数较多且重复荷载加大的结构, 如高速铁路轨道、轻轨、桥梁、重力式海洋平台、风电工程、核反应堆安全壳、高等级公路路面、机场跑道等等; 混凝土结构的疲劳损伤问题的重要意义开始凸显出来。然而, 当前国内外有关疲劳载荷和环境因素耦合作用下的混凝土耐久性研究却比较少, 尤其二者耦合作用下高性能混凝土材料损伤劣化的微结构演变过程的研究相当匮乏, 因而这类结构的耐久性评价和寿

收稿日期: 2009-09-23

资助项目: 国家 973 重大基础研究计划项目(2009CB623203);
863 计划项目(2008AA030704)

通信作者: 孙 伟, 女, 1935 年生, 中国工程院院士, 教授

命预测尚没有形成新理论和新方法,这已是国际上高速铁路和高速公路科学与工程界密切关注和亟待解决的重大问题。

氯离子去钝化引起的钢筋腐蚀是最为常见的一种混凝土结构腐蚀劣化现象。目前,在材料层次上,多数研究则集中于氯离子在混凝土中的传输性能上,这种传输行为的研究依然是局限于物理因素,而化学反应对传输性能的影响才刚刚起步。其中,国内外对静荷载作用下混凝土抵抗氯离子渗透与扩散性能进行了大量的研究,其结果表明:压荷载不超过极限强度的 50% 时对混凝土抗氯离子扩散影响不大,但弯曲荷载却明显劣化了混凝土的抵抗氯离子扩散的能力^[1]。就动荷载对混凝土抵抗氯离子渗透性能的影响而言,却鲜有报道。日本的 Mitsuru Saito^[2]曾对经受静态和抗压疲劳损伤后的混凝土进行了抗氯离子渗透性研究(测量卸载以后的混凝土导电量),得到了如下结论:使静态荷载达到极限强度的 90%,对导电量也没有多大的影响;而应力水平为 60% 的循环荷载对导电量的影响则十分明显,但应力水平小于 50% 时,循环荷载对导电量的影响却很不敏感;另外,导电量随着加载以后的残余应变的增大而增加。Nakhi 和 Xi^[3]也研究了轴心抗压疲劳对混凝土氯离子扩散性能的影响规律,得到了与前者大致相同的结论:疲劳荷载在混凝土内部引起弹性损伤,加速了氯离子在混凝土内的传输;当应力水平超过 60% 时,混凝土氯离子渗透性开始明显增大。国内陈拴发^[4]研究了弯曲疲劳荷载作用下高性能混凝土分别浸泡在硫酸钠、硫酸镁、氯化镁 3 种腐蚀介质中的性能影响,其研究结果表明,受腐蚀疲劳的高性能混凝土强度劣化幅度远大于未受疲

劳损伤的浸泡腐蚀试件。

以上关于疲劳载荷与盐类侵蚀介质对混凝土性能影响的研究中,均选用了疲劳循环次数作为损伤指标,从宏观层面上了解疲劳损伤对混凝土抵抗氯离子渗透性能的影响。然而,疲劳循环次数并不能真正表征混凝土的疲劳损伤程度,因此必须选择合理的疲劳损伤指标来表征混凝土的损伤程度,从而才能真正建立起疲劳损伤指标和氯离子扩散系数的定量关系。本实验选取了残余应变作为损伤评价指标,将弯曲疲劳损伤后的混凝土试件进行长期浸泡法,然后通过钻孔取样法来获取混凝土的不同深度处的自由氯离子含量,建立疲劳损伤程度与氯离子扩散系数的定量关系,来评价疲劳损伤对混凝土服役寿命的影响。

2 实验原材料与配合比

原材料 水泥均采用工程现场用的 42.5 级 P·O 水泥,粉煤灰采用镇江苏源 I 级粉煤灰。细集料采用赣江中粗河砂,细度模数为 2.6,级配合格,表观密度为 2 650 kg/m³。粗集料采用镇江茅迪玄武岩碎石,5 ~ 16.5 mm 连续级配,表观密度为 2 700 kg/m³。外加剂主要成分是聚羧酸型高分子聚合物,具有超塑化、高效减水和增强、低收缩等功能。水为清洁的自来水。钢纤维为压痕-哑铃复合异型,这种钢纤维与混凝土基体具有粘结和锚固双重作用。

配合比 分别制备了高性能混凝土(HPC)和相应的高性能纤维混凝土(HPFRCC),来研究疲劳损伤对这两种混凝土中氯离子扩散系数的影响规律。具体配合比详见表 1。

表 1 高性能纤维混凝土配合比设计(kg·cm⁻³)
Table 1 Mixed proportions of sample(kg·cm⁻³)

Code	Cement	Pulverized coal	Fine aggregate	Coarse aggregate	Fiber	Water	Added agent	Gas content/%
HPC	381.6	95.4	744	1 070	0	160	3.816	2.9
HPFRCC	388.8	97.2	806	946	62.4 (Short)	163	4.374	3.6

3 实验方法

3.1 损伤变量选取

一般工程材料的疲劳变形都具有明显的三段式发展规律^[5]。本实验研究的 HPC 和 HPFRCC 的弯曲疲劳变形均呈稳定的三阶段发展规律,如图 1 所示。在第 I 阶段(OA 段,以 k_A 表示),混凝土的疲劳变形在初始阶段发展很快,但随着疲劳荷载作用次数的增加,随后其增长速率逐渐降低;在第 II 阶段(AB 段,以 k_B - k_A 表示),混凝土的变形随着疲劳荷载作用次数的增加呈线

性增长,也称稳定增长阶段;在第 III 阶段(BC 段,以 1 - k_B 表示),混凝土的变形又进入快速发展阶段,随着疲劳荷载作用次数的增加,混凝土的疲劳变形急剧增大而发生破坏,又称失稳破坏阶段。

根据文献可得^[5-6]:不论加载应力水平从 0.65 ~ 0.8 如何变化,HPC 和 HPFRCC 的弯曲疲劳变形发展曲线基本符合上述三阶段发展规律,其疲劳损伤的第 II 阶段相对循环寿命比较长,即 $n/N_f \approx 0.8$;疲劳失效时对应的残余极限拉应变 ε_c^p 基本在 $(300 \sim 360) \times 10^{-6}$ 范围。混凝土疲劳损伤的第 II 发展阶段的特点是相对循环寿命

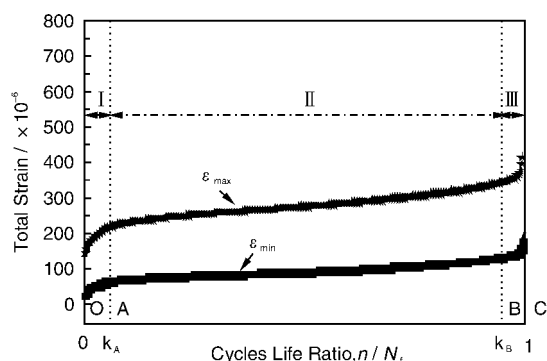


图 1 疲劳变形曲线的三阶段与特征点示意图

Fig. 1 Sketch of feature points of three phases of fatigue deformation

比较长,其损伤基本呈线性发展,这一发展阶段的疲劳损伤是重点研究的对象。根据以上的分析,结合本实验的弯曲疲劳试验结果,可以获得式(1)来计算疲劳循环寿命为 n 时对应的损伤程度。

$$D_N \approx \frac{\varepsilon_n^p}{\varepsilon_c^p} \quad (1)$$

式中: ε_c^p 表示与疲劳临界失效状态相对应的残余拉应变; ε_n^p 表示疲劳循环寿命为 n 时对应的残余拉应变; D_N 为混凝土疲劳损伤变量。

下面将借助 HPC 和 HPFRCC 弯曲疲劳形成的应力与应变的关系,对 ε_c^p 的取值进行讨论,然后改写 D_N 的表达式。图 2 示出,在 0.65 应力水平下的弯曲荷载作用下, HPC 和 HPFRCC 的疲劳失效时对应的残余极限应变数值均在 $(320 \sim 360) \times 10^{-6}$ 之间,其波动范围较小,因此可以认为 300×10^{-6} 为残余极限应变。这样,式(1)可以变为式(2)。

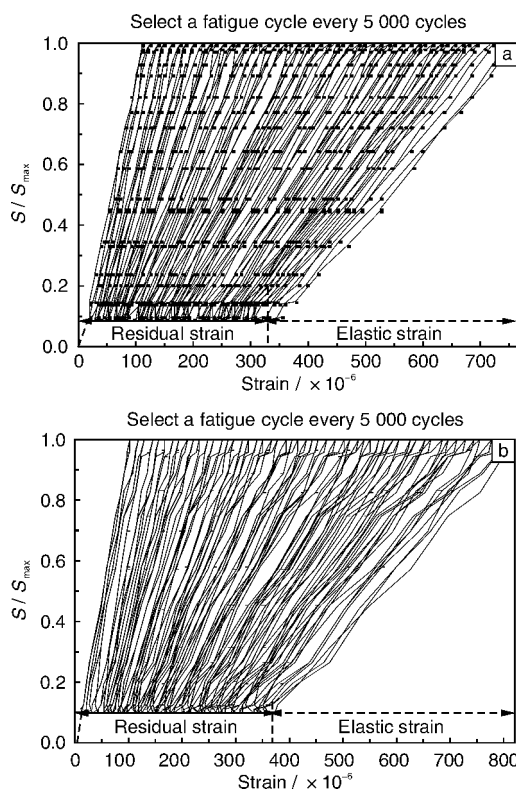
$$D_N \approx \frac{\varepsilon_n^p}{\varepsilon_c^p} = \frac{\varepsilon_{\min}^p}{300} \quad (2)$$

3.2 实验过程

采用上述的残余拉应变来定义疲劳损伤变量,将试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的长方体进行弯曲疲劳实验。针对疲劳损伤发展的第 II 阶段,获得残余应变分别为 $0, 30 \times 10^{-6}, 60 \times 10^{-6}, 90 \times 10^{-6}, 120 \times 10^{-6}, 150 \times 10^{-6}$ 的混凝土试件。

将这些不同损伤程度的混凝土试件进行氯离子自然扩散实验。大量实验表明,自然扩散法最能反映工程实际情况,因而是一种最常用的测定混凝土氯离子扩散系数的方法。其实验原理就是依据 Fick 第二扩散定律。假定混凝土是半无限均匀介质,氯离子在混凝土中扩散过程是一维扩散,扩散时部分氯离子被混凝土结合,则其扩散方程为^[1]

$$C_f = C_0 + (C_s - C_0) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (3)$$

图 2 在 0.65 应力水平下的弯曲疲劳循环应力-应变曲线: (a) HPC ($N = 747\ 303$), (b) HPFRCC ($N = 1\ 659\ 312$)Fig. 2 Stress-strain curves of bending fatigue at 0.65 stress level: (a) HPC ($N = 747\ 303$) and (b) HPFRCC ($N = 1\ 659\ 312$)

式中: C_f 为 x 深度的氯离子浓度; C_0 为混凝土内部初始氯离子浓度,计算时取 0; C_s 为表层氯离子浓度; D 为氯离子扩散系数; t 为扩散龄期; x 为取样深度。

按照上述实验方法,将疲劳到一定程度的混凝土试件,浸泡在浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液中,采用干湿循环制度^[1](混凝土浸泡到 NaCl 溶液中 45 h,放入烘箱中 60°C 烘 24 h,室温冷却 3 h,为一个循环周期)来加速氯离子在混凝土中的扩散。干湿循环 20 次后,即浸泡 60 d 后,在 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 试件的弯拉面和受压面的中间段取样,用钻孔法采集粉末样品,采样深度依次为 $0 \sim 5 \text{ mm}, 5 \sim 10 \text{ mm}, 10 \sim 15 \text{ mm}, 15 \sim 20 \text{ mm}$ 。混凝土钻孔取样后,将试样粉末在烘箱中 40°C 下烘 24 h,粉末过孔径 0.16 mm 筛,并用高性能磁铁将粉末中所含的钢纤维碎屑吸出。再参照国家交通部标准 JTJ270-98《水运工程混凝土实验规程》的“混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量测定”中的实验方法,测出混凝土不同深度中的自由氯离子浓度 C_f 。最后,利用 Fick 第二扩散定律和公式(3)求解出氯离子扩散系数。

4 结果分析

4.1 疲劳损伤对混凝土氯离子扩散特性的影响

不同疲劳损伤程度的混凝土在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 2 个月后,即 20 个干湿循环后,进行不同深度处自由氯离子浓度的测定,其实验结果见图 3。从图 3 可以看出:①对遭受疲劳损伤作用后的混凝土,无论是 HPC 还是 HPFRCC,其各深度处的自由氯离子含量均随残余应变的增加而增大,在残余应变大于 60×10^{-6} 时,这种趋势更加明显,而且自由氯离子含量的增幅显著;②HPFRCC 各深度处的自由氯离子含量均小于 HPC 的氯离子含量,也表明相同残余应变的 HPFRCC 抗氯离子扩散的能力要优于 HPC 的。

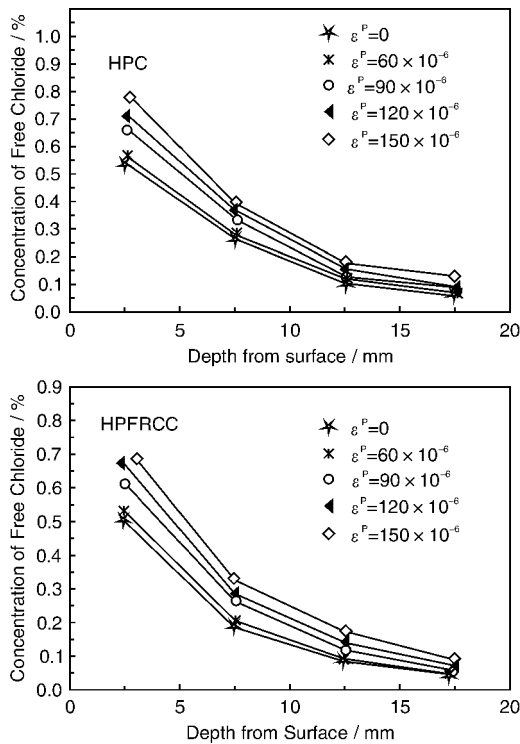


图3 疲劳损伤程度对 HPC 和 HPFRCC 中自由氯离子浓度的影响
Fig.3 Effect of different residual strain on free chloride ion concentration of concrete HPC and HPFRCC

4.2 疲劳载荷与氯离子协同作用下混凝土结构寿命预测模型的建立

由于氯离子在混凝土中的扩散规律符合 Fick 第二扩散定律,因此可以按照式(3)计算出混凝土的氯离子表观扩散系数。由图 4 可知:①随着残余应变增大, HPC 和 HPFRCC 的氯离子的扩散系数均增加,而且当残余应变超过 60×10^{-6} 时,这种增长幅度非常显著,即 $\frac{\partial D_{\text{load}}}{\partial \varepsilon}$ 变化率越来越大。主要原因在于残余应变的增大,

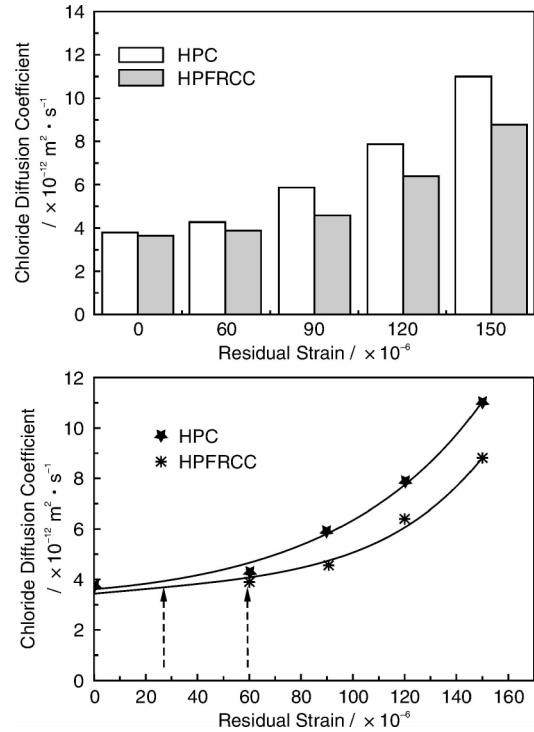


图4 不同疲劳损伤程度下的混凝土的氯离子扩散系数的比较
Fig.4 Effect of different residual strain on chloride ion diffusion coefficient of concrete

意味着混凝土损伤源的数量增多且尺度变大。在疲劳损伤较小时,混凝土的缺陷主要来自于原生微裂纹的发展,原生裂纹数量不多且尺度较小,混凝土内部的孔结构变化也不大,因此对氯离子的扩散系数影响较小。当疲劳损伤达到一定程度时,混凝土自身原有的缺陷在数量、尺度和分布上都大大劣化了混凝土的性能,尤其在干湿循环的作用下,氯离子扩散系数对这些尺度上的微裂纹和劣化的毛细孔比较敏感,因此其扩散系数会大幅度升高。比如,当疲劳损伤达到 120×10^{-6} 时, HPC 和 HPFRCC 的氯离子的扩散系数皆是与未疲劳损伤混凝土的 2 倍以上;②与 HPC 相比, HPFRCC 的抗氯离子渗透与扩散的性能要优异。主要原因在于钢纤维的加入对混凝土基体的阻裂效应能有效阻止原有微裂缝的发展和裂缝的引发,减少了裂缝源的尺寸和数量,从而有效抑制了混凝土的疲劳损伤,致使氯离子在混凝土中的扩散系数较小;③混凝土的氯离子扩散系数与其疲劳损伤过程中产生的残余应变,存在下列关系:

$$\text{HPC: } D_{\text{load}} = 3.2 + 0.8 \times e^{\varepsilon_n^P/45} \quad (4)$$

$$\text{HPFRCC: } D_{\text{load}} = 3.48 + 0.4 \times e^{\varepsilon_n^P/30} \quad (5)$$

式中: ε_n^P 为残余应变, D_{load} 为考虑疲劳损伤的混凝土氯离子扩散系数 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), 按照上面的公式, 可以计算出在疲劳载荷与氯离子环境耦合作用下的混凝土材料

与结构的服役 t 年后的氯离子扩散系数和自由氯离子含量。在此, 仍然只考虑疲劳损伤的第 II 发展阶段, 其占总循环寿命比的 80%, 利用计算该阶段残余应变与循环寿命比的等价关系, 即

$$\frac{5 \times t \times n_d \times 365}{4 \times 10^{(a-s_{\max})/b}} - \frac{1}{8} = \frac{\varepsilon_n^p}{\varepsilon_B^p}$$

将其分别代入(4)和(5), 得到下列公式:

HPC: $D_{\text{load}} =$

$$3.2 + 0.8 \times \exp\left(\frac{5 \times t \times n_d \times 365 \times \varepsilon_B^p}{180 \times 10^{(a-s_{\max})/b}} - \frac{1}{360} \varepsilon_B^p\right) \quad (6)$$

HPFRCC: $D_{\text{load}} =$

$$3.48 + 0.4 \times \exp\left(\frac{5 \times t \times n_d \times 365 \times \varepsilon_B^p}{120 \times 10^{(a-s_{\max})/b}} - \frac{1}{240} \varepsilon_B^p\right) \quad (7)$$

式中: ε_B^p 为疲劳损伤第 II 发展阶段末对应的残余应变,

HPC 和 HPFRCC 分别为 120×10^{-6} 和 150×10^{-6} ; D_{load} 为考虑疲劳损伤的混凝土氯离子扩散系数 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$); t 为结构混凝土的服役时间(a); n_d 为结构混凝土日承受的动荷载次数; a, b 为实验常数, 对 HPC 来说, $a = 1.07, b = 0.09$; 对纤维混凝土来说, $a = 1.07, b = 0.085$ 。

如果假设青岛海湾大桥和杭州湾大桥等大型跨海桥梁的设计通行能力是 7×10^4 辆/d, 对应的最大应力水平为 0.2 左右, 那么式(6)和(7)可以转化为式(8)和(9)。

$$\text{HPC: } D_{\text{load}} = 3.2 + 0.8 \times e^{(0.023t - 0.33)} \quad (8)$$

$$\text{HPFRCC: } D_{\text{load}} = 3.48 + 0.4 \times e^{(0.12t - 0.62)} \quad (9)$$

式中: D_{load} 为考虑疲劳损伤的混凝土氯离子扩散系数 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$); t 为结构混凝土的服役时间(a)。

将以上两式代入式(3)得到以下两式:

$$\text{HPC: } C_f = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \text{erf}\left(\frac{1000x}{2\sqrt{(3.2 + 0.8 \times e^{(0.023t - 0.33)}) \times (365 \times 3600 \times 24t)}}\right) \right] \quad (10)$$

$$\text{HPFRCC: } C_f = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \text{erf}\left(\frac{1000x}{2\sqrt{(3.48 + 0.4 \times e^{(0.12t - 0.62)}) \times (365 \times 3600 \times 24t)}}\right) \right] \quad (11)$$

式中: C_f 为 x 深度的氯离子浓度(%); C_0 为混凝土内部初始氯离子浓度, 计算时取 0; C_s 为表层氯离子浓度(%); t 为扩散龄期(a); x 为取样深度(mm)。

依据式(10)和(11), 可得到混凝土氯离子扩散系数和自由氯离子含量随桥梁服役年限的变化规律, 计算时所用参数的取值来自青岛胶州湾海底隧道的资料^[7]: 海洋大气区 $C_s = 0.1\% \sim 0.15\%$, 钢筋锈蚀临界浓度 $C_f = 0.07\%$ (混凝土), 混凝土保护层厚度 70 mm。计算结果如图 5 所示, 图中的扩散系数只给出了 HPC 的值。由图 5 可以得到: ①疲劳损伤显著提高了氯离子在混凝土中的扩散系数(图 5a), 劣化了混凝土抗氯离子扩散的能力。在混凝土结构服役的早期 10~20 a 内, 疲劳荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响不大; 在桥梁运营 30~40 a 后, 氯离子扩散系数对应着混凝土的残余应变为 $(30 \sim 45) \times 10^{-6}$ (见图 4), 表明疲劳损伤开始影响着混凝土氯离子扩散系数的变化; 当桥梁的服役寿命超过 50 a 后, 此时对应着混凝土的残余应变为 60×10^{-6} 左右, 氯离子在混凝土中扩散系数的变化率 $\frac{\partial D_{\text{load}}}{\partial t}$ 越来越

大, 从而导致氯离子扩散系数大幅度提高; ②在疲劳环境与海洋大气环境耦合作用下, 大大缩短了混凝土结构的服役寿命。按照钢筋混凝土中锈蚀临界浓度为 0.07% 计算, 如果不考虑疲劳损伤对氯离子扩散系数的影响, 则 HPC 和 HPFRCC 的服役寿命相差不大, 均在 140 a 左右。然而, 在海洋大气环境中服役的索塔锚固区混凝土

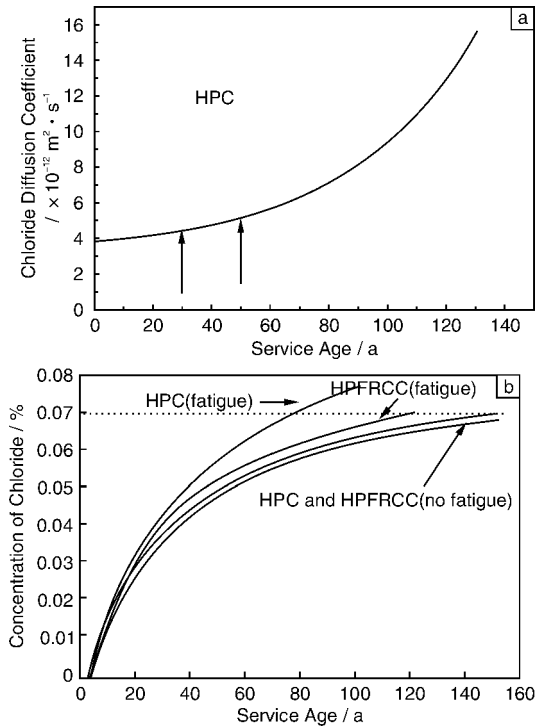


图 5 在疲劳荷载作用下混凝土的氯离子扩散性能与服役龄期的关系: (a) 氯离子扩散系数, (b) 自由氯离子浓度

Fig. 5 Relationship between chloride ion diffusion coefficient and service age of concrete under action of fatigue load: (a) chloride ion diffusion coefficient and (b) concentration of free chloride ion ($x = 70 \text{ mm}$)

工程是遭受疲劳载荷用的,因此必须把疲劳载荷与氯离子耦合作用结合起来才能对混凝土结构的服役寿命做出准确的评估。

在疲劳损伤对氯离子扩散性能的影响下, HPC 的服役寿命大幅度降低,在 80 a 左右,而 HPFRCC 的使用年限则在 113 a 左右,均低于单一环境因素作用下的混凝土服役寿命,其中在最大应力水平为 0.2 时, HPC 和 HPFRCC 的疲劳寿命分别在 160 a 和 560 a 左右。同时也可以看出, HPFRCC 的服役寿命要比 HPC 的长得多,其主要原因在于 HPFRCC 的抗疲劳损伤性能比 HPC 优异。当然,本研究在计算时没有考虑混凝土与自由氯离子结合的能力,而且日通车量是按最高 7×10^4 辆/d 计算的,所以在实际工程中混凝土寿命要长些。

5 机理分析

大量研究表明^[8],混凝土材料无论是在静态荷载还是在疲劳荷载作用下,其破坏过程就是裂缝在界面和基体中演化及扩展的过程。郑克仁等^[9]采用光学显微镜对经历不同周次弯曲疲劳荷载作用而破坏的混凝土试件内部疲劳裂缝进行了观察,并对粘结裂缝和基体裂缝的长度进行了统计,其观察和分析结果表明,界面区预先存在尺寸细小的微裂缝,由初始微裂缝引发的粘结裂缝既存在于粗集料与砂浆的界面区,也存在于水泥石与细集料之间的界面区。基体裂缝可以由邻近的细集料与水泥石之间粘结裂缝贯穿而形成,也可以存在于水泥石中,疲劳裂缝的数量随试件破坏前所承受的疲劳循环寿命比的增加而增多,其中粘结裂缝占疲劳裂缝的多数,且其相对数量有随疲劳循环寿命比的增长而增加的趋势。其它细观实验的研究^[10],也有类似的结论:应力水平不超过 0.53 时,混凝土内微裂纹数量和静载下相当;当应力水平超过 0.67 时,承受疲劳荷载的混凝土内有更多的微裂纹。Shah 和 Chandral^[11]也观察到应力水平为 0.60~0.85 的轴心抗压疲劳荷载导致了混凝土内更多的微裂纹生成。

通过对混凝土疲劳破坏的微观机理的研究发现,正是疲劳载荷的作用使混凝土产生损伤,而这种损伤以裂缝和有害孔的方式表现出来。B. Gérard 和 J. Marchand^[12]采用模型的办法研究了贯通裂缝对于饱和混凝土介质传输性能的影响,其研究结果认为裂缝的存在可以使得扩散系数增加 2~10 倍,而且混凝土本身越密实,其扩散性受微裂纹的影响就越显著。同样,通过前面的分析发现,由于疲劳损伤的增加,导致混凝土中氯离子的扩散系数提高了 2 倍以上。

可见,要进一步分析疲劳荷载与氯离子的耦合作用

对混凝土传输性能的影响机理,还需要结合混凝土微结构的定量分析,包括裂纹尺寸、密度、分布及连通性等。有害物质的传输除与混凝土内部裂缝尺度、数量、连通性和弯折度有关外,还必须考虑有害物质在混凝土内部传输过程中还会与混凝土内部发生化学反应生成新物质,这些新物质对混凝土孔缝结构会导致演变,从而对有害物质的传输速率会带来影响。换言之,这将直接影响到混凝土的服役寿命。

6 结论与展望

(1) 随着残余应变 ε^P (疲劳损伤) 的增加, HPC 和 HPFRCC 的氯离子的扩散系数均变大。而且,当残余应变超过 60×10^{-6} 时,这种增加幅度开始变得明显,可以把 $\varepsilon^P = 60 \times 10^{-6}$ 看作混凝土抵抗氯离子扩散性能劣化的起劣点。

(2) 弯曲疲劳荷载与氯盐的耦合作用大大缩短了混凝土的服役寿命,而且均明显低于单一环境因素作用下的混凝土服役寿命。

(3) HPFRCC 抵抗疲劳荷载与氯盐耦合作用的能力得到加强。对 HPC 而言,必须通过掺加矿物掺合料和提高混凝土自身的密实度以及抗疲劳性能,来降低混凝土中氯离子的扩散系数,以提高海洋环境中混凝土的服役寿命。

(4) 需进一步从混凝土微结构的损伤劣化演变过程中,来揭示疲劳荷载与氯离子的耦合作用对混凝土传输性能的影响机理,建立在疲劳荷载与氯盐扩散耦合作用下,传输行为与服役寿命的关系。

参考文献 References

- [1] Jin Zuquan (金祖权). *Durability and Service Life Prediction of Concrete Exposed to Harsh Environment in West of China* (西部地区严酷环境下混凝土的耐久性寿命预测) [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [2] Mitsum Saito, Hiroshi Ishimori. Chloride Permeability of Concrete under Static and Repeated Compressive Loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(4): 803–805.
- [3] Nakhi A E, Xi Y, Willam K, et al. The Effect of Fatigue Loading on Chloride Penetration in Non-Saturated Concrete [C]// *Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona: ECCOMAS, 2000.
- [4] Chen Shuanfa (陈拴发). *Study on Stress Corrosion and Corrosion Fatigue of High Performance Concrete* (高性能混凝土应力腐蚀与腐蚀疲劳特性研究) [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [5] Hong Jinxiang (洪锦祥). *The Effect of Air Content and Frost-Thaw Damage on the Fatigue Performance* (含气量与冻融损伤对混凝土疲劳性能的影响) [D]. Nanjing: Southeast

University, 2007.

- [6] Jiang Jinyang(蒋金洋). *Service Performance of HPSFRC Suitable for Super-High Vertical Pumping*(超高程泵送 HPFRCC 的服役性能研究)[D]. Nanjing: Southeast University, 2008.
- [7] Qu Liqing(曲立清), Jin Zuquan(金祖权), Zhao Tiejun(赵铁军), et al. 海底隧道钢筋混凝土基于氯盐腐蚀的耐久性参数设计研究[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*(岩石力学与工程学报), 2007, 26(11): 2 334 – 2 339.
- [8] Horii H, Shin H C, Pallewatta T M. Mechanism of Fatigue Crack Growth in Concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1992, 14: 83 – 90.
- [9] Zheng Keren(郑克仁). *Effect of Mineral Admixtures on Fatigue*

Behavior of Concrete and Mechanism(矿物掺合料对混凝土疲劳性能的影响及机理)[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.

- [10] Raiu N K. Small Concrete Specimens under Repeated Compressive Loads by Pulse Velocity[J]. *Tech J Mat*, 1970, 5(2): 262 – 272.
- [11] Shah S P, Chandra S. Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading[J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1970, 67(10): 816 – 825.
- [12] Gerard B, Marchand. Influence of Cracking on the Diffusion Properties of Cement-Based Materials Part I: Influence of Continuous Cracks on the Steady-State Regime[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(1): 37 – 43.

低碳经济与绿色建筑产业发展高峰论坛召开

11 月 14 日, 由九三学社中央委员会和辽宁省人民政府共同举办的“低碳经济与绿色建筑产业发展高峰论坛”在京举行。全国人大常委会副委员长、九三学社中央主席韩启德出席会议并致辞, 全国政协副主席、九三学社中央副主席王志珍出席论坛, 科技部副部长刘燕华等相关部门领导及专家学者发表演讲。

韩启德在讲话中指出, 气候变化已成为全球可持续发展面临的最严峻挑战之一。据美国橡树岭实验室研究报告, 自 1750 年以来, 全球累计排放了 1 万多亿吨二氧化碳, 其中发达国家排放约占 80%。因此, 在坚持“共同而有区别的责任”原则下, 以提高能效、发展清洁能源为核心, 以转变发展方式、创新发展机制为关键, 以经济社会可持续发展为目标的低碳发展应该成为国际社会的共同行动。我国正处于加快工业化、城镇化发展的重要阶段, 发展经济和改善民生的任务十分艰巨, 而我国人口众多、气候条件复杂、生态环境脆弱, 很难适应气候变化, 因此, 发展低碳经济, 也为我国落实科学发展观、加快转变经济发展方式带来重要机遇。韩启德同时指出, 我国的建筑使用能耗占全社会总能耗约 28%, 随着城乡居民的消费结构从“衣、食”逐步向“住、行”方向升级, 建筑耗能将成为未来 20 年主要能源消费的增长点。

2008 年, 九三学社中央确定将“全球气候变化对我国经济社会的影响”作为一项战略性课题长期跟踪调研, 并联合有关部委、专家开展一系列调研。今年 6 月, 九三学社中央以“发展低碳经济”为主题完成调研报告报送中共中央、国务院。报告建议: 将中国特色低碳发展道路确定为经济社会发展的重大战略; 尽快启动低碳发展的相关基础性工作, 做到心中有数; 实施若干低碳发展的重大行动计划; 大力增强低碳发展的科技支撑能力; 创新低碳发展机制; 健全低碳发展体制等。其中一条具体建议是实施建筑节能与绿色建筑等重大行动计划, 有选择地建立低碳发展试验区, 以比较效益高、量大面广、见效快的建筑节能工作与绿色建筑为抓手, 推动我国经济社会低碳发展。

刘燕华表示, “十二五”期间, 科技部将高度重视和发展低碳技术, 把低碳技术作为重点内容纳入国家“十二五”科技发展规划与相关技术产业发展规划当中。其中, 绿色建筑技术方面将围绕低碳建筑设计、低碳建筑建造、低碳建筑能源利用技术以及绿色建筑标准等方面, 注重关键、共性技术的研发, 集成, 示范及产业化, 建设有中国特色的低碳建筑体系。刘燕华透露, 近期, 科技部正在研究部署低碳经济科技关键技术研究及示范工作, 在国家和地方 2 个层面, 围绕建筑、交通、工业等领域, 推广一批潜力大、应用面广的低碳技术, 开展一些“看得见、摸得着、做得到”的低碳经济科技示范、试点工作。

与会者还探讨了我国发展低碳经济和绿色建筑现状与发展趋势, 分析了当前存在的问题和困难, 并对发展低碳经济和绿色建筑提出了建议。

(来源: 科技部网站)