

文章编号: 1001-4888(2017)04-0517-08

疲劳荷载与氯盐耦合作用下混凝土中 氯离子扩散行为的试验研究*

柳磊¹, 吕毅刚¹, 禹卓杰¹, 刘杰¹, 彭晖^{1,2}

(1. 长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南长沙 410114;

2. 长沙理工大学南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室, 湖南长沙 410114)

摘要: 混凝土桥梁在服役过程中经常同时承受疲劳荷载和氯离子侵蚀,但现有研究多未考虑疲劳和氯离子侵蚀的耦合作用。本文研究了疲劳荷载与氯盐侵蚀耦合作用下混凝土中氯离子的扩散行为,并运用超声检测表征混凝土的疲劳损伤,以建立疲劳损伤与氯离子扩散性能之间的关系。研究表明:随着疲劳压应力水平提高,超声参数表征的混凝土损伤值也逐渐增大;应力水平低于 0.4 时,不同疲劳应力水平对混凝土中氯离子浓度分布没有明显影响,氯离子扩散系数甚至略有减小,这应是应力水平较低时混凝土中微孔隙和裂缝被压缩而降低了氯离子的扩散能力;应力水平为 0.5 及 0.6 时,混凝土中氯离子浓度显著提高,扩散系数明显增大,并且与应力水平呈正相关;超声参数表征的混凝土损伤与氯离子渗透性的发展趋势不一致,表明由于混凝土内部缺陷分布的不均匀性使得超声技术难以定量表征荷载引起的混凝土损伤。

关键词: 混凝土; 疲劳; 超声; 氯离子; 扩散

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-141

0 引言

钢筋混凝土是土木工程领域应用最广泛的材料之一,但随着工程人员对钢筋混凝土结构的服役寿命不断提出更高的要求,钢筋混凝土的耐久性能日益受到重视。近些年随着跨海大桥和高速公路的不断兴建,这些结构往往处在沿海环境的高氯盐海水和混凝土路面的除冰盐环境中,这种环境下耦合疲劳荷载势必会加速混凝土结构中氯离子的迁移、侵蚀。已有研究表明,氯盐侵蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性最主要的环境作用之一,氯离子渗入混凝土内部导致钢筋锈蚀,并使得混凝土被锈蚀的钢筋胀裂,严重削弱其耐久性能和承载能力^[1],而荷载的耦合作用往往会增强和加速氯离子对钢筋混凝土的侵蚀作用,因为荷载可能导致混凝土内部出现微观或细观损伤,成为氯离子快速渗透传输的通道^[2]。

近年来许多学者研究了经历荷载作用后的混凝土中的氯离子传输行为,如李炜^[3]等首先对混凝土进行疲劳加载,再研究损伤后混凝土中氯离子的扩散性能,并建立了疲劳损伤与氯离子扩散系数之间的相关性;Samaha^[4]和 Saito^[5]等运用外加电场快速迁移法(RCPT法)测量了损伤后混凝土中氯离子的渗透性;陈桂发^[6]等通过自行设计的加载装置,运用 NEL 法研究了混凝土中氯离子的扩散性能;俞秋佳^[7]研究了受损混凝土的耐久性能。受限于试验装置和试验方法,已有研究中大部分所采用的试验方法都

* 收稿日期: 2017-05-27; 修回日期: 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(51578078); 国家“973”计划课题(2015CB057701); 长沙市科技计划(K1508020-31); 长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(16ZDXK10)

通讯作者: 彭晖, 教授, 博士, 主要从事先进复合材料与地聚物的结构工程应用、桥梁结构耐久性等方面研究。Email: HuiPeng1210@163.com

是对混凝土结构先进行疲劳损伤,再考察氯离子在损伤后的混凝土中的传输行为,但这样的试验过程没有实现疲劳荷载与氯离子侵蚀的耦合作用,与混凝土桥梁的真实服役状态有较大差异。疲劳所导致的混凝土损伤会影响氯离子在混凝土中的传输能力,但损伤程度与状态是随疲劳次数增加而逐渐发展的变量,对混凝土氯离子传输的影响也随疲劳次数而不断变化。因此已有研究所采用的“疲劳完成后—氯离子渗透”方法,得到的试验结果和研究结论也难以反映荷载-氯盐共同作用下钢筋混凝土结构的退化规律。

鉴于此,本文设计了试验方法和加载装置以实现压缩疲劳和氯离子侵蚀的耦合作用,运用超声检测技术量化评定混凝土的疲劳损伤,并考察不同疲劳应力水平下混凝土中的氯离子分布规律,以研究疲劳荷载耦合作用下混凝土结构中氯离子的传输行为。

1 试验方案

1.1 试件设计与制作

本文试验所使用的混凝土试件为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 立方体,设计强度为 C40、水灰比为 0.45,所有立方体试件一批浇筑而成。试件制作完成 24 小时后进行拆模,拆完模后的试件放入养护室中养护 28 天。达到龄期的混凝土试块进行试验前先进行饱水,然后擦干饱水后的混凝土表面,用凡士林均匀涂抹混凝土试块的 5 个面,再用锡箔纸包住并密封,防止氯盐从其他的面渗入,剩余 1 个表面用于实现氯离子的一维渗透。

1.2 试验方案

(1) 疲劳与氯离子侵蚀耦合作用:目前大部分研究人员的荷载-氯盐侵蚀耦合试验是在静载下完成的,如孙继成^[8]运用碟簧设计了稳定的恒压荷载装置,在此装置加载的同时,也能测量氯离子的渗透性。在参考其他学者工作的基础上,本文设计了疲劳-渗透耦合进行的方法(图 1):将充分饱水的试块放进盛有氯化钠溶液的金属容器中,实施氯离子渗透的同时施加疲劳荷载,以模拟真实的桥梁结构服役环境。

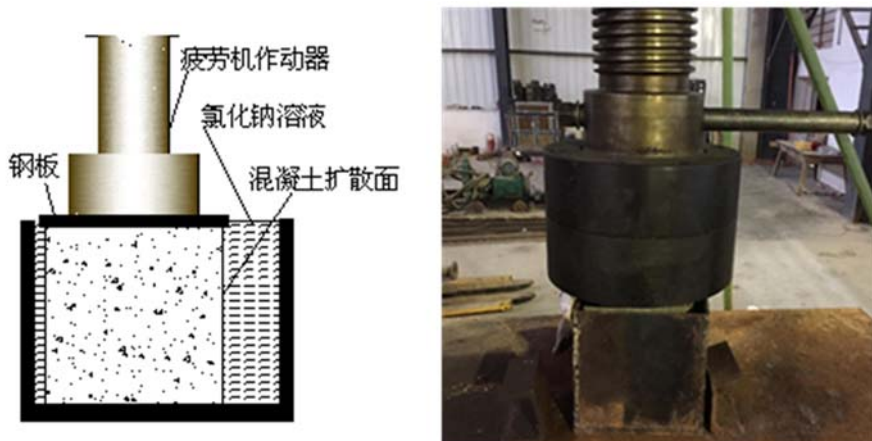


图 1 混凝土立方体试块的疲劳和氯离子渗透耦合作用试验装置

Fig. 1 Instrument a combined action of fatigue loading and chloride ion diffusion to concrete cubes

(2) 混凝土内氯离子的传输行为受混凝土含水状态不同(干燥、潮湿和完全饱和)的影响^[9],氯离子在饱和混凝土中以自由扩散为主,此时混凝土中的孔隙被水溶液填充,由于浓度梯度的不同,氯离子由外往内扩散到混凝土内部。在饱和状态下可以运用 Fick 第二定律及其相关修正公式来研究氯离子的扩散模型。本文试验主要考察饱和状态下氯离子在混凝土中的扩散行为,因此混凝土试件在承受疲劳和氯盐侵蚀前,先使用浙江中科仪器有限公司生产的 10L 型真空饱水机进行 24h 的真空饱水处理。

(3) 正常条件下氯离子在混凝土中的扩散速度很慢^[10,11],但荷载导致的混凝土损伤会加速混凝土中氯离子的扩散,王彩辉^[12]等在弯曲疲劳荷载与氯离子侵蚀耦合作用的试验中发现,自然扩散条件下由于疲劳荷载的作用,氯离子在 3.75 天的试验周期内即在混凝土中扩散到了一定深度。参考文献[12]

的研究成果,为使试验中氯离子有较充分的时间进行渗透,本文选取疲劳加载频率为 3Hz,疲劳-渗透耦合作用周期设置为 4 天,疲劳次数为 100 万次。混凝土疲劳寿命与作用在混凝土上的应力水平相关^[9],为了保证在加载试验过程中混凝土不过早破坏,同时又能产生一定程度的疲劳损伤,从而加速氯离子渗透,因此疲劳应力上限的选取不宜过高也不宜过低。钟美秦^[13]等通过混凝土压缩疲劳试验发现,在 $0.4f_c \sim 0.5f_c$ 的疲劳应力上限作用下混凝土试件的疲劳寿命均在 200 万次以上,在 $0.6f_c$ 的应力上限作用下,疲劳寿命急剧减少;李朝阳^[14]等在对混凝土的单轴抗压疲劳性能试验研究中发现,在 $0.6f_c \sim 0.8f_c$ 的疲劳应力上限作用下,试件的疲劳寿命为 20 万次左右,而在 $0.55f_c$ 应力上限作用下试件的疲劳寿命均在 100 万次以上。本文试验的疲劳应力上限取 $0.3f_c$ 、 $0.4f_c$ 、 $0.5f_c$ 和 $0.6f_c$ 四个水平,用应力水平 $S=(\text{疲劳应力上限}/\text{混凝土强度})$ 反映施加应力大小,则 $S=(0.3 \sim 0.6)$ 。

表 1 各试件加载方案

Tab. 1 Loading plan of specimens

应力水平	循环应力比	疲劳荷载上限(kN)	疲劳荷载下限(kN)	疲劳次数(万次)
0.3	0.2	316	63	100
0.4	0.2	422	84	100
0.5	0.2	527	105	100
0.6	0.2	632	126	100

1.3 混凝土损伤的超声表征

非均质的混凝土内部有大量微孔隙和气泡,一定大小和次数的疲劳荷载作用会导致混凝土内部的微裂缝逐渐发展成为影响超声波在其内部传播的大裂缝或宏观裂缝。因此超声波参数如波速、波形和波幅对混凝土内部结构有一定的敏感性,能较好地反映混凝土内部的损伤情况和裂缝发展,在混凝土内部的缺陷检测中也得到越来越广泛的应用^[2,14-16],本文试验采用超声技术表征疲劳荷载引起的混凝土损伤发展。

1.4 混凝土内氯离子含量测试

试块疲劳耦合渗透完成后,经干燥处理在渗透面的表面及不同深度选取 4 个不同的取样点,用酒精擦拭混凝土表面来保证取样面的整洁,为测试不同深度处混凝土中氯离子渗透进入的含量,游标卡尺测量下在取样点每 5mm 深度取一次样粉,取至距离表面 30mm 处。自由氯离子含量测试根据《水工混凝土试验规程》(SL352-2006)进行:将 30g 样品放在研磨钵中充分研磨至全部通过 0.063mm 标准筛;通过标准筛的样品置于 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 烘箱中烘两小时,取出后放入干燥器冷却至室温;称取两份 20g(精确到 0.01g)样品置于广口瓶中并加入 200ml 蒸馏水,塞紧瓶盖剧烈震荡两分钟,浸泡 24 个小时;将上述试样过滤,用移液管分别取滤液 20ml 置于两个三角烧瓶中,各加入 2 滴酚酞指示剂使溶液呈微红色,然后用稀硫酸溶液中和溶液至无色;加 10 滴铬酸钾指示剂使溶液呈黄色,立即采用标准浓度硝酸银溶液滴定至样品溶液刚呈砖红色;记录所消耗的标准浓度硝酸银溶液体积。混凝土中自由氯离子含量按下式计算:

$$p = \frac{C_{\text{AgNO}_3} V_5 \times 0.03545}{G \times \frac{V_4}{V_3}} \times 100\%$$

式中, p 为砂浆样品中水溶性氯离子含量(%); C_{AgNO_3} 为硝酸银标准溶液氯离子浓度(mol/L); G 为砂浆样品重量(g); V_3 为浸泡样品的水量(ml); V_4 为每次滴定时提取的滤液量(ml); V_5 为滴定消耗的硝酸银溶液量(ml)。

2 疲劳荷载作用下混凝土中氯离子的扩散行为

2.1 疲劳荷载致混凝土损伤的超声表征

国内外学者已对应用超声波观测表征混凝土和岩石损伤开展了相当多的研究^[15-21],取得了有意义

的成果。本文试验基于这些已有成果用超声波速来表征混凝土损伤(图2),定义混凝土的损伤变量 D 如下:

$$D = 1 - \frac{E^*}{E} \quad (1)$$

式中, E 为无损混凝土的弹性模量; E^* 为损伤混凝土的弹性模量。

根据弹性波在介质中的传播关系($E = \rho V^2$),式(1)可变换为:

$$D = 1 - \frac{V^2}{V_0^2} \quad (2)$$

式中, V_0 为初始超声波速; V 为疲劳作用后波速。

本文试验结果表明,在压缩疲劳荷载的作用下,随着应力水平增大,损伤前后所测得的混凝土中超声波速差值在逐渐增大,声速的变化规律与文献[20]得到的结果较为相符。本文基于式(2)获得了不同疲劳应力水平下的损伤量值并绘制两者的相关曲线如图3所示。从图中可以看出:随着作用于混凝土的疲劳压应力水平的提高,混凝土试件在疲劳100万次后的损伤值也在逐渐增大,但应力水平小于0.4时,损伤增加幅度较小,表现为曲线斜率较为平缓,而应力水平超过0.4以后,曲线的斜率明显增长较快,表明混凝土损伤积累速率显著增大。



图2 混凝土损伤的超声测试

Fig. 2 Measurement of concrete damage by ultrasonic

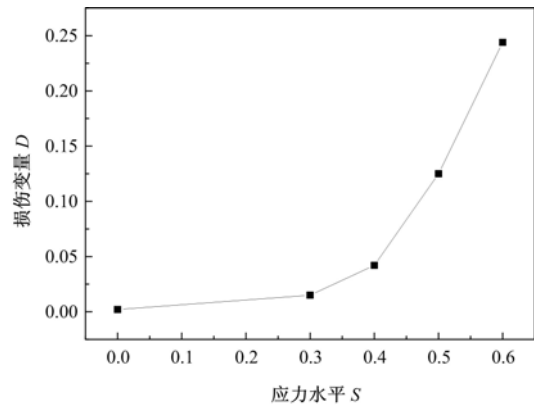


图3 疲劳100万次时应力水平—超声表征混凝土损伤曲线

Fig. 3 Curve of stress level versus damage of concrete represented by ultrasonic at 1000000 fatigue cycles

2.2 混凝土中氯离子分布

混凝土中钢筋表面处的氯离子达到一定浓度是导致钢筋发生锈蚀的最主要原因之一。本文考察了不同应力水平的疲劳荷载耦合作用下,混凝土中不同深度的氯离子分布,如图4、图5所示。

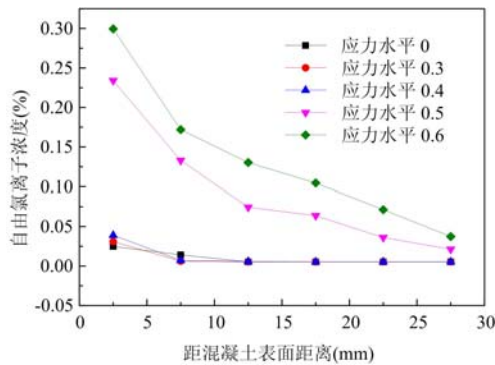


图4 疲劳下氯离子含量沿深度的分布曲线

Fig. 4 Curves of chloride ion content versus depth of concrete under fatigue loading

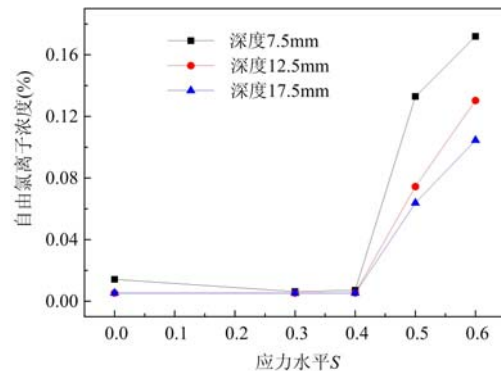


图5 同一深度处氯离子含量随应力水平变化曲线

Fig. 5 Curves of chloride ion content at same depth of concrete versus stress level

从图4中可以发现,较低应力水平下,混凝土中不同深度处的氯离子含量均较小, S 为0.3和0.4时,氯离子含量沿深度的分布曲线与 S 为0时的曲线高度重合,表明在这两个应力水平下疲劳荷载没有对混凝土中氯离子的渗透行为产生显著影响;应力水平超过0.4以后,一定深度处混凝土中的自由氯离子含量显著增加,并且应力水平越高,相同深度处的自由氯离子含量越大,呈现出氯离子渗透能力随疲劳应力增大而提高的明显规律性。这应是因为混凝土中存在大量微隙和微裂缝,在较低水平的压应力作用下混凝土的体积变形以压缩为主,内部微孔隙和裂缝没有显著发展,结构甚至变得更加密实,因此混凝土抵抗氯离子渗透的能力没有明显降低甚至可能反而有所提高^[22];当应力水平增大到0.5时,混凝土产生较显著的横向变形,内部的微孔隙和裂缝因应力水平提高和疲劳次数增加出现明显发展,微观结构逐渐变得疏松,有利于氯离子在其中的传输,因此混凝土中相同深度处的氯离子含量有明显增加。任心波^[23]研究了轴压静力荷载作用下混凝土中氯离子的扩散性能,发现当应力水平超过0.7时氯离子的浓度变化明显增大。这一应力水平大于本文试验中对应氯离子浓度显著增加的疲劳应力(0.5),这可能是因为任心波试验中施加的是轴压静力荷载,与本文试验相比没有循环应力造成的损伤累积。

图5描绘了混凝土相同深度处的自由氯离子含量随应力水平变化的曲线,从图中可看出,随着应力水平从0变化到0.4,7.5mm深度处的氯离子含量略有减小,这是因为0.4及以下的轴压应力作用时混凝土被压缩密实;12.5mm和17.5mm处的氯离子含量则基本为零,表明该应力水平作用下氯离子难以扩散到这一深度;当应力水平增大到0.5时,三个深度位置处的氯离子含量均出现明显增大,反映出在0.5倍材料强度的疲劳应力作用下,氯离子产生了显著扩散;疲劳应力比 S 为0.6时,三个深度处的氯离子含量进一步增加,反映出这一应力水平下氯离子在混凝土中的渗透能力更强。

2.3 混凝土损伤与氯离子扩散系数的相关性

由前述分析可知,氯离子在混凝土中的扩散性能与作用于混凝土的疲劳应力水平相关。本文根据不同深度处的自由氯离子含量实测结果,拟合出混凝土表面处的氯离子浓度,然后基于Fick第二定律反算出不同应力水平下的表观氯离子扩散系数,拟合系数均在0.95以上,并绘制扩散系数与应力水平的相关曲线如图6所示。疲劳导致氯离子传输性能改变的主要本质原因是混凝土损伤,因此本文还绘制了疲劳损伤和混凝土表观扩散系数的相关曲线如图7所示。

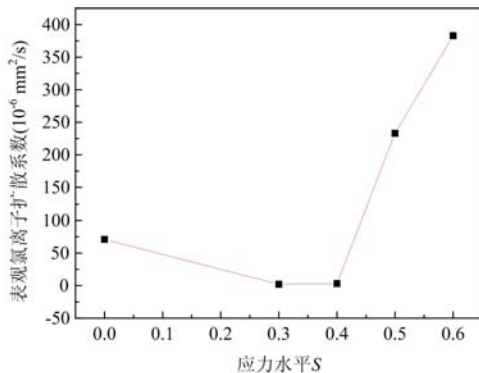


图6 氯离子表观扩散系数—应力水平

Fig. 6 Curve of apparent diffusion coefficient of chloride ion versus stress level

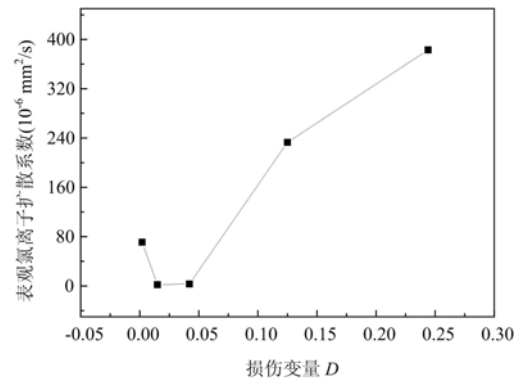


图7 表观扩散系数—疲劳损伤变量

Fig. 7 Curve of apparent diffusion coefficient of chloride ion versus fatigue damage value

从图6可以看出,不同应力水平下混凝土中氯离子的扩散系数明显不同,当 S 为0.3~0.4时,氯离子的扩散系数基本趋于零,而当 S 为0.5~0.6时,氯离子扩散系数又显著增加,混凝土中氯离子的扩散系数随着应力水平增大呈现先减小再增加的趋势;另外,从图7可以看出,随着应力水平的增大,混凝土的损伤总体趋势增加,但氯离子扩散系数先减小再增大,损伤和氯离子扩散系数曲线走势呈现出一定不一致性。这可能是因为本文试验中氯离子的浓度分布主要集中在距离混凝土表面30mm的深度范围内,而超声参数所反映的混凝土损伤是整个混凝土试件厚度的微观结构变化。作者认为疲劳作用下混凝土中氯离子扩散行为的变化主要是疲劳荷载使混凝土微观结构发生改变的结果。但在相对不高的应

力水平作用下,混凝土微观损伤的萌生和发展可能主要集中于部分水泥石-骨料的界面,这一微观结构变化能被穿透整个混凝土厚度的超声反映,因此超声参数有所变化;而距混凝土表面有限厚度内的微观损伤或微观结构变化较小,甚至结构更加致密,因此氯离子渗透性能变化很小甚至下降。这意味着,因为超声技术是较宏观地反映固体物质内部缺陷,疲劳荷载作用下混凝土内微观损伤分布的不均匀性使得超声技术难以精细化地定量评价荷载所致的混凝土微观损伤。有关基于超声技术建立损伤与氯离子渗透性的相关性还需进一步研究,同时也需发展更精细的混凝土内部损伤检测评价技术或方法。

3 结论

本文通过试验研究了疲劳荷载耦合作用下氯离子在混凝土中的传输行为,运用超声检测表征混凝土的疲劳损伤,分析不同疲劳应力水平对混凝土损伤及混凝土中氯离子传输性能的影响,得到如下结论:

(1) 随着作用于混凝土的疲劳压应力水平的提高,混凝土超声波速逐渐降低,由其定义的混凝土损伤值逐渐增大,但应力水平在 0.4 之前,损伤增加幅度较小,表现为曲线斜率较为平缓,而应力增长到 0.4 以后,曲线的斜率明显增长较快。

(2) 不同的疲劳应力水平作用下氯离子含量沿深度的分布呈现明显的差异,当疲劳应力水平(疲劳压应力上限与抗压强度之比)为 0.3 和 0.4 时,氯离子含量沿深度的分布曲线与应力为 0 时的曲线非常接近,一定深度处的氯离子含量甚至有所减小,这应是由于较低应力水平下混凝土内部的微孔隙和裂缝被压实,降低了氯离子在混凝土中的扩散能力;当应力水平提高到 0.5 和 0.6 时,一定深度处的自由氯离子含量显著增加,并且应力水平越高,相同深度处的自由氯离子含量越大,这应是由于较高疲劳应力下混凝土内部损伤不断累积发展;本文试验结果表明应力比 0.4 是临界应力比。

(3) 疲劳应力比从 0 增大到 0.6 时,混凝土损伤随疲劳应力增大而单调增加,但氯离子的扩散系数先略微减小后又显著增加,超声表征的混凝土损伤和氯离子扩散系数曲线走势呈现出一定不一致性;这可能是由于超声技术是较宏观地反映固体物质内部缺陷,而疲劳荷载作用下混凝土内微观损伤分布的不均匀性使得超声技术难以精细化的定量评价荷载所致的混凝土微观损伤,因此后续还需发展更加精细的混凝土内部损伤检测评价技术或方法。

参考文献:

- [1] 付传清. 混凝土中氯盐的传输机理及钢筋锈胀模型[D]. 浙江大学, 2012 (FU Chuanqing. Transport mechanism of chloride in concrete and corroded RC expansion model[D]. Zhejiang University, 2012 (in Chinese))
- [2] 孙培华. 循环荷载作用下混凝土渗透性试验研究[D]. 大连理工大学, 2012 (SUN Peihua. Experimental study on permeability of concrete under cyclic loadings[D]. Dalian University of Technology, 2012 (in Chinese))
- [3] 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的研究[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 (in Chinese))
- [4] Samaha H R, Hover K C. Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete[J]. ACI Mater J, 1992, 89(4):416-424.
- [5] Saito M, Lshimori H. Chloride permeability of concrete under static and repeated compressive loading[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(4):803-808.
- [6] 陈栓发, 廖卫东, 郑木莲. 腐蚀疲劳下高性能混凝土渗透性及破坏机理[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(8):31-34 (CHEN Shuanfa, LIAO Weidong, ZHENG Muliao. Permeability and damage mechanism of high performance concrete withstanding corrosion fatigue action[J]. Journal of Wuhan University Technology, 2005, 27(8):31-34 (in Chinese))
- [7] 俞秋佳. 受损结构混凝土的耐久性能研究[D]. 浙江大学, 2013 (YU Qiuji. Durability of damaged structural concrete[D]. Zhejiang University, 2013 (in Chinese))
- [8] 孙继成, 姚燕, 王玲, 等. 应力作用下混凝土的氯离子渗透性[J]. 低温建筑技术, 2011(3):1-3 (SUN Jicheng, YAO Yan, WANG Ling, et al. Chloride penetration of concrete under stress states[J]. Low Temperature

- Architecture Technology, 2011(3):1-3 (in Chinese))
- [9] 鲍玖文. 混凝土中物质传输过程的细观数值模拟研究[D]. 大连理工大学, 2014 (BAO Jiuwen. Numerical simulation on mass transport process in concrete by the mesoscale method[D]. Dalian university of Technology, 2014 (in Chinese))
- [10] Chindaprasirt P, Chotithanorm C, Cao H T, et al. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(2):356-351.
- [11] 何世钦, 贡金鑫. 弯曲荷载作用对混凝土中氯离子扩散的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(2):134-138 (HE Shiqin, GONG Jinxin. Influence of flexural loading on permeability of chloride ion in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(2):134-138 (in Chinese))
- [12] 王彩辉, 孙伟, 蒋金洋, 等. 动载环境耦合作用下氯离子在混凝土中的扩散性能研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(11):1-5 (WANG Caihui, SUN Wei, JIANG Jinyang, et al. The study on diffusion performance of chloride ion in concrete under coupling action of dynamic load and environment [J]. Industrial Construction, 2010, 40(11):1-5 (in Chinese))
- [13] 钟美秦, 汪加蔚. 混凝土疲劳强度的研究[J]. 铁道建筑, 1996, 5(9):25-29 (ZHONG Meiqin, WANG Jiawei. The study of concrete fatigue strength[J]. Railway Engineering, 1996, 5(9):25-29 (in Chinese))
- [14] 李朝阳, 宋玉谱, 车轶. 混凝土的单轴抗压疲劳损伤累积性能研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2):38-40 (LI Chaoyang, SONG Yupu, CHE Yi. Study on cumulative damage behavior of concrete under uniaxial cyclic load[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2):38-40 (in Chinese))
- [15] Komlos K, Popovics S, Numbergerova T, et al. Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards[J]. Cement & Concrete Composites, 1996, 18(5):357-374.
- [16] 王怀亮, 宋玉谱. 不同尺寸混凝土试件受压状态下超声波传播特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(1):90-94 (WANG Huailiang, SONG Yupu. Ultrasonic pulses behavior in various-size concrete specimens under compression[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(1):90-94 (in Chinese))
- [17] 朱金颖, 陈龙珠, 严细水. 混凝土受力状态下超声波传播特性研究[J]. 工程力学, 1998, 15(3):111-116 (ZHU Jinying, CHEN Longzhu, YAN Xishui. Ultrasonic pulses behavior in concrete during compressive loading[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(3):111-116 (in Chinese))
- [18] 赵明阶, 徐蓉. 岩土损伤特性与强度的超声波速研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6):720-722 (ZHAO Mingjie, XU Rong. The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6):720-722 (in Chinese))
- [19] 张玉敏, 王忠海. 混凝土抗压强度和弹性模量与其超声声速之间关系的试验研究[J]. 混凝土, 2002, 12:40-43 (ZHANG Yumin, WANG Zhonghai. The test study of the relation between crush intensity and elastic modulus and velocity of ultrasonic sound for concrete[J]. Concrete, 2002, 12:40-43 (in Chinese))
- [20] 王山山, 邱玲, 王京荣, 等. 混凝土动态破坏过程超声波测试研究[J]. 实验力学, 2011, 26(6):311-315 (WANG Shanshan, QIU Ling, WANG Jingrong, et al. Study of concrete dynamic failure process based on supersonic detection[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(6):311-315 (in Chinese))
- [21] 张钰娟, 陈星明, 张志贵. 超声波 CT 在混凝土爆炸损伤中的应用[J]. 爆破, 2011, 1(28):1-4 (ZHANG Yujuan, CHEN Xingming, ZHANG Zhigui. Application of ultrasonic CT technology in explosion damage of concrete[J]. Blasting, 2011, 1(28):1-4 (in Chinese))
- [22] 巴恒静, 张武满, 高小建. 水灰比和应力水平对混凝土氯离子渗透性的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(5):45-48 (BA Hengjing, ZHANG Wuman, GAO Xiaojian. Influence of water to cement ratio and stress level on chloride penetration resistance of concrete[J]. Journal of Wuhan University technology, 2006, 28(5):45-48 (in Chinese))
- [23] 任心波. 荷载作用下混凝土中氯离子扩散性能研究及寿命评估[D]. 青岛理工大学, 2012 (REN Xinbo. Study on the diffusion performance of chloride ion in concrete under mechanical load and life prediction[D]. Qingdao Technological University, 2012 (in Chinese))

Experimental Study on Diffusion Behavior of Chlorine Ion in Concrete Subjected to Fatigue Loading

LIU Lei¹, LV Yi-gang¹, YU Zhuo-jie¹, LIU Jie¹, PENG Hui^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Technology for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: Reinforced concrete bridges are often subjected to fatigue loads and chloride ion erosion in service. However very few investigations were carried out to study the combined action of fatigue loads and chloride penetration. In the present paper the transfer of chloride ion in concrete subjected to fatigue loading was studied, and the damage of concrete induced by fatigue loads was determined by ultrasonic. Then the relationship between fatigue damage of concrete and the chloride ion permeability was established. The results showed that the damage value of concrete reflected by ultrasonic parameters gradually increases as fatigue stress levels (applied to concrete) increase. When fatigue stress levels are less than 0.4, the distribution of chloride ion in concrete shows no significant differences under different stress levels, and the chloride diffusion coefficient decreases slightly, which should be due to compaction of micropore and microcrack under relative low fatigue stress level. While the stress level is increased to 0.5 or 0.6, the concentration of chloride ions in concrete grows obviously, and the chloride diffusion coefficient increased significantly, positively correlated with stress level. The concrete damage characterized by ultrasonic parameters is inconsistent with the chloride ion permeability with increase in fatigue numbers, which shows that ultrasonic has limitations to quantitatively characterize the damage induced by loads due to non-uniform distribution of defects in concrete.

Keywords: concrete; fatigue load; ultrasonic; chloride; diffusion