

文章编号:1673-2049(2018)04-0089-08

荷载损伤后纤维轻骨料混凝土氯离子侵蚀研究

张云国^{1,2}, 李 敏¹, 韩 玥¹

(1. 大连交通大学 土木与安全工程学院, 辽宁 大连 116028;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为研究荷载损伤对纤维轻骨料混凝土抵抗氯离子侵蚀性能的影响,设计了掺加聚丙烯纤维、钢-聚丙烯纤维、钢纤维 3 种轻骨料混凝土,开展了抗拉和抗压试验。分别在 40%, 60%, 80% 极限荷载 3 种拉、压应力水平下持续加载 60 s,并测量加载后的残余应变。卸载后将试件切割成直径 100 mm、厚 50 mm 的圆柱体,通过 NEL 法测定氯离子扩散系数。研究表明:混凝土残余应变随着拉、压荷载等级的增大而增大,纤维对轻骨料混凝土极限强度和变形能力提高显著;未施加荷载时,随着纤维的增加,单掺聚丙烯纤维组氯离子扩散系数变小,混掺纤维组基本保持不变,钢纤维组显著增加;施加荷载后,纤维的增加没有显著改善轻骨料混凝土抗氯离子侵蚀能力;残余应变与氯离子扩散系数间存在正相关特性,残余应变越大,氯离子扩散系数越大。

关键词:荷载损伤;残余应变;聚丙烯纤维;轻骨料混凝土;氯离子侵蚀

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

Study on Chloride Ion Penetration in Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete with Load Damages

ZHANG Yun-guo^{1,2}, LI Min¹, HAN Yue¹

(1. School of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the influence of load damages on the chloride ion resistance of fiber reinforced lightweight aggregate concrete, three types of lightweight aggregate concrete mixed with polypropylene fiber, steel and polypropylene fiber, steel fiber were designed, respectively. And then tensile test and compression test of the three types of concrete were carried out. Stress levels of 40%, 60% and 80% of limit load were applied on the specimens for 60 s and the residual strain was measured subsequently. After loading, the specimens were cut into cylinders with the diameter of 100 mm and the height of 50 mm, and the chloride ion diffusion coefficients of the specimen were measured based on the NEL method. The research results show that the residual strain of concrete increases with the increasing of tensile and compressive load levels and the fibers can improve the ultimate strength and deformation ability of lightweight aggregate concrete significantly. For the condition without load, chloride ion diffusion coefficient only for the group with polypropylene fiber added decreases with the increasing of fiber volume fraction, that of the steel and polypropylene hybrid fiber reinforced group keeps mostly unchangeable and the steel

收稿日期:2017-09-11

基金项目:海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1503)

作者简介:张云国(1978-),男,辽宁瓦房店人,大连交通大学副教授,工学博士,E-mail:zyg-ncwu@163.com。

fiber reinforced group increases significantly. After loading, there is no substantial improvement on concrete chloride ion penetration resistance with the increasing of the volume fraction of fibers. The positive correlation exists between residual strain and diffusion coefficients of chloride ion for fiber reinforced lightweight concrete. The greater residual strain is, the greater diffusion coefficient of chloride ion is.

Key words: load damage; residual strain; polypropylene fiber; lightweight aggregate concrete; chloride ion penetration

0 引言

纤维轻骨料混凝土因其高强、轻质、抵抗变形能力强而在建筑、交通、水利工程中被广泛应用。然而在沿海地区、盐除冰盐地区、盐碱地带,氯离子侵蚀会造成钢筋混凝土结构的劣化,服役过程中混凝土结构受到持续的荷载作用会改变混凝土的孔隙特征进而产生裂缝,如果氯离子侵蚀和荷载损伤交替或同时进行,结构破坏将更加迅速^[1-4]。因此,对荷载损伤后氯离子侵蚀问题的研究变得尤为重要。近年来,研究人员对加入钢纤维^[5]、聚丙烯纤维^[6-7]的普通混凝土氯离子侵蚀进行了大量研究。随着研究的不断深入,还有许多学者对荷载作用下的氯离子渗透性能做了研究,荷载作用方式主要有静态压荷载^[8-9]、动态压荷载^[10-11]、拉荷载^[12-13]、弯曲荷载^[14-16]等。邹斌等^[17]在研究剪应力对混凝土氯离子侵蚀规律的影响时提出了四点弯剪切法自锚加载方式,为后续研究剪应力作用下混凝土耐久性提供了新方法。

本文以纤维轻骨料混凝土圆柱体为试验对象,研究了拉应力、压应力作用对混凝土结构损伤后耐久性的影响,采用试验机加载方式使混凝土试件承受不同等级拉应力和压应力作用,通过试验研究拉应力、压应力作用后轻骨料混凝土结构的残余应变和氯离子扩散系数间的变化规律,为今后研究正应力作用下混凝土结构耐久性提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料与试件制备

水泥为大连小野田水泥厂生产的 P. O42. 5R 普通硅酸盐水泥;掺合料为大连华能电厂 I 级粉煤灰;砂为河砂,细度模数为 2. 79;轻骨料为宜昌生产的膨胀页岩碎石型陶粒,连续级配为 5~20 mm,堆积密度为 783 kg · m⁻³;高效减水剂为磺酸基和羧酸基共聚物的第 3 代产物,减水率为 28. 4%;水为自来水;纤维为竹节型聚丙烯纤维和波浪形钢纤维,其

性能指标如表 1 所示。

表 1 聚丙烯纤维和钢纤维性能指标
Tab. 1 Performance Indexes of Polypropylene Fiber and Steel Fiber

纤维名称	聚丙烯纤维	钢纤维
密度/(g · cm ⁻³)	0. 90	7. 84
长度/mm	36. 0	30. 0
直径/μm	850	538
弹性模量/GPa	>6. 7	202
抗拉强度/MPa	>470	>1 155

采用全计算配合比法^[18],以自密实砂浆为基础,用自密实砂浆超量取代粗骨料空隙,在骨料中加入砂浆,确定粗骨料体积率,最终确定轻骨料混凝土配合比。用纤维等体积代替粗骨料的方法,在轻骨料混凝土中加入纤维,得到纤维轻骨料混凝土配合比,如表 2 所示。

试验包括 10 组试件,分别为:未掺加纤维的 P0 组;聚丙烯纤维体积率为 0. 6%,0. 9%,1. 2%,1. 5%的试验组(编号 P6,P9,P12,P15);纤维总体积率为 0. 9%的试验组,其中钢-聚丙烯纤维体积率为 0. 1%+0. 8%,0. 3%+0. 6%,0. 5%+0. 4%(编号 PS1,PS3,PS5);钢纤维体积率为 1. 0%,1. 5%的试验组(编号 S10,S15)。每组 27 个试件,其中 3 个用于测量抗拉强度,3 个用于测量抗压强度,9 个用于测定 40%,60%,80%极限拉荷载损伤后的残余应变,9 个用于压荷载损伤试验(每个等级荷载需要 3 个试件),3 个不进行荷载损伤试验直接进行氯离子侵蚀试验,总计 270 个试件。

按照《水工混凝土试验规程》(SL 352—2006)^[19]、美国材料与试验协会(ASTM)混凝土试验标准^[20]和欧洲标准规范^[21]的要求进行混凝土的制备和工作性能的验证。将轻骨料混凝土拌制完成后,注入尺寸为 102 mm×220 mm 的 PVC 管模具中(内贴 1 mm 厚纸片便于脱模),24 h 后脱模,在温度为 20℃±2℃的饱和碱性溶液养护箱中养护 28 d,得到圆柱体试件,模具比试件高 20 mm 是为了试件成型后一端磨平处理所预留。

表 2 纤维轻骨料混凝土配合比

Tab. 2 Mix Proportion of Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete

试验组 编号	各材料用量/(kg·m ⁻³)					减水剂 掺量/%	聚丙烯纤维 体积率/%	钢纤维体 积率/%	28 d 抗压 强度/MPa	28 d 抗拉 强度/MPa
	水泥	粉煤灰	砂子	轻骨料	水					
P0	421	180	770	422.0	217.1	0.649	0.00	0.00	31.1	2.83
P6	421	180	770	407.2	217.1	0.709	0.60	0.00	33.6	3.12
P9	421	180	770	404.5	217.1	0.721	0.90	0.00	35.1	3.31
P12	421	180	770	401.8	217.1	0.728	1.20	0.00	36.8	3.49
P15	421	180	770	399.1	217.1	0.759	1.50	0.00	39.2	3.73
PS1	421	180	770	397.4	217.1	0.699	0.80	0.10	37.9	3.43
PS3	421	180	770	390.5	217.1	0.701	0.60	0.30	38.2	3.51
PS5	421	180	770	383.2	217.1	0.711	0.40	0.50	38.6	3.58
S10	421	180	770	403.2	217.1	0.718	0.00	1.00	39.5	3.79
S15	421	180	770	403.0	217.1	0.748	0.00	1.50	40.1	3.98

1.2 荷载损伤试验

先将养护好的试件进行抗压强度和抗拉强度试验。抗压强度试验在 200 t 万能试验机上进行,抗拉强度采用 30 t 电液伺服万能试验机进行测试。在测试抗拉强度时,先将试件两侧黏结面磨平,用植筋胶将两端带有拉杆的钢制球铰装置固定在圆柱体试件两端,静置 48 h 进行抗拉强度测试。钢球铰两端拉杆可以±5°方向调节,以保证试件所受拉力始终垂直于横截面。受拉试件和受拉试验见图 1,2,试验结果见表 2。然后进行荷载损伤试验,混凝土试件拉荷载、压荷载损伤试验均采用电液伺服万能试验机。在混凝土圆柱体极限抗拉强度、极限抗压强度的 40%,60%,80%水平下持载 60 s,然后卸载。试验过程中,用电阻应变片测量试件在加载、持载过程中的应变;用半桥式温度补偿片来减小温度变化对应变片电桥输出的影响;采用 DHDAS 动态信号采集系统进行数据采集,采集频率为 10 Hz。



图 1 受拉试件

Fig. 1 Tensile Specimens

1.3 氯离子扩散系数测定

对卸载后的试件和未掺加纤维对照组试件进行



图 2 受拉试验

Fig. 2 Tensile Test

切割,先切去试件上下端部各 50 mm,后将剩余部分切成两半,得到 2 块尺寸为 100 mm×50 mm 的小圆柱。将切割好的试块放入氯离子浓度为 4 mol·L⁻¹的智能真空饱水机中浸泡 18 h,然后用 NEL-PDR 氯离子扩散系数快速测定仪测定氯离子扩散系数,仪器通过对真空饱盐后的试件两端施加固定电压,使之产生通过试件的电流,通过计算机计算电导率,利用 Nernst-Einstein 方程计算氯离子扩散系数。最后对每组 6 个数据取平均值。真空饱水机与氯离子扩散系数快速测定仪如图 3,4 所示。

2 试验结果及分析

2.1 抗拉强度和抗压强度分析

图 5,6 给出了各组试件抗压强度和抗拉强度的分布规律。从图 5 可以看出,掺加纤维试验组的抗压强度均高于未掺加纤维的 P0 组,其中掺加钢纤维的 S15 组抗压强度最大,达到 40.1 MPa。加入聚丙烯纤维的 P6 组抗压强度从 31.3 MPa 提高到 33.6 MPa,P9,P12,P15 组分别提高到 35.1,36.8,



图 3 真空饱水机

Fig. 3 Vacuum Water Saturation Instrument

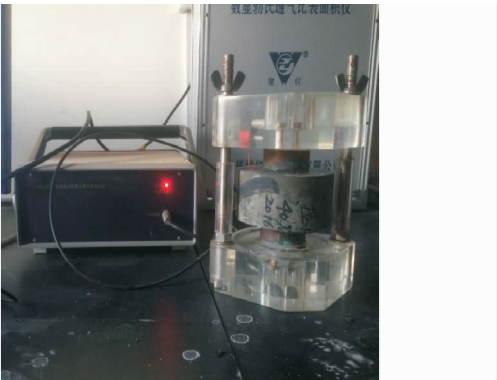


图 4 氯离子扩散系数快速测定仪
Fig. 4 Fast Measuring Instrument for
Chloride Ion Diffusion Coefficient

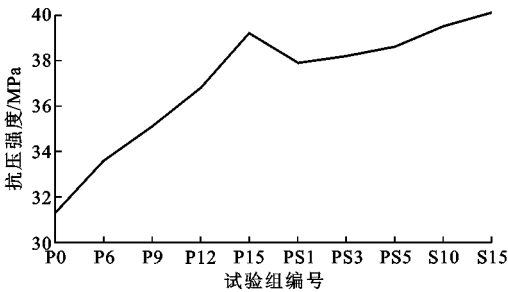


图 5 抗压强度分布

Fig. 5 Distribution of Compressive Strength

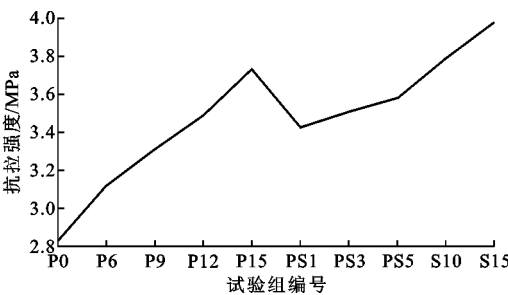


图 6 抗拉强度分布

Fig. 6 Distribution of Tensile Strength

似呈线性增加趋势。相比于抗压强度,纤维增强抗拉强度的效果更显著。单掺聚丙烯纤维的 P6,P9,P12,P15 组试件抗拉强度分别增加了 10%,17%,23%,32%,单掺钢纤维的 S10 组和 S15 组抗拉强度分别增加了 33%和 41%。由此可见轻骨料混凝土抗拉强度随着聚丙烯纤维体积率的增加而增加,钢纤维增强抗拉强度效果优于聚丙烯纤维,纤维增强了混凝土的韧性,延缓其破坏过程,提高了抗拉强度。

2.2 荷载损伤后应变分析

残余应变是混凝土结构在荷载卸载之后仍存在的不可恢复变形,表示为无荷载作用与荷载卸载之后的应变差值,通过应变片在试件加载前后的读数得到残余应变值。图 7,8 给出了拉、压荷载损伤后的残余应变分布规律,其中 P 为极限荷载。由图 7,8 可以看出,每组轻骨料混凝土应力水平与残余应变呈正相关关系,即同组试件应力水平越高,残余应变越大,混凝土内部结构塑性变形、微裂缝损伤程度和不可恢复程度越大。由于泌水、收缩、水化不充分等原因,轻骨料混凝土内部已经存在很多微裂缝,随着应力水平增加,微裂缝扩展最终相互连通,导致塑性变形增大。

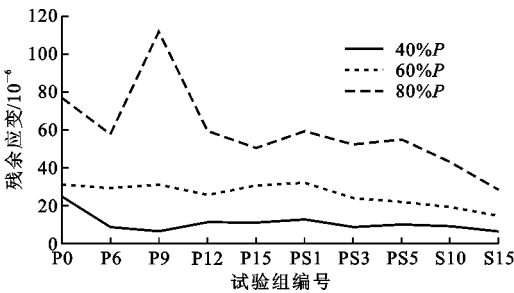


图 7 拉荷载作用后残余应变

Fig. 7 Residual Strain After Tensile Load

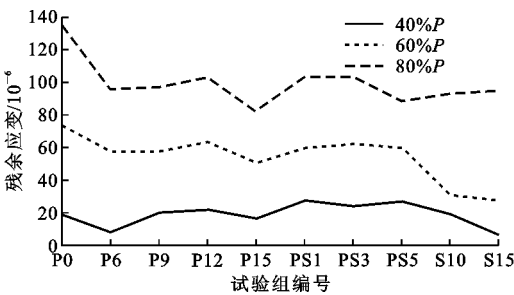


图 8 压荷载作用后残余应变

Fig. 8 Residual Strain After Compressive Load

由图 7 还可以看出,在 40%极限荷载拉应力水平作用下,各试验组残余应变差异不大,大多分布在 10×10^{-6} 左右。主要原因为:一方面,试件在较低的荷载水平作用下,拉应力对混凝土造成的损伤程度

较小,变形主要是骨料与水泥砂浆之间的弹性应变,塑性变形所占比例较小;另一方面,纤维的加入减小了内部结构的孔隙率和孔径,使得结构更密实。在 80% 极限荷载应力水平作用下,各试验组残余应变差异大于 40% 极限荷载应力水平作用,分布范围较大,在 $25 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$ 之间。与 P0 组相比, P15 组残余应变减小了 27×10^{-6} ,而 S15 组减小了 49×10^{-6} ,由此可见钢纤维在抵抗轻骨料混凝土变形方面明显优于聚丙烯纤维。

从图 8 还可以看出,40% 极限荷载压应力水平作用后,各组残余应变分布在 20×10^{-6} 左右,大多数试验组的残余应变大于 40% 极限荷载拉应力水平,低荷载作用下,纤维减小轻骨料混凝土的塑性变形在拉荷载损伤下效果更明显。在 60% 极限荷载作用后,掺加纤维的各试验组残余应变均小于 P0 组,加入纤维之后轻骨料混凝土的塑性变形得到不同程度的减小, P6, P9, P12, P15 试验组随着聚丙烯纤维体积率的增加,残余应变分布较为稳定,没有明显增减变化趋势。掺加聚丙烯纤维和钢纤维的总体积率都为 0.9% 的试验组由于纤维掺量较小,钢纤维体积率的变化对抵抗混凝土变形影响不显著。60% 极限荷载应力水平相当于混凝土结构在日常工作中承受概率最大的荷载等级,掺加钢纤维的 S10, S15 组相对于 P0 对照组残余应变减小幅度较大,分别减少了 57.7% 和 62.6%,再次证明了钢纤维可以增强混凝土强度,提高混凝土韧性。

2.3 氯离子扩散系数分析

氯离子扩散系数与混凝土抵抗氯离子侵蚀能力呈反比关系,氯离子扩散系数越大,混凝土抵抗氯离子侵蚀能力越弱。图 9,10 为拉荷载、压荷载损伤后氯离子扩散系数的分布情况。由图 9,10 可知,高应力水平作用后的试件在同组试件中氯离子扩散系数最大,这说明当荷载应力水平比较大时,应力损伤对混凝土结构氯离子侵蚀有明显的增大作用,不能忽略。

从图 9 还可以得出,各试验组中,随着拉应力水平的增加,氯离子扩散系数呈增长趋势。例如掺加 1.2% 聚丙烯纤维的 P12 组,在没有施加荷载时测得氯离子扩散系数为 $5.66 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,施加 40%, 60%, 80% 极限荷载之后,测得氯离子扩散系数分别为 11.04×10^{-9} , 13.04×10^{-9} , $17.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,呈递增趋势。拉荷载作用下混凝土微观结构逐步劣化,产生微裂缝,且拉应力使得混凝土内部孔隙率和孔径增大,随着荷载水平的提高,微裂缝

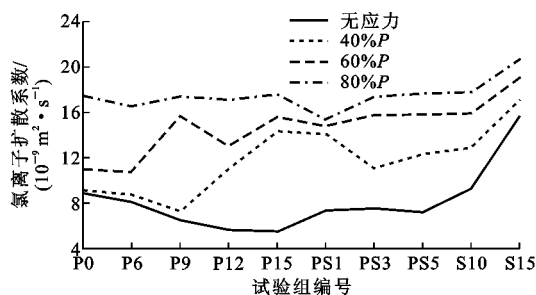


图 9 拉荷载作用后氯离子扩散系数

Fig. 9 Chloride Ion Diffusion Coefficient After Tensile Load

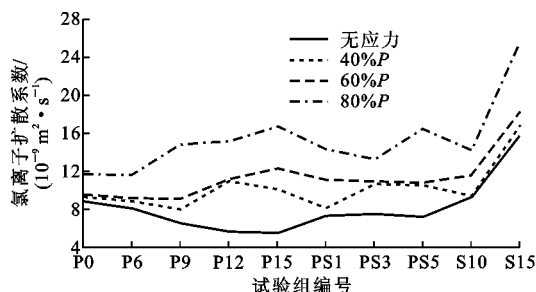


图 10 压荷载作用后氯离子扩散系数

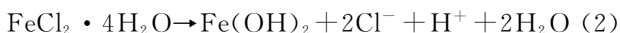
Fig. 10 Chloride Ion Diffusion Coefficient After Compressive Load

进一步扩展和相互连通,这些微裂缝可形成潜在的氯离子传输通道,使氯离子更容易进入结构内部。因此施加的荷载等级越高,混凝土抵抗氯离子侵蚀能力越弱。

在没有施加荷载的试验组中, P0 组氯离子扩散系数为 $8.86 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,与 P0 组相比, P6, P9, P12, P15 组氯离子扩散系数分别减少 0.75×10^{-9} , 2.23×10^{-9} , 3.2×10^{-9} , $3.35 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,降低率分别为 8%, 26%, 36%, 37%。由此说明聚丙烯纤维的加入,使得轻骨料混凝土的抗渗性能得到提高,加入体积率为 1.5% 的聚丙烯纤维试验组的抵抗氯离子侵蚀性能优于其他聚丙烯纤维体积率的混凝土。掺加聚丙烯纤维和钢纤维的 PS1, PS3, PS5 试验组氯离子扩散系数减少了 17%, 15%, 18%, 随钢纤维体积率的增加不明显。

对于没有施加荷载的试验组 S10, S15, 氯离子扩散系数与没有施加荷载的 P0 组相比均增大,其中掺加钢纤维体积率为 1.5% 的 S15 组增加了 77.2%, 增长十分显著。对于增长显著的原因,一般认为这是由于氯离子侵蚀加速了钢纤维钝化膜的破坏。水泥水化过程产生的高碱性环境 ($\text{pH} \geq 12.6$) 会使得钢纤维表面形成一层致密的钝化膜,钢纤维正常环境下不被侵蚀是因为钝化膜中的 Si-O 键对其有保护作用,而钝化膜只有在高碱性环境下才能

达到稳定状态,一旦 pH 值减小($\text{pH} < 11.5$ 时),钝化膜就开始变得不稳定;当 $\text{pH} < 9.88$ 时,钝化膜就会被破坏。研究表明,混凝土孔隙溶液中的 Cl^- 与 Fe^{2+} 反应生成易溶的绿锈 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$,并立即分解,反应式如下



可以看出 Cl^- 在反应中只是起到了催化作用,生成的 H^+ 和 OH^- 发生中和反应,使得结构内部 pH 下降,从而导致钝化膜破坏。在加入钢纤维的轻骨料混凝土试验组中,氯离子渗透进入混凝土内部加速破坏了钝化膜,引起钢纤维锈蚀,由于锈蚀物的体积大于原来消耗的钢纤维体积并且会对周围的混凝土产生锈胀作用,使得结构不密实。再加上钢纤维本身具有良好的导电性质,本次试验氯离子扩散系数测定的方法实质是电通量法,因此得到的氯离子扩散系数增长幅度较大。

由图 10 还可以看出,随着压应力水平的逐渐提高,聚丙烯纤维体积率为 1.5% 的 P15 组氯离子扩散系数逐渐增大。在不受荷载时氯离子扩散系数为 $5.51 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,受到 40%,60%,80% 极限荷载后氯离子扩散系数分别为 10.13×10^{-9} , 12.3×10^{-9} , $16.67 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,与施加同等荷载的 P0 组相比,分别增长 8.8%,28.1%,42.5%。由于在轻骨料混凝土中掺入一定量的纤维,会产生很多新的界面,和水泥砂浆与骨料界面一样,都是结构内部的薄弱部位,当受到的压应力水平逐渐提高时,这些薄弱部位首先破坏,为氯离子进入混凝土内部提供更多的通道,因此,氯离子扩散系数随荷载等级增加呈增长趋势。与 P15 组掺加同体积率的钢纤维 S15 组在不施加荷载时氯离子扩散系数为 $15.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,施加 40%,60%,80% 极限荷载后氯离子扩散系数分别为 16.8×10^{-9} , 18.2×10^{-9} , $25.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,与施加同等荷载的 P0 组相比,增长幅度分别为 80.4%,89.6%,118.8%,增长率远大于 P15 组。氯离子对聚丙烯纤维混凝土结构内部的酸碱环境改变不会影响到纤维本身,而氯离子通过改变钢纤维轻骨料混凝土内部的酸碱度,对破坏钢纤维表面的钝化膜起到催化作用,由于钢纤维具有导电性高的特点,在同等强度等级作用下,钢纤维轻骨料混凝土氯离子扩散系数更大一些。

2.4 残余应变-氯离子扩散系数关系

图 11,12 给出了拉、压荷载作用后纤维轻骨料混凝土在不同荷载等级作用下残余应变与氯离子扩

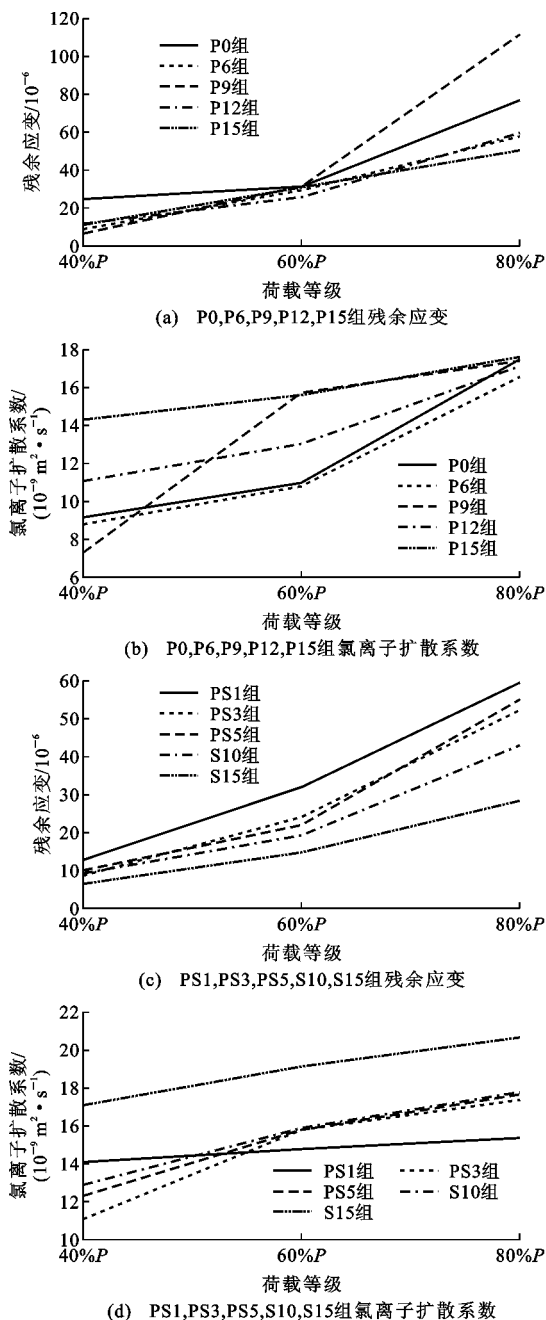


图 11 拉荷载作用后残余应变与氯离子扩散系数分布

Fig. 11 Distributions of Residual Strain and Chloride Diffusion Coefficient After Tensile Load

散系数的分布情况。从图 11,12 可以看出,总的趋势是随着荷载等级的增大,混凝土残余应变在增大,内部结构不可恢复变形增大,最终导致氯离子扩散系数明显增大。结合图 7,8 可以看出,随着纤维掺量的增加,混凝土残余应变并没有呈现显著的变小趋势。这是因为纤维掺量的增加导致了极限强度增加,在施加相应水平的损伤荷载时其荷载大小也在增加,因而没有出现残余应变减小的情况。结合图 9,10 可以看出,未施加荷载时,单掺聚丙烯纤维组

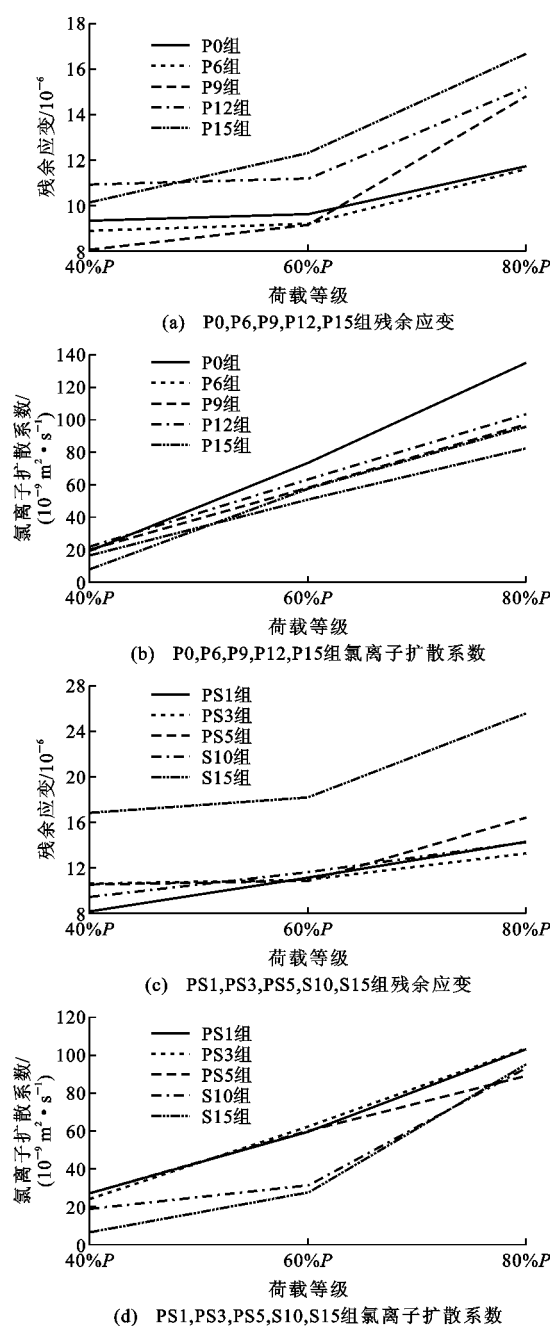


图 12 压荷载作用后残余应变与氯离子扩散系数分布

Fig. 12 Distributions of Residual Strain-chloride Diffusion Coefficient After Compressive Load

的氯离子扩散系数随着纤维的增加而变小,混掺纤维组基本保持不变,钢纤维组显著增加,施加荷载后纤维的增加没有显著改善混凝土抗氯离子扩散性能。总之,残余应变与氯离子扩散系数间存在正相关特性,残余应变越大,氯离子扩散系数越大。

3 结 语

(1)荷载作用后,混凝土残余应变随着拉、压荷载等级的增大而增大,残余应变增加后,混凝土抗氯

离子侵蚀能力降低,纤维对轻骨料混凝土极限强度和抗变形能力提高显著。

(2)无荷载作用时,随着聚丙烯纤维掺量的增加氯离子扩散系数降低,混凝土抵抗氯离子侵蚀能力增加;有荷载作用时,纤维的掺入对混凝土抗氯离子侵蚀能力并无显著改善。

(3)工程中应用纤维改善轻骨料混凝土抗氯离子侵蚀能力建议采用聚丙烯等有机纤维;NEL 法测量氯离子扩散系数并不适用于钢纤维轻骨料混凝土,钢纤维自身导电性会影响测试结果的准确性。

参考文献:

References:

[1] 金伟良,袁迎曙,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.

JIN Wei-liang, YUAN Ying-shu, WEI Jun, et al. Durability Theory and Design Methods of Concrete Structure in the Chloride Environment[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[2] 付传清,屠一军,金贤玉,等. 荷载作用对混凝土中氯盐传输的影响研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43 (4): 400-410.

FU Chuan-qing, TU Yi-jun, JIN Xian-yu, et al. Load Effect on Chloride Transportation in Concrete — A Short Review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43 (4): 400-410.

[3] 杜修力,金 浏,张仁波. 力学荷载对混凝土中氯离子渗透扩散行为影响述评[J]. 建筑结构学报, 2016, 37 (1): 107-125.

DU Xiu-li, JIN Liu, ZHANG Ren-bo. Review on Effect of External Mechanical Loadings on Chloride Penetration and Diffusion into Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37 (1): 107-125.

[4] 方永浩,余 韬,吕正龙. 荷载作用下混凝土氯离子渗透性研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40 (11): 1537-1543.

FANG Yong-hao, YU Tao, LV Zheng-long. Recent Developments on Chloride Penetration of Concrete Subjected to Loading[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40 (11): 1537-1543.

[5] 白 敏,牛荻涛,姜桂秀,等. 钢纤维掺量对混凝土氯离子渗透性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015 (11): 49-52.

BAI Min, NIU Di-tao, JIANG Gui-xiu, et al. Effect of Steel Fiber Content on Chloride Permeability of Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2015

- (11):49-52.
- [6] 王晨飞. 氯盐环境下聚丙烯纤维混凝土耐久性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2012.
WANG Chen-fei, Study on Durability of Polypropylene Fiber Concrete in Chloride Environment[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2012.
- [7] 李耀华. 聚丙烯纤维混凝土抗氯离子侵蚀研究[D]. 广州:广州大学,2013.
LI Yao-hua, Study on the Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Resistance to Chloride Ion Erosion[D]. Guangzhou:Guangzhou University, 2013.
- [8] 洪雷,程伟,王淑梅. 双向压荷载对高性能混凝土氯离子渗透性的影响[J]. 建筑材料学报,2012,15(6):852-856.
HONG Lei, CHENG Wei, WANG Shu-mei, Influence of Two-way Load on Chloride Permeability of High Performance Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6):852-856.
- [9] 陆文攀,赵铁军,马志鸣,等. 荷载损伤对混凝土微裂缝和氯离子侵蚀的影响研究[J]. 混凝土,2015(6):54-57.
LU Wen-pan, ZHAO Tie-jun, MA Zhi-ming, et al. Influence of Higher Stress on Chloride Ion Corrosion in Concrete[J]. Concrete, 2015(6):54-57.
- [10] LEE B, HYUN J, KIM Y. Chloride Permeability of Damaged High-performance Fiber-reinforced Cement Composite by Repeated Compressive Loads[J]. Materials, 2014, 7(8):5802-5815.
- [11] 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 Lin-hua, WANG Yong-liang, et al. Research on the Effect of Fatigue on Chloride Diffusion Coefficient in Concrete[J]. Concrete, 2014(1):31-34.
- [12] KIM D H, SHIMURA K, HORIGUCHI T. Effect of Tensile Loading on Chloride Penetration of Concrete Mixed with Granulated Blast Furnace Slag[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2010, 8(1):27-34.
- [13] 周凤华,姜福香,孟令波. 轴拉荷载作用对粉煤灰混凝土抗氯离子侵蚀性的影响[J]. 混凝土,2013(8):8-11.
ZHOU Feng-hua, JIANG Fu-xiang, MENG Ling-bo. Influence of an Applied Uniaxial Tensile Stress on Chloride Penetration Resistance of Fly Ash Concrete[J]. Concrete, 2013(8):8-11.
- [14] 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 Shi-qin, GONG Jin-xin. Influence of Flexural Loading on Permeability of Chloride Ion in Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(2):134-138.
- [15] 高延红,张杉,周巧萍,等. 自然潮差环境弯曲荷载作用下混凝土氯离子峰值浓度的分布[J]. 自然灾害学报,2016,25(1):103-109.
GAO Yan-hong, ZHANG Shan, ZHOU Qiao-ping, et al. Distribution of Peak Concentration of Chlorion in Concrete Under Flexural Load in the Natural Tidal Environment[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(1):103-109.
- [16] 方璇,韩建德,王曙光,等. 静力弯曲荷载作用下双掺混凝土氯离子侵蚀的试验研究[J]. 混凝土,2016(2):21-25.
FANG Xuan, HAN Jian-de, WANG Shu-guang, et al. Experimental Investigation on Chloride Ion of Penetration of Concrete with Fly Ash and Slag Under Static Bending Load[J]. Concrete, 2016(2):21-25.
- [17] 邹斌,詹树林. 剪应力作用下混凝土结构氯离子传输试验研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(8):2519-2522,2529.
ZOU Bin, ZHAN Shu-lin. Experimental Study on Chloride Ion Transport in Concrete Structure Under Shear Stress[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(8):2519-2522,2529.
- [18] 张云国,薛向锋,鲁兰兰. 基于砂浆的自密实轻骨料混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐通报,2015,34(5):1270-1274,1281.
ZHANG Yun-guo, XUE Xiang-feng, LU Lan-lan. Mixing Proportion Design for Self-compacting Lightweight Concrete Based on Mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(5):1270-1274,1281.
- [19] SL 352—2006, 水工混凝土试验规程[S].
SL 352—2006, Test Code for Hydraulic Concrete[S].
- [20] ASTM C 684-1999, Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens[S].
- [21] SCC 028, The European Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete[S].