

文章编号: 1001-4888(2020)06-1060-11

玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为 及力学性能试验研究*

王振山¹, 李亚坤¹, 韦俊², 卢俊龙¹, 郭宏超¹, 田建勃¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西西安 710048; 2. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏苏州 215009)

摘要: 玄武岩纤维混凝土在我国工程领域应用越来越广, 本文为研究其在氯盐环境下的耐腐蚀性及力学性能的退化, 共设计 10 种配合比, 置于浓度 5% 的氯化钠溶液中进行腐蚀试验。试块尺寸为 100mm×100mm×100mm, 每 30d 测定表观裂缝、有效孔隙率、吸水率及质量等; 每 90d 进行材料强度试验, 对受压性能变化进行研究。结果发现: 玄武岩纤维可有效抑制氯盐侵蚀裂缝的产生和发展, 降低氯离子迁移速率。与普通混凝土相比, 添加适量的玄武岩纤维能较好提升混凝土抗压强度及变形能力, 当纤维体积掺量为 0.1% 时, 最为有利; 当掺量超过 0.2% 后, 性能反而降低。另外发现, 添加粉煤灰在降低玄武岩纤维混凝土的有效孔隙率、减缓氯离子迁移等方面并不理想。氯盐侵蚀环境下, 建议玄武岩混凝土保护层厚度不宜低于 30mm。最后, 基于试验结果, 提出了玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀强度退化模型。本文研究结果可为玄武岩纤维混凝土在氯盐环境下的工程应用提供一定技术支持。

关键词: 玄武岩纤维混凝土; 氯盐侵蚀; 耐久性; 力学性能

中图分类号: TU528.572 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-19-189

0 引言

玄武岩纤维混凝土(Basalt Fiber Reinforced Concrete, BFRC)是将玄武岩纤维掺入混凝土中形成的一种新型水泥基复合材料, 纤维可在混凝土内部形成一定的拉结作用, 提高其密实度, 改善力学性能及耐腐蚀能力等。凭借其较好的综合性能, 近年来, BFRC 在海洋建筑、高速公路和桥梁结构等服役环境严苛的工程中得到了较多使用。

随着 BFRC 的大量应用, 为了应对不同工程需求, 国内外学者对玄武岩纤维混凝土的力学特性、各种腐蚀环境下侵蚀机理及耐久性能进行了深入研究。霍文静等^[1]通过盐酸和氢氧化钠溶液的腐蚀试验, 研究了玄武岩纤维的耐酸碱性, 考察了玄武岩纤维不同腐蚀时间下的质量变化、单丝强度、丝束拉伸性能及复合材料的弯曲性能。杨勇新等^[2]进行了 2 种不同树脂浸渍玄武岩纤维布在人工海水干湿环境下的老化试验, 通过考察拉伸强度、伸长率及弹性模量等参数, 发现玄武岩纤维布具有较好的抗海水腐蚀性能。李为民等^[3]分析了不同纤维对混凝土冲击性能的影响情况, 结果发现玄武岩纤维效果总体上优于碳纤维, 可有效增强混凝土的冲击韧性及强度。王钧等^[4]的试验研究发现: 玄武岩纤维混凝土的劈拉强度和抗折强度随着玄武岩纤维掺量的增大而增强。陈峰等^[5]采用正交试验研究了纤维掺量、纤维长度以及纤维直径对 BFRC 抗压强度及劈拉强度的影响, 结果表明: 玄武岩纤维的掺量变化对 BFRC

* 收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2020-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(51608441)

通信作者: 韦俊(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 结构工程抗震。Email: 5611450@qq.com

的力学性能影响最为显著,并且通过试验确定了最优的纤维掺量和纤维尺寸。张兰芳等^[6]对硫酸盐侵蚀的玄武岩纤维混凝土耐久性性能进行了试验研究,发现玄武岩纤维可有效减少混凝土中的孔隙率,增强混凝土抗渗能力和耐腐蚀性能。Ramakrishnan等^[7]进行了玄武岩纤维混凝土早期性能试验研究,发现适量的玄武岩纤维可有效防止离析发生,提高混凝土保水性和黏聚性,并减小早期收缩,对抑制混凝土的早期开裂作用显著。李建^[8]通过受压性能试验,研究了玄武岩纤维对矿渣粉煤灰混凝土受力性能的影响规律,发现纤维对提高混凝土的抗折和劈裂强度作用明显。Jung等^[9]对碱性溶液中的玄武岩纤维化学组成及稳定性进行了试验分析,发现玄武岩纤维耐弱碱侵蚀能力较好,化学成分稳定。Jalasutram等^[10]试验分析了玄武岩纤维混凝土的强度及变形情况,结果表明:适量的玄武岩纤维可对混凝土变形能力产生积极作用。叶邦士等^[11]研究了玄武岩纤维在水泥基体中的耐久性,结果发现:玄武岩纤维耐酸性能优于耐碱性能,粉煤灰的掺入降低了玄武岩纤维水泥浆体的缺陷数量。郭范波等^[12]将3种不同玄武岩纤维布包裹形式的混凝土试件浸泡于5倍浓度海水中,观察纤维表面形态并测定抗压强度,试验发现包裹玄武岩纤维布可提高混凝土耐久性。王海良等^[13]对玄武岩纤维布加固的钢筋混凝土梁在酸、碱、氯盐溶液中腐蚀60d后进行静力抗弯试验,结果表明:腐蚀均降低了梁的承载力,其中氯盐影响最小。金生吉等^[14]进行了玄武岩纤维混凝土在氯化钠、硫酸镁及其混合溶液中的冻融试验,结果表明:玄武岩纤维的掺入有效延长了混凝土在腐蚀条件下的使用寿命。王明超等^[15]对玄武岩纤维及玄武岩纤维混凝土的耐碱腐蚀性能进行了试验研究,观测了腐蚀过程,分析了侵蚀机理。韩铁林等^[16]研究了不同水化学环境腐蚀,包括溶液pH值、浓度及水化学成分对混凝土材料腐蚀程度及力学性能的影响。

通过上述分析发现,关于玄武岩纤维对混凝土力学性能影响的研究相对较多,对于玄武岩纤维材料及其制品耐腐蚀性的试验也进行了一定研究,但针对玄武岩纤维混凝土的耐久性试验以及腐蚀后力学性能变化情况的研究相对较少。氯盐在自然界中广泛存在,因此氯盐侵蚀是很多结构工程必须面对的腐蚀问题,随着氯离子的渗入,会对内部材料产生较为显著的影响。本文通过5.0%氯化钠溶液侵蚀试验,研究氯盐侵蚀下玄武岩纤维混凝土的裂缝发展、氯离子分布、力学性能等,以揭示侵蚀发展和腐蚀后混凝土强度退化规律,提出了受压强度退化模型,本文结果可为玄武岩纤维混凝土在氯盐环境中的应用提供一定技术支持。

1 试验介绍

试验采用玄武岩短切纤维,P. O42.5级硅酸盐水泥,细骨料为沙子,粗骨料为连续级配碎石,粒径5~16mm;外加剂为聚羧酸高性能粉末减水剂。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[17]和《纤维混凝土试验方法标准》^[18]相关规定,为方便进行腐蚀及侵蚀后的受压试验研究,试块尺寸选为100mm×100mm×100mm,共设计了5种不同纤维掺量的混凝土及粉煤灰混凝土配合比,纤维掺量分别为0%、0.05%、0.10%、0.20%、0.30%,具体见表1。试块加工过程中发现玄武岩纤维离散问题较为突

表1 混凝土配合比(单位:kg/m³)

Tab. 1 Mix proportion of concrete(unit: kg/m³)

试件	水泥	沙子	粗骨料	水	纤维	减水剂	粉煤灰
S1	524.0	532.0	1129.0	215.0	0	5.240	0
S2	524.0	532.0	1129.0	215.0	1.33	5.240	0
S3	524.0	532.0	1129.0	215.0	2.65	5.240	0
S4	524.0	532.0	1129.0	215.0	5.30	5.240	0
S5	524.0	532.0	1129.0	215.0	7.95	5.240	0
F1	472.6	532.0	1129.0	215.0	0	5.240	52.40
F2	472.6	532.0	1129.0	215.0	1.33	5.240	52.40
F3	472.6	532.0	1129.0	215.0	2.65	5.240	52.40
F4	472.6	532.0	1129.0	215.0	5.30	5.240	52.40
F5	472.6	532.0	1129.0	215.0	7.95	5.240	52.40

出,玄武岩纤维属柔性材料,与混凝土混合过程中易发生“聚团”情况,纤维分散程度差,会直接影响混凝土的各项性能。通过研究发现:玄武岩纤维与细颗粒体(细沙)经揉搓后,较容易打散;同时,对细沙的湿度有一定要求,湿度过大,纤维“聚团”情况加重;含水量过小,则会发生“打毛”情况;含水率为1.5%左右最为合理(见图1)。玄武岩纤维试块制作完成后在标准环境下养护28d,在样品强度测试合格后,置于5.0%氯化钠溶液中。腐蚀时间分别为90d、180d、270d,每30d观察混凝土裂缝产生及发展情况,测量试块体积、质量及有效孔隙率;侵蚀结束后,进行受压强度试验研究。

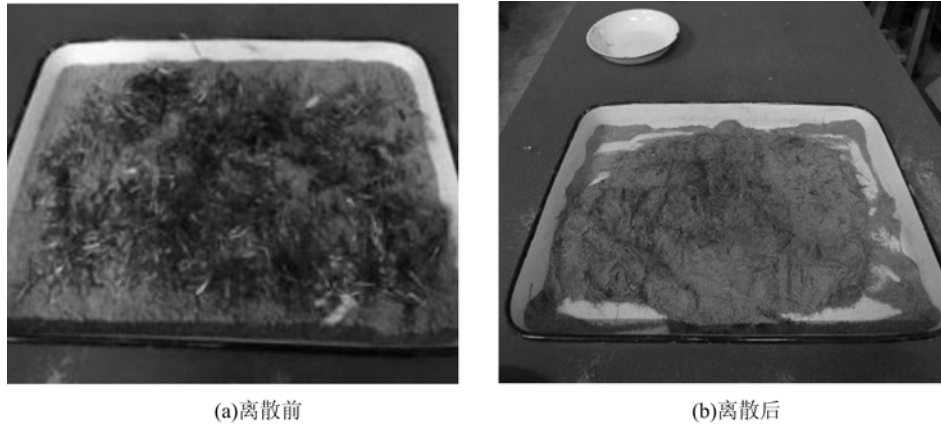


图1 玄武岩纤维离散情况
Fig.1 Basalt fiber dispersion

2 试验现象与分析

2.1 裂缝产生及发展

氯盐对BFRC的表观破坏并不明显,为探究氯盐侵蚀下BFRC的裂缝发展情况,采用20倍电子放大镜对试块的表面裂缝进行了观察。图2~图4为BFRC裂缝的发展变化情况,侵蚀90d时,各配合比试块裂纹分布大致相当;180d时,裂纹发展、加深,其中普通混凝土较为严重;270d时,普通混凝土、0.05%及0.3%纤维掺量混凝土裂纹分布最为严重,0.1%纤维掺量的混凝土相对较好。玄武岩纤维的加入可对混凝土早期裂缝形成有一定抑制作用;但随着腐蚀时间的增加,高掺量纤维试块并未表现出更好的抗裂性能。通过表观裂纹分析,0.1%纤维掺量抗裂效果相对较好。

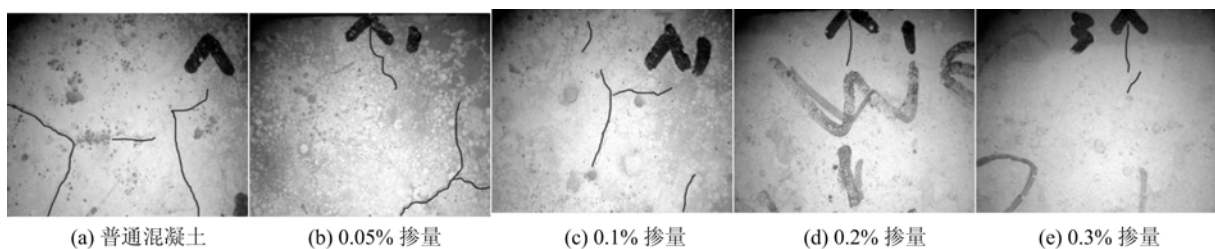


图2 90d裂缝开展情况
Fig.2 90d crack development

为了探究玄武岩纤维对混凝土内部孔隙的影响,通过200倍电子放大镜对腐蚀90d后距试块表面30mm处的界面进行观察(见图5),可以看出,未添加玄武岩纤维的试块界面孔洞最多,且多为小孔,掺入玄武岩纤维后,孔洞数量明显变少,纤维的加入密实了混凝土内部结构。玄武岩纤维掺量为0.2%以上时,试块内孔洞数量虽减少,但孔洞直径却变大,这是因为掺量过大,纤维搭接成团概率增加,导致孔洞直径增大。对比发现,玄武岩纤维掺量为0.1%的试块界面孔洞数量及直径最小,混凝土内部密实度最高。

2.2 有效孔隙率及氯离子浓度测定分析

混凝土中的孔隙作为腐蚀介质的输送通道,对混凝土耐久性影响较为突出。本文采用测量吸水率

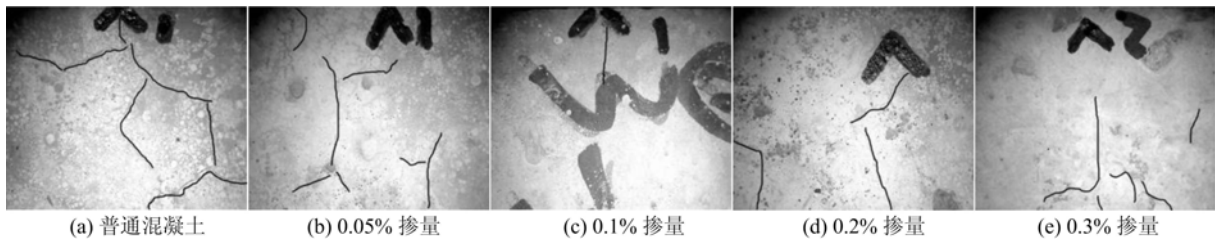


图 3 180d 裂缝开展情况
Fig. 3 180d crack development

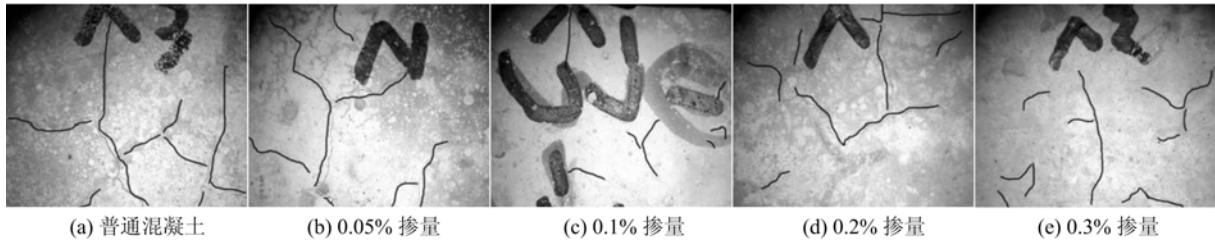


图 4 270d 裂缝开展情况
Fig. 4 270d crack development

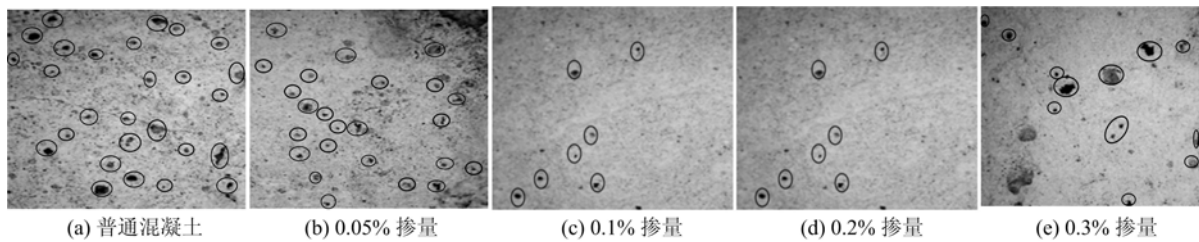


图 5 BFRC 内部孔隙分布(90d)
Fig. 5 Internal pore distribution of BFRC (90d)

的方法,对混凝土孔隙率变化进行分析,具体方法:测量周期为 30d,每种配合比 3 个试块,测量结果除去偶然误差后取平均值。先测定饱和状态下试块的质量及体积,再通过烘箱干燥后称重。按下式计算试块有效孔隙率:

$$\epsilon_e = \frac{(m_s - m_d) \cdot \rho_d}{m_d \cdot \rho_w} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_s 为饱和状态下试块质量; m_d 为干燥状态下试块质量; ρ_w 为水密度; ρ_d 为干燥状态下试块密度。

由图 6 可见,试块在氯盐侵蚀下的有效孔隙率总体趋势为先减小后增大。侵蚀时间为 90d 时,纤维掺量为 0.1% 的 BFRC 其有效孔隙率比未添加纤维的试块低 10%,纤维掺量为 0.3% 的 BFRC 其有效孔隙率比未添加纤维的试块高 7.6%;侵蚀时间为 180d 时,纤维掺量为 0.1% 的 BFRC 有效孔隙率比未添加纤维的试块低 9.9%,纤维掺量为 0.3% 的 BFRC 有效孔隙率比未添加纤维的试块高 8.2%;侵蚀时间为 270d 时,随着侵蚀程度加深,混凝土试块中裂隙逐渐增多、开展并贯通,所有试块有效孔隙率显著增大,但纤维掺量为 0.1% 的试块有效孔隙率最低。

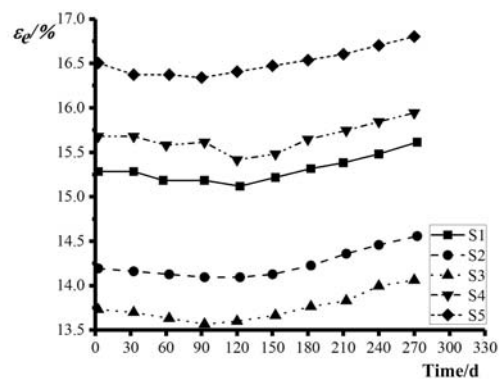


图 6 BFRC 有效孔隙率
Fig. 6 Effective porosity of BFRC

为探究玄武岩纤维和粉煤灰对混凝土耐久性的影响,对普通混凝土、0.1% 纤维掺量、粉煤灰混凝土以及 0.1% 纤维掺量+粉煤灰混凝土试块有效孔隙率进行了对比分析。如图 7 所示,侵蚀时间为 90d

时,粉煤灰混凝土试块比普通混凝土有效孔隙率低 0.99%, 0.1%纤维混凝土和 0.1%纤维粉煤灰混凝土比普通混凝土的有效孔隙率分别低 11.1%和 10.7%;侵蚀时间为 180d 时,粉煤灰混凝土、0.1%纤维和 0.1%纤维粉煤灰混凝土分别比普通混凝土有效孔隙率低 1.1%、11.4%和 10%。通过对比发现:粉煤灰对提高混凝土密实度有一定作用,但效果远远低于玄武岩纤维。

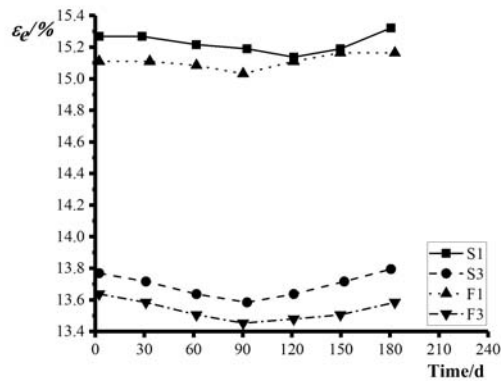


图7 有效孔隙率对比

Fig. 7 Effective porosity comparison

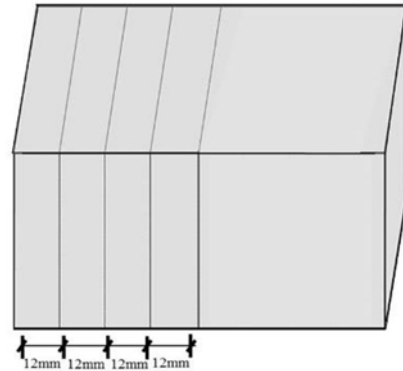


图8 切割示意图

Fig. 8 Cutting schematic diagram

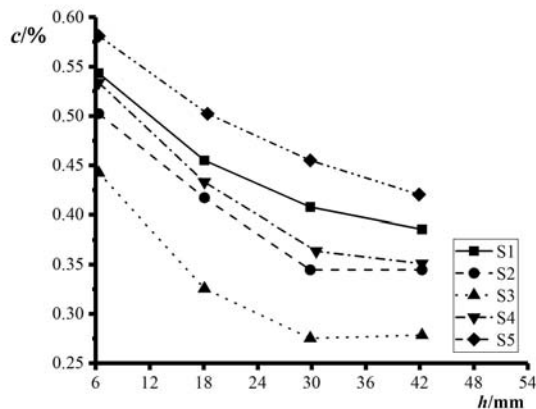


图9 90d 氯离子浓度变化

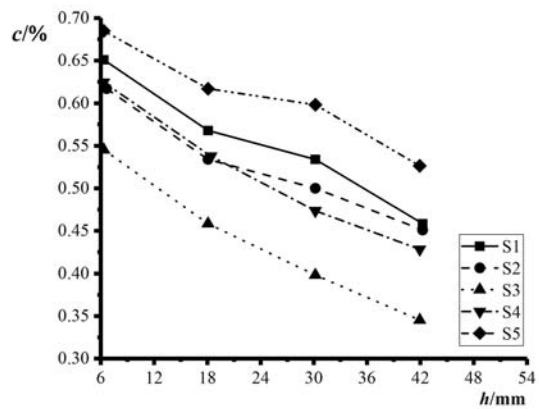
Fig. 9 Cl⁻ concentration changes for 90d

图10 180d 氯离子浓度变化

Fig. 10 Cl⁻ concentration changes for 180d

氯离子渗透到混凝土当中,会破坏钢筋表面的钝化膜并与钢筋发生一系列反应,导致钢筋腐蚀破坏。为研究氯离子在混凝土中的渗透情况,每 90d 进行一次氯离子浓度测定。将试块由外至内切割,切片厚度为 12mm,所测离子浓度作为该切片中间点处浓度,即试块 6mm、18mm、30mm 和 42mm 深度处的离子浓度,切片情况见图 8。将切片充分研磨成粉,称取 8g 溶于 400ml 纯净水,静置 20min,取上清液 100ml,用钠离子测定仪测定出氯离子浓度。图 9 为在氯盐溶液中侵蚀 90d 的氯离子浓度变化情况,普通混凝土与 0.3%纤维掺量的氯离子浓度最大,基本呈现两阶段变化,前期随深度增加,离子浓度下降速度较快,深度达到 18mm 以后,离子浓度下降速度减弱。0.05%、0.10%、0.20%纤维掺量的离子浓度基本呈两阶段变化,深度达到 30mm 以后,离子浓度不再增加,表明玄武岩纤维有明显的阻隔作用。图 10 为侵蚀 180d 的氯离子浓度,普通混凝土与 0.3%纤维掺量的氯离子浓度最大,变化规律也基本一致;0.05%、0.10%、0.20%纤维掺量的离子浓度基本呈线性变化;0.10%的离子浓度明显低于其他试块,在深度 42mm 处的离子浓度,相对于 90d 侵蚀时增长幅度不大。图 11 为侵蚀 270d 的氯离子浓度,0.3%纤维掺量的氯离子浓度远高于其他试块,表面与 18mm 处浓度差别不大,表明其已饱和。普通混

凝土与 0.2% 纤维掺量的离子浓度值大致相当;0.05% 与 0.10% 的变化规律基本一致,呈两阶段变化;深度达到 30mm 以后,离子浓度基本稳定。图 12 为加入粉煤灰后氯离子的变化情况,加入粉煤灰可增加混凝土的密实度,但最终的效果不显著,对于阻隔氯离子的渗入,玄武岩纤维起到主要作用。通过上述分析发现:适量玄武岩纤维对于氯离子渗入有较好的阻隔作用;对于加入纤维的试块,深度达到 30mm 以后,氯离子浓度显著降低,建议:用于氯离子环境中的玄武岩纤维混凝土结构,其保护层厚度不应小于 30mm。

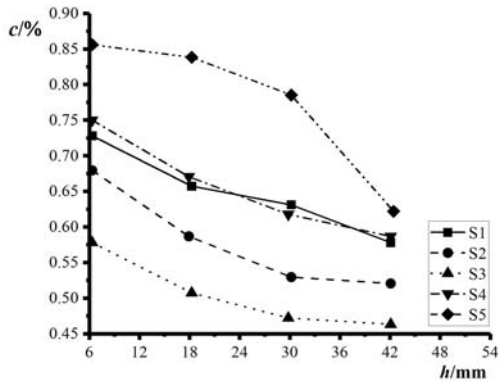


图 11 270d 氯离子浓度变化

Fig. 11 Cl⁻ concentration changes for 270d

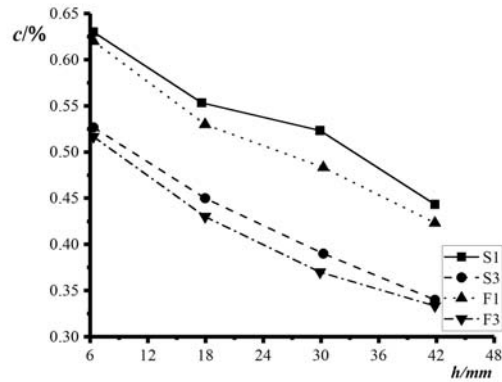


图 12 氯离子浓度对比(180d)

Fig. 12 Comparison of Cl⁻ concentration (180d)

2.3 玄武岩纤维混凝土力学性能分析

为探究经氯盐侵蚀后混凝土力学性能的变化情况,分别对浸泡时间为 90d、180d 和 270d 的试块进行抗压试验,加载速率为 0.45mm/min。当承载力下降到极限承载力的 85% 时判定为试块破坏,并停止加载,取 3 个试块的平均值进行分析。图 13 为 0.2% 纤维掺量试件轴压破坏情况,总体来看,侵蚀时间越长,试块受压破坏情况越严重。对于同一侵蚀时间,0%、0.05%、0.2% 和 0.3% 纤维掺量试块破坏后,混凝土离散化较为严重,而纤维掺量 0.1% 试块未发现大面积剥落情况,纤维的拉结作用依然较强,减弱了混凝土的破坏程度。



图 13 0.2% 纤维掺量试件轴压破坏情况

Fig. 13 Axial compression failure of 0.2% fiber parameter specimen

各试块的荷载-位移曲线见图 14~图 16,各试块的极限抗压强度对比见表 2。在氯盐溶液中侵蚀 90d 后,玄武岩纤维掺量为 0.1% 的试块,其抗压强度明显高于其他试块,相较于普通混凝土提高了 12.8%。随腐蚀时间的增加,试块强度下降,与 90d 时抗压强度相比,玄武岩纤维掺量为 0%、0.05% 和 0.1% 的试块,在 180d 时强度损失了 12.2%、9.7% 和 6.4%,在 270d 时强度损失了 20.4%、16.1% 和 12.9%。分析发现在侵蚀前期,玄武岩纤维对混凝土强度的提高并不显著;随着侵蚀时间的增加,尤其当过量加入玄武岩纤维后,强度损失较大,最大可达 20% 以上,所以在玄武岩纤维的工程应用当中,应严格控制其掺入量。对比 180d 时掺加粉煤灰的 BFRC 强度,发现粉煤灰的加入对改善混凝土强度效果

并不明显。总体来看,当玄武岩纤维掺量为 0.1%时,混凝土抗压强度提升最为显著。玄武岩纤维不仅可以提升混凝土的抗压强度,同时对其变形能力也有一定作用,可按式(2)分析混凝土的变形情况:

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \tag{2}$$

式中: Δu 为承载力下降到最大承载力 85%时对应的位移; Δy 为承载力上升到最大承载力 75%时对应的位移。

表 2 各试件抗压强度(单位:MPa)
Tab. 2 Compressive strength of each specimen(unit: MPa)

试件	90d	180d	270d	试件	90d	180d	270d
S1	50.0	43.9	39.8	F1	/	46.4	/
S2	53.4	48.2	44.8	F2	/	50.8	/
S3	56.4	52.8	49.1	F3	/	54.9	/
S4	48.3	42.7	38.5	F4	/	44.9	/
S5	46.4	39.3	34.1	F5	/	41.6	/

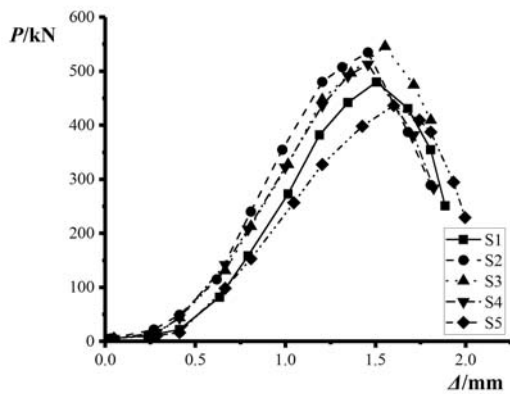


图 14 90d 荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves for 90d

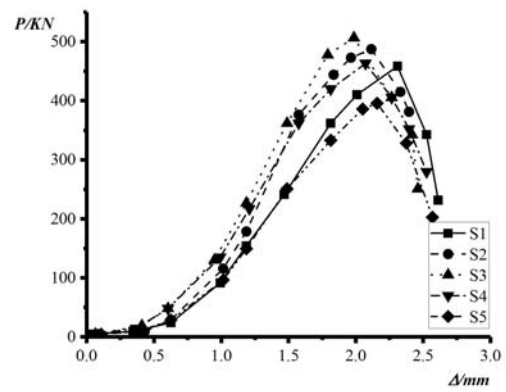


图 15 180d 荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curves for 180d

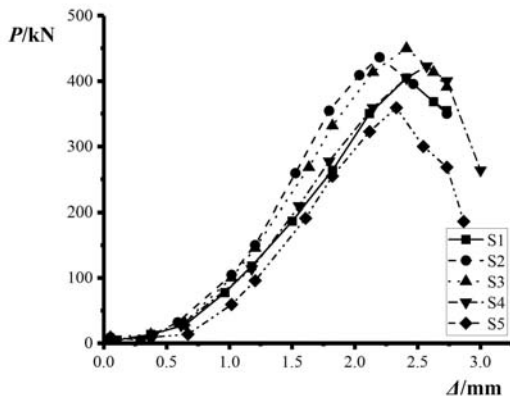


图 16 270d 荷载-位移曲线

Fig. 16 Load-displacement curves for 270d

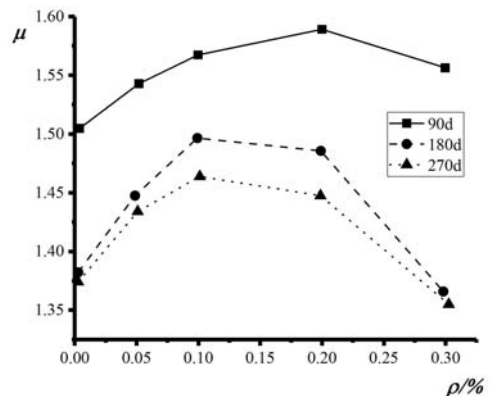


图 17 BFRc 变形能力对比

Fig. 17 Deformation capacity comparison of BFRc

各试块变形能力变化情况见图 17。侵蚀 90d 时,0.2%掺量的试块变形能力最好,普通混凝土变形

能力最差；随着侵蚀时间的增加，混凝土整体的变形能力降低；掺量 0.1% 与 0.2% 的混凝土变形能力较好，普通混凝土与掺量 0.3% 的混凝土变形能力相当。

2.4 有效孔隙率、离子浓度及力学性能关系分析

本文对有效孔隙率、离子浓度与力学性能之间的关系也进行了分析。图 18 为氯离子浓度与有效孔隙率的关系，由图可看出，随着孔隙率的增加，离子浓度呈增加趋势；90d 与 180d 侵蚀后，有效孔隙率与离子浓度变化规律基本一致；180d 后，孔隙率未大幅增加，但离子浓度却增加较多，0.1% 纤维掺量的混凝土孔隙率与离子浓度最小，0.3% 的混凝土孔隙率与离子浓度最大，普通混凝土居中。经过 270d 侵蚀后，孔隙率与离子浓度都大幅度提升，表明混凝土内部受到较大损伤。图 19 为 BFRC 氯离子浓度与抗压强度的关系，由图可见，抗压强度基本与离子浓度呈反比关系，随着离子浓度的增大，试块强度逐渐降低。纤维掺量为 0.1% 的试块抗压强度最高，且其对应的曲线相较其他掺量斜率也最低。0.3% 纤维掺量混凝土强度下降较快，普通混凝土基本处于中间位置，综合上述分析可得：过量加入纤维对混凝土耐久性及力学性能均产生不利作用。

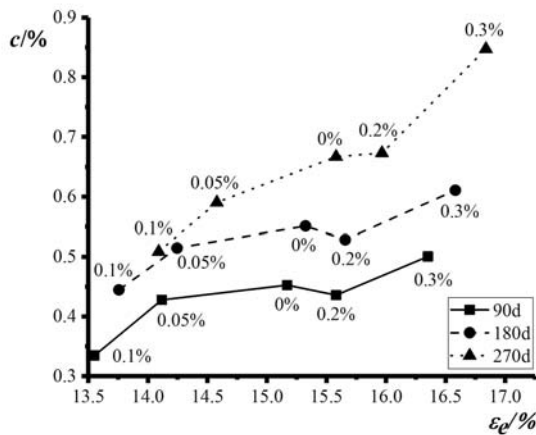


图 18 有效孔隙率与氯离子浓度的关系

Fig. 18 Relationship between effective porosity and Cl⁻ concentration

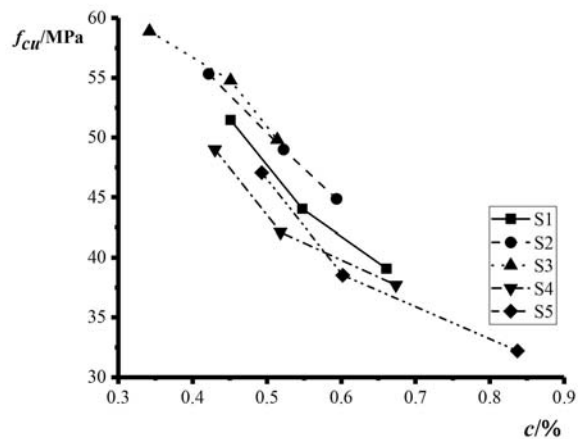


图 19 氯离子浓度与抗压强度的关系

Fig. 19 Relationship between Cl⁻ concentration and compressive strength

3 氯盐环境下玄武岩纤维混凝土的强度劣化模型

通过研究氯盐侵蚀时间及玄武岩纤维掺量对 BFRC 强度的影响规律，建立了与侵蚀时间及纤维掺量有关的 BFRC 强度劣化模型。根据混凝土受压试验结果，结合侵蚀过程及腐蚀机理分析，受蚀后混凝土动态抗压强度 f_a 表达式如下

$$f_a = kf_\omega(1 + a\rho + b\rho^2) \tag{3}$$

式中： k 、 a 、 b 为待定系数； f_a 、 f_ω 分别为 BFRC 受氯盐侵蚀后的理论抗压强度和未受侵蚀时的抗压强度； ρ 为玄武岩纤维体积掺量。

采用最小二乘法对浸泡 90d 时 BFRC 的抗压强度进行回归分析，得到式(4)：

$$f_a = kf_\omega(1 + 1.358\rho - 6.226\rho^2) \tag{4}$$

$$k = k_t$$

式中 k_t 为侵蚀时间影响下的 BFRC 抗压强度修正系数。

相对抗压强度为

$$\frac{f_a}{f_\omega} = k_t(1 + 1.358\rho - 6.226\rho^2) \tag{5}$$

回归分析得到

$$k_t = 1 - 9.322 \times 10^{-4} t \quad (6)$$

式中 t 为腐蚀时间(单位:d)。根据上述分析,确定了BFRC在氯盐环境下的抗压强度劣化模型

$$f_a = (1 - 9.322 \times 10^{-4} t)(1 + 1.358\rho - 6.226\rho^2) f_w \quad (7)$$

式中 $f_w = 55.28\text{MPa}$ 。

BFRC在氯盐溶液中侵蚀后的理论强度和试验强度见表3,其中: f_a 为理论计算强度; f_c 为试验强度,取每组3个试块的强度平均值。可以看出,理论强度与试验强度的误差在10%以内,吻合良好,说明此模型有较好的精度。

表3 理论强度与试验强度比较

Tab.3 Comparison of theoretical strength and test strength

	90d					180d					270d				
	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0	0.05	0.1	0.2	0.3
$\rho/\%$	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0	0.05	0.1	0.2	0.3
f_a/MPa	50.6	53.3	54.3	51.7	42.7	46.0	48.4	49.4	47.0	38.8	41.4	43.5	44.4	42.3	34.9
f_c/MPa	50.0	43.4	56.4	48.3	46.4	43.9	48.2	52.8	42.7	39.3	39.8	44.8	49.1	38.5	34.1
f_a/f_c	1.01	0.99	0.96	1.07	0.92	1.04	1.00	0.93	1.09	0.98	1.03	0.97	0.90	1.09	1.02

4 结论

通过玄武岩纤维混凝土5.0%氯化钠溶液耐久性试验及侵蚀后试块轴压性能试验研究,主要得到以下结论:

(1) 掺入适量玄武岩纤维能够有效抑制氯盐侵蚀下混凝土裂缝的产生与发展,玄武岩纤维能够细化孔结构,增加混凝土的密实度,提高混凝土在氯盐环境下的耐久性;粉煤灰对混凝土耐久性的提升效果远不如玄武岩纤维显著。

(2) 氯盐环境侵蚀下,玄武岩纤维可提高混凝土强度12%左右,但掺量超过0.2%后,性能反而大幅度降低。

(3) 玄武岩纤维可较好地提升混凝土耐氯盐侵蚀的能力,但过量加入纤维反而对混凝土的密实度产生不利作用,降低混凝土的耐久性能;建议纤维掺量以0.1%为宜,不易超过0.2%。

(4) 适量玄武岩纤维的加入能够降低氯盐侵蚀下混凝土试块中的氯离子浓度,减缓氯离子在混凝土中的渗透速率;去除掺量影响因素外,从保护层厚度来看,30mm以后,离子浓度变化速率明显降低;建议在氯盐环境中,玄武岩纤维混凝土保护层厚度不易小于30mm。

(5) 基于轴压试验结果,结合氯盐侵蚀过程,提出了玄武岩纤维混凝土强度退化模型,与试验结果吻合程度较好。

参考文献:

- [1] 霍文静,张佐光,王明超,等. 复合材料用玄武岩纤维耐酸碱性实验研究[J]. 复合材料学报, 2007, 24(6):77-82 (HUO Wenjing, ZHANG Zuoguang, WANG Mingchao, et al. Experiment study on acid and alkali resistance of basalt fiber for composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(6):77-82 (in Chinese))
- [2] 杨勇新,陈伟,马明山. 海水干湿交替环境下玄武岩纤维布耐久性能[J]. 工业建筑, 2010, 40(4):5-8, 26 (YANG Yongxin, CHEN Wei, MA Mingshan. Durability of basalt fiber sheets under wet-dry cycling in seawater [J]. Industrial Construction, 2010, 40(4):5-8, 26 (in Chinese))
- [3] 李为民,许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4):476-481, 486 (LI Weimin, XU Jinyu. Strengthening and toughening in basalt fiber-reinforced concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(4):476-481, 486 (in Chinese))
- [4] 王钧,马跃,张野,等. 短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验与分析[J]. 工程力学, 2014, 31(S1):99-102, 114 (WANG Jun, MA Yue, ZHANG Ye, et al. Experimental research and analysis on mechanical properties of chopped basalt fiber reinforced concrete[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(S1):99-102, 114 (in Chinese))

- [5] 陈峰, 陈欣. 玄武岩纤维混凝土的正交试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2014, 42(1):133-137 (CHEN Feng, CHEN Xin. Orthogonal experimental research on strength of concrete reinforced by basalt fiber [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2014, 42(1):133-137 (in Chinese))
- [6] 张兰芳, 王道峰. 玄武岩纤维掺量对混凝土耐硫酸盐腐蚀性和抗渗性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6):1946-1950 (ZHANG Lanfang, WANG Daofeng. Effect of basalt fiber content on sulfate resistance and impermeability of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(6):1946-1950 (in Chinese))
- [7] Ramakrishnan V, Tolmare S N, Brik V B. Performance evaluation of 3D basalt fiber reinforced concrete and basalt rod reinforced concrete [R]. Nchrpidea Program Project Final Report, Transportation Research Board, Washington, DC, 1998.
- [8] 李建. 短切玄武岩纤维对矿渣粉煤灰混凝土力学性能和微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2):727-732, 737 (LI Jian. Effects of chopped basalt fiber on mechanical properties and microstructure of slag fly ash concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2):727-732, 737 (in Chinese))
- [9] Jung J L, Jiyeon S, Hodong K. Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution[J]. Fibers and Polymers, 2014, 15:2329-2334.
- [10] Jalasutram S, Sahoo D R, Matsagar V. Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete[J]. Structural Concrete, 2017, 18(2):292-302.
- [11] 叶邦士, 孙伟, 蒋金洋, 等. 玄武岩纤维增强粉煤灰水泥浆体的耐久性及其缺陷分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8):1127-1132 (YE Bangshi, SUN Wei, JIANG Jinyang, et al. Long-term performances and defects of basalt fiber reinforced cement with fly-ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8):1127-1132 (in Chinese))
- [12] 郭范波, 徐岳, 金辉, 等. 海洋环境下玄武岩纤维布增强混凝土桥墩的耐久性试验研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1):75-80 (GUO Fanbo, XU Yue, JIN Hui, et al. Test study of durability of concrete pier strengthened with BFRP sheets in marine environment[J]. Bridge Construction, 2014, 44(1):75-80 (in Chinese))
- [13] 王海良, 王博, 杨新磊, 等. 酸、碱、氯盐对玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能的影响[J]. 建筑结构, 2015, 45(9):81-85, 55 (WANG Hailiang, WANG Bo, YANG Xinlei, et al. Effects of acid, alkaline and chlorine salt on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by basalt fiber cloth[J]. Building Structure, 2015, 45(9):81-85, 55 (in Chinese))
- [14] 金生吉, 李忠良, 张健, 等. 玄武岩纤维混凝土腐蚀条件下抗冻融性能试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(5):178-183 (JIN Shengji, LI Zhongliang, ZHANG Jian, et al. Experimental study on anti-freezing and thawing performance of reinforced concrete of basalt fiber under corrosion condition[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(5):178-183 (in Chinese))
- [15] 王明超, 张佐光, 孙志杰, 等. 连续玄武岩纤维及其复合材料耐腐蚀特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10):1255-1258 (WANG Mingchao, ZHANG Zuoguang, SUN Zhijie, et al. Corrosion resistance characteristic of continuous basalt fiber and its reinforcing composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10):1255-1258 (in Chinese))
- [16] 韩铁林, 陈蕴生, 师俊平, 等. 化学腐蚀对混凝土材料力学特性影响的试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(6):785-793 (HAN Tielin, CHEN Yunsheng, SHI Junping, et al. Experimental study on the influence of chemical corrosion on the mechanical properties of concrete materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(6):785-793 (in Chinese))
- [17] GB/T 50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003 (GB/T 50081-2002, Standard for test methods of mechanical properties on ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese))
- [18] CECS 13:2009, 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 2010 (CECS 13:2009, Standard test methods for fiber reinforced concrete[S]. Beijing: China Planning Press, 2010 (in Chinese))

Experimental study on corrosion behavior and mechanical properties of basalt fiber concrete by chlorine attack

WANG Zhenshan¹, LI Yakun¹, WEI Jun², LU Junlong¹, GUO Hongchao¹, TIAN Jianbo¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. School of civil engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

Abstract: Basalt fiber concrete has been widely used in the engineering field in our country. In order to study its corrosion resistance and mechanical property degradation in chloride environment, 10 kinds of mix proportion are designed and tested in 5% NaCl solution. The size of the test block is 100mm×100mm×100mm. The apparent cracks, effective porosity, water absorption and mass of the block are measured every 30 days; the axial compressive strength test is conducted every 90 days to determine the change of mechanical properties. It is found that the addition of basalt fiber can effectively inhibit the generation and development of concrete cracks and reduce the migration rate of chloride ions. Compared with the ordinary concrete, adding proper amount of basalt fiber can better improve the compressive strength and deformation ability of concrete. When the volume fraction of fiber is 0.1%, it is the most favorable, while when the parameter is more than 0.2%, the performance is reduced. In addition, it is found that the addition of fly ash is not ideal to reduce the effective porosity of basalt fiber concrete and slow down the migration of chloride ions. It is suggested that the thickness of basalt concrete protective layer should not be less than 30mm in chloride corrosion environment. Finally, on the basis of experiments, the strength degradation model of basalt fiber concrete under chloride erosion is proposed. This study will provide some technical support for the application of basalt fiber concrete in chloride environment.

Keywords: basalt fiber concrete; chloride erosion; durability; mechanical properties