

doi:10.3969/j.issn.1005-3026.2016.06.028

干湿循环作用下混杂纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能

李 艺, 张 爽

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用干湿循环法,研究了普通混凝土和混杂纤维混凝土标准立方体试块(150 mm × 150 mm × 150 mm)对面侵蚀,在800和6 000 mg/L两种硫酸钠侵蚀溶液质量浓度下,分别在侵蚀龄期为0,30,60,90,180,210 d的抗硫酸盐侵蚀性能。结果表明:当侵蚀龄期达210 d,侵蚀溶液质量浓度为800和6 000 mg/L时,普通混凝土抗压强度分别劣化了5.6%和10.0%,劈裂抗拉强度分别劣化了3.0%和5.1%;混杂纤维混凝土抗压强度分别劣化了4.0%和6.3%,劈裂抗拉强度分别劣化了0.51%和3.8%。侵蚀深度为1.5 mm时,普通混凝土的 SO_4^{2-} 质量分数分别为0.83%和1.03%,混杂纤维混凝土 SO_4^{2-} 质量分数分别为0.79%和1.00%。

关键词: 混杂纤维混凝土;干湿循环;硫酸盐;抗压强度;劈裂抗拉强度; SO_4^{2-} 质量分数

中图分类号: TU 528.572

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)06-0895-05

Resistance to Sulfate Attack of Hybrid Fiber Concrete Under Dry-Wet Cycles

LI Yi, ZHANG Shuang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Yi, professor, E-mail: liyi@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The dry-wet cycle method is adopted to study sulfate resistance of standard cubic plain concrete and hybrid fiber concrete specimens (150 mm × 150 mm × 150 mm). The anti-sulfate corrosion performance is tested at the erosion age of 0, 30, 60, 90, 180, 210 days with sodium sulfate erosion solution concentrations of 800 and 6 000 mg/L. The results show that when the erosion age is 210 days, corresponding to concentrations of 800 and 6 000 mg/L, compressive strength of plain concrete decreases by 5.6% and 10.0% and splitting tensile strength decreases by 3.0% and 5.1% respectively. Compressive strength of hybrid fiber concrete decreases by 4.0% and 6.3% and splitting tensile strength decreases by 0.51% and 3.8% respectively. When erosion depth comes to 1.5 mm, SO_4^{2-} concentrations of plain concrete are 0.83% and 1.03%, while hybrid fiber concrete are 0.79% and 1.0% respectively.

Key words: hybrid fiber concrete; dry-wet cycle; sulfate; compressive strength; splitting tensile strength; SO_4^{2-} concentration

硫酸盐侵蚀是最复杂、危害性最大的一种环境侵蚀作用,这是因为硫酸盐侵蚀环境普遍存在。目前该领域研究大都集中于普通混凝土和单掺混凝土^[1-4]及其试验方法和评价标准等^[5-9],而针对混杂纤维混凝土的研究相对匮乏。在混凝土基材中掺入不同品质、不同几何形态的纤维,制成混杂纤维混凝土,从不同层次上改善纤维三维分布以及集料与纤维的均衡性,与单掺纤维混凝土相

比,可显著改善混凝土材料的阻裂增韧效能,进而提高抗侵蚀能力。掺入了钢纤维的离心成型混凝土构件的抗硫酸盐侵蚀能力得到显著提高,但掺入较高体积率的钢纤维会影响混凝土的和易性^[4];单掺聚丙烯细纤维的混凝土质量损失最少,混掺聚丙烯网状纤维和钢纤维的混凝土抗压强度损失最少,混掺聚丙烯粗纤维和钢纤维的混凝土抗拉强度损失最少,聚丙烯纤维和钢纤维的

收稿日期: 2015-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078065);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0107);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130401009);辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2015024)。

作者简介: 李 艺(1972-)女,辽宁沈阳人,东北大学教授。

混杂效应有效改善了混凝土腐蚀后的质量损失和强度损失^[5]。

另外,野外实际观测表明,混凝土受硫酸盐侵蚀在干湿循环作用下远比连续浸泡下更为剧烈,但如果模拟干状态采用升温加速干燥,不仅升温可能改变硫酸盐侵蚀产物及机理,而且升温机制与实际环境相符亦难于控制^[10]。

本文根据课题组前期研究成果^[11],选取阻裂和抗渗性能最优(可有效阻止硫酸根离子渗入和扩散)的混杂纤维混凝土配比,通过研究其在干湿循环作用(干状态选择空气中自然干燥、充分结晶)、对面侵蚀下,当侵蚀龄期为 0、30、60、90、180、210 d 时抵抗两种硫酸钠溶液(800、6 000 mg/L)的侵蚀性能,同时分别测定了试件的抗压强度、劈裂抗拉强度、相对动弹性模量、侵蚀后质量变化以及试件内部不同侵蚀深度所对应的硫酸根离子浓度,并与普通混凝土作对比。

1 原材料和试验方法

杜拉纤维(聚丙烯纤维):由香港恒律格雷斯(GRACE)公司提供,长度 19 mm,熔点 330 ℃,拉伸极限 15%,燃点 1 100 ℃;玄武岩纤维:由四川航天拓鑫玄武岩实业有限公司提供,长度为 30 mm;细骨料:优质河砂,细度模数为 2.5 的中砂;粗骨料:碎石,粒径 15~25 mm;水泥:大连小野田公司生产的华日牌 52.5# 普通硅酸盐水泥,密度为 3 000 kg/m³;减水剂:花王萘系减水剂,最大减水率为 30%。本试验采用 0.6% 的掺用量,即每立方米减水剂用量为 3.18 kg;玄武岩纤维掺量为 2.5 kg/m³,杜拉纤维掺量为 0.9 kg/m³。

本试验采用对面侵蚀,其余 4 个面均用石蜡密封,然后将试件首先放入硫酸钠侵蚀溶液(硫酸根离子质量浓度分别为 800、6 000 mg/L)中浸泡 15 d(湿状态),再取出在空气中自然干燥 15 d(干状态),以此作为一个干湿循环。侵蚀龄期分别为 0、30、60、90、180、210 d,分别测定混凝土试块的抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量、侵蚀后质量以及试块中不同侵蚀深度所对应的硫酸根离子浓度。试件数量:每种侵蚀溶液下,每一龄期混杂纤维混凝土抗压试验试件数为 3 块,劈裂抗拉强度试验试件数为 3 块,计 72 块;同样,对照组普通混凝土普通混凝土计 72 块,试件总计 144 块。配比见表 1,混杂纤维混凝土在相同配比情况下,掺入聚丙烯和玄武岩纤维。

水	水泥	砂子	碎石	减水剂/%
159	530	616	1 095	0.6

本试验混凝土试件尺寸均采用 150 mm × 150 mm × 150 mm,按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)和《碳纤维混凝土试验方法》(CECS13 89),采用强制式混凝土搅拌机搅拌,搅拌均匀后装入试模中,置于振动台振动密实成型,试件成型后自然养护 24 h,水中养护至试验龄期(28 d),取出进行试验。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

硫酸钠侵蚀后普通混凝土和纤维混凝土抗压强度见图 1。由图 1 可知,当硫酸钠溶液质量浓度为 800 mg/L 时,普通混凝土和纤维混凝土抗压强度随侵蚀龄期的变化趋势大体相同,且均存在一个强度增长期。普通混凝土和纤维混凝土抗压强度最大值分别为 47.42 和 57.28 MPa,主要有两个原因:一是由于试件在侵蚀溶液中混凝土还会继续水化;二是侵蚀生成物逐渐填充混凝土内部孔隙。在侵蚀前期,生成的钙矾石首先充填混凝土内部的孔隙,使得混凝土变得更加密实,抗压强度有所增加。随侵蚀龄期的增加,混凝土内部孔隙逐渐被填满,侵蚀生成物则对混凝土起膨胀作用,产生微裂缝,引起抗压强度下降。由于纤维的掺入使得混杂纤维混凝土内部更加密实,减缓了侵蚀离子对混凝土基体造成的损害,由图 1 可以看出,纤维混凝土在经过不同的侵蚀龄期后其抗压强度均明显高于普通混凝土,且抗压强度随侵蚀龄期变化曲线较普通混凝土要平稳一些。

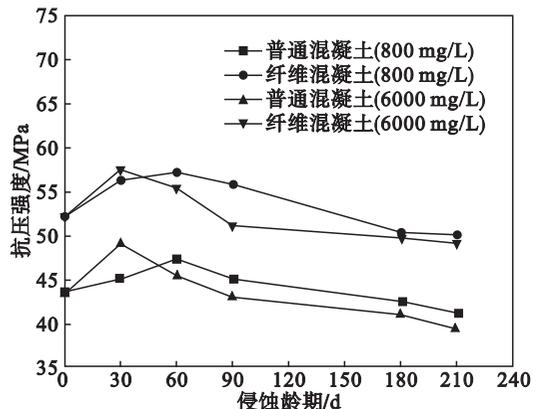


图 1 硫酸钠侵蚀后混凝土抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of concrete after sulfate erosion

当硫酸钠溶液质量浓度为 6 000 mg/L 时,与 800 mg/L 时的抗压强度变化规律类似,但因为 SO_4^{2-} 浓度较大,侵蚀前期硫酸钠侵蚀占主导,强度增长期缩短,且抗压强度劣化程度明显增大,侵蚀龄期为 30 d 时,普通混凝土和纤维混凝土的强度达最大值,分别为 48.93 和 57.48 MPa;侵蚀龄期达 210 d 时,分别下降为 39.42 和 48.96 MPa。此外,干湿循环的加速作用也是其抗压强度劣化的重要影响因素。总体来看,纤维的掺入使得混凝土受硫酸盐侵蚀后的抗压强度明显提高,且随龄期衰减变缓,即纤维的掺入改善了混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。

2.2 劈裂抗拉强度

硫酸钠侵蚀后普通混凝土和纤维混凝土劈裂抗拉强度见图 2。当侵蚀溶液质量浓度为 800 mg/L 时,由图 2 可知,在侵蚀龄期到达 90 d 前,普通混凝土和纤维混凝土的劈裂抗拉强度均呈上升趋势;龄期为 90 d 时达最大值,分别为 4.17 和 4.40 MPa。随侵蚀龄期增加,由于混凝土内部生成的侵蚀产物逐渐增多,对混凝土内部孔隙壁的膨胀应力逐渐增大,导致其内部逐渐遭到破坏,致使混凝土的劈裂抗拉强度逐渐降低。同抗压强度劣化规律类似,由于混凝土在侵蚀溶液中继续水化和侵蚀产物填充密实,使得普通混凝土和纤维混凝土均存在一个强度增长期。

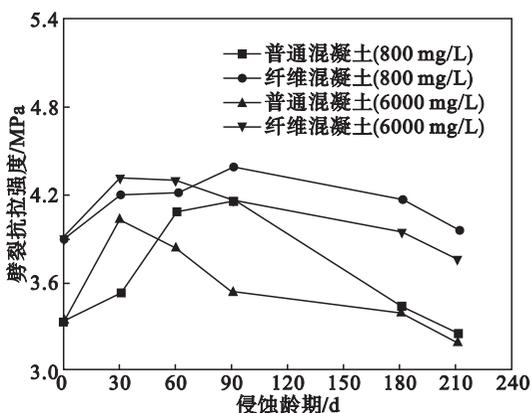


图 2 硫酸盐侵蚀后混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 2 Cleavage strength of concrete after sulfate erosion

当侵蚀溶液质量浓度为 6 000 mg/L 时,与侵蚀溶液质量浓度为 800 mg/L 相比,因 SO_4^{2-} 浓度较大,侵蚀前期硫酸钠侵蚀占主导,强度增长期缩短,在侵蚀龄期为 30 d 时达最大值,普通混凝土和纤维混凝土的值分别为 4.03 和 4.33 MPa,且劈裂抗拉强度劣化程度明显增大。由图 2 也可以看出,当侵蚀溶液质量浓度为 6 000 mg/L 时,纤

维混凝土劈裂抗拉强度随时间变化的曲线与普通混凝土相比要相对平缓一些,说明纤维混凝土的劣化程度比普通混凝土要小。

与普通混凝土相比,由于混掺聚丙烯纤维和玄武岩纤维,从不同层次上改善纤维三维分布以及集料与纤维的均衡性,相互取长补短,产生复合效应,从而使混凝土内部更为均匀、致密,可较好地改善混凝土的阻裂增韧效果。因此,混杂纤维混凝土初始劈裂抗拉强度普遍高于普通混凝土,在受硫酸盐侵蚀后,其劣化程度较普通混凝土低,劈裂抗拉强度下降的趋势较普通混凝土平缓。

2.3 相对动弹性模量

混凝土相对动弹性模量与混凝土内部裂缝、孔隙分布等有关,混凝土相对动弹性模量值越大说明其内部结构越致密,抗侵蚀能力越强。硫酸钠侵蚀后普通混凝土和纤维混凝土相对动弹性模量见图 3 和图 4。由图 3 和图 4 可知,混杂纤维混凝土相比普通混凝土其相对动弹性模量在侵蚀初期略有增加,之后呈下降趋势。

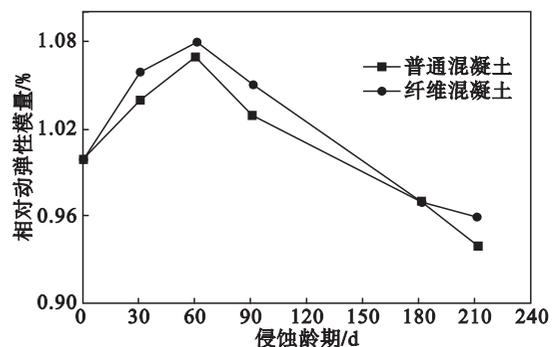


图 3 硫酸钠溶液质量浓度为 800 mg/L 时混凝土相对动弹性模量的变化

Fig. 3 Changes of the relative dynamic elastic modulus of concrete when sulfate solution concentration is 800 mg/L

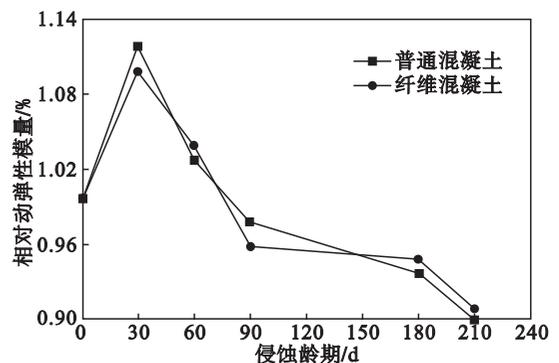


图 4 硫酸钠溶液质量浓度为 6 000 mg/L 时混凝土相对动弹性模量的变化

Fig. 4 Changes of the relative dynamic elastic modulus of concrete when sulfate solution concentration is 6 000 mg/L

硫酸钠侵蚀初期,因为水泥水化仍占主导,混凝土内部孔隙被侵蚀产物石膏、钙矾石充填,且此时膨胀应力尚未出现,使其内部更为致密,因此相对动弹性模量略增加.普通混凝土较纤维混凝土的孔隙率大,致密程度不如纤维混凝土,在侵蚀过程中,没有纤维的锚固作用,随着大裂缝的生成,相对动弹性模量降低较快.

2.4 硫酸根离子质量分数

为研究混凝土受硫酸盐侵蚀后内部损伤及硫酸根离子的扩散规律,对不同侵蚀深度下普通混凝土和纤维混凝土的 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 进行了测定,试验结果见图 5 和图 6.

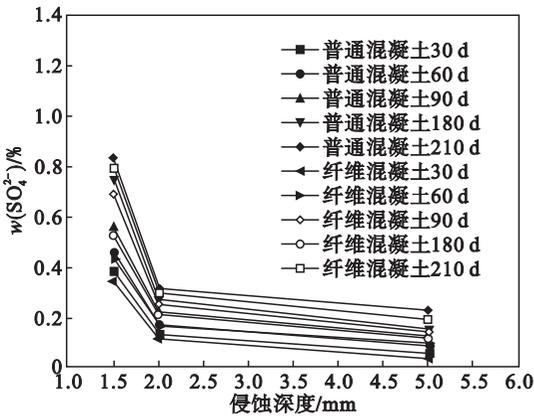


图 5 不同侵蚀龄期下硫酸根离子质量分数随侵蚀深度的变化(800 mg/L)
Fig. 5 Sulfuric acid root ion concentration changes with the depth of erosion under different erosion (800 mg/L)

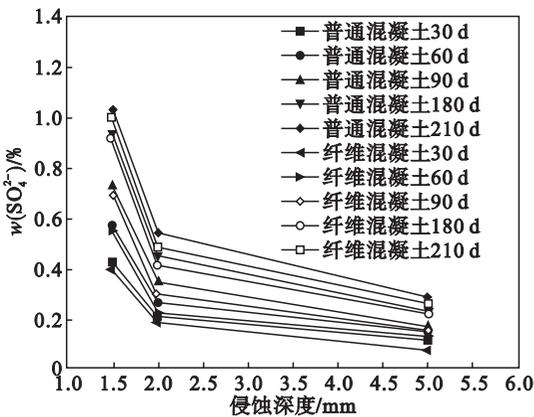


图 6 不同侵蚀龄期下硫酸根离子质量分数随侵蚀深度的变化(6000 mg/L)
Fig. 6 Sulfuric acid root ion concentration changes with the depth of erosion under different erosion (6000 mg/L)

由图 5 和图 6 可知,对于侵蚀溶液质量浓度为 800 和 6000 mg/L,不同侵蚀龄期下 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 随侵蚀深度的变化规律相似.对某一侵蚀龄期,随

侵蚀深度增大, $w(\text{SO}_4^{2-})$ 显著降低;由图 6 可知,对应于同一侵蚀深度,尤其是在距表层 1.5 mm 受侵蚀范围内,随侵蚀龄期增长,混凝土内部 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 增加;在侵蚀前期,由于侵蚀生成物的填充密实作用,表层 SO_4^{2-} 分布存在集中现象,这一现象在侵蚀溶液质量浓度为 6000 mg/L 时尤为明显,侵蚀龄期为 210 d 侵蚀深度为 1.5 mm 时,普通混凝土和纤维混凝土 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 分别为 1.03% 和 1.00%. 本试验在整个侵蚀过程中没有出现 SO_4^{2-} 分布异常现象,且各层 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 均随侵蚀龄期增长而增加,各侵蚀龄期下 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 均随侵蚀深度增大而减小.由于混掺了纤维,其内部较普通混凝土致密,初始孔隙率较小,在侵蚀过程中基体内的孔隙更易被钙矾石等膨胀性侵蚀产物填充,阻碍侵蚀离子的传输,所以相同龄期同一侵蚀深度的 SO_4^{2-} 质量分数比普通混凝土低,即纤维的掺入延缓了硫酸盐侵蚀反应的进行.

将质量浓度为 800 与 6000 mg/L 的数据整合至一起,得到相同侵蚀深度下硫酸根离子质量分数随侵蚀龄期的变化,见图 7. 干湿循环作用下,随侵蚀龄期增加,混凝土受硫酸盐侵蚀劣化程度加速,对于侵蚀溶液浓度比较大的情况,当湿状态开始时,由于混凝土基体内外 SO_4^{2-} 浓度差导致的浓度梯度很大, SO_4^{2-} 更容易进入混凝土内部;干状态下,由于混凝土孔隙中溶液的 SO_4^{2-} 浓度比较大,随着水分蒸发,孔隙内部溶液逐渐达到饱和状态,侵蚀所生成的硫酸钠晶体数量越来越多,致使混凝土更易遭到破坏,形成微小裂缝,而在混凝土中混掺纤维就可在多层次上起到锚固微小裂缝的作用,延缓了侵蚀破坏.

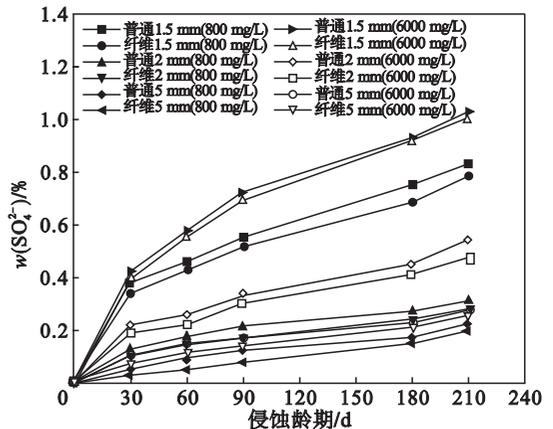


图 7 混凝土中硫酸根离子质量分数随侵蚀龄期的变化
Fig. 7 Changes of the concentration of sulfuric acid root ion in concrete along with ages of erosion