

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.188

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



毛细作用下硫酸钠半浸泡水泥基材料 抗氯离子渗透性研究

杨淑娟¹, 杨淑雁¹, 车佳玲¹, 刘西拉²

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘要:硫酸盐和氯盐复杂盐蚀环境中的服役结构会受到两者产生的耦合作用。研究毛细作用下硫酸钠半浸泡混凝土试样的抗氯离子渗透性能,设计不同水灰比、不同硫酸钠溶液浓度的砂浆毛细上升试验,测试硫酸钠半浸泡混凝土试样的扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)和氯离子电通量。结果表明:硫酸钠半浸泡混凝土抗氯离子渗透性能劣化,前期劣化严重,随着半浸泡时间的延长,抗氯离子渗透性能有所回升,但依然比未浸泡试样的差。结合微观测试结果可知,混凝土抗氯离子渗透性能劣化的主要原因是:前期,在毛细作用下硫酸钠溶液填充了混凝土孔隙,减弱了固化氯离子的结合能力,释放了较多自由氯离子,从而增大了氯离子的扩散量;后期,随着浸泡时间的延长和环境湿度的变化,孔隙中的硫酸钠溶液过饱和后,形成无水 Na_2SO_4 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 结晶体的混合物,结晶混合物沉淀于孔壁,部分阻碍了氯离子的扩散,从而减缓了抗氯离子渗透性能的劣化。硫酸钠溶液浓度超过 5% 以后,随着硫酸钠溶液浓度的升高,毛细上升速度减缓,混凝土抗氯离子渗透性能相应提高。硫酸钠溶液半浸泡下,水泥基材料毛细上升快慢可作为衡量混凝土抗氯离子渗透性能好坏的指标。硫酸钠和氯化钠的复合溶液对硫酸钠毛细上升有延缓作用,会改善混凝土的抗氯离子渗透性能。

关键词:水泥基材料;毛细作用;硫酸钠溶液;半浸泡;抗氯离子渗透性

中图分类号:TU502;TU528.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)03-0133-08

Chloride penetration resistance of cementitious materials half-submerged in sodium sulfate solution under capillary suction

Yang Shujuan¹, Yang Shuyan¹, Che Jialing¹, Liu Xila²

(1. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P. R. China)

Abstract: The service structure in the complex salt etch environment of sulfate and chloride may be affected by the coupling effect of them. In this paper, the chloride penetration resistance (CPR) of the concrete half

收稿日期:2019-02-21

基金项目:国家自然科学基金(51868065);宁夏自然科学基金(N217028)

作者简介:杨淑娟(1994-),女,主要从事新型建筑结构体系研究,E-mail: cowindyfly@163.com。

杨淑雁(通信作者),女,博士,E-mail: yangshuyan@nxu.edu.cn。

Received: 2019-02-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51868065); Natural Science Foundation of Ningxia (No. N217028)

Author brief: Yang Shujuan (1994-), main research interest: new building structure system, E-mail: cowindyfly@163.com.

Yang Shuyan (corresponding author), PhD, E-mail: yangshuyan@nxu.edu.cn.

immersion in sodium sulfate solution (SSS) under capillary action is studied. The capillary rising test of mortar with different water-cement ratio and different concentration of SSS was designed. Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and electric flux of chloride ion are applied to the concrete half immersion in SSS. The results show that the CPRs of concrete samples half immersion in SSS deteriorates, and have obvious degradations at early stage, but recover a bit at later stage. Combined with the results from microscopic tests, the degradations are attributed to the SSSs filled in the pores of concrete samples. The SSS impairs the ability of bound chloride ion and releases more free chloride ions, which increases the electric flux of chloride ion. With the extension of soaking time and the change of the relative humidity of environment, supersaturate SSS comes into being Na_2SO_4 and $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ crystals. The admixtures of crystals deposit on the walls of pores, and partially hinder the diffusions of chloride ions, hence increase the CPRs. When the concentration of SSS is higher than 5 percent, the velocity of capillary suction (VCS) slows down and the CPR of concrete is accordingly enhanced with the increase of the concentration of SSS. The VCS can be used to predict the CPR of concrete. The mixed solutions with sodium sulfate and sodium chloride can retard the VCS and then improve the CPR for concrete.

Keywords: cement based materials; capillary action; sodium sulfate solution (SSS); half immersion; chloride penetration resistance (CPR)

中国西部地区昼夜温差大、盐碱化面积大,土壤和水中含有较丰富的硫酸盐和氯盐,该地区的混凝土结构服役环境复杂,处于土-气交接处的混凝土结构性能劣化问题尤为突出。西部地区大的温、湿度差较大程度加速了有害盐类通过毛细作用上升至钢筋混凝土结构的地表部位,使结构面临着毛细作用下硫酸盐对混凝土的侵蚀和氯离子对钢筋的侵蚀双重作用。氯离子在硫酸盐腐蚀后的混凝土中扩散速度的快慢,对其抵达钢筋表面并最终导致钢筋锈蚀非常关键,因此,研究毛细作用下硫酸钠和氯盐的耦合作用意义重大。

一些学者^[1-5]对干湿循环制度下非饱和混凝土氯离子扩散进行了研究,结果表明,非饱和混凝土在干湿循环制度下的氯离子扩散速度远远大于全浸泡条件。另有学者研究了硫酸盐腐蚀后混凝土的氯离子扩散。王本臻等^[6]的盐溶液毛细吸附试验结果表明,硫酸盐的存在加速了氯盐的毛细吸附,从而加速了毛细吸附作用下氯离子侵入混凝土的速度。杨建森等^[7]研究了硫酸根和氯离子混合溶液作用下混凝土的抗氯离子渗透性能,发现硫酸根离子对氯离子渗透有抑制作用。杨志刚等^[8]对地下盐类环境下水泥砂浆耐腐蚀性能的研究结果表明,硫酸根的存在降低了氯离子的扩散能力。金祖权等^[9]研究了在全浸泡和干湿交替下硫酸盐对混凝土氯离子扩散的影响,结果表明,全浸泡时硫酸盐的腐蚀提高了混凝土

抗氯离子渗透性能,而干湿交替时则在腐蚀初期有增强作用,腐蚀后期劣化。还有学者^[10-11]从微观角度对硫酸钠溶液浸泡后水泥净浆的性能进行了研究,结果表明,固化态氯离子在硫酸钠腐蚀环境下容易失去稳定性,并重新转化为游离态,从而减弱混凝土的抗氯离子渗透性能。现有研究表明,随着硫酸盐腐蚀环境的不同,其对氯离子扩散的耦合作用也显示出不同结果。但是,目前针对大湿度差和毛细现象共同作用下硫酸盐侵蚀后混凝土氯离子扩散性的研究还不多见。

笔者针对硫酸钠毛细吸附作用设计了两个试验,为了减少粗骨料对毛细上升作用的影响,利用砂浆试样研究了硫酸钠溶液的毛细上升速度,采用不同水灰比混凝土试样在变化的相对湿度范围内研究了混凝土的抗氯离子渗透性能,研究的主要参数是水灰比和硫酸钠溶液浓度,根据测试结果对毛细上升速度与抗氯离子渗透性能之间的关系进行了分析和讨论。

1 试验原材料和设计参数

水泥:宁夏建材集团生产的赛马牌 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;中砂偏粗,细度模数 2.9;水:采用洁净自来水;硫酸钠分析纯,纯度 99.9%,配置硫酸钠溶液用水为蒸馏水。

试样设计参数见表 1,砂浆试样设计了 0.57 和 0.44 两种水灰比,1%、5%、10% 3 种硫酸钠溶液浓

度,所有同种水灰比的砂浆试样同一批浇筑完成,按 40 mm×40 mm×160 mm 成型并标准养护至 28 d 龄期后进行测试。混凝土试样设计了 C30 和 C40 两种强度标号,0.57 和 0.44 两种水灰比,5% 和 10% 两种硫酸钠溶液浓度,同时对水灰比为 0.44 的

试样设计了 5% 硫酸钠和 3% 氯化钠的混合溶液,以及闽海湖水的两组复合溶液,每组试件 3 个。C30 和 C40 混凝土实测标准立方体 28 d 抗压强度分别为 32.2、40.6 MPa。

表 1 水泥基材料设计参数

Table 1 Design parameters for cementitious materials

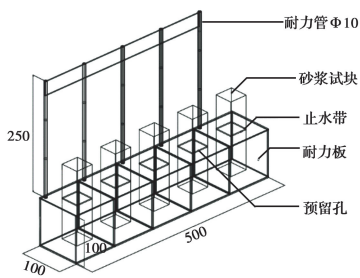
序号	编号	Na ₂ SO ₄ 溶液 浓度/%	NaCl 溶液 浓度/%	混凝土 28 d 抗压 强度 f_{cu} /MPa	水灰比	材料用量/(kg·m ⁻³)			
						水泥	水	砂	石子
1	D _{3-k}	1,5,10			0.57	420	239	572	0
2	D _{4-k}	1,5,10			0.44	420	185	572	0
3	C _{30-k}	5,10		32.2	0.57	325	185	662	1 228
4	C _{40-k}	5,10		40.6	0.44	420	185	572	1 273
5	SL	5	3	40.6	0.44	420	185	572	1 273
6	Z	闽海湖水	闽海湖水	40.6	0.44	420	185	572	1 273

注:编号 D_{3-k}、D_{4-k} 中下标 3 和 4 表示砂浆试样水灰比分别为 0.57 和 0.44;C_{30-k}、C_{40-k} 中下标 30 和 40 表示混凝土试样的强度标号分别为 C30 和 C40。 k 表示试样所处的硫酸钠溶液浓度。

2 测试方法

2.1 毛细上升测试

砂浆试样用来观察和测试硫酸钠的毛细上升现象。该试验采用自制的毛细上升测试装置,如图 1 所示。



(a) 装置示意图



(b) 装置照片

图 1 砂浆试样毛细上升测试装置示意图

Fig. 1 Testing devises of capillary suction for mortar samples

装置由透明耐力板和内径 10 mm 的耐力管粘接组合而成,板顶部设有预留孔,将砂浆试样放入预留孔中进行密封,通过耐力管注入硫酸钠溶液完成毛细上升测试。测试时试样先充分饱水,然后放入温度为 105 °C 的电热恒温鼓风干燥箱中干燥,根据干燥时长控制试样相对含水量(相对含水量是指试样某时刻含水量与真空饱水后含水量的比值),试验中试样采用 10% 的相对含水量。试样取出后冷却,然后在四壁涂刷环氧树脂密封,保证硫酸钠溶液沿一维方向浸入。将试样中部缠绕止水带,放入图 1 所示测试装置的预留孔中,用热熔胶进行固定密封,待热熔胶完全固化后,将安装有试样的图 1 装置整体放入水中,对试管口充气,检查装置的气密性。将不同浓度的硫酸钠溶液注入耐力管,读取管内溶液高度变化。

2.2 氯离子渗透测试

氯离子渗透测试采用标准的 ASTM C1202 测试方法。试样制作成 $\phi 100$ mm×50 mm 的圆柱体,浇筑完成后在养护室标准条件下水养至 45 d,然后在侧面涂刷环氧树脂密封(试样相对含水量 40% 左右),置于室温 20±2 °C、空气相对湿度 40%~60% 的养护室,放入浸泡箱中进行硫酸钠半浸泡试验。

试样底部用木板支垫,每隔一个月更换一次硫酸钠溶液,半浸泡现场图和典型的测试试样如图2所示。



(a) 半浸泡现场图



(b) 典型的测试试样

图2 混凝土试样硫酸钠半浸泡示意图

Fig. 2 Diagrams for concrete samples half-submerged in sodium sulfate solution

2.3 扫描电镜(SEM)测试

敲取混凝土试样中部含水泥石和完好界面过渡区的部分,直径小于5 mm,用无水乙醇浸泡终止水化后做SEM测试。

2.4 X射线衍射(XRD)测试

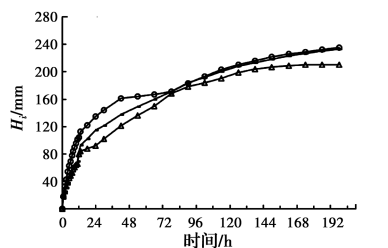
薄薄刮取混凝土试样表面泛出的白色晶体,碾磨成细粉末做XRD测试。

3 结果及分析

3.1 毛细上升

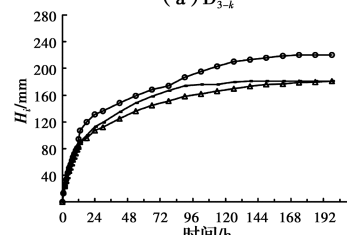
水泥砂浆试样设计的相对含水量为10%,测试时室内环境相对湿度约25.5%。图3是不同水灰比、不同硫酸钠溶液浓度下砂浆的管中溶液下降量(H_t)与时间的关系曲线图。从图3(a)中初始斜率可以看到,随着硫酸钠溶液浓度的增大,溶液下降量有一个先增大后减小的过程,5%硫酸钠溶液下降量最多。图3(b)也显示出同样的趋势。随着时间的延长,硫酸钠溶液的下降量缓慢上升,所有曲线均在168 h左右趋于平缓稳定。对比不同水灰比时5%硫酸钠半浸泡砂浆试样168 h的最终下降量,水灰比为0.57的D3-10-5试样为229 mm,水灰比为0.44的D4-10-5试样为220 mm,表明水灰比越大,

其毛细上升速度也越快。不同水灰比、不同硫酸钠溶液浓度砂浆毛细上升的试验结果表明,并不是盐溶液的浓度越大,其毛细上升的速度就越快。



注: \blacktriangle D3-10-1 \bullet D3-10-5 \blacktriangledown D3-10-10

(a) D_{3-k}



注: \blacktriangle D4-10-1 \bullet D4-10-5 \blacktriangledown D4-10-10

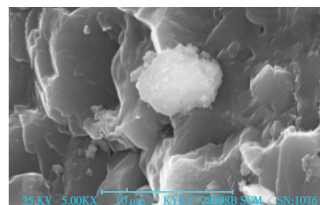
(b) D_{4-k}

图3 毛细上升测试结果

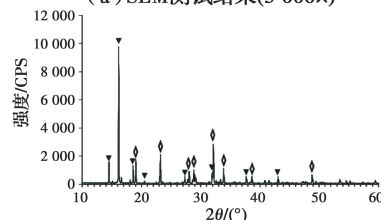
Fig. 3 Testing results for capillary suction

3.2 SEM和XRD

图4(a)是混凝土试样放大5 000倍的SEM图,从图4(a)可明显看出CSH凝胶处有白色晶体。图4(b)是刮取试样表面的白色粉末所做的XRD图,通过与无水 Na_2SO_4 晶体和 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体的 2θ 角进行对比发现,主要的峰值均很吻合。SEM和XRD测试结果表明,试样内部发生了无水 Na_2SO_4 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的物理结晶侵蚀。文献[12]的研究表明,根据环境相对湿度的不同,硫酸钠物理侵



(a) SEM测试结果(5 000 \times)



注: \diamond Na_2SO_4 \blacktriangledown $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

(b) XRD测试结果

图4 SEM和XRD测试结果

Fig. 4 Testing results for SEM and XRD

蚀在无水 Na_2SO_4 晶体和 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体之间相互转换。试验进行时试样所在的室内养护条件温度为 20 ± 2 °C,空气相对湿度为 40%~60%,由于环境相对湿度的变化,毛细孔溶液中生成了不同的结晶体。

3.3 氯离子电通量

3.3.1 硫酸钠溶液单因素 按照 ASTM C1202 标准测试方法对硫酸钠半浸泡后的混凝土试样进行氯离子电通量测试,测试结果如图 5 所示。图 5(a)、(b)分别是 C30 和 C40 混凝土试样在一维方向受 5%、10%硫酸钠溶液半浸泡后,在 0、3、14、28、56 d 的氯离子电通量测试结果。从图 5(a)可以看出,C30 混凝土在 5%硫酸钠溶液半浸泡下的氯离子电通量是依次是 1 045、1 157、1 644、1 771、1 280 C,10%时依次是 1 045、1 117、1 452、1 532、1 228 C。此处电通量的单位是库伦,用 C 表示。从图 5(b)可以看出,C40 混凝土在 5%和 10%硫酸钠溶液半浸泡下的氯离子电通量分别是 931、1 057、1 598、1 370、1 260 C 和 931、1 037、1 469、1 315、1 042 C。不同标号、不同硫酸钠溶液浓度条件下均表现出电通量先增大后减小的趋势,C30 试样在 28 d 时达到氯离子电通量的峰值,C40 试样在 14 d 时达到氯离子电通量的峰值。图 5(a)、(b)均显示出 10%硫酸钠半浸泡试样的电通量低于 5%。

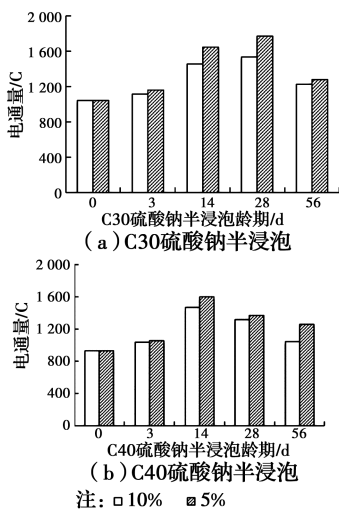


图 5 不同标号、不同硫酸钠溶液浓度半浸泡下混凝土氯离子电通量

Fig. 5 Electric flux of chloride ion of concrete with different grades half-submerged in different concentrations of SSS

图 6 是不同标号混凝土在 5%硫酸钠半浸泡下

不同龄期时的氯离子电通量曲线图。由图 6 可见,C30 和 C40 混凝土在 0、3、14、28、56 d 的电通量分别为 1 045 和 931 C、1 157 和 1 057 C、1 644 和 1 598 C、1 771 和 1 370 C、1 280 和 1 260 C,同龄期时 C40 的氯离子电通量均比 C30 的低。

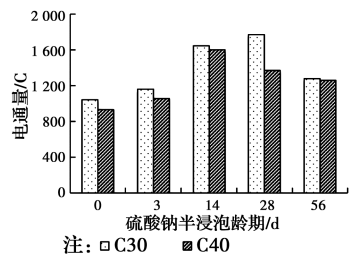


图 6 不同标号混凝土的氯离子电通量对比

Fig. 6 Comparisons of electric flux of chloride ion between concretes with different grades

将 C30 和 C40 两种标号混凝土氯离子电通量上升段进行拟合,如图 7 所示。图 7 表明,其线性关系拟合效果很好,相关性系数分别是 0.999 3 和 0.899 7。C40 拟合直线与 C30 相比,斜率略高,截距略低。

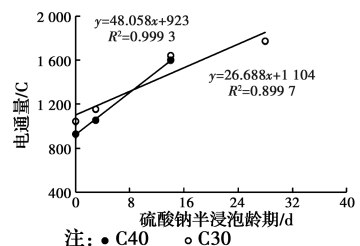


图 7 不同标号混凝土上升段电通量-龄期的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of electric fluxes of chloride ions and ages for concrete with different grades during rising stages

图 8 是 C40 混凝土在 5%硫酸钠溶液中半浸泡 0、3、14、28、56、84、112、140 d 的氯离子电通量测试结果,依次是 931、1 057、1 598、1 370、1 260、1 094、1 038、1 131 C。

由图 8 可见,在半浸泡的前 14 d 内,氯离子电通量逐渐增大,从 14 d 开始,随着半浸泡时间的延长,氯离子电通量逐渐降低,但依然比未浸泡时的氯离子电通量大,14 d 时的氯离子电通量扩大倍数是未浸泡的 1.71 倍。通过对上升段和下降段进行数据拟合发现,上升段与线性关系吻合很好,下降段与幂函数相关性很高。建立氯离子电通量(Y)与硫酸钠半浸泡天数(X)的关系,如式(1)所示。

$$\begin{cases} Y = aX + b(\text{上升段}) \\ Y = cX^d(\text{下降段}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 均为与混凝土强度、硫酸钠溶液浓度有关的常数。

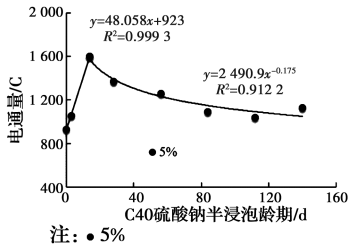


图8 C40混凝土在5%硫酸钠溶液半浸泡下氯离子电通量-龄期关系图

Fig. 8 Relationship between electric fluxes of chloride ions and ages for C40 concrete half-submerged in 5% SSS

3.3.2 复合溶液 图9是不同复合溶液半浸泡28d电通量的对比图,未浸泡、5%硫酸钠、5%硫酸钠+3%氯化钠、阅海湖水、10%硫酸钠溶液半浸泡后的氯离子电通量分别是931、1370、1226、1322、1315 C。由图9可见,所有硫酸钠溶液半浸泡后的氯离子电通量均比未浸泡的高,5%硫酸钠和3%氯化钠复合溶液有较低的氯离子电通量,阅海湖水和10%硫酸钠溶液氯离子电通量较接近,5%硫酸钠氯离子电通量最大。杨建森等^[7]对硫酸根和氯离子混合溶液的研究结果表明,硫酸根离子对氯离子渗透有抑制作用,从而可提高混凝土的抗氯离子渗透能力。氯离子电通量从小到大的顺序依次是未浸泡<5%硫酸钠+3%氯化钠<10%硫酸钠<阅海湖水<5%硫酸钠,扩大系数依次为1<1.31倍<1.41倍<1.42倍<1.47倍。

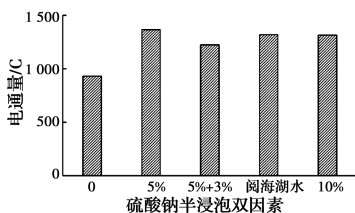


图9 不同复合溶液半浸泡28d混凝土的氯离子电通量

Fig. 9 Electric fluxes of chloride ions of 28 days for concretes half-submerged in different mixed solutions

3.4 单因素下硫酸钠半浸泡毛细上升和抗氯离子渗透性能关系

根据毛细上升测试结果,不同水灰比砂浆试样在5%硫酸钠半浸泡下的毛细上升量均大于10%。

根据SEM和XRD测试结果,毛细作用下混凝土孔隙中主要填充了硫酸钠溶液,过饱和时混凝土孔隙内部产生了无水 Na_2SO_4 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶混合物。氯离子电通量测试结果表明,C30和C40混凝土在5%硫酸钠溶液半浸泡条件下的氯离子电通量均大于10%,其抗氯离子渗透性能也比10%硫酸钠半浸泡的差。结合毛细上升、SEM和XRD测试结果,可以推测5%硫酸钠溶液半浸泡试样毛细上升速度快,孔隙中填充了较多的硫酸钠溶液,硫酸钠降低了固化氯离子的稳定性,并重新转化为游离态,从而增大了氯离子电通量,降低了混凝土抗氯离子渗透性能^[10-11]。随着硫酸钠溶液浓度的增大,高浓度的硫酸钠在表层处堆积,减慢了硫酸钠溶液的毛细上升速度,降低了氯离子电通量。随着浸泡时间的延长,孔隙中的硫酸钠溶液逐渐过饱和并形成无水 Na_2SO_4 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 结晶混合物,结晶混合物沉淀于孔壁,部分地阻隔了氯离子的扩散通道,降低了氯离子电通量。文献^[12-15]的研究也表明,毛细作用下暴露于空气中的硫酸盐半浸泡部分混凝土内会形成一个孔溶液区,该孔溶液区试样表面有盐结晶,含有 SO_4^{2-} 的孔溶液接近于饱和。

将D3-5、D3-10、D4-5、D4-10砂浆试样在毛细上升稳定(约168h左右)时的毛细上升量(H_i)与C30-5、C30-10、C40-5、C40-10混凝土试样28d氯离子电通量的关系图绘制于图10。从图10可以看到,砂浆毛细上升量(H_i)与混凝土氯离子电通量(Y)之间存在着近似的线性关系,即毛细上升速度越快,氯离子电通量也越大。对于硫酸钠半浸泡试样来说,毛细上升的快慢可以作为评价混凝土抗氯离子渗透性能的指标。

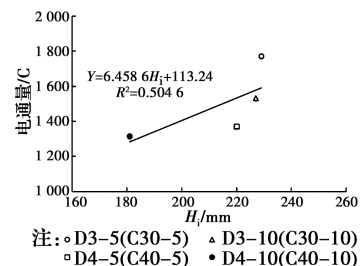


图10 砂浆毛细上升量与混凝土氯离子电通量的关系图

Fig. 10 Relationship between the amounts of capillary suction for mortar and the electric fluxes of chloride ions for concrete

4 结论

基于硫酸钠半浸泡砂浆的毛细上升试验、混凝

土的微观以及氯离子电通量试验的测试结果,得到以下结论:

1)硫酸钠半浸泡前期混凝土的抗氯离子渗透性能明显劣化,硫酸钠溶液填充了混凝土的孔隙,降低了固化氯离子的稳定性,释放了更多的自由氯离子,使混凝土的抗氯离子渗透性能劣化。随着半浸泡时间的延长,由于环境相对湿度的变化,硫酸钠溶液过饱和逐渐析出无水 Na_2SO_4 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶混合物,结晶混合物沉淀于孔壁,部分阻碍了氯离子的扩散通道,从而降低了氯离子电通量,使混凝土抗氯离子渗透性能有所恢复,但依然比未浸泡时差。

2)随着硫酸钠溶液浓度的增大,砂浆试样毛细上升速度先快后慢,5%硫酸钠溶液毛细上升速度大于10%,其氯离子电通量也较大,抗氯离子渗透性也差。通过硫酸钠溶液毛细上升速度的快慢,可以评价混凝土抗氯离子渗透性能的好坏。

3)水灰比越大,混凝土中孔隙也越大,氯离子电通量也越大,抗氯离子渗透性能也越差。

4)复合溶液有利于提高混凝土抗氯离子渗透性能,试验中抗氯离子渗透性能由强到弱依次是未浸泡<5%硫酸钠+3%氯化钠<10%硫酸钠<阅海湖水<5%硫酸钠,氯离子电通量扩大倍数依次为1倍<1.31倍<1.41倍<1.42倍<1.47倍。

参考文献:

[1] 金伟良,张奕,卢振勇. 非饱和状态下氯离子在混凝土中的渗透机理及计算模型[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(10): 1362-1369.
JIN W L, ZHANG Y, LU Z Y. Mechanism and mathematic modeling of chloride permeation in concrete under unsaturated state [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(10): 1362-1369. (in Chinese)

[2] 贾立哲,张英姿,王开源,等. 非饱和混凝土中氯离子传输机理[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 45-52.
JIA L Z, ZHANG Y Z, WANG K Y, et al. Transport mechanism of chloride in nonsaturated concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 45-52. (in Chinese)

[3] 徐港,徐可,苏义彪,等. 不同干湿制度下氯离子在混凝土中的传输特性[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 54-59.
XU G, XU K, SU Y B, et al. Transport characteristic of chloride ion in concrete under dry-wet cycles [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 54-59. (in Chinese)

[4] 张立明,余红发. 干湿循环次数对氯离子扩散系数的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 26-30.
ZHANG L M, YU H F. Influence of dry-wet cycles on chloride diffusion coefficient [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2014, 41(3): 26-30. (in Chinese)

[5] 姬永生,袁迎曙. 干湿循环作用下氯离子在混凝土中的侵蚀过程分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(12): 16-19, 23.
JI Y S, YUAN Y S. Transport process of chloride in concrete under wet and dry cycles [J]. Industrial Construction, 2006, 36(12): 16-19, 23. (in Chinese)

[6] 王本臻,金祖权,卢峰,等. 非饱和混凝土中氯离子的毛细吸附[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(10): 864-866.
WANG B Z, JIN Z Q, LU F, et al. Capillary absorption of chloride ions in unsaturated concrete [J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(10): 864-866. (in Chinese)

[7] 杨建森,王培铭. 盐碱溶液对混凝土氯离子渗透性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(12): 2048-2053.
YANG J S, WANG P M. Influence of saline alkaline solution on chloride permeability of concrete [J]. Journal of Harbing Institute of Technology, 2008, 40(12): 2048-2053. (in Chinese)

[8] 杨志刚,蒋正武,李文婷,等. 地下水强酸盐复合腐蚀环境下不同矿物掺合料对水泥砂浆耐腐蚀性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5): 82-87.
YANG Z G, JIANG Z W, LI W T, et al. Influence of mineral admixtures on corrosion resistance of cement mortar exposed to strong acid and salt composite groundwater [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(5): 82-87. (in Chinese)

[9] 金祖权,孙伟,张云升,等. 混凝土在硫酸盐、氯盐溶

- 液中的损伤过程[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5): 630-635.
- JIN Z Q, SUN W, ZHANG Y S, et al. Damage of concrete in sulfate and chloride solution [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(5): 630-635. (in Chinese)
- [10] DE WEERDT K, ORSÁKOVÁ D, GEIKER M R. The impact of sulphate and magnesium on chloride binding in Portland cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 65: 30-40.
- [11] 耿健, 杨海明, 莫利伟. 硫酸钠溶液腐蚀对固化态氯离子稳定性的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 919-925.
- GENG J, YANG H M, MO L W. Effect of attack of sodium sulfate solution on the stability of bounded chloride ions [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 919-925. (in Chinese)
- [12] HAYNES H, O' NEILL R, NEFF M, et al. Salt weathering distress on concrete exposed to sodium sulfate environment [J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(1): 35-43. DOI:10.14359/19205.
- [13] LIU Z Q, DENG D H, DE SCHUTTER G, et al. Chemical sulfate attack performance of partially exposed cement and cement + fly ash paste [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 230-237.
- [14] MIRONOVA M K, GOSPODINOV P N, KAZANDJIEV R F. The effect of liquid push out of the material capillaries under sulfate ion diffusion in cement composites [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(1): 9-15.
- [15] MARCHAND J, SAMSON E, MALTAIS Y, et al. Theoretical analysis of the effect of weak sodium sulfate solutions on the durability of concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(3/4): 317-329.

(编辑 胡玥)