

混凝土抗硫酸盐侵蚀性能及其离子扩散影响因素研究

肖鹏震¹, 张戎令^{1,2}, 胡锐鹏³, 石小清⁴, 窦晓峥¹, 熊泽宇¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

(2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

(3. 中铁西安勘察设计研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054)

(4. 中铁21局集团有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了进一步解释混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理, 研究了不同水胶比以及养护时间对全浸泡下混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响, 分析了硫酸盐在混凝土中的扩散过程。试验制备了0.32、0.35、0.38这3种水胶比的普通硅酸盐水泥混凝土试件, 对其质量、动弹性模量、抗压强度、 SO_4^{2-} 浓度等指标进行分析。结果表明: 全浸泡条件下, 混凝土抗硫酸盐侵蚀性能随着水胶比的降低而提高; 养护28 d的混凝土抗硫酸盐侵蚀能力大于养护3 d的混凝土, 养护时间越短, 水化过程越不完全, 混凝土劣化速度越快; 混凝土中 SO_4^{2-} 浓度随着水胶比的降低而降低, 随着养护时间的减小而增大。

关键词: 混凝土; 耐久性; 硫酸盐侵蚀; 硫酸根离子; 扩散

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)05-0359-07

Study on the Sulfate Resistance of Concrete and the Influencing Factors of Ion Diffusion

XIAO Pengzhen¹, ZHANG Rongling^{1,2}, HU Ruipeng³, SHI Xiaoqing⁴,
DOU Xiaozheng¹, XIONG Zeyu¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

(2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

(3. Xi'an Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

(4. China Railway 21st Bureau Group Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to further explain the mechanism of concrete deterioration by sulfate erosion, the resistance to sulfate erosion of concrete samples with different water-cement ratio and curing time under full immersion conditions and sulfate ion diffusion in concrete were studied. Cement concrete samples with water-cement ratio of 0.32, 0.35 and 0.38 were prepared. The evaluating indicators such as the mass, dynamic elastic modulus, compressive strength and sulfate ion content were analyzed. The results show that, under the condition of Na_2SO_4 solution full immersion, the resistance to sulfate attack increases with the decrease of water-cement ratio; the sulfate resistance of concrete cured for 28 days is greater than that of concrete cured for 3 days, the shorter the curing time is, the less complete the hydration process is, and the faster the deterioration rate of concrete is; the sulfate ion concentration in concrete decreases with the decrease of water-binder ratio and increases with the decrease of curing time.

Key words: concrete; durability; sulfate erosion; sulfate ion; diffusion

收稿日期: 2019-11-27 修回日期: 2020-06-13

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持(IRT_15R29);
甘肃省高校协同创新科技团队支持计划资助(2017C-08);
陇原青年创新人才(团队)项目; 甘肃省教育厅高等学校科研项目(2018B-054)

第一作者: 肖鹏震, 男, 1995年生, 硕士研究生

通讯作者: 张戎令, 男, 1984年生, 教授, 硕士生导师,

Email: mogzrlgg@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201911031

1 前言

硫酸盐对混凝土的侵蚀是一个十分复杂的过程, 其中涉及到物理、化学等多方面作用, 是影响混凝土耐久性的重要因素之一^[1]。我国沿海和内陆盐湖地区土壤中

的硫酸盐含量丰富，对混凝土构筑物造成了严重危害^[2]。

目前，国内外学者针对混凝土的抗硫酸盐侵蚀性已进行了大量研究，并取得了很多有价值的成果。张晓佳等^[3]在分析硫酸盐侵蚀对水泥基胶凝材料铝相水化产物和 C-S-H 影响的基础上，归纳了现有水泥基胶凝材料硫酸盐侵蚀的作用机理。高礼雄等^[4]通过一年的浸泡试验，系统研究了钡盐对混凝土抗硫酸盐侵蚀作用的有效性，结果表明，钡盐对混凝土抗硫酸盐侵蚀破坏的改善作用与其种类和掺量有关。Monteiro 等^[5]通过分析硫酸盐长期侵蚀试验下混凝土的膨胀数据，认为水胶比和 C₃A 含量对混凝土的失效时间有很大影响。马志鸣等^[6]通过现场暴露实验指出，侵蚀到混凝土试件内部的自由 SO₄²⁻含量与混凝土内部该深度处的总 SO₄²⁻含量随着侵蚀龄期和水胶比的不同而变化。刘俊^[7]通过实验研究指出，当掺合料掺量为 50%~60% (质量分数，下同) 时 (粉煤灰、矿粉各占掺合料总量的 50%)，混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能较好。苏建彪^[8]等指出，在较低浓度的硫酸盐、镁盐双重侵蚀溶液中，降低水胶比、增加粉煤灰掺量，可在一定程度上提高试件的抗双重侵蚀能力；但在高浓度双重侵蚀环境中，即使降低水胶比、增大粉煤灰掺量，也难以有效抵抗侵蚀破坏。Tumidajski 等^[9]在 Fick 第二定律的基础上建立了 SO₄²⁻浓度及扩散深度随时间变化的关系理

论模型。Gospodinov 等^[10]通过研究指出 SO₄²⁻在混凝土内部的扩散程度可以通过其抗压强度、孔隙率来确定。虽然目前对混凝土中硫酸盐侵蚀损伤机理有了相当研究，但对混凝土在不同条件下 SO₄²⁻的扩散规律研究相对较少。

本文通过对混凝土进行硫酸盐全浸泡试验，对不同水胶比、不同养护时间的混凝土试块受侵蚀的劣化过程进行进一步分析，并对 SO₄²⁻在混凝土内部的扩散规律进行了研究，以期为我国西北硫酸盐强腐蚀地区混凝土耐久性研究提供理论依据。

2 试 验

2.1 试验原材料

本试验的水泥采用甘肃祁连山水泥有限公司的 P·O 42.5 级水泥，各项性能指标见表 1。粗骨料采用 5~20 mm 连续级配碎石，含泥量为 0.5%，泥块含量为 0.1%，压碎指标为 10%，表观密度为 2670 kg/m³。细骨料采用天然河砂，中砂，细度模数为 2.66，含泥量为 0.7%，表观密度为 2651 kg·m⁻³；减水剂采用聚羧酸高性能减水剂，减水率为 25.6%。

2.2 试验配合比

试验设计了 3 种水胶比混凝土，分别为 0.32，0.35 和 0.38，具体配合比见表 2。

表 1 P·O 42.5 级水泥性能指标
Table 1 Performance index of P·O 42.5 level cement

Soundness /mm	Specific surface Area/(m ² ·kg ⁻³)	Ignition loss/%	Alkali content/%	Setting time/min		Compressive strength/MPa	
				Initial set	Final set	3 d	28 d
1.2	316	4.1	0.37	135	270	20.9	46.3

表 2 混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of concrete

No.	Water cement ratio	Water /(kg·m ⁻³)	Cement /(kg·m ⁻³)	Fine aggregate /(kg·m ⁻³)	Coarse aggregate /(kg·m ⁻³)	Water reducer /(kg·m ⁻³)
ASY-1	0.32	150	465.0	764	1056	5.58
BSY-1	0.35	147	420.0	850	1083	5.04
CSY-1	0.38	136	360.0	832	882	3.60

2.3 试验方案及指标

按照表 2 配比，称取定量材料依次放入混凝土搅拌机并搅拌至规定时间，混凝土入模振动后成型，抗压强度试件尺寸采用 100 mm×100 mm×100 mm，动弹性模量试件尺寸采用 100 mm×100 mm×400 mm，放入标准养护室养护 24 h 后脱模，脱模后分两批继续养护 3 d 及 28 d。

将达到规定龄期的混凝土试件全浸泡于 (20±2)℃、质量分数为 3% 的 Na₂SO₄ 溶液中，液面高度需高出试件顶面 10 mm。为保持 Na₂SO₄ 溶液浓度及 pH 稳定，每隔 30 d 更换一次溶液，且每隔 7 d 测试溶液 pH 并用硫酸溶液进行滴定。每隔 30 d 测定一次溶液中混凝土试块的质量、动弹性模量、抗压强度以及混凝土各深度处 SO₄²⁻含量等指标。

2.3.1 质量损失率

混凝土抗硫酸盐侵蚀性能采用质量损失率 w 进行评价,质量损失率由试件初始质量和在硫酸盐溶液中浸泡到某一龄期后质量的差值与初始质量之比来表示。质量损失率 w 的计算公式见式(1):

$$w = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

M_t ——侵蚀龄期为 t 天时试件的质量(kg);

M_0 ——试件初始质量(kg)。

2.3.2 相对动弹性模量

动弹性模量与材料自身结构密切相关,当混凝土内部结构发生变化时,动弹性模量也随之发生相应变化。在混凝土冻融破坏中,水在混凝土毛细孔中结冰造成冻胀开裂,进而引起混凝土性能的劣化,在冻融试验中用相对动弹性模量 E_r 评定^[11],计算公式见式(2):

$$E_r = \frac{E_t}{E_0} \quad (2)$$

式中:

E_t ——混凝土经过一定冻融次数的动弹性模量(MPa);

E_0 ——试件初始动弹性模量(MPa)。

而在硫酸盐腐蚀中,高浓度硫酸盐会析出结晶填充毛细孔,使体积膨胀;另外 SO_4^{2-} 会与混凝土中的水泥水化产物发生反应生成膨胀性钙矾石和石膏。上述两种腐蚀方式同样会使混凝土开裂,改变混凝土内部结构,引起动弹性模量的变化。混凝土抗硫酸盐侵蚀性能采用相对动弹性模量 P 进行评价,本文中相对动弹性模量计算公式见式(3):

$$P = \frac{E_t}{E_0} \quad (3)$$

式中:

E_t ——侵蚀龄期为 t 天时试件的动弹性模量(MPa);

E_0 ——试件初始动弹性模量(MPa)。

混凝土动弹性模量测试依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)相关规定,使用 DT-W18 动弹性模量测定仪进行试验。首先测定试件的质量和尺寸,确保动弹性模量测定仪各部件的连接和相对位置符合规范要求,然后调整测定仪使试件达到共振状态,以此时所显示的共振频率作为试件的基频振动频率。混凝土动弹性模量计算公式见式(4):

$$E_d = 13.244 \times 10^{-4} \times WL^3 f^2 / a^4 \quad (4)$$

式中:

E_d ——混凝土动弹性模量(MPa);

a ——正方形截面试件的边长(mm);

L ——试件的长度(mm);

W ——试件的质量(kg),精确到 0.01 kg;

f ——试件横向振动时的基频振动频率(Hz)。

2.3.3 抗蚀系数

在实际工程中,混凝土结构在同一龄期下受侵蚀与未受侵蚀试样的性能对比难以实现,为了更准确地评定实际混凝土服役到某一龄期后的劣化程度,引入初始抗压强度定义。混凝土抗硫酸盐侵蚀性能采用抗蚀系数 R 进行评价,抗蚀系数计算公式见式(5):

$$R = \frac{f_t}{f_0} \quad (5)$$

式中:

f_t ——侵蚀龄期为 t 天时试件的抗压强度(MPa);

f_0 ——试件初始抗压强度(MPa)。

抗压强度测试依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)相关规定,使用 3000 kN 微机控制电液伺服压力试验机进行试验。

2.3.4 硫酸根离子含量

达到规定侵蚀龄期时,取距离混凝土试块表面 1~2 cm、2~3 cm 深度处的粉末试样,取样示意图见图 1。渗透到混凝土内部的 SO_4^{2-} 浓度以 SO_3 计量,其测试方法根据《水泥化学分析方法》(GB/T 176-2008)中硫酸钡重量法(基准法)进行,其测试原理为试样溶液先加入 HCl 调

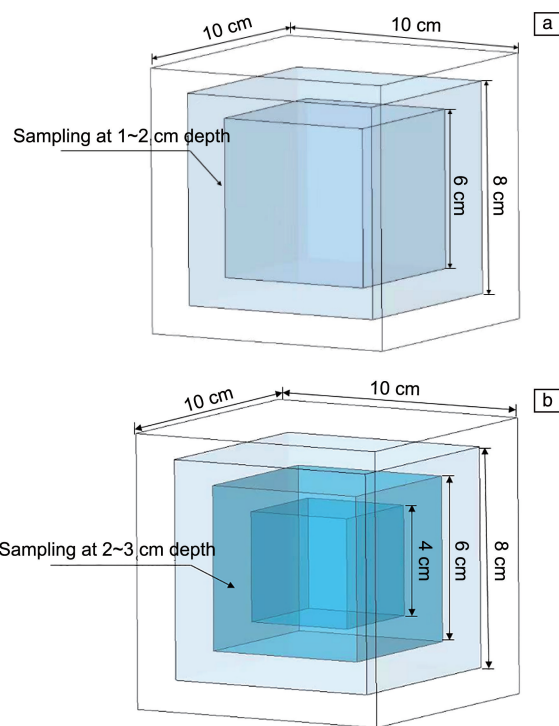


图1 取样位置示意图:(a)1~2 cm 深度处,(b)2~3 cm 深度处
Fig.1 Schematic diagram of sampling location: (a) 1~2 cm depth, (b) 2~3 cm depth

至弱酸性,煮沸后加入 BaCl_2 溶液产生沉淀,经过滤、灰化、高温灼烧、称重等步骤,以测定混凝土试件不同深度处的 SO_4^{2-} 含量。

3 硫酸盐侵蚀对混凝土性能的影响

3.1 质量损失率

混凝土受硫酸盐侵蚀后其性能劣化宏观表现为出现裂缝并伴有一定程度的剥落,可以用混凝土的质量损失来表示。质量损失率为正时,说明混凝土试件受侵蚀后质量减少;质量损失率为负时,说明混凝土试件受侵蚀后质量增加。不同水胶比和养护时间的混凝土在 Na_2SO_4 溶液中质量损失变化规律如图 2 所示。

由图 2a 可知,经过 28 d 的养护时间,随着侵蚀龄期的增加,各水胶比试件质量损失率呈现先降低后上升的趋势。对比 3 种水胶比试件的质量损失率曲线,水胶比越小则变化趋势越平缓。侵蚀龄期小于 90 d 时,试件的质量损失率都为负值,试件的质量呈上升趋势,且水胶比为 0.38 的混凝土试件上升趋势最大。这是因为在侵蚀前期,进入混凝土的硫酸盐与水化产物发生反应,产物在孔隙中不断堆积,提高了混凝土的密实度,同时使混凝土质量增加。侵蚀龄期为 90 d 时,0.32, 0.35 以及 0.38 水胶比的混凝土质量损失率分别达到了 -0.101% ,

-0.332% , -0.481% ;当侵蚀到第 300 d 时,各水胶比混凝土质量损失率分别为 1.254% , 2.112% , 2.741% 。水胶比为 0.38 的混凝土质量损失率最大,受硫酸盐侵蚀破坏最大。 Na_2SO_4 溶液对混凝土质量变化主要有两方面影响:一方面是进入混凝土中的 SO_4^{2-} 与水化产物反应生成的侵蚀产物在混凝土孔隙中填充聚集,暂时提高了混凝土密实度,表现为质量增加^[12];另一方面由于反应生成具有膨胀性的侵蚀产物,体积膨胀而导致混凝土开裂,质量随之下降。

不同养护时间下 0.32 水胶比混凝土在 Na_2SO_4 溶液中的质量损失率变化规律如图 2b。由图可知,养护时间越长,混凝土质量损失率越小。养护 3 d 后进行硫酸盐侵蚀试验的混凝土质量损失率一直呈现上升趋势,即混凝土质量均呈现下降趋势;养护 28 d 的混凝土质量损失率先轻微减少后逐渐变大,即质量先少量增加后随侵蚀龄期的增加逐渐减小。

试验过程中通过对混凝土试块外观的观察发现,养护 3 d 后进行硫酸盐侵蚀试验的混凝土,在第 90 d 时其外表已出现开裂,使硫酸盐侵蚀加剧,质量下降更为明显。当侵蚀龄期为 300 d 时,养护时间为 28 d 的混凝土质量损失率是养护时间为 3 d 的 27%,说明混凝土养护时间过短,其水化程度未完全,不利于其抗硫酸盐侵蚀。

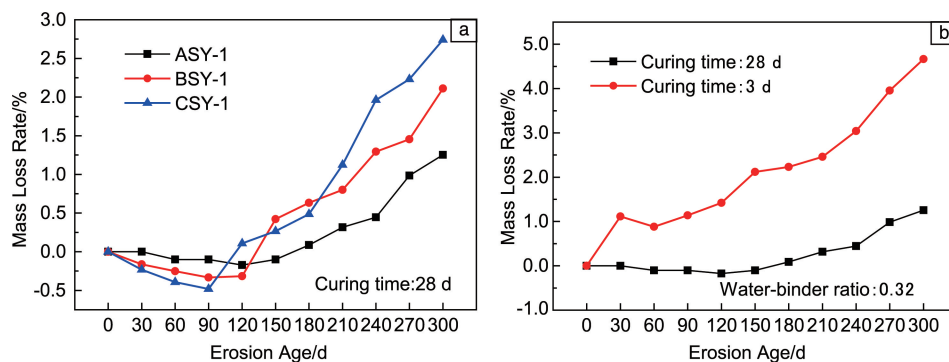


图 2 水胶比(a)和养护龄期(b)对混凝土受硫酸盐侵蚀后质量损失率的影响

Fig. 2 The influence of water-binder ratio (a) and curing time (b) on mass loss rate of concrete after sulfate attack

3.2 相对动弹性模量

不同水胶比和养护时间的混凝土在 Na_2SO_4 溶液中的动弹性模量变化规律如图 3。由图 3a 可见,不同水胶比混凝土在全浸泡环境下相对动弹性模量均呈现先增长后下降的趋势。相对动弹性模量开始时迅速上升,是因为硫酸盐与水化产物的生成物以及硫酸盐形成的结晶填充混凝土内部的裂缝和孔隙,使混凝土更加密实;随着侵蚀龄期的增加,侵蚀产物的膨胀、结晶使混凝土产生更多的裂缝,使更多的硫酸盐进入混凝土,加快了混凝土的受侵蚀速率,动弹性模量迅速下降。由图 3a 可知,混

凝土的相对动弹性模量存在一个相对稳定阶段,这取决于混凝土内部裂缝的发展情况以及裂缝被填充的程度,若裂缝发展情况与被填充程度存在一个平衡,则相对动弹性模量处于一个相对稳定阶段^[13]。

由试验可知,水胶比对混凝土的相对动弹性模量影响很大,水胶比越大越不利于混凝土的抗硫酸盐侵蚀。水胶比为 0.32 的混凝土相对动弹性模量变化趋势相比其他 2 个水胶比更为平缓,侵蚀龄期 300 d 时,其动弹性模量相比初始动弹性模量损失仅为 2.31%,而 0.35 及 0.38 水胶比的混凝土动弹性模量损失依次为 4.38% 以及 8.96%。

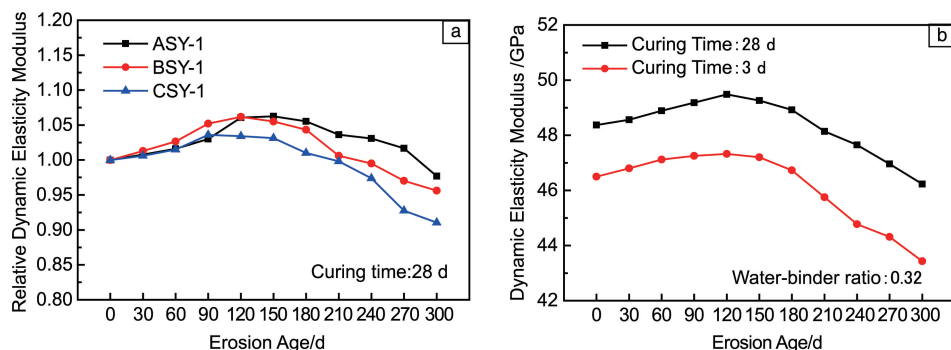


图3 水胶比(a)和养护时间(b)对混凝土受硫酸盐侵蚀后动弹性模量的影响

Fig. 3 The influence of water-binder ratio (a) and curing time (b) on dynamic elasticity modulus of concrete after sulfate attack

不同养护时间下水胶比为 0.32 的混凝土在 Na_2SO_4 溶液中的动弹性模量变化规律如图 3b。由图可见, 养护时间为 28 d 和 3 d 的混凝土动弹性模量总体变化规律类似, 均呈现先缓慢上升后加速下降的趋势, 最大动弹性模量均出现于 120 d 时, 但其变化速率有明显差异。养护时间为 28 d 的混凝土, 其最大动弹性模量为 49.48 GPa, 相比初始动弹性模量上升了 2.3%; 养护时间为 7 d 的混凝土, 其最大动弹性模量为 47.32 GPa, 相比初始动弹性模量上升了 1.8%, 养护时间越短, 动弹性模量上升速率越小。

侵蚀龄期达到 300 d 时, 养护时间为 3 d 的混凝土动弹性模量降低至 30 d 侵蚀龄期时的 92.8%, 而养护时间 28 d 的混凝土动弹性模量仅降低至 30 d 侵蚀龄期时的 95.2%。可见, 水化过程不完全, 会导致混凝土密实程

度降低, 使混凝土更易受硫酸盐侵蚀, SO_4^{2-} 更易进入混凝土内部, 发生一系列反应生成膨胀产物等。

3.3 抗蚀系数

不同水胶比和养护时间的混凝土在 Na_2SO_4 溶液中的抗压强度变化规律如图 4。由图 4a 可知, 3 种水胶比的混凝土抗蚀系数变化趋势相同, 可分为 2 个阶段, 第一个阶段为增长期, 第二个阶段为下降期。增长期为侵蚀龄期 120 d 以前, 混凝土的抗蚀系数增长, 其主要原因是早期的硫酸盐与混凝土的水化产物发生一系列反应, 填充混凝土中的孔隙使混凝土更加密实; 在第二个阶段, 随着侵蚀龄期的增加, 生成的钙矾石以及石膏逐渐增多并产生膨胀, 使混凝土内部的孔隙和裂缝进一步发展, 致使混凝土强度降低, 抗蚀系数减小。

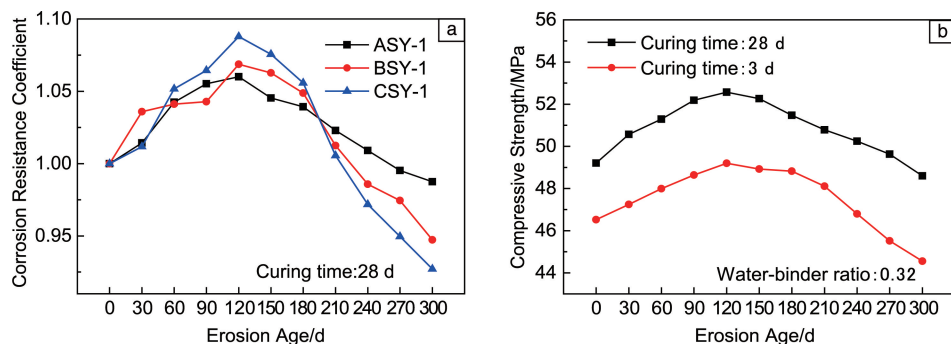


图4 水胶比(a)和养护时间(b)对混凝土受硫酸盐侵蚀后抗压强度的影响

Fig. 4 The influence of water-binder ratio (a) and curing time (b) on compressive strength of concrete after sulfate attack

水胶比的大小对混凝土的密实性有着决定性的作用。水胶比为 0.32 的混凝土经过 300 d 的硫酸盐侵蚀后, 其抗蚀系数降低了 1.25%, 水胶比为 0.35 和 0.38 的混凝土分别降低了 5.27% 和 7.29%, 水胶比为 0.32 的混凝土抗蚀系数变化幅度最小, 趋势最为平缓, 而 0.35 和 0.38 水胶比的混凝土抗蚀系数变化幅度更为剧烈, 且在龄期达到 180 d 后进入一个加速劣化阶段, 混凝土受硫酸盐

侵蚀破坏更加明显。

不同养护时间的 0.32 水胶比混凝土在 Na_2SO_4 溶液中的抗压强度变化规律如图 4b。两种养护时间下的混凝土强度发展规律都分为两个阶段: 前期增长阶段以及后期下降阶段。养护 28 d 的混凝土强度增长阶段速度明显大于养护 3 d 的混凝土, 同时后期强度下降阶段速度更慢。养护 28 d 后进行硫酸盐侵蚀的混凝土抗压强度在整

个侵蚀龄期都大于养护 3 d 后进行硫酸盐侵蚀的混凝土,说明养护 3 d 即进行硫酸盐侵蚀试验,混凝土的水化过程受到抑制,无法达到正常强度水平。

4 硫酸盐在混凝土中扩散的影响因素

4.1 水胶比的影响

不同水胶比混凝土 1~2 cm 深处的 SO_4^{2-} 浓度随侵蚀龄期的增加规律见图 5。由图 5 可见,混凝土 1~2 cm 深处的 SO_4^{2-} 浓度随着侵蚀龄期的增加而增加。试验条件下溶液的 SO_4^{2-} 浓度基本保持不变,而混凝土内部的 SO_4^{2-} 浓度较低, SO_4^{2-} 会从高浓度的外界环境往低浓度的混凝土内部不断扩散,使得混凝土内部的 SO_4^{2-} 浓度不断增加。

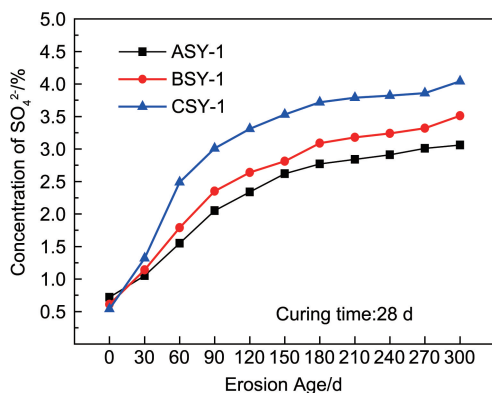


图 5 水胶比对混凝土 1~2 cm 深处 SO_4^{2-} 浓度的影响

Fig. 5 The influence of water-binder ratio on the concentration of SO_4^{2-} at 1~2 cm of concrete

随着侵蚀龄期的增加,该混凝土 1~2 cm 深度处的 SO_4^{2-} 浓度变化呈现两个阶段:前期快速增长阶段以及后期缓慢增长阶段。后期增长速度放慢是因为随着侵蚀龄期的增加, SO_4^{2-} 与水化产物生成膨胀性产物,从而填充混凝土内孔隙,使混凝土更加密实,阻塞了 SO_4^{2-} 进入混凝土的通道,进而阻碍 SO_4^{2-} 的进一步扩散。侵蚀龄期 120 d 前,内部 SO_4^{2-} 浓度增长迅速,之后开始放缓。侵蚀 30 d 时, 0.32、0.35 和 0.38 水胶比混凝土内部 1~2 cm 深度处的 SO_4^{2-} 浓度分别为 1.05%、1.14% 以及 1.65%, 侵蚀 300 d 时, SO_4^{2-} 浓度分别为 3.06%、3.51% 及 4.04%, 分别为 30 d 时的 2.91 倍、3.07 倍以及 3.26 倍。此外,水胶比越大,混凝土内 SO_4^{2-} 浓度越大,其原因是水胶比增加时,混凝土中浆体的含量将减少,密实度降低,孔隙率增大,使得 SO_4^{2-} 更容易且更快地侵蚀到混凝土内部,扩散的速度加快^[14]。

4.2 养护时间的影响

不同养护时间下 0.32 水胶比混凝土 2~3 cm 深处的

SO_4^{2-} 浓度随侵蚀龄期的增加规律见图 6。由图 6 可见,养护 28 d 的混凝土内部 SO_4^{2-} 增长速度明显低于养护 3 d 的混凝土试件。在相同侵蚀龄期和混凝土相同深度处,养护时间越长,混凝土中 SO_4^{2-} 浓度越小。

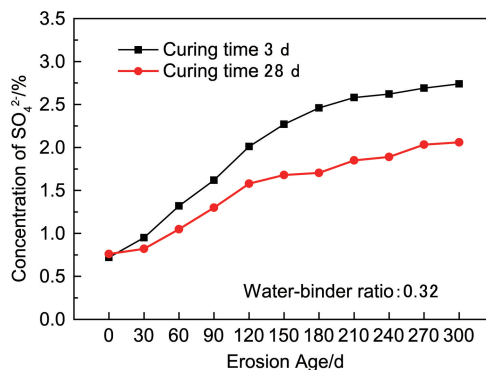


图 6 养护时间对混凝土 2~3 cm 深处 SO_4^{2-} 浓度的影响

Fig. 6 The influence of curing time on the concentration of SO_4^{2-} at 2~3 cm of concrete

养护 3 d 的混凝土内部 SO_4^{2-} 在整个侵蚀龄期基本处于持续上升阶段,养护 28 d 的混凝土内部的 SO_4^{2-} 浓度在侵蚀前期快速上升,然后进入缓慢上升阶段。养护时间为 3 d 的混凝土侵蚀龄期为 30 d 时,其内部 2~3 cm 深度处的 SO_4^{2-} 浓度为 0.95%, 侵蚀龄期为 300 d 时,该深度处的 SO_4^{2-} 浓度为 2.74%, 相比侵蚀龄期为 30 d 时增大了 1.88 倍;养护时间为 28 d 的混凝土 30 d 侵蚀龄期时, 2~3 cm 深度处的 SO_4^{2-} 浓度为 0.82%, 侵蚀龄期为 300 d 时为 2.06%, 相比侵蚀龄期为 30 d 时增大了 1.52 倍。由以上分析可知,养护时间越长,混凝土内部固定深度处的 SO_4^{2-} 浓度越小, SO_4^{2-} 的传输扩散速度越慢。这是因为混凝土养护时间越长,其内部水化越完全,密实度就越大,孔隙率就越低,从而使得 SO_4^{2-} 在其中的扩散速率越小^[15]。

5 结 论

(1) Na_2SO_4 全浸泡环境下,混凝土水胶比越小,其质量损失率越小、相对动弹性模量与抗蚀系数越大、内部的 SO_4^{2-} 浓度越小。降低水胶比有利于提高混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力。

(2) Na_2SO_4 全浸泡环境下,养护 3 d 的混凝土各项测试指标均低于养护 28 d 的混凝土。

(3) Na_2SO_4 全浸泡环境下,混凝土养护时间从 3 d 提高到 28 d 后,混凝土中 SO_4^{2-} 浓度明显降低,且随侵蚀龄期延长,增长速度降低。养护时间越长,水化程度越完全,孔隙率越小,有效抑制了 SO_4^{2-} 在混凝土中的传输扩散。

参考文献 References

- [1] 彭红璐, 王伯昕, 马焱, 等. 新型建筑材料[J], 2018, 45(1): 88-91.
PENG H L, WANG B X, MA Y, *et al.* New Building Materials[J], 2018, 45(1): 88-91.
- [2] 陈静, 刘学文, 杜应吉, 等. 人民黄河[J], 2009, 31(4): 95-96.
CHEN J, LIU X W, DU Y J, *et al.* Yellow River[J], 2009, 31(4): 95-96.
- [3] 张晓佳, 张高展, 孙道胜, 等. 材料导报[J], 2018, 32(7): 1174-1180.
ZHANG X J, ZHANG G Z, SUN D S, *et al.* Materials Reports [J], 2018, 32(7): 1174-1180.
- [4] 高礼雄, 荣辉, 刘金革, 等. 混凝土[J], 2007(3): 17-18+21.
GAO L X, RONG H, LIU J G, *et al.* Concrete [J], 2007(3): 17-18+21.
- [5] Monteiro P J M, Kurtis K E. Cement and Concrete Research [J], 2003, 33(7): 987-993.
- [6] 马志鸣, 赵铁军, 王鹏刚, 等. 粉煤灰[J], 2014, 26(1): 34-36+39.
MA Z M, ZHAO T J, WANG P G, *et al.* Coal Ash[J], 2014, 26(1): 34-36+39.
- [7] 刘俊. 掺合料混凝土抗硫酸盐侵蚀试验研究[D]. 西安建筑科技大学, 2010.
LIU J. Experimental research on Anti-sulfate Corrosion performance of concrete with admixtures[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [8] 苏建彪, 唐新军, 刘向楠, 等. 粉煤灰综合利用[J], 2014(5): 30-32.
SU J B, TANG X J, LIU X N, *et al.* Fly Ash Comprehensive Utilization[J], 2014(5): 30-32.
- [9] TUMIDAJSKI P J, CHAN G W, PHILIPOSE K E. Cement and Concrete Research[J], 1995, 25(6): 1159.
- [10] GOSPODINOV P N, KAZANDJIEV R F, PARTALIN T A, *et al.* Cement & Concrete Research[J], 1999, 29(10): 1591-1596.
- [11] ABABN EN A N. The Coupled Effect of Moisture Diffusion, Chloride Penetration and Freezing-thawing on Concrete Durability[D]. Denver: University of Colorado, 2002.
- [12] 姜磊. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土劣化规律研究[D]. 西安建筑科技大学, 2014.
JIANG L. Study on Deterioration of Concrete under Sulfate Attack [D]. Xi'an University of Architecture & Technology, 2014.
- [13] 谢智刚, 王起才, 代金鹏, 等. 硅酸盐通报[J], 2018, 37(4): 1125-1131.
XIE Z G, WANG Q C, DAI J P, *et al.* Bulletin of the Chinese Ceramic Society [J], 2018, 37(4): 1125-1131.
- [14] 梁咏宁, 王佳, 孔海新, 等. 混凝土[J], 2011(3): 11-13.
LIANG Y N, WANG J, KONG H X, *et al.* Concrete [J], 2011(3): 11-13.
- [15] 张东, 浦海, 张连英. 徐州工程学院学报(自然科学版)[J], 2012, 27(2): 57-62.
ZHANG J, PU H, ZHANG L Y. Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition)[J], 2012, 27(2): 57-62.

(编辑 张雨明)