

# 干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下 水工混凝土损伤研究

王逸然<sup>1</sup>, 杨 杰<sup>2</sup>, 赵春发<sup>3</sup>, 高懿伟<sup>4</sup>, 孙建伟<sup>5</sup>

(1. 江宁区水务局, 江苏 南京 211100; 2. 江宁区谷里街道水务管理服务站, 江苏 南京 211164;  
3. 江宁区水利工程质量监督站, 江苏 南京 211100; 4. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210024;  
5. 江宁区赵村水库管理所, 江苏 南京 211155)

**摘要:**硫酸盐侵蚀是影响混凝土耐久性的主要因素之一,混凝土损伤层的厚度及混凝土抗压强度作为衡量混凝土结构受侵蚀后退化的重要指标,能有效反应混凝土的损伤程度。本文主要从试验视角,采用超声波平测法和回弹法,重点研究干湿循环条件下不同浓度、种类盐溶液对水利工程混凝土表层损伤层厚度、混凝土抗压强度的影响,以期为服役在干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下混凝土建筑物设计与研究提供一些参考。

**关键词:**干湿循环; 硫酸盐侵蚀; 超声波平测法; 回弹法

中图分类号:TV431 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2021)03-0021-06

## Study on damage of hydraulic concrete under coupling action of dry – wet cycle and sulfate attack

WANG Yiran<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, ZHAO Chunfa<sup>3</sup>, GAO Yiwei<sup>4</sup>, SUN Jianwei<sup>5</sup>

(1. Jiangning District Water Affairs Bureau, Nanjing 211100, China;  
2. Guli Street Water Management Service Station of Jiangning District, Nanjing 211164, China;  
3. Jiangning District Water Conservancy Engineering Quality Supervision Station, Nanjing 211100, China;  
4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;  
5. Zhaocun Reservoir Management Institute of Jiangning District, Nanjing 211155, China)

**Abstract:** Sulfate attack is one of the main factors affecting the durability of concrete, and the thickness of concrete damage layer and compressive strength of concrete are important indexes to measure the degradation of concrete structure after erosion, which can effectively reflect the damage degree of concrete. From the experimental perspective, ultrasonic plane testing method and rebound method were used to focus on the influence of different concentrations and types of salt solutions on the thickness of concrete damage layer and compressive strength of concrete in water conservancy projects under dry – wet cycles, so as to provide some reference for the design and research of concrete buildings under the coupling effect of dry – wet cycles and sulfate attack.

**Key words:** dry – wet cycle; sulfate attack; ultrasonic plane testing method; rebound method

收稿日期:2020-08-31

作者简介:王逸然(1994—),男,主要从事水利工程、水土保持管理工作。E-mail:631525984@qq.com

通信作者:孙建伟(1984—),男,工程师,主要从事水库运行管理工作。E-mail:77166981@qq.com

硫酸盐侵蚀是影响混凝土耐久性的主要因素之一,水利工程所处的硫酸盐环境中的侵蚀介质常常引起混凝土膨胀、开裂,造成强度损失。处在水位变动区、浪溅区等区域的闸墩、胸墙、翼墙、大坝迎水坡、启闭机排架等,由于遭受着干湿循环与硫酸盐侵蚀的耦合作用,表层混凝土会不同程度的产生损伤,出现微裂缝并导致疏松从而形成一定厚度的损伤层,影响混凝土结构的承载力和耐久性。根据混凝土受硫酸盐侵蚀机理,环境中的  $\text{SO}_4^{2-}$  进入混凝土内部,与水泥石的某些固相组分发生化学反应而生成一些难溶的盐类矿物,这些难溶的盐类矿物一方面由于吸收了大量水分子而产生体积膨胀,形成膨胀内应力,当膨胀内应力超过混凝土的抗拉强度时就会导致混凝土的破坏<sup>[1]</sup>,形成损伤层,混凝土抗压强度降低。随着侵蚀时间的增加,损伤层厚度逐渐增加。因此混凝土损伤层的厚度及混凝土抗压强度能有效反应混凝土的损伤程度,可以作为衡量混凝土结构受侵蚀后退化的重要指标。

本文主要从试验视角模拟江淮地区在服役的水工建筑物,以南京市浦口区象山水库为研究对象,依据实际工程试配混凝土配合比,采用超声波平测法对干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下混凝土试件进行检测,通过获取混凝土损伤层超声波波速、未损伤层超声波波速等指标,进而推求出损伤层厚度的变化规律并采用回弹法检测混凝土抗压强度,从混凝土抗压强度视角分析研究干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下混凝土的损伤规律,以期为服役在干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下混凝土建筑物设计与研究提供一些参考。

## 1 实验方法

### 1.1 原材料及配合比

水泥采用南京大连山水泥厂生产的 P·O42.5 标号水泥。粉煤灰采用南京江海粉煤灰公司生产的 II 级粉煤灰。粗骨料采用湖北石灰岩碎石,粒径 5~16 mm 连续级配、无针片状颗粒、质地坚硬且表面粗糙。细骨料采用河沙,细度模数为 2.68。引气剂采用上海馨扬有限公司的 JDU-1 高性能混凝土引气剂。水采用南京市自来水,PH 为 6.7。实验采用的混凝土配合比见表 1。

### 1.2 试件制作与试验方法

混凝土浇筑 24 h 后拆模,在标准养护室养护 28 d 后进行试验,所有混凝土试件均采用同一配合比。试验参照《普通混凝土长期性能及耐久性能试

验方法标准》(GB/T50082—2009)<sup>[2]</sup>。为了模拟水库大坝运行环境,减少实验时间,本文采用自然浸泡-加热烘干来模拟干湿交替,具体的实验方案为:将试件放入水流流速为 0.05 m/s 的水槽中加压浸泡 5 min,浸泡完毕后放入烘干机中干燥 5 min,此为一个干湿循环,每 1 d 实施 6 h,共 36 个循环,每 1 d 为一个测试周期,根据水文资料,一个干湿循环平均 6 d 完成,可得每一个测试周期模拟 188 d,考虑到高温对混凝土结构的加速破坏作用,本次实验一个测试周期模拟实际 180 d,实验持续 20 d,混凝土试件干湿循环总次数为 720 次,模拟实际 3 600 d。

本试验重点研究干湿循环条件下不同浓度、种类盐溶液对水利工程混凝土表层损伤层、混凝土抗压强度的影响,设置 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液、0.05%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液、0.1%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液、0.03% NaCl 溶液、0.03% NaCl + 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  混合溶液共计 5 组,其中 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液、0.05%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液、0.1%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液组包含 3 块尺寸 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体试件及 12 块尺寸 200 mm × 200 mm × 200 mm 的棱方体试件,0.03% NaCl 溶液、0.03% NaCl + 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  混合溶液仅包含 3 块尺寸 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体试件。在干湿循环进行到第 120、240、360、480、720 次时采用 NM-4B 型非金属超声检测仪对棱柱体试件混凝土损伤层  $V_u$ 、 $V_d$  进行测量,并采用珀瑞克 YD225C 机械回弹仪、1% 的酒精酚酞溶液测算混凝土抗压强度,试验数据均取各组混凝土试件数据的平均值。

### 1.3 损伤层厚度检测原理及方法

超声波平测法是一种无损检测技术,如图 1 所示,通常,混凝土未损伤层与损伤层之间有较为明显的分界线,依据超声波在损伤层与未损伤层中传播速度的不同来测量损伤层厚度。试验方法依据《超声法检测混凝土缺陷技术规程》中的单面平测法,对棱柱体的 1 个 100 mm × 400 mm 平整侧面进行检测,换能器布置如图 2,发射换能器 T 布置于距棱柱体边缘 50 mm 处,接收换能器 R 沿混凝土面按一定测距进行排查,读取不同位置的声时值,测距依次为 50、75、100、150、200、250 mm,采用凡士林为耦合剂。

当 T、R 换能器距离较近时,超声波在损伤层中的传播时间较短,首先到达接收换能器,此时接受换能器读取的声时值为损伤层中的传播波速  $V_d$ ;当 T、R 换能器距离较远时,超声波透过损伤层在未损

表1 混凝土配合比特征值

水胶比	粉煤灰/ ( kg · m <sup>-3</sup> )	粗骨料/ ( kg · m <sup>-3</sup> )	细骨料/ ( kg · m <sup>-3</sup> )	水/ ( kg · m <sup>-3</sup> )	引气剂/ ( g · m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ %	砂率/ %
0.45	75	1191	642	176	19.46	20	35

伤层混凝土中的传播时间较短,此时接受换能器读取的声时值为未损伤混凝土中的传播波速 $V_u$ ,当 $T$ 、 $R$ 间距为某一测距 $l_0$ 时,超声波在损伤层中传播到达 $R$ 的时间和2次透过损伤层在未损伤混凝土传播到达 $R$ 的时间相等,此时有式(1):

$$\frac{l_0}{V_d} = \frac{2\sqrt{h_f^2 + x^2}}{V_d} + \frac{l_0 - 2x}{V_u}$$
 (1)

由式(1)可得混凝土损伤层厚度 $h_f$ :

$$h_f = \frac{l_0}{2\sqrt{V_u - V_d}} \sqrt{V_u + V_d}$$
 (2)

式中: $h_f$ 为损伤层厚度,mm; $l_0$ 为声速突变处 $T$ 、 $R$ 的测距,mm; $V_u$ 为未损伤层混凝土中超声波波速,km/s; $V_d$ 为损伤层混凝土中超声波波速,km/s; $x$ 为超声波穿过损伤层中的水平投影,mm。

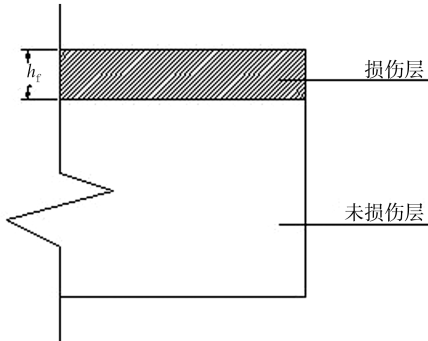


图1 混凝土损伤截面示意图

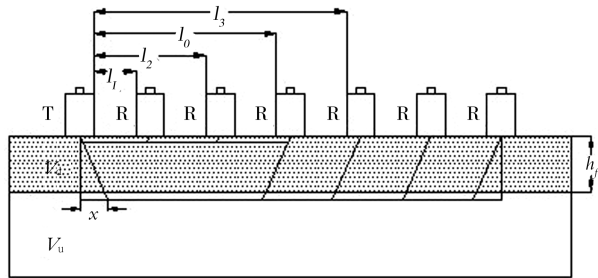


图2 非金属超声检测仪换能器布置图

按超声波平测法原理进行检测,可绘制出时-距关系曲线,见图3。

由图3可得声速改变点 $l_0$ , $l_0$ 点前为混凝土损伤层 $l$ 与 $t$ 关系曲线, $l_0$ 点后为混凝土未损伤层 $l$ 与 $t$ 关系曲线,用线性回归法求出混凝土损伤、未损伤 $l$ 与 $t$ 的回归直线方程:

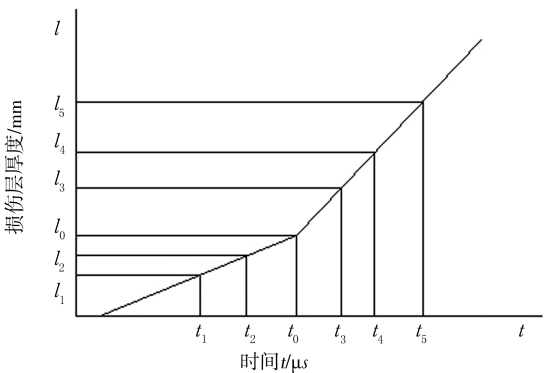


图3 超声波传播时间-换能器测距关系曲线

$$l_d = A_d + V_d t_d$$
 (3)

$$l_u = A_u + V_u t_u$$
 (4)

式中: $l_d$ 为 $l_0$ 点前各测点的测距,mm; $t_d$ 为对应于 $l_d$ 的声时, $\mu s$ ,如 $l_1$ 与 $t_1$ ; $l_u$ 为 $l_0$ 点后各测点的测距,mm; $t_u$ 为对应于 $l_u$ 的声时, $\mu s$ ,如 $l_4$ 与 $t_4$ ; $V_d$ 、 $A_d$ 、 $V_u$ 、 $A_u$ 为回归系数,即图3中损伤层混凝土和未损伤层混凝土回归直线方程的斜率和截距。声时突变处 $l_0$ 可用式(5)求得,即,

$$l_0 = \frac{A_d V_u - A_u V_d}{V_u - V_d}$$
 (5)

将 $l_0$ 带入式(2)即可求得混凝土损伤层厚度 $h_f$ <sup>[3]</sup>。

1.4 混凝土抗压强度检测原理及方法

根据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23—2011),采用回弹法检测混凝土现有抗压强度。回弹法是根据回弹仪中运动的重锤以一定冲击动能撞击顶在混凝土表面的冲击杆后,重锤回弹并带动一指针滑块,得到反映重锤回弹高度的回弹值,以回弹值推算混凝土强度。

本次实验在尺寸200 mm×200 mm×200 mm的棱方体试件中,选取没有疏松层和蜂窝麻面的原状混凝土面,抽样布置回弹测区(面积200 mm×200 mm)若干。在每一个测区内用回弹仪弹击16个测点并读取回弹测值( $N$ ),剔除其中3个最大值和3个最小值,将剩余的10个测值的平均值作为该测区的回弹值( $N$ ),同时在结构混凝土上用电锤打一小孔,滴入1%的酒精酚酞溶液,测量未变红色的混凝土厚度即碳化深度值( $H$ )。根据回弹值( $N$ )、碳化深度值( $H$ )~混凝土强度( $f$ )的关系曲线计算得到测区混凝土强度平均值。

各构件混凝土强度平均值  $m_{f_{cu}}$  由下式计算:

$$m_{f_{cu}} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c}{n} \quad (6)$$

式中:  $m_{f_{cu}}$  为结构或构件测区混凝土强度换算值的平均值, 精确至 0.1 MPa;  $f_{cu}^c$  为结构或构件测区单一测点的混凝土强度换算值;  $n$  为对于单个检测的构件, 取一个构件的测区数; 对批量检测的构件, 取被抽检构件测区数之和。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 超声波平测法实验结果与分析

#### 2.1.1 时-距关系曲线

采用超声波平测法检测混凝土损伤层, 以具有代表性的 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液为例, 对检测结果进行线性回归分析, 得到不同侵蚀时期混凝土的时-距关系曲线, 见图 4。

#### 2.1.2 溶液浓度对混凝土损伤层厚度的影响

根据式(1)~(5), 绘制超声波传播时间-换能器测距关系曲线, 计算出干湿循环作用下不同浓度的硫酸钠溶液中混凝土损伤层特征值, 制得表 2。从表 2 中可以发现,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度相同的条件下, 随着混凝土干湿循环的周期数增加, 混凝土未损伤层的超声波波速  $V_u$  呈现上升趋势, 波速上升速度随着时间的推移逐渐下降, 其原因在于随着时间推移, 混凝土水化导致混凝土的密实度不断增加, 水化速度逐渐降低。混凝土损伤层的超声波波速

$V_d$  呈现快速下降趋势, 下降速度明显快于未损伤层中超声波波速的上升速度。混凝土干湿循环的周期数相同的条件下, 随着硫酸盐溶液浓度的提高, 侵蚀程度越来越高, 侵蚀速度逐渐加快。经过 3 600 d, 侵蚀程度达到最高, 在 10%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  浓度下, 混凝土损伤层厚度达到 19.38 mm。

#### 2.1.3 溶液种类对混凝土损伤层厚度的影响

根据式(1)~(5), 绘制超声波传播时间-换能器测距关系曲线, 计算出干湿循环作用下不同溶液中混凝土损伤层特征值, 制得表 3。从表 3 中可以发现, 溶液中的混凝土损伤层的厚度  $h_f$  大小关系为 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{NaCl} + 0.03\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{NaCl}$ , 且混凝土损伤层中超声波波速  $V_d$  下降速度的大小关系为 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{NaCl} + 0.03\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{NaCl}$ , 这说明了氯盐的存在减缓了混凝土损伤的速率。

### 2.2 回弹法实验结果与分析

采用回弹法检测混凝土抗压强度, 以具有代表性的 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液为例, 得到不同侵蚀时期混凝土的回弹值、碳化深度、抗压强度关系曲线, 如图 5。

#### 2.2.1 溶液浓度对混凝土抗压强度的影响

根据实验测得的平均回弹值、碳化深度和式(6)计算出干湿循环作用下不同浓度溶液中的混凝土抗压强度特征值, 查阅回弹值( $N$ )、碳化深度值( $H$ )~混凝土强度( $f$ )的关系曲线制得表 4。从表 4 中可以发现, 随着干湿循环的周期数增加, 混凝土平均回弹值近似线性上升, 混凝土碳化深度  $H$  不断

表 2 干湿循环作用下不同浓度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液中的混凝土损伤层特征值

溶液种类	600 d			1 200 d			1 800 d		
	$V_u/$	$V_d/$	$h_f/$	$V_u/$	$V_d/$	$h_f/$	$V_u/$	$V_d/$	$h_f/$
	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	mm	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	mm	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	mm
0.03% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	5.08	4.50	7.53	5.10	4.46	8.22	5.16	4.45	10.11
0.05% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	5.21	4.49	9.49	5.18	4.49	10.53	5.21	4.41	11.60
0.1% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	5.19	4.48	10.88	5.22	4.45	11.81	5.27	4.35	13.19
溶液种类	2 400 d			3 000 d			3 600 d		
	$V_u/$	$V_d/$	$h_f/$	$V_u/$	$V_d/$	$h_f/$	$V_u/$	$V_d/$	$h_f/$
	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	mm	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	mm	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	mm
0.03% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	5.21	4.37	11.65	5.26	4.33	12.94	5.28	4.24	14.40
0.05% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	5.26	4.32	12.95	5.24	4.14	14.48	5.34	3.91	16.69
0.1% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	5.35	4.19	15.04	5.38	4.05	17.01	5.38	3.74	19.38

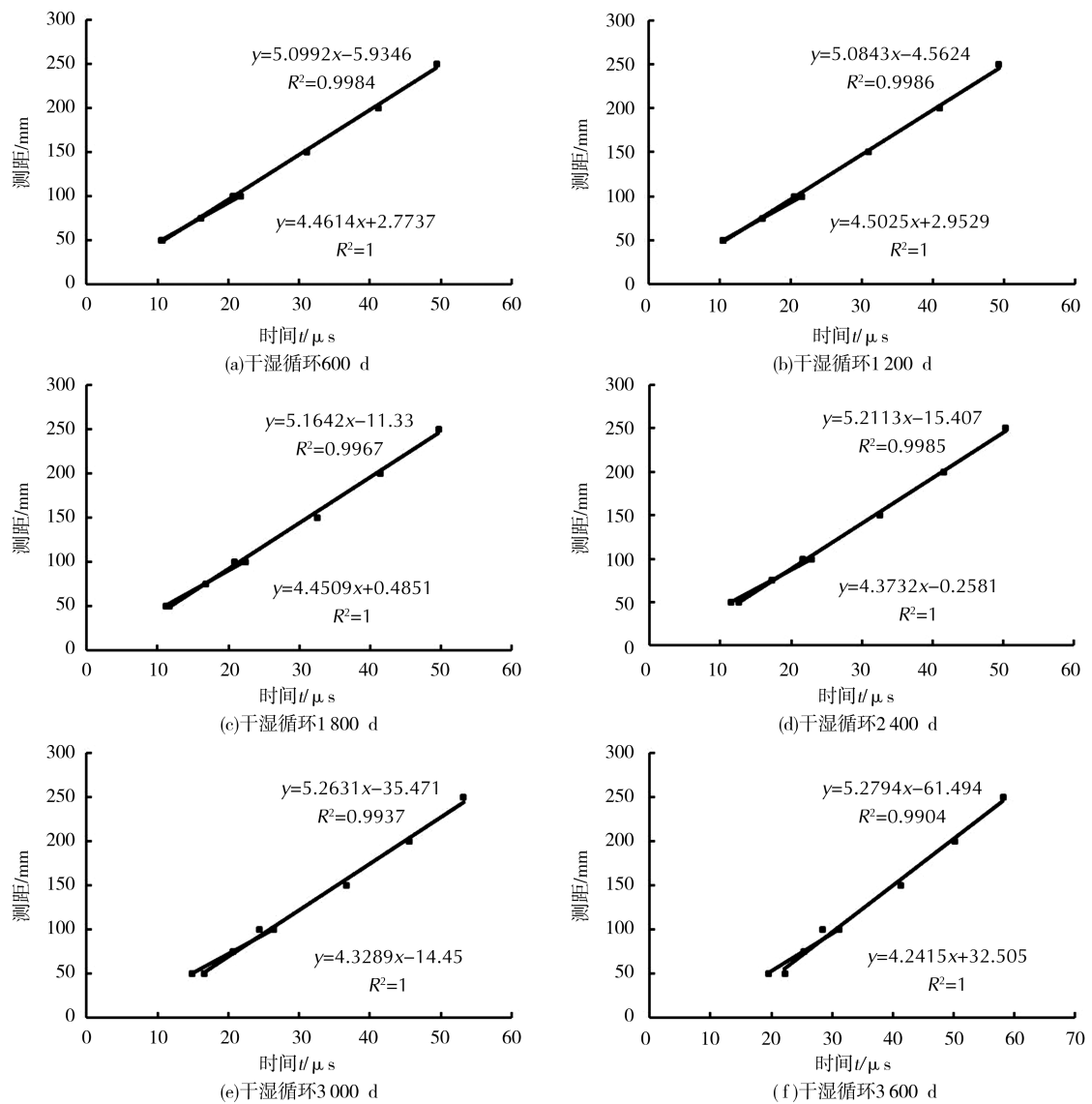


图 4 0.03% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液不同侵蚀时期混凝土时-距关系曲线

表 3 干湿循环作用下不同溶液中的混凝土损伤层特征值

溶液种类	600 d			1 200 d			1 800 d		
	$V_u/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_d/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$h_f/$ mm	$V_u/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_d/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$h_f/$ mm	$V_u/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_d/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$h_f/$ mm
0.03% NaCl	5.01	4.73	5.12	5.02	4.62	7.12	5.06	4.52	9.37
0.03% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5.08	4.50	7.53	5.10	4.46	8.22	5.16	4.45	10.11
0.03% NaCl + 0.03% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5.01	4.62	5.41	5.05	4.51	7.53	5.11	4.49	9.83

溶液种类	2 400 d			3 000 d			3 600 d		
	$V_u/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_d/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$h_f/$ mm	$V_u/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_d/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$h_f/$ mm	$V_u/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_d/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$h_f/$ mm
0.03% NaCl	5.12	4.47	9.99	5.17	4.43	10.56	5.20	4.43	11.81
0.03% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5.21	4.37	11.65	5.26	4.33	12.94	5.28	4.24	14.40
0.03% NaCl + 0.03% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5.15	4.45	10.12	5.20	4.42	11.82	5.25	4.31	13.00

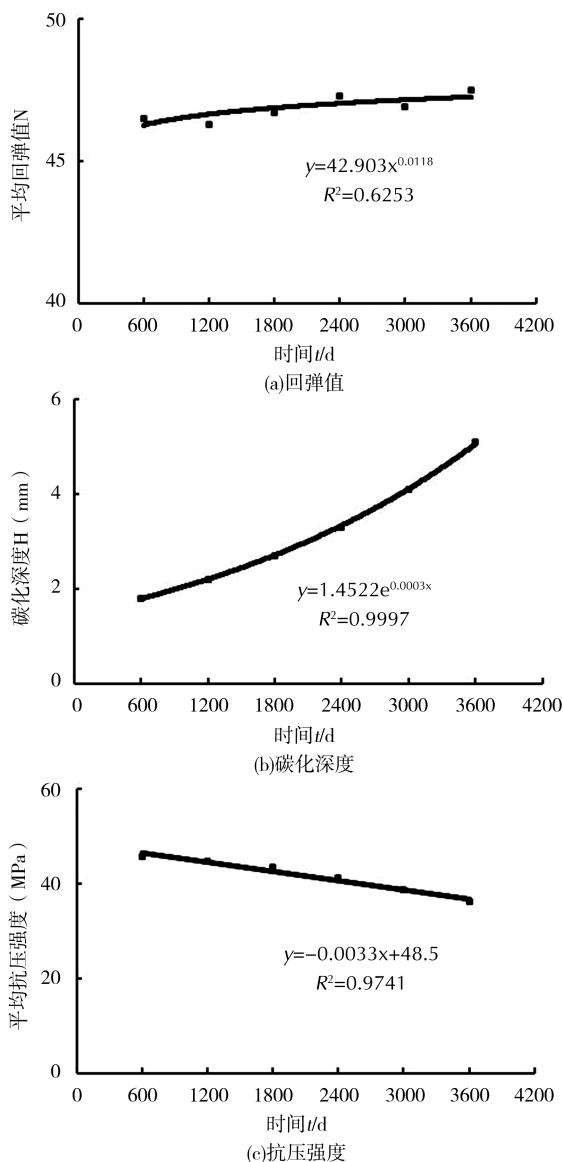


图 5 0.03%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液不同侵蚀时期混凝土的回弹值、碳化深度、抗压强度关系曲线

增加,增速不断增大,与此同时,混凝土强度平均值加速减小,原因在于随着空气中的  $\text{CO}_2$  与混凝土中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成的  $\text{CaCO}_3$  加速了碳化反应。溶液中的混凝土碳化深度  $H$  大小关系为  $0.1\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.05\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{Na}_2\text{SO}_4$ , 抗压强度的大小关系为  $0.03\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.05\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.1\% \text{Na}_2\text{SO}_4$ , 干湿循环次数达到 720 次时,  $0.1\% \text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液中混凝土试件碳化深度达到 6 mm, 抗压强度平均值下降至 36.1 MPa。

## 2.2.2 溶液种类对混凝土抗压强度的影响

根据实验测得的平均回弹值、碳化深度和式(6)计算出干湿循环作用下不同浓度溶液中的混凝土抗压强度特征值, 查阅回弹值( $N$ )、碳化深度值( $H$ ) ~ 混凝土强度( $f$ )的关系曲线制得表 5。从表 5 中可以发现, 各溶液中混凝土平均回弹值均近似线性下降, 混凝土碳化深度  $H$  增速均呈逐渐增大趋势。溶液中的混凝土碳化深度  $H$  大小关系为  $0.03\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{NaCl} + 0.03\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{NaCl}$ , 抗压强度的大小关系为  $0.03\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{NaCl} + 0.03\% \text{Na}_2\text{SO}_4 > 0.03\% \text{NaCl}$ ,  $0.03\% \text{NaCl}$  的加入显著降低了混凝土碳化深度, 混凝土平均抗压强度显著提高。

## 3 结 论

(1) 在干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下, 在前期的 1 年多时间里, 混凝土的损伤层厚度增加至 10 年期的约 50%。随后, 随着时间的推移, 混凝土的损伤层厚度的增速缓慢下降。经过 3 600 d, 混凝土损伤层的厚度基本达到钢筋保护层厚度的 50% ~ 90%。

(下转第 30 页)

表 4 干湿循环作用下不同浓度溶液中的混凝土抗压强度特征值

溶液种类	600 d			1 200 d			1 800 d		
	平均回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	平均回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	平均回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$
0.03% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	46.5	1.8	46.2	46.3	2.2	45.7	46.7	2.7	44.7
0.05% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	42.5	1.9	45.9	42.4	2.3	44.9	42.2	2.8	43.7
0.1% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	46.3	2.0	45.8	46.7	2.4	44.7	46.9	3.0	43.4
溶液种类	2 400 d			3 000 d			3 600 d		
	平均回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	平均回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	平均回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$
0.03% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	47.3	3.3	43.2	46.9	4.1	41.4	47.5	5.1	39.4
0.05% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	41.7	3.5	41.7	41.4	4.4	39.6	40.9	5.5	37.2
0.1% $\text{Na}_2\text{SO}_4$	46.7	3.8	41.1	47.5	4.8	38.8	48.1	6.0	36.1

- [2] 刘佩楼. 中小型河道治理的新型护砌型式探究[J]. 水利技术监督, 2015, 23(4):53-55.
- [3] 阎广聚. 洋河中游段防冲护砌工程优化设计[J]. 河北水利, 2014(3):21.
- [4] 郑敏. 深厚砂基水闸消能防冲设施抗浮分析研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [5] 周名德. 水闸消力池首端厚度计算与破坏原因分析[J]. 江苏水利, 2006(4):39-53.
- [6] 周尚. 张渡湖排水闸闸基冒水涌沙的研究[J]. 人民长江, 1955(11):5-21.
- [7] 张辉, 王鹏, 袁赛. 煤矿井下供水孔施工技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2017(1):100, 106.
- [8] 吴刚, 张自东. 溪洛渡水电站大孔径排水孔施工技术[J]. 青海电力, 2009, 28(增刊1):37-42.
- [9] 孙方超. 吉林省西部供水工程渠道护砌方案设计[J]. 水利规划与设计, 2018(9):165-168.

(上接第 26 页)

表 5 干湿循环作用下不同溶液中的混凝土抗压强度特征值

溶液种类	600 d			1 200 d			1 800 d		
	平均 回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	平均 回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	平均 回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$
0.03% NaCl	45.3	0.3	52.5	45.8	0.7	52.4	46.3	1.2	51.2
0.03% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	46.5	1.8	46.2	46.3	2.2	45.7	47.5	2.7	44.7
0.03% NaCl + 0.03% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	46.1	1.6	48.4	45.3	2.0	43.8	47.6	2.5	46.6

溶液种类	2 400 d			3 000 d			3 600 d		
	平均 回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	平均 回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	平均 回弹值 $N$	碳化深度 $H/\text{mm}$	强度平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$
0.03% NaCl	48.3	1.8	50.0	48.3	2.6	48.1	49.0	3.6	46.2
0.03% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	47.5	3.3	43.2	47.0	4.1	41.4	48.3	5.1	39.4
0.03% NaCl + 0.03% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	47.8	3.2	45.2	48.1	3.8	43.3	49.3	4.9	41.2

(2)在干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下,混凝土碳化深度逐渐增加,增速不断提高。早期混凝土抗压强度下降速度较慢,随着时间的推移,增速逐渐加大。在耦合作用后期,容易产生缝宽  $0.3 \leq \delta < 0.4 \text{ mm}$ ,缝深  $100 \leq h < 200 \text{ cm}$ ,且大于结构厚度  $1/4$  的深层裂缝,局部甚至能产生缝宽  $\delta \geq 0.4 \text{ mm}$ ,缝深  $h \geq 200 \text{ cm}$  或大于  $2/3$  结构厚度的贯穿性裂缝,对水工结构安全造成一定的危害。

(3)NaCl 溶液能显著减少混凝土损伤层厚、减小混凝土表层碳化深度,有效提高混凝土耐久性。

#### 参考文献:

- [1] 金雁南,周双喜. 混凝土硫酸盐侵蚀的类型及作用机理[J]. 华东交通大学学报, 2006(5):4-8.
- [2] 徐存东,高懿伟,程昱,等. 超声波平测法在混凝土盐冻损伤检测中的应用研究[J]. 混凝土, 2019(11):29-33, 38.
- [3] 姜磊. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土劣化规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.