

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210707003

养护条件对BCCP抗氯离子侵蚀性能的影响与比较分析*

胡钰泉¹, 胡少伟², 李文昊³, 汪旭³, 孙兆斌⁴

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 郑州大学黄河实验室, 河南 郑州 450001; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 宁夏青龙管业集团股份有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘要: 通过测试钢筋缠绕预应力钢筒混凝土管道(BCCP)细石混凝土保护层试块在标准养护(S), 低压养护(0.7P), 蒸汽养护(ZS)和蒸汽-低压养护(Z0.7P)条件下的氯离子扩散系数、抗压强度和吸水率, 研究养护方式对BCCP抗氯离子侵蚀能力的影响, 并基于灰色关联分析法, 比较各因素的影响程度。结果表明: 混凝土的抗氯离子侵蚀能力随着养护龄期的增加而增加, 单掺矿粉混凝土始终表现最优, 使用高抗硫水泥会降低混凝土本身抗氯能力。低压和蒸汽养护的混凝土在早期抗氯能力高于标准养护, 但随水化龄期的增长, 逐渐低于标准养护。低压不会对蒸汽养护混凝土内部产生损伤, 反而会提高混凝土的密实度, 因此, 在养护龄期14 d以前, 扩散系数关系为 $S > 0.7P > ZS > Z0.7P$, 28 d以后, 变为 $ZS > Z0.7P > 0.7P > S$; 此外, 养护气压和养护湿度对混凝土抗氯离子渗透性影响最大, 其次是养护温度, 养护龄期的影响最小。

关键词: 钢筋缠绕预应力钢筒混凝土压力管; 混凝土; 养护方式; 氯离子扩散系数; 配合比; 关联系数

中图分类号: TV332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0559-09

Influence and Comparative Analysis of Curing Conditions on Chloride Resistance of BCCP

HU Yuquan¹, HU Shaowei², LI Wenhao³, WANG Xu³, SUN Zhaobin⁴

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Ningxia Qinglong Pipe Group Co., Ltd., Yinchuan 750000, China)

Abstract: The chloride diffusion coefficients, compressive strength, and water absorption rates of fine aggregate concrete cover blocks of Bar-wrapped Cylinder Concrete Pressure Pipes (BCCPs) were examined under standard curing (s), low pressure curing (0.7p), steam curing (ZS), and steam-low pressure curing (Z0.7p) to study the influence of curing methods on BCCP's resistance to chloride. The influence degree of each factor was compared using grey correlation analysis. Results show that the resistance to chloride ingress of concrete increased with the increase of curing age and the chloride resistance of concrete with single mineral powder demonstrated the best performance. The utilization

* 收稿日期:2021-07-07;修回日期:2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51739008)、重庆市自然科学基金创新群体项目(cstc2020jcyj-cxttX0003)、重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-gksbx0013)资助

作者简介: 胡钰泉(1991—),男,博士研究生。主要从事混凝土结构耐久性能研究。E-mail: hhhyuquan@163.com

通讯作者: 胡少伟(1969—),男,教授,博导。主要从事混凝土损伤断裂与结构安全评价研究。E-mail: hushaowei@cqu.edu.cn

of high sulfate-resistant cement will reduce the chlorine resistance of concrete. At early stages, the resistance to chloride ingress of concrete cured under low pressure (0.7P) and steam (ZS) was higher than that cured under standard conditions (S), while over time, this trend reversed. Furthermore, 0.7P will not damage the interior of steam cured concrete (Z0.7P), but will improve the compactness of concrete. Therefore, the chloride diffusion coefficient of concrete is $S > 0.7P > ZS > Z0.7P$ prior to 14 days of curing age, while it will change to $ZS > Z0.7P > 0.7P > S$ after 28 days. In addition, curing air pressure and humidity have the greatest influence on the chloride ion permeability of concrete, followed by curing temperature, and curing age has the least influence.

Keywords: BCCP; concrete; curing method; chloride diffusion coefficient; mix proportion; correlation coefficient

0 引言

近年来,预应力钢筒混凝土管(PCCP)由于外保护层耐久性不足导致爆管的事故屡见不鲜,给人们生命财产安全造成严重威胁。为保障输水管线的安全运行,钢筋缠绕预应力钢筒混凝土压力管^[1](BCCP)就是针对 PCCP 耐久性不足研发的新产品,该管型继承了 PCCP 管高工压、高抗渗性、高耐久性、高密封性的特点,同时将最外层 30 mm 厚的砂浆保护层替换为 50 mm 厚的细石混凝土保护层,大大提高了管道自身的耐久性能,该管型已在国内多项输调水工程中得到大量应用,并逐渐在全国范围内推广应用。

同 PCCP 养护方式一样,BCCP 在生产过程中,一般也采用蒸汽养护,一方面可以加快模具的周转速率,提高生产效率;另一方面可以为管道提供早期强度,方便管道尽快运输至项目现场。有研究表明^[2-5],由于蒸汽养护过程水化反应剧烈,同时产生大量气泡,会导致混凝土内部大孔增加,孔隙结构恶化,从而削弱混凝土保护层的抗氯离子渗透性能;蒸汽养护后混凝土的脱模强度为 28 d 龄期时强度的 70% 左右,说明蒸养完成后的混凝土仍有一段强度发展期,这同标准养护混凝土一样,随着龄期增长,混凝土性能逐渐变优。值得注意的是,BCCP 在我国西部高原地区应用广泛,而在该环境中,BC-CP 长期处于低压、低湿、温差大的环境中,混凝土保护层所表现出的性能与低海拔地区势必不同。朱长华等^[6]发现气压降低会抑制引气剂的效果,从而降低混凝土的耐久性能,与李雪峰等^[7-8]和李立辉等^[9]的研究结论一致。X.Gex 等^[10]通过测试混凝土的抗压和劈裂强度,认为低压会对混凝土力学性能

产生不利影响,与何锐等^[11]研究结果一致。

氯离子是影响钢混结构耐久性最主要的因素,虽然目前关于氯离子侵蚀方面的研究很多,如在水灰比^[12]、掺合料^[13]、水化时间^[14]、氯离子的结合能力^[15]、环境的温湿度^[16]、干湿循环^[17]、冻融循环^[18]以及其他离子的耦合作用^[19]等方面取得的研究成果可以借鉴到 BCCP 上来,但结合 BCCP 的实际生产应用情况,上述研究均未对低压、蒸汽养护下混凝土的抗氯能力做出直接评判。为此,以 BCCP 细石混凝土保护层为研究对象,研究养护龄期、低压低湿和蒸汽养护对细石混凝土抗氯离子侵蚀能力的影响规律,评价各因素对管道耐久性影响程度的大小,为保障高原地区输水管道的安全运行提供依据。

1 试验

1.1 原材料

所用水泥为宁夏青铜峡水泥股份有限公司生产的 P.O42.5R 普通硅酸盐水泥和 P.HSR42.5 高抗硫酸盐水泥,水泥的主要化学成分及性能指标分别见表 1 和表 2。

所用掺合料有青铜峡铝业发电有限责任公司生产的 II 级粉煤灰和宁夏金筑新材料科技有限公司生产的 S95 矿渣微粉,主要化学成分见表 3。减水剂为宁夏海森建材有限公司生产的 HPWR-A 型聚羧酸高性能减水剂,用量占胶凝材料质量的 1.2%。所用细骨料为天然中砂,细度模数为 2.6,表观密度为 2 628 kg/m³。所用粗骨料为连续级配碎石,公称直径为 5~16 mm。

表1 水泥的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of cement

类别	P.O42.5R	P.HSR42.5
SiO ₂	22.06	19.10
CaO	59.61	64.57
MgO	2.51	2.40
Fe ₂ O ₃	4.19	6.00
Al ₂ O ₃	5.96	2.89
K ₂ O	0.90	0.67
SO ₃	3.71	3.71
Na ₂ O	0.32	0.33
SrO	0.16	0.17

表2 水泥的主要性能指标

Table 2 Main performance parameters of cement

类别	P.O42.5R	P.HSR42.5
安定性	无裂纹、无翘曲	
初凝/min	177	230
终凝/min	238	273
3 d抗压强度/MPa	29.9	29.5
28 d抗压强度/MPa	51.1	50.4
3 d抗折强度/MPa	5.7	5.8
28 d抗折强度/MPa	8.3	8.1

表3 矿物掺合料主要化学成分

Table 3 Main chemical composition of the mineral admixture

类别	粉煤灰	矿粉
SiO ₂	49.3	31.15
CaO	4.32	40.08
MgO	1.16	7.19
Fe ₂ O ₃	6.26	0.69
Al ₂ O ₃	32.18	14.28
K ₂ O	1.81	0.53
SO ₃	1.35	2.52
Na ₂ O	1.27	0.70
SrO	0.12	0.08
MnO	0.80	0.03
P ₂ O ₅	0.48	0.04

1.2 配合比

结合 BCCP 细石混凝土保护层的实际应用情况,共设计四种配合比,见表4。

表4 细石混凝土配合比

Table 4 Mix proportions of fine aggregate concrete

类别	1D	2F	3M	4HS
水泥	405	405	405	405
粉煤灰	70	105	—	70
矿粉	35	—	105	35
砂	710	710	710	710
石子	1 121	1 121	1 121	1 121
减水剂	6.12	6.12	6.12	6.12
水	150	150	150	150

注:配合比4HS所用的水泥种类是高抗硫酸盐水泥,其他拌和材料均同1D

1.3 养护条件

设计了以下四种养护方式:(1)浇筑成型24 h后脱模放入标准养护室养护(温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$,湿度 $\geq 95\%$),用于实验的对比组,记为S;(2)浇筑成型24 h后脱模放入0.7个标准大气压环境下低压养护(温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$,湿度约60%),用于模拟高原的低压低湿环境,记为0.7P;(3)浇筑完成后进行蒸汽养护,是BCCP保护层的常规养护方式,记为ZS;(4)蒸汽养护后再进行低压养护,用于模拟BCCP在高原地区生产应用时所处的环境,记为Z0.7P。

BCCP在生产过程中,蒸养制度一般为:静停1 h,以 $\leq 22^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速度升温至 60°C 恒温7 h,再以 $\leq 22^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速度降至环境温度,具体的蒸养制度如图1(a)所示。低压养护设备为JD-6004型模拟高空低压试验箱,蒸养设备和低压养护设备如图1(b)和图1(c)。

1.4 试验方法

1.4.1 RCM法

RCM法是基于混凝土内部氯离子非稳态电扩散的试验方法,用于表征混凝土抗氯离子渗透性能,测试具体过程参考规范[20],扩散系数计算方法见式(1),试验原理和测试过程如图2所示。

$$D_{\text{RCM}} = \left[0.0239(273 + T)L / (U - 2)t \right] g \left[X_d - 0.0238 \sqrt{(273 + T)LX_d / (U - 2)} \right] \quad (1)$$

式中, D_{RCM} 为氯离子非稳态扩散系数(m^2/s); T 为试验初始温度和终止温度的均值($^\circ\text{C}$); L 为试件的实际厚度(mm); U 为试验电压(V); t 为试验持续时间; X_d 为氯离子的平均渗透深度。

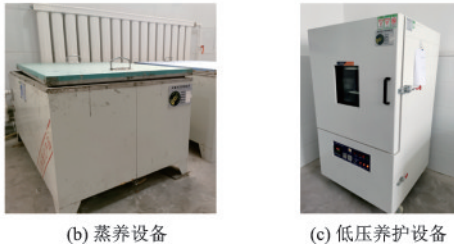
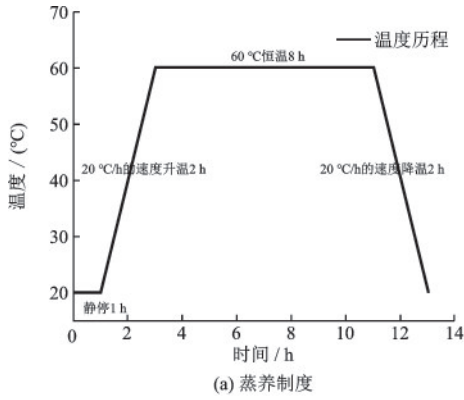


图1 蒸养制度和养护设备

Fig.1 Steam curing system and curing equipment

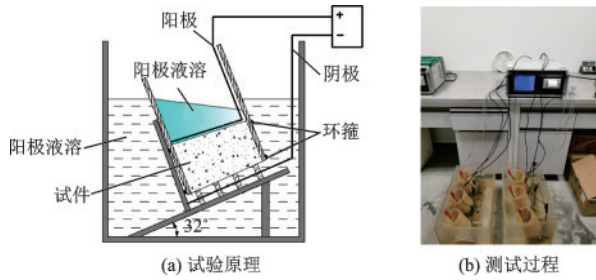


图2 RCM试验

Fig.2 RCM test

1.4.2 抗压强度测试

养护条件发生改变必然会影响混凝土的宏观力学性能。浇筑 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,测定混凝土的抗压强度。为获得可靠的试验数据,每组取三个有效样本的平均值作为结果。

1.4.3 吸水率测试

试件养护到试验龄期后,取出试件在 105 °C 烘箱中烘至质量恒定,测得干重 m_d , 然后,再将试件浸入水中至质量恒定时测得始终 m_s , 基于测试结果,吸水率可以根据式(2)计算。

$$\eta = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (2)$$

式中, η 是试件吸水率(%); m_s 是湿重(g); m_d 是干重(g)。

2 各因素影响机理分析

实际生产应用中, BCCP 混凝土保护层的常规配合比是 1D, 由于蒸养完成后, 在管道未养护至 28 d 龄期时可能会被运输至项目现场, 为此, 对四种不同养护条件下的 1D 试样进行了 3 d、7 d、14 d、28 d 和 180 d 的 RCM 试验和抗压强度试验, 结果见表 5。

表 5 不同养护方式下混凝土氯离子扩散系数 (D_{RCM} : $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) 和抗压强度 (σ : MPa)

Table 5 Chloride diffusion coefficient (D_{RCM} : $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) and compressive strength of the concrete under different curing methods (σ : MPa)

养护龄期		养护条件			
		S	0.7P	ZS	Z0.7P
3 d	D_{RCM}	11.4	8.8	6.6	6.2
	σ	25.3	28.7	42.3	40.8
7 d	D_{RCM}	7.8	6.6	5.6	4.7
	σ	28.6	32.6	48.1	50.2
14 d	D_{RCM}	4.3	4.3	4.6	3.9
	σ	43.8	45.6	50.7	53.9
28 d	D_{RCM}	2.6	3.2	4.4	3.6
	σ	55.6	54.3	53.8	56.2
90 d	D_{RCM}	2.1	2.8	3.7	3.1
	σ	63.5	58.2	56.8	57.3

从提高 BCCP 保护层的耐久性、节约成本和简化成型工艺的角度出发, BCCP 在生产中一直探索应用不同配合比混凝土, 基于此, 对 2F、3M、4HS 三种配比混凝土的氯离子扩散系数、抗压强度和吸水率进行测试, 结果分别见表 6 和表 7。

2.1 养护龄期对混凝土抗氯离子侵蚀能力的影响

根据表 5 可得, 随着养护龄期的增加, 氯离子扩散系数均逐渐减小, 抗压强度增大, 说明无论养护条件如何, 混凝土的抗氯离子侵蚀能力随着龄期的增加逐渐提高。在 28 d 龄期之前, 扩散系数递减速率很快, 如当采用 S 养护方式时, 28 d 的扩散系数比 3 d 的扩散系数减小了约 75%, 养护龄期超过 28 d 后, 扩散系数的递减速率明显变慢, 养护 90 d 比养护 28 d 的扩散系数仅减小 15% 左右。与此同时, 抗压强度在前 14 d 的增长速率较快, 14 d 以后增长速率减慢, 如采用 S 养护, 14 d 时的抗压强度比 3 d 的抗压强度增长了 73%, 而 28 d 和 90 d 的抗压强度仅比 14 d 的抗压强度分别增长了 27% 和 45%。

表6 不同配比混凝土的氯离子扩散系数($D_{RCM}:10^{-12} m^2/s$)和抗压强度($\sigma:MPa$)

Table 6 Chloride diffusion coefficient ($D_{RCM}:10^{-12} m^2/s$) and Compressive strength ($\sigma:MPa$) of the concrete with different mix proportions

配合比	养护龄期		养护条件			
			S	0.7P	ZS	Z0.7P
2F	28 d	D_{RCM}	3.2	5.3	6.7	4.1
		σ	47.9	45.8	52.2	53.6
	90 d	D_{RCM}	2.0	2.1	3.1	2.6
		σ	60.2	59.1	57.3	56.8
3M	28 d	D_{RCM}	1.9	2.5	3.6	2.9
		σ	56.7	54.3	52.6	55.4
	90 d	D_{RCM}	0.8	1.1	1.5	1.3
		σ	65.1	60.8	58.3	59.6
4HS	28 d	D_{RCM}	4.0	4.8	5.2	4.6
		σ	56.3	53.6	55.4	56.6
	90 d	D_{RCM}	2.6	3.1	4.5	3.9
		σ	62.7	60.9	59.2	58.7

表7 不同配比混凝土的吸水率

Table 7 Water absorption rates of the concrete with different mix proportions 单位:%

养护条件	1D		2F		3M		4HS	
	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
S	6.3	4.8	6.5	4.5	6.1	3.9	5.8	4.1
0.7P	6.7	5.6	6.9	5.0	6.1	4.4	6.3	5.2
ZS	7.2	6.1	7.4	6.2	6.6	4.9	6.8	5.5
Z0.7P	7.0	6.0	7.0	5.8	6.3	4.5	6.4	5.6

2.2 低压低湿养护对混凝土抗氯离子侵蚀能力的影响

如图3所示,采用0.7P的养护方式,在早期的3 d、7 d龄期时,氯离子扩散系数小于S养护,抗压强度略大于S养护,表现出较好的抗氯离子侵蚀能力;而在14 d以后,扩散系数较S养护更大,抗压强度更小,且差值有逐渐扩大的趋势,表明其抗氯离子侵蚀能力弱于S养护。根据道尔顿分压定律可知,当环境气压降低时,混凝土表面的水分蒸发速率加快,在3 d和7 d的养护龄期,由于混凝土内部的导湿系数较低,早期混凝土内部的水分几乎不会散失的空气中,表层水分的少量蒸发减少了小部分游离水,变相的提高了表层混凝土的密实度和强度,因而混凝土早期的抗氯离子侵蚀能力得到短暂的提高。但随时水化龄期的增长,水分蒸发越发强烈,在混凝土内部形成湿度梯度,混凝土内部水分

在向表面扩散的过程中形成孔隙通道,导致孔结构恶化,孔隙率增大,且由于水分缺失过多,导致混凝土水化不充分,水化产物减少,从而造成其抗氯离子侵蚀能力低于S养护。

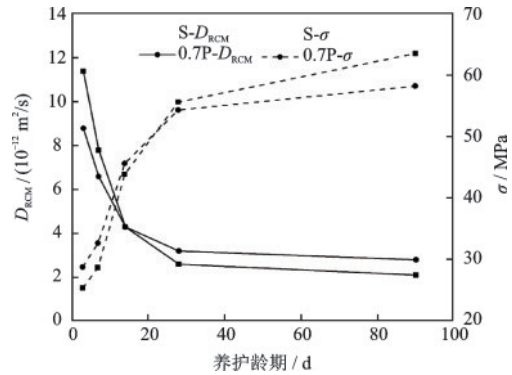


图3 S养护和0.7P养护下的氯离子扩散系数
Fig.3 Chloride diffusion coefficient under S and 0.7P curing

2.3 蒸汽养护对混凝土抗氯离子侵蚀能力的影响

如图4所示,在龄期14 d以前,四种配合比混凝土的扩散系数的大小规律一致,皆为 $S > 0.7P > ZS > Z0.7P$,在28 d以后,大小关系变为 $ZS > Z0.7P > 0.7P > S$ 。这是因为ZS和Z0.7P一开始进行了蒸汽养护,具备了早期强度,在14 d以前,扩散系数较小,抗压强度较大,表现出了较好的抗氯离子侵蚀能力,而他们28 d龄期的扩散系数和抗压强度与3 d龄期相比相差不大,且基本与90 d龄期时持平则是因为水泥在蒸养期间已完成了大部分的水化反应。90 d时,S和0.7P的扩散系数均小于ZS和Z0.7P,这是由于蒸汽养护过程中,水化反应剧烈,产生大量的气泡,使得混凝土内部孔隙体积疏松,总孔隙率变高,对混凝土造成一定的初始损伤,同时容易导

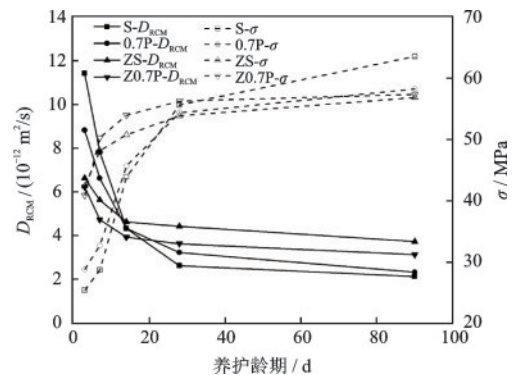


图4 四种养护方式下的氯离子扩散系数和抗压强度
Fig.4 Chloride diffusion coefficients and compressive strength of the concrete under four different curing methods

致水化产物较快地在包裹在未水化的水泥颗粒周围,抑制了后期的水化进程,因而ZS和Z0.7P后期的抗氯离子侵蚀性能相对较弱。

此外,从图4还可以发现,ZS和Z0.7P两种养护方式所获得的扩散系数和抗压强度数值比较接近,发展规律也非常相似,但Z0.7P的扩散系数略低于ZS,这是由于气压降低,虽然会加快混凝土水分的蒸发,但蒸养后的混凝土内部水化反应在蒸养期间已基本完成,不再需要过多的水分,且具备了较高的强度,水分的缓慢散失不再会对混凝土内部产生损伤,反而在一定程度上减小了游离水数量,进而提高了混凝土的密实度。

2.4 胶凝材料对混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响

从表5和表6中可以得出,无论养护方式如何,在28d龄期和90d龄期时,3M的扩散系数均最小,表明单掺矿粉混凝土试件抗氯离子侵蚀能力最优。这是由于采用的S95矿粉活性指数较高,矿粉中的活性成分(如活性硅)与对混凝土强度有不利影响的水化产物Ca(OH)₂发生二次反应(火山灰效应)生成C-S-H凝胶,一方面填充了内部的孔隙和裂缝,提高了混凝土的密实度,另一方面减弱了Ca(OH)₂的择优取向,改善了界面过渡区的微力学性质。此外,矿粉颗粒更加细小,比表面积更大,对氯离子的吸附能力较强,水化后生成的水化铝酸钙与氯离子结合生成Friedel盐,从而进一步提高了混凝土抗氯离子渗透性。

图5、图6和图7分别给出了1D和2F两种配比混凝土在28d龄期和90d龄期时的扩散系数、抗压强度和吸水率。如图5所示,28d龄期时,无论何种养护方式,2F的扩散系数均明显大于1D的扩散系数;在90d时,2F的扩散系数与1D比较接近,说明单掺粉煤灰的混凝土扩散系数受龄期影响较大,这是由于粉煤灰的活性相对较低,早期的水化主要是水泥进行,粉煤灰掺量越高,早期的水化反应越不充分,因而扩散系数会较大;但粉煤灰的主要结构形式为表面光滑、粒度细的球状玻璃体,随着水化龄期的延长,粉煤灰同时发挥火山灰效应和微集料效应,逐渐提高了混凝土的密实度,扩散系数也随之降低。早期混凝土内部不密实,氯离子扩散速度相对较快,但随着龄期的增长,混凝土水化更加充分,强度、密实度均显著提高,如图6所示,28d龄期时,2F的抗压强度远小于S,而90d龄期时,二者

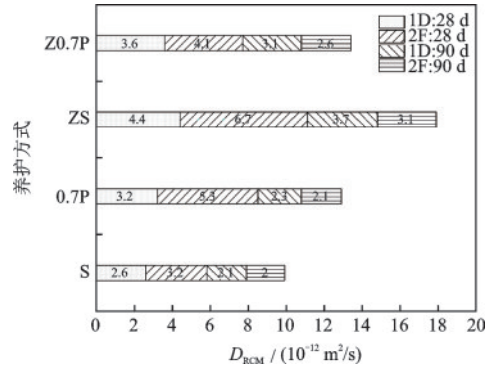


图5 1D和2F在四种养护方式下的氯离子扩散系数
Fig.5 Chloride diffusion coefficients of 1D and 2F under four different curing methods

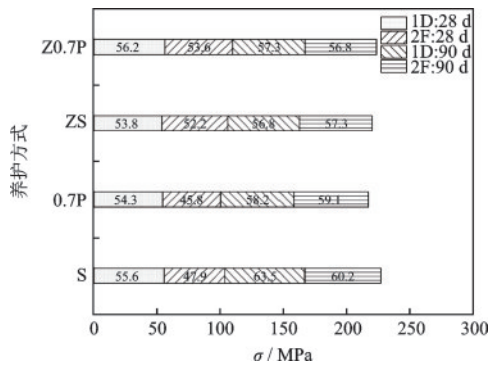


图6 1D和2F在四种养护方式下的抗压强度
Fig.6 Compressive strength of 1D and 2F under four different curing methods

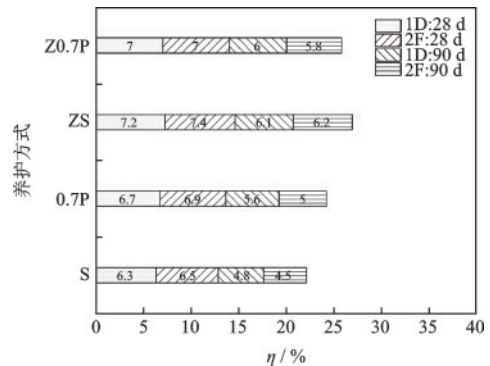


图7 1D和2F在四种养护方式下的吸水率
Fig.7 Water absorption of 1D and 2F under four different curing methods

的抗压强度几乎相等;而图7的吸水率与扩散系数的变化规律几乎一致,佐证了上述研究结论的正确性。

此外,通过对比表6和表7,HS相较于1D的扩散系数,在28d和180d龄期时,4HS试验获得的氯离子扩散系数均较大,说明采用高抗硫水泥代替普

通硅酸盐水泥,降低了混凝土抗氯离子渗透的能力,该结果与文献[21-22]研究结论一致,但同时发现抗压强度和开孔率与1D相比,却比较接近。这主要是由于P.HSR作为高抗硫水泥,必须严格控制C3A的含量,一般不能超过4%,因而其对氯离子的结合能力较弱,随着龄期的延长,这种劣势将越发明显。该结论适用于仅存在单一氯盐侵蚀的环境中,无法代表硫酸盐-氯盐耦合侵蚀环境中的规律。

3 影响因素显著性分析

由分析可知,养护龄期、养护气压、养护湿度和养护温度等都会对混凝土抗氯离子渗透性产生不同程度的影响,为了比较四种量纲不同的因素对混凝土抗氯离子侵蚀能力的影响程度,根据灰色系统理论,利用灰色关联分析法^[2,23]对氯离子扩散系数和抗压强度与其关联因子进行灰色关联分析,评价影响混凝土抗氯离子侵蚀能力各因素的重要程度。

灰色关联分析法是一种用于探寻不同系统或不同影响因素之间相关性的数据分析方法,理论模型简单、适用性强,基于数学计算结果来评价各个因素对变量结果的影响程度。根据试验结果,选择20个混凝土试块的氯离子扩散系数 D_{RCM} 和抗压强度 f 分别作为参考序列 $\{X_D(k) | k=1, 2, \dots, 20\}$, $\{X_f(k) | k=1, 2, \dots, 20\}$,以20个试块的实际养护气压(KPa)、养护湿度(%)、养护龄期(d)和养护温度(°C)分别作为比较序列 $\{X_i(k) | i=1, 2, \dots, 6; k=1, 2, \dots, 20\}$,试验所获数据见表8。

首先应用公式(3)对表8中数据进行均值化处理,得到均值象序列,计算结果见表9。

$$\tilde{X}(k) = \frac{20X(k)}{\sum_{k=1}^{20} X(k)} \quad (3)$$

关联系数 $L_{Di}(k)$ 的计算采用公式(4),关联度 r_{Di} 的计算采用公式(5)。 $L_{fi}(k)$ 和 r_{fi} 的计算方法同 $L_{Di}(k)$ 和 r_{Di} 。

$$L_{Di} = \frac{\min_i \min_k |\tilde{X}_D(k) - X_i(k)| + \epsilon \max_i \max_k |\tilde{X}_D(k) - X_i(k)|}{|\tilde{X}_D(k) - X_i(k)| + \epsilon \max_i \max_k |\tilde{X}_D(k) - X_i(k)|} \quad (4)$$

$$r_{Di} = \frac{1}{20} \sum_{k=1}^{20} L_{Di}(k) \quad (5)$$

表8 灰色关联分析法初始数据

Table 8 Initial data for grey correlation analysis

编号	扩散系数 X_D	抗压强度 X_f	气压 X_1	湿度 X_2	龄期 X_3	养护温度 X_4
1	11.4	25.3	100	97	3	20
2	7.8	28.6	100	97	7	20
3	4.3	43.8	100	97	14	20
4	2.6	55.6	100	97	28	20
5	2.1	63.5	100	97	90	20
6	8.8	28.7	70	70	3	20
7	6.6	32.6	70	70	7	20
8	4.3	45.6	70	70	14	20
9	3.2	54.3	70	70	28	20
10	2.8	58.2	70	70	90	20
11	6.6	42.3	100	97	3	60
12	5.6	48.1	100	97	7	60
13	4.6	50.7	100	97	14	60
14	4.4	53.8	100	97	28	60
15	3.7	56.8	100	97	90	60
16	6.2	40.8	70	70	3	60
17	4.7	50.2	70	70	7	60
18	3.9	53.9	70	70	14	60
19	3.6	52.6	70	70	28	60
20	3.1	57.3	70	70	90	60

表9 各序列均值象

Table 9 Mean image of each sequence

编号	\tilde{X}_D	\tilde{X}_f	\tilde{X}_1	\tilde{X}_2	\tilde{X}_3	\tilde{X}_4
1	2.27	0.54	1.18	1.16	0.11	0.50
2	1.55	0.61	1.18	1.16	0.25	0.50
3	0.86	0.93	1.18	1.16	0.49	0.50
4	0.52	1.18	1.18	1.16	0.99	0.50
5	0.42	1.35	1.18	1.16	3.17	0.50
6	1.75	0.61	0.82	0.84	0.11	0.50
7	1.31	0.69	0.82	0.84	0.25	0.50
8	0.86	0.97	0.82	0.84	0.49	0.50
9	0.64	1.15	0.82	0.84	0.99	0.50
10	0.56	1.23	0.82	0.84	3.17	0.50
11	1.31	0.90	1.18	1.16	0.11	1.50
12	1.12	1.02	1.18	1.16	0.25	1.50
13	0.92	1.08	1.18	1.16	0.49	1.50
14	0.88	1.14	1.18	1.16	0.99	1.50
15	0.74	1.20	1.18	1.16	3.17	1.50
16	1.24	0.87	0.82	0.84	0.11	1.50
17	0.94	1.06	0.82	0.84	0.25	1.50
18	0.78	1.14	0.82	0.84	0.49	1.50
19	0.72	1.12	0.82	0.84	0.99	1.50
20	0.62	1.22	0.82	0.84	3.17	1.50

根据表9中的数据,利用公式 $\Delta_{D_i} = |\tilde{X}_D(k) - \tilde{X}_i(k)|$ 和 $\Delta_{\beta_i} = |\tilde{X}_r(k) - \tilde{X}_i(k)|$ ($k=1, 2, \dots, 20; i=1, 2, 3, 4$) 计算各比较序列均值象和参考序列均值象的绝对差,计算结果见表10。

表10 各参考序列与比较序列均值象的绝对差值
Table 10 Absolute difference of the mean image between the reference sequence and comparison sequence

k	Δ_{D1}	Δ_{D2}	Δ_{D3}	Δ_{D4}	$\Delta_{\beta1}$	$\Delta_{\beta2}$	$\Delta_{\beta3}$	$\Delta_{\beta4}$
1	1.09	1.11	2.16	1.77	0.64	0.62	0.43	0.04
2	0.37	0.39	1.30	1.05	0.57	0.55	0.36	0.11
3	0.32	0.30	0.37	0.36	0.25	0.23	0.44	0.43
4	0.66	0.64	0.47	0.02	0.00	0.02	0.19	0.68
5	0.76	0.74	2.75	0.08	0.17	0.19	1.82	0.85
6	0.93	0.91	1.64	1.25	0.21	0.23	0.50	0.11
7	0.49	0.47	1.06	0.81	0.13	0.15	0.44	0.19
8	0.04	0.02	0.37	0.36	0.15	0.13	0.48	0.47
9	0.18	0.20	0.35	0.14	0.33	0.31	0.16	0.65
10	0.26	0.28	2.61	0.06	0.41	0.39	1.94	0.73
11	0.13	0.15	1.20	0.19	0.28	0.26	0.79	0.60
12	0.06	0.04	0.87	0.38	0.16	0.14	0.77	0.48
13	0.26	0.24	0.43	0.58	0.10	0.08	0.59	0.42
14	0.30	0.28	0.11	0.62	0.04	0.02	0.15	0.36
15	0.44	0.42	2.43	0.76	0.02	0.04	1.97	0.30
16	0.42	0.40	1.13	0.26	0.05	0.03	0.76	0.63
17	0.12	0.10	0.69	0.56	0.24	0.22	0.81	0.44
18	0.04	0.06	0.29	0.72	0.32	0.30	0.65	0.36
19	0.10	0.12	0.27	0.78	0.30	0.28	0.13	0.38
20	0.20	0.22	2.55	0.88	0.40	0.38	1.95	0.28

根据计算结果, Δ_{D_i} 的最小值 $\min_i \min_k |\tilde{X}_D(k) - \tilde{X}_i(k)|$ 是0.02,最大值 $\max_i \max_k |\tilde{X}_D(k) - \tilde{X}_i(k)|$ 是2.75; Δ_{β_i} 的最小值 $\min_i \min_k |\tilde{X}_r(k) - \tilde{X}_i(k)|$ 是0.00,最大值是 $\max_i \max_k |\tilde{X}_r(k) - \tilde{X}_i(k)|$ 是1.97。由式(4)和式(5)计算得到各比较序列与参考序列之间的关联度分别为: $r_{D1}=0.83, r_{D2}=0.83, r_{D3}=0.62, r_{D4}=0.75; r_{\beta1}=0.82, r_{\beta2}=0.83, r_{\beta3}=0.62, r_{\beta4}=0.72$ 。

即各个关联因子对混凝土抗氯离子渗透能力的影响大小为:养护气压=养护湿度>养护温度>养护龄期。因此,当BCCP在高原环境下服役时,应加强监测管道预应力筋是否发生锈蚀,同时可以采用阴极保护或涂刷环氧煤沥青防腐涂层等措施提高管道本身的抗氯离子侵蚀能力。

4 结 论

(1)无论养护条件如何,混凝土的抗氯能力随着龄期的增加逐渐提高;在28 d之前,氯离子扩散系数递减速率很快,超过28 d后,氯离子扩散系数的递减速率明显变慢。当环境气压降低时,混凝土在14 d之前抗氯离子侵蚀能力高于标准养护,但随时水化龄期的增长,水分蒸发越发强烈,导致混凝土孔结构恶化、孔隙率增大和水化不充分,其抗氯离子侵蚀能力逐渐小于标准养护。

(2)在养护14 d以前,四种配合比混凝土的氯离子扩散系数的大小规律一致,皆为 $S>0.7P>ZS>Z0.7P$,在28 d以后,大小关系变为 $ZS>Z0.7P>0.7P>S$ 。蒸汽养护会提高混凝土早期的强度和抗氯能力,但会对混凝土造成一定的初始损伤,影响后期强度和抗氯能力的发展。此外,当环境气压降低时,水分的缓慢散失不再会对蒸养混凝土内部产生损伤,反而一定程度上减小了游离水数量,提高了混凝土的密实度。

(3)无论养护方式如何,养护龄期为多久,单掺矿粉混凝土试件的抗氯能力最优;而单掺加粉煤灰的混凝土抗氯能力受龄期影响较大,随着龄期的增长,其氯离子扩散系数、抗压强度和吸水率等指标逐渐变优。此外,采用高抗硫水泥代替普通硅酸盐水泥,会降低混凝土抗氯能力。

(4)养护气压和养护湿度对混凝土抗氯离子渗透性影响最大,其次是养护温度,而养护龄期的影响最小。因此,对于低压低湿的高原地区,在应用BCCP时,需结合使用防腐涂层,以提高管道自身的抗氯离子侵蚀能力。

参考文献:

- [1] 钢筋缠绕预应力钢筒混凝土管道技术规范:DB/T 1161—2020[S]. 宁夏:宁夏回族自治区市场监督管理局, 2020.
- [2] 彭波. 蒸养制度对高强混凝土性能的影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
Peng B. Influence of steam-curing system on the performance of high strength concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [3] 陈磊, 陈国新, 苏枋. 蒸养混凝土力学性能国内外研究现状[J]. 粉煤灰综合利用, 2016(5): 61-64.
Chen L, Chen G X, Su F. Study on the mechanical properties of steam cured concrete at home and abroad [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2016(5): 61-

64. (in Chinese)
- [4] 刘伟, 贺志敏, 谢友均, 等. 蒸养混凝土抗氯离子渗透性能研究[J]. 混凝土, 2005(6): 56-60.
Liu W, He Z M, Xie Y J, et al. Chloride ion penetration resistance of steam curing concrete [J]. Concrete, 2005(6):56-60. (in Chinese)
- [5] 何智海, 刘运华. 蒸养粉煤灰混凝土抗氯离子渗透性能研究[J]. 混凝土, 2008(4): 4-7.
He Z H, Liu Y H. Performance of chlorid ion permeability resistance of steamed fly ash concrete [J]. Concrete, 2008(4):4-7. (in Chinese)
- [6] 朱长华, 谢永江, 张勇, 等. 环境气压对混凝土含气量的影响[J]. 混凝土, 2004(4): 9-10.
Zhu C H, Xie Y J, Zhang Y, et al. The effect of air pressure of environment on concrete's air-containing [J]. Concrete, 2004(4): 9-10. (in Chinese)
- [7] 李雪峰, 付智, 罗翥, 等. 高原低气压环境对新拌混凝土含气量的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(5):1046-1051.
Li X F, Fu Z, Luo Z, et al. Effect of low-pressure in plateau environment on air content of fresh concrete[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(5):1046-1051. (in Chinese)
- [8] 李雪峰, 付智, 罗翥. 低气压环境对混凝土含气量及气孔结构影响研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 49-54.
Li X F, Fu Z, Luo Z. Effect of air pressure environment on air content and air void structures of concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(2): 49-54. (in Chinese)
- [9] 李立辉, 陈歆, 田波, 等. 大气压强对混凝土引气剂引气效果的影响研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 886-873.
Li L H, Chen X, Tian B, et al. Study on the effect of atmospheric pressure on air-entraining performance of air-entraining agents of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 886-873. (in Chinese).
- [10] Ge X, Ge Y, Li Q F, et al. Effect of low air pressure on the durability of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 830-838.
- [11] 何锐, 王铜, 陈华鑫, 等. 青藏高原气候环境对混凝土强度和抗渗性的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 29-41.
He R, Wang T, Cheng H X, et al. Impact of Qinghai-Tibet Plateau's Climate on strength and permeability of concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 29-41. (in Chinese)
- [12] Kobayashi K, Ahn D L, Rokugo K. Effects of crack properties and water-cement ratio on the chloride proofing performance of cracked SHCC suffering from chloride attack [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 69: 18-27.
- [13] Hu X, Shi C, Shi Z, et al. Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, (104): 103392.
- [14] Kwon S J, Na U J, Park S P, et al. Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion [J]. Structural Safety, 2009, 31(1): 75-83.
- [15] 孙伟. 现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 224.
Sun W. Durability evaluation and service life prediction of modern concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 224. (in Chinese)
- [16] Bastidas-Arteaga E, Chateaufneuf A, Sánchez-Silva M, et al. A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete [J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 720-730.
- [17] Haiyan M, Wei G, Hongfa Y, et al. Durability of concrete subjected to dry-wet cycles in various types of salt lake brines [J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 286-294.
- [18] 朱方之, 赵铁军, 王振波, 等. 基于冻融损伤和表面剥落的氯离子扩散模型修正与应用[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 1065-1069.
Zhu F Z, Zhao T J, Wang Z B, et al. Modification and application of chloride diffusion model based on frost damage and surface scaling [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 1065-1069. (in Chinese)
- [19] 刘加平, 刘玉静, 石亮, 等. 氯盐-硫酸盐对水泥基材料的复合侵蚀破坏[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 993-997.
Liu J P, Liu Y J, Shi L, et al. Combine attack of chloride-sulfate on cement-based materials [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 993-997. (in Chinese)
- [20] 水运工程混凝土试验检测技术规程: JTS/T 23—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [21] 陈波, 白银, 刘雪娟, 等. 水泥品种对钻孔灌注桩混凝土耐久性的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(8): 1-6.
Chen B, Bai Y, Liu X J, et al. Influence of cement type on concrete durability of bored pile [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(8):1-6. (in Chinese)
- [22] 丁建彤, 宁逢伟, 王奇. 盐碱地下水环境中桩基混凝土耐腐蚀研究[J]. 混凝土, 2015(6): 153-156, 160.
Ding J T, Ning F W, Wang Q. Corrosion research on pile concrete in saline groundwater environments [J]. Concrete, 2015(6):153-156,160. (in Chinese)
- [23] 葛昕. 高原气候条件对混凝土性能及开裂机制影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Ge X. The research on effect of plateau climatic conditions on concrete performance and cracking mechanism [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)