

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0011-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.003

模拟地下水压力作用下混凝土硫酸盐腐蚀行为研究

蒋建华, 翁伟新, 裘佳琪

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对地下混凝土结构的耐久性问题, 利用室内模拟试验技术, 研究不同地下水静水压力(0、0.1和0.2 MPa)和粉煤灰掺量(10%、25%和40%)对混凝土受硫酸盐腐蚀的影响, 测定了混凝土腐蚀60 d后的腐蚀深度和力学性能指标(抗压强度和动弹性模量)。试验结果表明, 混凝土的硫酸盐腐蚀深度随粉煤灰掺量的增加而线性降低; 随地下水压力的增加近似呈线性增加。混凝土的抗压强度和动弹性模量随粉煤灰掺量的增加而降低, 随地下水压力的增加而略有提高。此外, 对混凝土抗压强度和超声波速的相关性进行分析, 结果表明粉煤灰和水压力对抗压强度与超声波速关系的影响不明显; 通过回归分析建立了硫酸盐腐蚀后混凝土抗压强度和超声波速的指数关系模型。

关键词: 混凝土; 水压力; 粉煤灰; 硫酸盐腐蚀; 超声波速

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

Corrosion Behaviors of Concrete Exposed to Sulfate Attack with Simulated Groundwater Pressure

JIANG Jianhua, WENG Weixin, QIU Jiaqi

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: This paper is aimed at the durability of underground concrete structure, and the influence of water pressure (0, 0.1 and 0.2 MPa) and fly ash content (10%, 25% and 40%) on sulfate corrosion of concrete which were studied by means of laboratory simulation test technique. In the experiment, the sulfate corrosion depth and mechanical properties (compression strength and dynamic elastic modulus) of concrete after 60 days of corrosion were measured. The results show that the sulfate corrosion depth of concrete decreases linearly with the increase of fly ash content, and increases linearly with the increase of water pressure. The compression strength and dynamic elastic modulus of concrete decrease with the increase of fly ash content, and slightly increase with the increase of water pressure. In addition, the relationship between the compression strength and ultrasonic pulse velocity of concrete was analyzed. The result indicates that the influences of fly ash content and water pressure are not obvious. Based on the regression analysis, an exponential model between the compression strength and ultrasonic pulse velocity of concrete exposed to sulfate attack is established.

Key words: concrete; water pressure; fly ash; sulfate attack; ultrasonic pulse velocity

硫酸盐侵蚀是造成地下混凝土结构耐久性失效的主要因素之一^[1]。许多国家和地区均发生过混凝土结构遭受硫酸盐侵蚀破坏的案例^[2-4]。因此, 开展混凝土在硫酸盐环境中的性能研究, 对于提高侵蚀性环境中混凝土的耐久性和使用寿命具有重要意义。

近年来, 许多学者对于混凝土在硫酸盐环境中的腐蚀行为展开了广泛的研究。Yuan^[5-6]等人研究表明干湿循环会加剧混凝土内部孔隙结构的破坏。高建明等人^[7]研究表明弯曲荷载加速了硫酸盐在干湿循环中对混凝土的劣化。而 Tan 等人^[8]研究表明受弯荷

收稿日期: 2019-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408192); 浙江省水利厅科技项目(RA1503)

作者简介: 蒋建华(1982-), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 研究方向为钢筋混凝土结构耐久性。

载和受拉荷载的作用会对混凝土的腐蚀产生明显的影响。在地下水环境中，混凝土容易受到水压力的作用。然而，目前关于地下水压力作用下混凝土受硫酸盐腐蚀的研究依然较少。基于此，本文对粉煤灰混凝土在模拟地下静水压力作用下的硫酸盐腐蚀行为等进行了研究。

1 试验方案

1.1 试件设计

试验所用混凝土试件为尺寸100 mm × 100 mm × 300 mm的棱柱体试件。混凝土配合比及胶凝材料的化学成分，分别如表1和表2所示。采用P.O 42.5普通硅酸盐水泥和F级粉煤灰；细骨料为河砂，细度模数2.7；粗骨料为粒径5 ~ 15 mm碎石；拌合水为普通自来水。粉煤灰等量取代水泥，粉煤灰掺量占胶凝材料质量的10%、25%和40%。

1.2 试件分组

混凝土试件浇筑24 h后脱模，在相对湿度不低于90%、温度(20 ± 1) °C的环境下养护28 d。然后将混凝土试件浸泡在浓度15%的Na₂SO₄溶液中60 d。试验中考虑了三种不同的静水压力(0、0.1和0.2 MPa)。溶液pH值控制在7.0，温度为(20 ± 1) °C。试件分组考虑不同静水压力和混凝土配比的组合，每种工况制作3个试件，共计27个。

1.3 模拟地下水静水压力试验装置

基于液压法原理设计了模拟地下静水压力的装置，如图1所示。装置分为密封容器和加压装置两部分。

试验开始时，将试件以一定间距浸泡于硫酸盐溶液中，保证液面高出试件顶部2 cm；密封箱盖，通过数显压力表设定好目标压力值和误差范围，利用充气泵向容器内加压，控制充气泵的自动开启或关闭，从而保证压力箱内压力基本稳定。

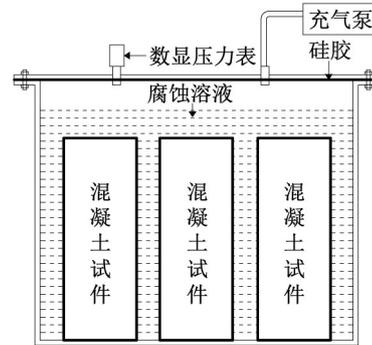


图1 地下静水压力模拟试验装置

Fig.1 Test device for simulating the underground hydrostatic pressure

1.4 基于超声波方法的混凝土腐蚀深度测量

基于超声波脉冲法的腐蚀测定方法可以有效评估混凝土损伤程度^[9]。本试验采用超声平测法对受腐蚀混凝土进行检测，如图2所示。

根据平测法原理，得腐蚀深度的计算公式^[10]：

$$d_0 = \frac{l_0}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}} \quad (1)$$

式中： d 为混凝土损伤层厚度，mm； v_2 和 v_1 分别为混凝土未损伤层和损伤层的超声波速，m/s； l_0 是超声波速度突变点对应的换能器距离，mm。

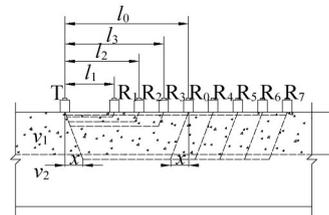


图2 超声波平测法测量混凝土腐蚀深度

Fig.2 Indirect ultrasonic testing for concrete corrosion depth

表1 混凝土配合比 (2 400 kg/m³)

Tab.1 Mixture proportion of concrete (2 400 kg/m³)

水 (W)	水泥 (C)	粉煤灰 (FA)	河砂 (S)	碎石 (G)
185.0	387.0	43.0	537.0	1 248.0
185.0	322.5	107.5	537.0	1 248.0
185.0	258.0	172.0	537.0	1 248.0

表2 水泥和粉煤灰的主要化学成分 (%)

Tab.2 Main chemical components of cement and fly ash (%)

类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
水泥	18.57	5.40	2.84	0.28	52.82	1.16	2.59	0.45	0.20	15.59
粉煤灰	14.13	5.27	1.55	0.25	32.02	8.61	0.16	0.67	0.13	36.12

1.5 抗压强度的测量

为了进一步评估硫酸盐侵蚀对混凝土力学性能的影响，依据《GB/T 50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准》开展了混凝土试件腐蚀 60 d 后的抗压强度测试试验。

1.6 动弹性模量的测定

利用超声波平测法得到的最大测距 (225 mm) 对应的波速作为混凝土表面波速，并通过下述公式计算得到混凝土动弹性模量^[11]：

$$E_d = v_r^2 \cdot \rho \cdot \frac{2(1 + \mu)^3}{(0.87 + 1.12\mu)^2} \quad (2)$$

式中： E_d 为混凝土动弹性模量，MPa； μ 为混凝土泊松比，本文统一取 0.2； ρ 为混凝土的密度，取 2 400 kg/m³； v_r 为混凝土表面波速，m/s。

2 试验结果与分析

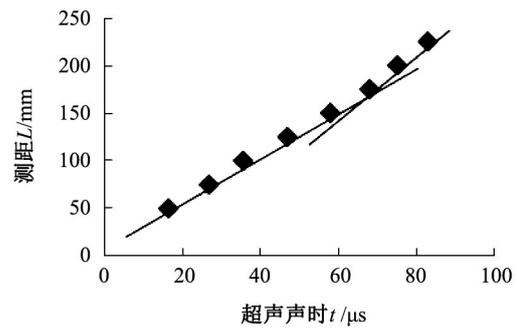
2.1 腐蚀深度

从图 3 中可以看出，超声波测距与声时的关系曲线在 60 μ s 和 80 μ s 间出现了一个明显转折点，这是由于混凝土受硫酸盐侵蚀导致了内部出现密实度分界层。

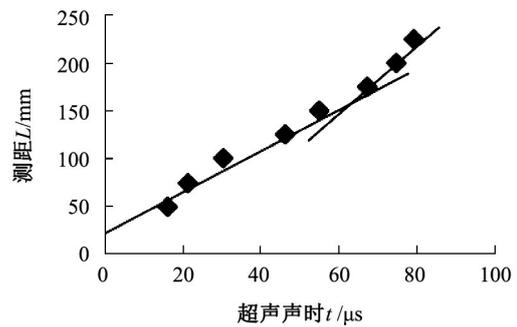
如图 4 所示，随着水压力的增加，混凝土的硫酸盐腐蚀深度近似呈线性增长的规律。这是由于水压力的作用会加速硫酸根离子向混凝土内部渗透^[12]。此外，随着粉煤灰掺量的增加，混凝土的硫酸盐腐蚀深度降低，水压力的影响也减小。粉煤灰在混凝土受硫酸盐腐蚀过程中主要发挥以下作用^[13]：一是粉煤灰的掺入降低了胶凝材料中的 C₃A 含量，减少了混凝土受腐蚀的内部因素；二是粉煤灰的火山灰效应，消耗了 Ca(OH)₂，缓解了硫酸盐的侵蚀；三是粉煤灰的填充密实效应可以有效阻止侵蚀性介质侵入。

2.2 抗压强度

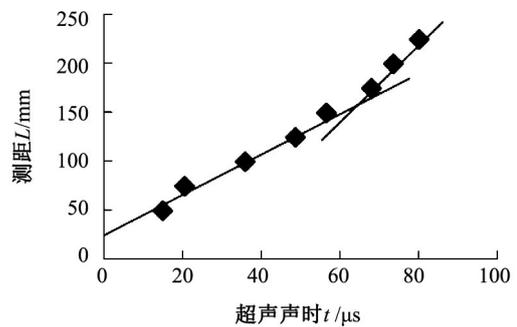
如图 5 所示，随着水压力的增加，混凝土抗压强度略有提高。Zhou 等人^[14]的研究指出，硫酸盐进入混凝土内部后，与水合铝酸钙反应生成钙矾石和石膏膨胀产物，使得混凝土在反应初期变得更加致密；随着腐蚀龄期的增加，腐蚀产物对混凝土膨胀压力的不断增大，最终导致混凝土发生破坏。本试验为 60 d 腐蚀龄期，混凝土依旧处于硫酸盐腐蚀



(a) $P_w=0$ MPa; FA=25%



(b) $P_w=0.1$ MPa; FA=10%



(c) $P_w=0.2$ MPa; FA=40%

图 3 硫酸盐腐蚀混凝土试块超声波测距 - 声时曲线
Fig.3 Ultrasonic distance-time curve of concrete specimens under sulfate attack

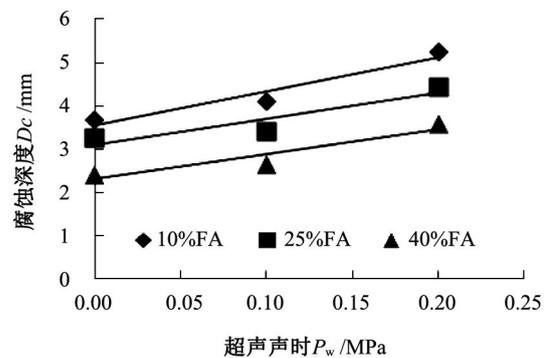


图 4 不同水压力条件下混凝土的腐蚀深度
Fig.4 Corrosion depth of concrete under different water pressure

早期阶段, 腐蚀反应产生的膨胀物(钙矾石和石膏)填充了内部孔隙, 因此强度略有提高。

另一方面, 随着粉煤灰掺量的增加, 混凝土的抗压强度降低。这与许多学者的研究相一致, 随着粉煤灰掺量的增加, 混凝土内水泥含量减少, 水化速率降低, 从而导致混凝土早期抗压强度降低^[15]。

2.3 动态弹性模量 E_d

如图 6 所示, E_d 随着粉煤灰掺量的增加而降低, 随水压力的增加而略有提高。动态弹性模量和抗压强度均为混凝土的力学性能参数, 受硫酸盐腐蚀的影响类似。随粉煤灰掺量增加, 混凝土力学性能下降, E_d 和抗压强度均降低; 随水压力的增加, 腐蚀深度增加, 早期腐蚀产物填充了内部孔隙, 使 E_d 略有增加, 该阶段称为腐蚀产物引起的弹性模量强化阶段^[16]。

2.4 混凝土抗压强度与超声波速度的关系模型

如图 7(a) 所示, 不同粉煤灰混凝土的抗压强度随超声波速的变化趋势基本一致。此外, 如图 7(b) 所示, 随着水压力增加, 抗压强度随超声波速的变

化规律也基本一致。因此, 粉煤灰掺量和水压力对混凝土抗压强度与超声波速的关系无显著影响。

将各试验工况下的混凝土抗压强度和超声波速进行综合分析, 如图 8 所示。可以看出, 硫酸盐腐蚀后混凝土的抗压强度与超声波速具有显著的正相关性。

本文基于试验数据的回归分析, 得到了混凝土硫酸盐腐蚀 60 d 后的抗压强度与超声波速之间的指数函数关系模型^[17], 如公式 (3) 所示。

$$f_c = 0.025e^{1.6912v}, R^2 = 0.947 \quad (3)$$

式中: v 为超声波速, km/s; f_c 为混凝土轴心抗压强度, MPa。

3 结论

1) 粉煤灰的掺入可以提升混凝土的抗硫酸盐腐蚀能力, 随着粉煤灰掺量的增加, 混凝土的腐蚀深度降低; 而随着粉煤灰的增加, 混凝土早期的抗压强度和动弹性模量降低。

2) 地下静水压力对混凝土硫酸盐腐蚀具有显著

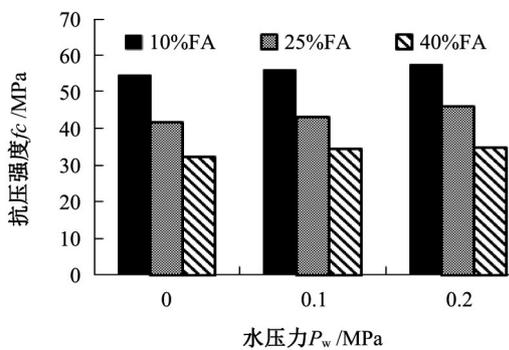


图 5 不同水压力条件下腐蚀混凝土的抗压强度
Fig.5 Compressive strength of the corroded concrete under different water pressure

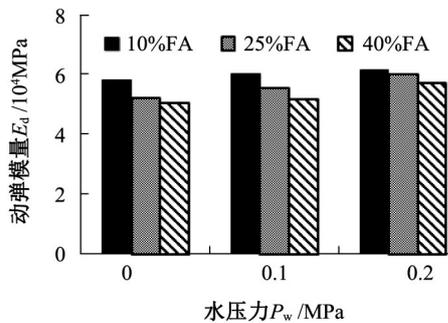
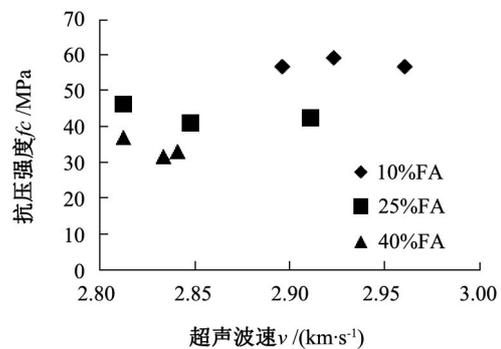
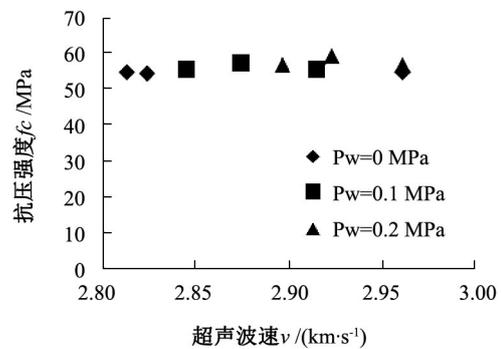


图 6 不同水压力条件下腐蚀混凝土动弹性模量
Fig.6 Dynamic elastic modulus of the corroded concrete under different water pressure



(a) $P_w=0.2$ MPa



(b) FA=10%

图 7 腐蚀混凝土的抗压强度随超声波速的变化
Fig.7 Variation of compressive strength with ultrasonic pulse velocity of corroded concrete

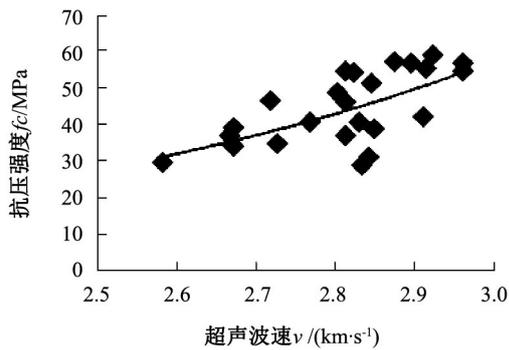


图8 硫酸盐腐蚀混凝土抗压强度与超声波速关系

Fig.8 Relationship of compressive strength with ultrasonic pulse velocity of concrete attacked by sulfate

影响。随着水压力的增大，混凝土腐蚀深度近似呈线性增加，而硫酸盐腐蚀60d后的抗压强度和动弹性模量略有提高。本试验中腐蚀60d后混凝土依然处于早期腐蚀状态，而混凝土在水压力下长期受硫酸盐腐蚀的性能变化规律有待进一步的研究。

3) 粉煤灰和水压力对硫酸盐腐蚀后混凝土抗压强度与超声波速的关系无显著影响，提出了水压力作用下受硫酸盐腐蚀60d后抗压强度和超声波速的指数函数关系模型。

参考文献:

- [1]ZHUTOVSKY S, HOOTON R D.Experimental study on physical sulfate salt attack[J].Materials and Structures, 2017, 50(1): 54.
- [2]LEEMANN A, LOSER R.Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years[J].Cement and Concrete Composites, 2011, 33(1): 74-83.
- [3]KUNTHER W, LOTHENBACH B, SKIBSTED J.Influence of the Ca/Si ratio of the C-S-H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure[J].Cement and concrete research, 2015, 69: 37-49.
- [4]YOSHIDA N, MATSUNAMI Y, NAGAYAMA M, et al.Salt weathering in residential concrete foundations exposed to sulfate-bearing ground[J].Journal of Advanced Concrete Technology, 2010, 8(2): 121-134.
- [5]YUAN J, LIU Y, TAN Z, et al.Investigating the failure process of concrete under the coupled actions between sulfate attack and drying-wetting cycles by using X-ray CT[J].Construction and Building Materials, 2016, 108: 129-138.
- [6]NIU D, MA R, WANG J, et al.Experiment study on the failure mechanism of dry-mix shotcrete under the combined actions of sulfate attack and drying-wetting cycles[J].Construction and Building Materials, 2015, 81: 74-80.
- [7]CHEN F, GAO J, QI B, et al.Degradation progress of concrete subject to combined sulfate-chloride attack under drying-wetting cycles and flexural loading[J].Construction and Building Materials, 2017, 151: 164-171.
- [8]TAN Y, YU H, MA H, et al.Study on the micro-crack evolution of concrete subjected to stress corrosion and magnesium sulfate[J].Construction and Building Materials, 2017, 141: 453-460.
- [9]JIANG L, NIU D, SUN Y, et al.Ultrasonic testing and microscopic analysis on concrete under sulfate attack and cyclic environment[J].Journal of Central South University, 2014, 21(12): 4723-4731.
- [10]秦国顺, 郑凤.硫酸盐腐蚀粉煤灰混凝土后强度超声检测评定[J].徐州工程学院学报:自然科学版, 2010, 25(2): 33-36.
- [11]孙丛涛, 牛荻涛, 元成方, 等.混凝土动弹性模量与超声声速及抗压强度的关系研究[J].混凝土, 2010(4): 14-16.
- [12]吴骏晖.荷载及水头压力作用下地下结构混凝土硫酸盐腐蚀研究[D].北京:中国矿业大学, 2015.
- [13]叶建雄.掺合料混凝土性能及应用研究[D].重庆:重庆大学, 2005.
- [14]ZHOU Y, LI M, SUI L, et al.Effect of sulfate attack on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete[J].Construction and Building Materials, 2016, 110: 235-250.
- [15]SAHA A K.Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete[J].Sustainable environment research, 2018, 28(1): 25-31.
- [16]ZHANG J, SUN M, HOU D, et al.External sulfate attack to reinforced concrete under drying-wetting cycles and loading condition: Numerical simulation and experimental validation by ultrasonic array method[J].Construction and Building Materials, 2017, 139: 365-373.
- [17]CHANG T P, LIN H C, CHANG W T, et al.Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods[J].Cement and Concrete Composites, 2006, 28(1): 57-68.

(责任编辑 王利君)