

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1285

# 侵蚀性环境对地下结构渗透和力学特性影响研究

王 冲<sup>1,2</sup>, 胡大伟<sup>1,2</sup>, 任金明<sup>3</sup>, 周 辉<sup>1,2</sup>, 卢景景<sup>1,2</sup>, 刘传新<sup>4</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 4. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211112)

**摘 要:** 环境污染造成地下结构侵蚀劣化, 使得地下结构面临严峻的长期稳定性问题。通过 50 g/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液、50 g/L NaCl 溶液以及含有 50 g/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+ 50 g/L NaCl 的垃圾渗滤液的浸泡侵蚀试验, 研究了经上述溶液侵蚀后混凝土试样在不同围压下的气体渗透特性、氯离子渗透特性以及力学特性。结果表明: (1) 经不同溶液侵蚀后试样的渗透率与所承受的围压大小密切相关。同一侵蚀时间下, 随着围压的增大, 渗透率逐渐减小。经垃圾渗滤液侵蚀后的试样渗透率随侵蚀时间线性增加, 且围压越小, 增大的速率越大; 经硫酸钠溶液、氯化钠溶液侵蚀后的试样渗透率总体先减小后增大; 经 3 种不同溶液侵蚀后, 试样渗透率对应力的敏感程度均有所提高。(2) 经 3 组溶液侵蚀后试样单轴抗压强度变化分为线性增加、缓慢下降两个阶段, 但垃圾渗滤液侵蚀后的试样强度始终为最小值。弹性模量也呈现出相似的变化规律。(3) 在同一侵蚀深度处, 垃圾渗滤液侵蚀后的试样自由氯离子含量比氯化钠溶液侵蚀后的试样低 20%~50%, 垃圾渗滤液侵蚀下混凝土试样被氯离子侵蚀的程度比氯化钠溶液侵蚀下混凝土试样低。(4) 气体渗透率随侵蚀的进行而变化最为明显, 比单轴抗压强度、氯离子扩散系数更适用于评价地下混凝土结构长期稳定性。研究结果可为侵蚀性环境下地下结构长期稳定性分析提供理论依据。

**关 键 词:** 垃圾渗滤液侵蚀; 地下结构; 渗透特性; 力学特性;

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 09-3457-09

## Influence of erosive environment on permeability and mechanical properties of underground structures

WANG Chong<sup>1,2</sup>, HU Da-wei<sup>1,2</sup>, REN Jin-ming<sup>3</sup>, ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, LU Jing-jing<sup>1,2</sup>, LIU Chuan-xin<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 4. Jiangsu Transportation Institute, Nanjing, Jiangsu 211112, China)

**Abstract:** Due to environmental pollution, the underground structure gradually deteriorates, which causes severe long-term stability problems of the underground structure. In this study, the immersion erosion tests were first carried out on concrete specimens by soaking in the 50 g/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution, 50 g/L NaCl solution and landfill leachate containing 50 g/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 50 g/L NaCl, respectively. Then the gas permeability under different confining pressures, chloride permeability and mechanical properties of the eroded concrete specimens were studied. The results show that the permeability coefficient of the specimens after immersion in different solutions is closely related to the confining pressure. Under the same erosion time, the permeability coefficient gradually decreases with the increase of confining pressure. The permeability of the specimen under continuous immersion by landfill leachate increases linearly with the time of erosion, and the lower the confining pressure is, the greater the rate of the increase is. While the permeability of the specimens exposed to Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaCl solutions decreases first and then increases. Generally, under immersion in three kinds of solutions, the permeability sensitivity of specimens to confining pressure is improved. The uniaxial compressive strength of the specimens after exposed to different solutions is divided into two stages: linear increase and slow decrease. However, the strength of the specimen exposed to landfill leachate is the lowest. The elastic modulus also presents a similar pattern. At the

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 国家重点研发计划资助(973 项目)(No.2018YFC0809601, No.2018YFC0809600); 国家自然科学基金资助项目(No.51479193, No.51779252); 湖北省技术创新专项重大项目(No.2017AAA128); 中科院百人计划项目资助; 武汉市“黄鹤英才(科技)计划”资助项目。

This work was supported by the National Key R & D Program of China(973 Program)(2018YFC0809601, 2018YFC0809600), the National Natural Science Foundation of China (51479193, 51779252), the Major Projects of Technical Innovation in Hubei(2017AAA128), the “100 Talent Program” of the Chinese Academy of Sciences and Wuhan Yellow Crane Talents(Science) Plan of China.

第一作者简介: 王冲, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事地下结构长期稳定性方面的研究工作。E-mail: 1148316899@qq.com

通讯作者: 胡大伟, 男, 1981 年生, 博士, 研究员, 主要从事地下工程多场耦合方面的研究工作。E-mail: dwu@whrsm.ac.cn

same erosion depth, the free chloride content of the specimen after the landfill leachate erosion is 20%–50% lower than that of the specimen after the erosion of the NaCl solution. In addition, the erosion degree of the concrete specimen by the chloride ions in the landfill leachate is lower than that of the concrete specimen by the NaCl solution. Compared with uniaxial compressive strength and chloride diffusion coefficient, the gas permeability changes the most obviously by the erosion, which is more suitable for evaluating the long-term stability of the concrete structure. The research results can provide a theoretical basis for the long-term stability analysis of underground structures under corrosive environment.

**Keywords:** landfill leachate erosion; underground structure; permeability; mechanical properties

## 1 引言

随着我国人口急剧增长和城市化进程的加快,城市建设正从地面转向地下,城市地下基础设施建设正迎来高速发展的时期。不同于地上建筑,地下混凝土结构服役环境较为复杂,不仅受到地层三维应力作用,还常常面临因环境污染带来的结构腐蚀性问题。如垃圾填埋场、酸碱厂、石油化工厂、污水厂、印刷厂等场地附近地基土及地下水都会受到不同程度的污染,处于及临近上述区域的地下结构都会受到污染介质的影响<sup>[1]</sup>。其中,垃圾填埋场中由于垃圾渗滤液的存在,使得构筑在垃圾填埋场上及其附近的地下结构面临严峻的结构腐蚀长期稳定性问题。垃圾渗滤液是一种经微生物发酵、有机物分解、降雨冲刷浸泡等作用产生的一种高强度废水,其含有大量的 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{H}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等侵蚀性离子<sup>[2]</sup>,一旦由于暴雨、工程施工、防渗膜老化破损等原因造成垃圾渗滤液渗漏,会对构筑在垃圾填埋场上及其附近的地下结构造成重大影响,而垃圾渗滤液渗漏情况时有发生<sup>[3]</sup>,其结构长期稳定性问题尤为重要。

目前,国内外已有许多在垃圾填埋场上及其附近新建地下结构的案例<sup>[4]</sup>,但其研究主要集中于垃圾填埋场中垃圾土物理力学参数的确定、垃圾土沉降变形规律以及垃圾渗滤液对基础施工的影响等<sup>[5-7]</sup>,鲜有学者考虑垃圾渗滤液对地下结构长期稳定性的影响。而地下结构的渗透性能、力学性能等在一定程度上可以反映地下结构长期稳定性,是评价地下结构长期稳定性的重要指标,故针对垃圾渗滤液对地下结构长期抗渗特性及力学特性的影响进行研究具有重要意义。

混凝土地下结构的渗透性试验主要采用气渗法、水渗法以及氯离子渗透法等。水渗法会导致水泥的继续水化以及侵蚀产物的迁移,从而对试验结果造成影响。气渗法具有测量精度高的特点,对微裂纹尤其是裂纹贯通时的混凝土渗透性评价具有不可替代的作用,是未来研究地下结构长期稳定性的

一个重要手段。目前常规混凝土气体渗透率的测量方法主要分为流量法、变压压力法等<sup>[8]</sup>,但这两种方法均无法为试样施加围压作用,无法模拟出地下结构所处的实际应力状态。鉴于此,本文采用岩石力学中瞬态压力脉冲法<sup>[9]</sup>测量不同围压下气体渗透率,并结合自由氯离子含量测量试验以及单轴压缩试验,对经垃圾渗滤液、硫酸钠溶液、氯化钠溶液侵蚀后混凝土试样的渗透特性及力学特性进行研究,为侵蚀性环境中地下结构长期稳定性分析提供依据。

## 2 侵蚀环境下地下结构渗透试验和力学试验

### 2.1 试样制备

地下结构材料采用强度等级为C30的混凝土,混凝土配合比为42.5普通硅酸盐水泥:水:粉煤灰:细骨料:粗骨料=1.00:0.59:0.25:2.76:3.79,水泥与粉煤灰化学组成如表1所示。按照混凝土配合比将混凝土浇筑成150 mm×150 mm×150 mm立方体试样,养护24 h后拆模,并放入专用养护室养护28 d。然后经取芯、切割、打磨,制备成 $\phi 50$  mm×100 mm的标准圆柱体试样。

表1 胶凝材料的化学成分(单位:%)  
Table 1 Chemical compositions of cementitious materials (unit: %)

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
水泥	21.47	5.80	4.04	56.64	3.24	2.08	0.22
粉煤灰	52.54	31.22	5.61	4.62	0.64	1.21	1.34

试验选用的垃圾渗滤液可以取自垃圾填埋场,但其取样点、取样时间的不同会导致垃圾渗滤液成分有所不同。为了排除垃圾渗滤液成分的不同对试验的影响,本次试验采用人工配置的方式。考虑到垃圾渗滤液中 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量较高<sup>[2]</sup>,且对混凝土影响较大,通过调节 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 的含量将垃圾渗滤液中 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 总浓度分别增加到50 g/L,以实现加速侵蚀效果。增加浓度后的垃圾渗滤液仅增

大对地下混凝土结构的侵蚀速率，并不影响本文对地下结构的渗透特性和力学特性的演化特征和演化规律的研究，其成分如表 2 所示<sup>[10]</sup>。同时，设置浓度为 50 g/L 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液和 NaCl 溶液作为对照

组，对比研究垃圾渗滤液、硫酸钠溶液和氯化钠溶液对混凝土地下结构渗透特性和力学特性的不同影响。上述溶液采用化学分析纯试剂配制，配置用水为蒸馏水。

表 2 垃圾渗滤液成分  
Table 2 Composition of landfill leachate

人工渗滤液	乙酸 / (mL/L)	丙酸 / (mL/L)	磷酸氢二钾 / (mg/L)	碳酸氢钾 / (mg/L)	碳酸钾 / (mg/L)	氯化钠 / (mg/L)	硝酸钠 / (mg/L)	碳酸氢钠 / (mg/L)	氯化钙 / (mg/L)	六水氯化镁 / (mg/L)	硫酸镁 / (mg/L)	碳酸氢铵 / (mg/L)	硫酸亚铁 / (mg/L)	五水硫酸铜 / (mg/L)	硫酸锰 / (mg/L)	硫酸钠 / (mg/L)
组分	3.5	3.5	15.0	156.0	162.0	47 588.0	25.0	1 506.0	1 441.0	1 557.0	78.0	1 220.0	500.0	20.0	250.0	49 194.0

将制备好的圆柱体试样上、下表面用石蜡密封，使侵蚀从侧面进行。随后将试样分成 A、B、C 三组，A 组放入垃圾渗滤液中侵蚀，B 组、C 组分别放入 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaCl 溶液中作为参照组，模拟地下结构在不同侵蚀环境下所受到的侵蚀。试样浸泡过程中保持温度为 20±2 °C，并在每 30 d 时更换一次侵蚀溶液。侵蚀前后的试样如图 1 所示。

压试验，每项试验进行 3 次重复试验，试验结果的处理参考文献[12]。

自由氯离子含量测量试验参考文献[12]，试验时取出经垃圾渗滤液和氯化钠溶液侵蚀一定时间（0、210 d）后的试样，通过切割机在试样横截面切取不同侵蚀深度处的混凝土试样，人工去除粗骨料，再经 60 °C 烘箱烘干 24 h，研磨成粉后测定侵蚀后的试样不同侵蚀深度处的自由氯离子浓度，每组试验进行 3 次重复试验。

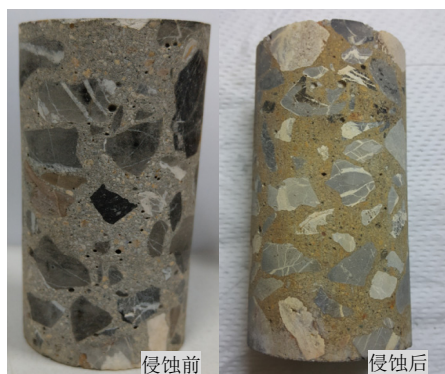


图 1 试样侵蚀前后  
Fig.1 Before and after specimen erosion

### 2.2 试验设备及试验方法

经侵蚀后的试样气体渗透试验、单轴压缩试验在中国科学院武汉岩土力学研究所的岩石多场耦合三轴试验仪上进行<sup>[11]</sup>。该试验系统由围压、轴压和孔隙压力 3 套独立的加载部分组成，可在高围压和孔隙压力下进行水力渗透和气体渗透试验。采用瞬态法或稳态法测量试样渗透率，围压加载部分具有压力和流量两种控制方式，能模拟出地下结构所处的实际应力状态，并测量相应的气体渗透率和单轴抗压强度。试验时取出经垃圾渗滤液、硫酸钠溶液和氯化钠溶液侵蚀一定时间（0、45、90、135、210 d）后的试样。为了避免含水率以及加热温度对试验结果产生影响，试样在 60 °C 烘箱中烘干 24 h 后再分别进行不同围压下的气体渗透率测量试验和单轴抗

气体渗透试验采用氮气作为渗透介质，并采用瞬态压力脉冲法测试混凝土试样的渗透率。该方法最早由 Brace 等<sup>[9]</sup>提出并给出其近似解，该原理可用图 2 表示。其试验过程是：①将制备好的试样置于压力容器中，用橡胶套包裹好并用箍环将其固定。为了避免温度对试验的影响，试验时温度保持在 20±0.3 °C；②施加围压至预定值 P<sub>1</sub>，并在试验过程中保持围压稳定，本次试验中 P<sub>1</sub> 对应的是垃圾填埋场混凝土构件内部的最大主应力，根据构件受力大小的不同分别设置为 2、3、5 和 10 MPa；③通过气源为试样上下游施加饱和压力 P<sub>0</sub>，本试验中 P<sub>0</sub> = 1.0 MPa；④待上下游压力稳定后将上游压力 P<sub>2</sub> 增加到 1.5 MPa，下游压力 P<sub>3</sub> 不变，关闭气源开关，使得试样上、下两端形成压差 ΔP = P<sub>2</sub> - P<sub>3</sub>，气体从上游经试样进入下游。渗透过程中，压差不断减少，直至上、下游压力容器达到平衡。试验过程中记录上、下游压力数据，得到压差曲线。试样气体渗透率可由下式<sup>[13]</sup>计算：

$$K = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{\beta \mu L}{A \cdot \Delta t} \ln \frac{\Delta P_t}{\Delta P_{t+\Delta t}} \quad (1)$$

式中：V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub> 分别为上、下游压力容器容积（m<sup>3</sup>），μ 为渗透介质的黏滞系数（Pa·s）；β 为渗透介质的压缩系数（Pa<sup>-1</sup>）；L 为试样的长度（m）；A 为试样的横截面积（m<sup>2</sup>）；Δt 为压差曲线上 2 个控制点的

时间间隔(s);  $\Delta P_t$ 、 $\Delta P_{t+\Delta t}$  分别为压差曲线上 2 个控制点的压差(MPa)。由式 (1) 即可计算出试样在不同围压下的渗透率。

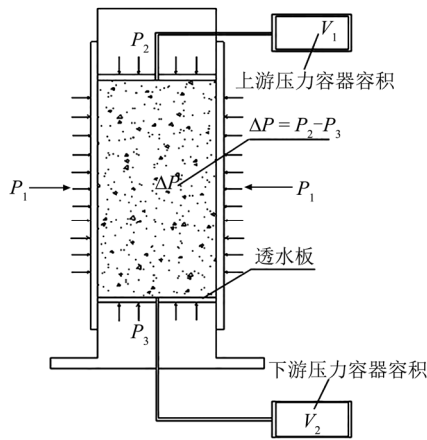


图 2 气体渗透试验原理  
Fig.2 Principle of gas permeability test

### 3 试验结果分析

#### 3.1 气体渗透试验

##### 3.1.1 不同围压下气体渗透率

如前所述, 为了真实模拟地下结构所处的应力状态, 对试样施加不同大小的围压, 然后进行气体渗透测试。因此, 对在垃圾渗滤液 (A 组)、硫酸钠溶液 (B 组)、氯化钠溶液 (C 组) 中侵蚀不同时间 (0、45、90、135 和 210 d) 后的试样, 分别在不同围压 (2、3、5 和 10 MPa) 下测得的试样的渗透率, 获得渗透率随侵蚀时间的演化规律, 如图 3~5 所示。

图 3 表明, A 组试样经垃圾渗滤液侵蚀过后, 其渗透率与侵蚀时间、围压大小密切相关。在相同围压作用下, 渗透率随侵蚀时间的增长逐渐增大,

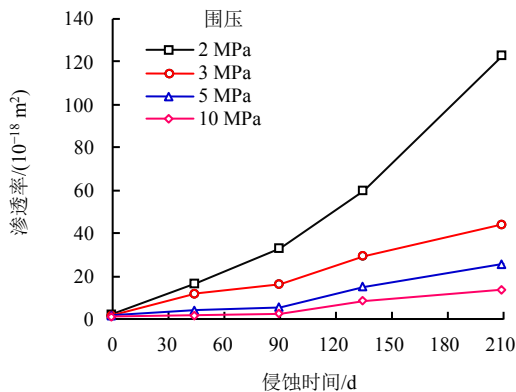


图 3 A 组试样在不同围压下渗透率变化曲线  
Fig.3 Variation curves of permeability of specimens in group A under different confining pressures

且几乎为线性增长。不同围压作用下, 渗透率大小以及增大的速率也不一样, 表现为围压越小, 渗透率越大, 渗透率随侵蚀时间增大的速率越快。一定的围压作用能使混凝土结构骨架压缩, 减小混凝土结构孔隙率, 造成混凝土渗透率减小, 有害离子通过渗透、扩散等作用进入混凝土结构内部的通道减小, 进而延缓地下结构的劣化。

图 4 表明, B 组试样经硫酸钠溶液侵蚀后, 其渗透率在前 90 d 先减小, 之后快速增大, 且不同围压作用下的渗透率在前 90 d 减小的速率几乎相同。但在 90 d 后, 表现为围压越小, 渗透率增大的速率越快。这是由于  $SO_4^{2-}$  与混凝土水化产物反应生成的石膏、钙矾石等物质能填充混凝土孔隙<sup>[14]</sup>, 使得混凝土试样渗透率在前期有所下降。但随着侵蚀的进行, 混凝土试样会因大量侵蚀产物产生微裂缝, 导致试样渗透率在 90 d 后开始快速增大。同时, 围压越大, 对试样结构骨架的压缩效应越明显, 因膨胀产生的裂纹会因高围压的压缩效应而闭合, 导致在渗透率增大阶段围压越小, 渗透率增大的速率越快。

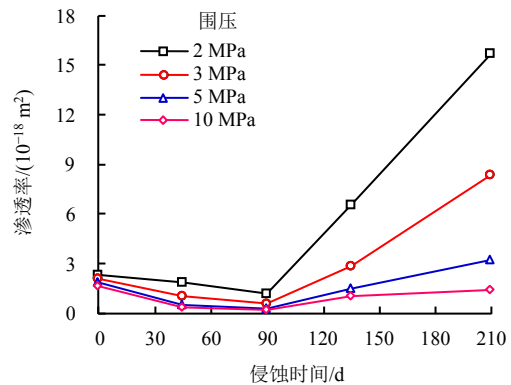


图 4 B 组试样在不同围压下渗透率变化曲线  
Fig.4 Variation curves of permeability of specimens in group B under different confining pressures

图 5 表明, C 组试样经氯化钠溶液侵蚀后, 在前 45 d 试样渗透率有所减小, 在 45 d 后试样渗透率整体而言开始增大。一方面, 在侵蚀初期混凝土中的水泥成分继续水化以及粉煤灰的 2 次水化效应, 能使混凝土结构更加致密; 另一方面  $Cl^-$  能与混凝土中的水化产物结合, 生成 Friedel 盐。Friedel 盐也是一种膨胀性物质, 对混凝土孔隙有一定的填充效应<sup>[15]</sup>, 能使结构更加致密, 使得混凝土的渗透性在前期有所降低。但随着侵蚀的进行, 膨胀性侵蚀产物会使的混凝土结构出现微小裂缝, 进而增大渗透率。



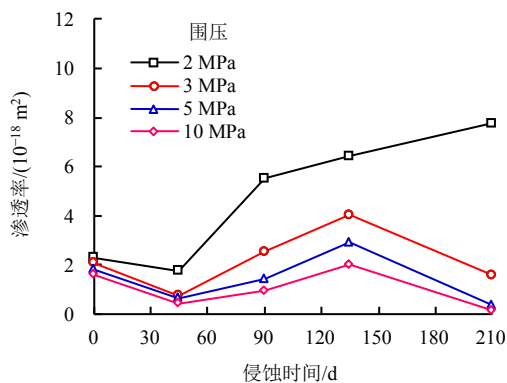


图 5 C 组试样在不同围压下渗透率变化曲线  
Fig.5 Variation curves of permeability of specimens in group C under different confining pressures

对比图 3~5，在围压为 2 MPa 作用下，A 组试样经垃圾渗滤液侵蚀 210 d 后渗透率比未侵蚀时增大了 52 倍，B 组试样经硫酸钠溶液侵蚀 210 d 后渗透率增大了 7 倍，而 C 组试样经氯化钠溶液侵蚀 210 d 后渗透率增大了 3 倍。显然，垃圾渗滤液相比硫酸钠溶液、氯化钠溶液对混凝土试样的气体渗透率影响更大，对地下结构长期稳定性影响也更大。

3.1.2 渗透率变化率

从图 3~5 可以看出，虽然 A、B、C 3 组试样在相同侵蚀时间其渗透率均随着围压的增大而减小，但 3 组试样的渗透率随围压增大而减小的幅度存在很大的差异。为了表征这种渗透率减小幅度上的差异，采用渗透率变化率来评价试样在侵蚀一定时间后渗透率随围压增大而减小的幅度，按下式计算：

$$D_{max} = \frac{k_0 - k_{min}}{k_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $D_{max}$  为侵蚀一定时间后试样渗透率变化率； $k_0$  为侵蚀一定时间后试样在最小围压下测得的渗透率，本文中即为 2 MPa 围压所对应渗透率； $k_{min}$  为侵蚀一定时间后最大围压下测得的渗透率，本文中即为 10 MPa 围压所对应的渗透率。渗透率变化率越大，试样渗透率随围压增大而减小的幅度也越大。根据式 (2) 计算出 3 组试样在不同侵蚀时间后的渗透率变化率，其值如表 3 所示。

由表 3 可看出，3 组试样经不同溶液侵蚀 45 d 后，混凝土试样渗透率变化率分别由 30% 增长至 88%、83%、77%，3 组试样经不同溶液侵蚀后渗透率随围压增大而减小的幅度都远大于未侵蚀时的混凝土试样，即经侵蚀后的试样渗透率对围压的敏感程度增大。虽然短期内 B、C 组试样由于  $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$

表 3 试样在不同侵蚀时间后的渗透率变化率  
Table 3 Permeability pressure change rates of specimens after different erosion time

时间/d	$D_{max} / \%$		
	A组	B组	C组
0	30	30	30
45	88	83	77
90	92	85	83
135	86	85	69
210	89	91	98

侵蚀产物的填充效应使得渗透率有所减小，但侵蚀作用同样消耗了混凝土水化产物，导致其颗粒骨架抵抗变形的能力与 A 组试样一样有所下降，因而 A、B、C 组试样渗透率变化率较未侵蚀时有显著提高。

3.2 力学性能试验

3.2.1 单轴抗压强度劣化规律

3 组试样经不同溶液侵蚀、不同时间后的单轴抗压强度如图 6 所示。由图 6 可知，3 组试样在不同溶液侵蚀下单轴抗压强度变化总体包括两个阶段：线性增加段、缓慢下降段。第 1 阶段，侵蚀时间对应为 0~45 d，其中 A 组试样单轴抗压强度增长最小，B 组试样单轴抗压强度增长最大，3 组试样强度分别增长了 7.6%、31.5%、17.3%；在第 2 阶段，侵蚀时间对应为 45~210 d，3 组试样单轴抗压强度都开始缓慢减小。在所研究的侵蚀时间内，A 组试样单轴抗压强度都是最小的，而 B 组试样单轴抗压强度最高。经侵蚀 210 d 后，A 组试样单轴抗压强度下降了 5%，B、C 组试样单轴抗压强度分别上升了 20%、5%。显然，短期内垃圾渗滤液相比硫酸钠溶液以及氯化钠溶液对混凝土强度的影响更大，对地下结构长期稳定性影响也更大。

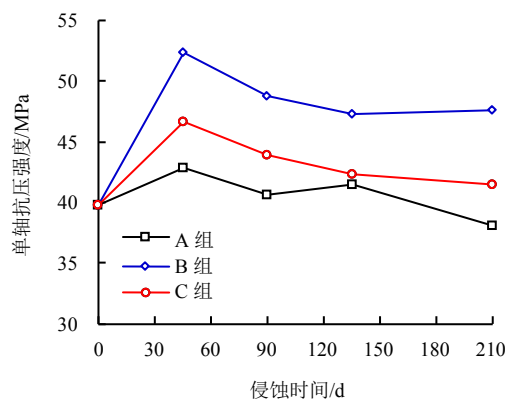


图 6 A、B、C 组试样经侵蚀后的单轴抗压强度  
Fig.6 Uniaxial compressive strength of specimens in group A, B and C after erosion

3组试样单轴抗压强度在第1阶段直线上升主要是混凝土继续水化、粉煤灰的二次水化效应以及 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 侵蚀产物的填充效应造成的。但很明显,垃圾渗滤液中其他成分的存在弱化了这种效应,造成A组试样单轴抗压强度增长最小。对于B、C组试样,第2阶段单轴抗压强度开始缓慢下降是由于 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 侵蚀产物的膨胀效应使得混凝土内部出现裂缝,造成强度的下降,但对于A组试样,则是垃圾渗滤液中各成分综合作用的结果,这将在下文进行分析。

### 3.2.2 弹性模量劣化规律

根据单轴压缩试验应力-应变曲线,参考文献[12]中静力抗压弹性模量计算方法,求得A、B、C组试样经不同侵蚀时间后的弹性模量,图7为试样弹性模量演化规律。由图7可知,A组试样在经过垃圾渗滤液侵蚀45d后,弹性模量由18.274 GPa减小为15.092 GPa,减小了17.4%,且后期弹性模量随侵蚀时间的增加变化不大。B组试样经硫酸钠溶液侵蚀45d后弹性模量达到最大,为24.16 GPa,增大了32.2%,随后开始减小。C组试样经氯化钠溶液侵蚀后弹性模量缓慢上升,至90d后开始减小。经不同溶液侵蚀210d后,3组试样弹性模量分别较未侵蚀时下降了16.1%、2.8%、10.4%。显然,垃圾渗滤液相比硫酸钠溶液以及氯化钠溶液对混凝土弹性模量的影响更大。

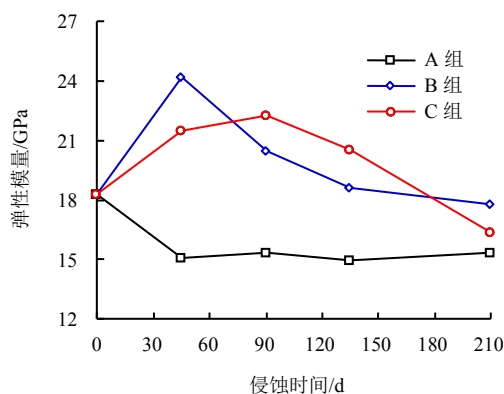


图7 弹性模量演化规律

Fig.7 Evolutions of elastic modulus

### 3.3 氯离子扩散试验结果

A、C组试样分别在垃圾渗滤液、氯化钠溶液中侵蚀210d后,试样中自由氯离子含量与侵蚀深度关系如图8所示。由图可知,A、C组试样侵蚀210d后,试样中自由氯离子的含量均随深度增加而降低。在同一侵蚀深度处,经垃圾渗滤液侵蚀后的试样,其自由氯离子含量比经氯化钠溶液侵蚀后的

试样低20%~50%。如在0~5、5~15、15~25mm处,氯化钠溶液中浸泡的C组试样氯离子浓度分别为0.434%、0.287%、0.169%,而垃圾渗滤液中浸泡的A组试样氯离子浓度仅为0.232%、0.168%、0.131%。显然,垃圾渗滤液侵蚀下混凝土试样被氯离子侵蚀的程度比单一氯化钠溶液侵蚀下混凝土试样低。这是由于离子在扩散的过程中存在争夺扩散通道的竞争机制,特别是垃圾渗滤液中含有大量 $\text{SO}_4^{2-}$ 等其他离子,会严重降低 $\text{Cl}^-$ 扩散速率。此外, $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 等侵蚀产物会堵塞扩散通道,也能降低垃圾渗滤液中 $\text{Cl}^-$ 的扩散速率<sup>[16-17]</sup>。

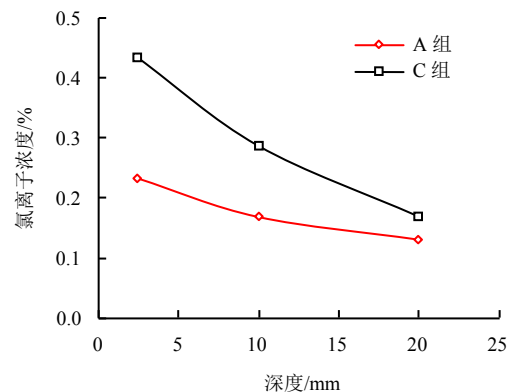


图8 A、C组试样氯离子浓度

Fig.8 Chlorine concentrations in group A and group C

## 4 垃圾渗滤液对地下结构劣化分析

垃圾渗滤液引起混凝土试样劣化的机制较为复杂,主要有以下几种:①垃圾渗滤液中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 与混凝土中的氢氧化钙、水化铝酸钙反应,生成石膏与钙矾石等物质<sup>[14]</sup>,前期表现为侵蚀产物填充混凝土孔隙,降低混凝土渗透率、增大混凝土强度,降低氯离子扩散性;后期过多的侵蚀产物将使混凝土出现裂纹,增大混凝土的渗透性,降低混凝土的强度,增强氯离子扩散性;②垃圾渗滤液中的 $\text{Cl}^-$ 对混凝土耐久性的影响主要是通过扩散、毛细管、渗透等作用形式进入混凝土内部,导致混凝土中钢筋锈蚀。此外, $\text{Cl}^-$ 还能与混凝土中的一些水化产物结合,生成少量Friedel盐,有研究表明Friedel盐具有一定的填充效应,在前期能使孔隙结构更加致密<sup>[15]</sup>;③垃圾渗滤液中的少量的 $\text{H}^+$ ,如微生物分解产生的生物酸等,与混凝土中的氢氧化钙、水化硅酸钙、水化铝酸钙等产物反应<sup>[18]</sup>,一方面消耗混凝土中的水化产物,另一方面降低混凝土本身pH值,引起混凝土水化硅酸钙、水化铝酸钙等水化产物进一步

分解,造成混凝孔隙率增大、气体渗透率增大、强度降低;④垃圾渗滤液中的 $\text{HCO}_3^-$ 与混凝土中的氢氧化钙、水化硅酸钙等反应,生成碳酸钙,使混凝土中性化,孔隙率有所降低,但改善了其孔隙的连通性,使得渗透率增大<sup>[19]</sup>,同时还能使强度下降,氯离子的扩散性也有所降低<sup>[17,20]</sup>;⑤垃圾渗滤液中的 $\text{NH}_4^+$ 与混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,将混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转化为可溶性的 $\text{Ca}^{2+}$ <sup>[21]</sup>,使得混凝土孔隙率增大,气体渗透率增大、强度降低、氯离子扩散性增强;⑥垃圾渗滤液中的 $\text{Mg}^{2+}$ 还能与混凝土中的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H凝胶反应,生成无胶凝性质的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、M-S-H,使混凝土结构变得松散,强度降低<sup>[22-23]</sup>。需要说明的是,上述各反应并不是单一进行的,而是互相影响、交替进行的,其真实反应过于复杂,超出了本文的研究范围,本文并不进行深入探究。

对比经垃圾渗滤液、硫酸钠溶液、氯化钠溶液侵蚀后试样在不同围压下的气体渗透率变化规律、单轴压缩强度变化规律、弹性模量演化规律,如图3~7所示。显然,垃圾渗滤液中大量的 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 并没有像单一成分的硫酸钠溶液、氯化钠溶液那样,在前期使混凝土气体渗透率有所减小、弹性模量有所提高。相反,经垃圾渗滤液侵蚀后的试样渗透率快速增大,单轴抗压强度在前期增长不大,弹性模量下降明显。这是由于除了 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 之外,垃圾渗滤液中还含有其他成分,如 $\text{H}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等,都能增大混凝土材料的渗透性能,造成混凝土材料的劣化。特别是混凝土材料呈碱性, $\text{H}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 比 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 更容易与水泥水化产物反应。上述反应还能降低混凝土构件的碱性,会进一步引起混凝土水化产物的分解,加速混凝土材料的劣化。很明显, $\text{H}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的存在能极大的减弱和延缓 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 侵蚀产物的填充效应,使得混凝土试样的气体渗透率一直增大,单轴抗压强度在前期增长最小,弹性模量明显下降。

## 5 结论

(1) 3组试样的渗透率与围压大小密切相关。同一侵蚀时间下,随着围压的增大,渗透率逐渐减小。经垃圾渗滤液侵蚀后的试样渗透率随侵蚀时间线性增大,且围压越小,增大的速率越大,经硫酸钠溶液、氯化钠溶液侵蚀后的试样渗透率先减小后增大。经3种不同溶液侵蚀后,试样渗透率对围压的敏感程度均有所提高。

(2) 经3组侵蚀溶液侵蚀后的试样单轴抗压强

度变化总体包括两个阶段:线性增加段和缓慢下降段,经垃圾渗滤液侵蚀后的试样强度始终最小,经硫酸钠溶液侵蚀后的试样强度始终最大。弹性模量也呈现出相似的变化规律。

(3) 在同一侵蚀深度处,经垃圾渗滤液侵蚀后的试样,其自由氯离子含量比经氯化钠溶液侵蚀后的试样低20%~50%,因此,垃圾渗滤液侵蚀下混凝土试样被氯离子侵蚀的程度比单一氯化钠溶液侵蚀下混凝土试样低。

(4) 经垃圾渗滤液侵蚀后的试样在整个侵蚀过程中气体渗透率最大、单轴抗压强度最小,与硫酸钠溶液和氯化钠溶液相比,垃圾渗滤液对混凝土影响最大。在整个侵蚀过程中,气体渗透率随侵蚀的进行变化最为明显,比单轴抗压强度、氯离子扩散试验更能表征混凝土劣化情况。

上述研究结果可为侵蚀性环境下地下结构长期稳定性分析提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 刘松玉,李洪江,童立元,等.城市地下结构污染腐蚀耐久性的若干问题[J].岩土工程学报,2016,38(增刊2):7-17.  
LIU Song-yu, LI Hong-jiang, TONG Li-yuan, et al. Some problems on polluted erosive durability of urban underground structures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(Suppl.2): 7-17.
- [2] KJELDSSEN P, BARLAZ M A, ROOKER A P, et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2002, 32(4): 297-336.
- [3] 张红梅,速宝玉.垃圾填埋场渗滤液及对地下水污染研究进展[J].水文地质工程地质,2003,30(6):110-115.  
ZHANG Hong-mei, SU Bao-yu. Waste landfill leachate and research development of its pollution to groundwater[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 30(6): 110-115.
- [4] 张昊旻.废弃生活垃圾填埋场土地再利用研究[D].重庆:西南大学,2015.  
ZHANG Hao-min. The reuse of waste landfill site[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [5] 杨明亮,骆行文,喻晓,等.金口垃圾填埋场内大型建筑物地基基础及安全性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):628-637.

- YANG Ming-liang, LUO Xing-wen, YU Xiao, et al. Research on foundation and security of the edifice in Jinkou municipal refuse landfill[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(4): 628—637.
- [6] 施建勇, 冒俊. 水泥垃圾土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1951—1954.
- SHI Jian-yong, MAO Jun. Experimental research of strength characteristics of solid waste mixed with cement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 1951—1954.
- [7] 杨明亮, 姚海林, 冯其林, 等. 钻孔灌注桩施工过程中垃圾渗滤液对地下水的污染分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 586—590.
- YANG Ming-liang, YAO Hai-lin, FENG Qi-lin, et al. Research on groundwater pollution brought out by leachate of municipal refuse in bored pile construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 586—590.
- [8] 桂强, 秦敏峰, 李克非. 水泥基材料气体渗透性研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1500—1510.
- GUI Qiang, QIN Min-feng, LI Ke-fei. Recent research development on gas permeability of cement-based materials[J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2015, 43(10): 1500—1510.
- [9] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1968, 73(6): 2225—2236.
- [10] FLEMING I R, ROWE R K. Laboratory studies of clogging of landfill leachate collection and drainage systems[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(41): 134—153.
- [11] 胡大伟, 周辉, 潘鹏志, 等. 砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2749—2754.
- HU Da-wei, ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, et al. Study on permeability of sandstone under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2749—2754.
- [12] 中华人民共和国水利部. SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 352—2006 Test code for hydraulic concrete[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2006.
- [13] LIU Z B, SHAO J F, HU D W, et al. Gas permeability evolution with deformation and cracking process in a white marble under compression[J]. **Transport in Porous Media**, 2016, 111(2): 441—455.
- [14] 刘赞群. 混凝土硫酸盐侵蚀基本机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- LIU Zan-qun. Study on the basic mechanism of concrete sulfate erosion[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [15] 梁咏宁, 黄君一, 林旭健, 等. 氯盐对受硫酸盐腐蚀混凝土性能的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 947—951.
- LIANG Yong-ning, HUANG Jun-yi, LIN Xu-jian, et al. The effect of chloride on concrete under sulfate attack[J]. **Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)**, 2011, 39(6): 947—951.
- [16] 管志超, 徐锋, 王曙光, 等. 硫酸盐对氯离子在地下结构混凝土中传输过程的影响[J]. 混凝土, 2014(11): 34—37.
- GUAN Zhi-chao, XU Feng, WANG Shu-guang, et al. Research on the influence of sulfate upon chloride diffusing into concrete of underground structures[J]. **Concrete**, 2014(11): 34—37.
- [17] 郑永来, 郑洁琼, 张梅. 碳化程度对混凝土中氯离子扩散系数的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 412—416.
- ZHENG Yong-lai, ZHENG Jie-qiong, ZHANG Mei. Experimental study on effect of concrete carbonization degrees on chloride diffusion coefficient[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science Edition)**, 2010, 38(3): 412—416.
- [18] 聂良学, 许金余, 范建设, 等. 混凝土在酸侵蚀环境下的静动抗压强度研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2286—2290.
- NIE Liang-xue, XU Jin-yu, FAN Jian-she, et al. Static and dynamic compressive strength of concrete under acid attack[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2015, 34(8): 2286—2290.
- [19] 元成方, 牛荻涛, 陈娜, 等. 碳化对混凝土微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(4): 687—691.
- YUAN Cheng-fang, NIU Di-tao, CHEN Na, et al. Influence of carbonation on the microstructure of concrete[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2013, 32(4): 687—691.



- internal time theory[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2003, 13(3): 735—742.
- [18] 徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II): 模型分析[J]. **岩土力学**, 2005, 26(5): 693—698.
- XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, XIE Shou-yi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (II): model analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(5): 693—698.
- [19] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(1): 132—140.
- ZHANG Zhi-liang, XU Wei-ya, WANG Wei. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 132—140.
- [20] 交通部公路科学研究院. JTG E40—2007, 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Research Institute of Highway Science, Ministry of Communications. JTG E40—2007, Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [21] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Soil geotechnology in special geotechnical and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [22] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- LIU Xiong. An introduction to rock rheology[M]. Beijing: Geology Press, 1994.
- [23] 臧濛. 湛江黏土工程性状的结构损伤基动力响应特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- ZANG Meng. Research on structural damage of engineering behavior and dynamic characteristics for Zhanjiang structured clay[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [24] GIODA G. A finite element solution of non-linear creep problems in rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1981, 18: 35—38.
- [25] 王军保, 刘新荣, 郭建强, 等. 盐岩蠕变特性及其非线性本构模型[J]. **煤炭学报**, 2014, 39(3): 445—451.
- WANG Jun-bao, LIU Xin-rong, GUO Jian-qiang, et al. Creep properties of salt rock and its nonlinear constitutive model[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(3): 445—451.

---

#### 上接第 3464 页

- [20] 李冠颖, 郭俊志, 谢其泰, 等. 二氧化碳储存环境对油井水泥性质影响之研究[J]. **岩土力学**, 2011(增刊 2): 346—350.
- LEE Kuan-ying, KUO Chun-chin, HSIEH Chi-tai, et al. Study of mechanical and microscopic properties of APIG cement with additives exposed to CO<sub>2</sub>-rich environment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011(Suppl.2): 346—350.
- [21] CARDE C, ESCADEILLAS G, FRANCOIS R. Use of ammonium nitrate solution to simulate and accelerate the leaching of cement pastes due to deionized water[J]. **Magazine of Concrete Research**, 1997, 49(181): 295—301.
- [22] HEKAL E E, KISHAR E, MOSTAFA H. Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances[J]. **Cement & Concrete Research**, 2002, 32(9): 1421—1427.
- [23] 梁咏宁, 袁迎曙. 硫酸钠和硫酸镁溶液中混凝土腐蚀破坏的机理[J]. **硅酸盐学报**, 2007, 35(4): 504—508.
- LIANG Yong-ning, YUAN Ying-shu. Mechanism of concrete destruction under sodium sulfate and magnesium sulfate solution[J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2007, 35(4): 504—508.