

DOI: 10.11779/CJGE2019S2025

# 劣化对水泥土渗透性影响室内试验研究

焦德才<sup>1</sup>, 杨俊杰<sup>\*</sup>, 董猛荣<sup>1</sup>, 常玉军<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛瑞源工程集团有限公司, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 为研究水泥土渗透性随劣化程度的演化规律, 通过模拟水泥土在腐蚀场地的形成过程制备完全劣化水泥土试样, 并实施了一系列的室内渗透试验。试验结果表明: 浸泡溶液对完全劣化水泥土渗透系数的影响可忽略不计, 可利用腐蚀性较强的溶液浸泡以加快完全劣化, 缩短完全劣化水泥土制样时间。但是溶液浓度过高, 可造成水泥土试样表面脱落, 影响试样制备的质量; 完全劣化水泥土的渗透系数与水泥掺入比有关, 随水泥掺入比的增大, 完全劣化水泥土的渗透系数呈减小的趋势; 本文试验条件下, 粉土水泥土完全劣化后的渗透系数与粉土的渗透系数接近, 高岭土水泥土完全劣化后的渗透系数小于高岭土的渗透系数; 水泥土完全劣化后的渗透系数远大于未劣化水泥土的渗透系数。研究结果可为腐蚀场地的水泥土止水帷幕设计提供理论依据。

**关键词:** 粉土; 高岭土; 水泥土; 完全劣化水泥土; 渗透试验; 渗透系数

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0097-04

作者简介: 焦德才(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理研究工作。E-mail: 81134262@qq.com。

## Laboratory tests on effect of deterioration on permeability of cement soil

JIAO De-cai<sup>1</sup>, YANG Jun-jie<sup>1</sup>, DONG Meng-rong<sup>1</sup>, CHANG Yu-jun<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao Ruiyuan

Engineering Group Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

**Abstract:** The completely deteriorated cement soil samples were prepared by simulating the formation process of cement soil in the corrosive site, and a series of indoor permeability tests are conducted in order to study the evolution laws of permeability of cement soil with deterioration degree. The results show that the effect of soaking solution on the permeability coefficient of completely deteriorated cement soil is negligible, and it can be immersed by the corrosive solution to accelerate the complete deterioration and shorten the sample preparation time of completely deteriorated cement soil. However, the concentration of solution is too high, the surface of cement soil sample may fall off, which affects the quality of sample preparation. The permeability coefficient of completely deteriorated cement soil is related to the cement ratio, which decreases with the increase of cement ratio. Under the experimental conditions, the permeability coefficient of completely deteriorated silt cement soil is completely close to that of silt, and the permeability coefficient of completely deteriorated kaolin cement soil is less than that of kaolin. The permeability coefficient of completely deteriorated cement soil is much larger than that of cement soil. The research results can provide a theoretical basis for the design of cement soil waterproof in the corrosive site.

**Key words:** silt; kaolin; cement soil; completely deteriorated cement soil; permeability test; permeability coefficient

## 0 引言

水泥土是水泥或水泥浆与土充分混合后形成的加固体, 因其具有较低渗透性而常用于基坑工程中的防渗止水帷幕<sup>[1]</sup>。对于处在滨海相软土等腐蚀场地的水泥土止水帷幕, 由于海水等腐蚀介质的持续作用, 在强度降低的同时, 其渗透性也随时间增大, 即, 水泥土止水帷幕的渗透性随水泥土劣化程度而增大, 研究水泥土渗透性随劣化程度的演化规律, 可为腐蚀场地的水泥土止水帷幕设计提供理论依据。

关于劣化水泥土的渗透性, 陈四利等<sup>[2]</sup>通过将风

干、碾碎后的粉质黏土与水泥和污水充分搅拌, 在试模中静置24 h脱模后置于污水中养护至规定龄期后进行渗透试验。试验结果表明, 当养护龄期小于60 d时, 水泥土的渗透系数随养护龄期逐渐减小, 龄期超过60 d后, 由于污水的侵蚀作用, 导致水泥土的渗透系数随养护龄期逐渐增大。张精禹<sup>[3]</sup>将制备好的水泥土试样置于酸性环境中养护至规定龄期后进行渗透试

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779235, 41602322)

收稿日期: 2019-04-29

\*通讯作者(E-mail: jjyang@ouc.edu.cn)

验。试验结果表明，在  $\text{PH}=2$  的盐酸环境养护制样条件下，7%水泥掺量的水泥土在开始时渗透系数随养护龄期降低，当龄期超过 30 d 后，渗透系数随养护龄期逐渐增大。袁伟<sup>[4]</sup>利用室内渗透试验模拟研究了滨海相软土止水帷幕的渗透特性。将海水与青岛胶州湾海相软土混合制备水泥土试样后直接放于海水环境中养护，至规定龄期进行渗透试验。试验结果表明，随海水养护时间增加，水泥土渗透性逐渐增大。

上述研究虽然阐述了劣化和水泥土渗透性的关系，但是在研究中没有对文中的水泥土劣化程度给出明确的定义，因此无法得到劣化程度与水泥土渗透性的定量关系。崔新壮等<sup>[5]</sup>基于劣化层和未劣化层的定义<sup>[6]</sup>并结合达西定律，推导出了利用未劣化水泥土的渗透系数、劣化水泥土的等效渗透系数和劣化深度计算劣化层渗透系数的计算式。而杨俊杰等<sup>[7]</sup>的最新研究结果表明，水泥土的劣化由表及里可分为劣化层和未劣化层，其中劣化层包含完全劣化层和劣化过渡层。完全劣化层可看成是均质体，而劣化过渡层是非均质体，二者的渗透性不同，揭示水泥土止水帷幕的渗透性随时间的演化规律，首先应该研究完全劣化层和劣化过渡层的渗透性。本文利用室内渗透试验对比研究了原土及水泥土在劣化前和完全劣化后的渗透性，关于劣化过渡层的渗透性问题，限于本文篇幅另作讨论。

## 1 原土试样、水泥土试样和完全劣化水泥土试样的制备方法

### 1.1 试验用材料

试验用土、水泥和海水与文献[1]相同。其中，试验用土选择黄河口粉土和性质稳定的商用高岭土。高岭土为上海倍墨实业有限公司生产，粒径大小为 1250 目，粉粒含量占 39.3%，黏粒含量占 60.7%。

### 1.2 试样制备方案

为使水泥土试样易于搅拌均匀、成型，调整试验用土含水率至液限的 1.2 倍，水泥土试样制备方案与文献[1]相同。水泥土完全劣化是指贯入阻力为 0<sup>[7]</sup>，水泥土试样完全劣化指沿整个试样高度贯入阻力均为 0，因此使水泥土试样达到完全劣化所需时间较长。为此浸泡溶液分别采用海水（5 倍标准海水浓度）、浓硫酸（4.5 g/L）溶液和浓盐酸（4.5 g/L）溶液，以缩短浸泡时间。完全劣化水泥土试样制备方案的配合比与水泥土试样的配合比相同。

### 1.3 试样制备方法

#### (1) 原土试样制备方法

将土样烘干并碾碎，以 1.2 倍液限的含水率进行搅拌，分两次填入内壁涂抹少量玻璃胶<sup>[1]</sup>的环刀模具

中。制备的粉土试样平均密度为  $1.89 \text{ g/cm}^3$ ，饱和度为 0.94，高岭土试样的平均密度为  $1.55 \text{ g/cm}^3$ ，饱和度为 0.96。

#### (2) 水泥土试样制备方法

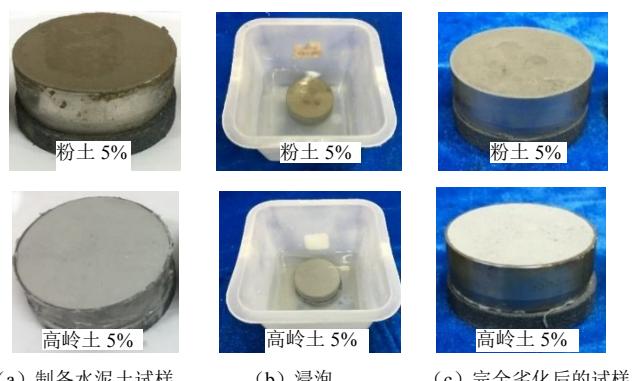
按试样制备方案，将烘干后的土样与水泥混合，再加入海水搅拌均匀，然后分两次填入内壁均匀涂抹有少量玻璃胶的环刀模具（直径 6.18 cm，高 4 cm）中。因初始水泥配合比不同，制备的水泥土试样平均密度也不同，高掺入比条件下的水泥土密度较大。但为保证水泥土的平均密度与原土一致，3 种配合比条件下，粉土水泥土试样的密度控制在  $(1.89 \pm 0.03) \text{ g/cm}^3$ ，高岭土水泥土试样的密度控制在  $(1.55 \pm 0.02) \text{ g/cm}^3$ 。将制备的试样放入养护箱中进行标准养护，至规定的龄期后实施渗透试验。

#### (3) 完全劣化水泥土试样制备方法

##### a) 完全劣化水泥土试样制备过程

完全劣化水泥土试样的填充方法与水泥土试样相同。由于水泥土试样完全劣化需要的时间较长，故将试样的高度减小为 2 cm。采用两面双向浸泡（上面暴露于溶液中，下面放透水石）方式浸泡，使水泥土劣化，利用微型贯入试验确认水泥土试样是否完全劣化。为室内模拟水泥加固体在腐蚀场地的形成过程，采用将水泥加固体不经标准养护立即浸泡的方法。完全劣化水泥土试样的制备过程如图 1 所示。

其中，粉土水泥土试样采用浓硫酸溶液浸泡时，浓硫酸对试样的腐蚀作用影响较大，造成试样与环刀内壁脱落（图 2），未能实施渗透试验。



(a) 制备水泥土试样      (b) 浸泡      (c) 完全劣化后的试样

图 1 完全劣化水泥土试样制备过程

Fig. 1 Sample preparation process of completely deteriorated cement soil

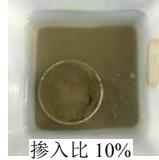


图 2 浓硫酸浸泡的粉土水泥土试样

Fig. 2 Silt cement soil sample immersed in sulfuric acid

### b) 完全劣化水泥土试样的贯入曲线

图 3 为不同溶液浸泡后的部分水泥土试样的贯入曲线。

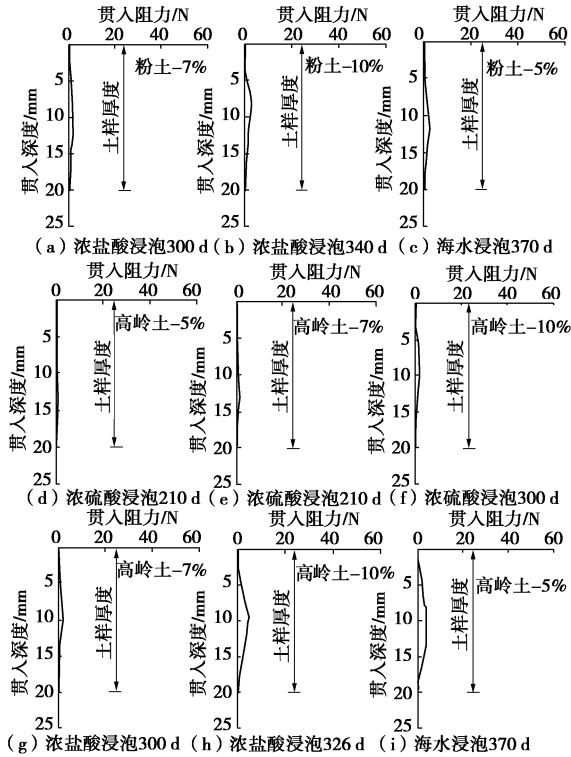


图 3 水泥土试样的贯入曲线

Fig. 3 Penetration curves of cement soil sample

如图 3 所示, 每种试验条件下贯入阻力沿着整个土样厚度几乎为 0, 表明水泥土试样完全劣化。试验为确定每种溶液导致水泥土完全劣化所需要的时间, 制备多个平行试样同时进行浸泡, 隔一段时间取出一个试样实施微型贯入试验, 判断试样是否完全劣化。如果未完全劣化, 剩余试样继续浸泡, 直至确定完全劣化后, 利用剩余试样实施渗透试验。因此, 确认的水泥土试样完全劣化时间(上述不同试验条件下的浸泡时间)可能比刚刚好劣化的时间(准确的时间)略长。

浸泡溶液相同时, 掺入比越小, 越容易劣化<sup>[6]</sup>, 掺入比为 7% 时采用浓盐酸浸泡至 300 d, 粉土水泥土和高岭土水泥土试样完全劣化, 故认为 5% 掺入比的水泥土试样采用相同溶液浸泡至相同龄期时, 水泥土试样也完全劣化。

粉土水泥土相同浸泡时间, 浓硫酸浸泡后水泥土试样与环刀内壁脱落, 无法试验(图 2), 而浓盐酸浸泡后水泥土试样可以实施微型贯入试验(图 3b)。可知相同配合比, 不同溶液浸泡至水泥土完全劣化的时间不同, 采用浓硫酸浸泡所需时间较短。但是, 浓硫酸容易造成试样表面脱落, 影响试样制备的质量, 在采用浓硫溶液浸泡时, 应适当减小溶液的浓度。

## 2 浸泡溶液对完全劣化水泥土渗透性的影响

图 4 为采用不同溶液制备的完全劣化水泥土试样的渗透试验结果。

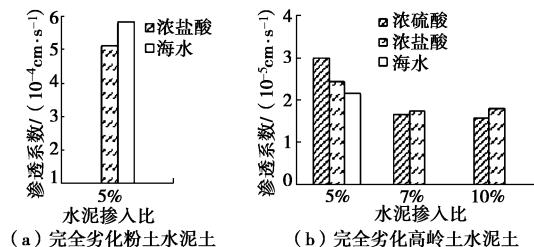


图 4 不同浸泡溶液对完全劣化水泥土渗透性的影响

Fig. 4 Effects of different soaking solutions on permeability of completely deteriorated cement soil

如图 4(a)所示, 浓盐酸和海水浸泡至粉土水泥土完全劣化后的渗透系数介于  $5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$  cm/s, 渗透系数差值较小。如图 4(b)所示, 高岭土水泥土的掺入比为 5% 时, 不同溶液浸泡至水泥土完全劣化后的渗透系数介于  $2 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5}$  cm/s; 掺入比为 7% 时, 水泥土完全劣化的渗透系数在  $1.6 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-5}$  cm/s 之间; 掺入比为 10% 时, 水泥土完全劣化后的渗透系数介于  $1.5 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-5}$  cm/s 之间, 相同掺入比条件下的渗透系数差值较小。说明浸泡溶液对完全劣化水泥土渗透系数的影响可忽略不计, 这主要是由于不同溶液的浸泡对水泥土的劣化机理是相同的, 只是至水泥土完全劣化的时间不同。

综上所述, 可利用腐蚀性较强的溶液浸泡以加快完全劣化, 缩短完全劣化水泥土制样时间。但是为防止水泥土试样表面受到强酸的腐蚀作用, 保障试样制备的质量, 在采用浓硫溶液浸泡时, 应适当减小溶液浓度。本文采用浓度为 4.5 g/L 的浓硫酸溶液浸泡粉土水泥土时, 造成试样与环刀内壁脱落(图 2), 建议在浸泡粉土水泥土试样时应适当减小浓硫酸溶液的浓度。

## 3 原土及水泥土在劣化前和完全劣化后的渗透性

图 5 为原土及水泥土在劣化前和完全劣化后的渗透性比较。

如图 5(a)所示, 粉土渗透系数为  $3.13 \times 10^{-4}$  cm/s。粉土水泥土的渗透系数随掺入比的增大和养护龄期的增加逐渐降低, 其中掺入比为 10% 时的渗透系数较掺入比为 5% 和 7% 时的渗透系数减少一个数量级。完全劣化粉土水泥土的渗透系数也与掺入比有关, 随掺入比的增大, 完全劣化水泥土的渗透系数呈减小的趋势。

完全劣化粉土水泥土渗透系数的数量级与粉土渗透系数的数量级相同；粉土水泥土完全劣化后的渗透系数远大于劣化前的渗透系数，完全劣化后渗透系数的数量级较劣化前的渗透系数高3个或者4个数量级。

如图5(b)所示，高岭土渗透系数为 $5.64 \times 10^{-5}$  cm/s。高岭土水泥土的渗透系数随掺入比的增大和养护龄期的增加逐渐降低。完全劣化高岭土水泥土的渗透系数随掺入比的增大逐渐降低。完全劣化高岭土水泥土渗透系数的数量级与高岭土渗透系数的数量级相同；高岭土水泥土完全劣化后的渗透系数远大于劣化前的渗透系数，完全劣化后渗透系数的数量级较劣化前的渗透系数高2个数量级。对比可知，完全劣化高岭土水泥土的渗透系数小于完全劣化粉土水泥土的渗透系数。

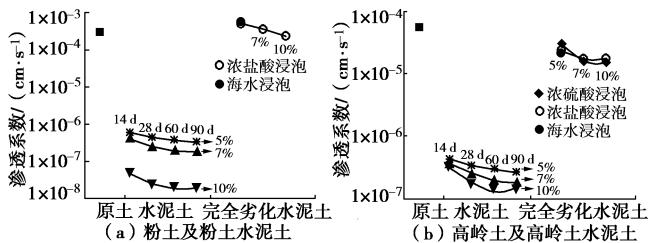


图5 原土及水泥土劣化前和完全劣化后的渗透性

Fig. 5 Permeabilities of original soil, cement soil and completely deteriorated cement soil

## 4 结 论

(1) 水泥土的渗透系数随掺入比的增大和养护龄期的增加逐渐降低；完全劣化水泥土的渗透系数与水泥掺入比有关，随水泥掺入比的增大，完全劣化水泥土的渗透系数呈减小的趋势。

(2) 水泥土完全劣化所需时间与水泥土配合比有关。掺入比越大，相同溶液浸泡时，完全劣化所需的时间越长。

(3) 本文试验条件下，粉土水泥土完全劣化后的渗透系数与粉土的渗透系数接近；高岭土水泥土完全劣化后的渗透系数小于高岭土的渗透系数。

(4) 水泥土完全劣化后的渗透系数远大于未劣化水泥土的渗透系数。

## 参考文献：

[1] 焦德才, 杨俊杰, 董猛荣, 等. 水泥土的长期渗透特性研究

- [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 待刊. (JIAO De-cai, YANG Jun-jie, DONG Meng-rong, et al. Long-term permeability characteristics of cement soil[J]. Periodical of Ocean University of China. (Accepted)(in Chinese))
- [2] 陈四利, 杨雨林, 周辉, 等. 污水环境对水泥土渗透性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3047–3054. (CHEN Si-li, YANG Yu-lin, ZHOU Hui, et al. Effect of sewage environment on permeability of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3047–3054. (in Chinese))
- [3] 张精禹. 化学溶液对水泥土渗透性能影响的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016. (ZHANG Jing-yu. Experimental study on effects of chemical solution on permeability of cemented soil[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [4] 袁伟. 海水环境对水泥土渗透性和强度的影响及机理分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012. (YUAN Wei. Effect of seawater condition on permeability and strength of cement-treated soil and mechanism analysis[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese))
- [5] 崔新壮, 侯飞, 黄丹, 等. 一种水泥土劣化层渗透系数的室内测定方法和装置[P]. CN104458530A, 2015-03-25. (CUI Xin-zhuang, HOU Fei, HUANG Dan, et al. Indoor measuring method and device for permeability coefficient of cement soil degradation layer[P]. CN104458530A, 2015-03-25. (in Chinese))
- [6] 杨俊杰, 张玥宸, 闫楠, 等. 场地形成的水泥土的劣化室内模拟试验[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 1–5. (YANG Jun-jie, ZHANG Yue-chen, YAN Nan, et al. Laboratory simulation experiment on deterioration of cement stabilized soil in site[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(3): 1–5. (in Chinese))
- [7] 杨俊杰, 董猛荣, 孙涛, 等. 现场条件下水泥土劣化试验及劣化深度预测[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(4): 297–302. (YANG Jun-jie, DONG Meng-rong, SUN Tao, et al. Test of cement soil degradation under in-suit conditions and degradation depth prediction[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(4): 297–302. (in Chinese))

(责编: 孙振远)