

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.04.015



污水环境对水泥石力学性能的影响试验研究

陈四利, 杨雨林, 张精禹

(沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 由于多数地下水泥石工程直接与地下腐蚀性介质环境接触, 必将导致水泥石材料的逐步劣化甚至失效破坏。以某市区工地附近明渠排放的污水作为侵蚀性介质, 制作了不同水泥掺量的水泥石试件, 通过对比试验, 研究了污水环境和清水环境下不同水泥掺量、不同龄期的水泥石抗压强度和抗剪强度。结果表明, 在污水或清水环境下, 相同水泥掺量水泥石 30 d 龄期的抗压强度几乎相等, 随着龄期的增加其抗压强度均逐步增大, 但污水环境下其抗压强度增长的幅度明显小于清水环境, 90 d 后清水环境的水泥石抗压强度不再增长, 而污水环境的抗压强度开始降低; 污水环境和清水环境下的水泥石内摩擦角和黏聚力随龄期、水泥掺量的增加均逐步增大, 污水环境下龄期 90 d 后的内摩擦角和黏聚力均开始降低。

关键词: 水泥石; 污水; 水泥掺量; 抗压强度; 抗剪强度

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)04-0112-06

Experimental analysis of effects of polluted water environment on mechanical properties of cemented soil

Chen Sili, Yang Yulin, Zhang Jingyu

(School of Architecture & Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, P. R. China)

Abstract: The majority of underground cemented soil projects contact with underground corrosive medium environment directly, which will lead to the deterioration of cemented soil material gradually or even failure. The discharged polluted water from the open channel near construction site is used as a kind of corrosive medium to produce test pieces of cemented soil with different cement content. In both polluted water environment and clean water environment, the compressive strength and shear strength of cemented soil with different cement content and different ages are compared. The results show that when the age is 30 days, compressive strength of cemented soil with the same cement content is almost the same in polluted water environment and clean water environment. Compressive strength of cemented soil gradually increases with the increase of the age. However, the increase extent of compressive strength in polluted water environment is significantly less than that in clean water environment. After 90 days, compressive strength of cemented soil no longer increases in clean water environment, and compressive strength begins to decrease in polluted water environment. The internal friction angle and the cohesion of cemented soil gradually increase with the increase of the age and cement content in polluted water environment and clean water environment. The internal friction angle and the cohesion begin to decrease in polluted

收稿日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(51279109)

作者简介: 陈四利(1959-), 男, 教授, 博士, 主要从事环境岩土力学及其应用研究, (E-mail) chen1458@163.com.

Received: 2015-03-31

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51279109)

Author brief: Chen Sili(1959-), professor, main research interest: environmental geotechnical mechanics, (E-mail) chen1458@163.com.

water environment after 90 days.

Key words: cemented soil; polluted water; cement content; compressive strength; shear strength

由于水泥土施工工艺简单、工期短、价格低廉、性能良好等特点,在建筑地基加固、基坑挡土墙及基坑止水帷幕等工程中得到广泛应用^[1]。学者们对水泥土在自然环境的力学性质研究较多,也取得了一定的研究结果^[2-6]。众所周知,地下结构的损坏多数与地下水的侵蚀有关,生活污水、工业污水等侵蚀性介质融入地下水中,地下水以及土质屡遭不同程度的污染,必将导致与污染环境接触的水泥土工程质量逐步劣化甚至失效破坏。比如在侵蚀性地下水地层中进行水泥土桩施工时,不仅要重视地下水对水泥土桩使用安全性的影响,而且在水泥土桩施工时地下水的侵入也要引起足够的重视。由于不同腐蚀介质的地下水对建筑材料有不同程度的影响,因此,有关这方面的课题越来越引起众多学者的关注,如刘恩军^[7]介绍了侵蚀性地下水对地下结构工程的影响、评价标准及其防治措施。宁宝宽等^[8-10]探讨了环境侵蚀下水泥土的力学效应、细观破裂过程以及水泥土桩承载力的影响。陈四利等^[11-13]进行了化学侵蚀下水泥土的无侧限抗压强度试验、渗透时间以及冻融循环对水泥土影响的试验研究。然而,在实际工程中,地下侵蚀环境不是单一的化学成分,是多种腐蚀介质的共同作用。为此,笔者根据工程实际情况,考虑多种腐蚀性介质的影响,如污水环境下水泥土力学特性的腐蚀效应,为水泥土工程的安全性和耐久性设计和应用提供技术参数。根据工程实际情况,设计了污水环境下水泥土抗压与抗剪试验,研究了污水对水泥土的抗压强度、内摩擦角和黏聚力的影响规律。

1 试验方案及试件制备

1.1 试验材料和试样制备

试验采用强度等级为 42.5 的矿渣硅酸盐水泥,其质量符合国家建材标准。试验所用土为取自沈阳市某地的粉质黏土,经过风干、碾压,并且通过 5 mm 筛,主要的物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 试验用土主要物理性质指标

Table 1 Main physical properties of test soil

天然含水率 $\omega/\%$	天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
16.5	21.4	20.0	16.3	3.75	0.07

清水为自来水,污水取自沈阳某工程工地附近明渠排放的污水,检测后,其主要化学成分如表 2 所示,其 pH 值为 6.5。

表 2 污水的化学成分

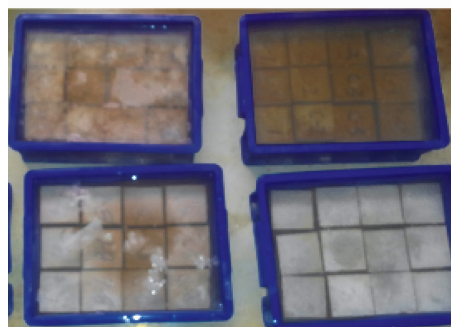
Table 2 Chemical composition of polluted water

(mg · L ⁻¹)				
Cl ⁻	HPO ₄ ⁻	Zn ²⁺	SO ₄ ⁻	Mg ²⁺
340	67.5	5.5	166.2	2.1
K ⁺	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	Fe ³⁺
32.5	581.0	76.2	219.1	4.2

水泥土试件中的水泥掺量采取 3 种配制形式,即水泥掺量分别为 9%、12%、15%;3 种配合比试验,土、水泥、水(清水或污水)质量比分别为 1:0.09:0.18,1:0.12:0.24,1:0.15:0.3。3 种配合比均分别用清水搅拌和污水搅拌,将搅拌后水泥土分别装入 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 钢模为抗压试验试件和直径 60 mm、高 20 mm 的环刀中为抗剪试验试件,静置 24 h 脱模,清水搅拌的试件置于清水中养护(简称清水环境),污水搅拌的试件置于污水中养护(简称污水环境),水的温度为(20 ± 1)℃,分别养护至 30、60、90、120 d 待用。试件养护情况如图 1 所示。



(a) 抗剪强度试件的养护



(b) 抗压强度试件的养护

图 1 水泥土试件的养护

Fig. 1 Curing of cemented soil specimens

1.2 试验方案

根据《JGJT 233—2011 水泥土配合比设计规程》的要求以及试验设计的要求,进行水泥土试件抗压强度试验和直剪试验,主要仪器设备有 YAW—300B 型全自动压力试验机和 ZJ 型应变控制式直剪仪。

对养护龄期为 30、60、90、120 d 的试件进行抗压试验和抗剪试验,获取抗压强度和抗剪强度相关参数。

2 试验结果及分析

2.1 污水对水泥土抗压强度的影响

在污水环境和清水环境下,随着水泥掺量的增大,其水泥土抗压强度均逐步增大,而且污水环境和清水环境下的水泥土抗压强度变化趋势也基本相同,如图 2 所示。

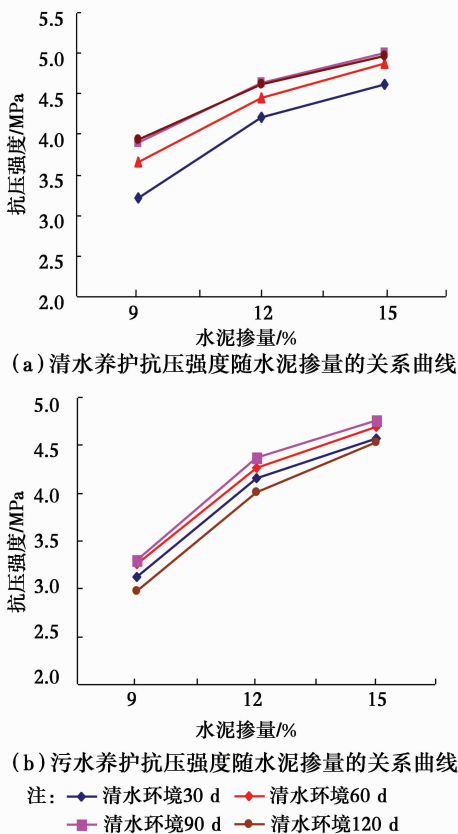


图 2 水泥土在不同龄期抗压强度随水泥掺量的关系曲线

Fig. 2 Relation curves of compressive strength on cemented soil with cement content in different age

如图 3 所示,污水环境和清水环境在龄期 30 d 处的抗压强度基本相等,说明小于龄期 30 d 的抗压强度其环境影响不大,随着龄期的增加其清水环境下的水泥土抗压强度逐步增大,90 d 后几乎不再增

长。而污水环境下的水泥土抗压强度虽然也逐步增大,但增大的幅度明显小于清水环境,而且 90 d 后其抗压强度又开始降低。龄期 120 d 且水泥掺量为 9%、12% 和 15% 时的清水养护抗压强度分别为 3.93、4.61 和 4.97 MPa,而污水养护分别降至 2.97、4.01 和 4.53 MPa。

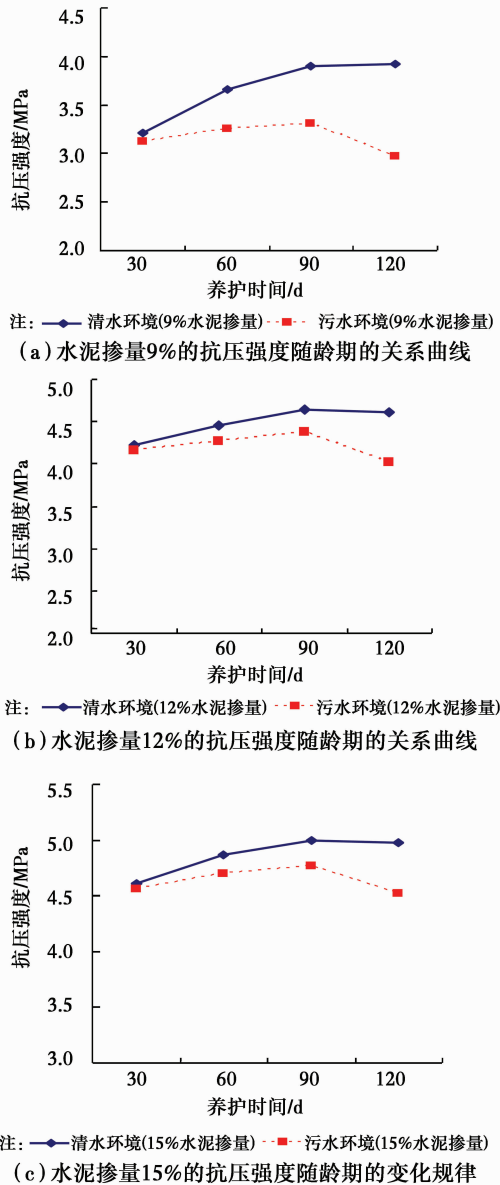


图 3 污水与清水环境水泥土抗压强度随龄期的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of compressive strength on cemented soil with age in clean water and polluted water

2.2 污水对水泥土抗剪强度的影响

不同龄期、不同水泥掺量条件下水泥土抗剪强度与法向应力的关系规律如图 4 所示。从图中可以看出,清水和污水中养护,水泥土抗剪强度随着法向应力的增加而增大,回归分析可知,其变化呈线性关系。同时还可以看出,在相同龄期、相同水泥掺量

下,清水环境的抗剪强度大于污水环境的抗剪强度,而且两条回归曲线几乎平行,也说明污水环境致使

黏聚力弱化,影响较大,内摩擦角与清水环境几乎相同,影响较小。

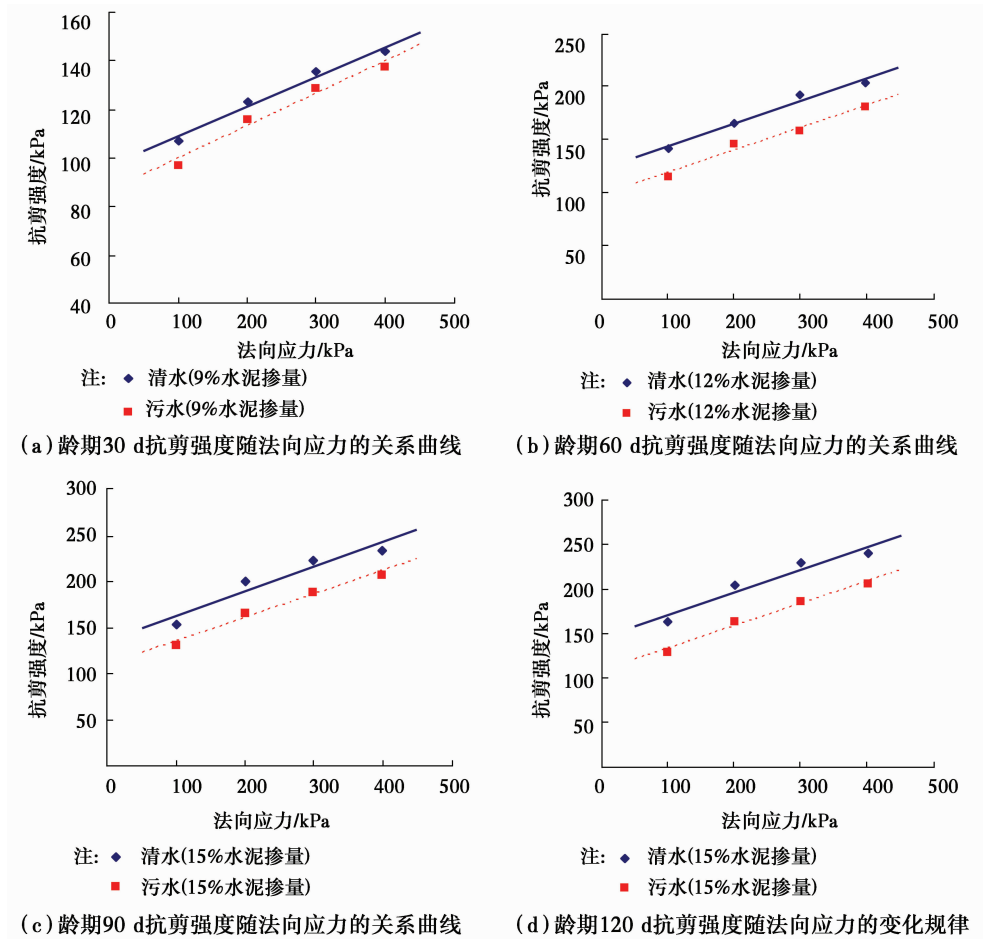


图 4 不同水泥掺量和龄期抗剪强度随法向应力的关系曲线

Fig. 4 Relation curves of shear strength on cemented soil with normal stress in different cement content and age

根据在污水环境或清水环境下不同水泥掺量、不同龄期水泥土抗剪强度随法向应力的变化规律,利用库仑定律,水泥土的抗剪强度方程为

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ_f 为水泥土的抗剪强度, kPa; σ 为法向应力, kPa; φ 为内摩擦角, ($^\circ$); c 为黏聚力 kPa。

图 4 中的线性回归曲线与横坐标的夹角即为内摩擦角,与纵坐标的截距即为黏聚力。由此可以得到污水环境与清水环境下不同水泥掺量,不同龄期水泥土的内摩擦角、黏聚力的大小,并绘制曲线如图 5、图 6 所示。

由图 5 可知,在污水环境和清水环境下水泥土内摩擦角随龄期、水泥掺量的增加而增大,龄期 90 d 后,内摩擦角变化不大,且略有降低的趋势。同时,水泥掺量相同,污水养护下的内摩擦角比清水养护下的内摩擦角均略有降低,且降低幅度非常小,说明

水泥掺量相同情况下,污水环境对内摩擦角的影响小。由图 6 可知,在污水环境和清水环境下水泥土黏聚力随龄期、水泥掺量的增加而增大,龄期 90 d 后,清水环境下的黏聚力几乎没有增加,而污水环境下的黏聚力呈下降趋势。对于不同龄期和不同水泥掺量,污水养护下的黏聚力比清水养护下的黏聚力均有降低,且降低幅度较大。说明水泥掺量相同情况下,污水环境对黏聚力的影响较大。

2.3 污水环境影响机理初步分析

土的矿物成分主要有 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 及少量云母和可溶盐。水泥主要水化反应是硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙。污水含有多种离子如表 2 所示。无机物及微生物,化学成分复杂,用污水制作养护水泥土,污水中离子会和水泥离子发生复杂的化学反应,会阻碍水泥的水化反应,同时和水泥水化后的产物发生反应,从而影响水泥土

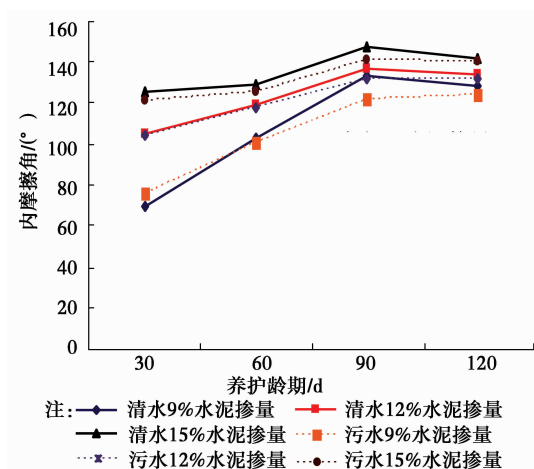


图5 污水养护与清水养护下不同水泥掺量水泥土的内摩擦角随龄期的关系曲线

Fig. 5 Relation curves of internal friction angle on cemented soil with age in clean water and polluted water of different cement content

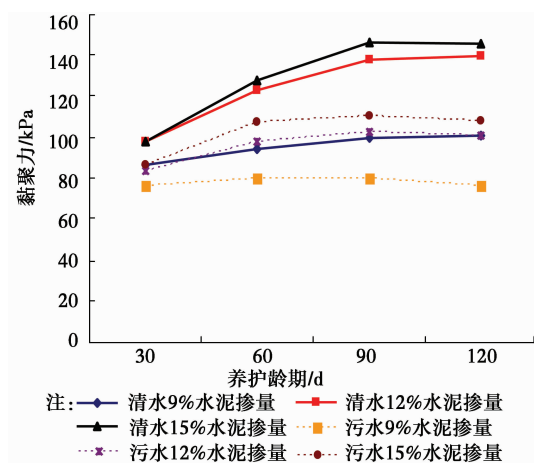
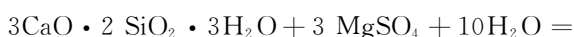
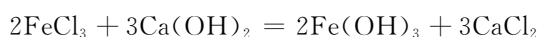
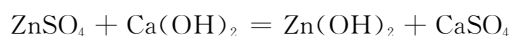
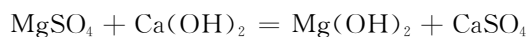


图6 污水养护与清水养护下不同水泥掺量水泥土的黏聚力随龄期的关系曲线

Fig. 6 Relation curves of cohesion on cemented soil with age in clean water and polluted water of different cement content

的强度。例如 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{3+} 都会和 $Ca(OH)_2$ 反应,消耗 $Ca(OH)_2$ 应而阻碍了水泥的水化反应。 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 导致 $C-S-H$ 开始分解生成 $M-S-H$ (水化硅酸镁), $M-S-H$ 的黏性很差,且强度不高。主要化学方程式如下:



另一方面,水泥颗粒可以吸附在比表面积大的土颗粒周围,不断凝结成一个整体,也可以产生相当数量的硅氧四面体和铝氢氧八面体生成片或网状^[11]。但由于 Cl^- 的作用使水泥土引起蜂窝状孔洞使水泥颗粒不能更好吸附在土颗粒周围从而影响强度。

3 结论

对水泥土进行了污水制作养护与清水制作养护对比试验,分析了不同水泥掺量、不同龄期对水泥土抗压强度、抗剪强度的影响,得到如下的结论:

1) 在污水环境和清水环境下,龄期小于 30 d 的水泥土抗压强度几乎相等,随着龄期的增加其清水环境下的水泥土抗压强度逐步增大,90 d 后几乎不再增长。而污水环境下的水泥土抗压强度虽然也逐步增大,但增大的幅度明显小于清水环境,而且 90 d 后其抗压强度不再增长,开始降低。

2) 不同水泥掺量和不同龄期的水泥土抗剪强度随着法向应力的增加而增大,试验结果表明,其抗剪强度变化呈线性关系,污水环境的抗剪强度明显小于清水环境的抗剪强度,而且两条曲线几乎平行,也说明污水环境致使黏聚力弱化,影响较大,内摩擦角与清水环境几乎相同,影响较小。

3) 污水环境和清水环境下水泥土内摩擦角随龄期、水泥掺量的增加而增大,在龄期 90 d 后,内摩擦角变化不大,且略有降低的趋势。污水环境下的内摩擦角比清水环境下的内摩擦角均略有降低,且降低幅度非常小。

4) 污水环境和清水环境下水泥土黏聚力随龄期、水泥掺量的增加而增大,在龄期 90 d 后,清水环境下的黏聚力几乎没有增加,而污水环境下的黏聚力呈下降趋势。污水环境下的黏聚力比清水环境下的黏聚力均有降低,且降低幅度较大。说明水泥掺量相同情况下,污水环境对黏聚力的影响较大。

参考文献:

- [1] 陈四利, 宁宝宽. 岩土材料的环境效应[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
Chen S L, Ning B K. Environment effect of geotechnical material [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 周海龙, 申向东, 薛慧君. 小龄期水泥土无侧限抗压强度试验研究[J]. 山东大学学报, 2014, 44(1): 75-79.
Zhou H L, Shen X D, Xue H J. Experiment research

- on unconfined compressive strength of cement soil under small age [J]. *Journal of Shandong Unniversity*, 2014, 44(1): 75-79. (in Chinese)
- [3] 孙宇雁,王子国,孙衍湖.关于水泥土抗剪强度的试验研究[J].*山西建筑*,2008,34(32):162-164.
Sun Y Y, Wang Z G, Sun Y H. Experimental study on shear strength of the soil cement [J], *Shanxi Architecture*, 2011, 37(5):146-148. (in Chinese)
- [4] Consoli N C, da Fonseca A V, Silva S R, et al. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils [J]. *Geotechnique*, 2012, 62(2): 177-183.
- [5] Consoli N C, de Moraes R R, Festugato L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(10): 1568-1573.
- [6] 赵振亚,申向东,贾尚华. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对低掺量水泥土的强度影响[J]. *土木建筑与环境工程*,2012, 34(Sup1): 170-173.
Zhao Z Y, Shen X D, Jia S H. Influence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on strength of low proportional cemented soil [J]. *Journal of Civil, Architectural & Engineering*, 2012, 34 (Sup1):170-173. (in Chinese)
- [7] 刘恩军. 侵蚀性地下水对地下结构工程的影响、评价标准及其防治措施[J]. *地下工程与隧道*,2001(4): 38-45.
Liu E J. Erosive impact of groundwater on the underground structure engineering, evaluation standards and control measures [J]. *Underground Works and Tunnels*, 2001(4):38-45. (in Chinese)
- [8] 宁宝宽,陈四利,刘斌,等. 环境侵蚀下水泥土的力学效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(4): 600-603.
Ning B K, Chen S L, Liu B, et al. Experimental study of cemented soil under environmental erosion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 600-603. (in Chinese)
- [9] 宁宝宽,刘斌,陈四利. 环境侵蚀对水泥土桩承载力影响的试验及分析[J]. *东北大学学报*, 2005, 26(1): 299-302.
Ning B K, Liu B, Chen S L. Bearing capacity study of cement-mixed soil pile under environmental erosion [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2005, 26(1): 95-98. (in Chinese)
- [10] 宁宝宽,陈四利,丁梧秀,等. 环境侵蚀下水泥土的强度及细观破裂过程分析[J]. *岩土力学*, 2009, 10(8): 2215-2219.
Ning B K, Chen S L, Ding W X, et al. Analysis of meso-fracture process of cemented soil under environmental erosion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 10(8): 2215-2219. (in Chinese)
- [11] 陈四利,宁宝宽,刘一芳,等. 化学侵蚀下水泥土的无侧限抗压强度试验[J]. *新型建筑材料*, 2006(6):40-42.
Chen S L, Ning B K, Liu Y F, et al. Experimental study of unconfined compression strength on cement soil under chemical erosion [J]. *New Building Materials*, 2006(6): 40-42. (in Chinese)
- [12] Chen S L, Dong K H, Yu T, et al. Experimental study on infiltration time effects of mechanical behaviors of cement soil [J]. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 2013, 50(20): 302-309.
- [13] 陈四利,史建军,于涛,等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(2): 343-349.
Chen S L, Shi J J, Yu T, et al. Influence of freezing and thawing cycles on mechanical properties of cemented soil [J]. *Journal of Basic Science and Engineering Applications*, 2014, 22(2): 343-349. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)