

环境侵蚀下水泥土的力学效应试验研究

宁宝宽¹⁻³, 陈四利^{2,3}, 刘斌¹, 刘一芳²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 2. 沈阳工业大学 建筑工程学院, 沈阳 110023;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 土木工程中广泛使用的软土地基加固方法主要有水泥土搅拌法、旋喷法、注浆法等, 其原理主要是形成具有一定强度和稳定性的水泥土加固体。在我国广大地区地下水受工农业、生活以及海水等环境因素的影响, 常含有一些具有侵蚀性的离子, 如 SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^{2-} 等。通过模拟试验的方法, 探讨了各种侵蚀性的离子在不同浓度和不同 pH 值条件下对水泥土的力学效应, 并对环境侵蚀机理进行了探讨。试验结果表明, 水化学作用对水泥土的力学性质具有明显的影响, 对水泥土在复杂地质环境条件的设计和工程应用具有重要意义。

关键词: 水泥土; 环境侵蚀; 无侧限抗压强度; 力学效应

中图分类号: TU 411.3

文献标识码: A

Experimental study of cemented soil under environmental erosion

NING Bao-kuan¹⁻³, CHEN Si-li^{2,3}, LIU Bin¹, LIU Yi-fang²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. School of Architecture & Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China;

3. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The soil-cement pile foundation was widely used to improve soft foundation in civil engineering. Some erosive ions, which lie in groundwater and seawater, might affect mechanical property of cemented soil. In this paper, some testing was made about cemented soil curing in erosive chemical conditions. Based on the testing data, the mechanical effects of cemented soil in different environmental conditions were discussed. The results show that the chemical erosion was evident on cemented soil. At the same time, mechanisms of erosion were analyzed.

Key words: cemented soil; chemical erosion; unconfined compression strength; mechanical effect

1 引言

水泥土是依靠机械力搅拌或射流冲切, 把地基的天然软土与水泥浆(或粉)混拌在一起形成的桩体, 由于其性能良好、材料来源广泛、价格低廉, 在土木工程中常用于路基的改良和加固建筑工程的复合地基以及基坑的挡土墙、防渗墙等, 它是改善高饱和和软土力学性质常用的地基处理方法。目前水泥土桩在我国沿海地区已大面积推广应用, 并取得了一系列的技术经济效果。

有关水泥土在自然条件下的力学性质研究的较多, 也取得了一定的研究成果^[1-3]。但是, 工程实际中, 水泥土常受周围环境因素, 特别是常含有一

些具有侵蚀性离子(如: SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} 等)的地下水、生活污水和海水等的影响。环境因素对水泥土力学性质的影响, 这方面的研究还鲜有报导, 因为有关水泥土受环境效应的研究才刚刚起步, 其试验技术和手段还不系统不完善, 理论亦不够成熟, 还有很多需要探索和研究的工作, 文献[4,5]仅仅做了初步探讨。为此, 根据工程的实际情况, 本文将着重探讨各种环境因素(水、不同化学溶液、不同浓度以及不同 pH 值等)对有一定水泥掺量的水泥土侵蚀后的力学效应。它的研究为建筑工程地基基础、基坑防渗、挡土墙护坡以及路基改良等工程设计和计算提供更准确有效的技术参数, 具有重要的理论意义和工程实际意义。

收稿日期: 2003-12-31

修改稿收到日期: 2004-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.50204009)和中国科学院岩土力学重点实验室开放课题(No. Z110403)资助。

作者简介: 宁宝宽, 男, 1971 年生, 博士研究生, 主要从事土木工程方面的研究与教学工作。E-mail: ningbk@126.com

2 试验方案和试验方法

2.1 水泥加固土的原状土特征

水泥土的原状土取自沈阳市某路基地下约 3 m 深处的粉质粘土，该土在自然状态下呈软塑状，其主要物理性质指标如表 1 所列。

表 1 试验用土样主要物理性质指标

Table 1 The results of physical behaviors of soil

含水量 w/%	孔隙比 e	天然重度 /kN·m ⁻³	比重 d _s	饱和度 S _r /%	液限 w _L /%	塑限 w _P /%	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	分类
27.0	0.85	19.2	2.71	96.8	35.0	19.4	15.6	0.58	粉质粘土

2.2 水泥土试块的制备和养护

在水泥土试块制备的过程中，首先把粉质粘土按干重度配制含水量为 40 % 的试件，水泥采用 425# 普通硅酸盐水泥，掺入比为 15 %，水灰比为 0.5，将水泥和土搅拌均匀，装入 7.07 cm × 7.07 cm × 7.07 cm 的钢模中；然后，抹平表面并编号，24 h 脱模后分别放入装有预先配制好的化学溶液的玻璃容器中进行浸泡，并将装有试件的玻璃容器放入标准养护箱中。在试件养护过程中，每天早晚 2 次用酸度计测试溶液的 pH 值，通过滴入少许酸或碱液来保证溶液特定的 pH 值。

2.3 化学溶液的配制

为了分析和探讨不同化学溶液 (CaCl₂, Na₂SO₄ 和 NaHCO₃) 不同摩尔浓度 (0.01, 0.1, 1.0 mol/L) 不同 pH 值 (2, 4, 7, 9, 12) 环境对水泥土特性的影响，并根据各地区地下水质量的实际情况，以及适当减少试验工作量并考虑试验结果的全面性，采用了正交设计的原则配制化学溶液。

3 试验成果及分析

3.1 水泥土试样的试验结果

鉴于目前水泥土试验无国家规范，本次试验参照土工试验及建材试验等相关规程进行。采用南京土壤仪器厂生产的应变控制式三轴仪，在预定的龄期分别进行各试件的无侧限抗压强度测试。由于所有试件均一次制作成型，材质均匀，外观良好。对部分试件做了 7, 14 d 等平行试验，结果变异性较小。因此，本试验均为单个样品在各种侵蚀条件下 28 d 龄期的测试结果。

3.2 试验结果分析

不同的环境条件对水泥土的侵蚀影响是不同的，与不同化学溶液、浓度及 pH 值的大小密切相关。现对试验结果讨论如下。

3.2.1 不同 pH 值的影响

化学溶液的 pH 值大小对水泥土强度的影响非

常明显，图 1 为不同 pH 值在各溶液中养护 28 d 的水泥土荷载-位移曲线。

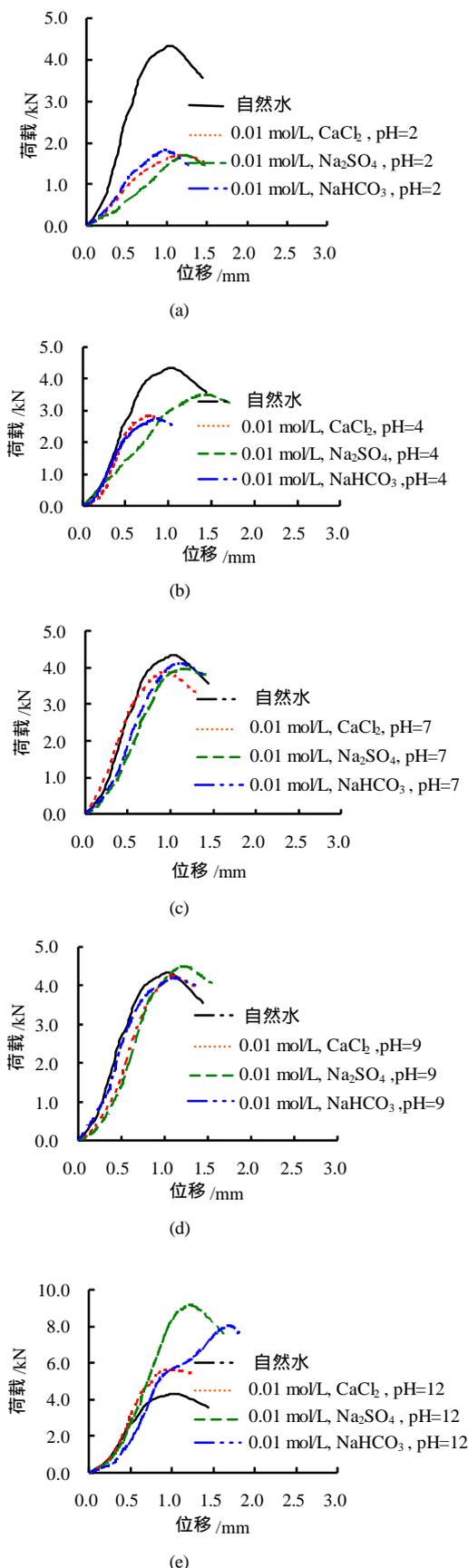


图 1 水泥土荷载-位移曲线

Fig.1 Load-displacement curves corresponding to solutions

水泥土的强度随 pH 值的增大而增加，但二者并非线性关系。试验结果表明， $pH < 4$ 的酸性溶液对水泥土具有强腐蚀性，与自然水养护条件下的试件相比，无侧限抗压强度峰值在 13.5 % ~ 60.5 % 之间，而 pH 值在 4 ~ 9 之间，水泥土强度降低的幅度不大，如 Na_2SO_4 溶液 $pH=9$ 时，水泥土试件的强度较浸水养护的强度有所提高，说明在此酸碱度范围内，化学溶液对水泥土的侵蚀影响较小，水泥土具有较强的适应性。随着 pH 值的进一步增加，水泥土强度大幅度提高，当 $pH=12$ 时，试验值较自然水养护试件提高均超过 30 %，说明强碱环境下水泥土不但没有被侵蚀，反而更有利于水泥土材料的固化。此现象与岩石在类似情况下的表现不同^[6-8]。图 1 所示荷载-位移曲线斜率各不相同，但在酸性环境试件的斜率明显偏大，说明酸对水泥土的表面具有一定的侵蚀作用，水泥土表面软化，强度降低。

3.2.2 不同化学溶液离子浓度的影响

化学溶液浓度的不同对水泥土的性质也产生一定的影响，对于不同的化学溶液，其离子浓度的改变对水泥土的力学效应略有差异，如图 2 所示。总体来看，水泥土的强度随着化学溶液浓度的增加而减小，说明化学离子浓度越大，对水泥土的侵蚀性越强。

3.2.3 不同化学溶液的影响

水泥土试件在纯水中养护 28 d 的无侧限抗压强度峰值为 2.15 MPa，但在不同的 pH 值和化学浓度下试件强度是不同的。当 $pH=2$ ，浓度为 0.01 mol/L 时， $CaCl_2$ ， Na_2SO_4 ， $NaHCO_3$ 溶液浸泡的试块无侧限抗压强度峰值分别为 0.85，0.85，0.9 MPa，与纯水浸泡试件峰值强度比分别降低了 60.5 % 和 58.1 %；当 $pH=4$ ，浓度为 0.01 mol/L 时，3 种溶液浸泡的试块无侧限抗压强度峰值分别为 1.9，1.75，1.85 MPa，分别降低了 11.6 %，18.6 % 和 13.9 %；当 $pH=7$ ，浓度为 0.01 mol/L 时，3 种溶液浸泡的试块无侧限抗压强度峰值分别为 1.94，1.99，2.06 MPa，分别降低了 10 %，7.7 % 和 4.4 %；当 $pH=9$ ，浓度为 0.01 mol/L 时，3 种溶液浸泡的试块无侧限抗压强度峰值分别为 2.13，2.3 和 2.1 MPa， $CaCl_2$ 和 $NaHCO_3$ 与纯水浸泡试件峰值强度接近，仅分别降低了 1.2 % 左右，而 0.01 mol/L 的 Na_2SO_4 溶液中试件的强度峰值反而增加了 4.4 %；当 $pH=12$ ，浓度为 0.01 mol/L 时，3 种溶液浸泡的试块无侧限抗压强度峰值分别为 2.83，4.06，4.01 MPa，与纯水浸泡试件峰值强度比均有较大程度的增加，增加值分别为 31.8 %，11.2 %，86 %。由此可见，不同化学溶液对水泥土试件的侵蚀是不同的。在相同浓度

和相同酸碱度条件下，各溶液对水泥土 28 d 无侧限抗压强度的影响，如图 3 所示。

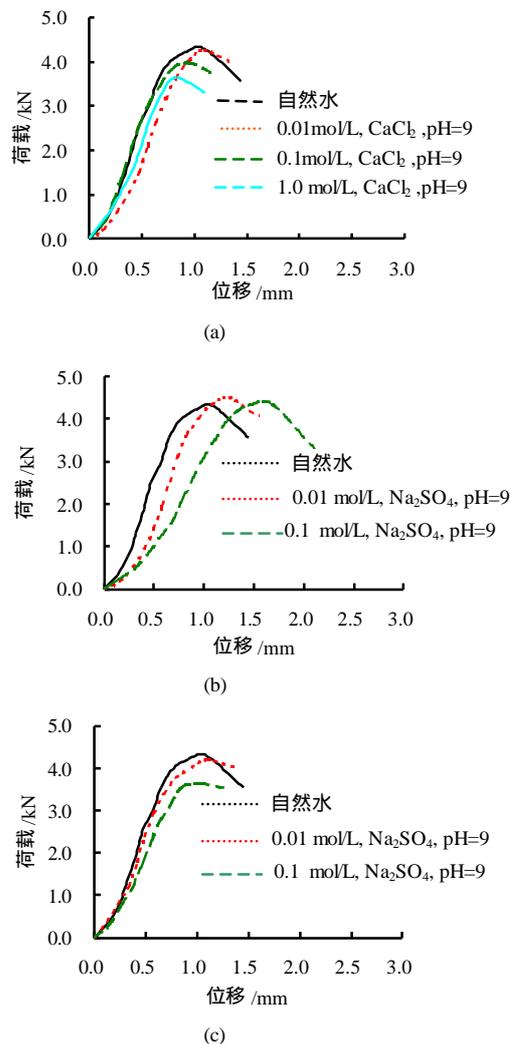


图 2 水和不同离子浓度、 $pH=9$ 的各溶液中养护 28 d 的水泥土荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves corresponding to ionic strength for cemented soil cured 28 days in different solutions with $pH=9$

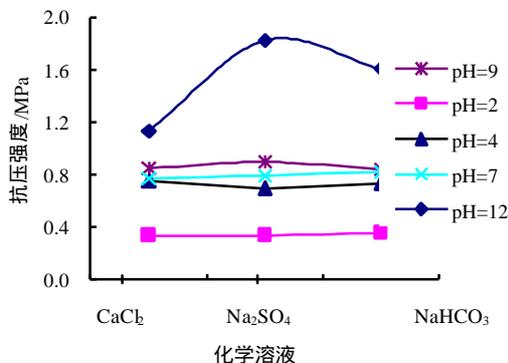


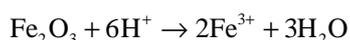
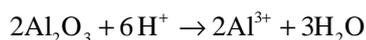
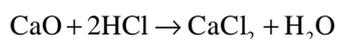
图 3 浓度 0.01 mol/L，不同化学溶液与不同 pH 值对应的水泥土无侧限抗压强度曲线

Fig. 3 Strength versus for cemented soil at $pH=2, 4, 7, 9$ and 12 in $CaCl_2, Na_2SO_4, NaHCO_3$ solutions with ionic strength of 0.01 mol/L

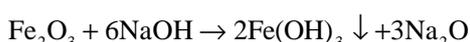
4 水泥石化学侵蚀机理的初步分析

粘性土的主要矿物成分为 SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 及少量云母和可溶盐。水泥与土搅拌后,一方面,水泥中的活性成分与水发生一系列水化反应,生成物具有较高的强度;另一方面,水泥颗粒可以吸附在比表面积更大的粘土颗粒周围,不断凝结成整体,也可以产生枝晶截留相当数量的硅氧四面体和铝氢氧八面体生成片或网,形成水泥石加固体,进一步增强水泥石在自然环境下的强度。水泥石浸泡在一定 pH 值的化学溶液中将发生不同程度的化学反应,使水泥石的力学性能发生改变,主要包括以下几方面:

(1) 当水泥石试件浸泡在酸性溶液里时,水泥和粘土矿物中的某些矿物成分将与氢离子发生一系列化学反应,生成物溶于水,使水泥石试件软化,甚至脱落,水泥石强度因此降低。部分化学反应方程式如下:



(2) 当水泥石试件浸泡在碱性溶液中,水泥和粘土矿物中某些组分(如 CaO , SiO_2 等)将与碱液发生化学反应,加速水泥的水化,生成的沉淀物能充填水泥石原有的孔隙,增加水泥石的密实程度,从而提高水泥石的强度。部分组分化学反应方程式如下:



(3) 不同化学溶液的影响,主要是溶液中所含有的可溶性离子(如: Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ 等),与水泥和粘土矿物中的某些阳离子(如: K^+ , Ca^{2+} , Na^+ 等)发生反应生成新的溶于水的矿物或生成如石膏等矿物产生膨胀,最终导致水泥石强度变化。

有关水泥石受化学侵蚀机理的详细分析和破裂过程的数值模拟将另文专述。

5 结语

通过探讨自然水、各种不同化学离子浓度、不同 pH 值及不同种类的化学溶液对水泥石的侵蚀,表明环境侵蚀对水泥石的力学性质有较大影响。相应的结果归纳如下:

(1) 不同 pH 值、不同浓度及不同种类化学溶液对水泥石力学性质的影响是明显的,其中 pH 值的变化对水泥石的力学效应最为显著。

(2) 与自然水养护的试件对比,酸性环境水泥

土强度降低,碱性环境水泥石强度提高。水泥石强度的增长与 pH 值的增加呈非线性关系。

(3) 水泥石强度的变化与化学溶液摩尔浓度的变化成反比;不同化学溶液在各自摩尔浓度时,水泥石强度的变化值不同。

(4) 不同化学溶液对水泥石力学性质的影响是不同的。特别是在强碱环境中,水泥石强度的增加值变化较大。

(5) 从机理分析看,水泥石在环境侵蚀下所表现出的力学性质主要是水泥、粘土颗粒及水泥水化产物与酸、碱和不同化学溶液产生了一系列物理-化学反应的结果。

参 考 文 献

- [1] 郝巨涛. 水泥石材料力学特性的探讨[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(3): 53 - 59.
HAO Ju-tao. Study on mechanical properties of cemented soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 13(3): 53 - 59.
- [2] 宫必宁, 李淞泉. 软土地基水泥深层搅拌加固土物理力学特性研究[J]. 河海大学学报, 2000, 28(2): 101 - 105
GONG Bi-ning, LI Song-quan. Study on physical and mechanical characteristics of deep jet mixing strengthening soil for soft foundation[J]. *Journal of Hohai University*, 2000, 28(2): 101 - 105.
- [3] 龚晓南. 深层搅拌法设计与施工[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [4] 裴向军, 杨国春. 防治海水对水泥石侵蚀的试验研究[J]. 长春工程学院学报, 2000, 1(1): 12 - 14.
PEI Xiang-jun, YANG Guo-cun. Research on preventing cement erosion in marine soil[J]. *Journal of Changchun Institute Technology*, 2000, 1(1): 12 - 14.
- [5] 谷秋芳, 潘盛山. 地下水影响粉喷桩强度的试验研究[J]. 北华大学学报, 2001, 2(4): 361 - 363.
GU Qiu-fang, PAN Sheng-shan. Influence of groundwater on compressive strength of powder jetted pile[J]. *Journal of Beihua University*, 2001, 2(4): 361 - 363.
- [6] 陈四利, 冯夏庭, 李邵军. 化学腐蚀对黄河小浪底砂岩力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 284 - 287.
CHEN Si-li, FENG Xia-ting, LI Shao-jun. The effects of chemical erosion on mechanical behaviors of Xiaolangdi sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(3): 284 - 287.
- [7] 陈四利, 冯夏庭, 李邵军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 547 - 551.
CHEN Si-li, FENG Xia-ting, LI Shao-jun. Effects of chemical erosion on uniaxial compressive strength and meso-fracturing behaviors of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 547 - 551.
- [8] 陈四利, 冯夏庭, 周辉. 化学腐蚀下砂岩三轴压缩力学效应的试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 23(3): 292 - 295.
CHEN Si-li, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Experiments on the mechanical effects of sandstone with chemical erosion under the triaxial compression[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2003, 23(3): 292 - 295.