

文章编号: 1000-7598(2009)08-2215-05

环境侵蚀下水泥土的强度及细观破裂过程分析

宁宝宽¹, 陈四利¹, 丁梧秀², 黄杰¹

(1. 沈阳工业大学 建筑工程学院, 沈阳 110178; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 研究了环境侵蚀下水泥土的细观破裂行为, 利用中国科学院武汉岩土力学研究所的岩石破裂过程细观力学试验系统, 对在各种侵蚀环境中侵蚀一定时间的水泥土细观试件进行了一系列破裂过程试验, 实时观察并用显微数码摄像系统记录了水泥土试件的细观破裂全过程, 得到了水泥土的应力-应变关系曲线及其对应显微图像。研究表明, 环境侵蚀后水泥土的细观破坏特征主要有两类, 即弹塑性破坏和脆性破坏。细观试验是研究环境侵蚀下水泥土破坏过程的有效手段。

关键词: 水泥土; 环境侵蚀; 实时观测; 细观破裂过程; 破裂特征

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Analysis of meso-fracture process of cemented soil under environmental erosion

NING Bao-kuan¹, CHEN Si-li¹, DING Wu-xiu², HUANG Jie¹

(1. College of Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China;

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

Abstract: In order to investigate the behaviors of cemented soil meso-cracking under environmental erosion, a series of environmental erosion tests are carried out on the basis of the rock meso-mechanics device provided by Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences. The meso-fracturing process of cemented soil is real-time observed using the microscope and the digital color camera. The stress-strain curves and the corresponding micro-images of specimens are obtained. The results show that there are two types of fracturing behaviors of cemented soil under environmental erosion. That is elastoplastic failure and brittleness failure. Meanwhile, the meso-cracking tests are effective method of cemented soil in erosion environment.

Key words: cemented soil; environmental erosion; real-time observation; meso-fracturing process; fracturing behaviors

1 引言

水泥土是水泥、土、水以及外加剂按一定比例掺合, 经均匀拌合而成的多相混合物, 它不同于一般的工程材料, 由于组份的复杂性导致水泥水化产物的多样性, 水泥土内部不可避免地存在着初始微裂纹和缺陷, 这些微裂隙的存在, 将直接影响水泥土的力学性质。同时, 由于在地基、边坡、基坑等水泥土应用的工程环境中, 常常有地下水的参与, 特别是受各种环境介质影响的地下水, 对水泥土的力学性质将产生一定的影响。

有关水泥土的力学性质及其工程应用的研究开展的较早^[1-5]。但相关研究多集中在自然环境条件

下水泥土的特性方面。受环境侵蚀水泥土力学性质的研究, 在国内外才刚刚起步。作者进行了环境侵蚀下水泥土的宏观力学试验, 并取得了一些进展^[6-8], 为了更加深刻地认识环境侵蚀下水泥土的宏观变形破坏行为及其损伤破裂机制, 进行了环境侵蚀下水泥土细观力学试验研究, 对其细观变形破坏的规律给予了更加科学的解释。受试验设备的限制, 国内岩土材料细观力学试验研究开展得较晚, 近年来, 研究人员对岩石和混凝土的细观力学的试验和理论进行了研究, 并取得了部分研究成果^[9-12], 而环境侵蚀条件下水泥土的细观试验研究还未见报道, 作者利用中科院武汉岩土力学研究所的岩石破裂过程细观力学试验系统, 对不同环境侵蚀的水泥土试件

收稿日期: 2008-04-21

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究计划资助 (No. 20060612); 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室资助课题 (No. Z110403)。

第一作者简介: 宁宝宽, 男, 1971年生, 博士, 副教授, 从事土木工程方面的教学和科研工作。E-mail: ningbk@126.com

进行了单轴压缩细观破裂试验,观测了环境侵蚀下水泥土的细观结构在压缩荷载作用下微裂纹的萌生、扩展直至变形破坏的全过程,并对试验结果进行了分析。此项研究为环境侵蚀下水泥土的强度理论以及细观本构模型的建立提供了试验依据^[13]。

2 试 验

2.1 试样制备

水泥土的原状土取自沈阳市某路基地下约 3 m 深处的粉质黏土,该层土在自然状态下呈软塑状,其主要物理性质指标见文献[7]。

在水泥土试块制备的过程中,把试验土样自然风干,过 2 mm 筛。采用 C42.5 普通硅酸盐水泥,配制含水率为 40% 的试验样土,将水泥和土搅拌均匀,根据试验设备对试件尺寸的要求,在预制的钢制试模中制成 17 mm×17 mm×38 mm 的矩形试件,试件干密度约 1.91 g/cm³,静置 24 h 后脱模,标准养护 28 d 后,放入配置好的各种侵蚀溶液中,模拟水泥土的侵蚀工作环境,侵蚀时间为 90 d。

2.2 试验设备

采用中国科学院武汉岩土力学研究所的岩石破裂过程细观力学试验系统。该仪器可以观察在加载过程中试样平面(试样为长方柱体)及每个点的变形破坏形貌,并能得到应力-应变关系曲线和相对应的裂纹开裂和发展图像,还可获得变形过程的录像,接连计算机,可自动采集各种应力-应变的数值及图形。

2.3 试验方法

首先,将准备好的水泥土试件安装在加载仪上,利用加载仪自带的数字视频观测系统,一个显微摄像头对准试件,选定表面进行局部显微图像监测;另一个显微摄像头对准试件表面进行全场监测。试验时,两个不同方位的摄像信号将图像传送给不同的监视器。这样,试件在荷载作用下的表面的变化状态均可由监视器进行实时观测,同时连接计算机试验过程的图像进行实时采集,保证得到局部和整个表面的动态扩展全过程显微图像。

本试验水泥掺量均为 15%,侵蚀时间为 90 d。考虑试验工作量较大,对部分水泥土试件仅做了单个细观破裂过程试验,环境侵蚀下水泥土的细观破裂试验共对 23 个试样进行了观测,试验过程中有 3 个试件没有采集到实时观测结果。

3 细观试验结果及分析

3.1 水泥土的表面侵蚀特征

不同侵蚀环境中水泥土试件经过相同时间的侵

蚀后,通过显微镜观测,水泥土表面受到了不同程度的侵蚀。酸性溶液中的水泥土试件表面明显软化,并有部分水泥土脱落,脱落程度与 pH 值大小成反比;0.1 mol/L 的 Na₂SO₄ 试件表面开裂(如图 1(a)),已经腐蚀破坏;其他各种化学溶液中的试件表面颜色也发生了不同程度的改变。图 1 为部分试件在不同侵蚀溶液中侵蚀 90 d 后的表面显微观测图像。

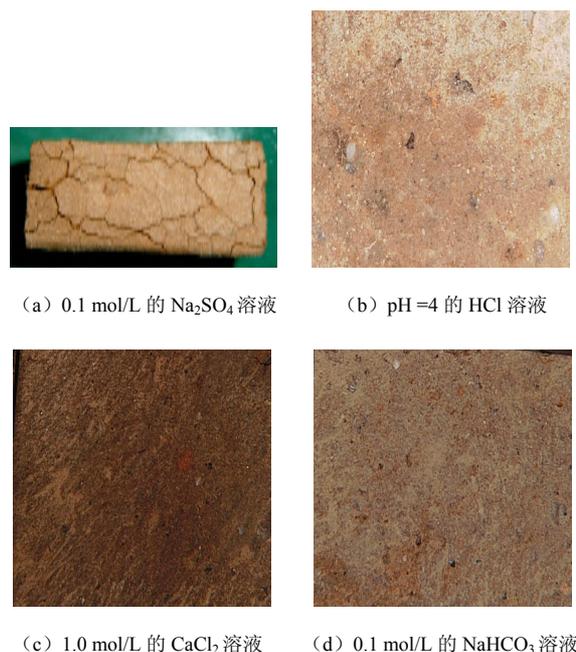


图 1 不同溶液侵蚀后试件的表面显微图像

Fig.1 Surface micrographs of specimens in different erosion solutions

3.2 环境侵蚀下水泥土细观单轴压缩试验的强度

表 1 为在不同侵蚀环境中侵蚀 90 d 后,20 个试件单轴压缩细观力学的部分试验数据。环境侵蚀条件下水泥土的单轴压缩细观力学试验结果与宏观试验结果在数值大小上有所区别,细观试验试件极限强度值普遍偏大,主要是细观试件尺寸小、制作过程精细、密实度较大等因素的综合表现。不同侵蚀环境中试件细观试验极限强度的变化具有一定的规律性,NaHCO₃ 和酸性溶液中水泥土力学性能劣化明显,且随着侵蚀溶液浓度的增加而加剧,部分试件尺寸略有减小;CaCl₂ 溶液中水泥土强度略有增长,此趋势与溶液的浓度成正比例。在各种环境侵蚀下水泥土试件强度变化规律见文献[6—8],在此不再赘述,以下重点探讨环境侵蚀下水泥土的细观破裂过程、方式和规律。

表 1 环境侵蚀下水泥土细观试验结果
Table 1 Meso-results of specimens under erosion environments

侵蚀溶液	溶液浓度 (mol/L)	pH 值	试件尺寸 /mm	极限强度 /MPa	备注
	0.01		17×17×38	2.651	
	0.10		17×17×38	1.955	
	0.50		17×17×37	0.955	
	1.00		17×17×37	0.461	
CaCl ₂	0.01		17×17×38	4.466	
	0.10		17×17×38	4.581	
	0.50		17×17×38	4.852	
	1.00		17×17×38	4.921	
Na ₂ SO ₄	0.10		17×17×38	破裂	试验前侵蚀破坏
	0.01		17×17×37	3.147	
纯水		8.1	17×17×38	3.557	pH 为实测值
		4	17×17×37	2.909	
		7	17×17×38	3.550	
H ₂ O		9	17×17×38	4.278	
		12	17×17×38	4.040	

3.3 环境侵蚀下水泥土细观破裂的全过程

试验系统自动记录了各试件的应力-应变关系数据，并自动给出了相应曲线；数字视频观测系统自动采集了试验过程中水泥石表面局部和全场动态破裂过程图像。根据得到的环境侵蚀下水泥土的各种力学性质试验结果，分析了水泥石应力-应变关系曲线以及相应图像，研究表明环境侵蚀下水泥土的细观破裂特征主要表现为以下 2 种情况。

3.3.1 情况 1

侵蚀环境下水泥土软化，强度降低，破裂过程和破裂特征与低掺量水泥石力学性质相似，试件塑性变形较大，破坏过程接近塑性材料。不同摩尔浓度的 NaHCO₃ 溶液中试件的细观试验结果表现为此特点，图 2 为 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液侵蚀 90 d 后试件的细观破裂过程部分图像，该试验图像基本上反映了侵蚀环境中水泥石遭到侵蚀后结构松散软化，在单轴压缩细观力学试验过程中逐步破坏的全过程。图 3 的曲线为图 2 图片摄制时对应时刻的应力-应变关系曲线，试验图像对应试验曲线的各个拐点。可见环境侵蚀后，水泥石不仅表面侵蚀软化，内部也受到了侵蚀，试件弹性模量明显降低，表现为弹塑性破坏。

另外，水泥石细观试验曲线不如宏观试验曲线平滑，出现了很多拐点，通过试验观察和分析认为主要源于以下两方面的原因：①细观加载仪压头端部水泥石在压力逐渐增长过程中，试件局部骤然破坏；②试件内部由于原状土和水泥的不均匀性，导致生成的水泥石固化物颗粒之间强度差异较大，在荷载线性增长过程中，各颗粒破坏时抵抗变形的能

力各不相同，因此，水泥石在加载初期就表现出非线性。

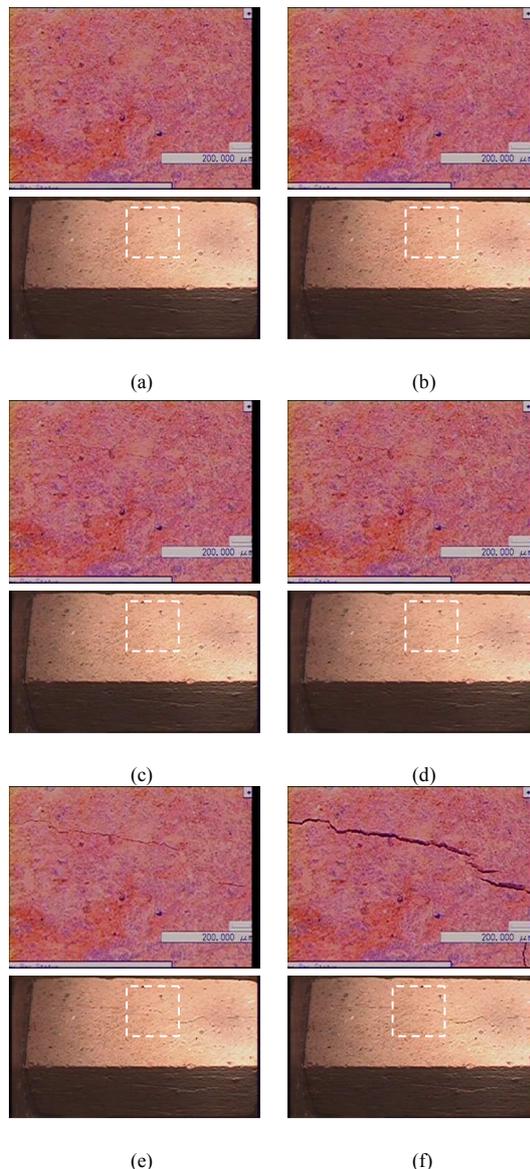


图 2 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液侵蚀后试件细观破裂过程的局部和对应全场显微图像

Fig.2 Part and entire field micrographs of meso-fracturing process for the specimen in NaHCO₃ solutions with 0.5 mol/L

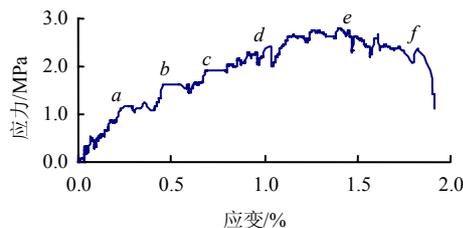


图 3 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液侵蚀后试件的应力-应变关系曲线

Fig.3 Stress-strain curves of specimen in solutions of NaHCO₃ with strength 0.5 mol/L

3.3.2 情况 2

水泥石试件表面侵蚀现象明显,其极限强度和变形各不相同。如酸性溶液中的试件,由于试件表面侵蚀软化,其细观破裂过程曲线的初始压密阶段更加明显,但此类试件的最终破裂特征与15%水泥掺量的水泥石试件在浸水养护的试验结果相似,均表现为脆性破裂。试验中除了部分高浓度 Na_2SO_4 溶液中的水泥石试件在试验之前就已经侵蚀破坏以外,低浓度 Na_2SO_4 、 CaCl_2 以及不同 pH 值溶液侵蚀环境中,水泥石均表现为上述细观破裂特征。图4为1.0 mol/L 的 CaCl_2 溶液侵蚀后试件细观破裂过程的局部和对应全场显微图像,图5为其对应应力-应变关系曲线及其图像采集点。水泥石显微图像和应力-应变关系曲线均表现出脆性材料的破裂特征。

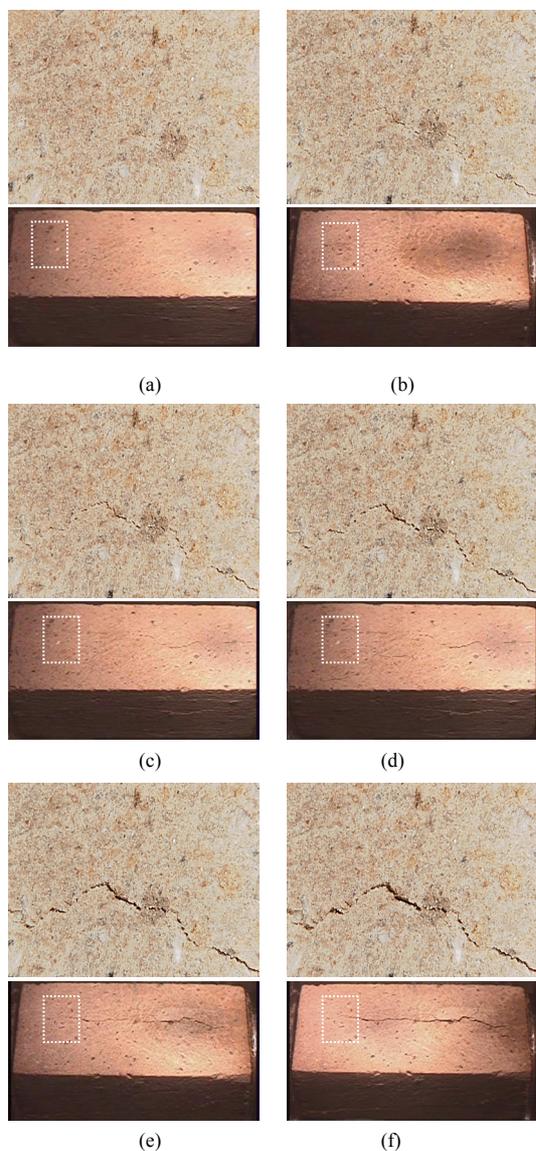


图4 1.0 mol/L 的 CaCl_2 溶液侵蚀后试件细观破裂过程的局部和对应全场显微图像

Fig.4 Part and entire field micrographs of meso-fracturing process for the specimen in CaCl_2 solutions with 1.0 mol/L

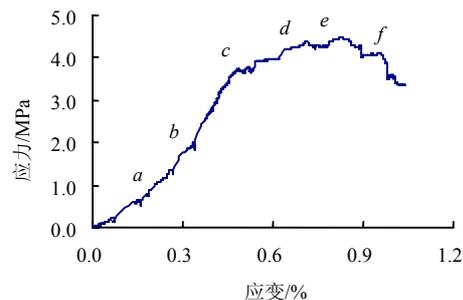


图5 1.0 mol/L 的 CaCl_2 溶液侵蚀后试件的应力-应变关系曲线

Fig.5 Stress-strain curves of specimen in solutions of CaCl_2 with strength 1.0 mol/L

3.4 环境侵蚀下水泥石的细观破裂机制

土的主要矿物成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 及少量云母和可溶盐。水泥与土搅拌后,水泥中的活性成分发生一系列水化反应,生成具有较高强度的水泥石固化物。当把水泥石浸泡在不同的侵蚀溶液中,土颗粒、水泥石固化物将与侵蚀溶液中的某些离子发生不同程度的反应。从化学方面分析,主要有酸性腐蚀、碱性增强以及可溶盐于土中某些成分的交流等,从而使水泥石的力学性能发生改变,以下简要分析:

(1) 酸性腐蚀:酸性侵蚀环境中,水泥和黏土矿物中的某些矿物成分 (Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 和 Na_2O) 等将与氢离子、碳酸氢根离子等发生化学反应,生成物溶于水或分解成 CO_2 气体逸出,导致水泥石试件逐渐软化,甚至脱落,影响水泥石的强度。此外,水泥石中大量原生孔隙的存在,使以上侵蚀作用不仅发生在试件表面,而且也发生于水泥石内部,这种内部侵蚀作用也不容忽略。

(2) 碱性环境: CaCl_2 溶液中钙离子的大量存在,能加速水泥的水化,生成的水泥石固化物在碱性环境中能够保持稳定,从而保证了水泥石的强度。

(3) 侵蚀溶液中所含有的可溶性离子(如 SO_4^{2-} 等),与水泥和黏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劣化甚至破裂。高浓度 SO_4^{2-} 作用下,水泥石发生侵蚀开裂。

4 结 论

(1) 细观试验是研究水泥石等岩土材料的细观结构以及荷载作用下微损伤的萌生、扩展、连通、直至破坏的全过程的有效手段。

(2) 各种侵蚀环境对水泥石的力学效应明显,不同侵蚀环境下,水泥石细观破裂过程各不相同,

但最终破坏特征主要表现为弹塑性破坏或脆性破坏两种情况。

(3) 水泥土的侵蚀机制与侵蚀环境密切相关, 水泥土的细观破裂过程及破裂特征是环境侵蚀的综合反映, 是研究环境侵蚀下水泥土细观本构模型的基础。

参 考 文 献

- [1] FISHER K P. Properties of an artificially cemented-clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, 15(1): 25—37.
- [2] KAWASAKI T. Deep mixing using cement hardening agent[C]//Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm: ICSMFE, 1981: 105—123.
- [3] MASAKI KITAZUME, KIMIHIKO OKANO, SHOGO MIYAJIMA. Centrifuge model tests on failure envelope of column type deep mixing method improved ground[J]. **Soils and Foundations**, 2000, (1): 43—55.
- [4] VATSALA A, NOVA R, Srinivasa Murthy B R. Elasto-plastic model for cemented soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(8): 679—687.
- [5] 童小东, 龚晓南, 蒋永生. 水泥土的弹塑性损伤试验研究[J]. **土木工程学报**, 2002, 35(4): 82—85.
TONG Xiao-dong, GONG Xiao-nan, JIANG Yong-sheng. Experimental study on elasto plastic damage of cemented soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2002, 35(4): 82—85.
- [6] 宁宝宽, 金生吉, 陈四利. 侵蚀性离子对水泥土力学特性的影响[J]. **沈阳工业大学学报**, 2006, (4): 178—181.
NING Bao-kuan, JIN Sheng-ji, CHEN Si-li. Influence of erosive ions on mechanical properties of cemented soil[J]. **Journal of Shenyang University of Technology**, 2006, (4): 178—181.
- [7] 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): 95—98.
NING Bao-kuan, LIU Bin, CHEN Si-li. Bearing capacity study of cement-mixed soil pile under environmental erosion[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2005, 26(1): 95—98.
- [8] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 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 Bao-kuan, CHEN Si-li, LIU Bin. Experimental study of cemented soil under environmental erosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 600—603.
- [9] HUANG J F, WANG Z Y, ZHAO Y H. The development of rock fracture from micro-fracturing to main-fracture formation[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1993, 38(7): 925—928.
- [10] DUNNING J, DOUGLAS B, MILLER M, et al. The role of the chemical environment in frictional deformation: stress corrosion cracking and comminution[J]. **Pageoph**, 1994, 143(1/2/3): 151—178.
- [11] FENG Xia-ting, CHEN Si-li, LI Shao-jun. Effects of water chemistry on micro-cracking and compressive strength of granite[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2001, 38(4): 557—568.
- [12] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model[J]. **Construction and Building Materials**, 2002, 16(8): 453—463.
- [13] 宁宝宽, 陈四利, 丁梧秀. 水泥土细观破裂过程的实时观测试验[J]. **实验力学**, 2008, (1): 53—58.
NING Bao-kuan, CHEN Si-li, DING Wu-xiu. Real-time observation on the meso-fracture process testing of cemented soil[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2008, (1): 53—58.