

文章编号: 1674-9057(2013)03-0499-05

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2013.03.018

聚四氟乙烯材料在环境岩土工程土工试验中的应用

黄振育, 韦昌富, 颜荣涛, 郭敬林, 李 凯

(桂林理工大学 a. 广西矿冶与环境科学实验中心; b. 广西岩土力学与工程重点实验室;
c. 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 采用聚四氟乙烯材料研制出一种用于环境岩土工程固结试验的新型耐腐蚀固结仪, 利用该新型固结仪分别在去离子水、0.08、0.1 mol/L 的 KCl 盐溶液以及 pH 值等于 5、4、3 的盐酸溶液中, 进行了不同水化学环境下桂林红粘土的室内固结压缩模拟试验, 试验结果表明: 红粘土的压缩性随盐溶液和酸液浓度的增大而增大。该新型耐腐蚀固结仪在中压条件下的实测变形量小于 0.001 mm, 满足试验精度要求。

关键词: 环境岩土工程; 聚四氟乙烯 (PTFE); 固结仪; 土工试验; 红粘土; 桂林

中图分类号: TU532; TU411.5

文献标志码: A

环境岩土工程是一门环境科学与岩土工程密切联系的边缘学科, “环境岩土工程” (Environmental Geotechnology) 一词是由美国麻省理工大学方晓阳教授于 1985 正式提出的, 其成为一门独立学科的标志在国际上公认为 1986 年在美国里海大学召开的第一届国际环境岩土工程学术讨论会^[1]。环境岩土工程所面临的问题通常较常规岩土工程问题要复杂的多, 在各种极端环境条件下, 当前常用的分析土性的土力学原理与方法已受到挑战。岩土工程测试技术近十几年来得到了长足的进展, 许多新的测试技术, 如扫描电镜 (SEM)^[2]、土工离心模型试验、探地雷达技术 (GPR) 等, 被应用到环境岩土工程中, 为研究岩土介质微细观结构的机理及污染物在岩土介质中的运移规律提供了有效的手段。然而, 环境岩土工程目前在国内还处于发展阶段, 具有满足该新领域土工试验要求特性 (抗腐蚀性、高介电性等) 的设备仍比较缺乏, 大多仍沿用传统土工试验中的设备, 这显然是不可取的。本文以使用聚四氟乙烯材料所制成的一种新型耐腐蚀固结仪为例, 并结合试验结

果阐述该高分子材料在环境岩土工程土工试验中的适用性。

1 国内环境岩土工程的发展状况

1.1 常见的环境岩土工程问题

环境岩土工程目前较为流行的分类方法是按引起环境问题的动因来划分^[3-9], 归为以下两大类: 一类是大环境岩土工程问题, 这类问题的动因主要由自然灾变引起, 其中包括内因形成的地震灾害、火山灾害, 外因形成的洪水灾害、水土流失、沙漠化、盐碱化、区域性滑坡等; 另一类是小环境岩土工程, 即人类的生活、生产和工程活动与环境之间的共同作用问题, 其动因主要为人类自身。例如, 生产活动引起的采空区塌陷、有毒有害废弃物的排放、过度开采地下水和石油所致地面沉降及海水入侵; 工程活动如打桩、强夯、基坑开挖、盾构施工和修建水电站等对周围环境的影响。

1.2 国内环境岩土工程的研究现状

作为一门新兴学科, 环境岩土工程学国内和国

收稿日期: 2013-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11372078; 51309055); 广西研究生教育创新计划资助项目 (YCSZ2012081)

作者简介: 黄振育 (1988—), 男, 硕士研究生, 岩土工程专业, m13481392124@163.com。

通讯作者: 韦昌富, 博士, 教授, cfwei@whrsm.ac.cn。

引文格式: 黄振育, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 聚四氟乙烯材料在环境岩土工程土工试验中的应用 [J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33 (3): 499-503.

外的研究存在差异:研究重点不同,国际上对城市垃圾及工业废料填埋处理作重点研究,而我国学者的研究重点则主要放在滑坡、地面沉降、矿山土地复垦等方面;研究水平不同,国外对垃圾填埋场的研究十分系统,检测手段先进,研究内容强调环境与各类岩土工程间的相互作用,治理与防治相结合,我国学者近些年才开始对废弃物管理与污染控制以及垃圾填埋场岩土工程问题进行研究^[10]。城市固体废物(MSW)特性与一般土相差很大,MSW的成分复杂、稳定化时间长,要求试验必须采用添加营养物及酸碱中和等方法加速MSW的降解,并且降解是放热反应,同时又产生具有腐蚀性的渗滤液,因此常规土工试验设备已不能满足要求^[11-12]。地基土的污染也已成为较严重的环境岩土工程问题,如海水倒灌、工业废水等,污染土的工程特性较未受污染前会发生极大变化,甚至会对置于其中的材料造成严重腐蚀。目前,专门用于污染土物理力学特性研究的仪器仍不多见,大多沿用岩土工程传统的检测设备。

基于上述考虑,一般的材料和传统的土工试验设备已不太适用于环境岩土工程领域的研究,因此亟需发掘一批新的材料和研制出更多能够满足环境岩土工程试验要求的新型试验仪器。

2 一种适用于环境岩土工程的新型耐腐蚀固结仪

目前,标准固结试验所使用的固结仪其材质一般为铜或不锈钢,虽然铜或不锈钢制成的固结仪在自然条件下具有一定的抗腐蚀性能及较高的力学强度,但在酸、碱、盐溶液以及有机溶剂的长期作用下会发生腐蚀变性^[13-14]而影响使用(图1),进而加大试验误差,且对于饱和土而言,水槽内所盛溶液浓度和成分易受外部环境影响,这些都限制了其在环境岩土工程研究领域中的应用。同时,铜或不锈钢制的固结仪还有造价较高、笨重等缺点。本次研制的固结仪使用耐腐蚀材料——聚四氟乙烯加工而成^[15],配以有机玻璃制成的封闭盖,为进一步研究水化学场变异所引起的环境岩土问题提供了重要手段。

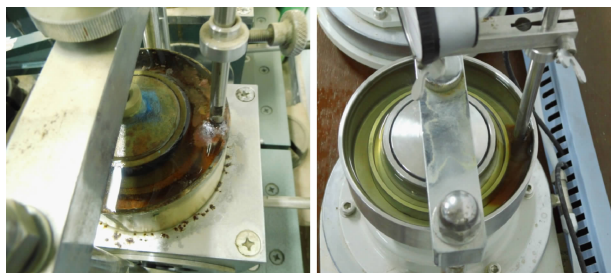


图1 受腐蚀的压缩容器

Fig.1 Corroded compressed container

2.1 聚四氟乙烯材料的性能

聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE),是由四氟乙烯经聚合而成的高分子化合物,分子式为 $[-CF_2-CF_2-]_n$ 。PTFE是综合性能较好的工程塑料,其特性^[16-17]为:

(1)突出的化学稳定性,PTFE不仅耐强酸如硫酸、盐酸、硝酸和王水,而且还耐强氧化剂如重铬酸钾、高锰酸钾等;其化学稳定性超过了玻璃、陶瓷、不锈钢,甚至金和铂,有“塑料王”之称。只有熔融状态的碱金属能夺去PTFE分子中的氟原子生成氟化物(如氟化钠或氟化钾);(2)优良的耐高、低温性能,可在 $-180 \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内长期使用。PTFE的热稳定性在所有工程塑料中极为突出,PTFE大分子的C—F键能大,C—C键四周包围着氟原子,不易受其他原子的侵袭;(3)良好的介电性能,其突出地表现在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,介电性能不随频率和温度的变化而变化,也不受湿度及腐蚀性气体的影响。PTFE的体积电阻率 $\geq 10^{17}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$,表面电阻率 $>10^{16}\text{ }\Omega$,即便长期浸在水中其体积电阻率也没有明显下降;(4)摩擦系数为0.04,为现有固定材料中最低者;(5)拥有不粘性、不燃性及非常好的耐大气老化性,长期暴露于大气中性能依然保持不变。

2.2 新型耐腐蚀固结仪结构

该新型耐腐蚀固结仪压缩容器的结构图如图2所示,其工作原理与《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)中所述的传统固结仪相同,但其中的部件1、2、5、6、11均由PTFE材料制成,可以使仪器在极端化学环境下仍可以正常使用而不损坏,并且上述PTFE部件均采用加厚设计以达到一定的机械强度。加载系统沿用传统固结仪的

分级砝码加载或气压加载（图 3）。由于薄型的 PTFE 硬度不高，所以环刀（内径 61.8 mm，外径 65 mm，高 20 mm）选用机械强度高、耐蠕变性能好、尺寸稳定性好的聚砜塑料（polysulfone, PSU）加工而成（图 4），PSU 除浓硫酸、浓硝酸外，对其他化学药品相当稳定，但能溶于极性有机溶剂酮、氯化烃。依据水槽尺寸，使用透明的有机玻璃板制作出两块对称的半圆环形封闭盖（部件 4、12），配合有机玻璃封闭盖使用可以保证水槽内溶液与外界环境隔离而达到不影响槽内溶液浓度的目的。同时，在固结试验过程中可以打开封闭盖添加或改换其他溶液以实现改变试样的水化学环境。而且 PTFE 材料密度以及价格均较不锈钢和铜金属材料低，所以该新型耐腐蚀固结仪亦可以有效弥补传统固结仪笨重和造价较高的不足。

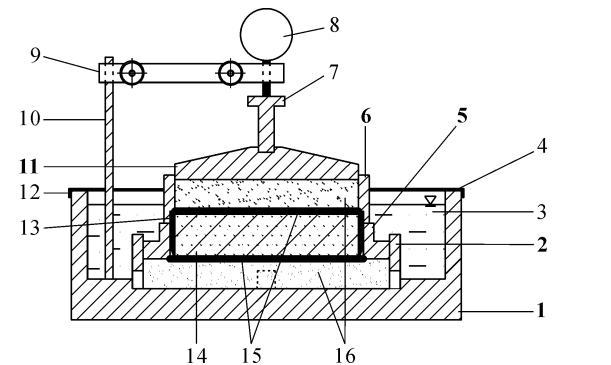


图 2 新型耐腐蚀聚四氟乙烯固结仪的结构

Fig. 2 Components of corrosion resistant oedometer made of PTFE

1—水槽；2—护环；3—溶液；4—右封闭盖；5—底部导环；6—顶部导环；7—百分表导杆；8—百分表；9—百分表架；10—百分表架支持杆；11—加压上盖；12—左封闭盖；13—PSU 塑料制成的环刀；14—土样；15—快速滤纸；16—圆形透水石

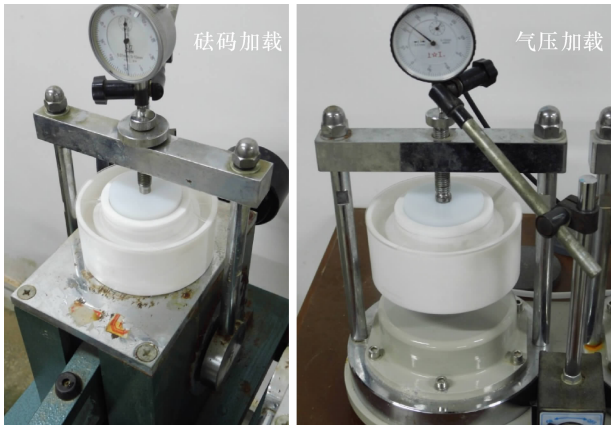


图 3 新型耐腐蚀聚四氟乙烯固结仪

Fig. 3 Corrosion resistant oedometer made of PTFE



图 4 聚砜塑料制成的环刀样及环刀

Fig. 4 Cutting ring samples and cutting rings made of PSU

2.3 新型耐腐蚀固结仪的应用举例

以不同水化学环境下桂林红粘土的室内固结模拟试验为例，论证该固结仪的适用性。试验用土取自桂林市临桂某一级公路工地的红粘土，其物性指标为比重 2.74，液限 52%，塑性指数 (I_p) 29，最大干密度 1.65 g/cm^3 ，最优含水率 20%，自由膨胀率 59%。风干后将其配成含水率 20% 的重塑土，采用压样法按 1.5 g/cm^3 干密度压制环刀样。使用 PTFE 材料制成的叠式饱和器（图 5）按真空抽气法将环刀样分别饱和于去离子水，0.08、0.1 mol/L 的 KCl 溶液^[18-19]，pH = 5、4、3 的盐酸溶液中^[20]，饱和时间为 7 d。饱和完成后按规范《土工试验方法标准》（GB/T 50123—1999）进行标准固结试验，并在水槽内加入土样饱和时所用的原溶液。

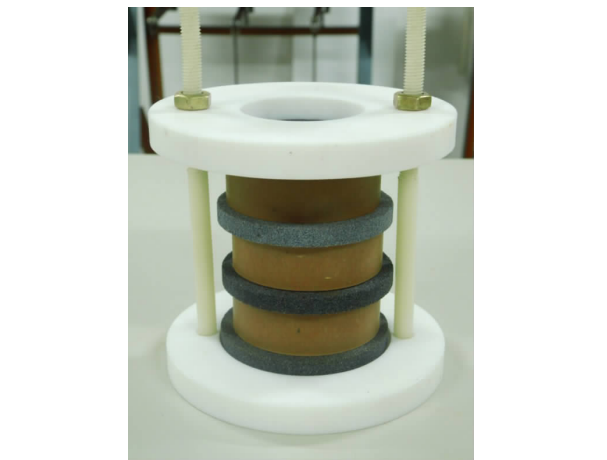


图 5 使用聚四氟乙烯制成的叠式饱和器

Fig. 5 Overlapped saturator made of PTFE

2.4 新型耐腐蚀固结仪适用性论证

从试验结果(表 1、图 6、图 7)可发现，KCl 溶液及酸液均对红粘土的压缩性产生影响。红粘土的压缩系数随 KCl 盐溶液浓度的增大而增大，其原因主要是土中粘粒通常带负电荷，当溶液中负离子的

浓度增加时, 会使粘粒 ζ 电位降低, 扩散层变薄, 使粘粒产生聚沉, 盐溶液浓度越高聚沉作用越强烈, 从而增加了红粘土的可压缩性^[21]; 红粘土的压缩系数随盐酸溶液 pH 值的减小而增大, 其原因不仅因为酸液中 H^+ 浓度的增加使得扩散层变薄, 且酸液对红粘土具有化学腐蚀作用, 红粘土中一部分 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 以游离氧化物形式存在, 这些氧化物在水的作用下具有下列水解平衡:

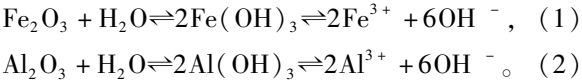


表 1 不同溶液饱和的红粘土的压缩指标
Table 1 Compressibility index of red clays saturated with different kinds of solution

	去离子水	[KCl]/(mol·L ⁻¹)		pH		
		0.08	0.1	5	4	3
压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	0.37	0.39	0.43	0.38	0.41	0.43
压缩模量 E_{s1-2}/MPa	4.95	4.67	4.24	4.84	4.51	4.35

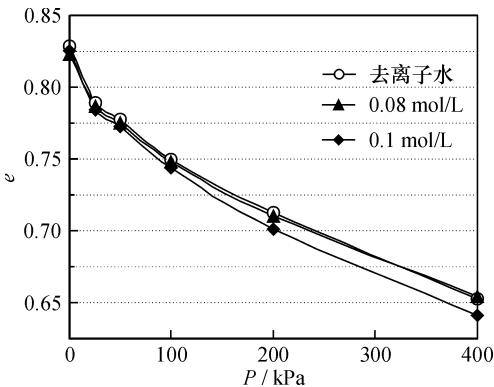


图 6 不同浓度 KCl 溶液饱和的红粘土的 $e-P$ 曲线
Fig. 6 $e-P$ curve of red clays saturated with different concentrations of KCl solution

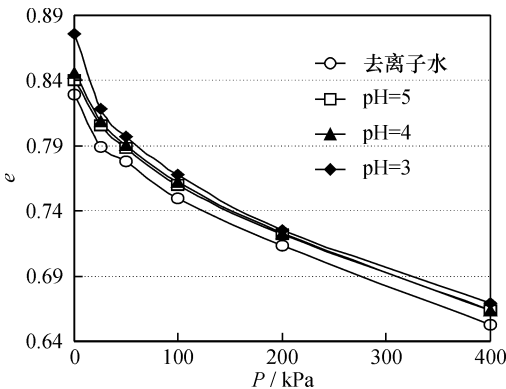
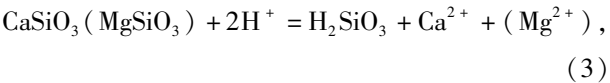


图 7 不同 pH 值酸液饱和的红粘土的 $e-P$ 曲线
Fig. 7 $e-P$ curve of red clays saturated with HCl solutions of different pH

当溶液中的 H^+ 浓度升高时, OH^{-} 离子浓度降低, 式 (1)、(2) 平衡向右移动, 使得红粘土中的 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 等游离氧化物溶解, 土的孔隙比大大增加, 同时氧化物的胶结作用也被大大削弱^[22]。此外, 酸液对粘土矿物还产生以下化学反应:



盐溶液及酸液均使得桂林红粘土的压缩性大大增强。

另外, 还用不锈钢圆柱代替红粘土环刀样, 对聚四氟乙烯制成的固结仪压缩容器在试验过程中的变形量进行了检测。由于本次变形量的检测采用的是百分表, 其测量精度为 0.001 mm (小数点后第 3 位为估读值), 小于 0.001 mm 的变形量则无法测出。PTFE 材料的杨氏模量为 500 MPa, 在最大荷载 400 kPa 下材料变形量的计算值为 0.000 8 mm。实测数据 (表 2) 表明该仪器在中压条件下 (0~400 kPa) 的变形量均小于 0.001 mm, 而百分表无法测出, 实测数据印证了计算结果, 故该仪器的变形量不会影响试验结果, 符合规范的使用要求。

表 2 新型耐腐蚀固结仪压缩容器的变形数据
Table 2 Deformation of corrosion resistant oedometer

荷载/kPa	0	25	50	100	200	400
变形量/mm	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: 加载时间均为 24 h。

3 结束语

(1) 目前国内在环境岩土工程这一领域的研究仍处于初级阶段, 专门用于该领域的实验设备仍不多见, 亟待发掘和研制一大批新的工程材料与试验仪器。

(2) 聚四氟乙烯材料具备较传统金属材料无法比拟的一些优良特性, 将该特种工程塑料应用于环境岩土工程土工试验, 研制出一种新型耐腐蚀固结仪, 用以进行与环境岩土工程相关的固结试验, 经实测符合使用要求。

(3) 试验结果表明桂林红粘土的压缩性随着 KCl 盐溶液浓度以及盐酸溶液浓度的增大而显著增大, 在酸液的作用下, 土的初始孔隙比随酸度的增加呈增大趋势。

参考文献：

- [1] 刘汉龙, 杨贵. 环境岩土工程研究现状与展望 [C] //中国岩石力学与工程学会. 2009—2010 岩石力学与岩石工程学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 156—210.
- [2] 易念平, 张信贵, 李芒原, 等. 地下水变异环境下土细观结构演化的 SEM 测试分析 [J]. 桂林工学院学报, 2008, 28 (1): 43—47.
- [3] 胡中雄, 李向约, 方晓阳. 环境岩土工程学概论 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12 (1): 98—107.
- [4] Fang H Y. Introductory remarks on environmental geotechnology [J]. Int. Symposium on Env. Geotechnologys. EWO PUBLISHING COMPANY, ONC. 1986, 1: 1—14.
- [5] Mitchell J K. Geotechnology the Environmental Perspective [C] //Proceedings of the 3th International Symposium - volume one, Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc, 1996: 1—17.
- [6] 格雷什克 G. 环境岩土工程学综述 [J]. 地质科技动态, 1999 (4): 19—23.
- [7] 方江华, 张志红, 姜玉松. 对环境岩土工程几个问题的探讨 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (4): 655—659.
- [8] 袁建新. 环境岩土工程问题综述 [J]. 岩土力学, 1996, 17 (2): 88—93.
- [9] 曲永新, 张永双, 冯玉勇. 当前国际环境地质工程 (环境岩土工程) 研究的热点领域及其相关技术 [J]. 工程地质学报, 1998, 6 (4): 301—304.
- [10] 李相然, 贺可强, 姚志祥, 等. 城市环境岩土工程问题与防治技术 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007.
- [11] 谢焰, 陈云敏, 唐晓武, 等. 城市生活垃圾降解压缩试验仪研制及应用 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (5): 571—576.
- [12] 聿振明. 固体废弃物的处理与处置 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [13] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [14] 柯伟. 中国腐蚀调查报告 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [15] 路琴, 吕少卉. 聚四氟乙烯的性能及其在机械工程中的应用 [J]. 农机使用与维修, 2006, (5): 60—62.
- [16] 石安富, 龚云表. 工程塑料手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社出版, 2003.
- [17] 倪德良, 张其晖. 塑料特性与选用 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 1994.
- [18] 张红波, 于爽, 何师意, 等. 桂林岩溶区大气降水的化学特征分析 [J]. 中国岩溶, 2012, 31 (3): 289—295.
- [19] Loret B, Gajo A, Simoes F M. Chemo-mechanical interactions in geological and biological materials: examples [J]. Courses and Lectures-International Centre for Mechanical Sciences, 2004: 125—148.
- [20] 朱春鹏, 刘汉龙, 张晓璐. 酸碱污染土压缩特性的室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (10): 1477—1483.
- [21] 唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 等. 工程岩土学 [M]. 2版. 北京: 地质出版社, 1999.
- [22] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

Application of PTFE in Environmental Geotechnology Engineering Test

HUANG Zhen-yu, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, GUO Jing-lin, LI Kai

(a. Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment; b. Guangxi Key Laboratory of Geo-Mechanics and Geo-Technical Engineering; c. College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A new corrosion-resistant oedometer, made of PTFE, is applied in environmental geotechnology engineering test. The oedometer is utilized to perform the red clay consolidation test in Guilin under different hydrochemical environment. Test solutions are : distilled water, 0.08 and 0.1 mol/L potassium chloride, hydrochloric acid whose pH values are 5, 4, 3 respectively. Test result indicates that the compressibility of red clay increases with the increase of inorganic salt solution and acid solution concentration, and its actual measurement deformation less than 0.001mm under medium load with good precision.

Key words: environmental geotechnology engineering; polytetrafluoroethylene (PTFE); oedometer; geotechnical test