

文章编号:1671-6833(2013)01-0035-04

黄土中水分入渗过程电阻率与染色示踪试验研究

刘志彬, 方伟, 陈志龙

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为探讨黄土中水分入渗过程的定量描述方法,开展了天然与重塑黄土的染色剂溶液土柱淋漓试验,对溶液入渗过程中土柱的电阻率变化及淋漓试验结束后不同深度横剖面染色区形态进行了定量分析.试验结果表明:相同入渗条件下,天然黄土电阻率随时间降低程度较重塑土高,而重塑黄土的电阻率呈阶段性减小.由于大孔隙结构的存在,水分在天然黄土中较重塑土能入渗至更深处,并且天然黄土横截面染色区面积比随深度降低程度较重塑土小.染色区边界分形维数在重塑黄土中随深度单调增大,而在天然黄土中则先增大后减小.

关键词:黄土;水分入渗;电阻率;染色示踪试验;形态分析

中图分类号: TU444

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.01.009

0 引言

由于土体结构的空間变异性及各向异性,水分与溶质在土中的流动和运移呈现非均匀性特点.近年来,利用示踪技术对该过程开展的可视化研究日益增多,例如染色示踪法在土壤优势流描述、非均匀流动尺度特性、溶质运移规律研究等方面得到了较好的应用^[1-3].另一方面,土的电阻率是其温度、含水率、孔隙液电导率、孔隙比、颗粒定向性等的综合指标^[4-5].许多学者对电阻率指标与土的工程性质间的相互关系进行了研究^[6-7].而孔隙水是影响其导电性最显著的因素,因此通过测试土体的电阻率指标可对水分入渗过程进行快速监测.

众所周知,水分入渗对于黄土的工程行为具有重要影响.在干燥状态下,黄土具有较高的强度因而能承受较大荷载.然而,当水分渗入黄土中,在荷载作用下颗粒间胶结强度一旦破坏,极易产生较大沉降变形^[8].因此,描述和研究水分自土体表面向下入渗过程对于深入了解黄土工程行为具有重要的科学意义.笔者利用电阻率与染色示踪技术相结合的方法开展天然黄土及人工重塑压实黄土的室内淋漓试验.另外,以往研究文献中,大多都是在示踪剂溶液入渗后对土体竖向剖面进

行形态分析,笔者则针对不同深度水平剖面上的染色区形态进行探讨.

1 试验方案

1.1 试验材料及仪器

本研究所用黄土取自西安乾景花园,取土深度为4.5~5.0 m.该黄土形成于Q₃时期,黄褐色,硬塑状态,针状大孔隙发育如图1所示.该土属低液限黏土.为了对比分析,试验采用两种不同类型的土样:天然黄土(NL)和重塑黄土(RL).天然黄土样试验所用土柱由现场原状土直接切削而成.将样品切削后的余料迅速揉碎,再用静压法压制成和天然黄土样密度相等的重塑土样,该黄土的基本物理性质如表1所示.试验过程中称取少量的亮蓝与蒸馏水配制成一定浓度的染色溶液.当亮蓝溶液在黏性土中入渗时,黏土颗粒表面会附着蓝色的染色剂,从而将溶液的入渗途径标识出来,为图像分析提供了便利.试验中土样的电阻率测试采用东南大学岩土所研制的ESEU-1型低频交流电阻率测试仪^[9].

1.2 试验步骤

在天然及重塑黄土土柱的上表面均匀滴洒预先配制的恒定浓度的亮蓝溶液,直至特定量的所有染色剂溶液全部渗入土中,试验中控制染色剂

收稿日期:2012-10-04;修订日期:2012-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41272311);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100092120049)

作者简介:刘志彬(1976-),男,河北省灵寿人,东南大学讲师,博士,主要从事环境岩土和工程地质方面教学与科研工作,E-mail:seulzb@seu.edu.cn.

的用量为 0.24 mL/cm³. 在溶液入渗过程中,按一定时间间隔测量整个土样的电阻率. 电阻率测试采用两电极法,即在土柱的上下两端施加测试电极,在电极片上方施加 3 kPa 的接触压力,保证电极片与土样间的充分接触. 试验中控制溶液的用量一定,没有从土样底端渗出. 淋漓试验结束后将柱状土样沿深度方向每隔 5 mm 切开,观察亮蓝在土样剖面上的分布,采用数码相机拍照用于图像分析. 需指出的是,由于水分在土柱中的入渗过程是非均匀的,因此实测电阻率为整个土样的等效电阻率.

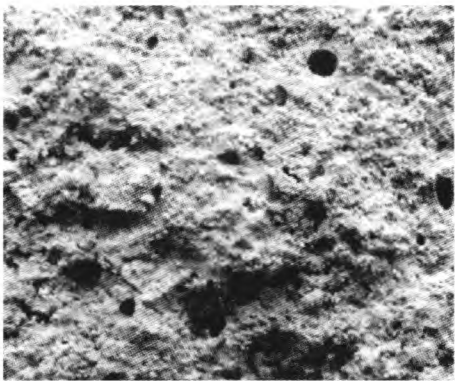


图 1 天然黄土中的大孔隙结构
Fig.1 Macropores in natural loess

表 1 天然黄土的物理性质
Tab.1 Physical properties of the natural loess

比重	液限/%	塑限/%	天然含水率/%	天然孔隙比	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ³)	200 kPa 湿陷系数
2.71	37	22	22	1.15	17	1.80	0.162

表 2 两种黄土土柱基本情况
Tab.2 Basic conditions of two types of loess column

编号	类型	长度/mm	直径/mm	密度/(g·cm ⁻³)
NL01	天然	75	62	1.59
NL02	天然	68	90	1.63
NL03	天然	60	90	1.64
RL01	重塑	70	62	1.75
RL02	重塑	65	62	1.57
RL03	重塑	66	62	1.57

2 试验结果与分析

2.1 水分入渗过程电阻率描述

以 NL01 土样为例尝试利用电阻率技术追踪水分入渗过程. 水分自土柱表面入渗开始后,土样侧壁很容易观察到水分运移的前缘或称湿润前锋,如图 2 所示. 湿润前锋随时间前进的距离如图 3 所示. 随着入渗过程的发展,土样的湿润段长度基本上线性增大,渗试验开始 70 min 后,湿润前锋到达土样底端,湿润段长度即保持不变. 然而溶液入渗过程中,土柱的等效电阻率并非线性降低,基本上可分为三个阶段. 在初始阶段 0~30 min,溶液渗入土中后被土样迅速吸收,因而电阻率快速降低. 在第二阶段 30~66 min,土样的等效电阻率虽然继续降低,但降低速率变缓,最后一个阶段 66 min 以后,溶液入渗的前缘到达土样底端,土样中开始形成良好的导电途径,土样的导电性再次明显改善,因而电阻率出现第二次快速降低,此外,虽然湿润前缘已经抵达土样底端,但土样的等

效电阻率仍在快速降低,这也说明电阻率参数反映出了土样内部水分的继续运移和发展过程. 基于以上分析,说明利用电阻率法描述水分在土中的入渗和运移过程是可行的.

不同土柱染色示踪溶液入渗试验过程中土样电阻率随入渗时间变化曲线如图 4 所示. 从图中可以看出,天然黄土电阻率随时间降低曲线的斜率较重塑土更大. 分析认为,这是由于两种类型土样的结构性差异造成的. 由于结构性遭到破坏,重塑黄土较天然黄土更加均质,因此水分在同一断面上的入渗和运移较天然黄土更加均匀. 而天然黄土的结构性使其土样具有典型的非均质性,内部的大孔隙结构都是其水分运移的优势通道,因此水分表现出更好的渗透运移能力,相同入渗时间里,天然黄土的电阻率降低程度较重塑土也就更加明显.



图 2 水分入渗过程的湿润前锋
Fig.2 Front wetting edge of moisture infiltration

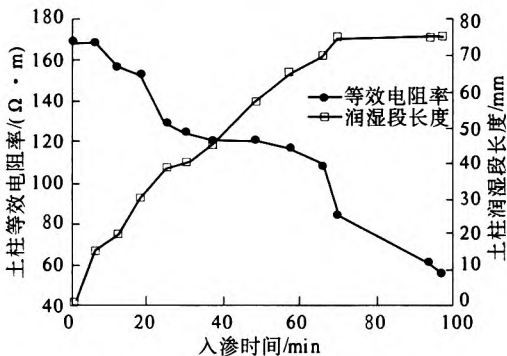


图 3 土柱等效电阻率和润湿段长度随时间变化曲线
Fig. 3 Variation of equivalent electrical resistivity and wetting length of the loess column with time

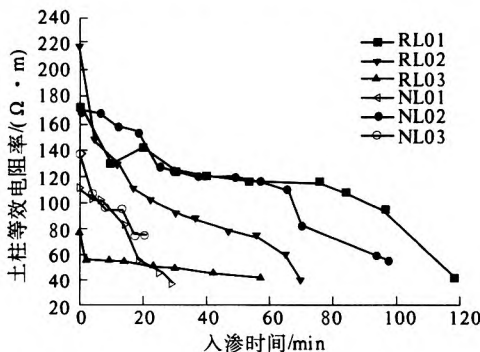


图 4 土柱等效电阻率随入渗时间的变化
Fig. 4 Variation of equivalent electrical resistivity of loess column with infiltration time

2.2 横断面染色示踪分析

为了进一步描述天然黄土与重塑黄土之间的结构性差异,对淋漓入渗试验结束后土样不同深度断面进行照相,并将图像二值化处理,部分结果如表 3 所示.表中每一土样最右侧染色图像表示染色剂溶液所能到达的最深断面.染色剂分子在黏性土中会被吸附在土颗粒表面,因此,在染色剂用量一定的情况下,土样中只有一定深度范围内的剖面会被染色.从表中发现,对于给定入渗量的染色溶液,染色剂在天然黄土中入渗到达的位置比在重塑黄土中更深.天然土中被亮蓝染色的剖面的最深位置约为自顶面起 19 ~ 33 mm 处,但对于重塑土染色剖面最深处一般在 15 ~ 20 mm 处,说明染色剂溶液在天然黄土中的下渗能力优于重塑黄土.

横剖面上染色区域面积与整个土样横截面面积的比值或称染色区面积比沿深度方向变化曲线如图 5 所示.由于入渗到下部的水分越来越少,因而染色区面积比随深度降低.由于土柱上表面处全断面通过染色剂溶液,因此染色区面积比为 1.而溶液入渗所能到达的最深处没有被染色,因此

染色区面积比为 0.从图 5 可以看出,一般来说天然土样中染色剂能到达的深度较重塑土更大,因此天然黄土中染色区面积比随深度降低的程度较重塑土小.

另一方面,从表 3 中还可以看出,同一深度横剖面上染色区几何形状重塑黄土比天然黄土更加规则和完整.由于天然结构性土中存在许多大直径针状孔隙,使得水溶液在入渗过程中优先选择这样的孔隙通道运移.这些优势路径并非均匀分布,这就造成了天然黄土横剖面上染色区的不规则形状,在较深位置处尤其如此.而重塑黄土中,同一断面上孔隙分布比较均匀,因此染色剂溶液通过同一断面不同点的几率差不多,染色区域的几何形状就比较完整.

表 3 不同深度横剖面染色区二值化图像

Tab. 3 Binary images of cross-sectional stained area at different depth

深度/mm	5	15	20	25	30
NL01					
深度/mm	10	18	23	28	33
NL02					
深度/mm	5	10	15	20	25
NL03					
深度/mm	5	10	15	20	
RL01					
深度/mm	5	10	15	20	
RL02					

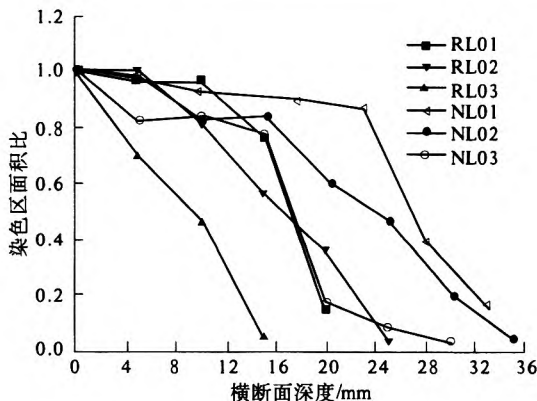


图 5 染色区面积比沿深度方向变化情况
Fig. 5 Variation of stained area ratio with depth

为进一步评价染色区的不规则性,笔者采用分形几何方法中的计盒维数对染色区边界形状的不规则性进行定量分析^[10],结果如图6所示。从图中可以看出,随着深度的增加,对于重塑黄土来说,其染色区边界的计盒维数随着深度的增大而单调增大。对于天然结构性黄土,其染色区边界的计盒维数随着深度的增加先增大后减小。分析认为,越深的剖面上染色区域的几何形状越能体现入渗通道的非均质性,因此染色区边界的分维值越高。但天然黄土中当溶液入渗超过一定深度后,优势流仅局限在一个较小的范围,因此染色区边界几何形状趋于简单化,其分形维数有所减小。对于重塑黄土,与天然结构性黄土中的入渗过程有所不同,越深处染色剂溶液入渗过程的优势流现象或不均匀性越明显,越靠近浅部染色区在断面上的发育程度越完善,浑圆度越高,分维值自然也越小,相对来说,其入渗前锋处的染色区几何形状最不规则。

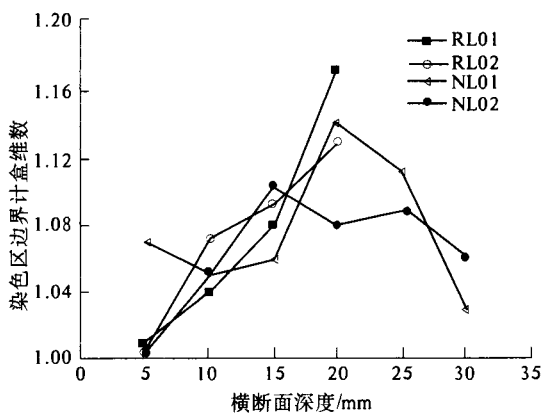


图6 不同横剖面上染色区边界分形维数
Fig.6 Fractal dimension of the stained area boundary at different cross-section

3 结论

(1)随着水分的渗入,土样的电阻率不断降低,其降低过程表现出一定的阶段性,且在重塑土中更加明显。

(2)由于大孔隙结构的存在,水分及溶质在天然黄土中的入渗运移能力较重塑土更高,因此相同入渗时间里,天然黄土的电阻率降低程度高。在总量一定的条件下,染色剂溶液在天然黄土中可

以到达较重塑黄土更深的位置。此外,天然黄土中染色区面积比随深度降低的程度较重塑土小。

(3)在水分入渗过程中,在天然黄土中水分有优先选择大孔隙通过的特点,因而其染色区域表现为典型的不规则形状,而重塑土中此现象不明显。染色区边界分形维数在重塑黄土中随深度单调增大,而在天然黄土中则是先增大后减小。

参考文献:

- [1] 王康,张仁铎,王富庆,等. 土壤水分运动空间变异性尺度效应的染色示踪入渗试验研究[J]. 水科学进展,2007,18(2):158-163.
- [2] 吴华山,陈效民,邱琳,等. 染色法测定、计算机解译农田土壤中大孔隙数量的研究[J]. 水土保持学报,2006,20(3):145-149.
- [3] 郑继勇,王丽梅,邵明安. 应用亮兰染色剂指示指示溶质迁移边界层的研究[J]. 水科学进展,2004,15(1):100-104.
- [4] ARULANANDAN K, SMITH S S. Electrical dispersion in relation to soil structure[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973,99(12):1113-1132.
- [5] THEVANAYAGAM S. Electrical response of two-phase soil: theory and applications[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993,119(8):1250-1275.
- [6] ABU-HASSANEIN Z S, BENSON C H, BLOTZ L R. Electrical resistivity of compacted clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996,122(5):397-406.
- [7] MCCARTER W J, DESMAZES P. Soil characterization using electrical measurements[J]. Geotechnique, 1997,47(1):179-183.
- [8] DIJKSTRA T A, SMALLEY I J, ROGERS C D F. Particle packing in loess deposits and the problem of structure collapse and hydroconsolidation[J]. Engineering Geology,1995,40:49-64.
- [9] 刘松玉,韩立华,杜延军. 水泥土的电阻率特性与应用探讨[J]. 岩土工程学报,2006,28(11):1921-1926.
- [10] 牛岑岑,王清,谭春,等. 吹填土渗流固结过程微观结构的分形特征[J]. 西南交通大学学报,2012,47(1):78-83.

(下转第43页)

- [10] 孙贤祥,陈玉婷,夏天喜. S-噻吗洛尔-D-酒石酸非对映体盐在有机溶剂中的溶解度测定和预测[J]. 高校化学工程学报,2012,26(1):7-12.

Measurement and Correlation of Solubilities of R- and S- α -phenylethylamine-D-tartrate in Four Solvents

HUANG Qiang, GAO Ying-yu, NIU Bo-lin, BAN Chun-lan, ZHANG Rui

(School of chemical engineering and energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The solubility of R- α -phenylethylamine-D-tartrate and S- α -phenylethylamine-D-tartrate in methanol, ethanol, DMF and a solvent mixture of acetone and water with the volume ratio of 5:2 were measured by dynamic method under atmospheric pressure. The solubility of the two salts in the above mentioned solvent systems increase with increasing temperature. The experimental data were correlated with simplified equation, Apelblat equation and the polynomial equation, the ranges of average absolute relative derivation (AARD) were $0.66 < \text{AARD} < 2.67$, $0.72 < \text{AARD} < 7.69$, $1.09 < \text{AARD} < 13.64$, respectively.

Key words: R- α -phenylethylamine-D-tartrate; S- α -phenylethylamine-D-tartrate; solubility; correlation

(上接第 38 页)

Experimental Research of Moisture Infiltration in Loess with Electrical Resistivity and Dye Tracer Method

LIU Zhi-bin, FANG Wei, CHEN Zhi-long

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To study the quantitative characterization methods of moisture infiltration in loess, column leaching tests with dye tracer solution were conducted. The variation of electrical resistivity of loess during moisture infiltration and the morphology of cross-sectional stained area of different depths after infiltration were quantitatively analyzed. The test results indicate that under the same condition of moisture infiltration, the electrical resistivity decrease of natural loess with time is higher than that of remolded loess, while the electrical resistivity decrease of remolded loess possesses staged property. Due to the existence of macropores, the moisture can infiltrate into natural loess deeper than remolded loess, and the stained area ratio decreases less in natural loess than in remolded loess. Generally the fractal dimension of stained area boundary increases monotonously in remolded loess, but increases first and then decreases in natural loess.

Key words: loess; moisture infiltration; electrical resistivity; dye tracer test; morphological analysis