

电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨

Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils

于小军, 刘松玉

(东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对黏性土及非饱和土结构定量分析的困难, 介绍了能反映土在变形过程中的内部结构特征变化的三个电阻率结构特性指标: 平均结构因子 \bar{F} 、平均形状因子 \bar{f} 、各向异性系数 A 。通过电阻率测试技术, 获取膨胀土样在膨胀过程中电阻率结构特性指标的变化规律, 建立描述膨胀土、膨胀改良土在膨胀过程中结构变化的电阻率评价方法。同时探索了应用电阻率结构特性指标预测膨胀量的可行性。

关键词: 膨胀土; 结构; 电阻率; 膨胀量

中图分类号: TU 471 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2004)03-0393-04

作者简介: 于小军(1969-), 女, 江西南昌人, 博士生, 主要从事地基处理和岩土工程测试技术研究。

YU Xiao-jun, LIU Song-yu

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to study soil microstructure quantitatively, three electrical resistivity indices, average formation factor, average shape factor and anisotropy factor, which can reflect the varieties of soil microstructure, are stated in this paper. Based on the electrical resistivity test during soil swelling, the evaluation system of the variety of soil microstructure is presented. Eventually, the feasibility of application of the electrical resistivity property indices on predicating the swell of expansive soils is discussed.

Key words: expansive soil; structure; electrical resistivity; swelling capacity

0 前 言*

膨胀土在我国分布十分广泛, 与工程实践联系密切。由于它对环境的湿热变化非常敏感, 常常会导致土体崩塌、滑坡、泥石流、建筑物变形开裂等灾害的发生, 因而, 膨胀土的特性及其治理研究一直是岩土工程界的热点课题之一。

膨胀土内部结构是决定其膨胀性强弱的主要因素之一, 所以, 为了更准确地把握其膨胀特性、膨胀机理, 更有效地设计处理这类地基土, 许多岩土工程界学者一直都很关注其微观结构的研究^[1]。但传统的膨胀土结构研究方法还存在如下一些问题: 微结构研究制样困难, 测试麻烦; 变异性大, 同一土样不同研究者往往会得出不同结论; 不能连续观测; 一些测试技术成本高, 使用不便, 因而难以满足现代土力学发展和工程应用需要。在这种背景下, 引入一种新的膨胀土结构定量研究的测试技术—电阻率测试技术。

土电阻率是表征土导电性的基本参数, 是土的固有物性参数之一。某种土的电阻率实际上就是当电流垂直通过边长为 1 m 立方体土时而呈现的电阻, 单位用欧姆·米表示。在土的结构性研究领域, Archie 1942 年最先把土的电阻率 n 与其结构相连, 提出了内结构因子 F 概念。 F 定义为土电阻率与孔隙水电阻率之比, 它主

要与孔隙率、孔隙结构等参数有关。同时, Archie 还提出了适用于无黏性、饱和的土或岩石的 F 与重要结构参数之一的孔隙率 n 的经典相关式^[2]。Archie 的 F 概念及经典关系式自提出后, 长期以来在岩土工程领域未得到重视和应用, 直到 20 世纪 80 年代后期, 才逐渐受到学者们的关注。一些学者开始对土的电阻率特性、平均结构因子 F 的含义进行深入研究。结果表明土的电阻率主要取决于土的一些重要结构参数, 如孔隙率、孔隙形状、孔隙结构、饱和度、孔隙液电阻率、固体颗粒成分、颗粒形状、颗粒定向性以及胶结状态等^[3-5]; 平均结构因子 \bar{F} 与土的颗粒形状、定向排列、接触排列、孔隙率、胶结特性、饱和度等有关^[3,6]。至于工程应用, 开始于 1988 年, 美国学者 Arulanandan and Muraleetharan^[3] 开始将结构因子概念应用于无黏性土的结构描述与砂土液化的评价中。在国内, 刘松玉等^[7] 2000 年首先研究了水泥土的电阻率变化规律, 并在现场粉喷桩工程质量检测方面进行了初步应用, 结论表明, 水泥土的电阻率与其水泥含量、无侧限抗压强度呈正相关关系。

总体而言, 电阻率测试技术应用于土结构性的研究目前还处于起步阶段。本文将简单介绍电阻率测试技术应用于土的结构性研究的原理, 并在大量室内试

* 收稿日期: 2003-07-17

验的基础上,分析探讨电阻率测试技术应用于膨胀土结构性研究的效果。

1 试验安排及仪器 测试原理

1.1 仪器设备

电阻率测试采用东南大学岩土工程研究所自行研制的电阻率测试仪,依据土的电学模型,通过调节低频率交流电桥的平衡,测得土的电阻,进一步得到电阻率。仪器的主要参数见表1所示。

表1 交流电桥参数表

Table 1 The parameters of AC bridge

桥臂选择/ Ω	有效量程/ Ω	等级指数	信号源电压/V
20~ 60	1~ 10	2	0.00~ 0.500
80~ 400	10~ 100	0.2	0.500~ 1.000
800~ 1000	100~ 100	0.2	1.000~ 1.999

1.2 测试原理

通过调节低频交流电桥的平衡,可测出膨胀土、膨胀改良土在膨胀过程中的竖向、水平向电阻 R_V 、 R_H ,结合膨胀量,可获得土的三个电阻率结构特性指标: \bar{F} , \bar{f} , A 。 \bar{F} 为平均结构因子,可反映土的孔隙率和孔隙结构; \bar{f} 为平均形状因子,可描述颗粒形状; A 为各向异性系数,可反映颗粒的定向排列。 \bar{F} , \bar{f} , A 计算公式如下^[3]:

$$\rho_v = \frac{R_V S_V}{L_V}; \rho_H = \frac{R_H S_H}{L_H}; F_V = \rho_v / \rho_w; F_H = \rho_H / \rho_w; \bar{F} = \frac{F_V + 2F_H}{3}; A = \sqrt{\frac{F_V}{F_H}}; \text{由 } \bar{F} = n^{-\bar{f}} \text{ 得到 } \bar{f}。 \text{式中 } \rho_v, \rho_H$$

为土的竖向、水平向电阻率($\Omega \cdot m$); ρ_w 为孔隙水电阻率($\Omega \cdot m$); R_V 、 R_H 为土样的竖向、水平向电阻(Ω); \bar{F} 为土的平均内结构因子; F_V 、 F_H 为土的竖向、水平向结构因子; n 为孔隙率; \bar{f} 为平均形状因子; A 为各向

异性指数; S_V 、 S_H 为测土的竖向、水平向电阻时电流通过的横截面积; L_V 、 L_H 为测土的竖向、水平向电阻的电极片之间的距离(m)。

另外,因膨胀过程历时十几天,温度起伏变化,所以所测电阻率值均应进行温度校正。温度校正沿用公式^[8] $\rho_t = \rho_{18} / [1 + \alpha(T - 18)]$, ρ_{18} 为 18℃ 时土的电阻率; T 为实际测试温度; α 为修正系数,取 $0.025 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

1.3 试验内容

试验方案见表2所示。试验中的膨胀土样取自合肥马鞍山南路万振逍遥苑,深度 1.5~ 2.1 m,基本物力学性质指标见表3。石灰为 II 级钙质生石灰粉。

表2 试验内容

Table 2 Content of tests

土样	测试内容
原状样	无荷、有荷(25 kPa)膨胀量,同步测其竖直、水平向电阻率
击实样	最优含水量、最优含水量 $\pm 5\%$ 含水量下无荷膨胀量,同步测其竖直、水平向电阻率
掺灰样	分别测养护龄期为 7 d,不同击实度下的无荷膨胀量,同步测其竖直、水平向电阻率

2 试验结果分析

2.1 土样的初始状态指标汇总

土样膨胀前的指标汇总见表4所示。

通过对表4中的原状土、击实土的膨胀前指标对比,可知原状土的 \bar{f} 比击实土小得多,表明结构单元体微小;其 \bar{F} 比击实土 1、2 的大,表明原状土结构联结较强,浸水后,需克服较大的结构联结强度才能使结构体分散吸水而膨胀;原状土的 A 比击实土 3 的小得多,表明自然状态下的膨胀土定向排列性比击实土 3 的差,则贯通性差,不能给膨胀土吸水提供良好的通道。

表3 膨胀土基本物力学指标

Table 3 The physico-mechanical indices of expansive soil

天然含水率 /%	密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙比	比重	液限 /%	塑限 /%	最优含水量 /%	最大干密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	自由膨胀率 F_s /%
24.14	2.08	0.63	2.73	72.3	29.6	18.3	1.687	60.5

表4 膨胀土、改良土膨胀前指标汇总

Table 4 The characteristics of samples before swelling

土样	平均结构因子 \bar{F}	平均形状因子 \bar{f}	各向异性系数 A	干密度 ρ_d / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	初始含水率 w /%	膨胀量 V_H /%	
原状土	4.179	1.387	15.106	1.674	24.14	3.270	
击实土	1	3.870	1.422	1.676	16.70	12.775	
	2	4.079	1.510	15.123	1.687	18.30	14.900
	3	4.368	1.735	19.929	1.563	24.30	13.060
掺灰 2%, 7 d	1	4.812	1.676	15.054	1.530	17.69	4.756
	2	4.811	1.634	15.262	1.528	22.73	4.240
掺灰 2%, 7 d	1	5.318	1.988	15.047	1.555	30.675	0.655
	2	5.318	1.955	15.047	1.552	38.48	1.240

从表4可知,掺灰击实后,最大干密度降低,最优含水量增大。另外,表4还显示掺灰土的平均结构因子 \bar{F} 均比击实土的高,且随着掺灰量的增大而增大,表明掺灰后结构联结强度随着掺灰量的增大而增大,此种结构特征不利于膨胀;掺灰后,平均形状因子 \bar{f} 均比击实土大,且随着掺灰量的增大而增大,表明掺灰,发生石灰效应后,团聚体形状增大、胶结增强,形成团粒骨架,使土的结构变疏松,初始孔隙比增大,浸水后,灰土产生的体积变化由于结构疏松而在内部抵消;另外,掺灰后的各向异性系数 A 变小,且随着掺灰量的增大而降低,表明发生石灰效应后,结构体排列无序,孔隙虽多,但贯通性差。因而掺灰后的改良土膨胀性比击实土小得多,且膨胀量随着掺灰量的增大而降低。

对于击实土,初始含水量高的土样其各向异性系数 A 一般较初始含水量小的 A 要大,表明定向排列性较好;且含水量高的土样平均结构因子一般较大,表明其结构联结强度较高。

2.2 膨胀过程中电阻率特性指标的变化规律

(1) 平均形状因子 \bar{f} 变化规律

如图1所示,图中表明原状土、击实土、掺灰土随着时间的增长, \bar{f} 均将降低。 \bar{f} 的降低表明土样在膨胀过程中其结构单元体的大小尺寸将变小,胶结程度变弱。另外,原状土无论加荷,不加荷,在加水膨胀瞬间,其 \bar{f} 将大幅度降低,加荷原状土的 \bar{f} 降低幅度更大,后趋于平缓;击实土在膨胀初期, \bar{f} 降低的幅度较小,待膨胀持续一段时间后, \bar{f} 陡降;待膨胀趋于稳定后,击实土、原状土、加荷原状土的 \bar{f} 将趋于一致;掺灰土随着时间增长,其 \bar{f} 将减小,但随着时间增到一定程度,膨胀后期,掺灰5%的土样 \bar{f} 会有所增长,表明其胶结性有所增长。掺灰2%的土样 \bar{f} 最终将趋于稳定。膨胀稳定后,掺灰土的 \bar{f} 大于击实土、原状土的 \bar{f} 。

(2) 平均结构因子 \bar{F} 变化规律

如图2所示,原状土、击实土、掺灰土,其平均结构因子 \bar{F} 均随着时间的增长而降低,表明土样在膨胀过程中其结构联结强度将变小。另外,原状土无论加荷还是不加荷,在加水膨胀瞬间,其 \bar{F} 将大幅度降低,后趋于平缓;击实土在加水膨胀瞬间, \bar{F} 降低的幅度很小,待膨胀持续一段时间后, \bar{F} 陡降;待膨胀趋于稳定后,击实土、原状土、加荷原状土的 \bar{F} 将趋于一致;掺灰土随着时间增长,其 \bar{F} 将减小,但随着时间增到一定程度,膨胀后期,其 \bar{F} 会有所增长;掺灰土样 \bar{F} 最终将趋于一致;膨胀稳定后,掺灰土的 \bar{F} 大于击实土、原状土的 \bar{F} 。

(3) 各向异性系数变化规律

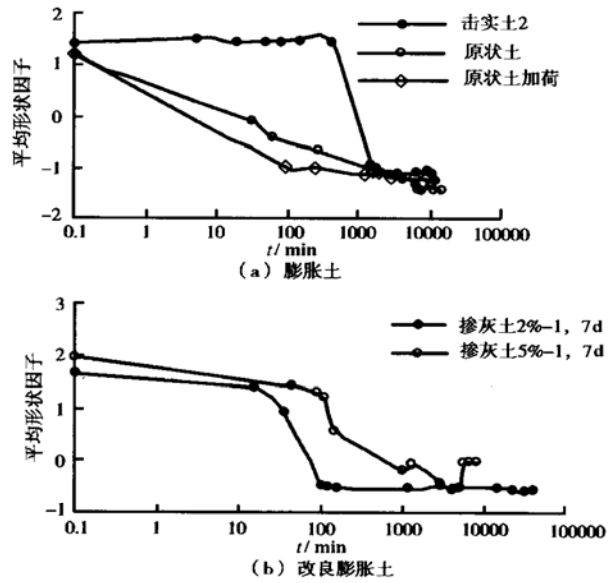


图1 时间与平均形状因子关系图

Fig. 1 The relationship between time and \bar{f}

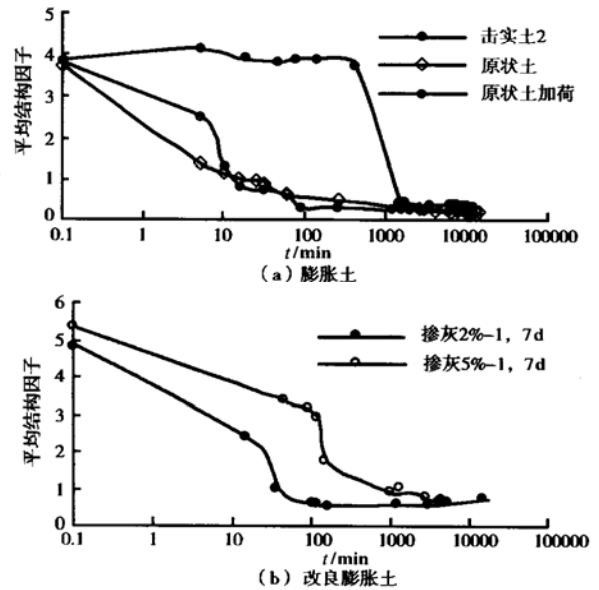


图2 时间与平均结构因子关系图

Fig. 2 The relationship between time and \bar{F}

研究可得各向异性系数 A 与时间 t 的汇总关系图3。图中表明原状土样随着吸水膨胀,结构进行调整,各向异性系数将随着时间增长而降低。而击实土,在膨胀初期,随着吸水膨胀,其各向异性系数 A 会有所增长;待膨胀到一定阶段后,会大幅度降低。待膨胀趋于稳定后,击实土、原状土、加荷原状土的 A 将趋于一致。对于掺灰土,随着时间的增长,其各向异性系数 A 将减小,但在膨胀后期,随时间增到一定程度,结构单元体大小均趋向变小,趋于均匀化,同时胶结程度增长,其各向异性系数会有所回升。

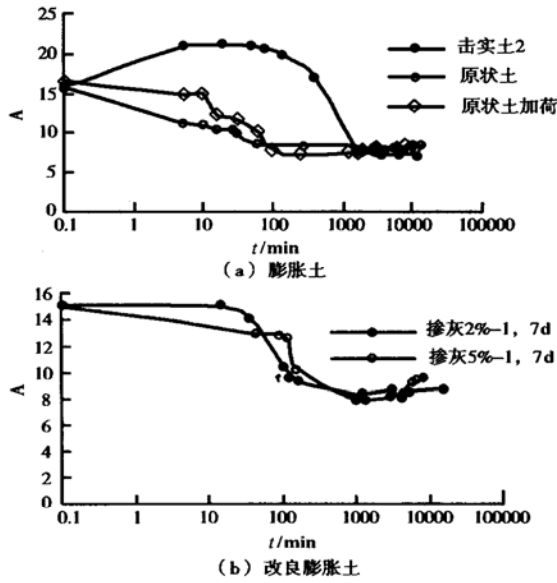


图3 时间与 A 关系图

Fig. 3 The relationship between time and A

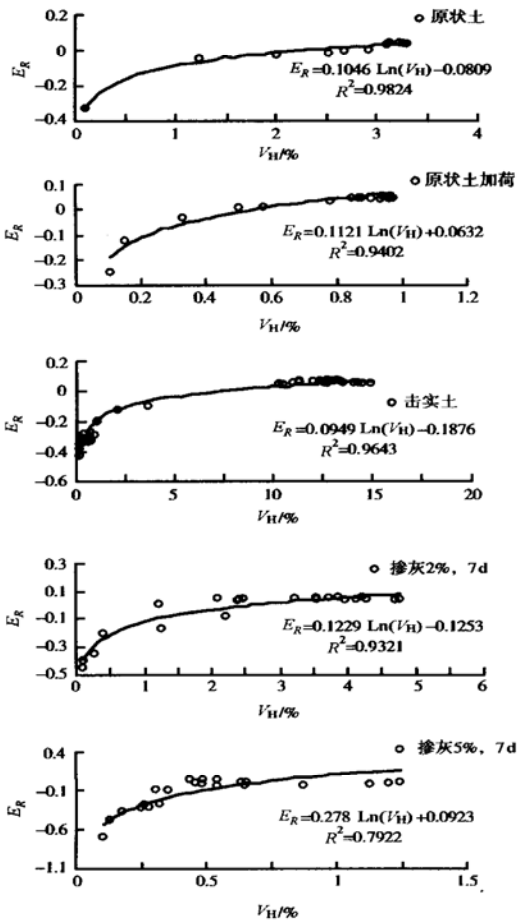


图4 ER 与膨胀量关系图

Fig. 4 The relationship between ER and swell value

2.3 用电阻率结构特性指标预测土样膨胀量的研究

定义 E_R 为综合电阻率指标, $E_R = -\bar{f}/A\bar{F}$, 图4 为 E_R 与膨胀量关系图。图4 显示原状土(加荷、不加荷)、击实土、掺灰土的综合电阻率指标 E_R 与其膨胀量的相关性均非常好, 相关关系式及其相关系数详见图中所示, 表明综合电阻率指标 E_R 可作为表征膨胀土膨胀性能的指标来预测膨胀量。

3 结 语

本文介绍了三个能反映土变形中内部结构特征变化的电阻率结构特性指标- 平均结构因子 \bar{F} 、平均形状因子 \bar{f} 、各向异性系数 A 。分析了膨胀土、膨胀改良土在膨胀过程中电阻率结构特性指标变化的基本规律, 建立了描述其在膨胀过程中结构变化的电阻率评价体系, 探讨了土样的膨胀特性与其电阻率结构特性指标的相互关系, 并指出综合电阻率指标 E_R 可作为描述膨胀强弱的指标。

尽管电阻率测试技术目前在土结构性研究领域中的应用尚处于国内空白, 国外起步阶段, 但不可否认的是, 具有测试方便、连续、快捷等优点的电阻率测试技术将有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 李生林. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 江苏: 科学技术出版社, 1992. 1- 2.
- [2] Archie G. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of American Institute of Mining Engineers, 1942, **146**: 54- 62.
- [3] Arulanandan K, Muraleetharan K. Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114**(7): 753- 789.
- [4] Thevananyagam S. Electrical response of two- phase soil[J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1993, **119**(8): 1250- 1275.
- [5] Tumidajski K. On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems[J]. Cement and concrete research, 1996, **26**(4): 539- 544.
- [6] Arulmoli K. Review of an electrical method for evaluation of stress ratio required to cause liquefaction and dynamic modulus [J]. Dynamic Geotechnical Testing, ASTM, 1994: 118- 130.
- [7] Liu S Y, Yu X J. The electrical resistivity characteristics of the cement soil[A]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Lowland Technology[C]. 2000. 185- 190.
- [8] Zeyad S. Electrical resistivity of compacted clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(5): 397- 406.