

黄土的视电阻率与工程性质关系研究

井彦林^{1,2}, 仵彦卿^{2,3}, 孟永会¹, 林杜军¹, 秦喜文¹

(1. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054;

2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 3. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 对黄土进行了视电阻率试验, 分析了视电阻率与黄土一般物理性质、湿陷性及强度等特性之间的关系。应用因子分析法对视电阻率及其它物理力学指标之间的关系进行了深入的探讨, 对各指标的重要性(以贡献率表示)进行了分析。研究结果表明, 视电阻率的重要性最大, 高于含水率、密度、压缩系数及湿陷系数等指标。

关键词: 黄土; 视电阻率; 相关性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)06-0098-04

中图分类号: TU444

Study of the Relationships Between Apparent Resistivity of Unsaturated Loess and Its Engineering Properties

JING Yair lin^{1,2}, WU Yair qing^{2,3}, MENG Yong hui¹, LIN Du jun¹, QIN Xi wen¹

(1. China Coal Xi'an Design & Engineering Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Experiments on apparent resistivity, moisture content, density, compressibility, strength, collapsibility of unsaturated loess were performed in laboratory. Testing data were analyzed using correlation analysis model. The relations of apparent resistivity to moisture content, density, compressibility, strength, and collapsibility of unsaturated loess were analyzed using the factor analysis method. Results showed that the contribution of the apparent resistivity was greater than those of moisture content, density, compressibility, and collapsibility of unsaturated loess.

Keywords: loess; apparent resistivity; correlation

电阻率测试是地球物理探测中的重要技术, 它是以研究地质体的电阻率差异为基础的测试方法。电阻率测试在地下异常体探测方面研究成果较多, 技术也较为成熟, 而在土工程性质测定方面的研究成果相对较少, 但由于其应用前景广阔, 日益受到人们的关注。文献[1-4]用电阻率研究土的结构, 建立了非饱和土电阻率模型; 文献[5]研究了甘肃省定西地区黄土的视电阻率, 提出视电阻率与含水率之间为显著的线性负相关关系, 文献[6-10]运用电阻率层析成像技术及统计技术研究了黏性土、淤泥的电阻率与含水率、饱和度、孔隙度、强度等指标的关系, 提出电阻率与含水率、无侧限抗压强度等呈正相关关系。

从已发表的文献来看, 电阻率在土工程性质方面的研究主要集中在两个方面, 一是用电阻率进行土的结构研究, 二是研究电阻率与土的物理力学指标的关系。后者的研究侧重于黏性土、砂土及淤泥等, 而关

于电阻率与黄土的工程性质关系方面的报道较少, 尤其是很少见到电阻率与黄土湿陷性关系方面的研究成果。本文研究的目的是通过电阻率试验, 分析黄土的一般物理特性、压缩性、强度及湿陷性等与其电阻率之间的关系。电阻率试验通过室内和野外方法均可完成。考虑到试验直观、方便及经济等原因, 本研究采用了室内试验。室内试验可获得视电阻率和真电阻率, 而目前野外测试不易直接测得真电阻率, 故研究中采用了视电阻率测试。

1 试验方法

取土场地位于陕西省彬县, 地貌为黄土塬。试样分别取自 4 个探井, 深度均为 15.00 m, 土性为晚更新世自重湿陷性黄土。在探井中采取不扰动土样, 在室内进行视电阻率测试, 同时进行一般物理力学试验、黄土固结试验等。

收稿日期: 2008-01-18

修回日期: 2008-04-17

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(10572090); 中煤能源集团公司重点科技项目(08-26)

作者简介: 井彦林(1963-), 男(汉族), 陕西省蒲城县人, 博士, 教授级高工, 主要从事黄土力学与工程、环境岩土工程及岩土工程信息化研究。E-mail: jingyanlin@sina.com。

视电阻率测试仪器选用重庆奔腾数控技术研究所生产的 WDJD-1 多功能数字直流激电仪。电阻率测试采用 4 极装置, 在土样表面任意两点用供电电极 A, B 供电, 在 A, B 之间另两点用测量电极 M, N 测定电位差(装置见图 1)。

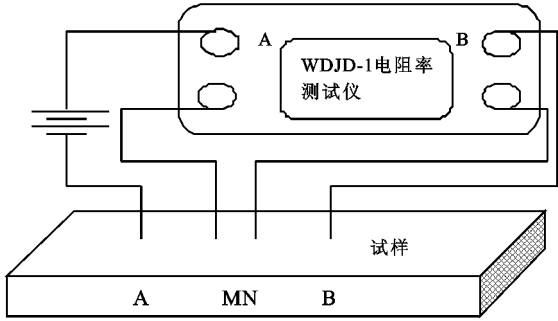


图 1 土样视电阻率测试装置

在对称的 4 极装置中, $AB=5\text{ cm}$, $MN=1\text{ cm}$ 。供电电极 A, B 及测量电极 M, N 均采用导电性良好的铜材料制作以减小接触点的电阻; 供电电源 45 V, 串联于 A, B 回路中, 用仪器测量回路中的电流 I_p 和 M, N 电极两端的电位差 ΔV , 然后用以下公式计算出 M, N 中点的视电阻率 ρ_s 。

$$\rho_s = k \cdot \Delta V / I \quad (1)$$

式中: I ——回路中的电流; 由于采用对称 4 极装置, 故装置系数 k 计算公式如下

$$k = 2\pi \cdot AM \cdot AN / MN \quad (2)$$

2 黄土的物理力学指标与视电阻率的关系

在黄土固结试验中, 11.5 m 以内湿陷性试验的压力为 200 kPa, 该深度以下试验压力为饱和自重压力。视电阻率与含水率、密度、湿陷系数及饱和度等的关系曲线见图 2—5(图 5 中的自重压力为饱和自重压力)。

(1) 视电阻率与含水率为线性负相关关系, 这与文献[5]的结果一致; 视电阻率与密度、干密度、饱和度、液限同样具有线性负相关关系。

(2) 视电阻率与黏聚力有较显著的线性正相关性。由图 5 可见, 关系曲线拟合程度较高, 其相关系数达到 0.88, 其回归方程为: $y = 0.2548x + 29.595$ 。

(3) 湿陷系数随视电阻率的增大而增大。200 kPa 压力下的湿陷系数与视电阻率拟合线较陡, 饱和自重压力下的拟合线较平缓, 说明 200 kPa 的湿陷系数随视电阻率变化敏感。

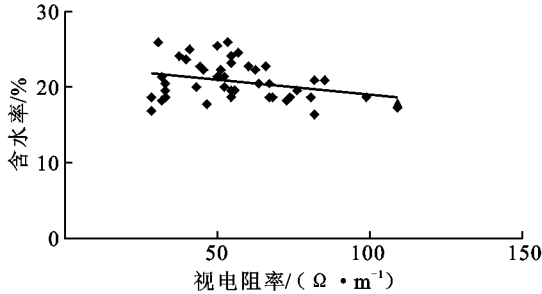


图 2 视电阻率—含水率关系数图

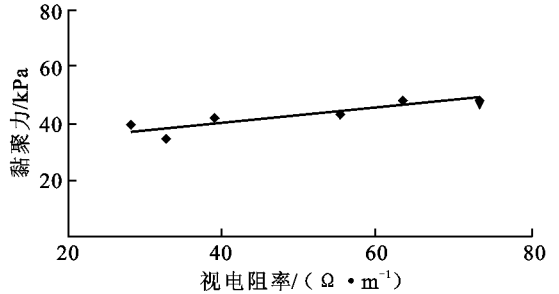


图 3 视电阻率—黏聚力关系图

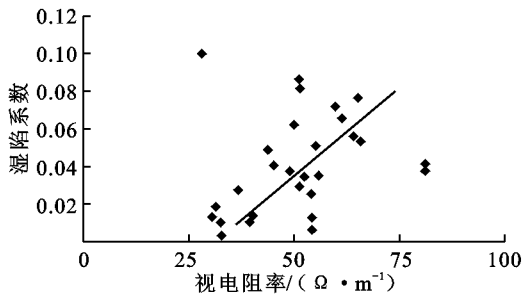


图 4 视电阻率—湿陷系数(200 kPa)关系图

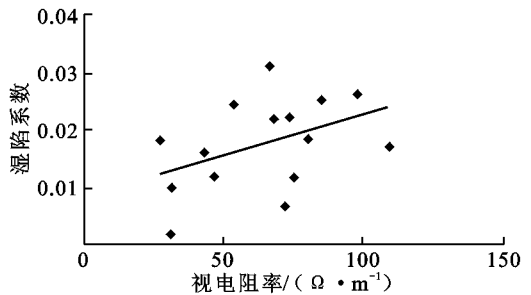


图 5 视电阻率—湿陷系数(300 kPa)关系图

3 因子分析

土体的湿度、稠度、压缩性及湿陷性等是其主要的, 也是基本的工程性质。这些工程性质通常由含水率、密度、液限、压缩系数(100~ 200 kPa) 及湿陷系数

等物理力学指标来表示, 其它一些重要指标如干密度、孔隙比、孔隙率、塑性指数等都是由这些指标通过计算而得出的。本文通过因子分析法进一步分析这些指标间的关系, 并对视电阻率相对于这些指标的重要性予以探讨。

3.1 因子分析方法

因子分析(factor analysis)是一种多元统计方法,其概念起源于20世纪初 Karl Pearson 和 Charles Spearman 等关于智力测验的统计分析。它的基本思想是根据相关性大小将变量分组,使得同组内的变量间相关性较大,而不同组的变量不具相关性或相关性较小。每组变量代表一个结构,这个结构称为公共因子。各公因子的含义不同,对原变量的贡献不同,据此就可判断某因子在原变量总体中的重要性^[11]。本文运用因子分析法通过各指标方差贡献率的大小论述其不同的重要性,并对各指标在数据总体中的重要性进行排序。

设有 n 个观测值,每个观测值有 p 个属性,则构成 p 维随机向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ 。

(1) 将原始变量 x 进行标准化。

$$x_{ij}^* = (x_{ij} - \bar{x}) / \sqrt{\text{var}(x_j)} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

式中: \bar{x} ——平均值; $\sqrt{\text{var}(x_j)}$ ——标准差; x_{ij}^* —— x_{ij} 的标准化值; n, p ——试样数据组数及每组中指标个数。

(2) 计算 x^* 的相关矩阵 R 。

$$r_{ij}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i.}^* x_{ij}^* \quad (2)$$

式中: r_{ij}^* ——相关矩阵 R 的元素; $x_{i.}^*, x_{ij}^*$ ——标准化变量中第 t 行第 i 列与第 j 列元素。

(3) 据相关矩阵计算特征值及特征向量,据特征值确定各主成分的贡献率及累计贡献率。

(4) 计算因子荷载矩阵。荷载值即特征向量与相应的特征值的平方根的乘积。

(5) 因子旋转。对因子荷载矩阵进行旋转计算后可使各因子的意义更加有代表性,即使荷载值向两极分化。常用的方法有正交旋转及斜交旋转,本文采用方差最大正交旋转(算法详见文献[11])。

3.2 结果与分析

按上节的计算步骤对视电阻率、含水率、密度、液限、压缩系数及湿陷系数等6项指标进行分析。首先计算相关矩阵,然后计算特征值、特征向量及因子荷载矩阵。因子荷载矩阵的解法采用主成分法。因子荷载矩阵计算中常出现同一因子的多个荷载值较大且接近的情形,这导致该因子物理意义不明确,故应进行因子旋转。因子旋转采用方差最大正交旋转。因子旋转后每个因子荷载值明显向两极分化,使因每个因子的含义更加清晰明确(见表1)。

表1 旋转后的因子荷载矩阵

项目	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子6
含水率	-0.161	0.236	-0.001	0.304	0.909	0.028
密度	-0.329	-0.242	-0.299	0.005	0.030	0.862
液限	-0.079	0.016	0.218	0.931	0.282	0.003
压缩系数	0.033	0.947	0.144	0.020	0.210	-0.189
湿陷系数	0.003	0.147	0.936	0.216	0.005	-0.236
视电阻率	0.958	0.027	0.000	-0.078	-0.141	-0.236
方差贡献	1.059	1.034	1.034	1.012	0.971	0.891
贡献率	17.653	17.226	17.228	16.869	16.176	14.848
累计贡献率	17.653	34.879	52.107	68.976	85.152	100.000

由表1可见,因子1中视电阻率对应的因子荷载值最大,为0.958,所以因子1代表视电阻率;因子1中视电阻率与含水率、密度及液限的因子荷载符号相反,说明其关系为负相关,与压缩系数、湿陷系数符号相同,说明其关系为正相关;因子2中,压缩系数的因子荷载值最大,为0.947,故因子2代表压缩系数;同理因子3—6分别代表湿陷系数、液限、含水率及密度。在因子分析中,以因子荷载矩阵各列的平方和表示因子对原始变量的方差贡献,即因子的重要性。某因子的方差贡献或贡献率值越大,说明该因子对原变

量的贡献越大,即越重要。因子1(视电阻率)的贡献率最大,其次为因子3(湿陷系数),再次为因子2(压缩系数),其它依次为因子4(液限)、因子5(含水率)及因子6(密度)。由此可见,视电阻率在黄土物理力学指标中的重要性最大,高于用不扰动土样才可测得的天然密度、压缩系数、湿陷系数等重要指标,当然也高于含水率。通过因子分析,对本试验场地而言各指标按重要性从大到小排序依次为:视电阻率、湿陷系数、压缩系数、液限、含水率、密度,即视电阻率的重要性大于其压缩性、湿陷性、液限、湿度及密实程度。

分析表明,密度为第6因子,其贡献率仅为14.848%,而前5个因子占总信息量的85%以上,故可采用前几个因子所代表的指标预测密度,而前5个因子中,视电阻率为最重要的指标。工程中常用电阻率换算岩土密度,所以因子分析结果为用电阻率对密度的预测提供了一定的科学依据。

3.3 问题讨论

视电阻率是土体导电性能的基本参数。影响岩土导电性的因素较复杂且是多方面的,其中主要是土的矿物成分、颗粒大小、颗粒排列方式、湿度、温度、孔隙特征及孔隙水的矿化度等;土中良导金属含量越高,视电阻率越低;颗粒成份不同,视电阻率不同;而且相同的矿物成份,其孔隙特征及颗粒排列方式不同,视电阻率也不同;含水率及孔隙水性质均影响视电阻率值。研究发现雨水、河水、海水和井水的视电阻率存在明显差异,这是由于它们的矿化度不同所致。

由视电阻率的影响因素分析看出,视电阻率是土体多种性质的综合反映,它在很大程度上表示土的结构性,文献[1—4]用电阻率研究土的结构,建立土的电阻率模型也正说明了这一点。正是因为视电阻率在很大程度上表示土的结构性,所以其信息量即重要性大于其密度、压缩系数、湿陷系数等指标。

湿陷性是黄土重要的工程性质,黄土湿陷性评价是地基、边坡等工程分析的重要内容。本文的研究表明视电阻率的重要性高于湿陷性。目前在实际工程中,视电阻率的测试已很普遍且相对经济而简便,因此可考虑用视电阻率评价黄土的湿陷性。

4 结论

(1) 试验及分析结果表明,黄土的视电阻率与含水率为线性负相关关系,与黏聚力有显著的线性正相关关系。

(2) 湿陷性随视电阻率的增大而增强,随视电阻率的减小而减弱,两者为线性正相关关系。

(3) 通过因子分析法对视电阻率、压缩系数、湿

陷系数、液限、含水率及密度的分析表明,各指标按重要性由大到小排序依次为视电阻率、压缩系数、湿陷系数、液限、含水率、密度,即视电阻率最为重要。

(4) 湿陷性是黄土重要的工程性质,而视电阻率的重要性高于湿陷性,因此可考虑用视电阻率评价黄土的湿陷性。

[参 考 文 献]

- [1] Arulanandan K, Muraleetharan K. Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(7): 753—789.
- [2] Kalinski R J, Kelly W E, Bogardi I, et al. Electrical resistivity measurement to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers[J]. Journal of Applied Geophysics, 1993, 30: 161—173.
- [3] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The microstructures of clay given by resistivity measurements[J]. Engineering Geology, 1999, 54: 43—53.
- [4] 于小军,刘松玉.电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨[J].岩土工程学报,2004,26(3): 393—396.
- [5] 张宗祜.甘肃定西附近黄土渗透性及湿陷性试验研究[C]//中华人民共和国地质部地质科学研究院论文集(丁种第一号).北京:中国工业出版社,1966: 93—125.
- [6] Liu S Y, Yu X J. The electrical resistivity characteristics of the cement soil[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Lowland Technology. 2000: 185—190.
- [7] 郭秀军,刘涛,贾永刚,等.土的工程力学性质与其电阻率关系实验研究[J].地球物理学进展,2003,18(1): 151—155.
- [8] 刘万恩,蔡克俭,殷亚斌.天津地区视电阻率与地基土物理力学指标之间的相关特征[J].物探装备,2003,14(3): 191—197.
- [9] 刘国华,王振宇,黄建平.土的电阻率特性及其工程应用研究[J].岩土工程学报,2004,26(1): 83—87.
- [10] 井彦林,仵彦卿.黄土岩土工程评价分析系统[J].岩土工程学报,2005,27(10): 1154—1158.
- [11] 何晓群.现代统计分析方法[M].北京:中国人民大学出版社,1998: 281—314.