

文章编号:1671-8879(2015)06-0033-09

基于电阻率特性的非饱和土压实度定量评价方法

宋 杰,李术才,刘 斌,许新骥,王传武,聂利超

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要:为了得到土壤压实度深部信息与分布情况,实现大范围评价,将电阻率法引入到土壤压实度评价中。在原有电阻率模型的基础上通过理论推导初步得到了电阻率与压实度理论关系的基本模型,并通过系统的室内试验研究验证了电阻率随含水率增加呈幂指数减小的规律,揭示了电阻率随压实度增加而呈幂指数减小的规律,得到了电阻率与含水率、压实度的确定性关系表达式。同时在考虑土壤压实工艺的前提下,得到了电阻率与压实度的幂指数关系公式。利用该公式,在电阻率层析成像与不等式约束反演的基础上,提出了基于电阻率特性的非饱和土压实度快速定量评价方法及其实现流程。研究结果表明:电阻率法得到的土壤压实度结果与环刀法基本一致,并可得到整个区域内压实度的分布情况,方便快捷,有较好的应用前景。

关键词:道路工程;压实度;电阻率特性;定量评价;电阻率层析成像

中图分类号:U416.1;TU47

文献标志码:A

Quantitative assessment method of unsaturated soil compaction degree based on resistivity property

SONG Jie, LI Shu-cai, LIU Bin, XU Xin-ji, WANG Chuan-wu, NIE Li-chao

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: The resistivity method was introduced into the assessment of soil compaction degree to obtain deep information and distribution of soil compaction degree and to achieve large-scale evaluation. The basic model of theoretical relationship between resistivity and compaction degree was obtained through theoretical deducing based on the original resistivity model. The systematic laboratory experiment results proved that resistivity decreases at the exponent sign rule with the increase of moisture content, and revealed that resistivity decreases at the exponent sign rule with the increase of compaction degree. The definite relationship expression among resistivity, moisture content and compaction degree was also obtained. Besides, an exponent sign formula on relationship between resistivity and compaction degree was obtained under the premise of considering soil compaction technology. Using the formula, this paper proposed the quantitative assessment method and the implementation process of unsaturated soil compaction degree with resistivity property was proposed based on electrical resistivity tomography and inversion with inequality constraint. The experimental results show that the result of soil compaction degree by resistivity method is basically consistent with that by the cutting ring method, and the

收稿日期:2015-08-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB036002,2014CB046901,2015CB058101);国家重大科研仪器设备研制专项(51327802);国家自然科学基金重点项目(51139004);国家自然科学基金面上项目(51479104);山东大学基本科研业务费资助项目(2014QY007,ZR2011EEQ013);山东大学人才引进与培养专项资金项目(2014HW012)

作者简介:宋 杰(1988-),男,山东威海人,工学博士研究生,E-mail:tom1442@sina.com。

distribution of soil compaction degree is obtained. The method is convenient and efficient, and has a bright prospect of generalization. 4 tabs, 15 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; compaction degree; resistivity property; quantitative assessment; electrical resistivity tomography

0 引言

在路基、地基等各类工程中,土壤的压实质量是关系路基、地基等工程安全的关键因素之一。压实使路基、地基等的强度大大提高,使土基的塑性变形明显减小,使土的透水性降低,毛细上升高度减少。然而相同的土基材料在不均匀的压实作用下可形成不同的物理力学指标,在工程结构工作寿命期间发生着向不良状态发展的动态变化,易导致各类病害现象,因此开展土壤压实度评价方法研究具有十分重要的意义。为此,提出了多种压实度评价方法。现场压实质量用压实度表示,目前压实度检测方法主要有:环刀法与灌砂法^[1]。《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)一直沿用的方法是环刀法^[2],该方法要求在路基(或地基)上选择一些具有代表性的检测点,通过选取的检测点推断整个范围的土壤压实度。由于碾压土层的密度一般是从上到下减小的,用环刀法测得的密度是环刀内土样所在深度范围内的平均密度,它不能代表整个碾压层的平均密度。而且环刀法仅适用于不含骨料的细粒土,受土质限制,从而不能适用各类实际工程的需要。灌砂法是施工过程中最常用的试验方法之一。但是该方法不适用于填石路堤等有大孔洞或大孔隙材料的压实度检测,同时操作过程繁琐、数据和操作过程受人为因素影响大,可能出现较大误差。

近几年,为适应快速发展的路基、地基等各类工程,有关学者还探索了一些新型的压实度检测方法,主要有核子密度仪法、瑞雷波检测等方法。核子密度仪法测量速度快,需要人员少^[3-4],但该方法的放射性物质对人体有害,另外需要打洞的仪器,在打洞过程中使洞壁附近的结构遭到破坏,影响测定的准确性。瑞雷波检测法是弹性波波速法的一种,适用于现场检测的快速无损原位测试。目前,刘江平等对瑞雷波法评价路基等的压实度进行了初步研究,但是仅通过该方法对压实质量进行定性的分析评价,未对波速与压实度的关系进行定量研究^[5-6]。瑞雷波法是利用地球物理方法来检测和表征土壤压实度,研究相应的地球物理特征与压实度之间的关系,是利用地球物理方法定量表征土壤压实度的基本前

提。瑞雷波法具有无损、快速、检测范围大的优势,是利用地球物理方法快速定量表征压实度的有益探索。

除了弹性波波速之外,电阻率也是土壤的一种重要地球物理参数,它是土的固有物性参数之一,是土的内因与外因共同作用的结果。非饱和土是由土体颗粒、孔隙水、空气组成的三相体系,土的电阻率特性主要受土体的孔隙率、含水率等因素的影响。在土壤压实过程中,土壤的三相体系发生变化,导致土的电阻率随之发生变化。因此,可以通过研究压实过程中压实度与电阻率的对应关系得到相应的定量关系,从而实现压实度的电阻率法定量评价。电阻率法可以大规模地布置测线,测定某一范围内的压实度;而且探测和评价深度远远超出传统方法,不需要每层都测,只需要在压实完成之后测量一次即可。因此电阻率法是一种适合普查的方法,通过它可以评价整个测试范围内的压实情况,并发现压实度不满足的区域。

对于土的电阻率特性以及模型研究开展较早。早在 1942 年美国物理学家 Archie 就提出了适用于饱和和无黏性土、纯净砂岩的电阻率模型^[7];Keller 等对该模型作了进一步研究,提出了适用范围更广的非饱和纯净砂岩与无黏性砂的电阻率模型^[8-9];Waxman 考虑到土壤颗粒因素对电阻率的影响,提出了非饱和土的电阻率模型^[10]。在土的电阻率特性及其应用上,国内外有关学者也进行了相关研究。董晓强等对水泥固化硫酸钠污染土的电阻率和强度特性进行了研究^[11];刘松玉等对土的电阻率影响因素进行了探究,并将其引入到膨胀土改良等有关工程当中^[12-14];Sudha 等将电阻率法与标准贯入试验、动态锥渗透测试、土壤粒度分析一起运用到岩土工程现场勘察中,取得了较好的应用效果^[15];Chaplot 等探讨了土壤近地表电阻率与渗透性参数之间的关系,并在此基础上,对实际观测到的视电阻率值进行了合理的修正,使其能够更加真实地反映土壤中水分的空间变化情况^[16];刘国华等也对土的电阻率与土的有关力学性质的关系进行了相关研究^[17-19]。但是目前尚未见到有关电阻率与压实度之间定性以及定量关系的研究,更未见将土壤电阻率引入到压

实度评价当中,因此,亟待开展相关研究。

针对上述问题,本文在原有电阻率模型的基础上通过理论推导初步得到了电阻率与压实度理论关系的基本模型,并通过系统的室内试验研究,揭示了含水率、压实度与电阻率之间的相关关系,得到了电阻率与压实度的确定性关系公式,在此基础上提出了基于电阻率特性的非饱和土压实度快速定量评价方法及其实现流程,并在室内试验中得到验证。

1 基于电阻率特性的土壤压实度定量表征方法

1.1 电阻率与压实度理论关系的基本模型

目前有关土壤电阻率模型共有 3 种:饱和和无黏性土、纯净砂岩的电阻率模型,非饱和纯净砂岩与无黏性砂电阻率模型,考虑土颗粒表面导电的非饱和土电阻率模型。Archie 等提出的饱和和无黏性土、纯净砂岩的电阻率模型将土电阻率与土的结构初步联系起来,它不考虑固体颗粒导电性^[7];考虑到饱和度对电阻率的影响,有关学者提出了非饱和纯净砂岩与无黏性砂电阻率模型^[8-9];Waxman 等考虑到土颗粒表面导电性对整个土体电阻率的影响,提出了非饱和土电阻率模型^[10]。

土壤压实过程使土壤颗粒重新定位并形成密集的结构,土壤固体颗粒的化学性质基本不发生变化,压实过程中基本不发生排水,孔隙水导电性也不发生变化。本文忽略土颗粒表面导电性对整个土体电阻率的影响,选择非饱和纯净砂岩与无黏性砂电阻率模型作为本文研究土的压实度与电阻率关系的模型,其基本公式为

$$\rho = a\rho_w n_k^{-m} S_r^{-p} \tag{1}$$

式中: ρ 为土壤电阻率; a 为试验参数; ρ_w 为孔隙水电阻率; n_k 为孔隙率; m 为胶结系数; S_r 为饱和度; p 为饱和度指数。

将式(1)中的孔隙率 n_k 、饱和度 S_r 用压实度 D 替换,整理得到下式

$$\rho = a\rho_w^{\frac{p+1}{p}} \rho_s^{-p} \omega^{-p} (1 + e_{\max} - ED)^m (e_{\max} - ED)^{p-m} \tag{2}$$

式中: ρ_s 为土粒密度; ω 为土壤含水率; $E = e_{\max} -$

e_{\min} ; e_{\max} 为土壤最大空隙比,可由其最小干密度换算; e_{\min} 为土壤最小空隙比,可由其最大干密度换算; D 为土壤压实度。

式(2)最后两项 e_{\max} 、 E 对于同一种土来说为定值,仅存在 D 这 1 个土壤参数为变量。但是,该两项比较复杂,在实际应用中无法直接应用,也无法将 D 直接用 ρ 表示出来,暂时先将后两项用函数 $G(D)$ 表示,所以式(2)可以表示为

$$\rho = a\rho_w^{\frac{p+1}{p}} \rho_s^{-p} \omega^{-p} G(D) \tag{3}$$

考虑到土壤压实工艺,在压实过程中,土壤基本不发生排水,土颗粒只是重新定位形成密集的结构,因此,在压实过程中孔隙水电阻率 ρ_w 、土粒密度 ρ_s 均基本相同,本文不做进一步研究。本文通过系统试验研究 ρ 与 ω 、 D 的定量关系。

1.2 土壤电阻率与压实度、含水率的关系

1.2.1 试验概况

试验所用土样采用粉质粘土为主的自然耕地土,试验用土自然状态下的基本物理特性见表 1,试验前按照相关规定将土样放在烘箱中烘干,将土体分成 6 份,每份加入不同量的水,制成不同含水率的土样,并精确测定每份的含水率。

土样制备的模具为自行设计加工的直径为 5 cm,高度为 12 cm 的圆柱型钢模具。制备的部分土样如下页图 1 所示。

本试验土壤电阻率通过直流电法仪采用四相电极法测得,装置示意图如下页图 2 所示。外部两端的电极 A、B 用于给试样供电,中间 2 个电极 M、N 用于测定电压。为减小接触电阻影响,试样两端的供电电极采用圆形供电电极,中间的测量电极采用环形测量电极,以增大接触面积。

土壤试件电阻率是通过测试两电极间的电压以及通过的电流,并根据欧姆定律计算出土壤电阻大小 R ,则土壤试件的电阻率为

$$\rho = R \frac{S}{L} \tag{4}$$

式中: S 为土壤断面面积(m^2); L 为电极间距(m)。

1.2.2 试验结果及分析

(1)电阻率与含水率之间的关系

表 1 试验用土自然状态下的基本物理特性
Tab. 1 Physical properties of soil in its natural state

相对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	最优含水率 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	不同颗粒(mm)土含量/ $\%$		
					<0.002	$0.002 \sim 0.075$	>0.075
2.73	60.1	29.2	20.9	1.72	50.4	40.1	9.5

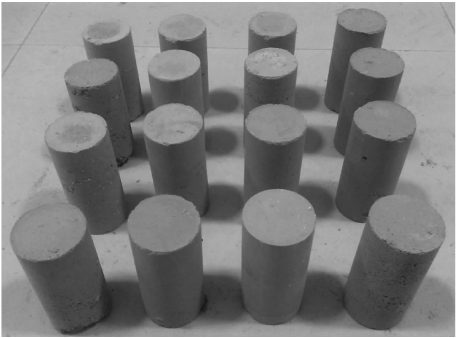


图 1 土壤试件
Fig. 1 Soil specimens

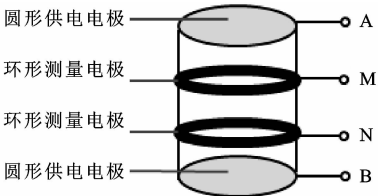


图 2 试验装置
Fig. 2 Experimental equipment

在压实度不变的情况下,测试不同含水率试样的电阻率。图 3 为压实度分别为 78.6%、81.4%、84.2%、87.0%、92.6%、94.9%、95.3% 时不同试样的电阻率。

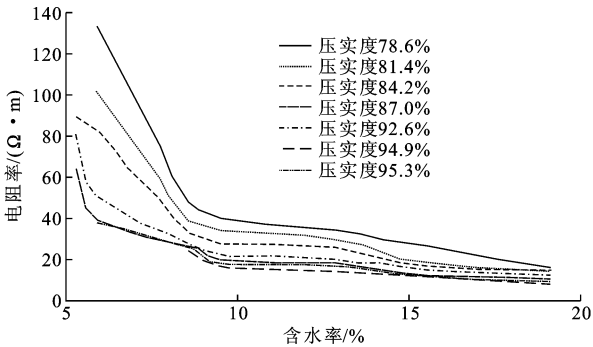


图 3 土样电阻率与含水率关系试验曲线
Fig. 3 Resistivity and moisture content test curve of soil examples

分析试验曲线可以发现,电阻率随含水率的变化具有下列规律:土壤电阻率随含水率的增加而减小,在含水率较低时,变化速率较快,当土的含水率达到一定值时(本试验约为 10%),电阻率随含水率变化速率明显降低。其原因为:在土壤含水率较低时,土壤含水率的增加会使三相土中空气减少,孔隙水连通性增加,同时土壤颗粒的接触也得到改善,导致土的电阻率随含水率的增加而迅速减小,这是土的三相结构变化对土壤电阻率影响的表现,此时土的含水率变化对土的电阻率影响较大;当含水率达

到一定值时(本次试验约为 10%),三相土孔隙中的孔隙水的连通性已达较好状态,此时继续增加土的含水率对于改善孔隙水的连通性以及土壤颗粒之间的接触影响不大,因此土的电阻率随含水率的变化速率明显降低,此时土壤含水率的变化对土壤电阻率的影响较小。

在式(3)中,考虑到土壤压实工艺,在压实度一定的情况下,除含水率外,其他参数均可视为定值,式(3)简化为

$$\rho = b\omega^{-p} \tag{5}$$

式中: b 为待定系数, $b = a\rho_w^{p+1}\rho_s^{-p}G(D)$,同一种土的 b 随着压实度的变化而变化。

对图 3 中的试验数据用式(5)进行拟合,拟合结果见表 2,部分拟合曲线见图 4。通过表 2 和图 4 可以发现,试验数据与理论推导公式拟合较理想,验证了理论模型的合理性。

表 2 土样电阻率与含水率关系拟合公式
Tab. 2 Resistivity and moisture content fitting formula of soil examples

压实度/%	拟合公式	判定系数
78.6	$\rho = 1\,888.8\omega^{-1.607\,4}$	$R^2 = 0.94$
81.4	$\rho = 1\,301.8\omega^{-1.536\,5}$	$R^2 = 0.94$
84.2	$\rho = 879.93\omega^{-1.420\,6}$	$R^2 = 0.94$
87.0	$\rho = 560.46\omega^{-1.315\,5}$	$R^2 = 0.93$
92.6	$\rho = 405.14\omega^{-1.241\,5}$	$R^2 = 0.94$
94.9	$\rho = 286.56\omega^{-1.145\,6}$	$R^2 = 0.96$
95.3	$\rho = 273.97\omega^{-1.138\,2}$	$R^2 = 0.94$

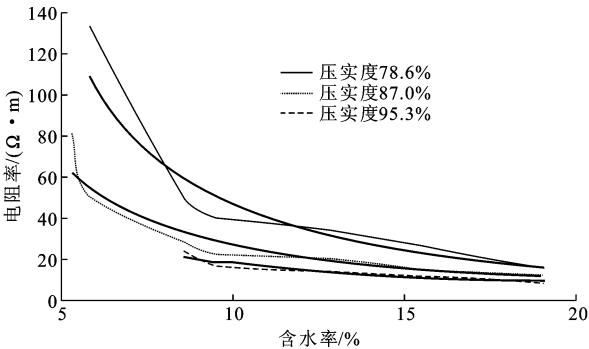


图 4 电阻率与含水率关系拟合曲线
Fig. 4 Fitting formula of relationship between resistivity and moisture content

(2)电阻率与压实度之间的关系

在含水率不变的情况下,测试不同压实度试样的电阻率。测试结果见下页图 5,图中为分别控制含水率为 5.9%、8.6%、9.5%、12.8%、15.5% 和 19.1% 时不同土样的电阻率。

分析上述曲线可以发现,土壤电阻率随压实度

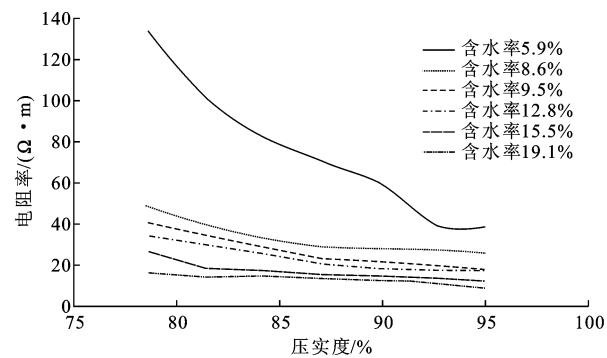


图 5 土样电阻率与压实度关系试验曲线
Fig. 5 Resistivity and compaction degree test curve of soil examples

的增加而减小。产生这种现象的原因:在土壤压实度较低时,土颗粒之间的接触较差,三相土中空气较多,孔隙水连通性较差,电阻率较高;当压实度增加时,三相土中空气减少,孔隙水连通性增加,土颗粒之间的接触得到改善,导致土的电阻率随压实度的增加而减小,这也是土的三相结构的变化对土壤电阻率影响的表现。

式(3)中电阻率与压实度的关系待定,为对其关系量化,对图 5 的试验结果进行拟合。通过拟合发现,电阻率与压实度之间呈幂指数相关,拟合结果如图 6~图 9,下页图 10、图 11 和表 3 所示。

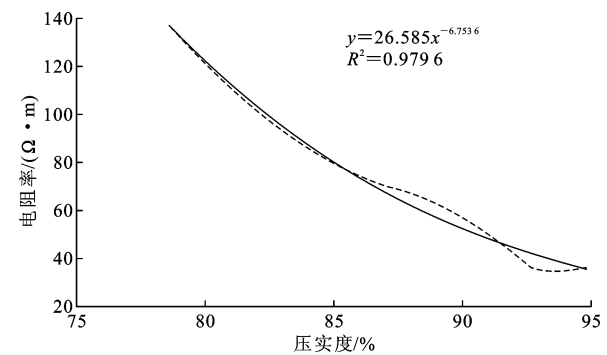


图 6 含水率为 5.9%时电阻率与压实度拟合曲线
Fig. 6 Fitting formula of relationship between resistivity and compaction degree in 5.9% moisture content

由表 3 可看出,电阻率与压实度之间的幂指数关系拟合较好,电阻率与压实度的拟合公式为

$$\rho = c_d D^{-n} \tag{6}$$

式中: n 为待定系数; $c_d = a\rho_w^{p+1}\rho_s^{-p}\omega^{-p}$ 。

(3) 电阻率与含水率、压实度之间的关系

式(3)中在含水率一定时,除压实度外,其他参数均为定值,将 $G(D)$ 用拟合关系替换,最终土的电阻率与含水率、压实度的表达式为

$$\rho = a\rho_w^{p+1}\rho_s^{-p}\omega^{-p}D^{-n} \tag{7}$$

参数 a 、 p 、 n 随土的种类及性质的变化而变化,

表 3 土样电阻率与压实度关系拟合曲线		
Tab. 3 Resistivity and compaction degree fitting formula of soil examples		
含水率/%	拟合公式	判定系数
5.9	$\rho = 26.585D^{-6.7536}$	$R^2 = 0.98$
8.6	$\rho = 20.303D^{-3.2554}$	$R^2 = 0.89$
9.5	$\rho = 14.006D^{-4.2643}$	$R^2 = 0.97$
12.8	$\rho = 13.303D^{-3.9007}$	$R^2 = 0.97$
15.5	$\rho = 9.7606D^{-3.6222}$	$R^2 = 0.91$
19.1	$\rho = 9.1278D^{-2.4095}$	$R^2 = 0.94$

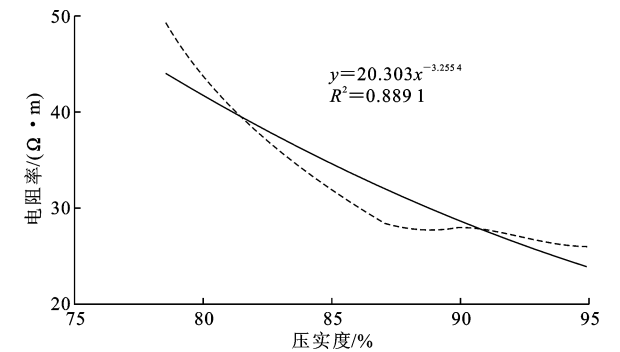


图 7 含水率为 8.6%时电阻率与压实度拟合曲线
Fig. 7 Fitting formula of relationship between resistivity and compaction degree in 8.6% moisture content

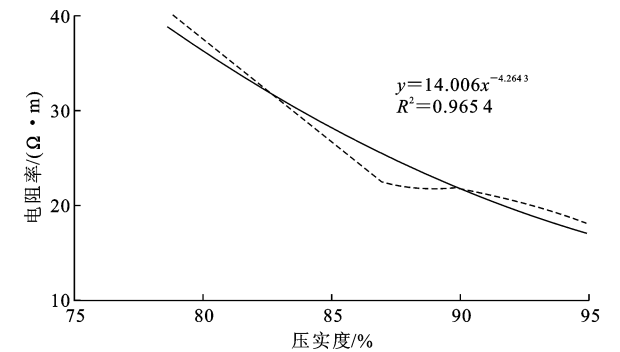


图 8 含水率为 9.5%时电阻率与压实度拟合曲线
Fig. 8 Fitting formula of relationship between resistivity and compaction degree in 9.5% moisture content

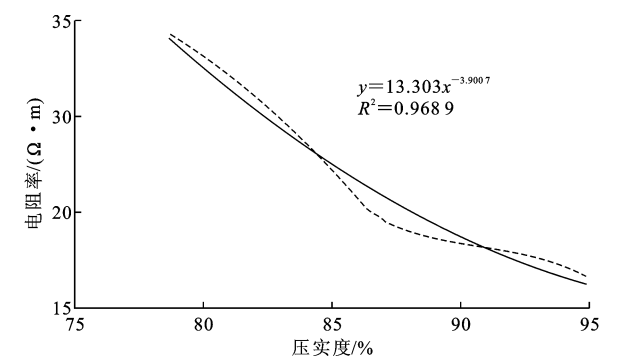


图 9 含水率为 12.8%时电阻率与压实度拟合曲线
Fig. 9 Fitting formula of relationship between resistivity and compaction degree in 12.8% moisture content

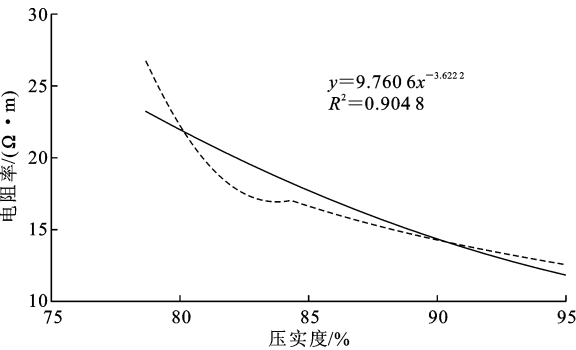


图 10 含水率为 15.5% 时电阻率与压实度拟合曲线
Fig. 10 Fitting formula of relationship between resistivity and compaction degree in 15.5% moisture content

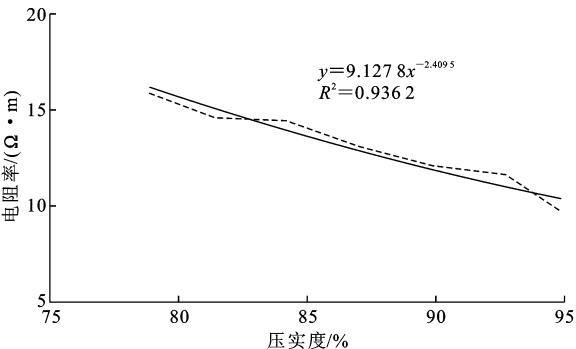


图 11 含水率为 19.1% 时电阻率与压实度拟合曲线
Fig. 11 Fitting formula of relationship between resistivity and compaction degree in 19.1% moisture content

实际应用中需取现场土样进行试验确定其具体值。

为了对式(7)的准确性作进一步验证,将本试验不同含水率下电阻率随压实度变化的数据用式(7)进行电阻率与含水率、压实度关系的三参量拟合。本试验的土孔隙水电阻率 ρ_w 为 $40\ \Omega\cdot\text{m}$ 、土粒密度 ρ_s 为 $2\ 720\ \text{kg}/\text{m}^3$,拟合结果为: $a = 9.768, p = 1.826, n = 5.689$,则有

$$\rho = 0.176\omega^{-1.826}D^{-5.689} \quad (8)$$
$$R^2 = 0.95$$

拟合结果如图 12 所示。拟合结果较理想,验证了理论模型及式(7)的合理性与准确性。

1.3 土壤压实度定量表征方法及流程

本文基于上述研究提出了电阻率法定量评价土壤压实度的方法。在土壤压实过程中,孔隙水电阻率 ρ_w 、土粒密度 ρ_s 、含水率 ω 都是不变的,因此将式(7)简化,给出电阻率法土壤压实度定量评价公式

$$D = c\rho^{-\frac{1}{n}} \quad (9)$$

式中: $c = (\alpha\rho_w^{p+1}\rho_s^{-p}\omega^{-p})^{\frac{1}{n}}$,从土的压实工艺来看,在基本不考虑土壤排水的情况下,压实过程中 c 值可视为不变,这就为利用电阻率评价压实度提供了理

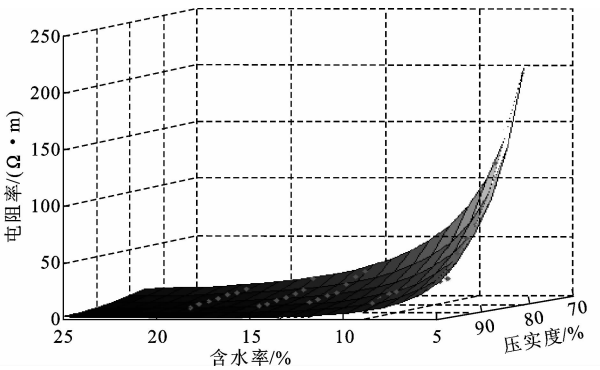


图 12 电阻率与含水率、压实度关系拟合结果
Fig. 12 Fitting result of relationship between resistivity and moisture content, compaction degree

论上的可能性。

由于压实过程中土壤成层效果较好,而且较均匀,电阻率分布不是很复杂,通过电阻率层析成像法得到的电阻率与真实相差不大,为电阻率法测量压实度奠定了基础。电阻率法测定土壤压实度有其特有的优点,它可以大规模地布置测线,采用电阻率层析成像法布置多条测线,通过反演得到整个区域内的电阻率分布,然后通过土壤电阻率与压实度之间的定量关系得到压实度分布。该方法可以在电阻率结果图中看到整个测量区域内的压实情况,可以作为普查的方法评价整个测量区域内压实是否达到设计要求,以及得到测量区域内压实度不满足要求的地方,这是其他方法难以实现的。

由式(9)给出了基于土的电阻率特性的压实度定量评价和表征方法,其基本流程见下页图 13,步骤如下:

(1) 在现场采土样,在室内制备 5 ~ 10 组不同压实度的试样,测得不同压实度对应的电阻率,从而确定式(9)中 c, n 的值;

(2) 进行现场外业工作,在现场根据需要确定高密度法的电极距等,并布置测线,采集视电阻率数据;

(3) 通过对数据进行反演处理得到真实电阻率分布,并通过公式计算得到压实度的具体值;

(4) 在反演结果图中,辨识出压实度不满足要求的区域,对于严重不满足的区域进行处理后,再次评价直至满足要求。

传统的电阻率反演处理是采用基于光滑约束的最小二乘法。该方法存在多解性、不适定性及求解速度慢等问题。而在本方法中,在前期取样待定 c, n 值过程中,土壤电阻率范围可以基本确定。因此本文将电阻率取值范围作为先验信息和约束条件,以不等

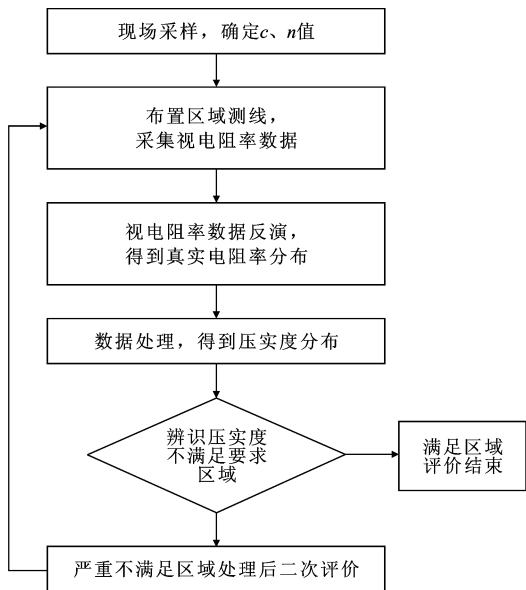


图 13 电阻率法评价压实度流程
Fig. 13 Flow of evaluating compaction degree with the resistivity method

式约束的形式施加到反演中,可有效去除反演过程中的假象,提高反演精度与反演结果准确性。

本文综合不等式约束和传统的光滑约束,使用基于不等式约束与光滑约束的最小二乘法电阻率反演目标函数^[20-21]进行反演

$$\begin{aligned} \Phi &= (\Delta d - A\Delta m)^T (\Delta d - A\Delta m) + \\ &\quad \lambda (C\Delta m)^T (C\Delta m) \\ \text{subject to} \\ \rho_{\min_i} &\leq m_i \leq \rho_{\max_i} \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (10)$$

式中: Φ 为目标函数; A 为敏感度矩阵; Δm 为模型参数增量向量; Δd 为观测数据 d_{obs} 与正演理论值 d_m 的残差向量, d_m 为根据给定的模型参数由数值正演得到的理论观测数据; λ 为拉格朗日常数, λ 的大小决定了光滑约束的权重; C 为光滑度矩阵; m_i 为第 i 个网格电阻率; ρ_{\min_i} 、 ρ_{\max_i} 分别为第 i 个网格的电阻率的下限和上限。

反演目标函数式(10)对应的基于不等式约束和传统光滑约束的反演方程^[21]为

$$\begin{aligned} (A^T A + \lambda C^T C + \mu_k X^{-2} + \mu_k Y^{-2}) \Delta m = \\ A^T \Delta d - \lambda C^T C m + \mu_k (X^{-1} - Y^{-1}) e \end{aligned} \quad (11)$$

式中: m 为模型参数向量; $e = (1, 1, L, 1)^T$; X 、 Y 为对角矩阵, X 的对角线元素为 $m_i - \rho_{\min_i}$ ($i = 1, 2, \dots$), Y 的对角线元素为 $\rho_{\max_i} - m_i$ ($i = 1, 2, \dots$)。

2 试验验证

为对本文方法的适用性与准确性进行验证,设

计了填土压实试验。填土模型为 $9\text{ m} \times 9\text{ m}$,分4层填土,每层填完后用环刀法测试其压实度,压实度分布见图14,压实度自上而下分别为84.2%、82.8%、81.8%、80.9%,填土厚度分别为0.6、0.25、0.4、0.5 m,同时在距左侧起点1.5 m最上面一层,在 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 范围内进行过夯,环刀法测得其压实度为88.7%。

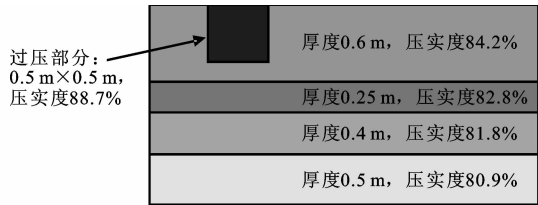


图 14 压实度分布
Fig. 14 Compaction degree distribution

填土材料与试验时采取的土质为同一地区的土壤,因此各项基本参数与试验一致,填土时含水率为5.9%,压实度评价公式为

$$D = 1.614 \, 2\rho^{-0.146 \, 7} \quad (12)$$

电阻率采集时采用施伦贝谢尔装置,电极间距0.2 m,共30个电极,通过反演得到如下页图15所示结果。从图中电阻率分布可以较好地得到分层效果以及压实度异常区域,可以初步将土壤分为4层:第1层平均电阻率为 $94.9\,\Omega \cdot \text{m}$,对应的压实度为82.8%,同时在1.5 m附近存在一个压实度过大的区域(图15标注区域),其平均电阻率为 $65.8\,\Omega \cdot \text{m}$,对应的压实度为87.3%;第2层平均电阻率为 $102.3\,\Omega \cdot \text{m}$,对应的压实度为81.9%;第3层平均电阻率为 $110.5\,\Omega \cdot \text{m}$,对应的压实度为80.9%;第4层平均电阻率为 $119.5\,\Omega \cdot \text{m}$,对应的压实度为80.0%。其与实际压实度(环刀法所测)对比结果见表4。

通过试验可以看到,电阻率法测得的土壤压实度与环刀法测得的压实度误差在2%以内,证明了该方法的有效性。同时可以反映整个测量范围内由浅到深的压实度分布情况。

表 4 试验结果及比较

Tab. 4 Experimental results and comparison

层数	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	电阻率法测得 压实度/%	环刀法测得 压实度/%	误差/%
1(过压部分)	65.8	87.3	88.7	1.58
1	94.9	82.8	84.2	1.66
2	102.3	81.9	82.8	1.09
3	110.5	80.9	81.8	1.10
4	119.5	80.0	80.9	1.11

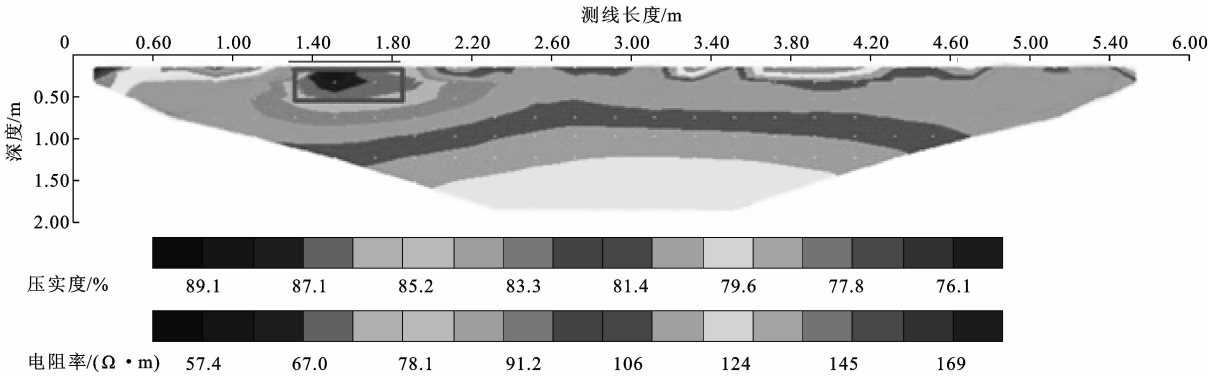


图 15 反演得到的电阻率及推断得到的压实度分布

Fig. 15 Distribution of resistivity by inversion and compaction degree by inference

由图 15 可以看到,在表层土壤存在几处小的异常,这几处电阻率偏高,推断是因为表层水分蒸发(含水率产生变化)以及电极接触的影响,导致电阻率偏大。

3 结 语

(1)在原有电阻率模型的基础上,通过理论推导初步得到了电阻率与含水率、压实度之间的基本关系式,公式中电阻率与压实度的具体表达式为待定,为研究电阻率与含水率、压实度之间的确定性关系计算式奠定了理论基础。

(2)通过系统的室内试验,验证了电阻率随含水率增加呈幂指数减小的规律,发现电阻率随压实度增加呈幂指数减小的规律,并在此基础上最终得到土壤电阻率与含水率、压实度之间的确定性关系表达式,为实现电阻率法定量评价与表征土壤压实度奠定了基础。

(3)基于土壤电阻率与含水率、压实度确定性关系表达式,考虑土壤压实工艺,得到了压实度与电阻率确定性关系公式。利用此公式,在电阻率层析成像与不等式约束反演的基础上,提出了基于电阻率特性的非饱和土的压实度快速定量评价方法及实现流程。需要注意的是本次室内试验只是针对特定一种土,实际工程中土的差异较大,需要针对具体的实际工程确定压实度与电阻率确定性关系公式中的待定土壤参数。

(4)电阻率法测得的土壤压实度与环刀法测得的压实度误差在 2% 以内,可实现较大范围内压实度的快速准确评价表征。下一步工作的重点是进行工程现场实践,对该方法在现场应用中的不足进行改进,以及改进后该方法的推广与工程实践。

参考文献:

References:

[1] 沙庆林. 公路压实与压实标准[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
SHA Qing-lin. Road compaction and compaction standard [M]. Beijing: China Communications Press, 1999. (in Chinese)

[2] JTG E40—2007, 公路土工试验规程[S].
JTG E40—2007, Test methods of soils for highway engineering[S]. (in Chinese)

[3] 王朝东,许锡昌,郭见扬. 核子测试技术在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1900-1902.
WANG Chao-dong, XU Xi-chang, GUO Jian-yang. Application of nuclear measuring technique in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S): 1900-1902. (in Chinese)

[4] 蔡喜高. 核子密度仪在填方场地分层碾压工程中的应用[J]. 土工基础, 1997, 11(4): 52-53.
CAI Xi-gao. Application of nuclear densimeter in layered compaction of a filling project[J]. Soil Engineering and Foundation, 1997, 11(4): 52-53. (in Chinese)

[5] 刘江平,罗银河,何伟兵. 相邻道瞬态瑞雷面波法与压实度检测[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1652-1659.
LIU Jiang-ping, LUO Yin-he, HE Wei-bing. Method of neighboring trace transient Rayleigh wave and its application in compactness inspection [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1652-1659. (in Chinese)

[6] 柴华友,汪江波,周一勤,等. 瑞利波分析方法及应用进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 119-125.

- CHAI Hua-you, WANG Jiang-bo, ZHOU Yi-qin, et al. Progress of Rayleigh wave analysis method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 119-125. (in Chinese)
- [7] Archie G E. The electric resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transaction of American Institute of Mining Metallurgical Engineers, 1942, 146(2): 54-62.
- [8] Keller G V, Frischknecht F C. Electrical methods in geophysical prospecting[M]. New York: Pergamom Press, 1966.
- [9] Mitchell J K, Arulanandan K. Electrical dispersion in relation to soil structure[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(2): 447-472.
- [10] Waxman M H, Smits L J M. 1863-electrical conductivity in oil-bearing shaly sand[J]. Society of Petroleum Engineering Journal, 1968, 8(2): 107-122.
- [11] 董晓强, 白晓红, 吕永康. 水泥固化硫酸钠污染土的电阻率和强度特性研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增2): 186-189.
- DONG Xiao-qiang, BAI Xiao-hong, LU Yong-kang. Study on the electrical resistivity and strength of cemented soil contaminated by sodium sulfate[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S2): 186-189. (in Chinese)
- [12] 刘松玉, 查甫生, 于小军. 土的电阻率室内测试技术研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 216-222.
- LIU Song-yu, ZHA Fu-sheng, YU Xiao-jun. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2): 216-222. (in Chinese)
- [13] 查甫生, 刘松玉. 土的电阻率理论及其应用探讨[J]. 工程勘察, 2006(5): 10-15.
- ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu. Study on the theory of soil electrical resistivity and its application[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(5): 10-15. (in Chinese)
- [14] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 击实黄土的电阻率特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2): 155-158.
- ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Characteristics of electrical resistivity of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 155-158. (in Chinese)
- [15] Sudha K, Israil M, Mittal S, et al. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations[J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 67(1): 74-79.
- [16] Chaplot V, Jewitt G, Lorentz S. Predicting plot-scale water infiltration using the correlation between soil apparent electrical resistivity and various soil properties[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2011, 36(14/15): 1033-1042.
- [17] 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.
- LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83-87. (in Chinese)
- [18] 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.
- GUO Xiu-jun, LIU Tao, JIA Yong-gang, et al. The study of the relationship between engineering mechanical properties and resistivity of soils[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 151-155. (in Chinese)
- [19] 于小军. 电阻率结构模型理论的土力学应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- YU Xiao-jun. On the theory and application of electrical resistivity model in soil mechanics[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [20] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 基于不等式约束的最小二乘法三维电阻率反演及其算法优化[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 260-268.
- LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. 3D electrical resistivity inversion with least-squares method based on inequality constraint and its computation efficiency optimization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 260-268. (in Chinese)
- [21] 刘斌, 李术才, 聂利超, 等. 矿井突水灾变过程电阻率约束反演成像实时监测模拟研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1722-1731.
- LIU Bin, LI Shu-cai, NIE Li-chao, et al. Research on simulation of mine water inrush real-time monitoring of using electrical resistivity constrained inversion imaging method[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1722-1731. (in Chinese)