

# 结构性黄土无侧限抗压强度试验过程的电阻率研究

冯松涛, 刘松玉, 刘志彬

(东南大学交通学院岩土工程研究所, 南京 210096)

**摘要:** 土的电阻率指标与其物理力学性质关系密切, 本文通过在室内对黄土进行无侧限压缩试验同步测量其电阻值, 分析了黄土在压缩变形过程中电阻率指标的变化规律。研究表明: 黄土的电阻率与含水量、抗压强度以及应变密切相关。含水量高, 抗压强度低, 电阻率就小, 尤以掺水泥黄土电阻率随含水量和抗压强度的变化最为典型; 黄土电阻率随着应变的增加而逐渐降低, 当应变增加到一定程度时, 黄土电阻率趋于稳定, 电阻率随应变的变化关系能很好地反映结构性黄土的损伤演化过程; 此外, 黄土的电阻率还与外掺改性材料相关。

**关键词:** 黄土; 结构性; 电阻率; 无侧限抗压强度

**作者简介:** 冯松涛(1982—), 男, 安徽阜阳人, 硕士在读, 主要从事地基处理等研究。E-mail: songtao\_310@163.com。

## 0 引言

黄土是一种多孔隙、弱胶结的第四纪沉积物。颗粒组成以粉粒为主, 具有较强的水敏性, 即天然低湿度下具有明显高强度和低压缩性的黄土, 但在浸水甚至增湿时会出现强度骤降和变形突增的特性。我国是世界上黄土面积分布最广泛的地区, 主要分布在西北、华北平原及东北的南部地区。随着我国西部大开发伟大战略的推进, 在黄土地基上兴建高层建筑、公路、铁路、机场等土工建筑物日益增多, 工程实践对黄土变形预测和控制的要求也越来越高, 由此引发的与黄土有关的岩土工程问题亦愈来愈突出。由于结构性是影响黄土力学行为和变形特性的重要因素, 因此, 如何在黄土基本性质研究中增加对其结构性的考虑, 或建立新的结构性本构模型来描述结构性黄土的受力变形性状, 已成为当今黄土力学研究领域的一大热点。同时, 开展其结构性研究对这类地基土的处理、设计和施工具有重要的工程指导意义<sup>[1~3]</sup>。

电阻率是表征土体导电性的基本参数, 是土的固有物性参数之一。土的电阻率实际上就是当电流垂直通过边长为 1 m 的立方体土样时呈现的

电阻, 单位用  $\Omega \cdot m$  表示。本文拟将电阻率指标应用于黄土的结构性研究, 分析电阻率随黄土结构损伤发展而变化的规律。由于土的电阻率指标获取简便、快捷、连续, 因而将其应用于土的结构损伤研究将从一定程度上克服传统土力学研究方法的弊端, 大大提高土体结构性指标测试的可操作性和一致性, 为黄土结构损伤演化过程的定量描述提供一种新视角。

## 1 试验方案

### 1.1 试验仪器和测试原理

电阻率测试采用东南大学岩土工程研究所自行研制的 ESEU-1 电阻率测试仪<sup>[4]</sup>。依据土的电学模型, 采用交流、低频、二相电极, 通过调节低频率交流电桥的平衡, 测得土的电阻, 进一步计算得到电阻率<sup>[5]</sup>。仪器的有效量程为 10~99 999 $\Omega$ , 其电路原理如图 1 所示。

测出土的电阻  $R_x$ , 由公式(1)得到土的电阻率。

$$R_x = RR_1/R_2; \rho = RS/L \quad (1)$$

式中,  $R_x$  为实测土的电阻;  $\rho$  为实测土的电阻率;  $R$  为可调电阻;  $R_1$ 、 $R_2$  为标准电阻;  $S$  为电极截面

积;  $L$  为电极间距。

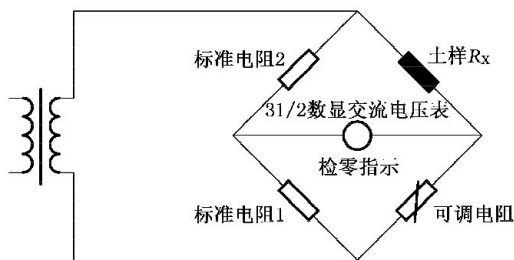


图1 电路原理图

### 1.2 试验内容

为了研究结构性黄土压缩变形过程中电阻率

的变化规律,进行了一系列不同含水量下原状黄土、重塑黄土和掺水泥黄土(2%水泥)的无侧限抗压强度试验。掺入水泥目的是为了增加黄土的结构性,从而考虑原状黄土、重塑黄土和掺水泥黄土的结构性差异。试验内容如表1所示。

### 1.3 试验材料和试样制备

试验用的黄土取自西安市乾景花园,取土深度为4.5~5.0 m。该黄土形成于 $Q_3$ 时期,土呈褐黄色,遇水崩解很快,硬塑状态,含水量较大,孔隙率较大,针状大空隙发育,土质比较均匀、易碎,其基本物理力学指标如表2所示。

表1 试验内容

土 样	测 试 内 容
原状样 (15%、20%、25%、30%、35%) 重塑样 (10%、15%、20%、25%) 掺水泥样 (2%)(20%、25%、30%、35%、40%)	在三轴仪上进行土样在不同含水量下的无侧限抗压强度试验,并通过改装仪器,同步测量土样压缩变形过程中的竖向电阻率的变化

表2 黄土的基本物理力学性质

天然含水率 (%)	密度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙比	比重	液限 (%)	塑限 (%)	最优含水率 (%)	最大干密度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )	湿陷系数
22.5	1.56	1.15	2.71	36.5	21.8	16.8	1.80	0.162

原状样取回后在雾化室内养护一年时间,开始室内制样工作。重塑土制样时先将黄土粉碎,过0.5 mm筛,称取一定质量黄土,加水搅拌,制成淤泥。然后放入准备的 $\phi 10.0 \text{ cm} \times 20.0 \text{ cm}$  PVC管中,在荷载50 kPa作用下排水固结,待两周固结完成后取出制样。在黄土中掺入占质量比2%的水泥,与黄土搅拌均匀,制样过程同重塑土,固结时间为一周。根据试验的目的,制成试样的尺寸为 $\phi 39.1 \text{ cm} \times 80.0 \text{ mm}$ 。为了保证实验结果的可比性,试样制作完成后,进行密度检验,体积相同而重量相差较大的土样则弃之不用,重新制作新的土样。不同含水量黄土试样的配置是采用水膜迁移法<sup>[6]</sup>完成的,根据设定的试验含水量及土样的实际含水量,计算得到需要添加或减少水的质量,每次配水以后至少养护24 h。

为了能在土样压缩变形过程中对土样的电阻率进行稳定量测,试验中将应变速率控制在一定范围内(本次试验速率为0.055 mm/min),则土样在压缩变形过程中某一时刻所测得的电阻率可视为基本不变。温度对土电阻率也有很大影响,温度升高导致离子活动性的上升,从而致使土电阻率下降。研究表明,土体在某一温度 $T$ 下的电阻率 $\rho_T$

与其18℃下的电阻率 $\rho_{18}$ 有如下公式<sup>[7]</sup>:

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18)} \quad (2)$$

式中, $\rho_{18}$ 为修正后土样电阻率( $\Omega \cdot m$ ); $\rho_T$ 为实测土样电阻率( $\Omega \cdot m$ ); $T$ 为温度(℃); $\alpha$ 为修正系数,取 $0.025^\circ C^{-1}$ 。

## 2 试验结果分析

### 2.1 黄土压缩过程的应力应变关系

由图2中的3组应力应变曲线特征可以看出:①随着黄土含水量由低到高的变化,应力应变曲线逐渐由强软化型过渡到弱软化型,以原状黄土最为明显。虽然峰值强度由于含水量、结构性及外掺剂等因素而各不相同,但每种土样试验结束时其残余强度相差不多。②原状黄土结构强度达到峰值时的应变较小,约为1.0%~2.0%左右,且随含水量的应变变化很小。重塑黄土应力应变曲线没有明显的峰值强度,因其结构性遭到破坏。掺水泥黄土达到峰值强度时对应的应变受含水量的变化影响较大,且达到峰值强度以后,黄土的强

度显著降低,这种变形特性,从一定程度上体现了掺入水泥对黄土结构性的影响。③黄土在荷载作用下发生压缩变形的过程,可以视为黄土由原状土到损伤土的演化过程,宏观上表现为应力随变形而降低<sup>[8,9]</sup>。黄土压缩变形过程大体可分为3个阶段<sup>[10]</sup>:第一阶段为弹性变形阶段,黄土结构基本保持完好,没有或只有少量结构破损;第二阶段为结构开始逐渐破损阶段,颗粒之间产生滑移,伴随孔隙结构的塌陷;第三阶段剪切带已经形成,土的性质接近重塑土,颗粒间的滑移成为变形的的主要原因。本文认为,黄土的损伤过程主要发生于第二阶段,可以把软化型应力-应变曲线的峰值点所对应的应力或应变值近似看作黄土损伤

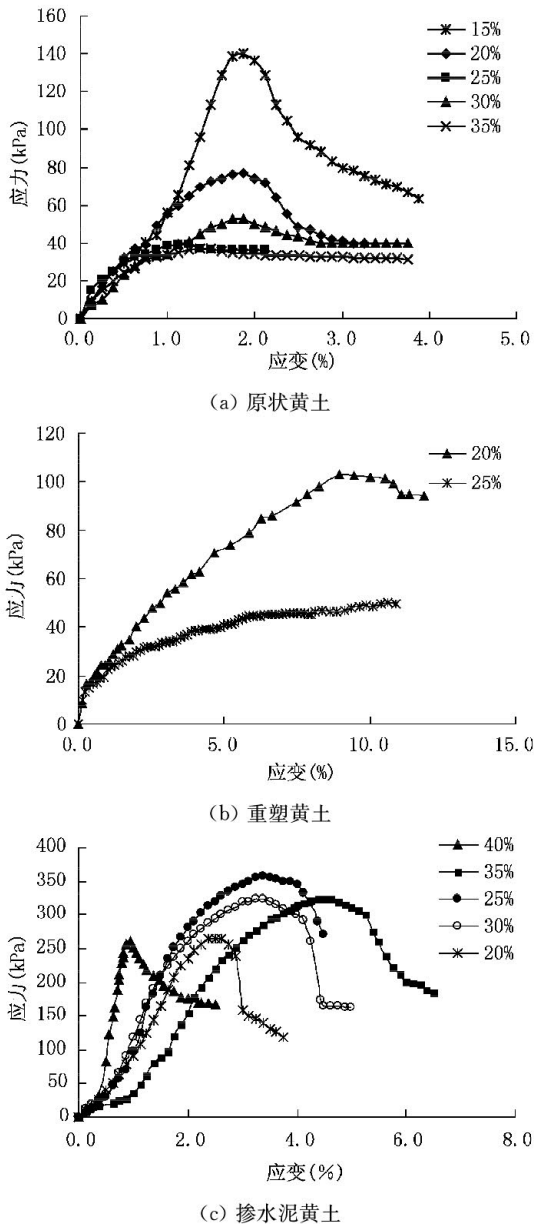


图2 黄土的应力-应变关系

累积由量变到质变,黄土结构强度迅速丧失的应力门槛值 $\sigma_c$ (抗压强度)或应变门槛值。黄土的性质接近重塑土,颗粒间的滑移成为变形的主要原因。本文认为,黄土的损伤过程主要发生于第二阶段,可以把软化型应力-应变曲线的峰值点所对应的应力或应变值近似看作黄土损伤累积由量变到质变,黄土结构强度迅速丧失的应力门槛值 $\sigma_c$ (抗压强度)或应变门槛值。

## 2.2 黄土电阻率与含水量的关系

土的介电性质主要受毛细水和弱结合水影响,湿土电阻率大约为 $10 \Omega \cdot m$ ,干土电阻率大约为 $10^5 \Omega \cdot m$ ,这是因为孔隙水导电性比固体、气体高。当含水量增大时,自由非结合水填充了土粒间的孔隙时,土导电性显著增大,电阻率显著降低。试验结果如图3所示:原状黄土、重塑黄土和掺水泥黄土含水量与电阻率均有很好的负相关关系,即黄土电阻率随含水量的增大而降低。当含水量增加到一定值时,黄土的电阻率随含水量的增加而减小的幅度有所降低。同一含水量下的电阻率大小依次为:掺水泥黄土>原状黄土>重塑黄土,而同一含水量下原状黄土与重塑黄土的电阻率相差较小,而与掺水泥黄土相差较大。这是因为水泥较土的导电性差,而且,当掺入一定量的水泥后,粒间孔隙相对较大,土的结构性增强,孔隙部分被气体充填,故电阻率较大。

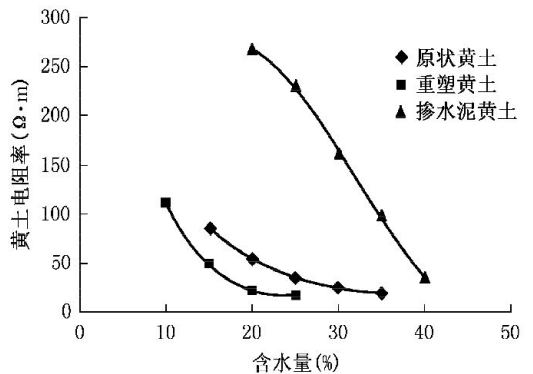
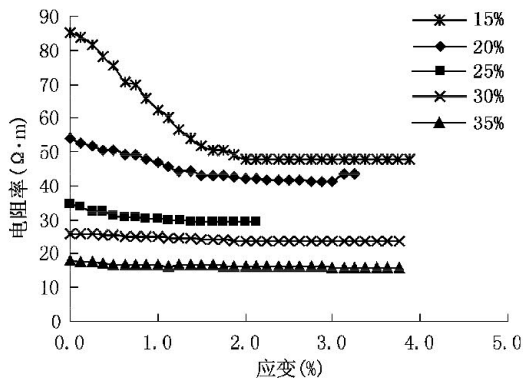


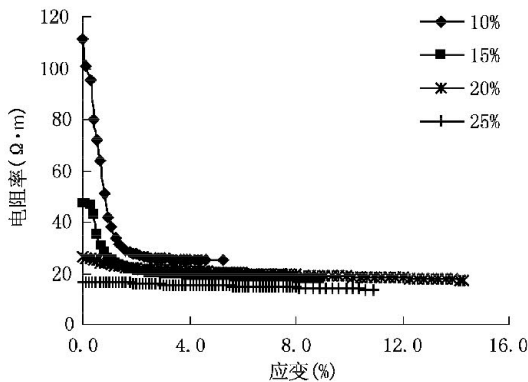
图3 黄土电阻率与含水量的关系

## 2.3 黄土电阻率与应变的关系

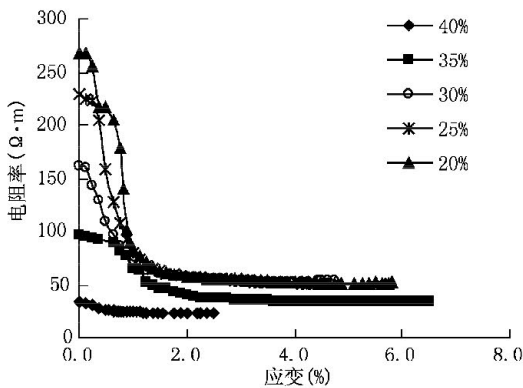
图4所示,黄土试样在无侧限抗压强度试验过程中,其电阻率随着应变的增加而逐渐降低,当应变增加到一定程度时(约为 $1.0\% \sim 2.0\%$ )黄土电阻率趋于稳定。对应黄土的应力-应变关系曲线可知,当黄土电阻率趋于稳定时,黄土的应力达到或接近最大值,土样已经或接近破坏。



(a) 原状黄土



(b) 重塑黄土



(c) 掺水泥黄土

图 4 黄土电阻率与应变的关系

图 4(a) 图中可以看出,当电阻率趋于稳定时,原状黄土的电阻率稳定值随着含水量的不同相差较大;而图 4(b)、图 4(c) 中重塑和掺水泥黄土电阻率稳定值受含水量的变化影响较小,与图 2(b)、图 2(c) 残余强度受含水量的影响较小对应。由图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 可知,当含水量较低(低于 20%)且应变较小时,黄土电阻率随应变的增加变化速率较大,尤以掺水泥黄土电阻率变化最为典型。

结合图 2 和图 4 可以看出,电阻率随应变而

显著减小的过程对应图 2 应力-应变曲线的第一阶段,因为随着应变的增加,土的孔隙率减小,导电性增加,电阻率减小<sup>[11]</sup>。当黄土处于结构开始破损阶段,损伤累积由量变到质变过程中,电阻率缓慢减小,直到土体达到峰值强度之后,剪切带已形成,此时土体产生滑移,电阻率趋于稳定。

黄土电阻率和应变的关系能够很好地反映在压缩变形过程中黄土损伤的三个阶段,与应力-应变曲线描述黄土的损伤阶段相对应。因此,可以把电阻率和应力门槛值  $\sigma_c$  相联系来反映黄土的结构损伤过程,为黄土结构损伤演化过程的定量描述提供一种新视角。

### 2.4 黄土电阻率与无侧限抗压强度的关系

湿陷性黄土在自然沉积过程中所形成的典型大孔隙弱胶结结构,使其较相同密度和含水量的重塑黄土具有更强的结构性。黄土的抗压强度与其含水量、孔隙结构以及胶结状态等有关<sup>[12]</sup>。原状黄土的结构性强于重塑黄土,但试验结果显示原状黄土强度低于重塑黄土,可能是由于黄土在雾化室养护时间过长,土的结构性发生劣化。

由图 5 可知:①黄土电阻率与无侧限抗压强度有很好的正相关关系,即黄土的电阻率随无侧限抗压强度的增大而增大;②掺水泥黄土电阻率随抗压强度的变化较原状和重塑黄土明显,因为掺入水泥增加了黄土的结构性。黄土电阻率随抗压强度变化曲线的斜率以掺水泥黄土最大,原状黄土次之,重塑黄土最小,这也从一定意义上说明结构性对电阻率的影响。

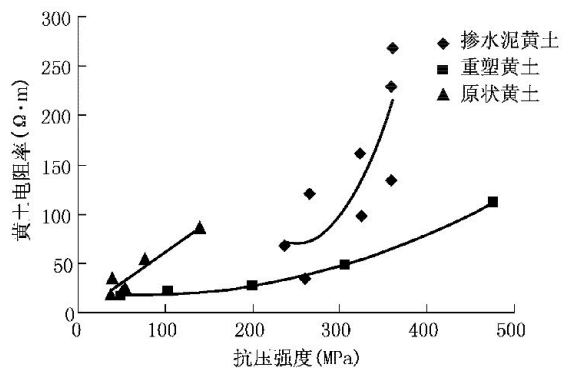


图 5 黄土电阻率与无侧限抗压强度关系

## 3 结论

本文主要进行了西安黄土的无侧限压缩试

验,探讨了试验过程中黄土电阻率的变化规律,得出了黄土电阻率同含水量、应变以及无侧限抗压强度间的关系。主要结论如下:

(1) 黄土的应力-应变曲线随着含水量从低到高的变化由强软化型过渡到弱软化型,以原状黄土较为明显,且峰值强度由于含水量、结构性及外掺剂等因素而各不相同,但每种土样试验结束时其残余强度相差不多。

(2) 黄土电阻率随含水量的增加而减小,当含水量增加到一定值时,电阻率随含水量的增加而减小的幅度降低,且以掺水泥黄土电阻率随含水量变化曲线的斜率最大,从一定程度说明外掺改性材料对黄土电阻率的影响。

(3) 黄土电阻率随着应变的增加而逐渐降低,当应变增加到一定程度时黄土电阻率趋于稳定。当黄土电阻率趋于稳定时,黄土的应力达到或接近最大值,土样已经或接近破坏。黄土电阻率和应变的关系能够很好地反映在压缩变形过程中黄土损伤的3个阶段,为用电阻率指标来反映黄土结构损伤的演化过程提供一种新途径。

(4) 黄土电阻率与无侧限抗压强度有很好的正相关关系,其关系曲线的斜率以掺水泥黄土最大,原状黄土次之,重塑黄土最小,这也从一定意义上说明结构性对黄土电阻率的影响。

以上结论可以看出,电阻率能很好地反映黄土在荷载作用下的结构损伤演化的规律。尽管用电阻率指标描述黄土的损伤变化过程尚不成熟,但电阻率法因其参数测试方便、快捷、连续、经济,随着相关研究的不断深入,必将有着广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报,1999,21(6):651~656.
- [2] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报,2001,23(1):3~13.
- [3] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社,1996.
- [4] 刘松玉,于小军. 交流低频土电阻率测试仪:中国,ZL03222401.X[P]. 2004.
- [5] 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,2004:25~29.
- [6] 林斌. 考虑损伤效应的黄土流变模型研究[D]. 西安:长安大学,2005:9~10.
- [7] Keller G, Frischknecht F. Electrical methods in geophysical prospecting [M]. New York: Pergamom Press, 1966.
- [8] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学,1980,(12):1203~1208.
- [9] 沈珠江,陈铁林. 岩土破损力学:基本概念、目标和任务[A]. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京:中国科学技术出版社,2002:9~12.
- [10] 邵生俊,李彦兴,周飞飞. 湿陷性黄土结构损伤演化特性[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4161~4165.
- [11] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The microstructures of clay given by measurements[J]. Engineering Geology, 1999,54:43~53.
- [12] 谢定义,齐吉琳,张震中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报,2000,33(4):35~41.