



# 水泥土的电阻率特性与应用探讨

刘松玉, 韩立华, 杜延军

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 利用低频交流电阻测试仪, 研究了现场水泥土样和室内制备的水泥土样的电阻率与其相关参数的关系。结果表明, 水泥土的电阻率随着龄期、水泥掺入比的增大而增大; 随着水泥土含水率、饱和度、似水灰比的增大而减小。研究证明, 水泥土电阻率与水泥土抗压强度和标贯击数存在着很好的相关性, 对电阻率法应用于水泥土桩质量的无损检测进行了探讨。

**关键词:** 水泥土; 电阻率; 无侧限抗压强度; 检测; 强度预测。

**中图分类号:** TU44

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2006)11-1921-06

**作者简介:** 刘松玉(1963-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事特殊地基处理等方面的研究工作。

## Experimental study on electrical resistivity of soil-cement

LIU Song-yu, HAN Li-hua, DU Yan-jun

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Recently in China, soil-cement has been widely used to improve the soft ground in the highway construction engineering. In the literature studies were mainly on the mechanical performance of the soil-cement, while its electrical resistivity were not well addressed. The electrical resistivity of the remolded soil-cement and the in-situ soil-cement column were investigated. It was shown that the electrical resistivity of the soil-cement increased with the increase of the cement-mixing ratio and curing time, and decreased with the increase of the water content, degree of saturation and water-cement ratio. A simple equation was proposed to predict the electrical resistivity of soil-cement under the condition of the specified curing time and water-cement ratio. It was found that the electrical resistivity had a good relationship with the unconfined compression strength and blow count of SPT. It was expected that the electrical resistivity method could be widely used for checking/controlling the quality of soil-cement in practice.

**Key words:** soil-cement; electrical resistivity; unconfined compression strength; test; strength prediction

## 0 前言

近年来水泥作为固化剂来改良软土地基已在高速公路建设中普遍地采用。该方法通过粉喷或深层搅拌法, 把水泥掺入到地基和软土中, 使水泥与地基土发生物理、化学反应, 从而使地基土得到固化。水泥土加固效果的检测也越来越受到重视, 目前比较常用的水泥土桩质量检测方法主要有<sup>[1]</sup>静载试验、抽芯检验、标准贯入试验法、小应变动力测试法等。

利用电阻率法研究土和岩石的工程性状近年来得到了重视。如 William 和 Thomas<sup>[2]</sup>应用二维电阻率方法对破碎结晶岩体进行了评价; Gao 等<sup>[3]</sup>对釜山粘土进行了电阻率研究, 并与取自其它地区的土样电阻率进行了比较; 刘松玉等<sup>[4]</sup>试验研究了水泥土电阻率与龄期、无侧限抗压强度和水泥掺入比的关系; 缪林昌, 刘松玉等<sup>[5-6]</sup>对水泥土电阻率的工程应用进行了探讨, 并把电阻率法应用于水泥土粉喷桩的检测中; 于小军、

刘松玉<sup>[7]</sup>探讨了电阻率测试技术在水泥土深层搅拌法工程中的应用。然而这些成果尚未系统研究影响和控制水泥土电阻率的主要因素。

本文通过室内和现场试验, 系统地研究了影响水泥土电阻率的因素; 提出了水泥土电阻率的简单预测公式; 探讨了水泥土电阻率与水泥土无侧限抗压强度的关系, 为应用电阻率法对水泥土搅拌桩进行检测提供依据。

## 1 电阻率法的原理与测试方法

### 1.1 电阻率法的基本原理

电阻率是表征物质导电性的基本参数, 某种物质的电阻率实际上就是当电流垂直通过由该物质所组成

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50478073)

收稿日期: 2005-09-02

的边长为 1 m 的立方体时而呈现的电阻。显然物质的电阻率值越低,其导电性就越好,反之,其导电性就越差。根据 Komine<sup>[8]</sup>土的电阻率计算模型,近似地把土层模型看成是由两相介质组成的,即由土颗粒骨架和水所构成(如图 1),电阻率表达式为<sup>[8]</sup>

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{1}{1+e} + \frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{e}{1+e}}, \quad (1)$$

式中,  $\rho$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_w$  分别为土、土颗粒和孔隙水的电阻率,  $e$  为土的孔隙比。

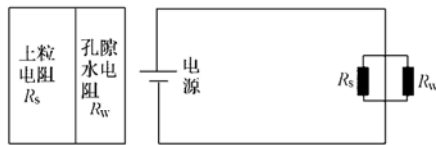


图 1 土的电阻率计算模型

Fig. 1 A model for calculating electrical resistivity of soil

水泥粉喷搅拌后,天然状态的土变成水泥土,由于土粒(固相)是不可压缩的,水泥与软土搅拌处理后,水泥所占的体积是原来土层孔隙体积的一部分,水泥搅拌后孔隙比减小。水泥土的电阻率由下列模型(如图 2)和公式计算<sup>[8]</sup>:

$$\rho_{sg} = \frac{1}{\frac{1-\sigma}{\rho_{sgs}} + \frac{\sigma}{\rho_{sgp}}}, \quad (2)$$

$$\rho_{sgs} = \frac{1}{\frac{1}{(1+e)(1-\frac{a_w}{100})^2} \cdot \frac{1}{\rho_s} + (\frac{1}{1-\frac{a_w}{100}} - \frac{1}{(1+e)(1-\frac{a_w}{100})^2}) \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{a_w}{100} \cdot \rho_g} \quad (\text{串联}), \quad (3)$$

$$\rho_{sgp} = \frac{1}{\frac{1}{1+e} \cdot \frac{1}{\rho_s} + (\frac{e}{1+e} \cdot \frac{a_w}{100}) \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{a_w}{100} \cdot \frac{1}{\rho_g}} \quad (\text{并联}), \quad (4)$$

$$a_w = \frac{n \cdot \alpha}{100 \cdot 100} \times 100. \quad (5)$$

式中  $\rho_{sg}$ 、 $\rho_{sgs}$  和  $\rho_{sgp}$  为水泥土的电阻率、串联模型水泥土的电阻率和并联模型水泥土的电阻率;  $\sigma$  为水泥土中并联模型所占的比例;  $\rho_s$ 、 $\rho_w$ 、 $\rho_g$  为土颗粒、孔隙水和水泥粉体的电阻率;  $a_w$  为水泥掺入比;  $e$  为孔隙比;  $n$  为孔隙率;  $\alpha$  为水泥粉所占孔隙中的体积比。

由式(1)可以看出,组份不同的土体( $\rho_s$ 不同)具有不同的电阻率,即使组份相同的土层,也会由于孔隙比不同及孔隙水的成分和含量的不同而使电阻率在很大的范围内变化。由式(3)、(4)可以看出,水泥土中由于水泥掺入比的不同,将会改变土颗粒、孔隙水和水泥粉体电阻率对水泥土电阻率的影响程度。宏观上表现为水泥掺入比不同,水泥土电阻率不同。

结合式(1)、(3)和(4)可知,孔隙比通过影响土颗粒电阻率和孔隙水电阻率在土体电阻率中所占比例而对土体电阻率产生影响,一般来说,结构致密的土层孔隙率较小,即含水率也较低,电阻率较高;结构疏松的土,孔隙率较大,含水率高,电阻率较低<sup>[1]</sup>。

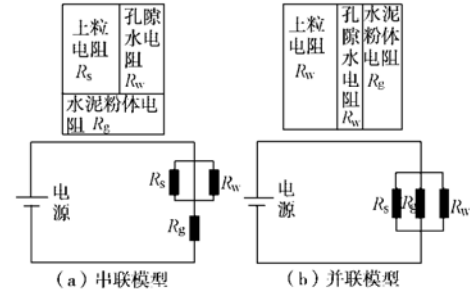


图 2 水泥土电阻率计算模型

Fig. 2 A model for calculating electrical resistivity of soil-cement

## 1.2 电阻率测试方法简介

目前国际上通用的电阻率测试方法主要有:

### (1) Wenner 方法<sup>[9]</sup>

室内试验和现场测试所用的主要方法就是 Wenner 方法(DC 法)<sup>[9]</sup>,见图 3。它是一种四相电极测试方法,电流  $I$  (mA) 通过外部电极测出,诱导电压由内部电极测出,则半空间电阻率  $\rho = 2\pi aV/I$ 。

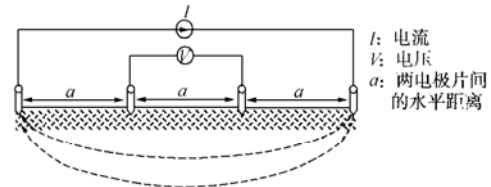


图 3 Wenner 法示意图

Fig. 3 Scheme of Wenner method

### (2) 二相电极法

二相电极法如图 4 所示。分为两大类:一类用两相电极法测得土样电阻  $R$ , 由公式  $\rho = R \frac{S}{l}$ , 求得土样电阻率。 $\rho$  为土样电阻率( $\Omega \cdot m$ ),  $R$  为土样电阻( $\Omega$ ),  $S$  为电流通过土样的横截面面积( $m^2$ ),  $l$  为电极片距离(m)。另一类用高阻抗电压表测得土样两端电位差,用电流表测得回路电流强度,再由公式  $\rho = \frac{\Delta U}{I} \frac{S}{l}$ , 计算获得土样电阻率。 $\rho$  为土样电阻率( $\Omega \cdot m$ ),  $\Delta U$  为电位差(v),  $I$  为电流强度,  $S$  为电流通过土样的横截面面积( $m^2$ ),  $l$  为电极片距离(m)<sup>[10]</sup>。

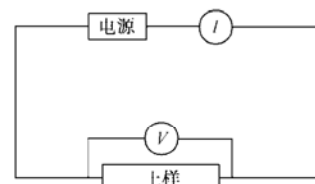


图 4 二相电极法示意图

Fig. 4 Scheme of two-electrode method

四相电极法的测试装置用于常规土工试验中, 如压缩试验、三轴试验, 要比二相测法复杂。在装置土样, 安插其中的金属环或探针、铜棒时, 会不可避免地扰动土样。东南大学岩土所研制的低频交流电阻测试仪, 应用交流二相电极测得土样电阻  $R$ , 再由公式  $\rho = R \frac{S}{l}$ , 求得土样电阻率。 $\rho$  为土样电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ ),  $R$  为土样电阻 ( $\Omega$ ),  $S$  为电流通过土样的横截面面积 ( $\text{m}^2$ ),  $l$  为电极片距离 ( $\text{m}$ )。仪器原理如图 5 所示。

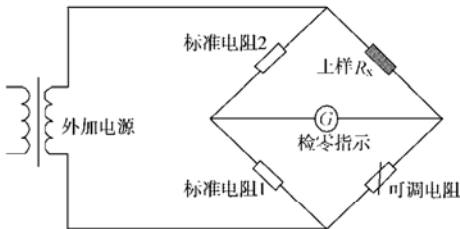


图 5 电桥原理示意图

Fig. 5 Scheme of an electrical bridge method

测试所用电极为铜电极, 长、宽、高分别为 70、70 和 2 mm, 测试时将电极片放在制备好的水泥土样上, 试验所用水泥土样规格为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。为了使电极片 and 水泥土样充分接触, 在上部电极片上加 2 MPa 的压强(预备试验证实 2 MPa 效果为佳)。之后调节电桥平衡, 测出水泥土电阻值。

2 试验方法和结果讨论

2.1 试验区域简介

试验区位于连徐高速公路连云港市郊区。该路段在地貌上属海积平原, 地势平坦。根据工程地质钻探显示, 试验区土体主要分为三个工程地质层: ① 高液限粘土, 黄褐色, 软塑, 其上部含植物根系, 局部含少量腐植质, 钻孔揭露土层厚度 2.3~2.7 m; ② 淤泥~淤泥质高液限粘土, 夹粉细砂层, 灰色—青灰色, 在粉细砂夹层中含生物碎屑, 局部含大量腐植物, 钻孔揭露厚度为 4 m; ③ 淤泥质高液限粘土与细砂互层, 青灰色, 软塑, 深度 8.0~9.0 m 处为细砂—中砂层, 富集以贝壳类生物为主的生物碎屑, 钻探揭示第三层厚 2.5~3 m。土层的岩土工程性质指标见表 1。

2.2 试验结果和分析

(1) 水泥掺入比对水泥土电阻率的影响

表 1 试验段土层的岩土工程性质指标

Table 1 Geotechnical engineering parameters of test area

| 土层名称          | 深度/m    | 含水率<br>$w/\%$ | 密度 $\rho$<br>$/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 液限<br>$w_L/\%$ | 塑限<br>$w_p/\%$ | 体积压缩系数<br>$m_v/(\text{MPa}^{-1})$ | 压缩模量<br>$E_s/\text{MPa}$ | 固结系数 $C_v/$<br>$(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 不排水强度<br>$c_u/\text{kPa}$ | 比贯入阻<br>力 $p_s/\text{MPa}$ | 标准贯<br>入击数<br>$N/\text{次}$ |
|---------------|---------|---------------|-------------------------------------------------|----------------|----------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 高液限粘土         | 2.3~2.7 | 38.7          | 1.74                                            | 62.6           | 24.8           | 0.24                              | 4.1                      | $1.93 \times 10^{-3}$                              | 39.0                      | 0.915                      | 3.0                        |
| 淤泥—淤泥质高液限粘土   | 6.3~6.6 | 59.4          | 1.73                                            | 66.0           | 28.0           | 0.69                              | 1.4                      | $1.85 \times 10^{-3}$                              | 7.3                       | 0.636                      | 2.2                        |
| 淤泥质高液限粘土与细砂互层 | 9.0~9.4 | 42.2          | 1.70                                            | 53.6           | 21.6           | 0.38                              | 2.6                      | $2.14 \times 10^{-3}$                              | 17.4                      | 2.448                      | 6.2                        |

在连徐高速公路软土地基的水泥粉喷桩施工试验区取 2~3、4~5、8~9 m 三个深度处的扰动土, 放入搅拌器中搅拌 30 min, 试验所用水泥为普通硅酸盐水泥, 标号为 42.5, 分别制备 8%、10%、12%、15% 四个掺入比的水泥土样, 在铁制模具中放置 24 h 后脱模, 送养护室养护。养护室的温度为  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , 相对湿度大于 90%。养护 10、20 和 34 d 进行水泥土电阻率测试。水泥掺入比  $a_w$  定义为掺加水泥的重量占所加固软土重量的百分比。本文的似水灰比  $w/c$  定义为干土中掺加水的质量与掺加水泥的质量之比, 它是水泥土中水的总质量与掺加水泥的质量之比, 试验结果如图 6 所示。

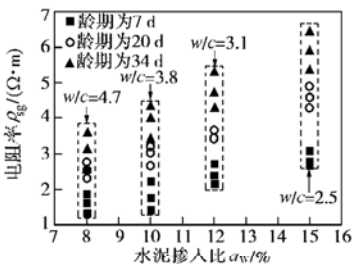


图 6 水泥土电阻率与水泥掺入比的关系

Fig. 6 Relationship between electrical resistivity of soil-cement and admixture ratio of cement

从上图可知, 电阻率随水泥掺入比增大而增大。这是因为当水泥掺入比加大时, 水泥粉体的胶结作用增强, 更多土颗粒胶结在一起, 使土颗粒聚集体变大, 孔隙减少; 一部分水泥粉体固化后充填于孔隙中, 使土体孔隙比进一步减小。由于水泥粉体的加入, 会与孔隙水发生物理、化学反应, 使水泥土的含水率减少。水泥土导电性由土颗粒、水泥粉体和孔隙水电导性组成, 孔隙水的导电性要远远高于土颗粒和水泥粉体的导电性。所以水泥土的导电性将由含水率和孔隙的连通情况所决定。当水泥粉体所占份量增大, 孔隙比减小, 连通性变差, 含水率减少时, 水泥土导电性减弱, 电阻率则升高。

(2) 含水率对水泥土电阻率的影响

McNeill<sup>[11]</sup>非饱和土电阻率  $\rho$  与饱和土电阻率  $\rho_{\text{sat}}$  的关系如下:

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{sat}}} = S_r^{-B}, \quad (6)$$

式中,  $S_r$  为饱和度,  $B$  为试验参数。以式 (6) 可以看出, 土电阻率随其饱和度的增加而降低。室内试验测得水泥土电阻率与含水率关系如图 7 所示。为了更充分地研究电阻率与饱和度的关系, 取连徐高速公路软土, 制备水泥掺入比为 8%, 扩大似水灰比范围 1~6 的不同饱和度的水泥土样, 养护方法同上, 电阻率与饱和度的关系试验结果见图 8。

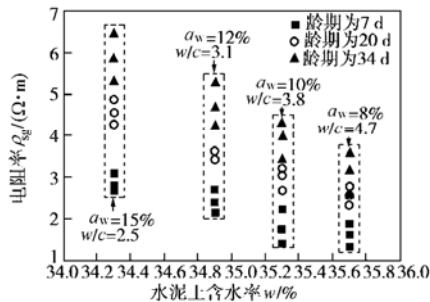


图 7 水泥土电阻率与含水率的关系

Fig. 7 Relationship between water content and electrical resistivity of soil-cement

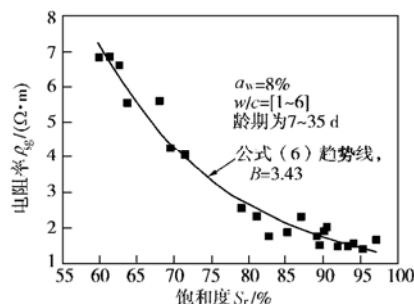


图 8 水泥土电阻率与饱和度的关系

Fig. 8 Relationship between degree of saturation and electrical resistivity of soil-cement

水泥土的电阻率是由土颗粒、水泥粉体和孔隙水的电阻率组成, 而孔隙水的导电性要远远高于土颗粒和水泥粉体的导电性。当水泥土含水率增大时, 水泥土的导电性增强, 孔隙水对水泥土电阻率的影响加大, 水泥土颗粒对电阻率的影响则相对减弱, 导致水泥土电阻率下降。饱和度对电阻率的影响可归结为含水率对电阻率的影响, 饱和度越高, 含水率越大, 则电阻率越低。

### (3) 似水灰比对水泥土电阻率的影响

Horpibulsuk<sup>[12]</sup>对不同龄期时水泥土无侧限抗压强度和似水灰比的关系进行了研究, 指出在特定龄期下, 水泥土无侧限抗压强度与似水灰比呈负指数相关, 即似水灰比升高, 无侧限抗压强度呈指数下降。同样似水灰比也会影响水泥土电阻率。实测连徐高速公路水

泥土电阻率和似水灰比的关系见图 9。由图 9 可知, 电阻率亦随似水灰比呈指数形式下降, 各龄期电阻率与似水灰比的指数回归公式为:

$$\text{龄期 7 d: } \rho_{\text{sg}} = 5.7e^{(-0.3w/c)}, R^2 = 0.9; \quad (7)$$

$$\text{龄期 20 d: } \rho_{\text{sg}} = 0.85e^{(-0.3w/c)}, R^2 = 0.9; \quad (8)$$

$$\text{龄期 34 d: } \rho_{\text{sg}} = 12.1e^{(-0.3w/c)}, R^2 = 0.7. \quad (9)$$

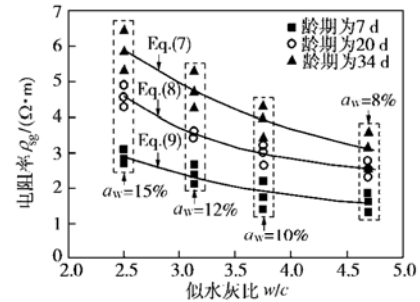


图 9 似水灰比对水泥土电阻率的影响

Fig. 9 Effect of water-cement ratio on electrical resistivity of soil-cement

似水灰比对电阻率的影响是水泥掺入比和含水率二者对电阻率影响的综合结果, 加入的水越多, 水泥土的含水率就越大, 似水灰比越大, 电阻率越小。水泥掺入比越大, 似水灰比越小, 电阻率越大。

### (4) 龄期对水泥土电阻率的影响

随着龄期的增长, 水泥粉体的胶结作用逐渐增强, 土颗粒聚集体变大, 孔隙减少, 水泥土强度升高。试验结果 (图 10) 显示, 随着龄期的增长, 水泥土的电阻率增大, 电阻率随着龄期增长而增大, 这是随着龄期的增长, 土颗粒之间联结越来越紧密所致。

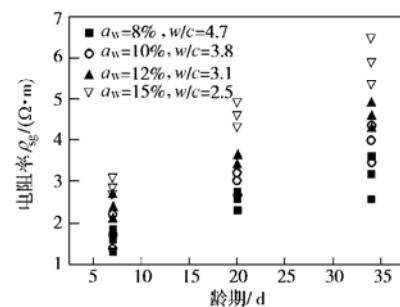


图 10 水泥土电阻率与龄期的关系

Fig. 10 Relationship between curing time and electrical resistivity of soil-cement

在电阻率与水泥土强度呈线性关系<sup>[4-5]</sup>的基础上, 假定水泥土的电阻率与似水灰比 ( $w/c$ ) 和龄期有如下的关系:

$$\frac{\rho_{\text{sg}(w/c)_D}}{\rho_{\text{sg}(w/c)_{34}}} = A^{[(w/c)_{34} - (w/c)_D]} (B + C \ln D). \quad (10)$$

式中  $\rho_{\text{sg}(w/c)_D}$ 、 $\rho_{\text{sg}(w/c)_{34}}$  分别为龄期  $D$  和 34 d 水泥土

电阻率值;  $(w/c)_{34}$ 、 $(w/c)_D$  分别为龄期 34 d 和  $D$  的水泥土似水灰比;  $D$  为龄期;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数。

联立公式 (7)、(8)、(9), 有

$$\frac{\rho_{sg}(w/c)_7}{\rho_{sg}(w/c)_{34}} = 0.47e^{0.3[(w/c)_{34} - (w/c)_7]} \quad (11)$$

$$\frac{\rho_{sg}(w/c)_{20}}{\rho_{sg}(w/c)_{34}} = 0.7e^{0.3[(w/c)_{34} - (w/c)_{20}]} \quad (12)$$

由公式 (10)、(11) 和 (12) 得出  $A$ 、 $B$  和  $C$  的值分别为 1.35、0.042 和 0.22, 则公式 (10) 为

$$\frac{\rho_{(w/c)_D}}{\rho_{(w/c)_{34}}} = 1.35^{[(w/c)_{34} - (w/c)_D]} (0.042 + 0.22 \ln D) \quad (13)$$

公式 (13) 即为水泥土电阻率与水泥土似水灰比和龄期的关系式, 此关系式与试验值的对比见图 11。

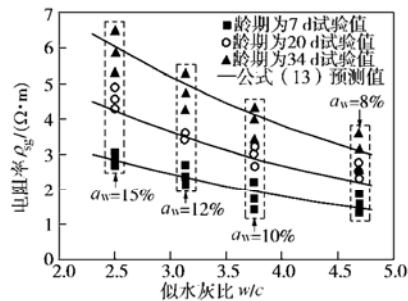


图 11 电阻率试验值与理论预测值对比图

Fig. 11 Comparison between experimental and predicted value

对比图 (9)、(11) 可见, 电阻率试验测定值和公式预测曲线是非常接近的, 说明公式的准确性很高。式 (13) 描述了水泥土电阻率与似水灰比和龄期之间的关系, 在测得龄期为 34 d 的水泥土的电阻率的情况下, 就可以对任意龄期和似水灰比水泥土的电阻率进行预测, 十分方便。

#### (5) 水泥土电阻率与强度的关系

无侧限抗压强度是水泥土的一个重要工程指标, 它随着龄期、水泥掺入比的增高而增高, 随着似水灰比、含水率的升高而降低<sup>[13]</sup>, 通过上面的试验研究得知, 水泥土电阻率与各因素的变化关系和无侧限抗压强度与各因素的变化关系是一致的; 连徐公路水泥土试样的抗压强度和电阻率关系室内测试结果见图 12, 说明水泥土的电阻率和无侧限抗压强度存在着良好的相关关系, 水泥土的电阻率随着无侧限抗压强度呈线性增长关系, 关系式为  $q_u = 286\rho_{sg} - 334$ , 因此, 水泥土电阻率可以用来反映其抗压强度。

此方法在现场试验中进行了进一步验证, 对连徐公路试验段水泥粉喷桩进行了电阻率、无侧限抗压强度和标贯击数的测试, 试验段水泥土水泥掺入比  $a_w$  为 11%, 似水灰比  $w/c$  为 2.5, 龄期为 28 d。其中标贯击数为原位试验测试结果, 无侧限抗压强度和电阻率

为取现场芯样室内进行测试的结果。取样方法为钻探取芯, 用岩芯管连续取芯, 取芯率 > 80%, 对芯样进行观察描述, 判断其搅拌均匀性, 每 1~2 m 采取原状芯样进行室内试验。结果见图 13。

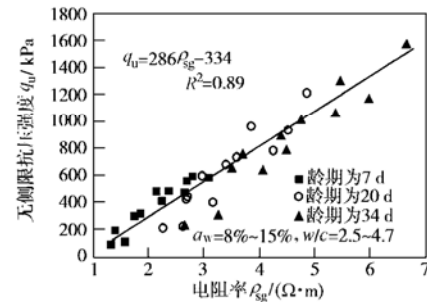


图 12 抗压强度与电阻率的关系

Fig. 12 Relationship between electrical resistivity and unconfined compression strength of soil-cement

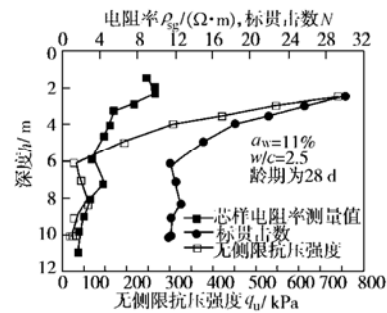


图 13 电阻率与标贯击数、无侧限抗压强度对比图

Fig. 13 Comparison between electrical resistivity and blow count of SPT and unconfined compression strength of soil-cement

各深度水泥土电阻率与标贯击数和无侧限抗压强度的关系见图 14 和 15。

可见电阻率与现场标贯击数和无侧限抗压强度有较好的相关关系, 随着水泥土标贯击数减少, 无侧限抗压强度减小, 水泥土的电阻率随之降低。值得一提的是在水泥土强度比较低时, 由于扰动作用的影响比较大, 对电阻率法的检测结果会造成一定的影响。所以通过电阻率的测定可以预计水泥土标贯击数和无侧限抗压强度的变化。

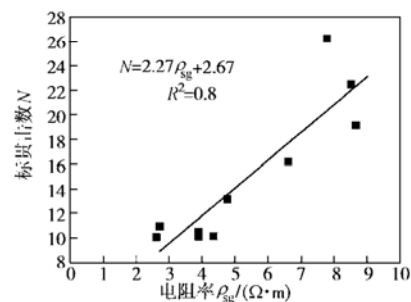


图 14 电阻率与标贯击数的关系

Fig. 14 Relationship between electrical resistivity and blow count of SPT of soil-cement

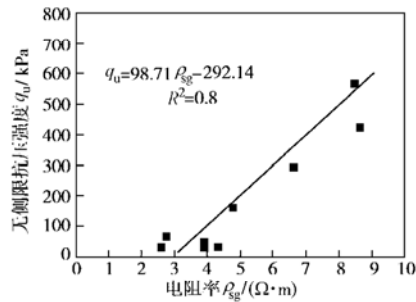


图 15 电阻率与无侧限抗压强度的关系

Fig. 15 Relationship between electrical resistivity and unconfined compression strength of soil-cement

### 3 结 论

(1) 水泥土的电阻率随着水泥土含水率、饱和度和似水灰比的增加而减小,随着龄期和水泥掺入量的增加而增大。

(2) 当实测了龄期 34 d 的水泥土电阻率的情况下,可以对任意龄期、任意似水灰比的水泥土电阻率应用公式(13)进行预测。

(3) 水泥土电阻率与水泥土抗压强度、标贯击数有良好的相关性,通过测定水泥土电阻率可以反映水泥土桩成桩质量以及水泥土的强度等指标。

#### 参考文献:

- [1] LIU Song-yu, ROMAN D Hryciw. Evaluation and quality control of dry-Jet-mixed clay soil-cement columns by standard penetration test[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2003, **1849**:47 - 52.
- [2] WILLIAM J Seaton, THOMAS J Burbey. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, **51**:21 - 41.
- [3] GIAO P H, CHUNG S G, KIM D Y, TANAKA H. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits[J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, **52**:157 - 175..
- [4] LIU S Y, YU X J. The electrical resistivity characteristics of the cemented soil[C]// Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Lowland Technology. 2000:185 - 190
- [5] 缪林昌, 刘松玉, 严明良. 水泥土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(1): 126 - 130.(MIAO Lin-chang, LIU Song-yu, YAN Ming-liang. Research on electrical resistivity feature cement-soil and it's application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2001, **20**(1):126 - 130.)
- [6] 缪林昌, 刘松玉, 阎长虹. 电阻率法在粉喷桩质量检测中的应用[J]. 建筑结构, 2001, **31**(5): 63 - 65.(MIAO Lin-chang, LIU Song-yu, YAN Chang-hong. Application of the electrical resistivity method for examining the construction quality of DJM piles[J]. Building Structure, 2001, **31**(5):63 - 65.)
- [7] 于小军, 刘松玉. 电阻率测试技术在水泥土深层搅拌法工程中的应用研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(4): 592 - 597.(YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Research on application of electrical resistivity method to cement deep mixing pile engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(4):592 - 597.)
- [8] KOMINE H. Estimation of chemical grouted soil by electrical resistivity[J]. Ground Improvement, 1997(1):101 - 113.
- [9] ELLAN J, DELANEY P, PEAPPLES R. Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated-fine-grained soil[J]. Cold Region Science and Technology, 2001, **32**:107 - 119.
- [10] 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.(YU Xiao-jun. On the theory and application of electrical resistivity model in soil mechanics[D]. Nanjing: Southeast University, 2004:25 - 29.)
- [11] MCNEILL J. Use of electromagnetic methods for groundwater studies[J]. Geotech and Envir Geophys, 1990(1):191 - 218.
- [12] HORPIBULSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Assessment of strength development in cement admixed high water content clays with Abram's law as a basis[J]. Geotechnique, 2003, **53**(4):439 - 444.
- [13] 顾明芬. 基于电阻率特征的水泥土损伤模型初步研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.(GU Ming-fen. Research on the cemented soil damage model base on the electrical resistance characteristics[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.)