

文章编号: 1000-7598-(2003) 04-0592-06

电阻率测试技术在水泥土深层 搅拌法工程中的应用研究

于小军, 刘松玉

(东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 通过水泥土电阻率试验研究分析, 可知水泥土电阻率与无侧限抗压强度、水泥掺入比、龄期成正相关, 即随着无侧限抗压强度、水泥掺入比、龄期的增大而增大; 水泥土电阻率与含水量负相关, 即随着含水量增大而降低; 影响水泥土电阻率的主要因素依次为含盐量、水泥掺入比、天然含水量、粉煤灰含量、石灰含量。进行了水泥土电阻率和喷粉搅拌桩桩身抗压强度、芯样力学性状和标贯击数的对比研究以及野外电测井、电测深剖面勘探, 探索了电阻率测试技术在水泥土深层搅拌法工程中的应用。

关 键 词: 水泥土; 电阻率; 正交分析; 水泥搅拌桩

中图分类号: TU4 **文献标识码:** A

Research on application of electrical resistivity method to cement deep mixing pile engineering

YU Xiao-jun, LIU Son-yu

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

Abstract: The main electrical resistivity properties of the cement soil are given by laboratory and field tests. Research shows that the cement soil with higher unconfined compression strength, higher cement content, longer time and lower water content, has higher electrical resistivity. In addition, The orthogonality test results indicate that factors influencing on the electrical resistivity of the cement soil are salt content, cement content, water content, flyash content, lime content in succession. By comparing field electrical resistivity test with standard penetration test, pile boiling observatin, it can be concluded that the electrical resistivity test is available for checking engineering quality of the cement deep mixing pile.

Key words: cement-soil; electrical resistivity; orthogonality test; cement deep mixing pile

1 引 言

水泥土深层搅拌法作为一种地基加固新技术, 近几年来在公路工程、建筑、堤坝等领域得到了广泛应用。尽管国内外有人对水泥土的特性及其应用方面也进行了研究。但水泥土桩在设计、施工、质量检测方面仍存在诸多问题未能很好地解决, 影响了软基处理效果和工程的经济性。

土-水交互作用是在多介质能场(热能场、电能场、磁能场)下进行的, 电能又是所有能场的核心, 因而土-水系统的工程特性与其电特性密切相关。以电法勘探为原理的电阻率测试技术在岩土工

程中的应用具有巨大的潜力。

通过对水泥土电阻率特性、电阻率测试技术检测喷粉搅拌桩工程质量等方面展开深入、系统地研究, 对提高此地基加固技术的应用效果、扩大其应用范围、保证其工程质量等方面具有着重要的理论意义和工程实用意义。同时, 应用无损、经济、有效、快捷的电阻率测试技术还将有着重大的经济意义和社会意义。

2 水泥土电阻率测试基本原理

水泥土电阻率计算模型见图 1。电阻率计算公式^[1, 2]有:

收稿日期: 2002-05-04

基金项目: 教育部博士生基金项目(No. 2001028618)资助。

作者简介: 于小军, 女, 1969 年生, 东南大学岩土工程专业博士生, 主要从事桩基承载力及变形计算、桩基检测、高速公路软基处理等方面的研究。

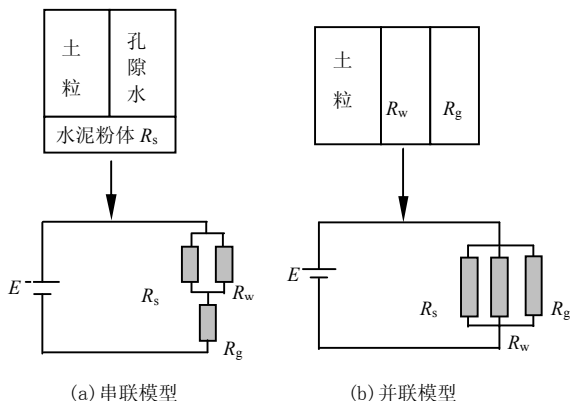


图1 水泥土的电阻率计算模型

Fig. 1 Electrical resistivity model of cement-soil

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

$$\rho_{sgs} = \frac{1}{A \frac{1}{\rho_s} + \left(\frac{1}{1 - \frac{\lambda}{100}} - A \right) \frac{1}{\rho_w}} + \frac{\lambda}{100} \rho_g$$

其中 $A = \frac{1}{(1+e) \left(1 - \frac{\lambda}{100} \right)^2}$

$$\rho_{sgp} = \frac{1}{\frac{1}{1+e} \frac{1}{\rho_s} + \left(\frac{e}{e+1} - \frac{\lambda}{100} \right) \frac{1}{\rho_w} + \frac{\lambda}{100} \frac{1}{\rho_g}} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{n}{100} \frac{\alpha}{100} \times 100$$

式中 ρ_{sg} 为水泥土的电阻率； ρ_{sgs} 为串联模型水泥土的电阻率； ρ_{sgp} 为并联水泥土的电阻率； σ 为水泥土中并联模型所占的比例； ρ_g 为水泥的电阻率； λ 为水泥掺合比； n 为孔隙率； α 为水泥粉所占孔隙中体积比。

水泥土电阻率测试仪器，采用高精度电阻箱，同时，备有直流电源及微安表等设备对土样进行电阻率测试。电阻率测试电路见图2。

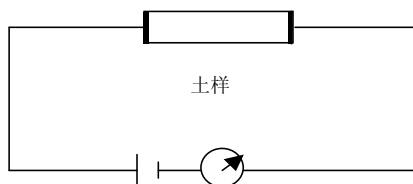


图2 电阻率法测试示意图

Fig. 2 The detecting diagram of electrical resistivity

3 水泥土电阻率试验研究

为研究水泥土电阻率特性的影响规律，进行了大量不同水泥掺入比、不同含水量、不同含盐量、不同石灰含量、不同粉煤灰含量、不同龄期的水泥土电阻率与无侧限抗压强度的室内对比测试。为了研究影响水泥土电阻率的主要因素和次要因素，进行了正交试验分析。

3.1 试验材料 取自于南京南湖小区，位于地表下2 m左右处，为淤泥质粘土，灰黑色，流塑。土层主要物理力学性质指标、土样的主要化学成分、有机质及含量分别见表1，表2。普通硅酸盐水泥；粉煤灰各项指标见表3。表3中颗粒单位为 μm 。

表1 土层主要物理力学性质指标

含水量	重度	孔隙比	液性指数	塑性指数	压缩模量	压缩系数	抗剪强度	比贯入
/ %	/ $\text{kN} \cdot \text{m}^3$	e	I_L	I_P	E_{s1-2} / MPa	a_{1-2} / MPa^{-1}	C_k / kPa ϕ / (°)	阻力 ρ_s
56.5	16.5	1.53	1.28	23.1	2.00	1.42	5.0	4.9
								0.37

表2 土样的主要化学成分、有机质及含量

指标	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量	有机质
含量 / %	59.68	6.28	17.16	0.86	1.21	2.42	6.28	3.06	1.18	1.75

表3 粉煤灰指标

颗粒分布 / %								比表	SO ₂	灼
								面积		减
								/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}$	/ %	/ %
>250	75	45	30	20	10	4	<4	9.3	39.1	16.3
								5.8	8.2	2.0
								7.9	1.4	25.2
								0.21	4.44	
检测内容		S ₂ O ₂		Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃				
含量 / %		49.24		9.79		28.09				

3.2 试样制备

按配方的配比配制水泥浆液，然后加入对应的天然土样人工揉和均匀后，用70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm规格的试模，采用手工压注成型，静置24 h后脱模编号，后送到养护室养护。

对所制备的土样养护7 d，14 d，28 d后均进行

了电阻率和无侧限抗压强度的测试。

3.1.5 试验方案

(1) 对比试验 对比试验方案见表 4。

表 4 试样制备表

Table 4 The preparation of sample

序号	水泥掺入比 $\alpha_w / \%$	天然土含水量 $\omega / \%$	粉煤灰含量 / %	含盐量 / %
1	16	30, 40, 50, 60, 70, 80	—	—
2	10, 12, 14, 16, 18, 20	60	—	—
3	10	30, 40, 50, 60, 70, 80	10	—
4	15	60	10, 15, 20, 25	—
5	10, 12, 14, 16, 18, 20	60	—	10
6	16	60	—	5, 10, 15

(2) 正交试验方案 正交试验设计可以把试验安排和数据处理两者紧密地结合起来, 不仅能减少试验次数提供丰富的试验数据, 而且还能得到全面、正确的结论。

为研究影响水泥土电阻率的主要因素和次要因素, 设计了如下几种试验方案:

① 水泥土中天然含水量、水泥掺入比、粉煤灰掺入量均发生变化;

② 水泥土中天然含水量、石灰含量、粉煤灰掺入量均发生变化;

③ 水泥土中天然含水量、水泥掺入比、水中含盐量均发生变化。

由于开展全面试验的工作量太大, 故试验方法采用正交设计, 对以上 3 种不同试验方案设计其因素水平表, 见表 5, 进行正交测试、分析 (考虑交互作用)。

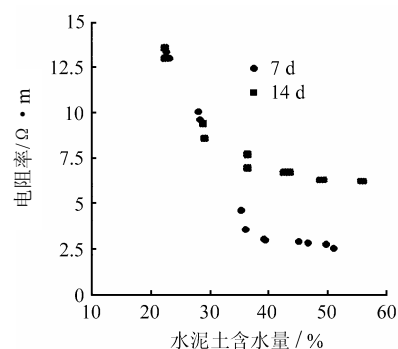
表 5 试验方案因素水平表

Table 5 Factor level table of test scheme 1

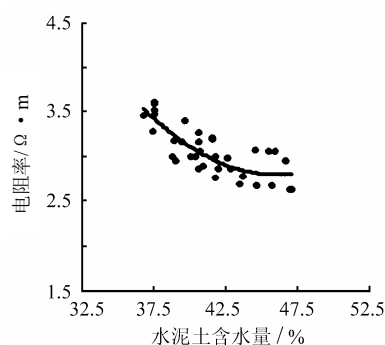
方案	因素	天然含水量 / %	水泥掺入比 / %	粉煤灰掺入量 / %	石灰含量 / %	盐含量 / %
1	水平 1	45	5	10	/	/
	水平 2	60	10	15	/	/
	水平 3	75	15	20	/	/
2	水平 1	45	/	10	5	/
	水平 2	60	/	15	10	/
	水平 3	75	/	20	15	/
3	水平 1	45	10	/	/	10
	水平 2	60	15	/	/	15

注: (盐含量为盐重与水重之比)

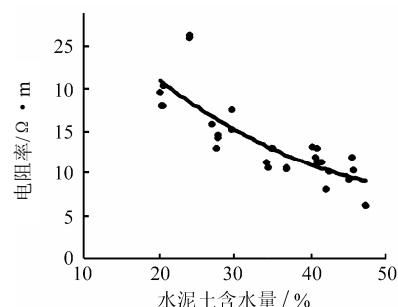
体高。因此, 对于一个电阻率较小的土而言, 电流绝大部分通过孔隙水。当含水量增大, 自由非结合水填充了土粒间的孔隙时, 土导电性显著增大, 电阻率显著降低。当含水量较小时, 水泥拌合困难, 粘粒间的孔隙相对较大, 孔隙大部分被气体充填, 导电性差, 电阻率较大。试验结果如图 3 示。试验显示: 水泥土含水量与水泥土电阻率均有很好的负相关关系, 即水泥土电阻率随水泥土含水量增大而降低。



(水泥掺入比 16%, 天然含水量 40%, 50%, 60%, 70%, 80%)



(天然含水量 60%, 水泥掺入比 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20%)



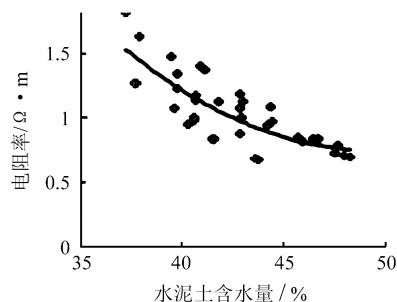
(水泥掺入比 10%, 天然含水量 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 粉煤灰含量 10%)

3.2 测试结果分析

3.2.1 对比试验分析

(1) 水泥土电阻率与含水量的关系

土的介电性质主要受弱结合水和毛细水影响。干土电阻率大约为 $10^5 \Omega \cdot m$, 湿土电阻率大约为 $10 \Omega \cdot m$, 这是因为自然孔隙水导电性比固体、气



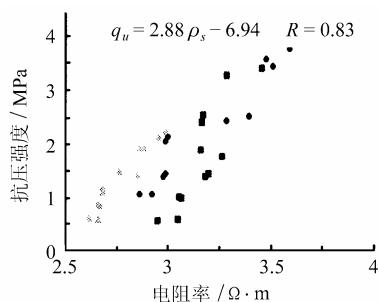
(天然含水量 60%, 水泥掺入比 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20%, 含盐量 10%)

图 3 水泥土含水量与电阻率关系图

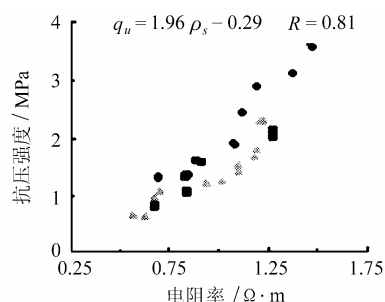
Fig. 3 Relationship between water content and electrical resistivity

(2) 水泥土电阻率与无侧限抗压强度关系

水泥土抗压强度大, 水化程度相对大, 水化硅酸钙凝胶体较多, 水化产物充填粘土颗粒间的孔隙的程度则较大, 孔隙度较小, 结构相对密实, 因而导电性低, 电阻率高。试验结果如图 4 示。试验显示: 水泥土电阻率与无侧限抗压强度均有很好的正相关关系, 即水泥土电阻率随无侧限抗压强度增大而增大。



(天然含水量 60%, 水泥掺入比 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20%)



(天然含水量 60%, 水泥掺入比 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20%, 掺盐量 10%)

图 4 抗压强度与电阻率的关系图

Fig. 4 Relationship between unconfined compression strength and electrical resistivity

图 5 为现场抽取的芯样的电阻率与无侧限抗压强度的关系图, 两者同样有很好的正相关关系。图 6 为电阻率与无侧限抗压强度的关系汇总图。(水泥土掺入盐; 水泥土; 水泥土掺入粉煤灰)。

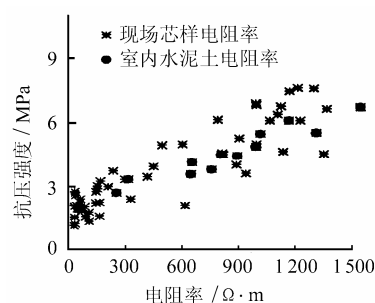


图 5 抗压强度与电阻率的关系图

Fig. 5 Relationship between unconfined compression strength and electrical resistivity 595

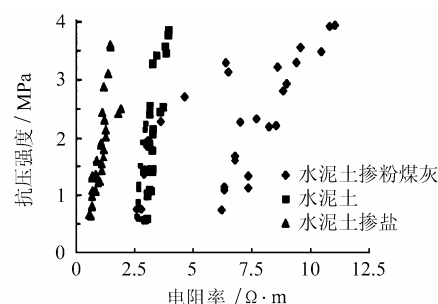


图 6 抗压强度与电阻率关系汇总图

Fig. 6 Collecting relationship between unconfined compression strength and electrical resistivity

(3) 水泥土电阻率与水泥掺入比关系

水泥掺入比增大, 水泥的水化程度高, 水泥与粘土的反应增强, 水化硅酸钙胶体增多。随着水泥量的增加, 水泥水化产物充填粘土颗粒间的孔隙程度也随之增大, 结构密实, 因而导电性降低, 电阻率升高。试验结果如图 7, 8 示。试验显示: 水泥土电阻率与水泥掺入比有很好的正相关关系, 即水泥土电阻率随水泥掺入比增大而增大。图 9 为不同龄期下水泥土电阻率与水泥掺入比的关系图; 图 8 为不同水泥掺入比下水泥土电阻率与无侧限抗压强度的关系图, 从图可见, 随着水泥掺入比的增加, 其电阻率与抗压强度均增加。

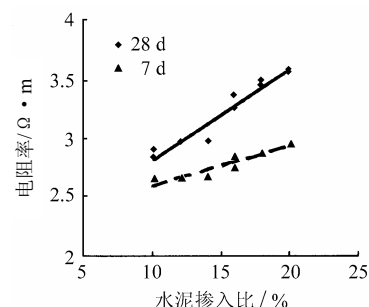


图 7 水泥掺入比与电阻率的关系图

Fig. 7 Relationship between cement content and electrical

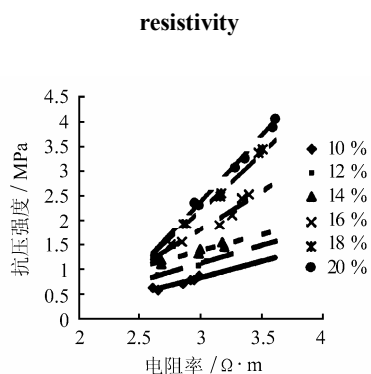


图 8 抗压强度与电阻率的关系图

Fig. 8 Relationship between unconfined compression strength and electrical resistivity

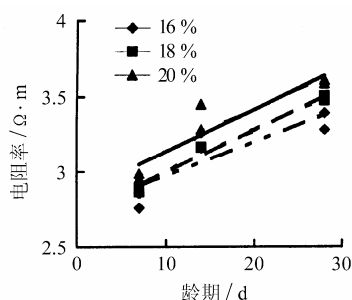


图 9 龄期与电阻率的关系图

Fig. 9 Relationship between age and electrical resistivity

(4) 水泥土电阻率与龄期关系

随着时间延长,水泥土水化反应继续,水化产物增多,团粒化作用增强,结构密实,因而导电性降低,电阻率升高。试验结果如图 7, 9 示。试验显示:水泥土电阻率与龄期呈正相关,即水泥土电阻率随龄期增大而增大。

3.2.2 正交试验分析

综合方案 1 当水泥土天然含水量、水泥掺入比、粉煤灰含量发生变化时,对水泥土电阻率影响最大的因素为水泥掺入比;对水泥土电阻率影响最小的因素为粉煤灰含量。其中天然含水量与水泥掺入比的交互作用对电阻率的影响也较大。

综合方案 2 当水泥土天然含水量、石灰含量、粉煤灰含量发生变化时,对水泥土电阻率影响最大的因素为天然含水量;对水泥土电阻率影响最小的因素为石灰含量。其中石灰含量与粉煤灰、天然含水量与粉煤灰的交互作用对电阻率的影响也较大。

综合方案 3 当水泥土天然含水量、水泥掺入比、含盐量发生变化时,对水泥土电阻率影响最大的因素为含盐量;含盐量与天然含水量、含盐量与水泥掺入比的交互作用对水泥土电阻率影响也较大;而天然含水量、水泥掺入比的因素水平变化对

电阻率的影响相对较小。

综述 3 个正交方案,对水泥土电阻率影响的主要因素依次为含盐量、水泥掺入比、天然含水量、粉煤灰含量、石灰含量。

4 电阻率法在粉喷桩工程中的应用初探

电阻率是反应水泥土固有特性的物理参数。为了研究水泥土电阻率和岩土力学参数(桩身抗压强度、标贯击数等)的相互关系,进行了水泥土芯样电阻率和喷粉搅拌桩桩身抗压强度和喷粉搅拌桩标贯击数的对比研究。本次研究水泥土芯样取自连徐高速公路 A7 标段 K30+821~K31+034.5。研究表明水泥土芯样电阻率和桩身抗压强度、标贯击数均存在较好的相关关系,且水泥土电阻率与芯样状态也较好相关。现场采用电阻率测井与喷粉搅拌桩桩身抗压强度和喷粉搅拌桩标贯击数测试进行对比分析,另在粉喷桩施工工段垂直公路的中轴线作电测深剖面,由各剖面的各电测深曲线再作出等电阻率断面图,来探索电阻率法在粉喷桩工程质量检测中的应用,结果表明,采用电阻率法来检测喷粉搅拌桩桩身及复合地基是一种快速、有效的新手段。

4.1 芯样电阻率和桩身抗压强度、标贯击数关系

水泥土芯样电阻率、抗压强度、标贯测试结果的回归分析结果见图 10, 11。

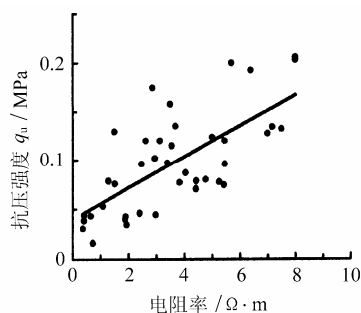


图 10 芯样抗压强度与电阻率的关系图

Fig. 10 Relationship between unconfined compression strength and electrical resistivity of core sample

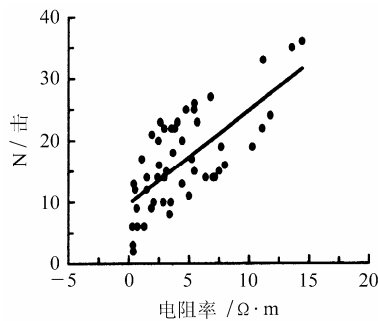


图 11 标贯击数与电阻率的关系图
Fig. 11 Relationship between the number of SPT and electrical resistivity of core sample

4.2 电阻率与芯样状态关系

通过现场电阻率测井与现场取芯进行对比分析, 可得坚硬、较硬的水泥土电阻率较高, 可塑、软塑的水泥土电阻率较低。具体而言, 电阻率大于 $3 \Omega \cdot \text{m}$ 的土样较硬或坚硬状, 电阻率小于 $3 \Omega \cdot \text{m}$ 且大于 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 的土样为硬塑状, 电阻率小于 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 的土样为可塑至软塑状。

4.3 芯样电阻率、抗压强度、标贯击数与深度关系

通过对现场和室内测试结果的分析可得芯样抗压强度与深度的关系 (如图 12), 芯样电阻率与深度的关系 (图 13), 标贯击数与深度的关系 (图 14)。同时, 还可得到芯样的抗压强度, 标贯击数, 电阻率随深度变化的统计表 (见表 6)。由三个剖面图可显见, $0 \sim 4 \text{ m}$ 深度段粉喷桩桩体为较硬、坚硬, 芯样的电阻率较高, 相应的抗压强度、标贯击数也较

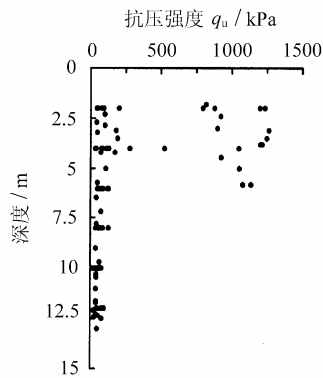


图 12 抗压强度与深度关系图
Fig. 12 Relationship between unconfined compression strength and depth

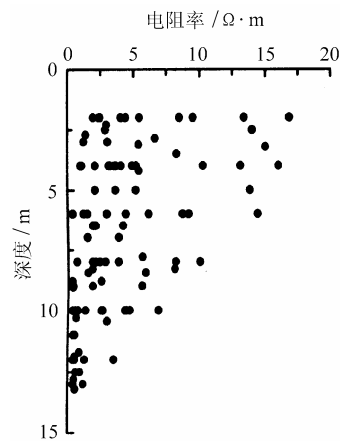


图 13 电阻率与深度关系图
Fig. 13 Relationship between electrical resistivity and depth

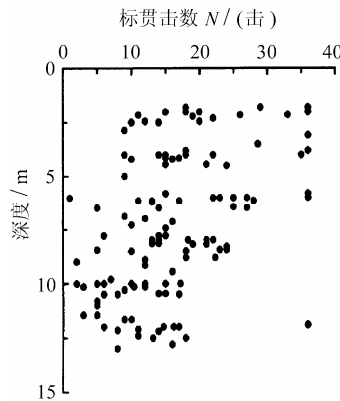


图 14 标贯击数与深度关系图
Fig. 14 Relationship between the number of SPT and depth

表 6 芯样抗压强度、标贯击数、电阻率
随深度变化的统计表

Table 6 Unconfined compression strength, the number of SPT and electrical resistivity of core sample at different depths

深度 / m	0~4	4~6	6~9	9 m 以下
电阻率平均值 / $\Omega \cdot \text{m}$	9.3	7.43	4.42	1.99
标贯击数平均值 / 击	23	18	16	8
抗压强度平均值 / kPa	610.0	428.3	136.3	88.5

大, 土层强度得到明显提高; 4 m 以下的桩体硬塑、可塑和软塑均有, 电阻率较低, 相应的抗压强度、标贯击数也较小。

4.4 电阻率法勘测工作

为探索电阻率法在粉喷桩工程质量检测中的应用, 进行了连徐高速公路 A7 标段喷粉桩的工程质量电阻率法野外勘测工作。野外电法勘测工作采用二种方法: ①对喷粉桩取样钻孔进行了视电阻率测井。电测井的目的是了解各个取样的喷粉桩由桩头

到桩尾在各个深度上的视电阻率变化,以便和取样所测定的真电阻率以及有关参数进行对比分析,从而,找出相关关系。②在施工工段垂直公路的中轴线作电测深剖面。由剖面的各电测深点曲线再作出等 ρ_s 断面。电测深剖面的目的是从总体上了解喷粉桩施工后在该断面上由浅至深的电阻率变化情况,从而,了解并找出该断面由浅到深相应的物理力学参数的变化,以达到检测某一区域加固效果的目的。野外勘测结果表明,用电测井可以检测个别桩的状态,用电测深剖面法可以检测某一区域加固效果^[3]。

参 考 文 献

- [1] Dr. Akio. Sakurai. Quantitative evaluation of ground improvement by chemical grouting using electrical resistivity (part II)—Evaluation of improved region by resistivity tomography--Special Document for IERE Members[M]. JAPEN: IERE Council, 1994.
- [2] 于小军. 水泥土电阻率特性及其工程应用研究[硕士学位论文 D]. 南京: 东南大学, 2001. 25—30.
- [3] 刘松玉 等. 水泥系深层搅拌法加固软土地基设计理论与质量控制研究报告[R]. 南京: 东南大学岩土工程研究所, 1999. 190—198.