

水泥土结构特性的定量化研究

顾明芬, 刘松玉, 洪振舜, 于小军

(东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096)

摘要: 采用电阻率测试技术, 通过测试水泥土在强度增长以及压缩过程中的竖向、水平向电阻, 探求水泥土在强度增长过程和压缩过程中电阻率特性参数——平均结构因子 F 、平均形状因子 f 以及各向异性系数 A 变化的基本规律, 分析了 F, f, A 与水泥土物理力学特性之间的关系, 证实了这3个参数能对土的结构性进行定量分析。

关键词: 水泥土; 强度; 电阻率; 平均结构因子; 平均形状因子; 各向异性系数

中图分类号: TU 472 **文献标识码:** A

Quantifying research on structural characteristics of cemented soils

GU Ming-fen, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun, YU Xiao-jun

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

Abstract: The electrical resistivity testing technology is presented to research the structural characteristics of cemented soil quantitatively. To describe the change of the resistance, three electrical resistivity indices: average structure factor F , average shape factor f and anisotropy factor A ; are introduced. With the measure of vertical and horizontal resistance during the compression test, the electrical resistivity indices of cemented soil are concluded. Then, the relationship between the electrical resistivity indices and physico-mechanical characters is analyzed. The results show that it is effective to research the soil structure by the electrical resistivity indices.

Key words: cemented soil; strength; electrical resistivity; average structure factor; average shape factor; anisotropy factor

1 前言

在我国沿海地区、内河两岸和湖泊地区广泛分布着软土, 在这些地区修筑公路或建筑物均需对软土进行加固处理。水泥搅拌桩是目前比较常用的方法之一, 该法处理软基具有施工速度快、无公害、处理效果好、工后沉降小等优点, 因而在公路和建筑物软基处理中得到了广泛应用, 但是, 目前对水泥土特性的研究与认识还不够, 因此在水泥土搅拌桩的设计、施工、质量检测等方面仍存在诸多问题, 尤其是对水泥土微观结构的研究还不够深入, 这些都严重影响了水泥土搅拌桩的发展与应用。本文采用电阻率测试技术, 对水泥土的微结构进行了定量研究, 全面、合理的反映了水泥土在强度增长过程和压缩过程中其内部结构的变化情况, 使水泥土多样的微观结构与其所表现出的宏观力学效应得到了有机的统一。

2 试验仪器及其相关原理

2.1 仪器设备

电阻率测试采用东南大学岩土工程研究所刘松玉教授、于小军博士自行研制的电阻率测试仪^[1,2], 此装置已获国家专利^[2]。仪器采用交流、低频、二相电极, 交流电源频率从 20~100 Hz 细分为 9 档。另外, 为了与常规土工测试仪器相匹配, 定制了具有一定强度、刚度的绝缘配件以及特殊电极片。仪器的电原理图、主要参数分别见图 1 和表 1 所示。

2.2 测试原理

依据土的电学模型, 通过调节低频率交流电桥的平衡, 测出土的电阻 R_x , 获得土的电阻率:

$$R_{xv} = R_v \frac{R_1}{R_2}; R_{xh} = R_h \frac{R_1}{R_2}; \rho_v = \frac{R_v S_v}{L_v}; \rho_h = \frac{R_h S_h}{L_h} \quad (1)$$

式中 R_{xV}, R_{xH} 为土的竖向、水平向电阻; ρ_v, ρ_H 为土的竖向、水平向电阻率; ρ_w 为孔隙水电阻率, 经过测试, 孔隙水(蒸馏水)的电阻率在 $0.4\sim 0.6\ \Omega\cdot m$ 之间, 本文试验取其平均值 $0.5\ \Omega\cdot m$; R_V, R_H 为可调电阻; R_1, R_2 为标准电阻; S_V, S_H 为所测土的竖向、水平向电阻时电流通过的横截面面积; L_V, L_H 为所测土竖向、水平向电极片之间的距离^[3,4]。

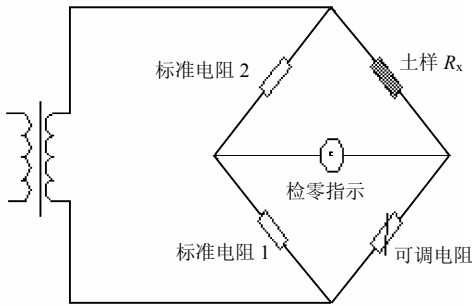


图 1 低频交流电桥测电阻电原理^[2]
Fig.1 The electrical principle of AC bridge

表 1 仪器主要参数表^[1]

Table 1 The parameters of AC bridge			
桥臂选择/ Ω	有效量程/ Ω	等级指数	信号源电压/V
20~60	1~10	2	0.200~0.500
80~400	10~100	0.2	0.500~1.000
800~1 000	100~1 000	0.2	1.000~1.999

3 应 用

电阻率结构特性参数量化土的微观结构法主要是应用电阻率测试技术, 测得结构变化过程中土的竖向、水平向电阻变化情况, 求得能反映土内部结构特征的 3 个基本电阻率结构特性参数: 即 F, f, A 的变化规律, 从而洞察土微观结构的定量变化。其中 F 反映土的孔隙率和孔隙结构, f 描述土的颗粒形状, 取决于土的电导率、介电常数、颗粒形状、频率等, 与土的排列无关, A 反映土颗粒的定向排列^[4~6]。

通过测试混凝土在强度增长以及压缩过程中的竖向、水平向电阻及其基本物理特性, 得到其竖向、水平向电阻率 $\rho_v, \rho_H, (\Omega\cdot m)$, 进而得到 3 个电阻率结构特性参数: 平均结构因子 $F = (F_V + 2F_H)/3, F_V = \rho_v / \rho_w, F_H = \rho_H / \rho_w$; 平均形状因子 $f = \log F / \log n$; 各向异性指数 $A = \sqrt{F_V / F_H}$, 3 个参数均无量纲, n 为孔隙率。

3.1 试验

本次试验采用含水量 $\omega = 60\%$ 的连云港海相软

土, 基本物理参数见表 2。掺入 5%, 普通硅酸盐水泥 C32.5。在室内人工制成 $70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}$ 规格的试块, 在 1, 3, 7, 15, 30 d 龄期下做无侧限抗压强度试验、压缩试验, 同步测其水平向、竖向电阻, 并进行含水量、比重、密度、孔隙比等物理力学特性指标的测试。

表 2 软土物理参数
Table 2 The soft soil physical properties

含水量/%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比重	孔隙比	液限/%	塑限/%
60	1.678	2.73	1.732	77.82	28.98

3.2 试验结果及分析

试验用水泥土初始参数见表 3。

表 3 混凝土初始状态参数汇总
Table 3 The cemented soil parameters at initial state

龄期/d	F	f	A	q_u / kPa	ω /%	G_s	平均 ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	塑限 ω_p /%	e_0
1	8.8	2.18	11.80	107.36	58	2.62	1.651	48.51	0.630
3	13	2.6	14.8	173.39	55.89	2.68	1.681	49.20	0.604
7	13.25	2.64	15.05	217.67	53.97	2.71	1.699	53.60	0.587
15	14.56	2.76	15.69	244.07	53.1	2.73	1.701	48.22	0.583
30	21.29	3.13	20.34	257.41	52.9	2.74	1.702	42.39	0.581

由表 3 可知: (1) 无侧限抗压强度 q_u 与龄期有, 较好的相关关系, 随着龄期的增长, q_u 将升高。在初期 q_u 增长幅度较大, 7 d 后 q_u 的增长趋于平缓, 在 15 d 时 q_u 大约为 30 d 无侧限抗压强度的 95%, q_u 随龄期变化的规律曲线如图 2(a)所示; (2) 比重 G_s 和平均密度 ρ 随着龄期的增长而升高, 同时这 2 个量的增长随龄期有着先快后慢并逐渐趋于平缓的变化特点。 G_s, ρ 随龄期变化的规律曲线如图 2(b)所示。 (3) 混凝土的初始塑限 ω_p 在龄期初期逐渐变大, 7 d 时达到最大值, 随后逐渐降低, 30 d 达到最小值, ω_p 随龄期变化的规律曲线见图 2(c)。混凝土的初始孔隙比 e_0 随着龄期的增长而减小, e_0 随龄期变化的规律曲线见图 2(d)。 (4) F, f, A 与龄期有着密切的关系, 均随着龄期的增长而升高, 表明混凝土样在龄期增长过程中其结构联接强度增强, 使得颗粒间的引力增大, 结构体的整体形状变大, 定向排列性变强。 F, f, A 随龄期变化的规律曲线见图 2(e)、图 2(f)。 (5) 混凝土样的初始电阻率结构特性参数与其基本物理力学参数的关系见图 2(g)、图 2(h)。 F, f, A 与 e_0, G_s 有较好的相关关系, 均随着 e 的增长而降低, 随着 G_s 的增长而升高且 F 和 A 的变化更加明显, 表明混凝土样在 e_0 减小过程中其结构联接强度将变大, 结构体的整体形状将变大,

定向排列性将变强;而随着 G_s 的增大其变化规律也是如此。(6) 在强度增长过程中, F , f , A 随着 q_u 的增长而增大, 表明土样在强度增长过程中其结构联接强度增强, 结构体团粒变大, 定向排列性变强, 贯通性变好。另外, 3 个结构特性参数在强度增长初期升高较快, 在强度增长中期趋于平缓, 且在强度增长的中后期又有较大幅度的升高, 变化的规律曲线见图 2(i)。

上述规律的产生主要是由于水泥土随着养护龄期的增长, 水泥的水化反应和硬化反应不断发展, 在土颗粒周围形成各种水化物的凝胶和结晶, 并很快生长交织在一起形成空间网架结构, 所以强度随着龄期增加而不断增长; 由于水泥掺入比较小, 龄

期 15 d 后水泥的水化反应和硬化反应基本完成, 宏观上表现为其强度接近于极限强度。同样, 随着水泥水化物的不断生成, 土颗粒周围的空隙不断得到填充, 水泥土变得更加密实, 因此随着龄期的增长其平均密度 ρ , G_s 增大, e_0 减小。在水泥土空间网架结构的不断形成过程中, 内部结构体的胶结强度不断增强, 从而使得颗粒间的引力不断增大, 因而结构体的整体形状变大, 颗粒的排列性增强。

3.2.2 压缩过程中电阻率结构特性参数的变化规律

研究结果显示, F , f , A 与应力 p 有较好的相关关系(图 3~6), 随着 p 的增大, F , f , A 将减小, 表明土样在应力增长过程中其结构联接强度将变弱, 结构体团粒整体的形状将变小, 其定向排列性

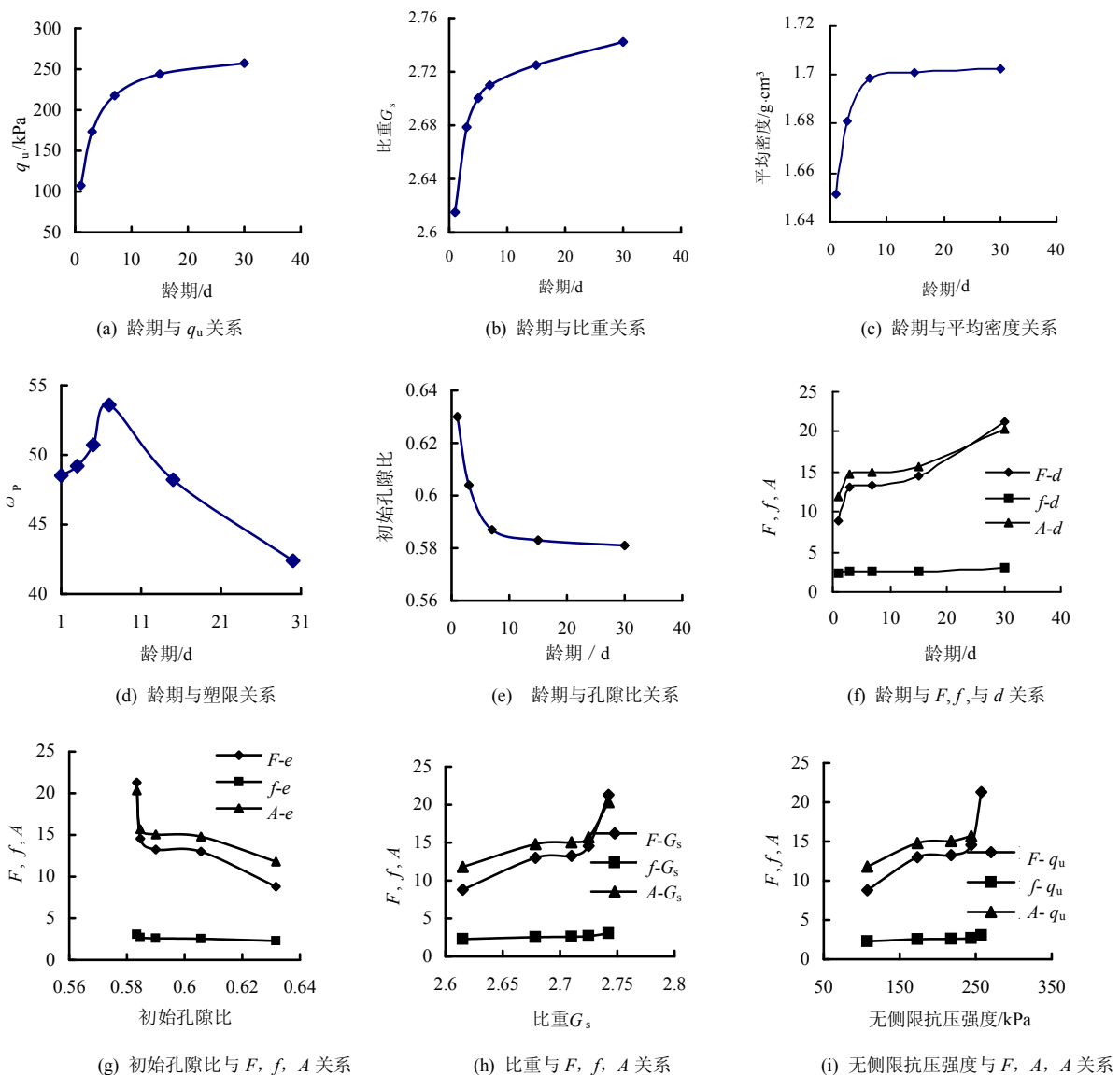


图 2 物理力学特性关系
Fig.2 The relationship of physico-mechanical characters

将变弱, 而且 F , f , A 在 p 增大瞬间陡降, F , f 随着 p 的进一步增大很快趋于平缓, 而 A 当 p 增大到一定程度后有所反弹。

根据图 6 的 e - $\log p$ 曲线得各龄期固结屈服压力 p_c (表 4)。龄期越高, p_c 值越大。由图 3~6 可知, 各变化曲线陡降的最低点与各龄期的固结屈服压力基本吻合, 揭示了在屈服前随着 p 的增加, 土结构逐渐破坏, F , f , A 随之陡降; 当外加应力达到土体的固结屈服压力时土结构完全被破坏, F , f , A 降至图上的最低点, 屈服后随着外加应力 p 的增加, 由于内部结构已破坏, 所以 F , f 基本没有变化。但外加应力的增大使得颗粒排列性有所增强, 在土体屈服后各向异性系数 A 的曲线会出现反弹。这也说明了电阻率特性参数 F , f , A 能反映土的内部结构变化特征, 因此可根据这 3 个参数与外加应力的关系曲线预测土体的固结屈服压力 p_c 。

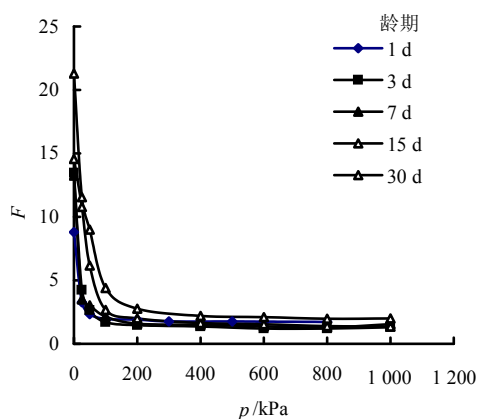


图 3 应力与平均结构因子关系曲线
Fig.3 The relationship between stress and average structure factor F

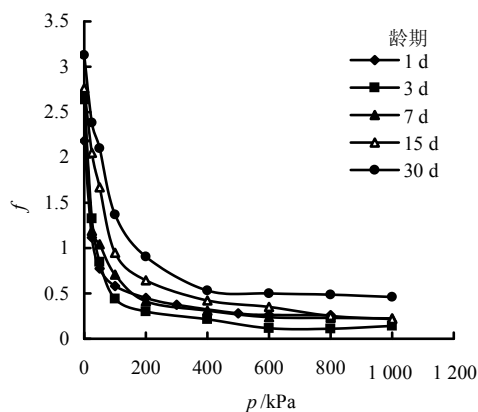


图 4 应力与平均形状因子关系曲线
Fig.4 The relationship between stress and average shape factor f

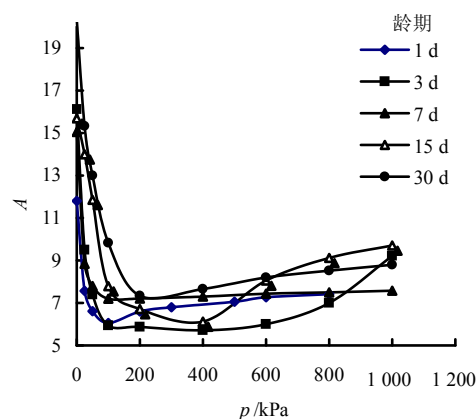


图 5 应力与各向异性系数关系曲线
Fig.5 The relationship between stress and anisotropy p factor A

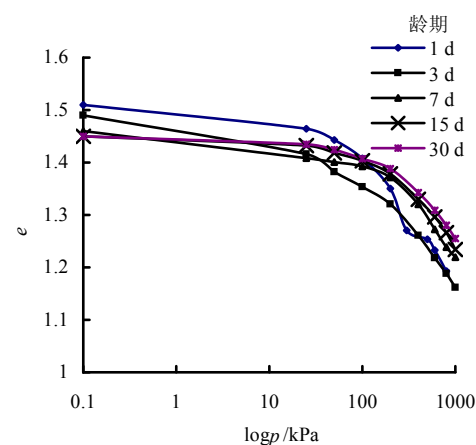


图 6 e - $\log p$ 曲线
Fig.6 The curves of e - $\log p$

表 4 各龄期固结屈服压力值

不同龄期 (d) 的 p_c /kPa				
1	3	7	15	30
65	80	110	150	190

4 结 论

(1) 实验结果表明, 水泥土 3 个电阻率特性参数——平均形成因子 F 、平均形状因子 f 、各向异性系数 A , 能对土的结构进行定量分析, 反映土体变形、强度流动过程中其内部结构特征的变化规律。

(2) 根据室内试验结果总结了水泥土平均密度、孔隙比、比重、塑限等基本物理参数与电阻率结构特性参数的关系。

(3) 水泥土龄期、无侧限抗压强度及轴向应力与电阻率结构特性参数有较好的相关关系, 结果表明水泥土的电阻率特性参数与无侧限抗压强度、龄期以及轴向应力均成正相关关系。

(4) 电阻率结构特性参数与外加应力变化曲线陡降的最低点与各龄期的固结屈服压力基本吻合, 因而可根据这 3 个参数与外加应力的关系曲线来预测土体的固结屈服压力 p_c 。

参 考 文 献

- [1] 刘松玉, 于小军. 交流低频土电阻率测试仪[P]. 中国专利: ZL03222401.X, 2004—6—30.
- [2] 于小军. 电阻率结构模型理论的土力学应用研究[博士学位论文 D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [3] 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, (3): 393—396.
YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Research on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils[J]. **Chinese Journal Geotechnical Engineering**, 2004, (3): 393—396.
- [4] Arulanandan K, Muraleetharan K. Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 114(7): 753—789.
- [5] Arulanandan. Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 117(2): 319—326.
- [6] Thevananyagam S, Electrical response of two-phase soil: theory and applications[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 119(8): 1 250—1 275.