

TDR 技术在石灰炉渣加固土中的应用

陈仁朋¹, 王进学¹, 陈云敏¹, 张延红²

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江工业大学设计研究院市政分院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 石灰炉渣和水泥炉渣常用于加固路基土。石灰炉渣含有除石灰以外的其它化学物质, 因此, 石灰炉渣加固土的性质比石灰加固土更加复杂。本文试验研究了石灰炉渣加固土的电学特性和强度增长的规律, 应用 TDR 技术测得加固土的电导率随土中化学反应进行的变化规律, 提出用双曲线模型反映不同掺入量的加固土电导率的变化与强度增长的规律。与传统的测试方法相比, TDR 技术有助于了解石灰炉渣与土之间的化学反应对加固土性质的影响, 对于控制压实质量非常有效。

关键词: TDR; 石灰矿渣; 介电常数; 电导率; 强度

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)05-0676-08

作者简介: 陈仁朋(1972-), 男, 浙江衢州人, 副教授, 从事基础工程、地基处理和环境岩土工程的研究和教学。E-mail: chenrp@zju.edu.cn.

Application of TDR in LKD modified soils

CHEN Ren-peng¹, WANG Jin-xue¹, CHEN Yun-min¹, ZHANG Yan-hong²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

Abstract: By-product materials like lime kiln dust (LKD), cement kiln dust, and fly ash are usually used to modify pavement subgrades. The behavior of soils modified with LKD was more complex than that with lime due to the presence of various compounds besides lime in LKD. The electrical conductivity behavior and the development of shear strength of LKD modified soils were described. The chemical processes were tracked with the variation of electrical conductivity of soil monitored by time domain reflectometry (TDR) technology. Hyperbolic-type models were proposed to estimate the LKD dosage and to predict the development of shear strength with the variation of electrical conductivity. Compared with the conventional test methods, the use of TDR was expected to provide better understanding of the rate and extent of chemical reactions between chemical modifiers like LKD and soil and be useful for compaction quality control.

Key words: time-domain reflectometry; lime kiln dust; dielectric constant; electrical conductivity; strength

0 前 言

工程中广泛应用化学掺合料加固路基, 以提高土的工程性质。常用的化学掺合料有生石灰、熟石灰和水泥等。目前石灰炉渣、水泥炉渣和粉煤灰等工业副产品也被用作化学掺合料, 不仅有效地回收工业副产品, 且使化学加固路基更加经济, 具有广阔的应用前景。在美国, 石灰炉渣已经广泛地用于加固路基土^[1]。许多学者^[2-6]深入地研究了石灰加固土中的物理化学反应, 根据反应时间将其分为短期(水化和凝结)和长期(稳定)反应。还有一些学者^[7-11]研究了化学加固土的物理性质和工程性质。

石灰炉渣主要由 CaO 组成, 含有 CaCO₃, CaSO₄ 和粉煤灰等杂质。杂质的存在使石灰炉渣和土之间的反应非常复杂, 分为短期反应和长期反应^[12]。短期反

应的反应速率较快, 表现为 CaO 水化、离子交换和土颗粒的胶结, 使加固土的性质有了较大的改善。短期反应在土体中产生强碱环境, 溶解的铝和硅与钙离子发生化学反应, 生成水化硅酸钙(CSH)和水化铝酸钙(CAH)等胶结物质, 使土颗粒胶结, 提高加固土的长期强度。加固过程中化学反应起主导作用, 因此, 加固土的性质受时间和温度影响。土体的化学变化将导致其电学特性的变化。近年来, 一些学者研究了混凝土的电学特性(介电常数和电导率)随时间变化与其强度增长的关系^[13-14]。于小军等研究了电阻率测试技术在水泥土深层搅拌法中的应用, 并且探讨水

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50308026); 国家自然科学基金重点项目(50538080)

收稿日期: 2006-04-20

表 1 Orchard 土和 Grundite 土的基本物理指标

Table 1 Basic properties of Orchard clay and Grundite

物理指标	颗粒分析	液限 /%	塑性指数 /%	AASHTO 分类法	USCS 分类法	压实特性	pH 值 (与水 1:1 混合)	最优掺入量
Orchard 土	砂粒 28%, 粉粒 47%, 黏粒 25%	35.0	19.0	A6(11)	CL	$\gamma_{dmax}=18.1 \text{ kN/m}^3$, $w_{op}=16.5 \%$	7.74	4%
Grundite 土	砂粒 23%, 粉粒 51%, 黏粒 26%	46.7	20.7	A6(11)	CL	$\gamma_{dmax}=16.2 \text{ kN/m}^3$, $w_{op}=19 \%$	2.2~2.4	11%

泥土电阻率与无侧限抗压强度之间的关系^[15]。Boardman 等试验研究发现石灰加固土的电导率随时间降低的特性, 根据电导率检测石灰加固土的质量, 但没提出具体的方法^[16]。Yu 等研究发现 TDR 测试仪测得的电导率能够准确有效地反映石灰加固土的水化程度^[17]。

TDR 技术应用于岩土工程起步较晚, 国内研究更是少见。TDR 技术主要用来测试土体的两个基本电学参数: 介电常数和电导率。介电常数反映土的极化程度, 土的极化在 TDR 测试仪工作频率范围内主要受土中自由水含量的影响, 因此, 可以用于测试土体的含水率和干密度; 电导率则反映了土的导电能力, 受孔隙水的电导率和土体的表面电导率的影响, 用于测试土体中的离子含量。目前, TDR 技术主要应用于土壤含水率的测定、滑坡变形的监测和污染物的监控等方面。

本文在文献[18]的基础上进一步研究了石灰炉渣加固土的击实特性、电学特性和强度增长规律, 根据石灰炉渣加固土的电学特性与石灰炉渣的掺入量和加固土强度之间的联系, 提出应用 TDR 测试技术确定石灰炉渣的掺入量和预测加固土的抗剪强度的方法。试验表明, TDR 技术可用于控制石灰炉渣加固土的加固质量, 是一种很有效的现场质量控制方法。

1 试样制备

1.1 材料: 土和石灰炉渣

试验中用 Orchard 土和 Grundite 土。Orchard 土取自美国印第安那州的拉斐特, Grundite 土取自美国伊利诺斯州的一个黏土制品工厂。Orchard 土室温下风干, 用 4.75 mm (No. 4) 筛筛分, 除去较大的颗粒。根据 ASTM 的相关实验标准测试两种土的基本物理指标, 测试结果见表 1。

石灰炉渣取自美国卡梅尔山附近的 Buffington 工厂。石灰炉渣在自然状态和水化后分别做 X 射线衍射分析, 主要含有 CaO、CaCO₃、CaMg(CO₃)₂、CaSO₄ 和 Ca(OH)₂ 等化学成分。

1.2 试样制备

制备两组同样的试样, 一组用于研究加固土的击实特性, 另一组用于测试加固土的电学特性和强度增长。制备时, 每个试样达到目标含水率后, 用塑料袋

密封。Orchard 土试样放置于恒温 10℃ 的潮湿环境中, Grundite 土试样则放置于恒温 22℃ 的环境中。24 h 之后, 在各个试样中加入不同掺入量的石灰炉渣, 用机械搅拌器搅拌 5 min。混合均匀后的试样放入直径 10.16 cm、高 11.64 cm 的标准击实筒里, 分三层击实, 每层 25 击, 用于 TDR 测试的击实筒如图 1。

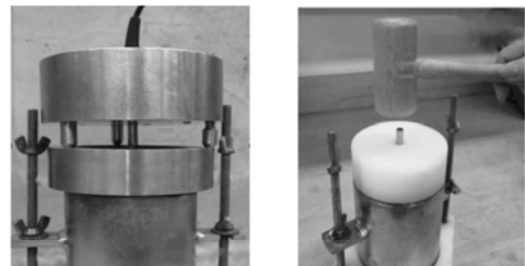


图 1 用于 TDR 测试的击实筒

Fig. 1 Specimens preparation in the mold for TDR measurement

试验中各试样的含水率和石灰炉渣掺入量见表 2。各试样分为两份, 击实后一份用 TDR 仪测试介电常数和电导率, 另一份用针式贯入仪测试贯入阻力。试样顶部用蜡封, 防止养护过程中水分蒸发。为了验证试验的可重复性, 做了三个相同的 ORC4-17 试样, 测试其电导率和贯入阻力, 得到的结果非常接近。

2 测试

2.1 介电常数和电导率

介电常数和电导率是土的两个基本电学参数, 由 TDR 测试仪测得^[19]。本试验设备采用美国 Campbell Scientific 公司的 TDR100 测试仪 (图 2), 由一根长 1.8 m, 特性阻抗 50Ω 的同轴电缆将 TDR100 测试仪和电缆接头连接起来, 电缆接头与击实筒的金属环连接。TDR100 测试仪的信号发生器发射一个阶跃电压脉冲, 此脉冲沿着电缆、电缆接头和击实筒传播, 在探针与土的接触面和探针底部阻抗发生变化的地方发生反射, 反射信号被 TDR100 测试仪接收, 获得反射波形 (图 3)。在反射波形上, 两个反射点间的相对距离 L_a 反映了电磁波在探针里的传播时间。根据电磁波理论, 探针和筒壁间介质的相对介电常数由下式计算:

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L_p} \right)^2, \quad (1)$$

式中, L_p 是探针插入土中的实际长度。

表2 试样的基本指标及试验结果

Table 2 Test results

试样编号	LKD 掺入量/%	混合后目标含水率/%	混合后含水率/%	试验结束时含水率/%	$B/(mS \cdot m^{-1})$	A/h
ORC 2-15	2	15	15.49	15.26	4.48	0.45
ORC 2-17	2	17	17.14	17.04	3.61	0.33
ORC 2-19	2	19	18.87	18.87	5.75	0.62
ORC 4-15	4	15	14.39	14.24	45.25	10.03
ORC 4-17	4	17	17.82	17.22	60.24	11.75
ORC 4-19	4	19	18.70	18.18	57.80	9.90
ORC 6-15	6	15	15.23	15.22	63.69	10.97
ORC 6-17	6	17	16.50	16.50	82.64	10.48
ORC 6-19	6	19	19.30	19.20	75.19	4.43
GRU 11-13	11	13	12.62	12.71	13.81	18.42
GRU 11-17	11	17	17.13	17.21	30.21	14.84
GRU 11-21	11	21	20.21	20.41	41.84	19.85
GRU 15-13	15	13	13.56	13.40	25.91	10.98
GRU 15-17	15	17	17.23	16.67	52.63	15.97
GRU 15-21	15	21	20.88	20.87	68.97	8.09
GRU 7-17	7	17	17.65	17.62	9.99	0.1

注: 试样编号中的 ORC 表示 Orchard 土, GRU 表示 Grundite 土, 第一个数字表示石灰炉渣的掺入量, 第二个数字表示目标含水率, LKD 表示石灰炉渣。

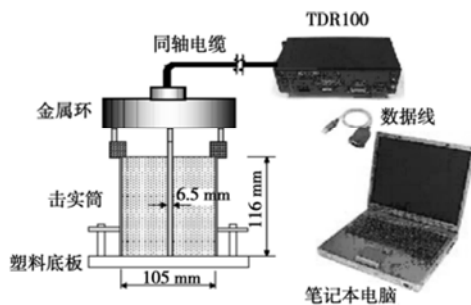


图2 试验用的 TDR 测试系统

Fig. 2 TDR apparatus for laboratory measurement

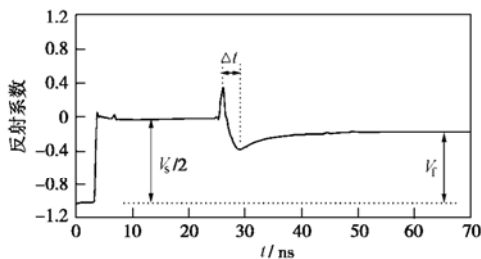


图3 典型的反射波形

Fig. 3 Typical TDR waveform

电导率是电阻率的倒数,反映了介质的导电能力,与介质中的离子含量密切相关。电导率与 TDR 的入射电压和稳定电压有关。稳定电压是电磁波经过多次反射之后的最终电压,结合入射电压可计算探针和筒壁间介质的电导率

$$EC_b = \frac{1}{C} \left(\frac{V_s}{V_f} - 1 \right) \quad (2)$$

式中 V_s 是入射电压,等于阶跃脉冲电压的 2 倍; V_f 是稳定电压; C 是与探针的几何性质有关的常数,可以通过理论分析或标定试验确定。当电导率增大,电磁波在传播过程中产生衰减,稳定电压会降低。

2.2 贯入阻力

加固土的强度和模量是工程中最关心的两个参数。传统的现场测试方法有:动力触探试验(DCP)、加州承载比试验(CBR)和落锤式挠度计(FWD)^[6-11]。无侧限抗压强度试验经常用于测试原状土和重塑土的强度。试验表明:无侧限抗压强度试验和各种现场测试试验都具有某种联系^[20]。由于加固土的脆性较大,做无侧限抗压强度试验具有一定的局限性。因此,用针式贯入仪测试其贯入阻力作为强度指标。贯入试验在以下时间内进行:击实试验刚结束、1 d 后和 3 d 后,部分试验还测试了 7 d 后的强度。

3 测试结果及分析

3.1 压实特性

最大干密度和最优含水率是压实过程中的两个重要参数,常用于现场质量控制。研究表明:石灰加固土压实后最大干密度减小,且随着石灰含量的增加继

续减小^[10, 12]。加固土的强碱环境改变了土颗粒表面的电荷分布, 颗粒间的斥力增加, 颗粒的有效粒径分布改变, 导致最大干密度下降。石灰炉渣用于加固 Orchard 土试验时, 得到不同掺入量的压实曲线 (图 4)。从图中可以看出, 掺入量为 2% 和 4% 时, 最优含水率上升, 最大干密度下降; 当掺入量增加到 6% 时, 最优含水率又回到处理前的水平, 而最大干密度继续下降; 当掺入量增加到 8% 时, 最优含水率显著下降, 最大干密度相对于掺入量 6% 时有所上升。由此可知, 石灰炉渣加固土的压实特性比石灰加固土的复杂。

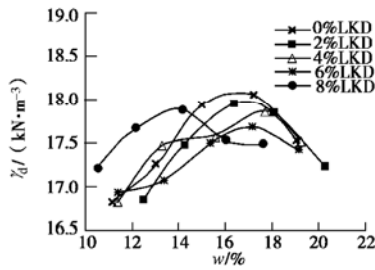


图 4 不同石灰炉渣掺入量的 Orchard 土的压实曲线

Fig. 4 Compaction curves of natural and LKD modified Orchard clay

土的最优含水率受土颗粒的颗粒级配和土颗粒表面双电层厚度的影响, 颗粒级配越均匀, 双电层越厚, 最优含水率就越高。在土中加入石灰炉渣后, 孔隙水中的阳离子浓度增加, 降低了双电层的厚度, 而胶结作用使细黏土颗粒胶结形成大颗粒, 改变了土颗粒的粒组分配, 导致加固土的性质趋向于粒状土。当掺入量较小时, 石灰炉渣和细黏土颗粒之间的反应并不充分, 颗粒的有效粒径改变并不明显, 但会增加细颗粒的比例, 导致最优含水率上升。当掺入量增加, 石灰炉渣和细黏土颗粒之间的反应加剧, 颗粒的有效粒径明显增加, 细颗粒含量减少, 导致最优含水率下降。

3.2 电学特性

(1) 电导率

击实试验刚结束, 用 TDR 测试仪测试试样的电导率。图 5 为不同掺入量不同含水率的 Orchard 土试样的电导率, 可以看出电导率与掺入量和含水率有关。在同样含水率下, 未处理土的电导率比较低 (大约 35~60 mS/m)。加入石灰炉渣后, 加固土中的阳离子含量显著增加, 导致加固土的电导率也随之增大, 而且随着掺入量的增加而增大。

土的电导率和孔隙水电导率、表面电导率有关。离子交换使土颗粒表面水膜的扩散层变薄, 有利于土颗粒的胶结, 使土颗粒粒径变大, 表现出粒状土的性质, 还会使表面电导率降低。离子交换速率很快, 但是由于石灰炉渣和土不可能完全的混合均匀, 因此,

石灰只能缓慢的扩散通过反应物, 与界面的土颗粒继续反应。电导率反映土的物理化学反应。监测结果表明: 加入石灰炉渣后, 土体的电导率随时间而降低, 而且石灰炉渣掺入量和土体含水率的越高, 电导率下降得越快 (图 6)。

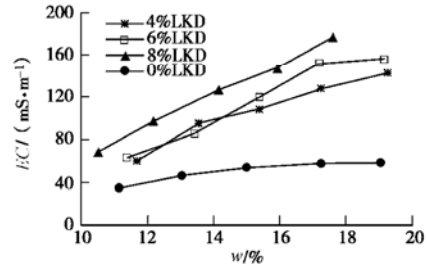


图 5 击实完成后 Orchard 土的电导率

Fig. 5 Electrical conductivity measured immediately after compaction for LKD modified Orchard clay

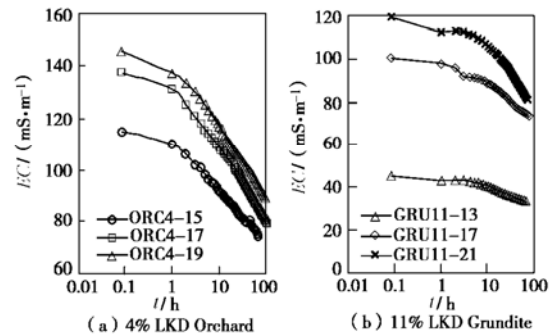


图 6 电导率随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of electrical conductivity with time

对实验数据进行归一化处理, 定义电导率的增量 $\Delta EC_t = (EC_t - EC_0) / EC_0$, 式中, EC_0 为初始电导率 (击实试验完成后 5 min 时测得的电导率), EC_t 为 t 时刻的电导率。实验结果表明, 掺入量相同而含水率不同的试样电导率增量 ΔEC_t 具有相同的趋势, 最终交于一个很小的区域, 如图 7 所示。

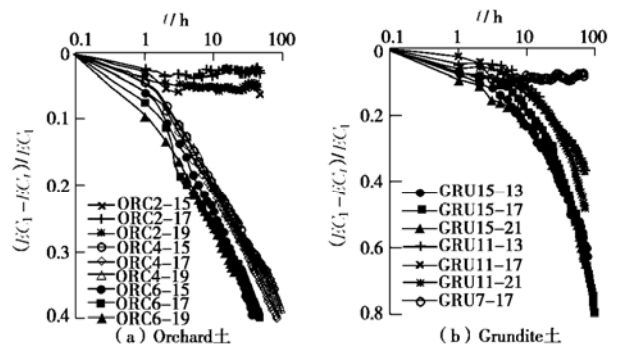


图 7 加固土的归一化电导率随时间变化曲线

Fig. 7 Variation of normalized electrical conductivity with time for LKD modified clay

从图中可知, 电导率增量 ΔEC_t 受掺入量的影响较大, 而受含水率的影响很小, 因此, ΔEC_t 可以作为特

定时间内加固土硬化反应的度量指标。同时 ΔEC_t 的斜率还反映了加固土中石灰炉渣的剂量,如图 8 所示, ΔEC_t 的斜率的增长和石灰炉渣的含量基本成线性关系。

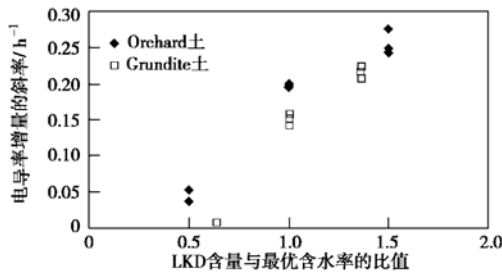


图 8 掺入量对电导率增量的斜率的影响

Fig. 8 Effect of dosage of LKD on the gradient of net decrease of electrical conductivity

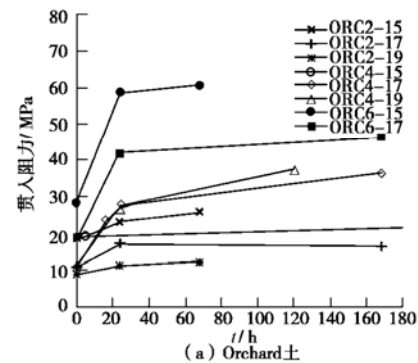
(2) 介电常数

介电常数反映土中自由水的含量^[19]。土体中电导率增大,引起反射信号能量损失,导致时域分析得到的介电常数偏大^[21]。Jones 等提出即使土的电导率在一般水平 ($EC=200$ mS/m), TDR 信号的衰减也会降低含水率的测试精度,因此,当电导率很大时,时域分析得到的介电常数的误差很大^[22]。石灰炉渣加入土中的前几个小时,加固土的电导率很大,信号衰减得很快,从 TDR 波形中很难分析出二次反射信号(探针端部的反射),无法确定介电常数。随着时间的推移,土中电导率逐渐降低,二次反射信号逐渐清晰,从而可以计算出介电常数。试验中发现,含水率相同的试样,测得的介电常数非常接近,并且在试验过程中下降很缓慢。分别测试试样在击实试验刚结束时和 TDR 测试完成后的含水率,发现含水率几乎不变,而电导率却有很大变化,由此可得,介电常数的下降与电导率的变化有密切关系。养护过程中,土颗粒的增大会减弱结合水的极化程度和 Maxwell-Wagner 效应,引起介电常数的降低。综上所述,介电常数的影响因素很复杂,如何从高电导率介质中的 TDR 波形中获得精确的介电常数,尚需进一步研究。

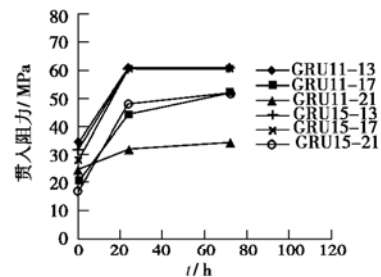
3.3 强度增长规律

土和石灰炉渣混合后,发生离子交换和胶结作用,加固土的强度在短时间内有较大的提高,而硬化反应则非常缓慢,可以持续几个月甚至几年,加固土强度的增长是一个长期的过程。因此,针式贯入仪测得的加固土强度主要是石灰炉渣短期反应的结果。图 9 为加固 Orchard 土和加固 Grundite 土的贯入阻力随时间变化曲线。试样 ORC6-17, ORC4-17 和 ORC4-15 的最终数据是混合后第 7 d。从实验结果可知,加固土的大部分强度在击实试验结束后 1 d 获得,因此,剩下

试样的数据由 7 d 改为 3 d。试样 ORC 6-15 在 3 d 后的贯入阻力和试样 GRU 15-13, GRU 15-17, GRU 15-21 在 1 d 后的贯入阻力都超过了贯入仪的量程。



(a) Orchard土



(b) Grundite土

图 9 贯入阻力随时间变化曲线

Fig. 9 Variation of penetration resistance with time

从图 9 可知,加固土的含水率和掺入量对加固土初始强度的影响非常大,含水率和掺入量越高,强度就越高,且加固土的强度增长大部分都在 1 d 内完成。Geiman 等试验研究发现养护时间对用生石灰处理过的 VoVa 土和 Staunton 土的强度的影响并不是很大^[23],试验中,VoVa 土和 Staunton 土试样的含水率分别为最优含水率和 20% (大于最优含水率),养护 3 d 后的无侧限抗压强度已经达到养护 28 d 时强度的 81%~92%。因此,石灰炉渣加固土具有同石灰加固土相似的强度增长规律。

电导率和强度都与土的物理化学反应有关,因此它们之间可能存在某种关系。图 10 为不同试样的贯入阻力和电导率,各数据点的时间间隔与图 9 相同。

从图 10 中可以看出,电导率较大时(击实试验刚完成时),与贯入阻力近似成线性关系,强度增长的速率随时间降低,电导率也随之降低,当达到某一值时,贯入阻力与电导率之间近似成一条水平线。

结合试样中石灰炉渣的掺入量,图 10 可以用于通过电导率计算加固土的贯入阻力。

4 TDR 在石灰炉渣加固土中的应用

4.1 测试含水率和干密度

水的介电常数(约 81, 20℃)比土颗粒的介电常

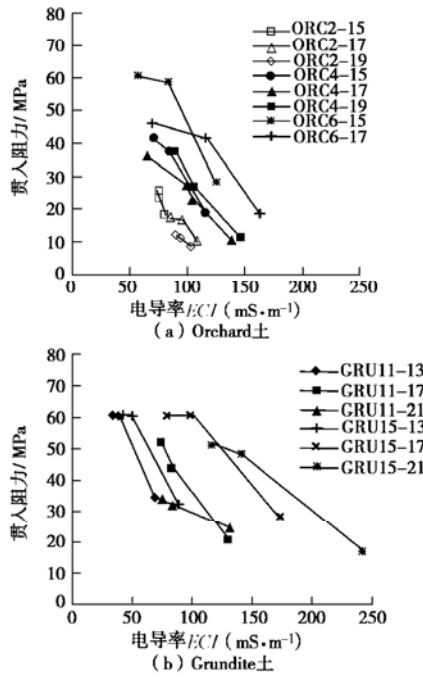


图 10 电导率与贯入阻力的关系曲线图

Fig. 10 Penetration resistance vs. electrical conductivity

数 (约 3~5) 大得多, 因此, 可以用土体的介电常数来计算土中的含水率。Topp 等提出了介电常数和土体体积含水率之间的经验关系^[24], 极大地促进了 TDR 技术的发展。Yu 和 Drnevich 建立了介电常数和含水率的关系^[19]:

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw \quad (3)$$

式中, K_a 是土的表现介电常数, w 是土的含水率, ρ_w 是水的密度, ρ_d 是土的干密度, a, b 是土的标定常数, 由标定试验确定。他们还建立了土中电导率和含水率的关系^[19]

$$\sqrt{EC} \frac{\rho_w}{\rho_d} = c + dw \quad (4)$$

式中, EC 是土的体积电导率, c, d 是标定常数, 由标定试验确定。

现场测试前, a, b, c 和 d 等常数需在实验室标定。现场测试方法分两步法和一步法两种。

两步法测试过程如下: 用四针式探头测得现场土的介电常数 $K_{a,field}$, 然后将探针间的土挖出放入击实筒里击实, 称重, 得击实筒里土的总密度 $\rho_{t,mold}$, 并测得击实筒里土的介电常数 $K_{a,mold}$ 。根据式 (3), 击实筒里土的含水率 w_{mold} 可由下式确定:

$$w_{mold} = \frac{\sqrt{K_{a,mold}} - a \frac{\rho_{t,mold}}{\rho_w}}{b \frac{\rho_{t,mold}}{\rho_w} - \sqrt{K_{a,mold}}} \quad (5)$$

此方法假定现场土挖出放入击实筒中, 含水率没

有改变, 即 w_{field} 等于 w_{mold} 。现场土的干密度

$$\rho_{d,mold} = \frac{\sqrt{K_{a,field}}}{\sqrt{K_{a,mold}}} \frac{\rho_{t,mold}}{1 + w_{field}} \quad (6)$$

一步法的测试过程如下: 将四针式探头直接插入现场土体, 测得土的表现介电常数 K_a 和体积电导率 EC , 应用式 (3) 和式 (4), 直接计算出土的含水率和干密度。一步法不用现场取土, 比两步法更加快捷方便。Yu 等通过大量的试验表明^[17], 这种方法对化学加固土同样适用。

4.2 根据电导率计算加固土的掺入量

土中石灰炉渣的掺入量对施工质量控制非常重要。一般情况下, 现场质量检测在施工完成后 1~2 d 内进行。试验结果表明, 电导率可以用来计算加固土的掺入量。

击实试样测得的电导率可用双曲线方程拟合:

$$EC_t = EC_1 - \frac{Bt}{A+t} \quad (7)$$

式中, t 为时间, B 和 A 为拟合常数, B 表示电导率的最大减小量, B/A 表示电导率下降的初始斜率。各试样的拟合常数 B 和 A 见表 2。从图 11 可以看出, 双曲线方程能够很好地拟合实验数据, 只有掺入量为 2% 的 Orchard 土试样数据偏离较大。变换方程 (7), 得

$$\frac{EC_1 - EC_t}{EC_1} = \frac{B}{EC_1} \cdot \frac{t}{A+t} \quad (8)$$

图 7 表明相同掺入量的试样的归一化电导率增量曲线具有同样的趋势, 因此, 方程 (8) 可以用于计算加固土的掺入量。加固土施工完成后, 分别在三个不同的时间内用 TDR 测试仪测试其电导率, 代入方程 (8), 就可以得到 EC_1, A 和 B 的值, 从而得到任意时刻的电导率增量的斜率, 然后根据图 8 中的标定曲线就可以确定加固土中的石灰炉渣的掺入量。

4.3 根据电导率预测加固土强度

试验表明, 电导率和试样的贯入阻力负相关。Yu^[17]等研究发现两类不同的混凝土具有相同的趋势, 抗压强度和电导率之间可用下面的方程表示:

$$f_c = \lambda \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\beta(EC_t - EC_0)) \right] P_a \quad (9)$$

式中, f_c 为无侧限抗压强度 (MPa), λ 为经验常数 (无量纲), β 为经验常数 (m/mS), EC_0 由标定试验获得 (mS/m), P_a 为大气压 ($P_a = 0.098$ MPa)。

将方程 (9) 应用于石灰炉渣加固土。试样 ORC 4-17 的拟合常数为: $\lambda = 86.5, \beta = 0.0878$ m/mS, $EC_0 = 102.6$ mS/m。试样 GRU 11-17 的拟合常数为: $\lambda = 110.0, \beta = 0.1844$ m/mS, $EC_0 = 87.3$ mS/m。从图 12 中可以看出, 方程 (3) 的曲线和试验测得的数据吻合的非常好, 因此, 根据方程 (9) 就可以由 TDR

测试仪测得的电导率推算出试样的贯入阻力，从而得到试样的强度。

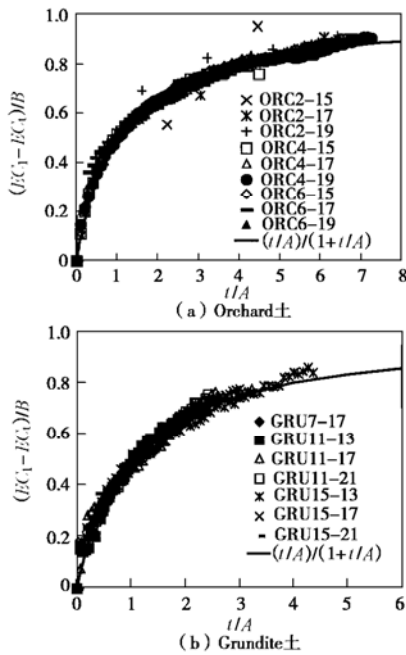


图 11 试样的拟合曲线

Fig. 11 Curves of fitting

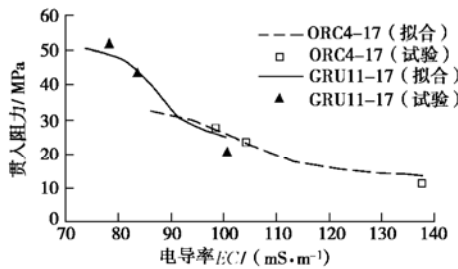


图 12 电导率与贯入阻力的关系

Fig. 12 Relationship between the electrical conductivity and the penetration resistance

5 结 论

石灰炉渣加固土的压实特性受石灰炉渣的掺入量、加固土的含水率及其它因素的影响。加固土的压实质量控制仅仅测试密度和含水率是不够的。室内试验结果表明：电导率与石灰炉渣掺入量、含水率和加固土的贯入阻力有关。因此，动力触探试验（DCP）和 TDR 测试技术应用于现场，同样可以得到电导率与贯入阻力的关系，从而应用于加固土的现场质量控制。

试验结果表明：电导率与影响加固土性质的各种关键因素有关。因此，通过测试加固土的电导率变化可以检测其现场加固质量。由于 TDR 测试的范围局限于探针的长度（0.1~1 m），对应较厚的加固土层需要分层多点测量。本文尚需在现场试验结果的基础上，建立关于加固土的电导率、时间因素和掺入量的模型。

参考文献:

[1] KIM D, SIDDIKI N Z. Lime kiln dust and lime: a comparative study in Indiana[C]// 83rd TRB Annual Meeting, Washington DC. 2004.

[2] DIAMOND S, KINTER E B. Mechanisms of soil-lime stabilization: an interpretive review[J]. Highway Research Record, 1965, **92**: 83 - 102.

[3] BASMA A A, TUNCER E R. Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays[J]. Transportation Research Record, 1991, **1295**: 52 - 61.

[4] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils[J]. Engineering Geology, 1996, **42**(4): 223 - 227.

[5] BHATTACHARJA S B, JAVED I, TODRES H A. Stabilization of clay soils by portland cement or lime: a critical review of literature[C]// PCA R&D Serial No. 2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2003.

[6] BICZYSKO S J. Long-term performance of lime stabilized road subgrade[M]// Lime Stabilization. London: Thomas Telford Publisher, 1996.

[7] THOMPSON M R. Lime reactivity of Illinois soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1966, **92**(5): 67 - 92.

[8] THOMPSON M R. Engineering properties of lime-soil mixtures[J]. Journal of Materials ASTM, 1969, **4**(4): 968 - 969.

[9] LITTLE D N. Assessment of in situ structural properties of lime-stabilized clay subgrades[J]. Transportation Research Record, 1996, **1546**: 13 - 23.

[10] LITTLE D N. Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates[C]// National Lime Association, Arlington, Virginia, 2000.

[11] PUPPALA A J, MOHAMMAD L N, AARON A. Engineering behavior of lime-treated Louisiana subgrade soil[J]. Transportation Research Record, 1996, **1546**: 24 - 31.

[12] TRB. Lime stabilization: reactions, properties, design, and construction[R]// Transportation Research Board, National Research Council, Washington D C. 1987.

[13] BEEK V A, HILHORST M A. Dielectric measurements to characterize the microstructural changes of young concrete[J]. Heron, 1999, **44**(1): 1 - 17.

[14] YU X, DRNEVICH V P, OLEK J. Predicting strength development of concrete by Time Domain Reflectometry[C]// International Conference on Advances in Concrete through Science and Engineering, RILEM, Evanston, Illinois, 2004.

[15] 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. (in Chinese))

[16] BOARDMAN D I, GLENDINNING S, ROGERS C D. In situ monitoring of lime-stabilized road subgrade[J]. Transportation Research Record, 2001, **1757**: 3 - 13.

[17] YU X, DRNEVICH V P. Time domain reflectometry for compaction control of stabilized soils[J]. Transportation Research Record, 2004(b), **1868**: 14 - 22.

[18] CHEN Ren-peng, DAITA R K, DRNEVICH V P, KIM D H. Laboratory monitoring of physico-chemical process in lime kiln dust stabilized clayey soil[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 249 - 255.

[19] YU X, DRNEVICH V P. Soil water content and dry density by time domain reflectometry[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004(a), **130**(9): 922 - 934.

[20] JANOO V C, FRICANO A J, BARNA L A, ORCHINO S A. Field testing of stabilized soils[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1999, **31**(1): 37 - 53.

[21] PERSSON M, BERNDTSSON R. Noninvasive water content and electrical conductivity laboratory measurements using time domain reflectometry[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, **62**(6): 1471 - 1476.

[22] JONES S B, OR D. Frequency domain analysis for extending time domain reflectometry water content measurement in highly saline soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, **68**(5): 1568 - 1577.

[23] Geiman C M, Filz G M, Brandon T. Stabilization of soft clay subgrades in virginia: phase I laboratory study [R]// Virginia Transportation Research Council, 2005.

[24] TOPP G C, DAVIS J L. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission line[J]. Water Resource Research, 1980, **6**(3): 574 - 582.

中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议信息

据中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议第 3 号通知, 由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主办、中国人民解放军后勤工程学院等单位承办的第十届土力学及岩土工程学术会议将于 2007 年 11 月 1 日~4 日在重庆举行。经过会务组认真的前期筹备工作, 目前会议论文的录用通知已经寄发给作者, 5 月 31 日为论文修改稿返回的截止日期。

会议期间将有 8 个综述报告和 12 个特邀报告, 报告专家包括国际土力学及岩土工程学会主席 Pinto 教授、张在明院士、郑颖人院士等著名学者。综述报告和特邀报告的主题和报告人拟定如下:

综述报告	
报告内容	报告人
1 土的基本性质测试技术	蔡正银, 魏汝龙
2 基础工程	周宏磊, 郑刚, 高温生, 张在明
3 地基处理	郑刚, 叶阳生, 刘松玉, 龚晓南
4 地下工程及深基坑	黄茂松, 宋二祥, 王卫东
5 滑坡	王恭先, 马惠民
6 土工构筑物及边坡	李青云, 汪稔, 孔令伟, 包承纲
7 土动力学及岩土地震工程	张建民, 王兰民, 栾茂田
8 环境岩土工程的进展和展望	陈云敏, 张建红, 施建勇

特邀报告

	报告内容	报告人
1	Geoenvironmental engineering	Prof. Pinto
2	奥运工程	张在明
3	我国高土石坝建设成就与展望	张宗亮
4	岩土工程的工作方法	李广信
5	我国地质灾害防治	殷跃平
6	海底隧道	李术才
7	高层建筑	王卫东
8	非饱和土	陈正汉
9	边坡工程中的技术问题	郑颖人
10	港湾工程	吴澎 (在考虑中)
11	新技术与新材料	刘汉龙
12	信息技术在岩土工程中的应用	汪学宁 (在考虑中)

会议期间, 恰逢中国土木工程学会土力学及岩土工程分会成立五十周年 (1957~2007)。学会将举行庆祝活动, 特编辑出版土力学及岩土工程分会纪念文集暨画册, 并免费赠予与会代表。

会议的有关事项可以联系会务组, 联系人: 李秀地博士, 地址: 重庆市渝州路 79 号后勤工程学院建筑系地下教研室 (400041), 电子邮件: librte@163.com, 电话: 023-68598052, 13508386471, 传真: 023-68598052。

(本刊编辑部)