

含盐量对软黏土电渗排水影响的试验研究

李瑛，龚晓南

(浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室，浙江 杭州 310058)

摘要：为了研究土体含盐量对软黏土电渗排水的影响，在自制的试验槽里进行室内一维试验，利用试验数据从排水量、排水速率、能量消耗、含水率和电化学反应等5方面对电渗性状进行对比分析。试验结果表明：含盐量对软黏土电渗性状有着明显影响，并存在最佳含盐量；较高的含盐量不利于电渗排水和含水率降低，而且会导致能量消耗、阳极腐蚀量和电渗后酸碱不平衡较大；能量消耗系数、阳极腐蚀百分比和排水速率与电流强度的比值这3者都与土体含盐量存在一定的定量关系。试验结果能为判别电渗的工程适宜性提供一定的参考依据。

关键词：电渗排水；土体含盐量；能量消耗；电极腐蚀；电化学反应

中图分类号：TU411 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2011)08-1254-06

作者简介：李瑛(1985-)，男，江西九江人，博士研究生，从事软黏土地基处理及土力学研究。E-mail: liying3104@163.com。

Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmotic dewatering in soft clay

LI Ying, GONG Xiao-nan

(MOE Key Laboratory of Soft Soil and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: A one-dimensional laboratory test program is conducted to study the effect of soil salinity on electro-osmotic dewatering in soft clay. Five indexes including discharge, dewatering rate, coefficient of energy consumption, reduction in water content and electro-chemical reaction are compared to analyze the electro-osmotic characters of different saline clays. The results show that the soil salinity has obvious effect on the electro-osmotic dewatering in soft clay and there is an optimal salinity for some type of clay. A higher salinity will lead to larger energy consumption, more anode corrosion and larger variation of pH value, while a lower salinity is better for drainage and reduction of water content. Moreover, there is some quantitative relationship between the coefficient of energy consumption and the soil salinity, and percent of anode corrosion and ration of drainage rate to current intensity are similar to coefficient of energy consumption. It may provide some reference for judging the suitability of electro-osmotic dewatering in practice.

Key words: electro-osmotic dewatering; soil salinity; energy consumption; electrode corrosion; electro-chemical reaction

0 引言

随着吹填造陆和河道清淤的增多，如何处理高含水率、低抗剪强度和弱渗透性的软黏土逐渐成为岩土工程界的热点问题之一。真空预压和堆载预压等传统加固方式受制于土体渗透系数，排水速率缓慢，有时甚至难以达到预期的加固目的。电渗排水速率与土体渗透性无关的特点因此被提起，并在工程实践中得到越来越多的应用机会。

电渗在土木工程中的应用已经有很长历史，1939年Cassagrande用其加固德国某铁路挖方工程^[1]。此后其应用范围不断扩大，相应的研究也不断增多。Bjerrum等^[2]用电渗来提高处于挪威流黏土边坡上的

基坑的稳定性，处理后土体的平均不排水抗剪强度是之前的4倍。通过精心设计电极结构和使用电极转换技术，Lo等^[3]以较低的能耗和花费加固了加拿大某空军基地。Micic等^[4]试图用间歇通电来提高海相沉积黏土的电渗效率，虽然土体的抗剪强度得到一定提高，但阳极的腐蚀十分严重，总体效果不明显。Chew等^[5]用中间插入铜丝的塑料排水板(PVD)替代金属电极来处理新加坡海边围垦区，电极腐蚀得到有效抑制，但是处理效果没有得到有效提高。Kalumba等^[6]用与PVD性质类似的新型电动土工合成材料(EKG)来处

理隧道淤泥, 却获得满意的效果。这些工程资料说明电渗并不适用于所用类型的土体。

进一步的分析表明: 电渗成功的例子都是在低含盐量的黏土中, 即孔隙水含盐量低于 2 gNaCl/L , 或土体电导率不超过 0.25 S/m ^[7]; 而在高含盐量海相黏土中的电渗效果都不理想。高盐分黏土中的电渗主要涉及到两方面的问题, 高电导率造成的过大能量消耗和电化学反应导致的金属阳极严重腐蚀^[8]。它们的存在使得土体中的电渗流明显减小或完全消除。此外也有试验资料表明, 低含盐量时土体盐分的增加能加速电渗排水。这说明存在电渗排水最佳含盐量^[9]。

然而以往的电渗研究偏重电渗的效果和经济性, 如利用电极转换^[10]、间歇通电^[4]或注入化学浆液改善阳极接触^[11]等技术手段来提高电渗处理效果等。极少有人专门从土体含盐量的角度来研究电渗排水。本文利用自研的仪器来进行室内一维电渗试验, 以研究土体含盐多少对电渗性状的影响, 以期对电渗的生产实践有所裨益。

1 试验方案

1.1 试验设计

含盐量是试验的唯一变量, 其他参数保持一致。出于分析的方便, 试验条件为一维情况。黏土目标含水率为 70%, 大概为液限的 1.5 倍。试验采用稳压输出模式, 电压为 20 V, 即电势梯度为 1 V/cm 。试验时间为 32 h。电极采用金属材料。鉴于孔隙水含盐量与土体含水率有关, 不便于试验控制和分析, 本试验采用土体含盐量来量化黏土中易溶盐的多少。

海相黏土的含盐量较高, 一般为 2%~3%。考虑到高含盐量时阳极的严重腐蚀易使电路断开, 以及土体的最佳含盐量在低含盐范围, 因此研究低含盐量范围内的电渗更有实际意义, 故本试验研究的含盐量范围为 0%~1.0%。

为了较全面地比较不同含盐量下电渗性状的不同, 试验后需对排水速率、电能消耗、含水率降低、pH 值变化以及阳极腐蚀量进行分析, 因此在试验过程中需要定时监测排水量和电流强度, 试验前后测定土体的含水率、pH 值和阳极的质量。

1.2 试验装置

图 1 所示的改进型 Miller soil box 主要由左侧的试样盒和右侧的集水箱组成。安放土样的试样盒的长宽高为 $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。阳极和阴极均为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的低碳镀锌电焊网, 网眼为 $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 。电渗汇集到阴极的水从试样盒流到集水箱中, 进而流入放置在集水箱下面的量筒中进行体积测量。放

置在阴极板和土体之间的土工布用作反滤层。试验电路图也在图 1 (a) 中一并给出。由于电极自身的厚度, 阴极和阳极的实际距离只有 19 cm。

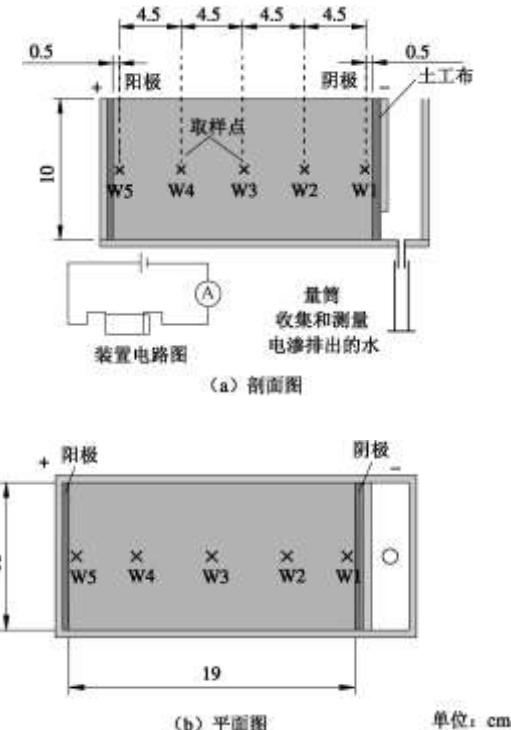


图 1 含盐量试验装置图

Fig. 1 Setup for salinity tests

1.3 试验土样

试验土料取自杭州三墩, 原状土的基本物理力学性质: 黏土 $\gamma = 16.8 \text{ kN/m}^3$, $G_s = 2.73$, $e = 1.52$, $w = 55.5\%$, $S_r = 99.7\%$, $w_L = 52\%$, $w_p = 22\%$ 。原状土风干碾碎成干粉后铺入托盘, 并按 1:5 的土水质量比浸水搅拌均匀, 待溶液澄清后用吸管将清液排出。如此反复进行数次, 以尽可能使土样变成素土^[12]。将素土烘干、碾碎, 过 1 mm 筛备用。根据试样的体积、含水率和含盐量计算并量取相应的干粉、水和盐。先将盐完全溶入水, 再用盐水制作土样。盐用 NaCl 代替。土样的含盐量依次为 0%、0.25%、0.5% 和 1.0%。

1.4 试验步骤

整套试验由 4 个小试验组成, 试验条件汇总在表 1 中。每个试验的程序: 在试验盒中安装电极, 分层密实装填土样; 连接线路和电表; 静置 24 h 后, 接通电源, 开始电渗。试验中, 定时记录电流表和量筒的读数。试验结束后, 按图 1 所示的 5 个位置(W1~W5)取样进行含水率测试。并将含水率测试的烘干土样碾碎过筛, 以 1:5 的土水质量比配置成悬浊液, 用玻璃棒搅拌 1 min 后静止 0.5 h, 取其上部清液进行 pH 值测试。试验前后阳极的质量也被测量。由于试样搅拌过程中采用的是自来水, 故电渗前土样为酸性, pH 值

接近 6.0, 同自来水的相同。此外, 为了监测电渗过程中实际作用在土体上的电势梯度, 两根直径 1 mm 的不锈钢丝分别按图 1 标示的 W1 和 W5 的位置插入 T1 和 T4 的试样中用作电势测针。

表 1 试验条件汇总表

Table 1 Summary of test conditions

试验 编号	土体含 盐量/%	初始含水率 /%	初始 pH	阳极 质量/g
T1	0	69.99	5.7	15.991
T2	0.25	70.29	6.0	16.614
T3	0.5	69.74	5.9	16.204
T4	1	70.61	5.7	16.157

2 试验结果

2.1 排水量

图 2 显示了电渗排水量和通电时间之间的关系。电渗排水量随通电的延长而不断增大, 但是增大的速率越来越小。刚开始的几个小时内, 土体的含盐量似乎对电渗排水没有影响, 排水量和通电时间近似成线性关系; 其后, T3 和 T4 的增长速率要比 T1 和 T2 慢得多, 以致后它们后 24 h 的排水量只占总排水量的 47.6% 和 34.2%, 而 T1 和 T2 的却高达 61.5% 和 59.7%。

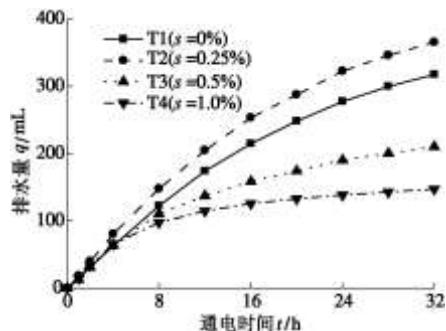


图 2 电渗排水曲线

Fig. 2 Volumes of drainage during electro-osmotic dewatering

图 2 还显示: 排水量最大的土样的含盐量为 0.25% (T2)。它们之间的关系进一步显示在图 3。曲线清晰地显示最佳含盐量在 0.25% 附近。通电 1 h 后, 4 个试样的电渗排水量相差不大; 到了 8 h, T2 的排水量明显比其他的 3 个试样大; 其后, 这种优势越发明显。图 3 还显示, 在 0%~0.25% 和 0.5%~1.0% 这 2 个含盐量范围内, 电渗排水量的变化幅度不大; 而在 0.25%~0.5% 的范围内, 含盐量对排水量的影响较大; 因此最佳含盐量应该比 0.25% 小。

2.2 排水速率

图 4 显示的电渗排水速率曲线再次印证了排水量部分得出的结论。电渗的初期, 4 个试样的排水速率相差不大; T1 和 T2 的排水速率比较接近; T3 和 T4 的排水速率相差很小; 随着电渗的进行, 所有试样的排水速率都不断变缓, 但是高含盐量的要比低含盐量

的快得多, T3 和 T4 以很短的时间便降低到较小的排水速率。

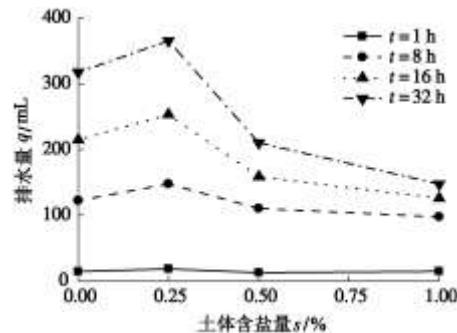


图 3 电渗排水量与土体含盐量的关系

Fig. 3 Relationship between electro-osmotic drainage and salinity

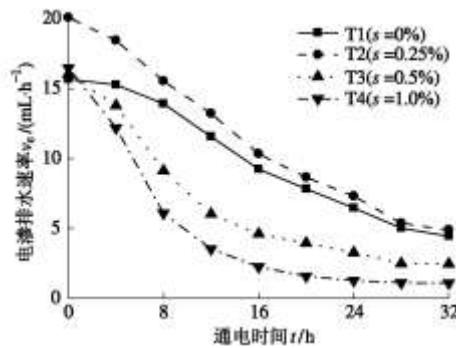


图 4 电渗排水速率

Fig. 4 Variation of electro-osmotic drainage rate with time

根据 Esrig 的理论^[13], 电渗排水速率可以表述为

$$v_e = k_e EA \quad , \quad (1)$$

式中, v_e 为电渗排水速率 (ml/s), k_e 为土体的电渗透系数 ($\text{cm}^2/\text{h V}$), E 为施加在阴极和阳极之间的电势梯度 (V/cm), A 为通过水流或电流的土体横截面积 (cm^2)。

土样的横截面积 A 在试验中可认为保持不变。由于在电极和土体的接触面上存在接触电阻, 实际用于土体电渗的电势梯度并不等于电源电压和电极间距的商, 而应该是实际作用在土体两端的电压差除以土样长度。本试验中, W1 处的测针与阴极、W5 处的测针与阳极之间的距离均为 0.5 cm, 相对于土样的长度和截面尺寸很小, 故可近似地将两测针处测量的电势之差认为是实际作用在土体上的有效电势差。对 T1 和 T4 的电势监测结果表明电渗过程中实际作用在土体两端的平均有效电势梯度 E' 也可认为不变, 如图 5 所示, 大部分的电势数据点都落入 0.64~0.74 的区间。那么, 根据式 (1), 电渗渗透系数 k_e 和通电时间 t 之间的关系应该和图 4 类似。

如果式 (1) 中的电势梯度用电流强度代替, 则有

$$v_e = k_e \rho I \quad , \quad (2)$$

式中, ρ 为土体的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$), I 为电路中的电流强度 (A)。

图 6 表明电渗排水速率和电流强度大致成线性关系, 而且直线的斜率和土体含盐量有关, 高含盐量对应的是小斜率。根据式(2), 这说明, 对某一含盐量的黏土而言, 电渗渗透系数和电阻率的乘积 $k_e \rho$ 在电渗过程中基本保持不变。图 7 给出了 $k_e \rho$ 与含盐量之间的曲线, 拟合后为一阶递减指数曲线:

$$k_e \rho = 17.2 + 114.7 e^{-3.32s} \quad , \quad (3)$$

式中, $k_e \rho$ 的单位为 $\text{ml}/(\text{A} \cdot \text{h})$, 含盐量 s 的单位为%。

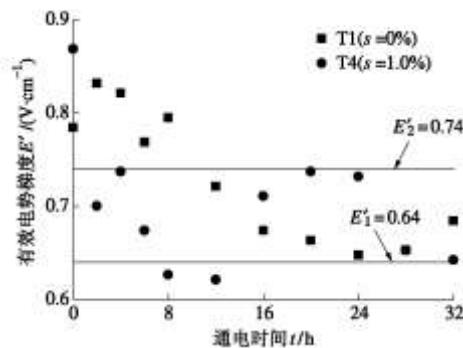


图 5 平均有效电势梯度

Fig. 5 Average effective voltage gradient

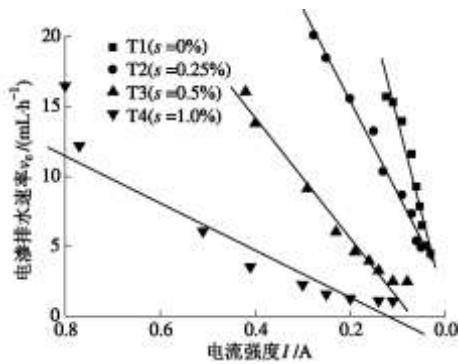


图 6 电渗排水速率和电流强度的关系

Fig. 6 Relationship between drainage rate and electric current

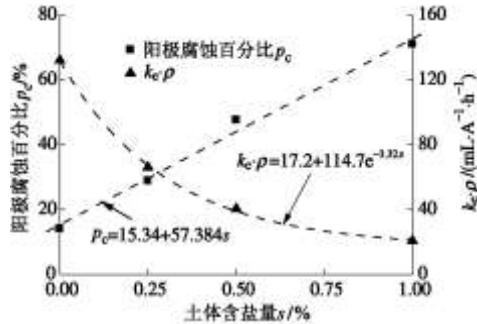


图 7 不同含盐量下的 $k_e \rho$ 和阳极腐蚀百分比

Fig. 7 $k_e \rho$ and anode corrosion percentage under different salinities

2.3 能量消耗

图 8 为不同含盐量土体的电流强度随通电时间的

变化曲线。电流变化的总体趋势是先短暂增大然后不断减小, 含盐量越高, 波峰越明显, 其后衰减的速率也越快。含盐量高的土, 电阻率小, 电流强度大。小电阻率有利降低能耗, 而大电流强度对应高能耗。为了比较不同含盐量土样电渗的能量消耗, 定义能耗系数:

$$C = \frac{1}{q_t V} \int_0^t 20I_\tau d\tau \quad . \quad (4)$$

式中 q_t 为 t 时间内电渗排出水的总体积 (ml); V 表示电渗处理土样的体积, 本试验中为定值 $1.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$; I_τ 表示 t 时间内某一时刻 τ 土体中的电流 (A); 能耗系数 C 的单位为 $\text{kWh}/(\text{L} \cdot \text{m}^3)$, 即用电渗从单位体积的土体中排出 1L 水所消耗的能量, 通电时间 t 的单位为 h。

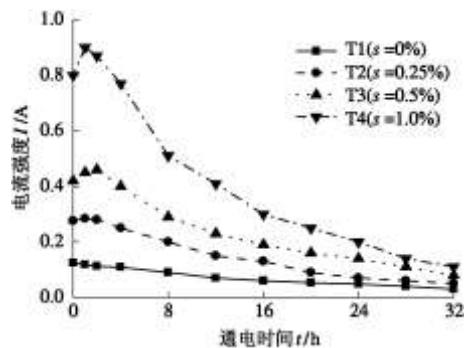


图 8 电流随时间变化曲线

Fig. 8 Variation of current with time

图 9 显示, 能耗系数随着土体含盐量的增加而不断增大, 且在 0.25%~1.0% 的范围内随含盐量近似线性增加。低含盐量 2 个试样 (T1 和 T2) 的能耗系数基本不随通电时间变化; 而 T3 和 T4 的随时间的延长而不断增大, 但是增速逐渐变小。定义图 9 中从 0.25% 到 1.0% 范围内的直线段的斜率为 B ,

$$B = \frac{C_s - C_{0.25}}{s - 0.25} \quad (0.25 < s \leq 1.0) \quad , \quad (5)$$

式中, C_s 和 $C_{0.25}$ 分别为土体含盐量为 s 和 0.25% 的能耗系数 ($\text{kWh}/(\text{L} \cdot \text{m}^3)$)。

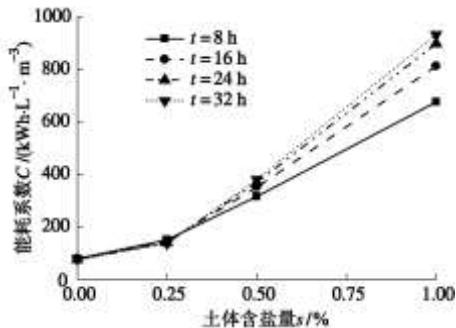


图 9 不同通电时间时的能耗系数

Fig. 9 Energy consumption coefficients after different treating

time

利用试验数据可以计算出各个时间观测点的 B 值, B 与通电时间之间的关系显示在图 10 中, 为一抛物线。即能耗系数 C 是土体含盐量 s 和通电时间 t 的函数,

$$\frac{C_s - 150}{s - 0.25} = 409.1 + 40.6t - 0.63t^2 \quad , \quad (6)$$

式中, s 的取值范围为 0.25%~1.0%。由于含盐量为 0.25% 时的能耗系数 $C_{0.25}$ 随通电时间变化不大, 故在式(6)中用其平均值 150 kWh/(L m³)代替。

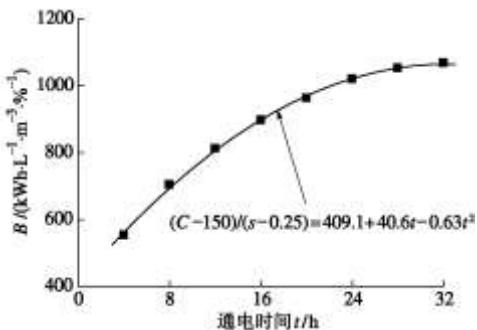


图 10 B 与通电时间之间的关系

Fig. 10 Relationship between B and working time

2.4 含水率

如前所述, 低含盐量有利于电渗排水和降低能耗。电渗处理的目的是提高土体的抗剪强度, 电渗后土体的含水率自然是需要关注的指标。图 11 显示了电渗后含水率降低量在土样长度方向的分布。虽然数据有些紊乱, 但是一些规律还是能得出。阳极附近含水率降低最多, 两极之间的次之, 阴极附近降低最小。整体而言, 含盐量对含水率降低的影响与含盐量对排水量的类似, 依次为: T2>T1>T3>T4。但是 T3 和 T4 在含水率降低量上的差别要大于排水量上的, 这与水的电解有关, 如图 12。在靠近电极的地方含水率之间的关系稍有变化: 在阳极附近, 4 个试样电渗后的含水率相差不大; 在阴极附近, T1 和 T2 的含水率较接近, T3 和 T4 的也较接近, 而且低含盐量的要比高含盐量的小 10% 左右。电渗排水量的差异和电渗流的方向可能是含水率分布不同的原因。因为土体中的水在电场作用下从阳极向阴极流动, 即可认为先排阳极附近土体的水, 然后慢慢向阴极靠拢, 所以阳极的含水率差不多, 而排水量的不同只能体现在阴极附近的土体上。

土体含水率的降低并不完全是电渗的作用, 因为在直流电的作用下电解是不可避免的。假定黏土颗粒没有随电渗流排出, 那么可以通过比较收集到的水的体积和土样电渗前后的质量差来近似计算电解水的体积。二者基本相等的话, 电解作用可以忽略; 如果不相等, 二者之差即电解水的体积。电解水的体积和土

体含盐量的关系显示在图 12 中, 图中一并给出了电渗 32 h 后的排水量。电解水量最大的是 T3, 有 91 ml, 占电渗排水量的 43.3%; T1 的最小, 为 11 ml, 只占电渗排水量的 3.5%; T2 和 T4 电解水的体积相当, 都为 24 ml, 但是占电渗排水量的百分比相差较大, 分别为 6.4% 和 16.5%, 这与电渗排水量相差较大有关。

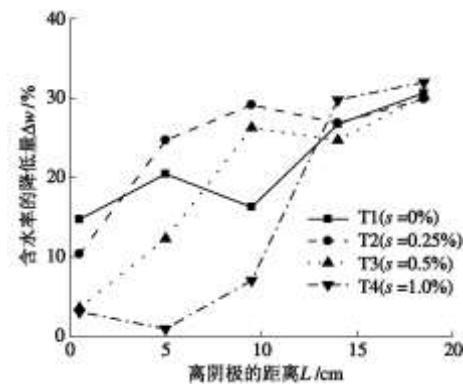


图 11 电渗后含水率降低量的分布

Fig. 11 Profiles of reduction value of water content after treatment

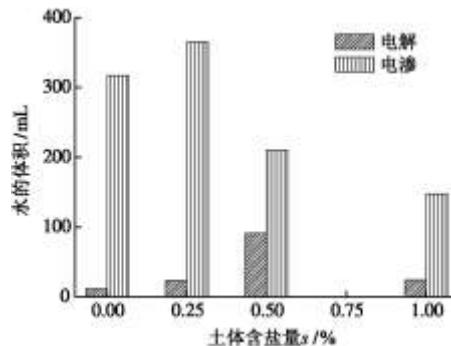
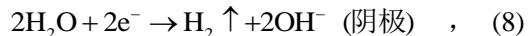
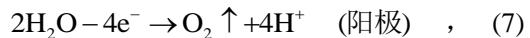


图 12 电解耗水量和电渗排水量

Fig. 12 Volumes of water removed by electrolysis and electro-osmosis

2.5 电化学反应



如式(7)、(8)所示, 电解反应导致 H^+ 在阳极生成, OH^- 在阴极生成。阳极的酸性环境导致土体 pH 值的降低和电极的腐蚀, 如式(9)所示; 阴极的碱性环境则会促使钙镁的难溶物生成。式(9)中的 M 表示电极金属。这些反应会导致阳极附近和阴极附近的 pH 值发生变化, 图 13 显示了电渗结束后土体 pH 值沿土样长度方向的分布情况。T1 中电解水的体积和阳极的腐蚀量都是 4 个试样中最小的, 所以 pH 值变化很小。T2 中的电解和电蚀都要比 T1 略强, 故酸碱度变化也要大一些。水的电解在 T3 中最多, 阳极腐蚀最严重的是 T4, 所以它们的 pH 值变化都较大。图 7 还显示

阳极的腐蚀百分比和土体含盐量成线性关系, 并可以用下方方程拟合:

$$p_c = 15.34 + 57.384s \quad (10)$$

式中, p_c 表示阳极腐蚀量占阳极初始质量的百分数(%), 土体含盐量 s 的单位也为%。

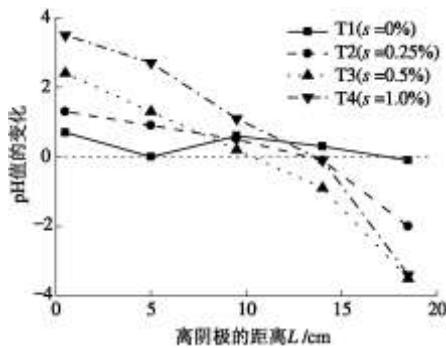


图 13 电渗后土体 pH 值的变化

Fig. 13 Final distribution of pH variation in treated samples

3 结 论

(1) 通过室内一维电渗试验, 专门研究了土体含盐量对软黏土电渗的影响, 并从排水量、排水速率、能量消耗、含水率和电化学反应等 5 方面进行了对比分析。

(2) 含盐量对软黏土电渗性状有着明显影响, 并存在最佳含盐量。较高的含盐量不利于电渗排水和含水率的降低, 而且会导致能量消耗、阳极腐蚀量和电渗后酸碱不平衡较大。

(3) 在最佳含盐量时, 电渗的处理效果最好, 排水量、排水速率和含水率降低量都是最大的, 能量消耗和电化学反应都较小。

(4) 在电渗的过程中, 阳极腐蚀和水的电解等电化学反应是不可避免的。电化学反应导致阳极附近呈酸性, 阴极附近呈碱性。阳极腐蚀百分比与土体含盐量之间呈线性关系。

(5) 电渗的能耗系数是含盐量和通电时间的函数。在 0.25%~1.0% 的含盐量范围内, 能耗系数与含盐量大致呈线性关系; 含盐量小于此值时, 能耗系数随通电时间变化不大。

(6) 电渗排水速率与电流强度呈线性关系, 直线斜率与含盐量成一阶指数关系, 高含盐量对应的是低斜率。

参考文献:

- [1] CASSAGANDE L. Electro-osmosis in soils[J]. Geotechnique, 1949, 1: 159~177.
- [2] BJERRUM L, MOUM J, EIDE O. Application of

electro-osmosis to a foundation problem in a norwegian quick clay[J]. Geotechnique, 1967, 17: 214~235.

- [3] LO K Y, HO K S, INCULET I I. Field test of electroosmotic strengthening of soft sensitive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 74~83.
- [4] MICIC S, SHANG J Q, LO K Y, et al. Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38: 287~302.
- [5] CHEW S H, KARUNARATNE G P, KUMA V M, et al. A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2004, 22: 17~35.
- [6] KALUMBA D, GLENDINNING S, ROGERS C D F, et al. Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2009, 135(11): 1227~1236.
- [7] MITCHELL J K. Conductive phenomena: from theory to geotechnical practice[J]. Geotechnique, 1991, 41(3): 299~340.
- [8] FOURIE A B, JOHNS D G, JONES C J F P. Dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(2): 160~172.
- [9] SHANG J Q, LO K Y. Electrokinetic dewatering of a phosphate clay[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 55: 117~133.
- [10] 王协群, 邹维列. 电渗排水法加固湖相软黏土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 34(2): 95~99. (WANG Xie-qun, ZOU Wei-lie. Experimental research on electro-osmotic consolidation of lacustrine clay[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 34(2): 95~99. (in Chinese))
- [11] GUY L, FABIEN B. Improvements of electroosmotic consolidation of soft clays by minimizing power loss at electrodes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(2): 399~408.
- [12] 柴寿喜, 王晓燕, 仲晓梅, 等. 含盐量对石灰固化滨海盐渍土稠度和击实性能的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3066~3070. (CHAI Shou-xi, WANG Xiao-yan, ZHONG Xiao-mei, et al. Different salt contents effect on consistency and compactness of saline soil in inshore with lime[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3066~3070. (in Chinese))
- [13] ESRIG M I. Pore pressure, consolidation and electrokinetics[J]. Journal of the Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(SM4): 899~921.

第33卷 第8期
2011年 8月

岩 土 工 程 学 报
Chinese Journal of Geotechnical Engineering

Vol. 33 No. 8
Aug. 2011
