

文章编号: 1000-7598-(2008) 09-2409-06

边坡电渗模型试验及能量分析法数值模拟

庄艳峰^{1,2}, 王 钊³, 陈 轮^{1,2}

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘 要: 采用导电塑料制成的电动土工合成材料(EKG)进行了 15.5 d 的边坡电渗加固试验, 测定了电渗之后土体等含水率分布曲线。试验结果表明, 电渗加固效果是随时间从阳极到阴极逐渐扩展的, 因此, 越靠近阳极接入点的土体加固效果越好, 越靠近阴极末端的土体加固效果越差。提出了电渗能量分析法, 该方法仅要求黏性土体在排水固结开始的初始时刻是处于饱和状态, 而在排水固结进行的过程中土体可以是饱和的, 也可以是非饱和的。提出了基于能量分析法的电渗过程数值模拟方法, 并对试验过程进行了数值模拟, 模拟结果与实测结果能够较为吻合。

关 键 词: 电动土工合成材料; 电渗; 边坡加固; 能量分析法; 非饱和土

中图分类号: TU411

文献标识码: A

Model test of slope reinforcement through electro-osmosis and its numerical simulation based on energy analysis method

ZHUANG Yan-feng^{1,2}, WANG Zhao³, CHEN Lun^{1,2}

(1. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Model test of slope reinforcement through electro-osmosis is conducted; the electro-kinetic geosynthetics (EKG) was adopted as electrodes in the test. Isolines of water content of the soil after 15.5 days of electro-osmosis were tested. Test result shows that electro-osmotic consolidated zone extended from anode to cathode gradually. Soil around EKG anode near the wire holder of electrode positive had the strongest effect of consolidation; on the contrary, soil around EKG cathode far away from the wire holder of electrode negative had the weakest effect of consolidation. Energy analysis method for electro-osmosis is presented. This method is applicable for both saturated and unsaturated soils during the drainage consolidation process, if only the soil is saturated at the beginning of consolidation process. Numerical simulation method for electro-osmosis based on energy analysis method is presented. Numerical simulation result shows good accordance with the tested result.

Key words: electro-kinetic geosynthetics; electro-osmosis; slope reinforcement; energy analysis method; unsaturated soil

1 引 言

在一些不得不采用黏性土, 甚至是饱和软黏土作填料堆堤坡的情况下, 堤坡本身在自重作用下就很难保持稳定, 更无法采用堆载的方法进行排水固结。在这种情况下, 采用电渗排水的方法进行加固就很合适。对于软黏土边坡, 电渗法的优点在于排水速度比堆载法快, 并且在土体内部产生的是负孔隙水压力, 不会像堆载法那样因为超静孔隙水压力而产生稳定性问题。

近来研制发展的 EKG 材料(电动土工合成材料)很适合用于此类边坡加固工程中。EKG 材料是由导电塑料制成, 与传统的金属电渗电极相比, 具有不会被腐蚀、可方便采用电极转换技术、可将加筋和排水功能相结合等优点^[1-3]。本文采用 EKG 作电极进行软黏土边坡电渗排水加固模型试验, 并采用能量分析法对边坡电渗过程进行数值模拟。

现有电渗理论不适合于分析边坡电渗排水加固的原因主要有^[4-6]:

(1)现有的电渗理论在推导过程中都假定排水

收稿日期: 2006-12-23

基金项目: 非饱和土坡变形机制和 FRP 螺旋锚护坡技术的研究 (No. 50279036); 中国博士后科学基金 (No. 2005038041)。

作者简介: 庄艳峰, 男, 1978 年生, 博士后, 主要从事土工合成材料和软土固结的科研工作。E-mail: zhuang@mails.tsinghua.edu.cn

量等于体积压缩量, 这个关系只适合于饱和土, 因此, 现有电渗理论实际上都暗含了土体在电渗过程中始终处于饱和状态这一假定, 而在软黏土边坡电渗排水加固的过程中土体将逐渐从饱和状态变为非饱和状态。

(2) 现有的电渗理论假定电势呈线性分布, 这一点也与边坡电渗排水加固的实际情况不符合。在边坡电渗排水加固过程中, 土体是从阳极到阴极逐渐干燥的, 土体中的吸力也是从阳极到阴极逐渐产生并增长的, 因此, 土体中的电势也不是线性分布的, 靠近阳极电势梯度大, 靠近阴极电势梯度小。

(3) 现有的电渗理论将电渗产生的吸力等价于有效应力, 再根据有效应力原理以及应力-应变关系进行计算。但是电渗过程中, 吸力究竟能够产生多大的固结效果尚无一个明确的认识。换言之, 电渗过程中非饱和土体的应力-应变关系尚无一个很好的本构模型来加以描述。

为此, 笔者提出了能量分析法对软黏土边坡电渗排水加固过程进行分析。该方法的优点在于^[7]:

(1) 仅要求黏性土体在排水固结开始的初始时刻是处于饱和状态, 而在排水固结进行的过程中土体可以是饱和的, 也可以是非饱和的。

(2) 直接把排水过程看作一个能量消耗的过程, 而不去区分这部分能量有多少用于土体固结, 有多少用于产生吸力, 在分析过程中避开了吸力这个量。

(3) 结合试验得到的土体电导率和含水率的关系, 在能量分析法数值模拟中, 可以根据土体含水率计算电场分布情况, 取消了电势呈线性分布这一人为假定。

2 边坡电渗加固模型试验

2.1 土样的制备

试验所使用的土体取自于中国科学院武汉岩土力学研究所, 土体的液限 $w_L = 44.17\%$; 塑限 $w_p = 19.25\%$; 塑性指数 $I_p = 24.92 > 17$; 该土为黏性土。将土加水调匀, 静置 24 h 后测定其含水率为 37.53%。

2.2 电极的制备

试验采用导电塑料电极^[8]。阴、阳电极各 3 排, 每排电极由 18 根导电塑料和 10 cm 宽的土工织物缝制而成。试验所用的土工织物为针刺无纺布, 其性能参数如表 1 所示。导电塑料的平均直径为 1.5 mm, 电阻率为 $0.064 \Omega \cdot m$ 。阳极长度为 34 cm, 阴极长度为 75 cm。每根电极上导电塑料丝的一端都

通过端子排接线柱引出导线, 这样做的目的是为了保证各个导电塑料丝与电源的良好接触。电极的实物照片如图 1 所示。

表 1 试验所用土工织物的技术指标

Table 1 Properties of the geotextile adopted in the test

单位面积质量 / $g \cdot m^{-2}$	厚度 / mm	纵向抗拉强度 / $N \cdot cm^{-1}$		渗透系数 / $cm \cdot s^{-1}$	等效孔径 O_{95}/mm
		干态	湿态		
150	1.3	45	22	0.37	0.07

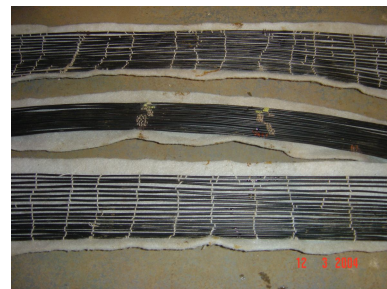


图 1 EKG 电极实物照片

Fig.1 Photo of EKG electrodes

2.3 边坡模型的填筑

模型的尺寸如下: 上底为 43 cm, 下底为 83 cm, 宽为 30 cm, 坡角为 49° 。边坡的总高度为 46 cm, 其中正负电极之间的电渗处理层高度为 30 cm, 正负电极之外分别是 6 cm 厚的上覆层和 10 cm 厚的下垫层 (如图 2 所示)。用于填筑边坡的湿土总重为 160.91 kg, 填土时 5 cm 一击实, 干密度控制在 $1.35 g/cm^3$ 。填筑之后的土体, 经取样测定, 其电渗之前的渗透系数 $K_h = 7.60 \times 10^{-8} cm/s$, $c = 5.10 kPa$, $\phi = 2.04^\circ$ 。

原计划阴阳极的电极都是满铺埋设的, 但由于边坡的坡面一侧无支挡, 因此, 在填筑时有所偏差, 造成阳极处电极长度不够, 无法满铺。如图 2 所示, 阳极处有 15 cm 的长度未铺电极。电极铺设时让导电塑料直接与土体接触。

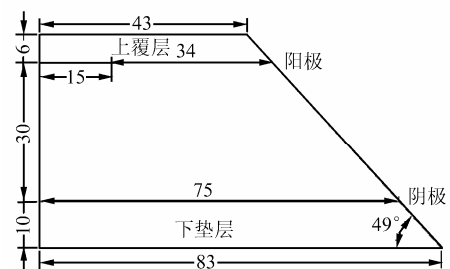


图 2 边坡模型简图 (单位: cm)

Fig.2 Sketch of slope model (unit: cm)

模型的边界条件为: 上覆层表面以及斜坡面直接与大气接触; 边坡模型的其余各个表面都预先铺上一层防水布; 上覆层底部铺设防水布, 模拟阳极处的不透水边界; 下垫层上部铺设无纺织物, 模拟阴极处的透水边界。

试验电源采用中川集团上海振华稳压器厂出产的 WYJ 系列高精度直流稳压稳流电源, 该电源系 0~60 V/5 A 可调式直流单路稳压电源, 电压在 0~60 V 范围内连续可调, 电流在 0~5 A 范围内连续可调。

2.4 电渗加固之后的边坡等含水率曲线

电渗加固过程持续 372.07 h (约 15.5 d) 之后在边坡模型内部的不同位置取样测定土体的含水率, 含水率测点的位置如图 3 所示, 根据测得的含水率数据插值作出等含水率曲线如图 4 所示。

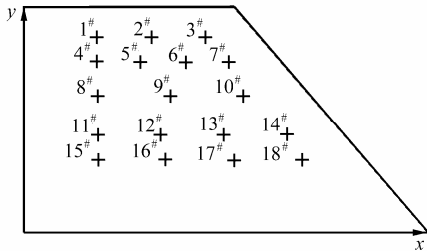


图3 边坡内部土体含水率测点分布图

Fig.3 Location of water content detected points

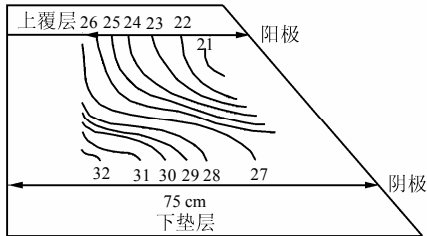


图4 电渗之后土体的等含水率实测曲线 (单位: %)

Fig.4 Tested isolines of water content after electro-osmosis (unit: %)

等含水率曲线直观地反映了阴阳电极之间电渗效果的空间差异性。从图 4 可以看出, 等含水率曲线基本上有两个曲率中心, 一个是阳极的接入点, 一个是阴极的末端。产生这种曲线形状的原因如下: 阳极和阴极的接入点是各自电极上电场最强的点, 而各自的末端则是电场最弱的点。又由于土体电渗是在阳极封闭阴极排水的边界条件下进行的, 土中水在电场作用下从阳极流向阴极, 因此阳极上电场最强的点就逐渐成为含水率最小的点, 而阴极上电场最弱的点就逐渐成为含水率最高的点, 这样就形成了如上所测的等含水率曲线形状。另外, 倾斜的边坡使得阴阳两电极的长度不同, 使电场的边界条

件更为复杂, 这也对等含水率曲线的形状有影响。

该试验中的电渗问题与传统地基电渗处理的区别主要有: 导电电极本身的电阻不能够忽略, 因此整个电极不能够看作一个等势体, 这增加了电渗问题理论分析的维度; 倾斜的边坡使得电场边界条件复杂化; 电渗排水不是井点管排水方式, 而是设置水平排水层将排向阴极的水引出, 需要考虑电渗排水的方向与水自重的影响。

对于这样一个边坡模型, 笔者采用了基于能量分析法的数值计算方法进行了模拟。该试验结果可以为理论计算提供一个试验对照, 评价理论分析方法的有效性。

3 电渗能量分析法的基本方程

能量分析法的基本方程如下^[7]:

$$\nabla \bar{q} = k_E \frac{\partial E_s}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $\bar{q}$ 为排水流速矢量 (m/s); E_s 为土体的能级密度 (J/m³); t 为时间 (s); k_E 为能量系数 (Pa⁻¹); ∇ 为哈密顿算子。

$$\bar{q} = k_{qx} \frac{\partial (E_f - E_s)}{\partial x} \bar{i} + k_{qy} \frac{\partial (E_f - E_s)}{\partial y} \bar{j} + k_{qz} \frac{\partial (E_f - E_s)}{\partial z} \bar{k} \quad (2)$$

式中: E_f 为外加能量场的能级密度 (J/m³); k_{qx} , k_{qy} , k_{qz} 分别为 x , y , z 方向的流量系数 (m²/Pa·s); $\bar{i}$, $\bar{j}$, $\bar{k}$ 分别为 x , y , z 方向的单位向量。

$$\nabla E_f = \frac{k_{ex}}{k_{qx}} \frac{\partial v}{\partial x} \bar{i} + \frac{k_{ey}}{k_{qy}} \frac{\partial v}{\partial y} \bar{j} + \frac{k_{ez}}{k_{qz}} \frac{\partial v}{\partial z} \bar{k} \quad (3)$$

式中: v 为电势 (V); k_{ex} , k_{ey} , k_{ez} 分别为 x , y , z 方向的电渗系数 (m²/V·s)。

$$G = f_G(w) \quad (4)$$

式中: G 为土体电导率 (Ω⁻¹·m⁻¹); w 为土体含水率 (%); $f_G(w)$ 为以 w 为自变量的函数, 需要通过试验确定, 该式反映的是土体固结对电场的影响。

$$\bar{j} = G \cdot \nabla v \quad (5)$$

式中: $\bar{j}$ 为电流面密度矢量 (A/m²)。该式是电学中的广义欧姆定律^[9]:

$$w = w_0 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{ds}} \int_{E_{s0}}^{E_{st}} k_E dE_s \quad (6)$$

式中: γ_w 为水的重度 (kN/m³); γ_{ds} 为干土的重度

(kN/m^3); w_0 为土体初始含水率(%); E_{s0} , E_{st} 分别为初始时刻和 t 时刻土体的能级密度(J/m^3)。

4 基于能量分析法的数值模拟

能量分析法所描述的电渗过程是极度非线性的, 需要用数值方法求解。笔者用 VB 编写了一个基于能量分析法的差分程序^[10], 对上述边坡电渗过程进行了数值模拟。为了降低分析的复杂度, 对边坡模型作了适当简化。主要的简化工作有: (1) 取消了模型的上覆层和下垫层。简化的理由是: 这两层在电极之外, 而且与电极之间都铺设了不透水的塑料布隔水层, 对电极之间的加固土层影响不大。

(2) 阳极未铺设导电塑料之处, 假定电场不扩散到其下方的土体, 这部分土体不参与电渗分析。这是为了简化计算, 如果考虑将电场延伸到这部分土体, 那么电场的分布将大大复杂化, 难以分析。(3) 由于上一条简化, 边坡垂直一侧就不再是不透水边界, 应修改为透水, 而无电场的边界。(4) 忽略边坡模型填筑时坡面一侧的不规则鼓出。

4.1 边坡模型参数

数值模拟的边坡模型参数与上述模型试验一致, 主要参数如下: 土体的含水率为 37.53 %, 干密度为 $1.35 \text{ g}/\text{cm}^3$, 水力渗透系数为 $7.6 \times 10^{-10} \text{ m/s}$, 电渗系数为 $1.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$, 初始孔隙比为 1.007 2。土体为正常固结土, 压缩指数为 0.182 4。电渗固结之前土体完全饱和。导电塑料的电阻率为 $0.064 \Omega \cdot \text{m}$ 。阳极长为 34 cm, 阴极长为 60 cm, 高为 30 cm, 宽为 30 cm, 坡角为 49° , 电源电压为 40 V。

研究表明, 土体电导率和含水率的关系在试验过程所处的含水率区段内满足如下关系式^[11]:

$$\begin{cases} G = 0.0009w - 0.0116, & 21.8 \leq w < 38.4 \\ G = 0.0004w + 0.0076, & 38.4 \leq w \leq 52.5 \end{cases} \quad (7)$$

4.2 单元划分

该模型可以简化为一个二维问题, 单元体划分如图 5 所示。差分计算中时间增量步长取 60 s。

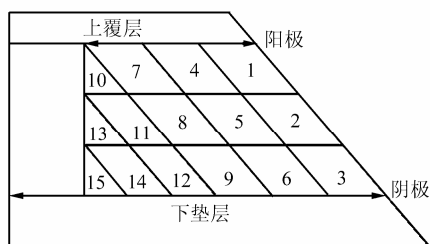


图 5 数值模拟边坡电渗模型的单元体划分
Fig.5 Element division of slope model for numerical simulation

4.3 电场分布的简化计算

在电渗过程中, 土体含水率变化不均匀, 电场也随之不断地发生重分布, 所以对每一个时间增量步都要重新计算电场分布。精确计算电场分布的工作量太大, 因此, 将电场分布的计算作了适当的简化。由于电极的电阻率比土体小很多, 因此, 可以近似认为电流是通过电极逐渐分配到土体当中的。电流沿着每一列斜向单元体从阳极流向阴极。根据这一假定就可以通过多环路的基尔霍夫定理^[10]解出土体中的电流、电势分布情况。求解方法如下:

假定通过电极分配到每一列斜向单元体中的电流强度为

$$\mathbf{I} = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4 \ I_5 \ I_6] \quad (8)$$

根据每一个环路的电压平衡, 线性方程组可以写为

$$\mathbf{R}\mathbf{I}^T = \mathbf{U}^T \quad (9)$$

式中: $\mathbf{U} = [40 \ 40 \ 40 \ 40 \ 40 \ 40]$, 是电压常数矩阵; $\mathbf{R}$ 为一个 6×6 的电阻矩阵。记 R_{a_i} ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为与各列土体相连的阳极电阻, R_{c_i} ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为与各列土体相连的阴极电阻; R_{s_i} ($i = 1, 2, \dots, 15$) 为每块土体单元的电阻, 矩阵中每一项表达如下:

(1) 矩阵第 1 行:

$$\left. \begin{aligned} R_{11} &= R_{a_1} + R_{c_1} + \sum_{j=1}^3 R_{s_j} \\ R_{1i} &= R_{a_1} + R_{c_1}, \quad i = 2, 3, \dots, 6 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(2) 矩阵第 2 行:

$$\left. \begin{aligned} R_{21} &= R_{a_1} + R_{c_1} \\ R_{22} &= \sum_{j=1}^2 (R_{a_j} + R_{c_j}) + \sum_{j=4}^6 R_{s_j} \\ R_{2i} &= \sum_{j=1}^2 (R_{a_j} + R_{c_j}), \quad i = 3, 4, \dots, 6 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(3) 矩阵第 3 行:

$$\left. \begin{aligned} R_{31} &= R_{21} \\ R_{32} &= \sum_{j=1}^2 (R_{a_j} + R_{c_j}) \\ R_{33} &= \sum_{j=1}^3 (R_{a_j} + R_{c_j}) + \sum_{j=7}^9 R_{s_j} \\ R_{3i} &= \sum_{j=1}^3 (R_{a_j} + R_{c_j}), \quad i = 4, 5, 6 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(4) 矩阵第 4 行:

$$\left. \begin{aligned} R_{41} &= R_{31}; \quad R_{42} = R_{32}; \quad R_{43} = \sum_{j=1}^3 (R_{a_j} + R_{c_j}) \\ R_{44} &= \sum_{j=1}^4 (R_{a_j} + R_{c_j}) + \sum_{j=10}^{12} R_{s_j} \\ R_{4i} &= \sum_{j=1}^4 (R_{a_j} + R_{c_j}) + R_{s_{10}}, \quad i = 5, 6 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(5) 矩阵第5行:

$$\left. \begin{aligned} R_{51} &= R_{41}; R_{52} = R_{42}; R_{53} = R_{43} \\ R_{54} &= \sum_{j=1}^4 (Ra_j + Rc_j) + Rs_{10} \\ R_{55} &= R_{54} + Rc_5 + \sum_{j=13}^{14} Rs_j \\ R_{56} &= R_{54} + Rs_{13} + Rc_5 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(6) 矩阵第6行:

$$\left. \begin{aligned} R_{61} &= R_{51}; R_{62} = R_{52}; R_{63} = R_{53} \\ R_{64} &= R_{54}; R_{65} = R_{54} + Rs_{13} + Rc_5 \\ R_{66} &= R_{65} + Rc_6 + Rs_{15} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

电阻矩阵 R 是一个对称阵。通过求解式 (9) 线性方程组就可以求出各个分支的电流, 再根据式 (7) 求出的土体各部分电阻率, 就可以确定出土体中的电场分布情况。

4.4 边界条件

该模型中3种边界条件分别表述如下:

(1) 阳极和坡面为不透水边界

$$q = 0 \quad (16)$$

(2) 阴极为排水边界

$$E_s = 0, \frac{\partial E_f}{\partial z} = \frac{k_{ez}}{k_{qz}} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (17)$$

(3) 垂直侧为透水无电场边界

$$E_s = 0, \frac{\partial E_f}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

4.5 数值计算过程

数值计算的步骤如下:

(1) 通过求解式 (9), 确定电场分布;

(2) 根据电场分布情况, 通过式 (3) 确定电场能级梯度;

(3) 根据电场能级梯度, 通过式 (2) 求解各单元体所有边界的排水流量;

(4) 根据各单元体边界排水流量, 计算单个时间增量步长中每个单元体的含水率变化;

(5) 根据变化之后的含水率, 通过式 (6) 更新各单元体的能级密度;

(6) 根据变化之后的能级密度, 更新各单元体的能量系数、流量系数; 根据变化之后的含水率, 更新各单元体的电导率;

(7) 根据更新之后的参数重复下一个时间增量步的计算过程。

4.6 计算结果与试验结果的比较

基于能量分析法的数值计算模拟了上述边坡模

型试验的电渗过程, 计算出的电渗加固之后的含水率分布如图6所示。

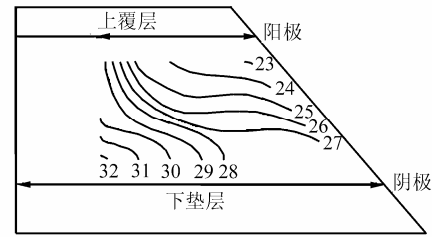


图6 能量法计算的电渗之后边坡模型的等含水率曲线 (单位: %)

Fig.6 Calculated isolines of water content of slope model after electro-osmosis via numerical simulation based on energy analysis (unit: %)

比较计算和实测的结果可以看出, 计算出的等含水率曲线和实测曲线具有相似的曲线形状, 但在曲线倾斜和弯曲程度上有所区别。造成差别的主要原因如下:

(1) 边界条件进行了简化处理。正如本节开头所述, 为了降低分析的复杂度, 对模型作了一定简化, 这就使得阳极处以及垂直侧的边界条件与试验模型不完全相同。在试验模型条件下, 实际上会有部分电场能量向表面未铺设阳极的那部分土体扩散。

(2) 电场分布的计算经过了简化, 而实际的电场分布情况要复杂得多, 因此, 这种简化也会带来误差。

(3) 土体初始参数不均匀。由于模型尺寸比较大, 试验中未能将土样晾干敲碎之后重新调配, 因此, 土体本身存在不均匀性。

(4) 划分的单元体个数偏少。受计算量的限制, 未能划分更多的单元体, 这也增大了计算的误差。

尽管有上述的差别, 但计算结果还是反映出了与实测结果相同的规律。在垂直方向, 上部土体的含水率小于下部; 在水平方向, 越靠近坡面含水率越小; 靠近阳极接入点处土体排水固结的效果好, 土体含水率小且较为均匀; 靠近阳极末端土体含水率较大, 且含水率分布不均匀; 靠近阴极末端的土体排水固结效果差, 土体仍处于较高含水率状态。

5 结 论

采用导电塑料制成的EKG材料进行了372.07 h边坡电渗加固试验, 测定了电渗之后土体等含水率分布曲线, 提出了电渗能量分析法以及基于能量分析法的电渗过程数值模拟方法, 得出如下结论:

(1) 试验表明, 采用 EKG 材料进行边坡电渗加固, 加固效果是随着电渗时间从阳极到阴极逐渐扩展的, 而且由于导电塑料电极的电阻不能忽略, 电渗效果沿电极方向也不同。总的来说, 越靠近阳极接入点的土体加固效果越好, 越靠近阴极末端的土体加固效果越差。

(2) 试验过程中, 边坡土体逐渐从饱和状态变为非饱和状态, 因此, 传统的电渗理论不适用于分析边坡电渗排水加固过程。

(3) 笔者提出的能量分析法仅要求黏性土体在排水固结开始的初始时刻处于饱和状态, 而在排水固结进行的过程中土体可以是饱和的, 也可以是非饱和的。该方法可用于分析边坡电渗排水加固过程。

(4) 基于能量分析法的数值模拟计算结果与实测结果能够较好地吻合。

参考文献

- [1] HAMIR R B, JONES C J F P, CLARKE B G. Electrically conductive geosynthetics for consolidation and reinforced soil [J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2001, 19(8): 455—482.
- [2] NETTLETON I M, JONES C J F P, CLARKE B G et al. Electrokinetic geosynthetics and their applications [C]// The Sixth International Conference on Geosynthetics, Madison: Omnipress, 1998: 871—876.
- [3] ZHUANG Yan-feng, LI Xia, WANG Zhao. Application of electro-kinetic geosynthetics in reinforced slope [C]// GeoAsia2004 Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics. Seoul: KGSS, 2004: 1 042—1 047.
- [4] ESRIG M I. Pore pressure, consolidation and electrokinetics [J]. **Journal of the SMFD, ASCE**, 1968, 94(SM4): 899—921.
- [5] WAN T Y, MITCHELL J K. Electro-osmotic consolidation of soils [J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1976, GT5 (5): 473—491.
- [6] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior (second edition)[M]. New York: John Wiley, 1993.
- [7] 庄艳峰. EKG 材料的研制及其在边坡加固工程中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [8] ZHUANG Yan-feng, WANG Zhao, CHEN Lun. Model test study on soft clay slope reinforced with electro-kinetic geosynthetics [C]// 8th International Conference on Geosynthetics. Yokohama: Mill Press, 2006: 531—534.
- [9] 贾起民, 郑永令, 陈暨耀. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [10] SILER B, SPOTTS J. Visual Basic 6 开发使用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [11] 庄艳峰, 王钊. 电渗的电荷累积理论[J]. **岩土力学**, 2005, 26(4): 629—632.
- ZHUANG Yan-feng, WANG Zhao. Electric charge accumulation theory for electro-osmotic consolidation [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 629—632.
- analysis of layered rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1 615—1 619.
- [11] 郭明传. 复合岩体之岩块体积比量测及其力学行为[博士学位论文 D]. 中坭: 国立中央大学土木工程研究所, 1994.
- [12] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990.
- [13] 韩昌瑞, 白世伟, 张波. 正交各向异性岩体孔径变形法二维地应力分析方法改进[J]. **岩土力学**, 2007, 28(11): 2 249—2 253.
- HAN Chang-rui, BAI Shi-wei, ZHANG Bo. Amending a method of 2-D geostatic stress measurement for orthotropic rockmass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2 249—2 253.
- [14] ATTEWELL B, SANDFORD R. Intrinsic shear strength of a brittle, anisotropic rock – I: Experimental and Mechanical Interpretation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1974, 11(11): 423—430.
- [15] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体抗剪强度的方向性及剪切破坏面的确定[J]. **岩土力学**, 2001, 22(3): 254—257.
- ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. Anisotropy of shear strength of layered rocks and determination of shear failure plane[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 254—257.
- [16] 白世伟, 韩昌瑞, 顾义磊, 等. 隧道应力扰动区应力测试及反演研究[J]. **岩土力学**, 2008, 待刊.
- BAI Shi-wei, HAN Chang-rui, GU Yi-lei, et al. Study of crustal stress measurement and inversion of stress disturbed area of a tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, (to be published)

上接第 2408 页