

# 电渗法处理过湿土填料中有关参数设计的探讨

王甦达<sup>1</sup>, 张林洪<sup>2</sup>, 吴华金<sup>3</sup>, 段翔<sup>3</sup>, 陈加洪<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650051;

3. 云南交通咨询有限公司, 云南 昆明 650031)

**摘要:** 介绍了应用电渗脱水原理降低路基过湿填料含水率的方法及要点; 将电渗理论、电学原理和现有电渗实践经验结合起来, 提出了电渗法处理过湿土的设计、计算步骤以及相关参数的估算方法, 给出了具体计算公式, 通过实际工程对该方法进行了检验, 并提出了相应的设计建议和注意事项。电渗参数估算时采取了从宏观上计算需从过湿土中排出的水量, 在计算电渗区土体总电阻时引入了界面电阻并考虑相邻电极影响, 结果表明与实际情况基本相符。

**关键词:** 电渗; 含水率; 脱水; 过湿土; 界面电阻; 设计

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)02-0211-05

**作者简介:** 王甦达(1965-), 男, 云南昆明人, 硕士, 副教授, 从事道路工程教学与研究工作。E-mail: [wsd.163@163.com](mailto:wsd.163@163.com)。

## Parameter design of over-wet soil fill treated by electro-osmosis

WANG Su-da<sup>1</sup>, ZHANG Lin-hong<sup>2</sup>, WU Hua-jin<sup>3</sup>, DUAN Xiang<sup>3</sup>, CHEN Jia-hong<sup>3</sup>

(1. Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China; 2. Faculty of

Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China; 3. Yunnan Highway Consultancy

Company, Kunming 650031, China)

**Abstract:** The method and essentials of decreasing water content of over-wet subgrade fill are introduced by use of the principle of dewatering by electro-osmosis. Combining the electro-osmosis theory and electricity principle with successful experience of electro-osmosis practice, the design, calculation steps and estimating method of relevant parameters of the over-wet soil treated by electro-osmosis are presented, the specific calculation formula is shown, the method by some project practices is validated, and some design advices and points for attention are put forward. The method of calculating water quantity drain from over-wet subgrade fill from a macro-view is adopted for estimating parameters. The interface electric resistance is introduced and the influence from adjacent electrode is considered when calculating overall resistance of soil in electro-osmosis area. The experimental results show that the conclusions are reasonable.

**Key words:** electro-osmosis; water content; dewatering; over-wet soil; interface electric resistance; design

## 0 前 言

在公路路基施工中, 受到天气、工期及现场条件的限制, 有时不得不直接采用过湿土填筑路基, 这时必须采取适当措施以保证路基填筑质量。利用电渗技术处治过湿土突破了传统的技术和工艺局限, 在多雨潮湿地区当其它处治措施不利时, 它可以作为可选方案提出来。

自电渗法问世以来, 已被成功应用到各类岩土工程治理上。现有电渗实践主要偏重于软土地基排水固结和基坑降水, 而对过湿土填料电渗脱水的研究较少。在以往电渗实践中, 由于电渗理论体系不完善, 在电渗处理时往往带有盲目性质, 事先对电渗参数确定随意性较强, 处理过程中又不断改动, 施工效果事前无

法评估, 缺乏指导设计、施工可以遵循的原则和方法。对于这些情况, 针对基坑开挖降水、软土地基排水加固的电渗设计方法近年来已有文献提出<sup>[1-2]</sup>, 但这些设计方法并不完全适用于过湿土的处治项目上, 因为此时电渗对象为非饱和土, 无论是电渗的方案还是需要解决的问题都不尽相同。本文根据电渗的基本理论, 引入近年来界面电阻的研究成果, 结合电学分析以及电渗实践的成功经验, 对电渗处理过湿土的设计和计算方法进行了研究, 以期待对电渗处治过湿土的研究工作有借鉴作用。

所谓“过湿土填料”, 是指回填土料的天然含水

基金项目: 云南省交通厅重点科技项目(TST(2005)52b104c)

收稿日期: 2008-09-27

率超过击实曲线上按压实度要求控制的含水率范围,一般含水率超过最佳含水率 2%~3% 就不能直接压实,需采取各种措施进行处理后,才能压(夯)实达到规定的密实度。

## 1 电渗法降低过湿土填料含水率的相关设计内容

### 1.1 电渗处理过湿填料应解决的主要问题

电渗的目的是通过电渗过程将过湿填料含水率降低到适宜压实的程度。采用电渗技术处理过湿填料时,人们首先关注电渗的效果和费用,其次是电渗方案和有关的技术参数以及电渗实施的方法。电渗设计涉及到以下问题:电渗目标和电渗处理过湿填料的方案;填料的土工指标;填料的电学参数及获取方法;电压和电极布置;电渗排水通道设计;电渗结束标准;供电设备的功率及选型;电渗需要的时间;电能消耗,等等。合理估算电渗技术参数,可以为选择最优的过湿填料处理方案提供决策依据,为电渗设计、现场实施和工程效益评估等提供指导。

### 1.2 电渗方案

可从以下两方面考虑:①先在料场分批堆料进行电渗脱水(图1),待过湿填料含水率降低至适宜压实后,再送到施工路段填筑压实;②过湿填料直接在路基层位上摊铺并进行初压,填筑层经过电渗含水率降到符合压实规定的含水率后,再进行正式压实(图2)。前者优点在于填料质量易于保证,电极可重复使用,但需进行二次倒运;后者避免了填料二次倒运,成本较低,但现场施工及管理较为复杂。

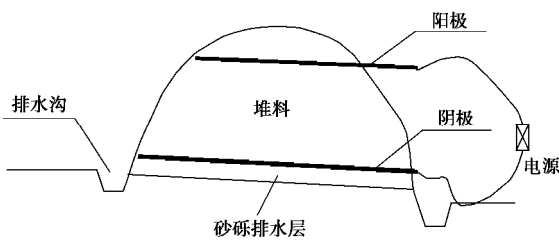


图1 料场堆料电渗

Fig. 1 Electro-osmosis in the stockpile on the stock ground

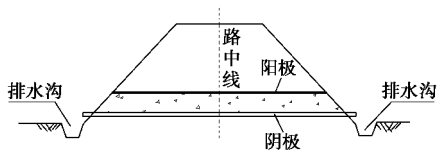


图2 直接在路基填筑层中电渗

Fig. 2 Electro-osmosis in the subgrade filling layer

### 1.3 供电设备选择

工地周边电源一般为 380 V 交流电,需转换为直

流电。供电设备是电渗法的主要设备,直流电整流波形对脱水性能影响不大<sup>[3]</sup>,对其技术性能要求应包括:输入及输出电压、最大输出电流、额定输出电流、容量、效率、外形尺寸、重量、安装与使用是否便利等。适用于现场的直流电源主要有三类:

(1) 自制可控硅整流器。体积小、重量轻、价格低。现场使用时,整流器前必须串接交流隔离变压器,否则电源与大地形成回路造成短路。

(2) 可调节式或非调节式专用直流稳压电源。使用时根据需要,可采取稳压输出方式或稳流(恒流)输出方式。设备功能全,功率大,使用方便,但价格昂贵。

(3) 直流电焊机。直流电焊机成本仅为前两种的 1/5~1/15,且可作为其它用途,使用较为经济,缺点是输出电压有限(低于 72 V),且输出电压、电流不稳定,输出电压随输出电流增大而降低。

一般多选择直流焊机作为电源,可以一机多用,降低设备投资。

## 2 电渗参数设计步骤与方法

电渗参数设计可按以下步骤进行。

(1) 测定拟用填料的物理指标。这些指标主要包括:粒度成分、击实特性、天然含水率、土的塑性性指标、稠度等,判断填料是否过湿。

(2) 确定适当的电渗层厚度。直接在填筑层中电渗时,为适应后期压实需要,电渗层厚度应与压实方式、压实机具的压实功能相适应;如过湿土在料场集中处理,电渗层厚适当加大。

(3) 测定待处理填料的电学指标,包括电阻率  $\rho$  ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )、电渗系数  $k_e$  ( $\text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{v}$ )。电阻率采用类似 Miller Soil Box 模型箱装置进行测定<sup>[4]</sup>,见图3。

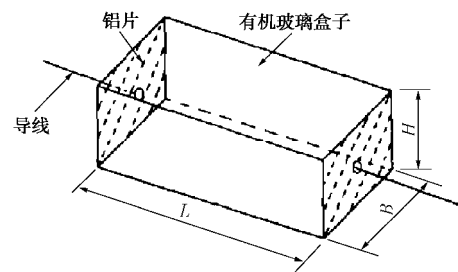


图3 Miller Soil Box 示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Typical Miller soil system<sup>[4]</sup>

在箱子长度方向的两个相对面上嵌入铝片或铁板,盒子的内边净尺寸为  $B \times H \times L$ 。将待测试土样放入盒子中,用电路导线与铝片相连,测得 Miller Soil Box 两端电压为  $U$ , 电路电流为  $I$ , 则土样的电阻率为

$$r = \frac{U BH}{I L} \quad (1)$$

电渗系数  $k_e$  测定方法: 由电渗方程<sup>[5-7]</sup>

$$q_e = k_e i_e A \quad (2)$$

其中

$$i_e = \frac{\partial V}{\partial L} \quad (3)$$

可以得到

$$k_e = \frac{q_e \partial L}{A \partial V} \quad (4)$$

式 (2) ~ (4) 中,  $q_e$  为电渗流量 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ),  $k_e$  为电渗系数 ( $\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{V}$ ),  $i_e$  为电压梯度 ( $\text{V}/\text{cm}$ ),  $A$  为通电区面积, 可取外围电极轴线包围的土体面积 ( $\text{cm}^2$ ),  $V$  为电压 ( $\text{V}$ ),  $L$  为阴阳电极距离 ( $\text{cm}$ )。  $q_e$  值在试验室小模型箱进行测试, 测试的时间不宜过短, 否则得出的数值偏大。测出  $q_e$  值后, 由式 (4) 计算出  $k_e$ 。

(4) 确定电压和电极布置参数。电压常用范围  $U=24\sim 160\text{ V}$ , 现有电渗实践证明了电压梯度对电渗排水速率有很大影响<sup>[8-10]</sup>, 电压应尽可能调高。为兼顾电渗效率与现场安全, 以接近并不超过  $72\text{ V}$  安全电压为宜。

电极材料一般选用钢管或钢筋 (后者只能用于阳极)。阳极或阴极各自按排形布置, 阴极布置在电渗区下方底部位置, 阴极管上开排水孔, 并保持不小于 3% 的排水纵坡; 阳极布置在电渗区上方, 阳极顶部覆土厚度  $20\text{ cm}$  左右。异性电极间距适当小于电渗层厚度, 同性电极间距建议采用  $1\text{ m}$ 。

(5) 确定需要从填料中排出的总水量  $Q$ 。排出水的总质量为<sup>[11]</sup>

$$m_w = \frac{m}{1+0.01w_1} \cdot 0.01(w_1 - w_0) \quad (5)$$

式中  $m_w$  为应排出的水总质量 ( $\text{g}$ );  $m$  为湿土质量 ( $\text{g}$ );  $w_1$  为湿土含水率 ( $\%$ );  $w_0$  为电渗后的含水率 ( $\%$ ),  $w_0$  不超过重型击实试验确定的最佳含水率  $2\% \sim 3\%$ 。

取水的密度为  $r_w=1\text{ g}/\text{cm}^3$ , 就确定出需要从填料中排出水的总体积  $Q$  ( $\text{cm}^3$ )。

(6) 估算电渗区场地的总电阻  $\Sigma R_{\text{视在}}$ 。电渗区的总电阻效应可用视在电阻  $\Sigma R_{\text{视在}}$  来描述。由于电极与土体的导电面积相差很大, 在这两种导电介质之间存在明显的界面电阻。若考虑电极与周围土体之间的界面电阻, 则每一对电极间电阻  $R_{\text{视在}}$  由电极电阻  $R_{\text{电极}}$ 、电极与土体界面电阻  $R_{\text{界面}}$  以及土体电阻  $R_{\text{土}}$  三部分构成<sup>[12-13]</sup>:

$$R_{\text{视在}} = R_{\text{电极}} + R_{\text{界面}} + R_{\text{土}} \quad (6)$$

式中  $R_{\text{电极}}$  为电极本身的电阻 ( $\Omega$ ), 金属电极时,  $R_{\text{电极}} \approx 0$ ;  $R_{\text{界面}}$  为电极与土体之间的界面电阻 ( $\Omega$ );  $R_{\text{土}}$  为土体电阻 ( $\Omega$ ),  $R_{\text{土}} = \rho_{\pm} \cdot l / A$ ,  $\rho_{\pm}$  为土体电阻

率 ( $\Omega\cdot\text{cm}$ ),  $l$  为阴阳电极距离 ( $\text{cm}$ ),  $A$  为土体面积 ( $\text{cm}^2$ )。

界面电阻为<sup>[12-13]</sup>

$$R_{\text{界面}} = \frac{k_j}{s_2} \left( \frac{1}{\text{rat}} - 1 \right) \quad (7)$$

式中,  $k_j$  为界面电阻率 ( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ), 取  $k_j=11.5\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ <sup>[12]</sup>,  $\text{rat}=s_1/s_2$ , 称为导电面积比 (无量纲),  $s_1, s_2$  分别为电极和土体导电面积 ( $\text{cm}^2$ )。

由式 (6) 计算出每一对阴阳极间的视在电阻  $R_{\text{视在}}$ 。由于场地电路由很多对电极构成, 将每对电极和它们之间土体划分为一个条带, 电渗区中各条带可以视为并联关系, 电渗区电路就简化为图 4 模型。

由于电流也能在相邻土条中的电极间传递, 只不过电极距离比同一土条中加大, 图 5 (a) 为某一根阳极  $i$  与其下方 3 根阴极形成一组并联电路, 这一组电极间的电阻  $R'_{\text{视在}}$  较只由阳极  $i$  ~ 阴极  $i$  形成的单一土条的电阻  $R_{\text{视在}}$  变小了。电渗场地总电阻  $\Sigma R_{\text{视在}}$  应由各组电阻  $R'_{\text{视在}}$  并联形成的电路计算而得。

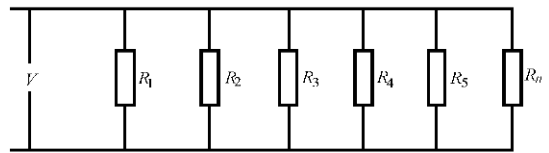


图 4 电渗场地电阻简化计算模型

Fig. 4 The simplified calculation model of resistance in electro-osmotic site

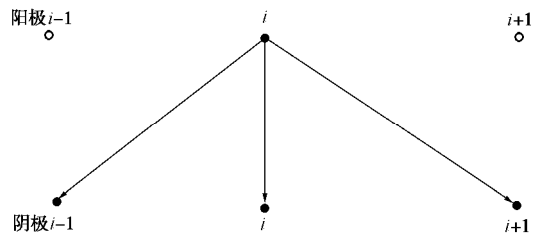


图 5 考虑相邻电极影响

Fig. 5 Consideration of influence from adjacent electrode

电渗场地总电阻  $\Sigma R_{\text{视在}}$  按下式求出:

$$\frac{1}{R'_{\text{视在}}} n = \frac{1}{\Sigma R_{\text{视在}}} \quad (8)$$

式中,  $n$  为电极对数或阳极根数。

(7) 估算电渗区总电流  $I$ , 目的是为了确定供电设备负荷、确定导线截面以及测量仪表的量程。电渗过程中电流从高到低变化, 初始电流  $I_{\text{max}}$  按下式估算:

$$I_{\text{max}} = \frac{U}{\Sigma R_{\text{视在}}} \quad (9)$$

(8) 预估电渗排水时间  $t$ , 以便对工期作出合理安排。

电渗期间平均电渗流量  $q_e = \frac{Q}{t}$ , 平均电压梯度

$i_c = \frac{V}{L}$ , 故式 (2) 改写成  $\frac{Q}{t} = k_c \frac{V}{L} A$ , 于是得到电渗通电所需时间  $t$  为

$$t = \frac{Q L 1}{k_c V A} \quad (10)$$

(9) 确定电源功率  $P$ , 作为供电设备选型的依据

$$P = VI \quad (11)$$

设备选型时,  $I$  应按通电初始的最大电流考虑, 并应同时满足电压、电流、功率三项指标。若电源功率受到限制, 可采取分区电渗处理。

(10) 耗电量  $N$  预估

$$N = \frac{VI t}{1000} \quad (12)$$

式中,  $I$  为电源的平均输出电流 (A)。因为电流逐渐降低, 根据笔者多次电渗试验结果,  $I$  可近似采用通电初始电流的  $1/3 \sim 1/2$  估算。这里  $I$  值低于饱和土中的数值<sup>[13]</sup>。

### 3 实例及结果分析

云南水富—麻柳湾高速公路现场电渗试验, 电渗目的是降低路基过湿土填筑层的含水率。填料类别为砾类土, 实测天然含水率  $w=19.1\%$ , 天然稠度  $w_c=0.738$ , 最佳含水率为  $9.7\%$  (重型击实法), 天然含水率超过最佳含水率  $9.4\%$ , 填料处于过湿状态。采用在路基上先填筑后电渗的方法降低填筑层含水率, 电渗后再进行压实。

填料物理参数: 天然含水率  $w=19.1\%$ , 塑限  $w_p=13.8\%$ , 液限  $w_L=34.0\%$ , 塑性指数  $I_p=20.2$ , 天然稠度  $w_c=0.738$ , 土体湿密度  $\gamma=2.08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 电阻率  $\rho=22200\Omega\cdot\text{cm}$ , 电渗系数  $k_c=9.5\times 10^{-6} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$ 。

试验段长  $30 \text{ m}$ , 待处理过湿填筑层厚度  $0.8 \text{ m}$ , 宽度  $5 \text{ m}$ , 体积  $120 \text{ m}^3$ 。电极呈排形布置, 阳极在上方, 阴极在下方, 阴极、阳极垂直正对齐, 所有同性电极各用  $2$  道  $\Phi 16 \text{ mm}$  纵向钢筋焊接起来, 形成  $2$  片电极网片。同性电极水平间距  $1.0 \text{ m}$ , 异性电极垂直间距  $0.6 \text{ m}$ , 阴、阳极各为  $31$  根, 单根电极长度  $5.0 \text{ m}$  (与填筑宽度相同)。阳极采用  $f 16$  螺纹钢, 阴极采用  $\Phi 24 \text{ mm}$  镀锌管 (管壁上开透水孔), 电极纵坡为  $3\%$ , 水进入阴极后排出路基外。

直流电源为科跃牌直流电焊机, 型号为  $ZX7-500$ , 输入端为三相  $AC380 \text{ V}$ , 输出空载电压  $70 \text{ V}$ , 输出电流  $0 \sim 500 \text{ A}$ 。实测平均输出电压  $60.75 \text{ V}$ , 电流  $28.8 \text{ A}$ 。

(1) 需要从填料中排出的总水量  $Q$

取水密度  $\gamma_w \approx 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 填料湿密度为  $\rho=2.08 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 通电前填料含水率  $w_1=19.1\%$ , 电渗后含水率检测值为  $w_0=12.3\%$ , 计算出需移走的水量为  $Q \approx 14.25 \text{ m}^3$ 。

(2) 电渗区场地的总电阻  $\Sigma R_{\text{视在}}$  计算

将电渗区沿电极方向以电极为中心划分为  $1 \text{ m}$  宽度土条, 每个土条长度  $L=500 \text{ cm}$ , 电渗区共  $31$  个垂直土条。考虑电流在相邻电极传递, 见图 6, 阳极  $i$  与阴极  $i$  之间的土条电阻为  $R_{\pm i,i} = r_{\pm} l_{i,i} / A = (22200 \times 60) / (500 \times 100) = 26.64 \Omega$ ; 阳极  $i$  与阴极  $i-1$  之间的土条电阻为  $R_{\pm i,i-1} = r_{\pm} l_{i,i-1} / A = (22200 \times 116.6) / (500 \times 100) = 51.77 \Omega$ ; 阳极  $i$  与阴极  $i+1$  之间的土条电阻为  $R_{\pm i,i+1} = 51.77 \Omega$ 。

电极截面阳极  $d_{\text{阳}}=1.6 \text{ cm}$ , 阴极  $d_{\text{阴}}=2.4 \text{ cm}$ , 阳极  $\text{rat}_{\text{阳}}=s_1/s_2=(1.6 \times 500) / (500 \times 100)=0.016$ , 阴极  $\text{rat}_{\text{阴}}=s_1/s_2=(2.4 \times 500) / (500 \times 100)=0.024$ , 故电极界面电阻:

$$R_{\text{界阳}} = \frac{k_j}{s_2} \left( \frac{1}{r_{\text{阳}}} - 1 \right) = \frac{11500}{500 \times 100} \left( \frac{1}{0.016} - 1 \right) = 14.1 \Omega,$$

$$R_{\text{界阴}} = \frac{k_j}{s_2} \left( \frac{1}{r_{\text{阴}}} - 1 \right) = \frac{11500}{500 \times 100} \left( \frac{1}{0.024} - 1 \right) = 9.35 \Omega.$$

阳极  $i$  与下方  $3$  根阴极之间的电阻:  $R_{\text{视在},i} = 14.1 + 9.35 + 26.64 = 50.09 \Omega$ ,  $R_{\text{视在},i-1} = R_{\text{视在},i+1} = 14.1 + 9.35 + 51.77 = 75.22 \Omega$ , 这一组电极的电阻为  $R'_{\text{视在}} = 21.48 \Omega$ 。电渗区共有  $31$  组电极, 各组电极的  $R'_{\text{视在}}$  都相同, 并且是并联关系, 故电渗场地的总电阻  $\Sigma R_{\text{视在}} = R'_{\text{视在}} / n = 21.48 \Omega / 31 = 0.693 \Omega$ 。

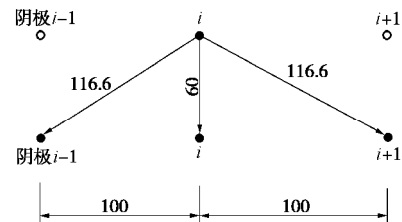


图 6 考虑相邻电极影响

Fig. 6 Consideration of influence of border upon electrode  
继续按第 3 节步骤计算, 参数计算结果列于表 1。

表 1 电渗参数计算

Table 1 Parameter calculation of electro-osmosis			
步骤	计算内容	计算结果	实测值
1	电极垂直间距/cm	—	60
2	电极水平间距/cm	—	100
3	需处理的土体积/ $\text{m}^3$	—	120
4	初始含水率/%	—	19.1
5	处理后含水率/%	—	12.3
6	需排出的水量/ $\text{m}^3$	14.25	—
7	场地总电阻/ $\Omega$	0.693	0.667
8	通电初始电压/V	—	52
9	初始电流/A	75.04	78
10	通电时间/h	274	331
11	电源功率/(V·A)	>3900	4056
12	耗电量/(kw·h)	416.4~624.5	544.3

从表 1 分析, 计算结果与实际基本相符。通电时间计算值较实际超出  $20\%$ , 主要是受现场连续降雨影

响, 填筑层受潮使电渗时间延长。电渗后土体平均含水率下降了 6.8%, 仅超出最佳含水率 2.6%, 满足路基压实的含水率条件(重型击实法)。耗电量每立方米土体 4.54 kw·h, 电耗较低。

在水麻路另外两场电渗试验中, 参数估算结果与试验数据也很吻合, 此处不再列出。

## 4 结论与建议

(1) 将计算结果与现场试验数据进行对比, 本文提出的电渗排水设计方法符合实际观测值, 能合理估算电渗参数, 提高电渗的可预期性, 避免盲目设计和造成施工被动。

(2) 电流计算值准确度较高, 将界面电阻纳入电渗区电阻范畴, 并考虑相邻电极之间的电流传递能提高电渗区电阻计算的精度, 推荐设计时采用此算法。

(3) 电渗时间计算值准确度较低, 主要是现场降雨及路基浸水受潮引起, 这也说明现场电渗结束的时间应以提取的土样含水率检测结果判定, 同时雨期施工当现场防排水条件较差时应适当延长电渗处理的时间。

(4) 设计前应准确测定填料的土工参数和电学参数, 为提高电渗设计的准确性提供依据。

### 参考文献:

- [1] 邹维列, 杨金鑫, 王 钊. 电动土工合成材料用于固结和加筋设计[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 319 - 322. (ZOU Wei-lie, YANG Jin-xin, WANG Zhao. Design methods of electro-kinetic geosynthetics for consolidation and soil reinforcement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 319 - 322. (in Chinese))
- [2] 王协群, 邹维列. 电动土工合成材料的特性及应用[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(6): 62 - 65. (WANG Xie-qun, ZOU Wei-lie. Properties and applications of electro-kinetic geosynthetics[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(6): 62 - 65. (in Chinese))
- [3] 许景文. 一种污泥脱水的新方法—电渗透脱水法[J]. 重庆环境科学, 1990, 12(6): 45 - 49. (XU Jin-wen. A new method of sludge dewatering by electro-dialysis[J]. Chongqing Environmental Science, 1990, 12(6): 45 - 49. (in Chinese))
- [4] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83 - 87. (LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and it's application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83 - 87. (in Chinese))
- [5] 陈新民. 电渗及其在岩土工程中的若干应用研究现状[J]. 岩土工程师, 1997, 9(4): 24 - 27. (CHEN Xin-min. The present situations of application and research for the electroosmosis technique in geotechnical engineering[J]. Geotechnical Engineer, 1997, 9(4): 24 - 27. (in Chinese))
- [6] 黄可明. 电渗法加固软土技术研究[J]. 水利科技, 1996(1): 5 - 8. (HUANG Ke-ming. Technical research on electro-osmotic consolidation of soft soil[J]. Hydraulic Science and Technology, 1996(1): 5 - 8. (in Chinese))
- [7] 程庆臣, 孙永军, 刘 伟, 等. 电渗技术在吹填泥袋坝固结中的应用[J]. 东北水利水电, 2001, 19(9): 14 - 16. (CHENG Qing-chen, SUN Yong-jun, LIU Wei, et al. Application of electroosmosis technology to concretion hydraulic fill mud bag dam[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2001, 19(9): 14 - 16. (in Chinese))
- [8] SHANG J Q, DUNLAP W A. Improvement of soft clays by high voltage electrokinetics[J]. Geotechnical Engineering Journal, 1996, 29(2): 23 - 36.
- [9] 李 苗, 张林洪, 王甦达. 电渗法处理填土地基的排水效果影响因素分析[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(1): 4 - 6, 10. (LI Miao, ZHANG Lin-hong, WANG Su-da. Factors affecting electro-osmotic drainage of backfill soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(1): 4 - 6, 10. (in Chinese))
- [10] 张林洪, 吴华金, 王甦达. 三种降低土料含水率方法的试验研究[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(4): 170 - 175. (ZHANG Lin-hong, WU Hua-jin, WANG Su-da. Comparison experiment of water content reduction methods of engineering soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(4): 170 - 175. (in Chinese))
- [11] JTGE40—2007 公路土工试验规程[S]. 2007. (JTGE40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. 2007. (in Chinese))
- [12] 庄艳峰, 王 钊. 电渗固结中的界面电阻问题[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 117 - 120. (ZHUANG Yan-feng, WANG Zhao. Study on interface electric resistance of electro-osmotic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 117 - 120. (in Chinese))
- [13] 胡俞晨, 王 钊, 庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基实验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 582 - 586. (HU Yu-chen, WANG Zhao, ZHUANG Yan-feng. Experimental studies on electro-osmotic consolidation of soft clay using EGK electrodes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 582 - 586. (in Chinese))