

# 过湿土路基电渗排水低能耗逐级加载方法

钱劲松<sup>1</sup>, 杨以诚<sup>1</sup>, 张 玉<sup>1</sup>, 卢军源<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 广西交投科技有限公司, 广西 南宁 530029)

**摘要:** 为提升电渗处置的能量利用效率, 开展了不同加载方式和加载电势梯度的室内电渗排水试验, 分析了能耗系数和瞬时能耗系数随排水时间和含水率的变化规律, 提出了低能耗的过湿土路基电渗排水逐级加载方法。结果表明: 电渗过程中能耗系数呈现先下降后上升的趋势; 瞬时能耗系数最低时的加载电势梯度与平均含水率负相关, 两者为幂函数关系; 以此幂函数关系确定最优加载电势梯度的低能耗加载方式, 较 1.2 V·cm<sup>-1</sup> 稳压加载节约 54% 的能耗, 较逐级加载节约 23% 的能耗。

**关键词:** 路基工程; 电渗排水; 能耗; 电势; 逐级加载

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

## Stepwise Loading Method of Electroosmotic Drainage with Low Energy Consumption for Over-wet Subgrade

QIAN Jinsong<sup>1</sup>, YANG Yicheng<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, LU Junyuan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Guangxi Communications Investment Technology Co., Ltd., Nanning 530029, China)

**Abstract:** In order to improve the energy utilization efficiency of electroosmotic drainage in over-wet subgrade, electroosmotic drainage laboratory tests with different loading methods and potential gradients were carried out, and the evolution characteristics of energy consumption coefficient and instantaneous energy consumption coefficient with time and water content were analyzed. Finally, a stepwise loading method with low energy consumption was proposed. The results show that the energy consumption coefficient initially declines and subsequently increases in electroosmotic drainage tests. The negative correlation between the loading potential gradient with the lowest instantaneous energy

consumption coefficient and the average moisture content can be expressed by power function. The low energy consumption stepwise loading mode based on the power function can save 54% energy compared with the stable voltage loading at 1.2 V·cm<sup>-1</sup> and 23% energy compared with the traditional stepwise loading.

**Key words:** subgrade engineering; electroosmotic drainage; energy consumption; potential; stepwise loading

竣工运营后多雨潮湿地区公路路基的含水率会逐步提高<sup>[1-3]</sup>, 进而引发服役性能的衰减<sup>[4-5]</sup>。电渗排水法指电场作用下土中自由水和弱结合水由阳极向阴极移动的方法<sup>[6]</sup>。相较于以翻挖翻修为主的传统处理方法, 电渗排水对路基结构的影响较小, 能够有效预防或弥补因排水设施失效而导致的路基过湿问题, 对于智慧道路和低碳养护均具有较好的应用前景<sup>[7-8]</sup>。

Casagrande<sup>[9]</sup>最早将电渗排水法用于铁路路基的边坡处理中, 发现电渗排水可以有效降低路基土的含水率, 提高土体的强度和路基稳定性。近些年, 学者们在路基电渗排水室内试验和实际工程中均取得了一定的进展。Wang 等<sup>[10]</sup>、王旻楚等<sup>[11]</sup>利用电渗降低过湿土路堤填料含水率, 通过室内试验证明其效果优于真空排水, 并将电渗排水法应用于云南水麻高速工程, 使得土壤含水率降低 7% 左右。曹怀长<sup>[12]</sup>对西北地区非饱和黄土进行电渗排水试验, 结果表明电渗排水可以促使非饱和黄土内的水分发生迁移, 证明了电渗排水法在黄土地区的适用性。Ling 等<sup>[13]</sup>利用太阳能电池驱动电极, 实现了太阳能供电系统下过湿土的长期有效排水。Tang 等<sup>[14]</sup>利用碳纤维材料, 实现了季冻区非饱和土的路基排水,

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 广西重点研发计划(AB20238031); 江西省交通运输厅科技项目(2020C0002)

第一作者: 钱劲松(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。

E-mail: qianjs@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

并探究了湿度在空间上的分布规律性。

然而,电势利用效率低<sup>[15-16]</sup>、接触电阻大<sup>[17-18]</sup>、电渗后期能耗大<sup>[19-20]</sup>等问题制约了电渗排水法的进一步发展与应用。电渗排水过程中存在能耗较低的加载电势<sup>[21]</sup>,学者们也通过改变加载方法来提高电渗的能量利用效率,如间歇通电法<sup>[22-23]</sup>、反转电极法<sup>[24]</sup>等。其中,逐级加载法因效果显著,工程可应用性强,被认为是改善电渗排水法较优的方式之一。Karunaratne<sup>[25]</sup>、刘飞禹等<sup>[26]</sup>的研究表明,逐级加载电压能够降低电能消耗、提高电渗后期的排水效率。现有逐级加载方法<sup>[25-27]</sup>大多通过预设加载时间、加载电压和电流,根据实践经验进行电渗排水,并未从根本上揭示逐级加载过程中不同加载电势下能耗减少的原因。

开展不同加载方式和加载电势梯度的电渗室内试验,研究电渗能耗随排水时间和含水率的变化规律,提出瞬时能耗系数分析指标、最优能耗加载曲线和低能耗逐级加载方法,并通过试验比较低能耗逐级加载方法的节能效果。

## 1 电渗排水室内试验

### 1.1 试验装置

试验采用低液限黏土,基本参数如表 1 所示。试验装置如图 1 所示。试验模具的尺寸为 50 cm×20 cm×20 cm(长×高×宽),模具内填充试验土样。土体两端分别插入阴极和阳极,电极采用碳纤维材料。碳纤维具有质量轻、比表面积大、力学性能好、导电性强、耐腐蚀等优点,不仅可以作为优良的导体,还能适应路基环境,将碳纤维布和塑料排水盲管组合制作成的碳纤维电极如图 2 所示。试验采用稳压直流电源(0~64 V 直流电压),电流范围为 0~5 A,电压精度为 0.01 V,电流精度为 0.01 A,用于提供土体两端的电势梯度。阴极内部设有小型抽水泵,用于吸收排出的水分。在两极土体间每隔 10 cm 利用 TDR 湿度计,分别在土体阳极处、1/4 处、中点处、3/4 处、阴极处测量土体含水率。两极土体处设有电势测针,用于测量土体两端的有效加载电势。稳压直流电源连接电能表,用于监测电压、电流、功率和能耗。

### 1.2 试验方案

为探究不同加载方式和加载电势梯度下的电渗排水效果和能量消耗规律,参照现有研究<sup>[15,28]</sup>,拟定加载电势梯度范围为 0.4~1.6 V·cm<sup>-1</sup>,试验方案如表 2 所示。其中,试验 1—试验 4 用于电渗过程中的

表 1 试验土样基本参数

Tab.1 Basic parameters of soil samples

参数	数值
天然含水率/%	32.8
比重/%	2.76
干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.54
最佳含水率/%	15.7
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.75
液限/%	42.4
塑限/%	20.7
土样分类	低液限黏土

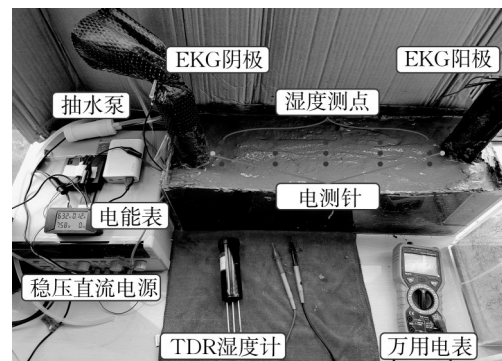


图 1 电渗排水室内试验装置

Fig.1 Indoor electroosmotic drainage test setup



图 2 电极实物图

Fig.2 Physical drawings of electrodes

能耗分析;试验 5 和试验 6 为后续最优能耗电势梯度分析的补充试验。稳压加载试验中,电渗工作时长取决于电渗排水的进度,现多以电流或含水率<sup>[29-30]</sup>为控制指标。当电流减小至某一水平(如 0.01 A)或下降至初始值的一定比例(如 10%)时,电渗排水试验的排水速率接近于零,电渗排水试验结束。逐级加载试验中,电势梯度由 0.4 V·cm<sup>-1</sup> 加载至 0.8 V·cm<sup>-1</sup>,再加载至 1.2 V·cm<sup>-1</sup>,每当加载电流降低至 0.02 A 时进入下一级直到结束。

试验的主要步骤为:先将土样碾碎烘干,根据试验方案称取适量烘干土样研细并加水,配置成相应的黏土并焖料 24 h,保证试验前土体平均含水率在

表2 室内电渗试验方案

Tab.2 Indoor electroosmotic test scheme

分类	通电方式	电势梯度/(V·cm <sup>-1</sup> )
试验1	逐级加压	0.4~1.2
试验2	稳压加载	0.4
试验3	稳压加载	0.8
试验4	稳压加载	1.2
试验5	稳压加载	0.6
试验6	稳压加载	1.6

35%左右;称取制备好的土料,分5层分别加入模具中,按照90%压实度计算每一层土体所需体积和相应层高,利用夯锤将土体夯实至相应高度以保证压实度要求;在第1层土体填筑前,在土体两侧分别埋置阴阳电极,并在阴极内放入抽水泵;土体填筑完成后,用电线连接电源和电极,并将电能表工作端串联进电路内,将电势测针插入土体两侧的阴阳两极,在湿度测点放置湿度传感器;打开直流电源,接通电路,检查电源以及电能表、湿度传感器等测试设备,根据试验要求记录数据。

### 1.3 分析指标

本试验探究不同加载方式和加载电势梯度下电渗过程中能量消耗的变化规律,因此以能量指标为分析重点。能耗是电渗过程中所消耗的电能。能耗系数<sup>[31-32]</sup>是电渗排出单位水分所需消耗的能量。能耗系数是评价排水过程中整体排水系统能量转化效率的累积值,与电渗的能耗和总排水量相关,但无法反映不同空间位置处和某一时刻的能量利用率。因此,提出了瞬时能耗系数指标。与能耗系数相比,瞬时能耗系数可以反映某一时刻的实际能量利用率,由排水速率计算而得,既可以反映排水的平均瞬时能耗,还可以表达某一空间位置处的瞬时能耗。能耗、能耗系数、瞬时能耗系数的计算式分别如下所示:

$$W = Pt = UI t \quad (1)$$

$$C = \frac{W}{Q} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{dW/dt}{dQ/dt} = \frac{P}{v} \quad (3)$$

式中:  $W$  为能耗,  $W \cdot h$ ;  $P$  为功率,  $W$ ;  $U$  为加载电压,  $V$ ;  $I$  为电流,  $A$ ;  $t$  为时间,  $h$ ;  $C$  为能耗系数,  $W \cdot h \cdot L^{-1}$ ;  $Q$  为排水量,  $L$ ;  $C_i$  为瞬时能耗系数,  $W \cdot h \cdot \%^{-1}$ ;  $v$  为排水速率,  $\% \cdot d^{-1}$ 。

## 2 电渗排水试验的数据分析

### 2.1 不同加载方式下的能耗

图3为不同加载电势下土体平均含水率的变化。

在稳压加载中,加载电势梯度显著影响了含水率的下降速度和最终水平,加载电势梯度越大最终含水率越低。在逐级加载中,各级电势梯度下湿度曲线形态接近于同一级别稳压加载的曲线形态,逐级加载的最终效果与最后一级电势梯度大小相关。

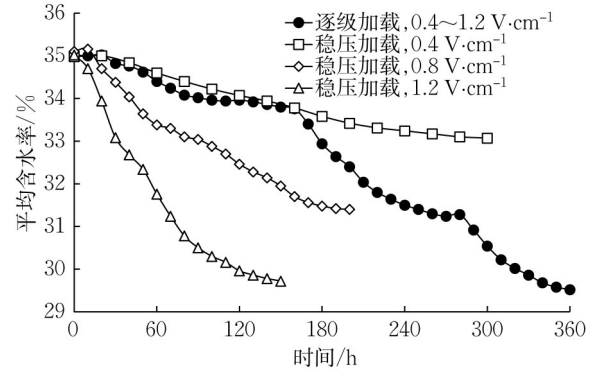


图3 平均含水率随时间的变化

Fig.3 Variation of average water content with time

图4为电渗能耗随时间的变化。在0.4、0.8、1.2  $V \cdot cm^{-1}$  稳压加载试验结束时,分别消耗149.8、260.0、355.9  $W \cdot h$  能量,电势梯度越高能耗上升速度越快。图5为电渗能耗系数随时间的变化。由图5可知,能耗系数呈现先降低后升高的趋势。这表明,随着电渗试验的进行,不同加载电势梯度下的能耗系数存在一个最低值。图6为电渗能耗系数随土体平均含水率的变化。0.4  $V \cdot cm^{-1}$  稳压加载下能耗系数最低时所对应的含水率为33.5%,而0.8  $V \cdot cm^{-1}$  和1.2  $V \cdot cm^{-1}$  稳压加载下对应的含水率分别为31.7%和30.5%。这表明,加载电势梯度越高,能耗系数最低时所对应的含水率越低。能耗系数是一个累积值,表明从试验开始进行到此刻的总体能量利用率,因此图6从侧面反映出不同加载电势梯度下能量利用率最高时的土体平均含水率是不同的。

对于逐级加载而言,由图5可知试验最终的能耗系数为326  $W \cdot h \cdot L^{-1}$ ,低于1.2  $V \cdot cm^{-1}$  稳压加载时的440  $W \cdot h \cdot L^{-1}$ ,节约了25%左右的能量。由图3和图5可知,随着试验的进行,当某一加载电势梯度较难将湿度降低至更低水平时,排水速率变慢,能耗系数逐渐上升。增加加载电势可以使排水速率提升,能耗系数从上升变为逐渐下降,从而将能耗维持在较低水平。逐级加载法通过增加电势,提高了排水速率,使土体含水率始终维持在该加载电势下能耗系数较低的水平,因此提升了能量利用率。

### 2.2 不同位置的瞬时能耗

为了探究电渗后期能耗系数上升的原因,对土



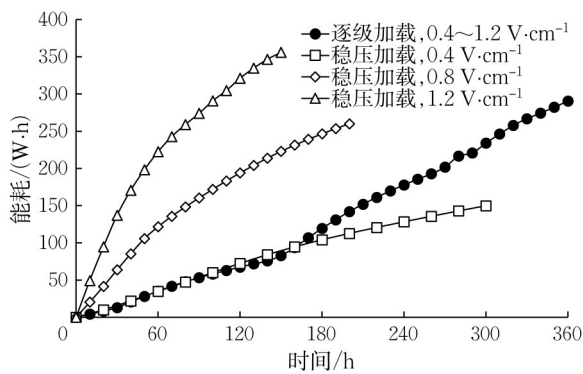


图4 电渗能耗随时间的变化

Fig.4 Variation of electroosmotic energy consumption with time

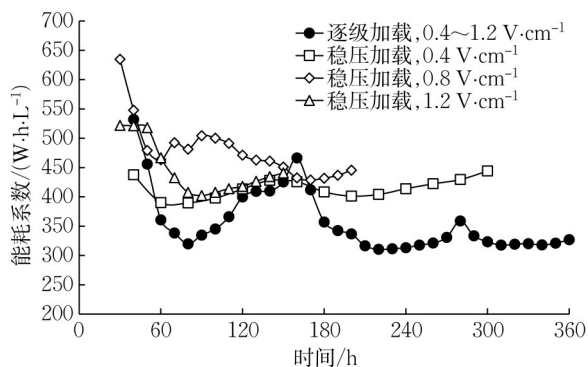


图5 电渗能耗系数随时间的变化

Fig.5 Variation of electroosmotic energy consumption coefficient with time

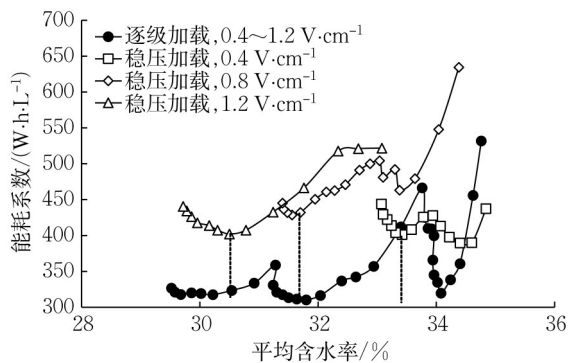


图6 电渗能耗系数随平均含水率的变化

Fig.6 Variation of electroosmotic energy consumption coefficient with average water content

体不同位置、不同时间的瞬时能耗系数进行分析。图7和图8分别为0.4、0.8、1.2 V·cm<sup>-1</sup>稳压加载下,电渗排水速率和瞬时能耗系数在不同空间位置的分布。其中,归一化距离是土体中一点到阳极的距离与阴阳极间距的比值,阳极为0,阴极为1。

由图7可知,电渗前期阳极附近的土体排水速

率较大,其他区域排水速率较小,导致阳极附近逐渐形成湿度梯度。随着电渗试验的进行,其他位置的排水速率逐渐增大,不同位置处的排水速率逐渐接近。到试验后期接近排水结束时,阳极附近排水速率大大下降并低于大部分区域。由图8可知,随着电渗的进行,瞬时能耗系数最大值由中间位置向阳极附近迁移,峰值先减小后增大。阳极及附近区域瞬时能耗系数上升较快,这是由于阳极区域排水速率逐渐变慢,然而占用的能量却更多;反观阴极区域,排水速率较稳定,而且消耗的能量更少,因此瞬时能耗系数也相对维持在较小水平。0.4、0.8、1.2 V·cm<sup>-1</sup>稳压加载下,阳极至1/4处区域的瞬时能耗系数分别占总体的62%、72%和78%。由图7可知,0.4、0.8、1.2 V·cm<sup>-1</sup>稳压加载下,阳极至1/4处区域的排水速率为总体的36%、27%和22%,这说明该部分区域排水效率低且瞬时能耗系数过高,影响了整体的排水效率,不利于电渗排水的进行。

加载电势梯度越高两极瞬时能耗系数之差越大。电势梯度为0.4 V·cm<sup>-1</sup>时,两极瞬时能耗系数最大相差7.6 W·h·%<sup>-1</sup>;电势梯度为0.8 V·cm<sup>-1</sup>时,两极瞬时能耗系数最大相差8.7 W·h·%<sup>-1</sup>;电势梯度1.2 V·cm<sup>-1</sup>时,两极瞬时能耗系数最大相差10.5 W·h·%<sup>-1</sup>。这是由于加载电势梯度越高,土体湿度梯度越大,土体电阻的跨度就越大,瞬时能耗系数的空间分布就越不均匀。由图9和图10可知,随着电渗试验的进行,靠近阳极土体的水分不断向阴极迁移,阳极附近土体的含水率下降较快,土体饱和度下降进而收缩产生裂缝,随着阳极水分持续减少,裂缝沿水平方向和垂直方向不断延伸,使得电流通路受到阻断,加剧电阻上升,导致电能利用率下降。

### 2.3 平均瞬时能耗

图11和图12分别为土体整体平均排水速率和平均瞬时能耗系数随时间的变化。由图11可知,不同加载电势梯度下平均排水速率呈现先上升后下降的趋势,电势梯度越大平均排水速率下降越快。由图12可知,当加载电势梯度为1.2 V·cm<sup>-1</sup>时,瞬时能耗系数在10 d前逐渐下降,之后维持在较低水平,直到进行至15 d时瞬时能耗系数才有上升的趋势;加载电势梯度为0.8 V·cm<sup>-1</sup>时,瞬时能耗系数在20 d才开始逐渐上升;加载电势梯度为0.4 V·cm<sup>-1</sup>时,瞬时能耗系数直到25 d才有显著上升的趋势。这说明电渗维持低能耗工作的时长与加载电势梯度大小为负相关,过度增加电渗时长而不改变加载电势梯度,会导致排水速率较低,而且

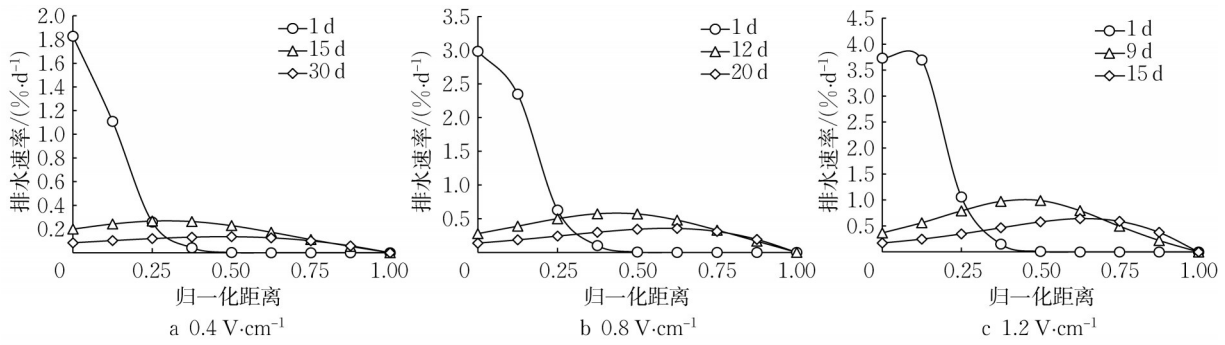


图 7 土体不同位置处的排水速率

Fig.7 Drainage rates at different locations of the soil

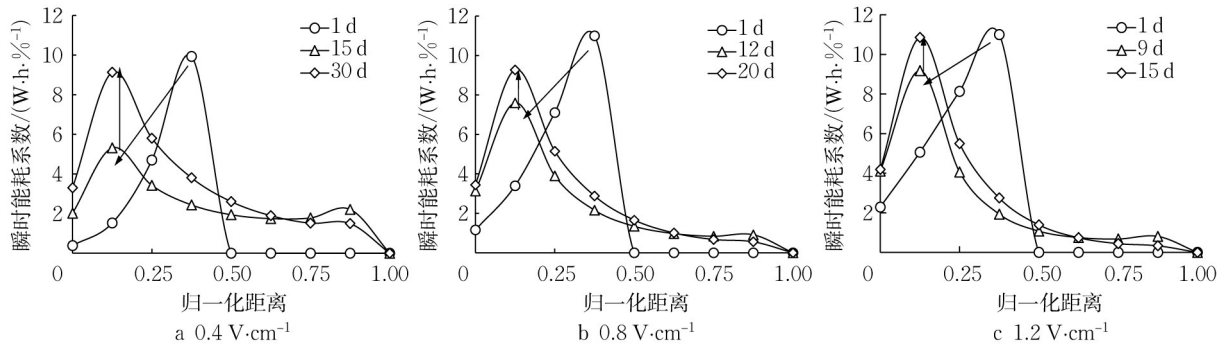


图 8 土体不同位置处的瞬时能耗系数

Fig.8 Instantaneous energy consumption coefficients at different locations of the soil

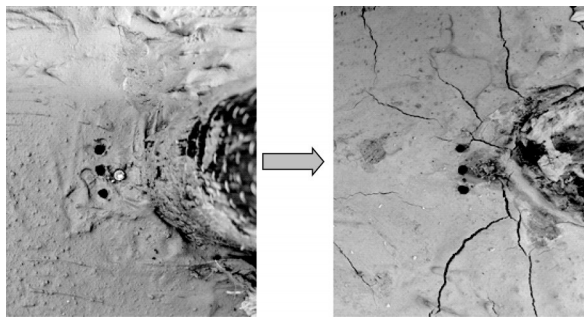


图 9 阳极附近土体与电极间的接触裂缝

Fig.9 Contact cracks between soil and electrodes near anode

使得能量利用率变低。

电渗过程中平均瞬时能耗系数先降低后升高的变化特征,与水分迁移过程有关。电渗前期湿度从阳极处逐渐下降,并开始出现湿度梯度,此时部分电能转化为土体的土水势能,由于未产生整体的湿度下降,平均排水速率较低,导致试验开始时平均瞬时能耗系数较高。随着湿度梯度逐渐形成并稳定,平均排水速率逐渐上升,瞬时能耗系数逐渐下降。试验进行到后期,排水速率下降到较低水平,土体电阻逐渐上升,特别是阳极附近的电阻大大增加,瞬时能耗系数也逐渐变大。

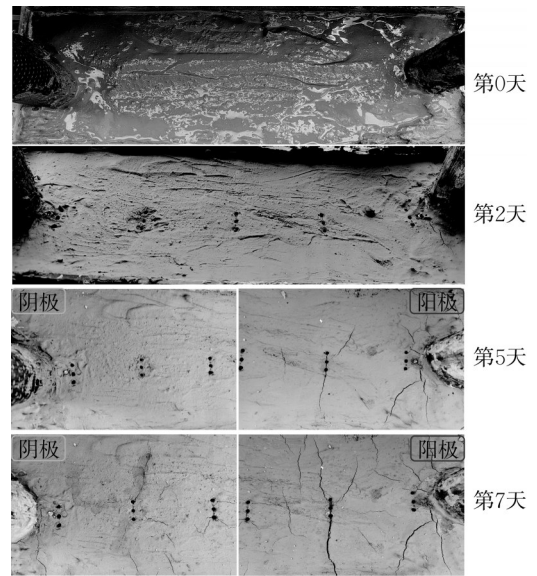


图 10 室内电渗试验过程的土体湿度

Fig.10 Soil moisture during indoor electroosmotic testing

### 2.4 电渗最优能耗加载曲线

瞬时能耗系数随时间的变化趋势表明,土体平均含水率显著影响该加载电势梯度下的瞬时能耗系数。为进一步分析瞬时能耗系数与土体平均含水率的关系,将0.4~1.6 V·cm<sup>-1</sup>稳压加载电渗试验中的平均瞬时

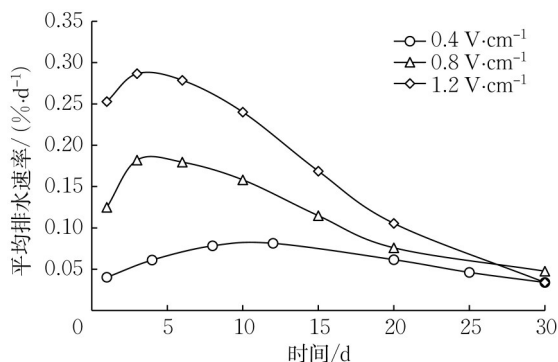


图11 平均排水速率随时间的变化

Fig.11 Variation of average drainage rate with time

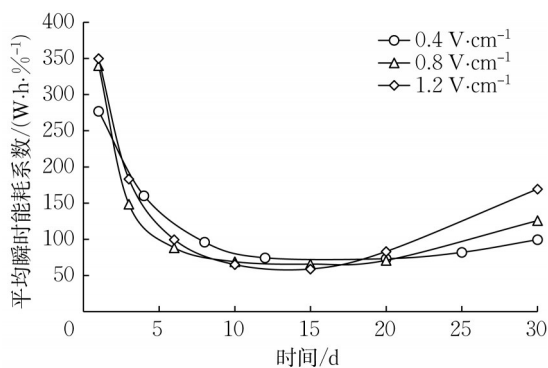


图12 平均瞬时能耗系数随时间的变化

Fig.12 Variation of average instantaneous energy consumption coefficient with time

能耗系数随土体平均含水率的变化汇总于图13。由图13可见,在不同加载电势梯度下,平均瞬时能耗系数随土体平均含水率的增大先减小后增加,不同加载电势的平均瞬时能耗系数曲线的最低点不同,将该点称为该加载电势梯度下的最优能耗点,最优能耗点对应的加载电势梯度称为该湿度下的最优电势梯度。当平均含水率分别为32.1%、30.6%、29.5%、28.1%、27.2%时,最优电势梯度分别为0.4、0.6、0.8、1.2、1.6  $V \cdot cm^{-1}$ 。当加载的电势梯度位于该含水率下的最优加载电势梯度附近时,电渗瞬时能耗系数将维持在较低水平。

图14为不同含水率对应的最优电势梯度,可称之为最优能耗加载曲线。随着土体湿度的下降,最优加载电势梯度逐渐上升,两者为幂函数关系。基于该最优能耗加载曲线,可动态调节电渗过程中的加载电势梯度,实现低能耗的电渗排水。

### 3 低能耗逐级加载试验

#### 3.1 低能耗加载排水试验

为验证低能耗加载方法的效果,与稳压加载法和逐级加载法进行对比试验,方案如表3所示。土

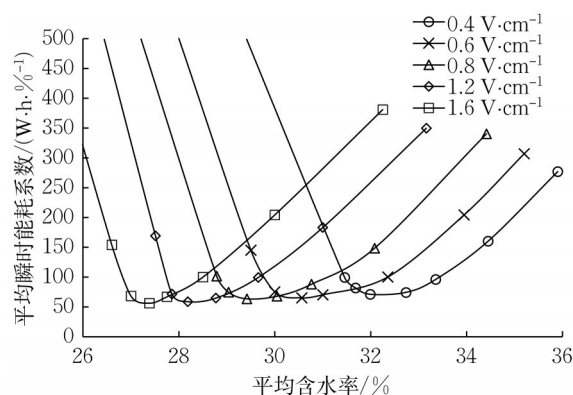


图13 不同电势梯度下平均瞬时能耗系数随平均含水率的变化

Fig.13 Variation of average instantaneous energy consumption coefficient with average water content at different potential gradients

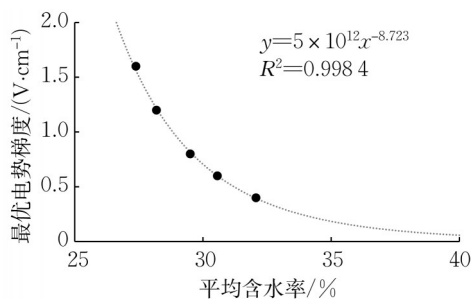


图14 最优电势梯度与平均含水率的关系

Fig.14 Relationship between optimum potential gradient and average water content

体初始平均含水率为40%,结束时的平均含水率为27%。其中,试验1—试验3的试验步骤如1.2节所述,而试验4为低能耗加载方式,以不同含水率对应的最优加载电势梯度为依据,采用0.1  $V \cdot cm^{-1}$ 为间隔进行逐级加载,直到试验结束。

表3 稳压加载、逐级加载及低能耗加载的试验设计

Tab.3 Test design for stabilized loading, stepwise loading and low energy consumption loading

试验编号	通电方式	电势梯度( $V \cdot cm^{-1}$ )
试验1	稳压加载	0.8
试验2	稳压加载	1.2
试验3	逐级加载	0.4~1.6
试验4	低能耗加载	初始0.4

#### 3.2 试验效果分析

图15为各加载方式下平均含水率与能耗的关系。1.2  $V \cdot cm^{-1}$ 稳压加载下的能耗最高,试验结束时消耗能量1306.5  $W \cdot h$ ;逐级加载消耗能量781.8  $W \cdot h$ ,为稳压加载的59.8%;低能耗加载的能耗最低,消耗能量602.9  $W \cdot h$ ,为稳压加载的46.1%、逐级加载的77.1%。这表明,逐级加载可以有效减少



电渗过程中的能耗,基于最优能耗加载曲线的低能耗加载则进一步优化了能耗。

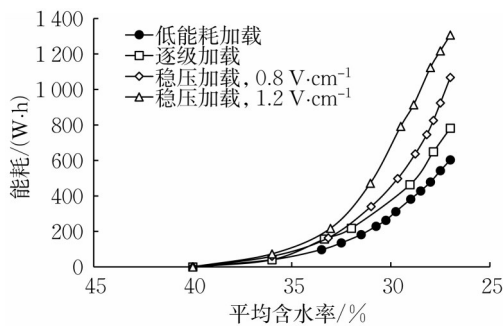


图15 各加载方式下平均含水率与能耗的关系

Fig.15 Relationship between average water content and energy consumption under different loading modes

图16为各加载方式下平均含水率与电渗时间的关系。加载电势梯度为最低的 $0.8 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时,试验前期含水率下降较快,但后期排水效率降低,电渗时间达最长的33 d。加载电势梯度为最高的 $1.2 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时,试验时间仅为最短的14 d;与之相比,逐级加载和低能耗加载都在一定程度上需花费更多的电渗时间,可视为用时间成本替换能量成本。同时,低能耗加载方式下含水率随时间的变化比逐级加载方式下的趋势更平顺,表明以土体湿度作为依据的低能耗加载不仅可以降低能耗,还可以使排水速率维持在一个相对较高的水平。

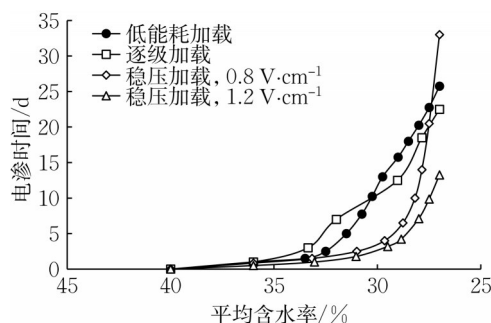


图16 各加载方式下平均含水率与电渗时间的关系

Fig.16 Relationship between average water content and testing time under different loading modes

## 4 结论

(1)电渗过程中能耗系数先降低后上升,能耗系数最低时所对应的土体平均含水率与加载电势梯度负相关。加载电势梯度每增加 $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,最低能耗系数所对应的平均含水率降低约 $1.5\%$ 。

(2)电渗试验后期阳极瞬时能耗系数较大,约占

总体的70%,而该区域的排水速率约占整体的30%,影响了整体的能源利用率和排水效率,不利于电渗排水的进行。

(3)电渗的平均瞬时能耗系数随着电渗的进行先降低后增加,加载电势梯度越大对应的最优能耗含水率越小,瞬时能耗系数最低时的加载电势梯度与平均含水率负相关,两者为幂函数关系。

(4)基于最优能耗加载曲线的低能耗加载方法,较 $1.2 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 稳压加载节约54%的能耗、较逐级加载节约23%的能耗。

### 作者贡献声明:

钱劲松:试验设计,数据分析和论文修改。

杨以诚:室内试验,数据处理和论文撰写。

张玉:图表处理,论文修改。

卢军源:数据分析。

### 参考文献:

- [1] QUINTUS H V, KILLINGSWORTH B. Analysis relating to pavement material characterizations and their effects on pavement performance [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1998.
- [2] 钱劲松,王朋,凌建明,等.潮湿多雨地区高速公路路基湿度的实测特征[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(12):1812.  
QIAN Jinsong, WANG Peng, LING Jianming, et al. In-situ investigation of subgrade moisture of expressway in humid zone [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(12):1812.
- [3] 李聪,凌建明,官盛飞.基于路基湿度预估的综合湿度指数[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(11):1672.  
LI Cong, LING Jianming, GUAN Shengfei. Prediction-based subgrade moisture thornthwaite moisture index [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(11):1672.
- [4] BRIAUD J, SAEZ D. Soil compaction: recent developments[C]// International Conference on Ground Improvement & Ground Control. Wollongong: University of Wollongong, 2012:3-30.
- [5] 李冬雪,凌建明,钱劲松,等.湿度循环下黏质土路基回弹模量演化规律[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(7):1051.  
LI Dongxue, LING Jianming, QIAN Jinsong, et al. Influence of moisture content change cyclicality on modulus evolution law of cohesive subgrade soil [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(7):1051.
- [6] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [7] 赵鸿铨,朱兴一,涂辉招,等.智能铺面的内涵与架构[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(8):1131.  
ZHAO Hongduo, ZHU Xingyi, TU Huizhao, et al. Concept and framework of smart pavement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(8):1131.
- [8] 赵鸿铨.智能铺面技术新进展[M].北京:人民交通出版社,2019.  
ZHAO Hongduo. State-of-the-art and future perspectives of smart

- pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [9] CASAGRANDE L. Stabilization of soils by means of electro-osmosis state of the art [J]. Journal of the Boston Society of Civil Engineers Section, 1983,69:255.
- [10] WANG S D, ZHANG L H, WU H J, *et al.* Research on over-wet subgrade filler treatment by electro-osmosis in rainy and moist areas [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009,31(8):63.
- [11] 王甦达,张林洪,吴华金,等. 电渗法处理过湿土填料中有关参数设计的探讨[J]. 岩土工程学报, 2010(2):211.  
WANG Suda, ZHANG Linhong, WU Huajin, *et al.* Parameter design of over-wet soil fill treated by electro-osmosis. [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(2):211.
- [12] 曹怀长. 电势作用下重塑黄土水分迁移问题研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.  
CAO Huaizhang. Study of remolded loess moisture migration under the action of electric potential [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [13] LING J, LI X, QIAN J, *et al.* Performance comparison of different electrode materials for electro-osmosis treatment on subgrade soil [J]. Construction and Building Materials, 2020, 271:121590.
- [14] TANG K, ZHANG F, FENG D, *et al.* Moisture migration and electric distribution of unsaturated clay under electro-osmosis with carbon fiber tape as electrode [J]. Engineering Geology, 2021, 294:106404.
- [15] 陈卓. 通电设计对电渗加固软土效果的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
CHEN Zhuo. Experimental research on the effect of electricity design to electro-osmotic consolidation of soft clay [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [16] 朱俊霖. 提高电渗法能量利用率的实用技术研究[J]. 土工基础, 2017(4):472.  
ZHU Junlin. Improving the energy utilization rate in the practical application of electro-osmosis [J]. Soil Engineering and Foundation, 2017(4):472.
- [17] KALUMBA D, GLENDINNING S, ROGERS C, *et al.* Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(11):1227.
- [18] 庄艳峰,王钊. 电渗固结中的界面电阻问题[J]. 岩土力学, 2004(1):117.  
ZHUANG Yanfeng, WANG Zhao. Study on interface electric resistance of electro-osmotic consolidation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(1):117.
- [19] 陶燕丽,周建,龚晓南. 电极材料对电渗过程作用机理的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014,48(9):1618.  
TAO Yanli, ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Experimental study on function mechanism of electrode materials upon electro-osmotic process [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014,48(9):1618.
- [20] 李卓明. 电渗固结中接触电阻影响因素的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
LI Zhuoming. Experimental study on the influencing factors of the contact resistance on electro-osmotic consolidation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [21] 郑凌透,谢新宇,谢康和,等. 电渗法加固地基试验及应用研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017,51(6):1064.  
ZHENG Lingwei, XIE Xinyu, XIE Kanghe, *et al.* Test and application research advance on foundation reinforcement by electro-osmosis method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017,51(6):1064.
- [22] 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(2): 287.
- [23] 焦丹,龚晓南,李瑛. 电渗法加固软土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3208.  
JIAO Dan, GONG Xiaonan, LI Ying. Experimental study of consolidation of soft clay using electro-osmosis method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3208.
- [24] 陈卓,周建,温晓贵,等. 电极反转对电渗加固效果的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013,47(9):1579.  
CHEN Zhuo, ZHOU Jian, WEN Xiaogui, *et al.* Experimental research on effect of polarity reversal to electro-osmotic [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013,47(9):1579.
- [25] KARUNARATNE G P. Prefabricated and electrical vertical drains for consolidation of soft clay [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(4): 391.
- [26] 刘飞禹,宓炜,王军,等. 逐级加载电压对电渗加固吹填土的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(12):2582.  
LIU Feiyu, MI Wei, WANG Jun, *et al.* Influence of applying stepped voltage in electro-osmotic reinforcement of dredger fill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2582.
- [27] 潘冬庆,张建忠,张赤宇. 降低电渗能量消耗的理论及试验研究[J]. 低温建筑技术, 2014,36(3):123.  
PAN Dongqing, ZHANG Jianzhong, ZHANG Chiyu. Theoretical and experimental research on reducing energy consumption of electroosmosis [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014,36(3):123.
- [28] 陶燕丽. 不同电极电渗过程比较及基于电导率电渗排水量计算方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
TAO Yanli. Electro-osmotic process under different electrode materials and a novel method for discharge calculation based on electrical conductivity [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [29] 李瑛,龚晓南,张雪婵. 电压对一维电渗排水影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2011,32(3):709.  
LI Ying, GONG Xiaonan, ZHANG Xuechan. Experimental research on effect of applied voltage on one-dimensional electroosmotic drainage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3):709.
- [30] XUE Z, TANG X, YANG Q, *et al.* Comparison of electro-osmosis experiments on marine sludge with different electrode materials [J]. Drying Technology, 2015, 33(8):986.
- [31] 李瑛. 软黏土地基电渗固结试验和理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
LI Ying. Experimental and theoretic study on electro-osmotic consolidation of soft clay foundation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [32] 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(5):582.  
HU Yuchen, WANG Zhao, ZHUANG Yanfeng. Experimental studies on electro-osmotic consolidation of soft clay using EKG electrodes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(5):582.