

DOI:10.16799/j.cnki.csdqfh.2020.11.052

夹砂层软土地基电渗联合真空预压设计

屠建波¹, 崔允亮², 葛倩如¹, 张 勇¹

(1. 浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州 3100030; 2. 浙江大学城市学院土木工程系, 浙江 杭州 310015)

摘 要: 电渗联合真空预压处理软基设计方法尚不够系统和全面, 限制了该技术在工程中的应用。针对夹砂层软土地基电渗联合真空预压处理设计, 提出了可压缩排水电极设计方法, 电源与供电线路设计方法, 真空封闭及排水系统设计方法和工期与沉降预测方法, 给出了具体的夹砂层地基电阻的计算公式和有限元法模拟时电压换算超孔压的计算公式, 研究成果为夹砂层软土地基电渗联合真空预压工程设计提供了成套设计方法。

关键词: 电渗; 真空预压; 电源设计; 沉降预测

中图分类号: TU472.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)11-0194-04

0 引言

自从 Casagrande^[1]将电渗技术应用于软土加固工程中以后, 电渗技术吸引了众多岩土工程研究者的兴趣。国内外通过大量的室内试验^[2-7]验证了电渗法进行软土固结的特性和相关规律, 证明了电渗法加固软土地基的有效性。目前电渗法已在许多现场试验^[8-12]中实施, 试验结果表明单纯使用电渗固结效率较低, 电渗法与其他地基处理方式联合应用才能取得更好的效果。电渗联合真空预压法^[12]、电渗联合强夯法^[8]、电渗联合气压劈裂法^[3]和电渗联合化学法^[2]等都在室内或者现场试验中得到验证。其中, 电渗联合真空预压法研究和应用最为广泛, 许多学者对电渗联合真空预压法加固软土地基进行了大量的试验研究^[13-15]。在电渗联合真空预压设计方面已有一定的研究基础, 例如庄艳峰等^[16]提出了电渗过程中界面电阻的表达式; 王甦达等^[17]引入了界面电阻并考虑相邻电极影响用于计算场地总电阻和电流。李瑛等^[18]和庄艳峰^[19]给出了电渗排水固结设计的主要流程和设计内容, 给出了排水量、电渗系统、处理时间等的确定方法, 对电渗工程设计具有较好的参考价值, 但对于电渗联合真空预压工程设计而言其设计理论不够全面和系统, 也没有给出明确的沉降和孔压预测方法。徐伟等^[20]以及吴辉和胡黎明^[22]均基于传统的太沙基固结理论推导了电渗固结方程。这些固结理论的推导为电渗法有限元模拟奠定了良

好的基础。另外, 薛志佳等^[21]用 AMGPSO-BP 算法进行了电渗神经网络预测。对电渗固结沉降预测可通过推导固结方程发展有限元软件进行数值模拟, 或者利用神经网络等其他手段, 但是这类方法不利于工程技术人员掌握, 对于预测复杂工程精度不高。

综上所述, 对于电渗联合真空预压的设计方法目前研究较少, 已有成果不够系统和全面, 需要对电渗联合真空预压法加固软土地基的设计方法进行系统研究。沿海地区深厚软土地基往往存在一定厚度的夹砂层, 夹砂层含水丰富, 渗透系数大, 在进行电渗联合真空预压处理时容易造成电极浪费、电流过大造成线路过载、真空封闭系统漏气等, 需要合理进行电极和真空封闭系统设计, 并准确设计电路系统。本文针对夹砂层软土地基进行详细电渗联合真空预压设计。

1 设计方法

1.1 电极设计

电渗联合真空预压法加固软土地基系统要求电极既能导电又能排水, 同时为了防止电极在地基沉降过程中刺穿地基表面覆盖的真空膜, 还要求电极为柔性或可压缩。针对夹砂层软土地基, 电极在砂层中宜为绝缘状态, 砂层中水流丰富易形成短路而导致电路中电流过大。满足上述要求的电极可采用“电动塑料排水板(EKG)”, 电动塑料排水板通过在滤芯材料中添加石墨、内嵌铜丝等方式实现排水板的导电性能, 柔性较好, 且方便施工, 是一种理想的电渗联合真空预压加固软基系统的电极材料。目前我国研发的 EKG 材料有板式、管式和板管结合

收稿日期: 2020-04-25

基金项目: 浙江省交通厅科研计划项目(2017004); 浙江省自然科学基金项目(LGF20E080007)

作者简介: 屠建波(1975—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事道路设计研究工作。

式。EKG 材料目前可采用成本低、导电性好的金属电极代替。针对电渗联合真空预压法加固软土地基的需求,该研究提出一种可压缩排水电极(ePVD)。可压缩排水电极(ePVD)采用周身钻满小孔的镀锌钢管外包土工滤布制作而成,顶端引出一根导线用于连接电路。弹簧软管在地基沉降过程中可压缩,避免刺穿真空膜,并且弹簧软管可与水平排水管道通过三通直接连接,改善真空传递效果。针对夹砂层软土地基,在可压缩排水电极处于砂层部分采用绝缘胶带缠绕在镀锌钢管上,使这部分钢管与周围含水层绝缘。可压缩排水电极如图 1 所示。



图 1 可压缩排水电极

电渗固结工程中排水电极的间距对电渗效果影响很大。考虑到过小的电极间距会产生高昂的电极材料成本,在纯电渗工程中电极间距较多采用 1.0~1.5 m 间距,电极排列采用正方形或梅花形排列方式。在电渗联合真空预压法加固软土地基工程中,为降低材料成本可适当增大电极间距,可采用可压缩排水电极与常规塑料排水板间隔布置的方式,即排水电极间距为塑料排水板间距的 2 倍,排水电极与塑料排水板互为补充。电极长度根据所需处理软土层深度确定,对于软土层较深的情况,可采用短电极+长塑料排水板的组合形式,但在有条件情况下仍建议电极长度满足软土层处理深度的要求。

1.2 电源与供电线路设计

直流电源是电渗联合真空预压加固地基工程的主要设备。工地用电通常为 380 V 三相交流电,需要通过直流电源设备将其转换为直流电。常采用的直流电源主要分为单向脉冲式直流电源和单向恒直流电源两种。单向脉冲式直流电源输出的电流波形为高频次的单向方波,单向恒直流电源输出的电流波形为单向恒定直流电。根据笔者的试验研究脉冲式直流电源相比恒直流电源的电渗效率更高,建议采用脉冲式直流电源。插入地基的排水电极通过支导线汇总到主导线并连接到直流

电源的阳极和阴极。导线可采用铜芯电缆线或铝芯电缆线。铝芯电缆线载流能力不及铜芯电缆线,容易发热,但价格较便宜,在电流较小的情况下可采用铝芯电缆线。在实际工程中,由于场地含水量高,场地电阻小,往往对导线载流量和直流电源功率有较大的需求,而这两者也是电渗处理面积的限制因素,因此对导线电流和电源功率的计算十分重要。工程设计中应根据每根支导线串联的电极根数计算支导线和主导线电流,分别确定支导线截面积和主导线截面积。最后根据主导线电流及设计电压计算所需电源功率。由于电源功率越大,电源重量越大,价格越高,在工程中对于大面积场地宜划分成小面积的电渗区块,每个区块采用一台直流电源控制。

电源功率 $P=UI$, 其中 U 为电源输出电压,通常为安全电压 36V 以内,也可根据工程需要采用更高的电压,但采用太多的电压电能浪费严重,且对电路系统和电源要求较高,成本显著增长; I 为电源输出总电流,其电流大小为每根阳极(或阴极)支导线电流 I' 的总和。每根阳极支导线电流 $I'=U/\Sigma R'$, 其中 $\Sigma R'$ 为每根阳极支导线所控制场地面积的总电阻。电渗线路系统如图 2 所示。

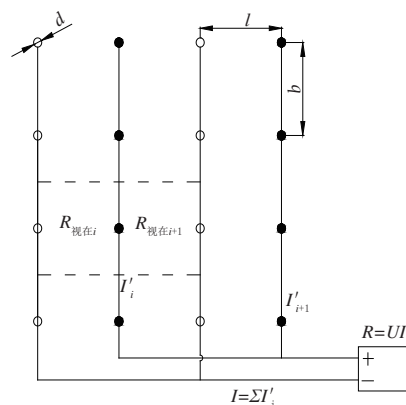


图 2 电渗线路示意图

每根阳极支导线所控制场地面积的总电阻 $\Sigma R'$ 可由每对阴阳极的视在电阻来描述。将每一对阴阳极及之间土体划分为一个土条,如图 2 所示,则该对电极的视在电阻:

$$R_{\text{视在}} = R_{\text{线路}} + R_{\text{电极}} + R_{\text{界面}} + R_{\text{土体}} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{线路}}$ 为导线及导线连接处产生的电阻,工程估算时可令 $R_{\text{线路}}=0$; $R_{\text{电极}}$ 为排水电极材料自身电阻,采用金属电极时可令 $R_{\text{金属}}=0$,采用电动塑料排水板(EKG)材料时根据实测材料电阻取值。

由于电极材料与土体导电面积差别较大,而且由于电极材料与土体界面的不良接触,电极与土体的界面电阻 $R_{\text{界面}}$ 往往是不能忽略的。庄艳峰等^[16]和胡俞晨等^[23]给出的界面电阻计算公式为:

$$R_{\text{界面}} = \frac{k_i}{s_2} \left(\frac{1}{\text{rat}} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: $\text{rat} = s_1/s_2$ 是一个比例参数, s_1 为电极导电面积, s_2 为土体导电面积, 两者的面积比例影响电极与土体之间的界面导电效果。

界面电阻和土体电阻计算需考虑夹砂层的影响。针对采用本文所提可压缩排水电极处理夹砂层地基情况, 上式可改写为:

$$R_{\text{界面}} = \left(\frac{1}{d \sum h_i} - \frac{1}{d \sum h_i} \right) k_j \quad (3)$$

式中: k_j 为界面电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}^2$; d 为阳极或阴极直径, cm ; h_i 为电极处理范围内第 i 层土体厚度, cm , 针对可压缩排水电极处理夹砂层地基情况不包括砂层厚度和电极顶部弹簧软管段土层厚度; b 为阳极间距或阴极间距, cm 。

一对阴极和阳极之间的土体电阻为:

$$R_{\text{土体}} = \frac{\rho_{\pm} l}{d \sum h_i b} \quad (4)$$

式中: $\rho_{\pm}$ 为阴阳极间土体的平均电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 将每层土体的电阻率按照土层厚度进行加权平均, 针对可压缩排水电极处理夹砂层地基情况不包括砂层电阻率和电极顶部弹簧软管段土层的电阻率; l 为阴阳极之间距离, cm 。

由于一根阳极支导线上所连接的每对阴阳极的视在电阻为并联关系。因此, 每根阳极支导线所控制场地面积的总电阻 $\Sigma R' = R_{\text{视在}}/n$, 其中 n 为阴阳极对数。由于一根阳极支导线与相邻的两条阴极支导线形成回路, n 为一根阳极支导线所连接阳极个数的两倍。由于一对阴阳极中, 阳极与相对应阴极两侧相邻阴极之间的电流较小, 可不考虑阳极与相邻阴极之间形成的电阻。每根阳极支导线电流 $I' = U/\Sigma R'$, 根据计算电流, 按照导线截面积载流能力选择合适的支导线类型。每台电源控制面积的总电流 $I = \Sigma I'$, 根据总电流确定主导线的截面积, 选择合适的主导线类型。

1.3 真空封闭及排水系统设计

由于地基中夹有砂层, 容易导致抽真空过程中场地漏气, 真空度达不到设计要求, 因此, 需要在场地四周设置密封墙阻断透气层。密封墙可采用泥浆搅拌墙。泥浆中的黏土含量不低于 20%, 泥浆浓度 1.2~1.3 s。黏土密封墙的宽度通常为 0.7~1.2 m, 黏土密封墙应穿透砂层并进入不透水层不小于 1.0 m。

对于砂层埋藏较深的情况, 泥浆搅拌密封墙效果不佳, 在真空压力作用下容易失效, 建议采用自凝灰浆墙作为密封墙。对于淤泥质软黏土地基

夹砂层的地质, 经现场试验建议自凝灰浆的配合比为: 水泥(PO42.5): 钙基膨润土: JM-VII 型缓凝剂: 纯碱: 水 = 280: 62.5: 1.12: 5: 1 000。自凝灰浆墙厚度为 600~800 mm。

在利用密封墙封闭的场地区域内, 用真空膜覆盖场地, 并将真空膜沿场地四周埋入黏土中, 使待处理场地形成一个密闭的空间。真空膜下面设置水平排水层, 包括水平主管和支管。可沿场地四周修建围堰, 然后在围堰内注水加载。真空密闭和排水系统如图 3 中 A 区所示。

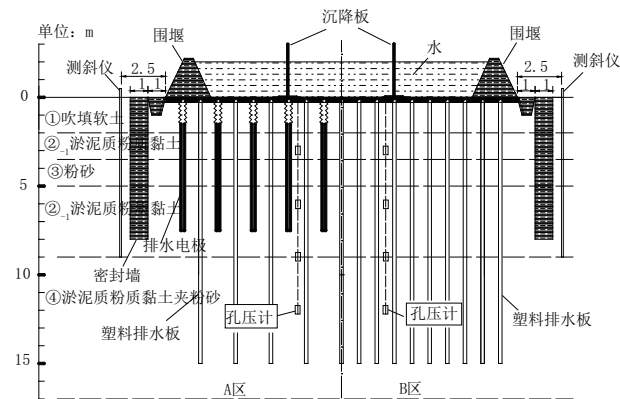


图3 真空密闭和排水系统(单位:m)

1.4 工期与沉降预测

处理工期和地基沉降对施工组织有重大影响, 是软土地基处理工程的重要因素, 因此准确的工期和沉降预测是软土地基处理设计的重要内容。以往的电渗处理软土地基工程对于工期设计往往根据经验或根据现场监测情况决定电渗停止时间; 对于电渗处理软土地基沉降, 部分学者建立了电渗联合真空预压的固结方程可以用于沉降计算, 但需要编制有限元程序, 对于普通工程技术人员难以掌握。为简化电渗联合真空预压处理软土地基工期和沉降预测, 提出一种简化的、易于工程技术人员掌握的有限元模拟电渗固结的方法。假设单元土体内由电渗引起的水流可以用负压引起的水流等效, 在保证渗流量相等的条件下, 可以推导出施加多大的负压可以与一定的电压下单元土体的排水效果等价。虽然电渗固结和负压固结的固结机理不同, 但软土加固工程重在加固效果, 最直观的体现就是固结排水量。因此, 在保证单元土体单位排水量相等的条件下用负压固结来近似模拟电渗固结可以满足工程需要。

根据 Mitchell^[24]的研究, 单元土体内由电渗引起的单位流量可以表示为:

$$q_e = k_e i_e = k_e \text{grad}(\phi) = k_e \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (5)$$

根据达西定律, 单元土体内由负压引起的单位

流量可以表示为:

$$q_h = k_h i_h = k_h \frac{\text{grad}(H)}{\gamma_w} = \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

式中: k_e 为电渗透系数; k_h 是水平渗透系数 m/s ; i_e 是电势梯度, i_h 是水头梯度; ϕ 是电势 V ; H 是水头 m ; u 为负的超孔隙水压力, Pa 。

假设在负的超孔隙水压力 u 作用下产生的单位水流 q_h 与电势 ϕ 作用下产生的单位水流 q_e 相等, 则:

$$q_h = q_e = \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x} = k_e \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (7)$$

对式(7)积分得:

$$\frac{k_h}{\gamma_w} u = k_e \phi + C \quad (8)$$

根据 $x=0$ 时, $\phi=0, u=0$ 的边界条件, 则常数 $C=0$ 。

由式(8)得:

$$u = \frac{k_e \gamma_w \phi}{k_h} \quad (9)$$

则电势 ϕ 产生单位渗流量等于负的超孔压 $u = k_e \gamma_w \phi / k_h$ 产生的单位渗流量, 本身的符号为负。

在电渗固结的有限元模拟中, 采用施加负的超孔压排水的办法来近似模拟电渗排水, 将阳极设置成负压边界, 负压的大小通过式(9)计算。实际电渗水流从阴极排出, 阴极处的超孔压始终为 0, 在阳极不排水的条件下, 随着阳极处孔隙水往阴极排出, 逐渐在阳极处形成负的超孔压, 阳极处的土体首先固结, 产生比阴极处土体更大的沉降。这与实际电渗过程中的土体的固结沉降规律是一致的。不过, 在采用本文提出的简化方法进行电渗有限元模拟时, 施加在阳极处的负的超孔压会产生从阴极流向阳极的渗流, 这与实际电渗的渗流方向是不一致的, 因而这种方法只是一种简化的近似方法。但是这种方法除了可以保证土体排水量相等外, 还可以反映电渗过程中阳极处的土体比阴极处更先得到固结沉降的规律。软土地基加固最关心的是沉降和位移, 渗流方向并不重要, 因而在软土地基加固中应用。

虽然该方法不能从本质上反映电渗加固机理, 但可以预测土体沉降, 可以用于真空电渗堆载法处理软土地基的沉降预测。通过有限元模拟准确预测地基沉降量可以合理设计沉降土方, 准确进行土方调配。根据有限元模拟提取沉降-时间曲线, 可预测地基的沉降随时间变化规律, 沉降稳定并且预测工后沉降满足工程要求的时间可以作为真空电渗堆载法停止工作时间, 以此预测工程工

期, 便于合理进行工程进度安排。

2 结 论

本文针对夹砂层软土地基电渗联合真空预压处理设计, 提出了可压缩排水电极设计、电源与供电线路设计、真空封闭及排水系统设计和工期与沉降预测成套设计方法:

(1) 可压缩排水电极同时具有导电和排水功能, 可隔离夹砂层, 同时可压缩避免刺破真空膜, 适用于夹砂层软土地基电渗联合真空预压处理。

(2) 合理设计供电线路和电源功率是电渗处理工程的关键, 需考虑界面电阻和夹砂层影响准确计算场地电阻, 本文提出的计算方法可合理计算夹砂层软土地基所需导线截面积和电源功率。

(3) 夹砂层软土地基需保证场地密封效果, 建议采用自凝灰浆墙进行真空封闭, 本文试验所得自凝灰浆配合比可用于夹砂层软土地基。

(4) 提出了电渗固结的简化有限模拟方法, 基于单元土体渗流量相等原则, 将电压换算成超孔压施加在排水边界。该方法可用于预测电渗联合真空预压处理场地沉降和估算工期。

参考文献:

- [1] CASAGRANDE L. Electro-osmosis in Soils [J]. Geotechnique, 1948, 1(3): 159-177.
- [2] OU Chang-yu, CHIEN Shao-Chi, LIU Ren-hao. A Study of the Effects of Electrode Spacing on the Cementation Region for Electro-osmotic Chemical Treatment [J]. Applied Clay Science, 2015(104): 168-181.
- [3] 刘飞禹, 吴文清, 海钧, 等. 絮凝剂对电渗处理河道疏浚淤泥的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 56-63+72.
- [4] WU Hui, HU Li-ming, WEN Qing-bo. Electro-osmotic Enhancement of Bentonite with Reactive and Inert Electrodes [J]. Applied Clay Science, 2015(111): 76-82.
- [5] SHEN Yang, LI Yan-de, HUANG Wen-jun, et al. Vertical Drainage Capacity of New Electrical Drainage Board on Improvement of Super Soft Clayey Ground [J]. Journal of Central South University, 2015(22): 4027-4034.
- [6] 杨克军, 袁国辉, 符洪涛, 等. 通电方式对电渗加固软土影响试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(2): 170-176.
- [7] 任连伟, 曹辉, 孔纲强. 试剂注入配合比对化学电渗法处治软黏土加固效应对比研究[J]. 岩土力学, 2020(4): 1-8.
- [8] 符洪涛, 王军, 蔡袁强, 等. 低能量强夯-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 612-620.
- [9] BJERRUM L, MOUM J, EIDE O. Application of Electro-osmosis to a Foundation Problem in Norwegian Quick Clay [J]. Geotechnique, 1967, 17(3): 214-235.
- [10] LO K Y, HO K S, INCULETI I. Field Test of Electroosmotic Strengthening of Soft Sensitive Clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 74-83.

贯通。因此此次有限元模拟长管砂袋围堰填筑过程,最终地基土未塑性破坏,围堰结构安全。

5 结 语

本文通过有限元模拟长管砂袋围堰填筑施工过程,研究围堰分层填筑过程变形规律,计算了围堰沉降及水平变形结果,同时通过地基土塑性区发展分析,得出围堰结构未发生失稳破坏的结论,为工程施工提供了参考依据。

参考文献:

[1] 魏新江,王金艳,丁智,等. 舟山海底沉管隧道模袋砂围堰位移

分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1835-1842.

[2] 闫振哲. 分析模袋围堰施工技术[J]. 北京水务, 2009(6): 24-26.

[3] 李明宇, 李成强, 刘涛, 等. 饱和软土中模袋围堰变形规律现场试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(9): 110-114.

[4] 羊炜. 软土地基上模袋围堰稳定分析方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[5] 周辉, 方大勇, 李川, 等. 大型土工织物充填袋筑堤时软土地基变形速率的控制[J]. 广东水利水电, 2004(2): 20-21.

[6] 江泓达, 江越进, 王付德. 模袋砂围堰在淤泥基础上的应用[J]. 人民珠江, 2005(3): 64-65, 73.

[7] 董志良, 张功新, 李燕, 等. 大面积围海造陆创新技术及工程实践[J]. 水运工程, 2010(10): 54-67.

[8] 董志良, 刘嘉, 朱幸科, 等. 大面积围海造陆围堰工程关键技术研究及应用[J]. 水运工程, 2013(5): 168-175.

(上接第 197 页)

[11] 吴松华, 徐勇平. 电渗联合注浆加固吹填土现场试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 77-81.

[12] Han-long Liu, Yun-liang Cui, Yang Shen. A new method of combination of electro-osmosis, vacuum and surcharge preloading for soft ground improvement [J]. China Ocean Engineering, 2014, 28(4): 511-528.

[13] 王军, 王逸杰, 刘飞禹, 等. 间歇式真空预压联合电渗加固吹填软土试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 37-45.

[14] 孙召花, 余湘娟, 高明军, 等. 真空-电渗联合加固技术的固结试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 250-258.

[15] 邱晨辰, 沈扬, 励彦德, 等. EKG 电极真空-电渗处理软黏土室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 251-255.

[16] 庄艳峰, 王钊. 电渗固结中的界面电阻问题[J]. 岩土力学, 2004(1): 117-120.

[17] 王魁达, 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, 32(2): 211-215.

[18] 李瑛, 龚晓南. 软黏土地基电渗加固的设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 955-959.

[19] 庄艳峰. 电渗排水固结的设计理论和方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 152-155.

[20] 徐伟, 刘斯宏, 王柳江, 等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 169-175.

[21] 薛志佳, 唐小微, 杨庆. 基于 AMGPSO-BP 神经网络电渗固结排水效果预测分析[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 267-272.

[22] 吴辉, 胡黎明. 真空预压与电渗固结联合加固技术的理论模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2): 182-185.

[23] 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): 582-586.

[24] MITCHELL J K. Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice[J]. Geotechnique, 1991, 41(3): 299-340.