

土体中电现象的应用

庄艳峰, 王 钊

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:介绍了 5 种主要的土体电现象, 及其在加筋、固结、环境治理等方面的应用, 并对土体的电渗固结进行了理论分析, 由此得出: 在施加电场的情况下, 孔压消散加快, 随着时间的增加, 孔压可以达到负值; 另外, 土体固结度增加, 相应的土体电动固结后的含水量低于加载固结。这些结论与 Nettleton I. M. 的一系列试验结果比较吻合。

关键词:电现象; 加筋; 固结; 环境治理; 土体

中图分类号: TU441+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2002)06-0112-04

土体中存在 5 种主要的电现象, 它们分别是: 流势、迁移势、电渗透、离子迁移、电泳。流势、迁移势电现象分别与电荷和带电颗粒移动所引起的电势有关, 电渗透、离子迁移、电泳这三种则与在土中施加电场所产生的输移机理有关。土体电现象主要有以下两方面应用。

a. 在加筋、固结中的应用。电渗透可以产生负孔压, 从而提高有效应力, 促进土体固结, 其治理效果与预压排水固结相似, 所不同的是电渗透所产生的孔压不是正的而是负的, 因此不存在稳定性问题。电渗透也可以用于加速垂直加载所引起的正孔压的消散, 而且正孔压消散后, 负孔压产生, 在电渗作用下固结还可以进一步进行。在电渗固结过程中, 由于固结以及化学胶结作用, 土(尤其是粘性土)的强度以及土与加筋材料间的粘结力提高。

b. 在环境治理方面的应用。电现象可以用于去除或封锁土体中的污染物。电动处理是惟一可以原位处理细粒土及其中水污染问题的方法。以下是一些可用于去除或封锁污染物的电动过程: 离子迁移可用于传输金属和极性污染物, 使它们到达相应的电极, 从而被去除^[1]; 离子迁移可用于传输营养(如: 含 N, P 的离子), 以加强生物治理; 电渗可用于冲洗土中污物^[1]; 电吸附可用于从土体中析出污物。

另外由于土体可作为电阻, 因此在电压作用下土地升温。文献^[1]指出, 温度可升高 20~40℃, 这个现象可用于挥发有机污物和刺激生物治理作用。

1 理论分析

设一饱和粘土层, 厚度为 H , 顶面透水, 底面是一不透水层。假定该土层在自重作用下的固结已经完成。在该土层中施加电场, 顶面为负极, 底面为正极, 地表荷载为零。根据电渗的达西平衡式

$$q = k_e i_i = k_e \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)$$

又根据孔压与电压的关系

$$u = \frac{k_e}{k_h} \gamma_w V$$

所以

$$q = - \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad \frac{\partial q}{\partial z} = - \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

由此可得在 dt 时间内, 微元 dz 的水量变化

$$\Delta Q = - \frac{k_h}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt$$

设 dt 时间内土体孔隙比改变为 de , 则 dt 时间内微元孔隙体积变化

$$\Delta v = \frac{de}{1 + e_1} dz$$

又

$$de = a d\sigma' = a d(\sigma - u) = -adu = -a \frac{\partial u}{\partial t} dt$$

所以

$$\Delta v = -\frac{a}{1 + e_1} \frac{\partial u}{\partial t} dz dt$$

对于饱和土体, dt 时间内流经微元体的水量变化应等于微元体孔隙体积的压缩量, 即 $\Delta q = \Delta v$. 因此

$$-\frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{a}{1 + e_1} \frac{\partial u}{\partial t} \quad c_v = \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{1 + e_1}{a}$$

则有饱和土体的单向渗流固结微分方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

该方程对于电渗固结、加载固结以及两者共同作用固结都是适用的, 所不同的只是它们的初始条件和边界条件.

电渗固结的初始条件和边界条件为:

$$\left\{ \begin{array}{lll} t = 0 & 0 < z < H & u = 0 \\ 0 < t < \infty & z = 0 & u = -\frac{k_e}{k_h} \gamma_w V \\ 0 < t < \infty & z = H & \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ t = \infty & 0 < z < H & u = -\frac{k_e}{k_h} \gamma_w V \text{ (该项可以自动满足)} \end{array} \right.$$

令

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} = \frac{k_h(1 + e_1)t}{a\gamma_w H^2} \quad P_e = \frac{k_e}{k_h} \gamma_w V$$

解微分方程得

$$u = \frac{4}{\pi} P_e \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n + 1} \sin \frac{(2n + 1)\pi z}{2H} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} T_v} - P_e \quad (1)$$

类似可得加载固结、电渗加载共同作用、电渗加载共同作用且阴阳两极均透水三种情况下孔压微分方程的解

$$u = \frac{4}{\pi} P_h \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n + 1} \sin \frac{(2n + 1)\pi z}{2H} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} T_v} \quad (2)$$

$$u = \frac{4}{\pi} (P_h + P_e) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n + 1} \sin \frac{(2n + 1)\pi z}{2H} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} T_v} - P_e \quad (3)$$

$$u = \frac{2}{\pi} (P_h + P_e) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z}{H} e^{-n^2 \pi^2 T_v} - P_e + \frac{P_h + P_e}{H} z \quad (4)$$

式中 P_h 为加载压力. 对式(1)~(4)各取级数的第一项作为近似解得

电渗固结

$$u = \left(\frac{4}{\pi} P_e \sin \frac{\pi z}{2H} \right) e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} - P_e \quad (5)$$

加载固结

$$u = \left(\frac{4}{\pi} P_h \sin \frac{\pi z}{2H} \right) e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} \quad (6)$$

共同作用(电动固结)

$$u = \left[\frac{4}{\pi} (P_h + P_e) \sin \frac{\pi z}{2H} \right] e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} - P_e \quad (7)$$

无限抽水

$$u = \left[\frac{2}{\pi} (P_h + P_e) \sin \frac{\pi z}{H} \right] e^{-\pi^2 T_v} - P_e + \frac{P_h + P_e}{H} z \quad (8)$$

将式(7)对时间求导, 即可得到孔压消散速度

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{P_h + P_e}{H^2} c_v \pi \sin \frac{\pi z}{2H} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}}$$

同样由式(6)可得

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{P_h}{H^2} c_v \pi \sin \frac{\pi z}{2H} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}}$$

$$\left| \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{(7)} > \left| \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{(6)}$$

这说明在施加电场的情况下,孔压消散加快,且孔压消散速度与 P_e 成正比,亦即:与电压 V 成正比.由式(7)可以看出,随着时间的增加,孔压可以达到负值,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $u \rightarrow -P_e$,如图1所示.

固结度 $U = \int_0^H (\sigma - u) dz / (P_h H)$,为了比较,这里统一取加载固结的 s_∞ 作为最终沉降量,由式(7)得

$$U = \frac{P_h + P_e}{P_h} \left(1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} \right)$$

由式(6)得

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v}$$

由此可见电动固结曲线与加载固结曲线相似,但固结度增加,如图2所示.电动固结的 $U_\infty = 1 + \frac{P_e}{P_h} > 1$,表示电动固结的最终沉降量大于加载固结.它反映了电动固结中正孔压消散后,负孔压产生,土体进一步固结的特点.由于在电场作用下,土体固结度增加,因此相应地土体电动固结后的含水量低于加载固结,如图3所示.

将式(8)对 z 求导即得孔压梯度

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{P_h + P_e}{H} \left(2 \cos \frac{\pi z}{H} e^{-\pi^2 T_v} + 1 \right)$$

当 $z = 0$ 时 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 取得最大值

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{\max} = \frac{P_h + P_e}{H} (2e^{-\pi^2 T_v} + 1)$$

这说明最大排水量将发生在地表,亦即:阴极处的排水量最大,如图4所示.

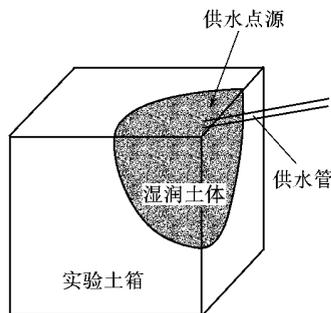


图1 孔压与时间关系曲线

Fig.1 Pore pressure versus time under normal consolidation and electroosmotic consolidation

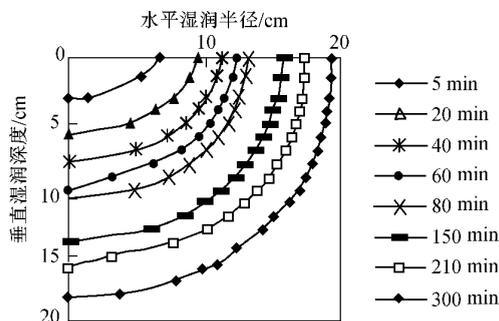


图2 垂直沉降与时间关系曲线

Fig.2 Vertical settlement versus time under normal consolidation and electroosmotic consolidation

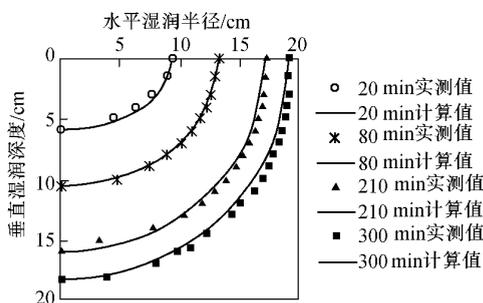


图3 阳极封闭时的含水量分布曲线

Fig.3 Variation of water content in soil specimens consolidated by vertical loading and electroosmosis with a closed anode

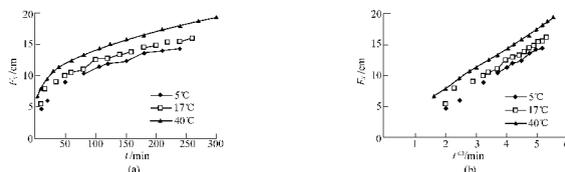


图4 阳极透水时的含水量分布曲线

Fig.4 Variation of water content in soil specimens by electrokinetic treatment with an open anode and cathode

2 实验数据

本文的理论分析虽然仅采用最简单的一维固结模型,而且孔压与电压的关系也简化为线性函数关系,但其结果还是比较符合实际的。实验数据(表 1、2,图 1~4)取自于文献[2]。

表 1 电动处理后抗剪强度的提高

Table 1 Increase in shear strength by electrokinetic treatment

作用条件	抗剪强度/kPa	提高百分率/%
50 kPa 垂直压力	11	
50 kPa 垂直压力 + 15 V 电压	19	72
50 kPa 垂直压力 + 20 V 电压	26	128

表 2 电动处理后抗剪强度和抗拔强度的提高

Table 2 Increase in shear strength and pull strength by electrokinetic treatment

固结压力/kPa	抗剪强度提高百分比/%	抗拔强度提高百分比/%
110	150	209
140	203	113
356	72	54

注:施加电压为 30 V 的直流电,最大电流 1 A。

3 结 语

土体电现象是一个值得关注的问题,它可以应用于土体的固结、加筋以及环境治理等方面,尤其是对于通常情况下难以处理的细粒低渗透性土,理论和试验研究均表明电现象对土体的固结和加筋有加强效果。土体电现象已在各类不同的土体治理中得到了成功的应用。文献[3]曾对电渗现象,尤其是现场应用的设计和施工细节(包括参数选定)进行了详细总结。为了将电动技术引入土体中,可在土体中插入导电介质作为电极,然后通过电极向土体施加电场。一般所使用的电压为 60~160 V,电极间距为 2.5~5 m。电极材料通常采用铁、铜、铝或碳材,其中以非腐蚀性的碳电极较为经济。在阴极处通常另设开有槽孔的 PVC 塑料井点管以排除渗水,管外设砂土滤层。目前还有一种较新的材料,称为电动土工合成材料,它是在传统土工合成材料中加入导电性物质,或者本身就采用电导体制成,从而成为可集电极、排水、加筋于一体的新型土工合成材料,极大地推动了电动技术在土体中的应用,该种材料目前还在发展中。

参考文献:

- [1] Lageman R, Pool W, Seffinga G A. Electro-reclamation: state-of-the-art[A]. NATO/CCMS 3rd Int Conf on Demonstration of Remedial Action Technologies for Contaminated Land and Groundwater[C]. Montreal, Canada, 1998(6~9): 115~136.
- [2] Nettleton I M. Electro kinetic geosynthetics and their applications[A]. In: Rowe R K, eds. 6th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products[C]. Georgia USA: International Industrial Fabrics Association, 1998. 871~876.
- [3] Casaglane L. Stabilization of soils by means of electroosmotic state-of-the-art[J]. Journal of Boston Society of Civil Engineers, ASCE, 1983, 69(3): 255~302.

Electrokinetic phenomena in soil and their applications

ZHUANG Yan-feng, WANG Zhao

(Civil and Architectural Engineering Institute, Wuhan Univ., Wuhan 430072, China)

Abstract: Some kinds of electrokinetic phenomena in soil together with their applications in the field of reinforcement, consolidation, and environment regulation are introduced. Then a theoretical analysis is made, and some conclusions are drawn: under the action of an electric field, the dissipation of pore pressure speeds up; with the increase of time, the pressure can be a negative value; with the increase of soil consolidation, the water content in soil under electrokinetic consolidation is smaller than that under loading consolidation. The conclusions are in good agreement with the results from a series of experiments done by Nettleton I M, et al in 1998.

Key words: electrokinetic phenomena; reinforcement; consolidation; environment treatment; soil