

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1349

基于电磁驱动的滑坡模型水分迁移 理论及试验研究

周 昌, 胡新丽, 徐 楚, 王 强, 徐 迎

(中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 加快模型试验中水的渗流速率对库岸滑坡研究意义重大。考虑滑坡渗流特性, 基于电磁驱动原理, 在滑坡模型中施加相互垂直的电场、磁场, 推导出孔隙水受力公式, 根据电渗固结理论, 推导水分迁移速率 v 与电压 V_e 、磁场强度 B 的关系式, 进而获得时间相似比, 实现了通过电磁场强度来控制滑坡模型水分迁移速率, 改进模型试验, 为研究库水位升降对滑坡的影响提供条件。通过试验进行验证: 电磁场对水分迁移速度的影响具有显著效果, 且电压大小对模型的稳定渗流场影响较小。说明在不改变模型材料参数的条件下, 改变磁场强度和电压可获得任意孔隙水的渗流速度, 为研究库水位波动条件下的滑坡演化机制奠定基础。

关 键 词: 库水位涨落; 电渗; 电磁驱动; 模型试验

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 09-3347-08

Theory and experimental study of electromagnetic-driven moisture migration of landslide model

ZHOU Chang, HU Xin-li, XU Chu, WANG Qiang, XU Ying

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: How to accelerate the seepage rate of water in model test is significant to the study of bank landslide. Based on the principle of electromagnetism, the force of pore water was calculated by applying mutually perpendicular electric and magnetic fields in the landslide model. According to the theory of electroosmotic consolidation, the resultant force of groundwater is calculated, and the relationship between the migration rate and the voltage and magnetic field intensity is deduced, then the time similarity ratio is obtained. The water migration rate of landslide model is improved by controlling the voltage and magnetic field strength applied to the model, and the effect of the electromagnetic field on the soil moisture is verified by experiments. The influence of electromagnetic field significantly affects the water migration velocity, and the voltage has little effect on the stable seepage field of the model. Without changing the parameters of model material, the changes of the magnetic field strength and voltage can determine the seepage velocity of any pore water lays which can be the foundation for studying the evolution mechanism of the landslide under fluctuating reservoir water conditions.

Keywords: water level fluctuation; electro-osmosis; electromagnetic drive; model test

1 引 言

水库运行条件下, 滑坡的内在变形机制和稳定性的研究是一个亟需解决的重要课题, 它为大型水利工程的建设和运行提供理论依据, 具有重要的研

究价值和意义^[1]。

滑坡模型试验是对滑坡演化过程进行研究的的有效手段之一^[2]。目前研究主要集中于滑坡位移场、应力场等有关滑坡运动规律、内部变形规律等内容。Yi 等^[3]开展了加筋土边坡模型试验, 得到边坡的位

收稿日期: 2017-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41630643, No.41272305); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No.2011CB710604); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.CUGCJ1701, No.18010491A26)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41630643, 41272305), the National Basic Research Program of China(973 Program)(2011CB710604) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (CUGCJ1701, 18010491A26).

第一作者简介: 周昌, 男, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程稳定性评价、地质灾害防治设计及基础理论方面的研究工作。

E-mail: zc201191@163.com

通讯作者: 胡新丽, 女, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程稳定性评价、地质灾害防治设计教学与科研工作。E-mail: huxinli@cug.edu.cn

移场和变形规律。Li^[4]、Tang^[5]等开展了滑坡-抗滑桩模型试验研究; Liu等^[6]研究了散体边坡的运动规律和内部变形规律的模型试验。Valentin等^[7]开展滑坡-海啸的物理模型试验研究。但目前在水库运行条件下,对滑坡变形破坏机制的研究较少,如胡修文等^[8]研究水位骤降后滑坡的坡面位移变化,获得了滑坡变形特征和稳定性变化规律。倪卫达^[1]、Jiang^[9]、董金玉^[10]、罗红明^[11]等采用数值模拟等手段对动态水位下的滑坡变形进行研究,并取得一定的成果。李邵军等^[12]通过离心模型试验开展了库水位升降下滑坡物理模型试验,揭示了滑坡在库水位升降条件下的破坏模式和变形失稳机制,但由于土体渗透性较差,故土体中的水位自由面和实际地下水位面存在较大差异。综上所述,学者主要采用静态水位下的模型试验、数值模拟等手段研究库水位作用下滑坡变形机制,动态水位下模型试验无法满足研究要求,其原因如下:①由于模型制作工艺的缺陷,渗透系数无法控制等;②基于相似理论换算模型渗透系数,即 $K_m = 10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ m/s}$ (土质滑坡渗透系数多为 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ ^[12-14])。土力学认为土体渗透系数 $k < 10^{-8} \text{ m/s}$ 为不透水层^[15],故模型土体为低渗透材料。模型渗透性差,水分迁移速率慢,工作周期长,难以实现模拟库水位升降过程对滑坡的影响。目前鲜有有效的方法解决该问题。

针对模型材料渗透系数小、渗透周期长等问题,本文基于电磁驱动及电渗理论提出一种新的方法,用以加快模型水分迁移,即对模型施加相互垂直的电场和磁场,加速地下水迁移,缩短渗透时间,为研究动态地下水作用滑坡变形机制创造条件,并通过试验对此进行验证。本论文目前只开展了电磁场加速水分迁移的时间效果研究。

2 电磁驱动理论基础

2.1 电磁场对黏土颗粒变形状态的影响讨论

根据 Fukue等^[16]理论,土体的结构随含水率的增加而改变。依据李瑛等^[17]研究成果:当含水率低于土体的液限值时,颗粒间紧密接触,土颗粒间的抗力抵消其所受电磁场力,黏土颗粒未发生运动。当含水率值大于液限后,导电主要以液相导电为主,土颗粒结构发生变化,对于粒径较大颗粒,其所受电磁场力相比于自身重力可忽略不计,而对于粒径较小的则有可能发生运动。综上所述,含水率低于液限时,黏土颗粒在电磁场中基本不产生运动,黏土颗粒变形状态未受电磁场的影响;反之,高于液限,则粒径较小的土颗粒可能会产生运动。

2.2 基本假设

为了计算离子在电磁场作用下所受的力,本文建立电磁场作用下离子受力模型(见图1),现对该模型做以下几点假设^[18]:

- (1) 液体黏滞系数 η 以及流体的密度 ρ 均为常数;
- (2) 电磁感应强度 $\vec{B}$ 和电流密度 $\vec{J}$ 均为均匀分布且方向相互垂直;
- (3) 计算时不计重力影响;
- (4) 渗透路径的长度等于模型的长度;
- (5) 受电磁场力的水在土体中的运动不影响土颗粒的运动状态。

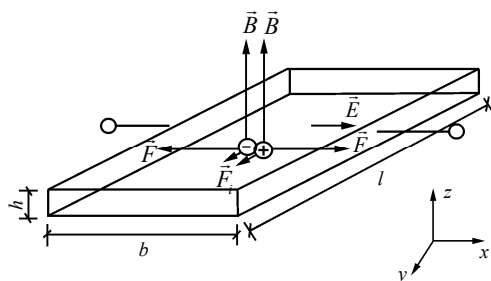


图1 电场与磁场对离子作用力分析图
Fig.1 Analysis of ion force in electric field and magnetic field

2.3 模型在电磁场中所受的力

在电磁场作用下,液体中阴阳离子分别产生电场力及洛伦兹力。如图1所示,模型尺寸为 l (长) $\times b$ (宽) $\times h$ (高)。在模型的 x 方向施加一个均匀电场,在 y 方向施加一个均匀磁场。带电离子在电场的作用下将会沿着 x 方向定向运动,定向运动的离子在磁场作用下将会产生沿 z 方向的洛伦兹力。当该力大于流体黏滞力时,就会使液体发生流动。

2.4 洛伦兹力的微观表达

在磁场作用区域内,模型中任意一个自由离子的受力情况如下:

$$\vec{F}_i = z_i e \vec{E} + z_i e \vec{v}_i \times \vec{B} \quad (1)$$

式中: z_i 为第 i 个离子的电荷数; e 为单位电荷(C); $\vec{E}$ 为电场强度; $\vec{B}$ 为磁场强度; $\vec{v}_i$ 第 i 个离子的速度; $\vec{F}_i$ 为作用在第 i 个离子所受合力。

2.4.1 电场力

假设单位体积模型中离散的正负离子的粒子数密度分别为 n_+ 、 n_- ,则单位体积的模型所受的总电场力 $\vec{F}_1$ 为

$$\vec{F}_1 = \vec{E}(n_+ z_+ e - n_- z_- e) \quad (2)$$

式中: z_+e 、 z_-e 分别为正负离子电荷量。

2.4.2 洛伦兹力计算

速度 $\vec{v}_i$ 可分为沿 z 方向的 $\vec{v}_{iz}$ 和 x 方向的 $\vec{v}_{ix}$ (即迁移速度) 两个分量, 根据电磁学理论可知:

(1) $\vec{v}_{iz}$ 具有的洛伦兹力为

$$\vec{F}_{2z} = \sum_i z_i e \vec{v}_{iz} \times \vec{B} = (n_+ z_+ e - n_- z_- e) \vec{v}_{iz} \times \vec{B} \quad (3)$$

(2) $\vec{v}_{ix}$ 具有的洛伦兹力

电场作用下, 正、负离子运动方向相反。根据洛伦兹力公式的分析可知, 运动方向相反的正、负离子所受到的洛伦兹力大小、方向均相同。故该部分速度分量所产生的洛伦兹力为

$$\vec{F}_{2x} = \sum_i z_i e \vec{v}_{ix} \times \vec{B} = \vec{E} \times \vec{B} (\mu_+ n_+ z_+ e + \mu_- n_- z_- e) \quad (4)$$

式中: $\mu_{\pm}$ 为正负离子的迁移率。

通过观察可以发现, 式(4)括号内值可用液体的导电率 σ 表示, 故式(4)可化简为

$$\vec{F}_{2x} = \vec{E} \times \vec{B} \sigma \quad (5)$$

故单位模型在电磁场所受的总力为

$$\vec{F} = \vec{F}_{2z} + \vec{F}_{2x} + \vec{F}_1 \quad (6)$$

2.5 土体系受力计算

2.5.1 电场力

根据电渗固结理论^[19-20], 土体在电场下会发生电泳和电渗现象, 即带负电荷的土颗粒向阳极移动, 水分子向阴极移动。电渗原理常用于地基处理, 加速软黏土的固结, 效果非常好, 电渗固结理论也较为完善, 本文提出的理论借鉴了该理论关于电场作用下土体电泳现象的相关知识。

整个土体呈现电中性, 而土颗粒表面带负电, 价位较高, 土颗粒具有比较稳定的结构而在电渗过程中不产生运动, 所以电解质溶液中可移动的负离子数量远远小于溶液中正离子数量^[21], $n_+ z_+ e \gg n_- z_- e$, 溶液中相对过剩的阳离子在外加电场作用下带动孔隙中水分子向阴极移动^[20]。相对过剩的阳离子在外加电场的作用下带动孔隙中水化阳离子向阴极移动。故模型的总电场力不为 0:

$$\vec{F}_1 = \vec{E} (n_+ z_+ e - n_- z_- e) \approx \vec{E} Q \quad (7)$$

式中: Q 为孔隙水中可移动正离子总电荷量, 且有

$$Q = ne N_A V_w \quad (8)$$

式中: V_w 为孔隙水的体积 (m^3); n 为孔隙水正电荷摩尔浓度单位 (mol/m^3); N_A 为阿伏伽德罗常数。

将土体分为 3 相: 固相、液相、气相, 则液相的几何参数设为 $LS = V_w$, L 为孔隙水渗透路径长度, S 为孔隙水的换算截面积, 根据土力学知识可知:

$$V_w = \frac{\rho}{\rho_w} \frac{w}{1+w} = \frac{\rho_0}{\rho_w} w \quad (9)$$

式中: ρ_0 为土体的干密度; ρ_w 为孔隙水密度; w 为含水率。

将式(9)代入式(8)可得

$$Q = ne \times 6.02 \times 10^{23} \times \frac{\rho_0}{\rho_w} w \quad (10)$$

令 $\gamma = n \times e \times 6.02 \times 10^{23}$, γ 为土体的电荷常数, 它与孔隙水溶质种类、土颗粒大小及物质组成有关。

将 γ 代入式(10):

$$Q = \gamma w \rho_0 / \rho_w \quad (11)$$

2.5.2 洛伦兹力

单位体积土体孔隙水在电磁场所受的力 $\vec{F}_2$ 为

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{2x} = \vec{E} \times \vec{B} \sigma_w = \frac{\vec{V}_e \times \vec{B} \sigma_w}{L} \quad (12)$$

式中: σ_w 为孔隙水电导率; $\vec{V}_e$ 为电压。

当孔隙率确定时, 孔隙水电导率与含水率呈线性关系^[21]:

$$\sigma_w = a(w - w_0) \quad (13)$$

式中: a 为系数, 与土体性质有关; w_0 为临界含水率, 与土体的性质有关。

孔隙水总体积所受的总的电磁力为

$$\vec{F}_2 = \vec{E} \times \vec{B} a(w - w_0) V_D = \vec{E} \times \vec{B} a(w - w_0) w \rho_0 / \rho_w \quad (14)$$

则土体模型所受的总力 $\vec{F}$ 为

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad (15)$$

故有

$$|\vec{F}| = \sqrt{(\vec{F}_1)^2 + (\vec{F}_2)^2} = \frac{|\vec{V}_e| w \rho_0 \sqrt{[|\vec{B}| a(w - w_0)]^2 + \gamma^2}}{L \rho_w} \quad (16)$$

$$\theta = \arctan \frac{\gamma}{|\vec{B}| a(w - w_0)} \quad (17)$$

式中: θ 为 $\vec{F}$ 与 x 轴的夹角。

3 时间效应分析

3.1 电磁力的时间效应

电磁驱动的水分迁移由电场力和磁场力（洛伦兹力）对离子的牵引而产生，服从有关电磁学理论和电渗理论。

对土体模型进行概化，将渗流通道简化为直径为 d 的圆形通道，且假设通道之间相互独立，无流体交换，如图 2 所示。

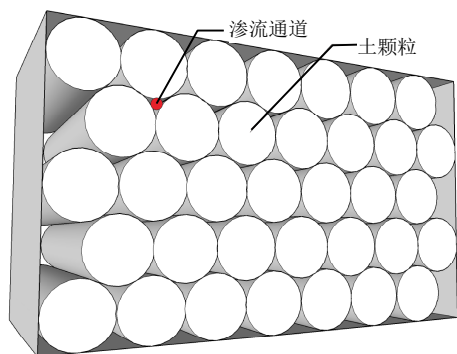


图2 土颗粒及渗流通道图

Fig.2 Soil particles and seepage channels

则流体阻力 R_h 为^[21]

$$R_h = \frac{128\eta L}{\pi d^4} \quad (18)$$

式中： η 为液体黏滞系数，受液体本身性质及土颗粒性质的影响。

根据电磁驱动理论可知，管道内液体的平均线性速率可表示为^[21]

$$v = \frac{16|\vec{F}|}{\pi^2 d^4 R_h} \quad (19)$$

将式 (16)、(18) 代入式 (19) 得

$$v = \frac{|\vec{V}_e| w \rho_0}{8\pi\eta L^2 \rho_w} \sqrt{[|\vec{B}| a(w - w_0)]^2 + \gamma^2} \quad (20)$$

在试验中，电磁场参数常量，故由式 (20) 可以看出速率 v 是关于含水率 w 的函数，含水率取值范围为 $[w_0, w_r]$ 。取初始含水率为 0，则水分迁移平均速率为

$$\bar{v} = \frac{|\vec{V}_e| w_r \rho_0}{16\pi\eta L^2 \rho_w} \sqrt{(Baw_r)^2 + \gamma^2} \quad (21)$$

式中： $\bar{v}$ 为水分迁移平均速率； w_r 为土体饱和含水率。

实际速率为

$$\vec{v}' = \chi \bar{v} \quad (22)$$

式中： $\vec{v}'$ 为实际速率； χ 为有效系数，与土体的结构、孔隙水的种类等因素有关。

则时间相似比 N 为

$$N = \frac{v_H}{\bar{v}} \quad (23)$$

式中： v_H 为地下水实际速率。

由此便可得到时间缩短倍数与电压、磁场强度之间的关系，通过改变电压、磁场强度加快水分的入渗，控制入渗时间。

3.2 N 的影响因素

从式 (21) ~ (23) 中可发现， N 与液体的黏滞系数、土颗粒的组成及结构、化学性质等因素有关。在模型尺寸、材料确定的前提下，相似比 N 只与电压、磁场强度相关。

图 3 为电压 $|\vec{V}_e|$ 、磁场强度 $|\vec{B}|$ 、速率 v 的三维曲面图，通过改变电压、磁场强度来调节速率，从而达到相似比的要求。其中土以黏土为例，含水率为 $[0\%, 42\%]$ ，干密度为 1.55 g/m^3 ， $a = 0.6$ ， $L = 1 \text{ m}$ ， $\eta = 10^3$ 。

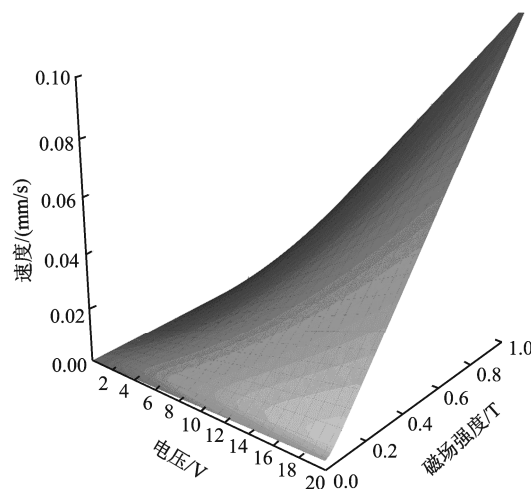


图3 速度与磁场强度、电压的关系图

Fig.3 Graph of velocity with voltage and magnetic field strength

根据式 (16) 计算得到孔隙水所受到的合力 $\vec{F}$ 的大小（见图 4），其中 $|\vec{V}_e| = 5 \text{ V}$ ， $|\vec{B}| = 0.5 \text{ T}$ 。从图中可以看出， $|\vec{F}|$ 随着含水率的增加而增加，即由于施加电磁场导致的渗透力变化较大，对试验有比较大的影响，这个问题还有待进一步解决。

4 试验验证

4.1 试验设计

4.1.1 试验框架

本次试验模型选用理想模型，框架尺寸为

40 cm×10 cm×10 cm，边坡坡角为 30°，如图 5 所示。

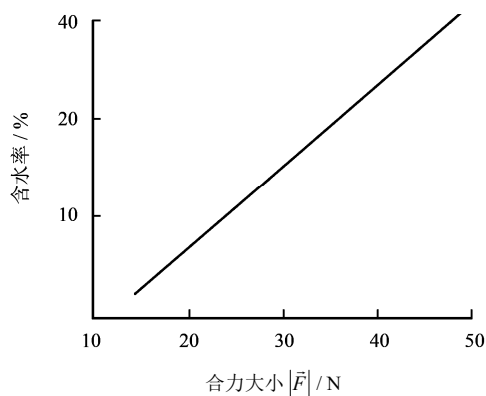
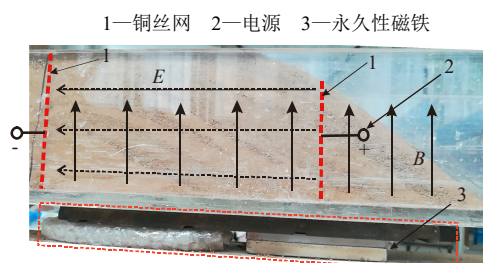
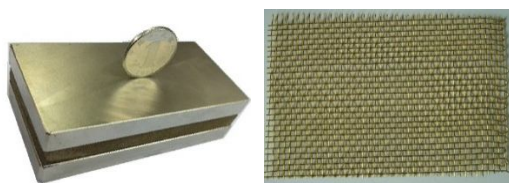


图 4 合力大小与含水率关系图

Fig.4 Relationship of electromagnetic force with moisture



(a) 模型图



(b) 永久性磁铁

(c) 铜丝网

图 5 模型简图

Fig.5 Components of model

4.1.2 试验用料

本次试验滑体配比材料选用雍睿^[22]制作模型试验的配比材料：主要由 39%的江砂（过 2 mm 筛分）、49.1%的滑体土（过 2 mm 筛分）、0.9%的膨润土构成。材料物理力学参数见表 1。

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Soil physical and mechanical parameters

材料	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	天然密度 /(g/cm ³)	渗透系数 /(cm/s)	弹性模量 /MPa
滑体	11.2	18.91	1.92	3.25×10^{-5}	2.4

预先配置浓度为 0.060 2 mol/L 的氯化钠溶液作为试验用水，其黏滞系数为 1×10^{-3} 。采用永久性磁铁施加固定磁场，磁铁的磁场强度测得为 0.05 T。

4.1.3 浸润线观测方法

采用测压管法^[20]观测浸润线。测压管设置在同一高度土层，间隔为 2 cm，如图 6 所示。通过监测各测压管最初出现地下水时的时间获得迁移速度。

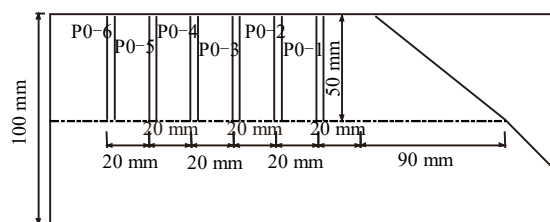


图 6 测压管布置图

Fig.6 Layout of piezometer tubes in slope model

4.2 试验过程

模型土体填筑控制指标为压实度。采用分层填筑，分层压实的方法制备模型。土体压实度控制在 0.8 左右。无电磁场作用下，记录各个测压管出现地下水的時間，直到最后一根测压管出现地下水，结束试验。重复上述步骤，分别将模型置于电压为 0、3、6、9、12、15、18 V 的磁场中进行试验，记录各电压下测压管地下水位出现时间。

4.3 试验结果分析

4.3.1 时间效果

图 7 为不同电压下地下水出现时间与测压管编号的关系图，计算得到不同电压下的入渗速度，见图 8 所示。

从图中可以看出：水分迁移速度理论值与试验值呈现相同的变化规律，即随着电压增大而呈线性增大，其有效系数 $\chi \approx 0.9$ ；对比未施加电磁场的对照组试验结果可发现，电磁场对水分迁移速度的影响具有显著效果，对水库滑坡模型试验研究具有十

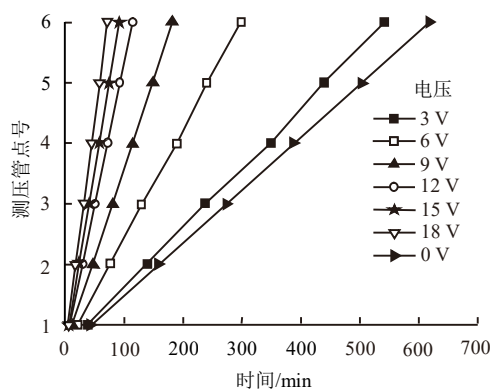


图 7 不同电压下地下水出现时间与测压管关系图

Fig.7 Occurrence time of groundwater with position of pressure measuring tube

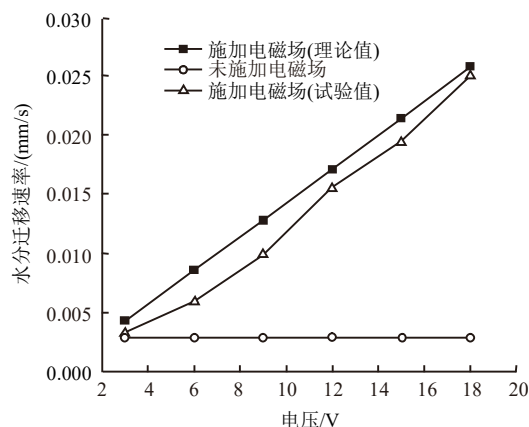


图8 水分迁移速度与电压关系图

Fig.8 Curves of moisture migration velocity with voltage

分重要的意义。

4.3.2 地下水扩散

电磁场对土体的影响主要包括两部分：电磁场对阴阳离子施加作用力，改变了土体的应力场；电场阴阳极对离子的吸附作用会导致两极电荷的集中，即电泳现象。本文基于前人研究及试验现象对此进行相关分析。

Cooke^[20]、张建红等^[23]通过离心试验发现，改变土体的应力场只对水分扩散速度有影响，对水分扩散路径等并无影响。本文对不同电压条件下的模型浸润线、湿润线进行比较分析。

对同一位置不同电压下模型湿润线进行对比，如图9所示。从图中可以发现，不同电压下湿润线均呈现外凸型。

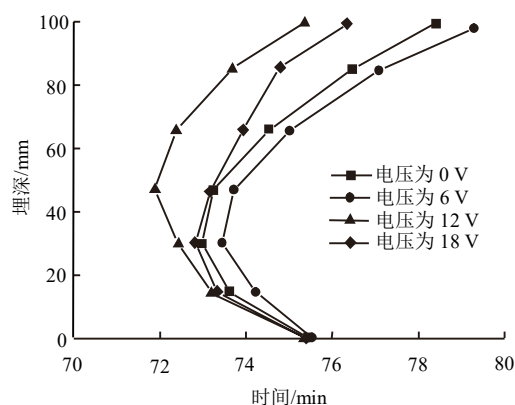


图9 同一位置模型湿润曲线图

Fig.9 Wetting curves of model in the same position

图10为浸润线位置图。从图中可发现，不同电压下浸润线变化曲线变化一致，对其误差进行分析发现最大误差为5.04%，浸润线误差向模型内部逐渐减小，平均误差为3.17%，说明电磁场作用对浸润线影响较小。

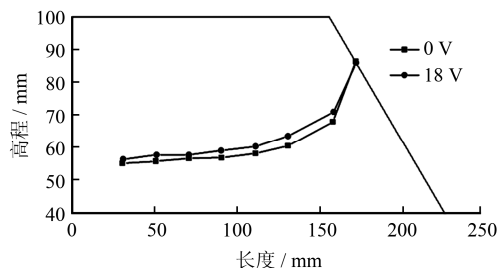


图10 浸润线位置图

Fig.10 Seepage line position with different voltages

4.4 小结

由于相似理论主要关注滑坡的力学特性而忽略了滑坡渗流特性，本文提出了电磁场加速水分迁移理论，对模型试验进行改进，用以研究滑坡模型渗流特性。该方法的使用步骤如下：①采用相同填筑方法对相似材料进行堆填，进行小尺寸电磁场试验，获得有效系数 χ 取值；②根据相似比确定模型试验地下水渗流时间；③依据式(22)确定合适的电压、磁场强度模型。

5 结论与展望

本文建立模型分析离子在电磁场作用下的受力，根据相似理论得到电磁场产生的时间相似比。将结果应用在滑坡模型中，库水和土体中的孔隙水在电磁场的作用下加速渗流，缩短渗流时间，并对其进行试验验证。具体研究成果可归纳如下：

(1) 对离子在电磁场中的受力进行分析，推导出离子溶液在电磁场中受力表达式，进而得到了水分渗流速度与电压、磁场强度的关系式。

(2) 试验表明，电磁场作用明显改变了水分的迁移速率，对地下水扩散及黏土颗粒的影响较小，但仍需要进一步深入研究。

(3) 本文仅从时间效应上对该理论进行论证，尚未考虑滑坡模型的渗流场、位移场等方面的影响，对滑坡进行定量研究，这将是未来研究的主要内容。考虑到经济效应，该方法不适用于大规模的工程运用，只适合于研究动态水位条件下小尺寸的滑坡模型。

参考文献

- [1] 倪卫达, 唐辉明, 胡新丽, 等. 黄土坡临江 I 号崩滑体变形及稳定性演化规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2961-2970.
NI Wei-da, TANG Hui-ming, HU Xin-li, et al. Research on deformation and stability evolution law of Huangtupo

- riverside slump-mass No. I[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(10): 2961—2970.
- [2] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Theory and application of model test on landslide[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008
- [3] YI He, HEMANTA HAZARIKA, NORIYUKI YASUFUKU, et al. Evaluating the effect of slope angle on the distribution of the soil-pile pressure acting on stabilizing piles in sandy slopes[J]. **Computers and Geotechnics**, 2015, 69: 153—165.
- [4] LI CHANGDONG, WU JUNJIE, TANG HUIMING, et al. Model testing of the response of stabilizing piles in landslides with upper hard and lower weak bedrock[J]. **Engineering Geology**, 2016, 204: 65—76.
- [5] TANG HUIMING, HU XINLI, XU CONG, et al. A novel approach for determining landslide pushing force based on landslide-pile interactions[J]. **Engineering Geology**, 2014, 182(A): 15—24.
- [6] LIU ZHINA, KOYI HEMIN A, SWANTESSON JAN O, et al. Kinematics and 3D internal deformation of granular slopes: analogue models and natural landslides[J]. **Journal of Structural Geology**, 2013, 53: 27—42.
- [7] VALENTIN HELLER, JOHANNES SPINNEKEN. On the effect of the water body geometry on landslide-tsunamis: physical insight from laboratory tests and 2D to 3D wave parameter transformation[J]. **Coastal Engineering**, 2015, 104: 113—134.
- [8] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2089—2095.
- HU Xiu-wen, TANG Hui-ming, LIU You-rong. Physical model studies on stability of Zhaoshuling landslide in area of Three Gorges Reservoir[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2089—2095.
- [9] JIANG JIWEI, EHRET DOMINIK, XIANG WEI. Numerical simulation of Qiaotou landslide deformation caused by drawdown of the Three Gorges Reservoir, China[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2011, 62(2): 411—419.
- [10] 董金玉, 杨继红, 孙文怀, 等. 库水位升降作用下大型堆积体边坡变形破坏预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1774—1780.
- DONG Jin-yu, YANG Ji-hong, SUN Wen-huai, et al. Prediction of deformation and failure of a large-scale deposit slope during reservoir water level fluctuation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1774—1780.
- [11] 罗红明, 唐辉明, 章广成. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2008, 33(5): 687—692.
- LUO Hong-ming, TANG Hui-ming, ZHANG Guang-cheng. The influence of water level fluctuation on the bank landslide stability[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 2008, 33(5): 687—692.
- [12] 李邵军, KNAPPETT J A, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1586—1593.
- LI Shao-jun, KNAPPETT J A, FENG Xia-ting. Centrifugal test on slope instability influenced by risk and fall of reservoir water level[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1586—1593.
- [13] 党发宁, 刘海伟, 王学武, 等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1909—1917.
- DANG Fa-ning, LIU Hai-wei, WANG Xue-wu, et al. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(9): 1909—1917.
- [14] 唐晓松, 郑颖人, 董诚. 应用神经网络预估粗颗粒土的渗透系数[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 133—136.
- TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, DONG Cheng. The prediction of seepage coefficient of coarse-grained soil by neurotic network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.) 133—136.
- [15] 方云, 林彤, 谭松林. 土力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003.
- FANG Yun, LIN Tong, TAN Song-lin. Soil mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003.
- [16] FUKUE M, MINATO T, HORIBE H, et al. The micro-structure of clay by resistivity measurements[J]. **Engineering Geology**, 1999, 54(1-2): 43—53.
- [17] 李瑛, 龚晓南, 郭彪, 等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4027—4032.
- LI Ying, GONG Xiao-nan, GUO Biao, et al. Research on

- conductivity characteristics of soft clay during electro-osmosis and its conductive mechanism[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 4027—4032.
- [18] 焦丹. 软黏土电渗固结试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- JIAO Dan. Experimental study on electroosmotic consolidation of soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [19] 王俊杰, 张梁, 闫宗岭. 水库初次蓄水均质库岸现象试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1284—1289.
- WANG Jun-jie, ZHANG Liang, YAN Zong-ling. Experiment study on homogeneous bank caving of reservoirs during the first impounding[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(8): 1284—1289.
- [20] COOKE A B. Centrifuge modeling of flow and contaminant transport through partially saturated soils[D]. Kingston: Department of Civil Engineering, Queen's University, 1991.
- [21] 顾珂. 离子液体电磁驱动实验研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- GU Ke. Experimental study of the electromagnetic drive of the ionic liquids[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [22] 雍睿. 三峡库区侏罗系地层推移式滑坡-抗滑桩相互作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2014.
- YONG Rui. Interaction between thrust load caused landslide and anti-slide pile in jurassic strata in Three Gorges reservoir region[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2014.
- [23] 张建红, 劳敏慈, 胡黎明. 非饱和土中水分迁移及污染物扩散的离心模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 622—625.
- ZHANG Jian-hong, LAO Min-ci, HU Li-ming. Centrifuge modeling of moisture and contaminant migration in unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 622—625.
-
- 上接第 3346 页
- [18] 杨春和, 陈峰, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1602—1604.
- YANG Chun-he, CHEN Feng, ZENG Yi-jin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1602—1604.
- [19] 王伟, 吕军, 王海成, 等. 砂岩流变损伤模型研究及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3650—3658.
- WANG Wei, LÜ Jun, WANG Hai-chen, et al. A rheological damage model of sandstone and its application to engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3650—3658.
- [20] 李良权, 王伟. 基于 Burgers 模型的流变损伤本构模型[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2009, 31(5): 26—28.
- LI Liang-quan, WANG Wei. A rheological damage constitution model based on burgers model[J]. **Journal of Three Gorges University(Natural Science)**, 2009, 31(5): 26—28.
- [21] WANG Wei, LIU Tao-gen, SHAO Jian-fu. Effects of acid solution on the mechanical behavior of sandstone[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2016, 28(1): 1—6.
- [22] 刘林芽, 高柏松. 红砂岩工程特性的试验研究[J]. 铁道建筑, 2007 (11): 44—46.
- LIU Lin-ya, GAO Bai-song. Experimental study on engineering characteristics of red sandstone[J]. **Railway Engineering**, 2007 (11): 44—46.
- [23] 罗孝俊, 杨卫东, 李荣西, 等. pH 值对长石溶解度及次生孔隙发育的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(2): 103—107.
- LUO Xiao-jun, YANG Wei-dong, LI Rong-xi, et al. Effects of pH on the solubility of the feldspar and the development of secondary porosity[J]. **Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry**, 2001, 20(2): 103—107.