

DOI: 10.11779/CJGE201411011

裂缝对电渗模型尺寸效应影响的试验研究

温晓贵, 胡平川, 周建*, 李一雯, 陶燕丽

(浙江大学滨海与城市岩土工程中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 通过对电渗-堆载模型试验、单纯电渗模型试验和现场试验的比较发现: 裂缝发展的巨大差异是导致单纯电渗模型试验与现场情况差别较大的原因, 适当的堆载可消除几何边界引起的尺寸效应, 使试验裂缝开展较准确地反映了现场电渗的真实情况, 其结果可更好地模拟现场电渗情况; 消除尺寸效应后, 影响电渗排水效果的主要因素是有效电场面积, 电流密度仅为次要影响因素, 在梅花形、长方形与平行错位三种布置形式中, 有效面积占比最大的梅花形布置效果最优、经济性最好, 建议实际工程中采用梅花形布置。

关键词: 电渗; 堆载; 尺寸效应; 裂缝; 有效电场

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-2054-07

作者简介: 温晓贵(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地基处理、软黏土力学、桩基工程等方面的教学与研究工作。E-mail: wenxiaogui@vip.sina.com。

Experimental research on influence of cracks on size effect of electro-osmosis model

WEN Xiao-gui, HU Ping-chuan, ZHOU Jian, LI Yi-wen, TAO Yan-li

(Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to study the size effect, a model experiment on the electro-osmosis combined with loading is designed and conducted. Through the comparison among model experiment on electro-osmosis combined with loading, model experiment on simple electro-osmosis and in-situ experiment on electro-osmosis, it is demonstrated that the large difference of cracks is the main reason why the model experiment on simple electro-osmosis draws an opposite conclusion with the in-situ experiment. The size effect caused by geometric boundary can be eliminated by reasonable loading, which makes the cracks similar to those in the in-situ experiment, so the model experiment on electro-osmosis combined with loading can better simulate the in-situ experiment. As the size effect is eliminated, the main factor influencing the electro-osmosis dewatering is the effective electric field rather than the current density. Among hexagonal, rectangular, and parallel and transposition configurations, the hexagonal configuration which has the maximum area of effective electric field is the most effective and economical, so it is recommended to be employed for electro-osmotic treatment.

Key words: electro-osmosis; loading; size effect; crack; effective electric field

0 引言

近年来, 电渗法由于对低渗透性和高含水率的淤泥和黏土处理效果较好, 成为地基处理的研究热点。然而电渗法相关参数的确定难度大、精度低, 同时电渗法经济效益较差, 因此, 长久以来, 其工程应用一直受到限制。

一些学者对不同电极布置形式的电渗效果进行了研究。Glendinning等^[1]进行电渗现场试验, 比较了长方形和梅花形2种电极布置形式减少污泥体积的效果, 试验发现使相同体积污泥降低相同含水率梅花形布置用时更短, 所需的电极数目和消耗的电能更少。而李一雯等^[2]进行室内模型试验比较了梅花型布置、平行

错位布置与长方形布置3种布置形式的电渗排水效果, 发现平行错位优于长方形, 梅花形布置效果最差。

可以看出, 两者结论相反。这说明电渗模型试验不能很好地预测现场电渗固结效果, 即存在模型尺寸效应。

电渗模型尺寸效应产生的原因是什么, 如何消除尺寸效应, 消除尺寸效应后影响电渗效果的关键因素是什么, 本文将就这3个问题给出初步回答。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478425); 浙江省滩涂围垦与岩土工程技术科技创新团队项目(2011R50020); 浙江省交通规划设计研究院科研项目(2013W03)

收稿日期: 2014-03-10

*通讯作者

1 尺寸效应

尺寸效应是自然界普遍存在的现象, 如几何尺寸效应、力尺寸效应及摩擦系数、速度等其他物理量的尺寸效应等。一般地, 如果某一物理量在不同尺寸下表现出不同的变化规律, 称其存在尺寸效应。土木工程中, 利用室内模型试验(小尺寸)模拟、预测现场工况(大尺寸)是经常运用的研究方法。由于尺寸效应的存在, 室内模型试验的结果经常不能正确反映现场情况, 因此, 对尺寸效应的研究十分必要。

长久以来, 对岩土工程尺寸效应主要集中在以下 4 个方面^[3]: ①强度的尺寸效应, 如抗压强度及抗拉强度等的尺寸效应; ②断裂韧度和断裂能等断裂力学参数的尺寸效应; ③弹性模量及泊松比等弹性力学参数的尺寸效应; ④剪切带倾角及峰后应力(或荷载) - 应变(或变形)曲线的尺寸效应。其中又以岩石材料的强度尺寸效应^[4]得到最多关注。以至于有学者将尺寸效应定义为材料的名义强度与具有几何相似结构的尺寸相关性。笔者认为, 这大大限制了对尺寸效应研究的发展。

如前所述, 在电渗的室内模型试验和现场试验中, 长方形布置和梅花形布置两种电极布置形式的电渗效果相反, 由此可知, 在电渗模型试验中存在尺寸效应。

比较李一雯等^[2]和 Glendinning 等^[1]电渗处理后土体照片, 可以发现室内模型试验的裂缝开展程度远远大于电渗现场试验。局部化^[3,5]是造成钢筋、混凝土、岩石材料强度尺寸效应的主要因素, 那么是否可以推断裂缝的开展是引起电渗模型尺寸效应的原因呢? 为验证这一假设, 笔者在课题组前期电渗试验的基础上增加堆载, 以限制电渗试验的裂缝开展, 将两者试验结果和 Glendinning 等^[1]电渗现场试验进行对比, 探讨裂缝对于电渗模型试验尺寸效应的影响。

2 试验方案

本次试验控制了电极布置形式、电极尺寸、电极间距、电压与李一雯等^[2]所做电渗模型试验一致, 并且采用同一批淤泥质软土。电极为铝管, 外径 20 mm, 壁厚 5 mm。本试验采用稳压输出模式, 外加电压为 12 V。电极布置形式如图 1 所示, 为使得同一工况下不同电极布置形式具有可比性, 本文控制每个电渗单元的面积电极数相等, 均为 $8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 。

试验土样为含水率约 80% 的饱和重塑软黏土, 原状土为杭州三墩某基坑开挖出的淤泥质黏土, 基本物理力学性质: $\rho = 1.58 \text{ g/cm}^3$, $G_s = 2.75$, $e = 1.76$, 含水

率 $w = 58.3\%$, 饱和度 S_r 为 91.1%, 液限 w_L 为 45.4%, w_p 为 24%。

试验箱内土样高度 130 mm, 体积 31200 cm^3 , 上覆石英砂厚 70 mm, 约重 16.5 kg, 相当于 674 Pa 的均布荷载, 如图 2 所示。

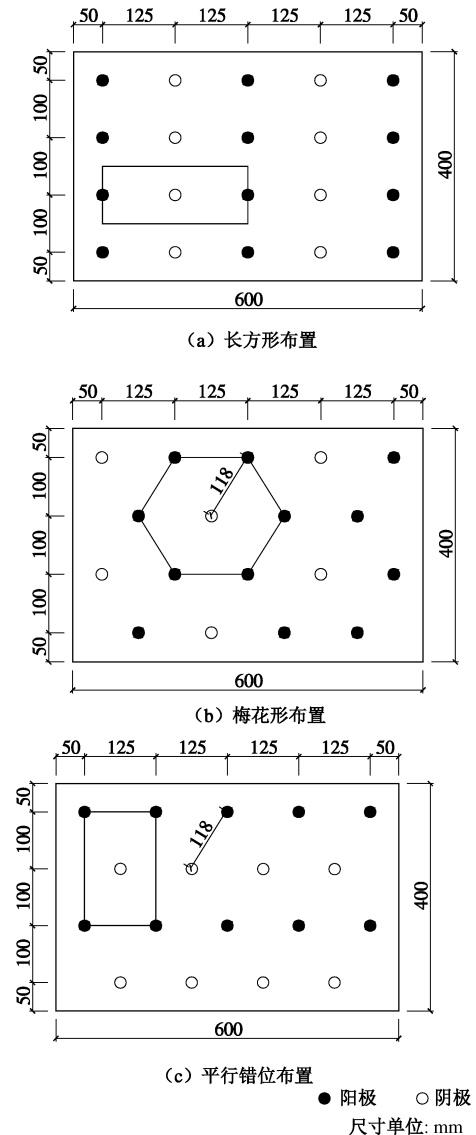


图 1 电极布置平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of electrode configurations

试验步骤如下: ①将原状土加水搅拌成目标含水率为 80% 的饱和重塑土, 之后静置 24 h; ②取适量土进行初始含水率测试; ③铝管电极底部 130 mm 外露, 以上包裹保鲜膜 70 mm, 与砂层绝缘, 以排除砂层对电场的影响, 电极顶端外露以便于连接电线; ④在模型槽内安装打孔树脂管, 树脂管外套阴极铝管时需包裹湿润的滤纸, 作为阳极时直接外套铝管, 模型槽底部相应位置安装排水管; ⑤往模型箱内装填土样, 一边装填一边搅拌, 箱内装土厚 130 mm, 然后填入石英砂, 约 70 mm 厚; ⑥连接电极与电源, 将集水容器

编号、称重，并置于对应的阴极排水管下方；⑦电极两端施加 12 V 稳压，接通电路，每间隔 4 h 称量集水容器的总质量，总质量减去原始质量即为电渗排水量；⑧72 h 后，停止试验，断开电源；⑨试验结束后挖除上层石英砂，露出土体表面，采用微型十字板剪切仪进行抗剪强度测量；⑩分别取土样表层、中层、底层各电极周围的土体，进行含水率测试。

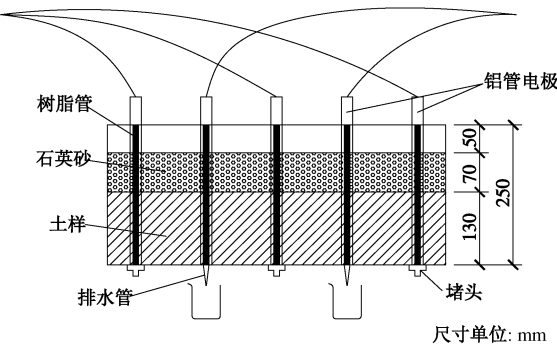


图 2 电渗-堆载试验模型箱示意图

Fig. 2 Model box of experiment on electro-osmosis combined with loading

3 试验结果与分析

本节首先从排水情况（图 3）、试验后土的含水率和抗剪强度（图 4）以及能耗（表 1，2）对本试验 3 种电极布置形式进行比较，接下来对电渗-堆载模型试验、单纯电渗模型试验和前人所做电渗现场试验三者所得结论的差异进行探讨，验证本文前言中提出的假设，探讨裂缝对渗模型尺寸效应的影响。由于之前对电渗排水效果影响因素的研究均未考虑尺寸效应，因此本节最后对消除尺寸效应后影响电渗效果的关键因素进行分析。

3.1 电渗-堆载模型试验结果

电渗-堆载模型试验的排水总量分别为：梅花形布置 4.930 kg>长方形布置 4.695 kg>平行错位布置 4.615 kg。由于 3 种布置形式排水管（阴极）数目不一样，因此计算了单位阴极排水量，如图 3 所示。可

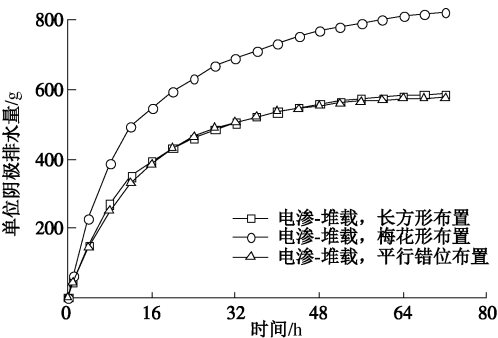


图 3 电渗-堆载试验单位阴极排水曲线图

Fig. 3 Dewatering curves of cathode in experiment on electro-osmosis combined with loading

以看出，无论从总排水量还是从单位阴极单位土体排水量来看，均有梅花形布置>长方形布置>平行错位布置。尤其值得指出的是，虽然梅花形布置的单位土体排水量仅比平行错位布置的总排水量高出 7%，但其单位阴极排水量却为平行错位布置的 1.42 倍，排水效果最好。

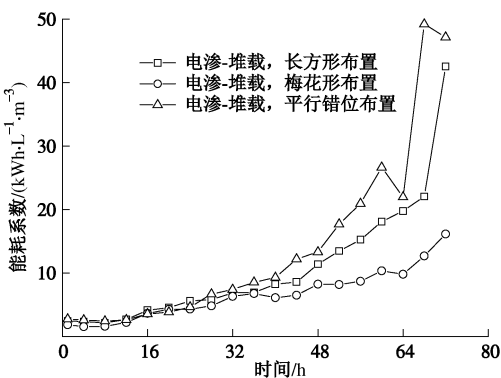


图 4 电渗-堆载试验能耗系数曲线图

Fig. 4 Curves of coefficient of energy consumption in experiment on electro-osmosis combined with loading

表 1 电渗-堆载试验各含水率测试值

Table 1 Water contents of experiment on electro-osmosis combined with loading (%)

布置形式	初始含水率	阳极附近平均含水率			阴极附近平均含水率		
		表层	中层	底层	表层	中层	底层
长方形	76.65	42.31	46.28	51.62	46.62	57.02	58.51
梅花形	75.70	42.15	43.11	45.55	43.16	54.12	55.12
平行	76.81	44.93	55.29	61.77	53.58	58.65	67.14

表 2 电渗-堆载试验后抗剪强度测试值

Table 2 Shear strengths of soil after treatment of electro-osmosis combined with loading (kPa)

布置形式	阳极处抗剪强度平均值	阴极处抗剪强度平均值
长方形	7	3
梅花形	8	4
平行错位	5	2

试验结束后，对土体的表层、中层及底层各电极附近分别取样进行含水率测量，3 种电极布置形式电渗-堆载试验的初始含水率以及电渗后土体各层阴阳极处的平均含水率见表 1。可知，电渗后平行错位布置的各含水率值均为三者最高，梅花形的含水率最小。能耗系数^[2] C ($\text{kWh}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{m}^3$) 表示电渗从 1 m^3 土中排出 1 L 水需要消耗的能量，用于比较电渗过程的能量消耗量。经计算，本试验长方形布置、梅花形布置和平行错位布置的能耗系数平均值分别为 10.67，6.52，13.87 $\text{kWh}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{m}^3$ ，其中梅花形布置的能耗系数平均值最小。图 4 为电渗堆载试验中能耗系数随电渗通电时

间的变化关系图。试验前期, 3 种电极布置形式的能耗系数均随通电时间的增加而缓慢增大, 试验后期, 长方形和平行错位布置的能耗系数大幅度增加, 而梅花形布置的能耗系数却增长缓慢。

3.2 裂缝与尺寸效应

比较本次电渗-堆载模型试验与李一雯等^[2]单纯电渗模型试验, 发现二者结果差别较大。单纯电渗模型试验中的排水量、能耗系数的顺序与本文试验结果恰好相反。而 Glendinning 等^[1]所做现场试验与本文试验结果相同(梅花形布置优于长方形布置)。由此可见, 本次试验可较好地反映现场电渗情况, 也就是说, 适当的堆载可消除电渗模型试验中的尺寸效应。之所以选取 Glendinning 的现场试验作为参考, 原因在于笔者查阅了国内外关于电渗现场试验的文献记载, 发现鲜有对不同电极布置形式进行对比。J. Kenneth Wittle^[6]的试验虽然采用了不同的电极布置形式, 但其电极布置与本文讨论的 3 种电极布置形式相差甚远, 且是在同一场地不同试验阶段采用的, 对本文参考价值不高。而 Glendinning 现场试验是目前笔者查到的文献中唯一对不同电极布置形式进行平行对比的现场试验, 采用的电极布置形式与本文一致, 具有很好的可比性。

两次室内模型试验控制了电极布置形式、电极尺寸、电极间距、电压一致, 并且采用同一批淤泥质软土, 试验条件的不同之处仅在于堆载与否。笔者认为由于堆载条件不同引起的土体裂缝开展情况的巨大差异是造成两次电渗模型试验结果差异的主要原因, 正是裂缝的开展使得单纯电渗室内模型试验结果偏离现场试验。

单纯电渗试验中, 随着土中水的排出, 土体收缩产生大量裂缝, 且 3 种电极布置形式差别很大, 文献[2]中对此有详细介绍。相较单纯电渗试验, 电渗-堆载试验的裂缝开展程度显然要轻微得多。电渗-堆载试验结束后, 在尽量不破坏土样表层裂缝的前提下, 挖除上层的石英砂, 发现表面土体经电渗排水后仅产生几条微小裂缝, 且石英砂并未填充其内。图 5 所示为电渗-堆载条件下梅花形布置的裂缝开展情况, 其他布置形式的裂缝开展情况与之相似。由此可见, 裂缝开展情况是两组室内模型试验的显著不同之处。

图 6 给出了 2 组试验中 3 种电极布置形式的电流降低率曲线(为保持时间一致, 单纯电渗试验仅取前 72 小时数据)。从图 6 中可以看出, 前 4 小时, 6 条曲线均相差不大, 之后单纯电渗试验的 3 条曲线相差较大, 从第 8 小时到第 24 小时, 梅花形布置与平行错位布置的电渗降低率相差 20% 以上, 曲线均不光滑, 且

形状差别较大。而电渗-堆载试验的 3 条曲线显然圆滑得多, 且始终非常接近, 均可分为 3 个阶段, 前 4 小时为电流迅速下降段, 第 4 小时至第 24 小时为过渡段, 24 小时后为电流缓慢下降段。以上差异与裂缝的开展关系密切。单纯电渗试验中裂缝开展明显, 裂缝的产生使得电势梯度突变, 使得电流降低率曲线的曲率突变。由于不同电极布置形式裂缝的形成时间、发展形式不一样, 故不同布置形式的电流降低率曲线差异较大。而电渗-堆载试验由于上覆砂的作用, 裂缝开展十分有限, 试验过程中土体完整, 因此曲线光滑。



图 5 电渗-堆载试验裂缝开展情况

Fig. 5 Cracks in model experiment on electro-osmosis combined with loading

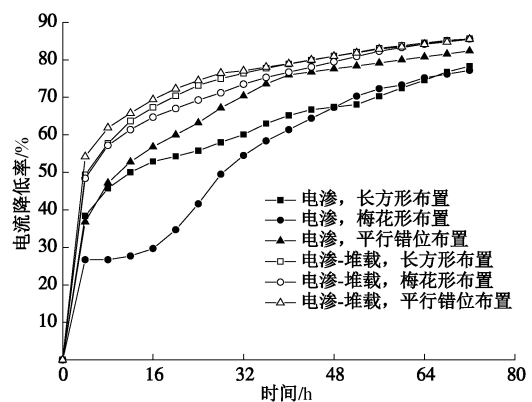


图 6 电流降低率曲线图

Fig. 6 Curves of electric current-reducing rate

之所以电渗-堆载模型试验的结果与现场试验接近, 是由于单纯电渗试验夸大了裂缝的开展程度, 而电渗-堆载模型试验的裂缝开展更接近现场试验。目前电渗现场试验文献关于裂缝的文字描述较少, 仅能通过照片看出裂缝的发展情况。Glendinning 等^[1]的电渗现场试验裂缝开展十分轻微, 仅有电极附近产生数条细小的裂缝, 并未影响土体的完整性, 与电渗-堆载模型试验的裂缝开展十分接近, 如图 7 (a); 江阴市华宏盈飞电渗科技有限公司胡士勤等运用导电塑料排水板在江苏江阴市进行的现场电渗试验亦没发现大的裂缝开展(相关技术资料尚未发表), 见图 7 (b)。



(a) Glendinning 电渗现场试验 (2008年)



(b) 胡士勤等人电渗现场试验 (2012年)

图 7 电渗现场试验土体裂缝开展情况

Fig. 7 Cracks in in-situ experiment on electro-osmosis

Fourie 等^[7]指出几何边界（包括仪器壁和电极的约束）是造成小尺寸试验比大尺寸试验电渗能量消耗大的原因，但未曾有人对该现象作进一步解释。

笔者认为，仪器壁和电极的约束作用使得土体竖向方向的变形受到限制，而水平向变形得到增强，由此裂缝的开展程度大大加强。实际工程中，地基中的电渗管和电极同样对土体有一定的约束作用，但约束程度比室内试验要小得多，裂缝开展自然比单纯电渗模型试验轻微得多。而施加堆载后，利用上覆荷载抑制水平向变形，使得裂缝的开展程度接近现场试验。裂缝的开展使得土体等效电阻增大，而小尺寸试验裂缝开展明显，这解释了 Fourie 等^[7]的发现。不堆载时，在每个电渗单元的单位面积电极数相等的情况下，不同电极布置形式的裂缝开展程度与几何形状亦差别较大，梅花形布置裂缝发展最严重，多处地方从上到下贯穿整个土体，而长方形布置和平行错位布置裂缝发展较轻微、存在于土体表面，这就是 2 组试验 3 种电极布置形式效果相反的原因。

综上所述，电渗-堆载模型试验的试验结果对实际工程更具有指导意义，建议在今后开展电渗的室内模型试验时能施加适当的堆载以消除几何边界引起的尺寸效应。

3.3 影响电渗效果的关键因素

前文已经表明，电渗-堆载模型试验可较好地模拟

实际工况，消除尺寸效应，因此本节对电渗-堆载模型试验结果进行分析，以找到消除尺寸效应后影响电渗效果的关键因素。

图 8 为电渗-堆载模型试验中 3 种电极布置形式的电流随时间的变化曲线。长方形电极布置的电流变化曲线始终位于最上方，梅花形电极布置位于最下方。由于本试验控制了 3 种电极布置形式每个电渗单元的单位面积电极数相等（均为 $8 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$ ），所以电流密度的大小顺序与电流一致，为长方形布置 > 平行错位布置 > 梅花形布置。一般认为，电流密度大的电渗效果较好，排水量应当较高，然而如前文指出的，实际排水量顺序为梅花形布置 > 长方形布置 > 平行错位布置，与电流密度不一致，由此可见电流密度大小并非影响电渗效果的关键因素。

Alshawabkeh 等^[8]认为，二维电渗时，每个电极单元的面积可分为无效电场和有效电场两部分。无效电场的近似形状为若干个等腰三角形，其底边等于同性电极间距，三角形的高是近似值，受处理时间、电极间距、电极布置等因素影响。电极长方形布置时，假设三角形的高为底边（即同性电极间距）的 $1/2$ ，而当中间为阴极、周围为阳极布置时，三角形的高约为底边（即同性电极间距）的 $1/4$ 。

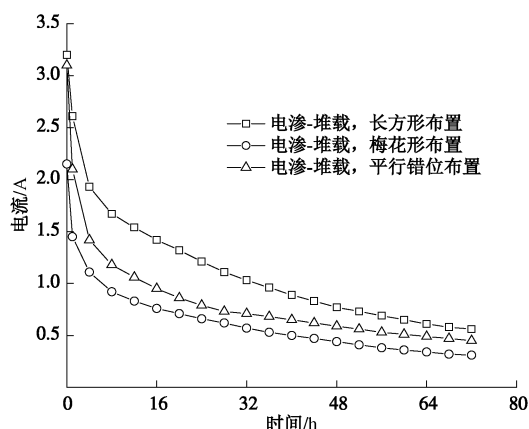


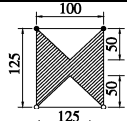
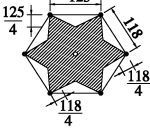
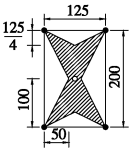
图 8 电渗-堆载试验电流值曲线图

Fig. 8 Curves of electric currents of experiment on simple electro-osmosis

按此理论，笔者计算了 2 次试验中长方形布置、梅花形布置和平行错位布置 3 种电极布置形式的无效电场和有效电场范围，如表 3 所示。3 种电极布置形式的有效电场比为梅花形 70% > 长方形布置 61% > 平行错位布置 44%（见表 3），其顺序与电渗-堆载试验排水量顺序相一致。由此说明在消除尺寸效应的影响下，影响电渗排水效果的关键因素是有效电场面积比，有效电场面积比决定了 3 种电极布置形式排水效果的顺序。然而排水量并不与有效电场比成正比关系，这

是由电流密度大小造成的, 本试验中电流密度与有效电场顺序不一致, 这使得排水量与有效电场偏离正比关系。

表 3 3 种布置形式的有效电场面积
Table 3 Areas of effective electric fields

布置形式	单元面积/cm ²	有效电场 A_e		有效电场示意图
		面积/cm ²	占比/%	
长方形	125	75	60	
梅花形	375	266	71	
平行错位	250	111	44	

注: N 为单元电极数, 表中示意图尺寸单位为 mm。
由此可见, 如何提高电渗的有效电场比是今后研究加强电渗效果、降低电渗成本的重要方向。

4 讨 论

本文 3.2 节对裂缝和尺寸效应的关系从试验现象的角度出发进行了论述, 并解释了电渗-堆载模型试验较单纯电渗试验裂缝开展程度接近现场试验的原因。但理论上如何解释裂缝与尺寸效应的关系仍值得研究。

大量文献指出, 造成混凝土、岩石等材料强度尺寸效应的主要因素是局部化。一般认为, 脆性材料强度的尺寸效应与其内部孔洞、裂缝等细观缺陷的演化有关。Bazant 等^[9]认为尺寸效应是由宏观裂纹扩展时应变能耗引起的。而 Carpinteri 等^[10]认为裂纹分形特性上的差异是准脆性材料产生尺寸效应的根本原因。

虽然 Bazant 等^[9]、Carpinteri 等^[10]的研究多针对脆性材料、准脆性材料强度尺寸效应, 与本文所述电渗模型尺寸效应概念并不完全一致。但诚如引言所述, 尺寸效应为某一物理量在不同尺寸下表现出不同变化规律的现象, 从这一角度来看, 二者同大于异, 前者可为理解电渗模型尺寸效应提供借鉴。笔者认为, 电渗过程中裂缝的开展造成了局部化, 阻碍了电势在土体中的连续性传递, 进而对电渗排水效果造成影响, 不同尺寸下裂缝开展程度不一致, 小尺寸下裂缝开展充分, 而现场试验(大尺寸)的裂缝开展轻微, 这是引起电渗模型尺寸效应的主要原因。因此, 模型试验裂缝开展情况是否接近现场试验是其能否准确预测现

场情况的关键, 这解释了为什么电渗-堆载试验与实际情况更接近。

5 结 论

本文通过电渗-堆载的室内模型试验, 比较了堆载作用下长方形、梅花形和平行错位 3 种电极布置形式对电渗效果的影响, 并对试验结果与李一雯等^[2]的单纯电渗模型试验进行了比较, 得到以下 3 点结论。

(1) 电渗模型试验中, 适当的堆载使试验裂缝开展较准确地反映了现场电渗的真实情况, 可消除几何边界引起的尺寸效应, 其结果可更好地模拟现场电渗情况。本文试验处理软黏土体积为 400 mm×600 mm×130 mm, 同性电极间距 100 mm, 异性电极间距 150 mm (长方形布置数据, 其他布置形式见图 1), 上覆荷载 674 Pa 可有效减少裂缝、消除尺寸效应, 以上数据可供今后电渗模型试验参考。

(2) 影响电渗排水效果的主要因素是有效电场面积, 电流密度仅为次要影响因素。建议今后关于如何增强电渗效果的研究可从提高有效电场面积比的角度入手。

(3) 电渗-堆载模型试验, 在梅花形、平行错位与长方形 3 种布置形式中, 梅花形布置效果最优, 排水量最大, 且电流降低率、能耗系数均最优, 具有最高的经济效益, 而平行错位布置效果最差。建议实际工程选择电渗法进行地基处理时选择梅花形布置。

参考文献:

[1] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C J F P. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **A139**: 491 - 499.

[2] 李一雯, 周建, 龚晓南, 等. 电极布置形式对电渗效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1972 - 1978. (LI Yi-wen, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Experimental research on the effect of electrodes array to electro-osmotic dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1972 - 1978. (in Chinese))

[3] 王学滨, 刘杰, 王雷, 等. 基于梯度塑性本构理论的岩样侧向变形分析(II): 尺寸效应及弹性回跳[J]. 岩土力学, 2004, **25**(7): 1127 - 1130. (WANG Xue-bin, LIU Jie, WANG Lei, et al. Analysis of lateral deformation of rock specimen based on gradient-dependent plasticity(II): size effect and snap-back[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(7): 1127 - 1130. (in Chinese))

[4] ODA M A. Method for evaluating the representative elementary

- volume based on joint survey of rock mass[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **25**(3): 281 - 287.
- [5] BAZANT Z P, DESMORAT R. Size effect in fiber or bar pullout with interface softening slip[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, **120**(9): 1945 - 1962.
- [6] WITTLE J Ke, ZANKO L M, FALK D, et al. Enhanced stabilization of dikes and levees using direct current technology[C]// Geocongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation. ASCE, 2008: 686 - 693.
- [7] FOURIE A B, JONES C J F P. Improved estimates of power consumption during dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics (EKGs)[J]. Geotextiles and Geomembrances, 2010, **28**(2): 181 - 190.
- [8] ALSHAWABKEH A N, GALE R J, OZSU-ACAR E, et al. Optimization of 2-D electrode configuration for electrokinetic remediation[J]. Journal of Soil Contamination, 1999, **8**(6): 617 - 635.
- [9] BAZANT Z P, XIANG Y Y. Size effect in compression fracture: splitting crack band propagation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, **123**(2): 162 - 171.
- [10] CARPINTERI A, CHIAIA B. Multifractal scaling laws in the breaking behaviors of disordered materials[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1997, **8**(2): 135 - 150.
-

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司（原冶金勘察研究总院）主办的学术—技术类双月刊，是中国科技论文统计源期刊，中国地质文摘引用期刊，中国学术期刊（光盘版）、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊，多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富，理论结合实际，适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行，双月刊，大 16 开本，双月 20 日出版。每期定价 10.0 元，全年 60 元。邮发代号 18-153。全国各地邮局均可订阅，也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告，价格适中，印制精良，注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址：河北省保定市东风中路 1285 号《勘察科学技术》编辑部；邮编：071069；Tel: 0312-3020887, 3094054；Fax: 0312-3034561；E-mail: kckxjs@163.com, kckxjs@126.com。

（《勘察科学技术》编辑部 供稿）