

DOI: 10.11779/CJGE201608010

# 可液化地基电解减饱法处理的电学特性分析

何森凯<sup>1, 2</sup>, 陈育民<sup>1, 2</sup>, 方志<sup>1, 2</sup>

(1 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 电解减饱和法是近年来提出的一种处理可液化地基的新方法, 通过电解饱和砂土地基中的孔隙水生成气体, 达到减小砂土地基饱和度并提高抗液化强度的目的。采用可导电的塑料排水板 (EKG) 为电极, 开展饱和砂土地基在恒定电流下的电解减饱和和模型试验, 并分析了砂土地基在电解过程中的电学特性。试验结果表明, 电解初期饱和度的下降速率与电流强度呈正比; 然后饱和度的下降速率变缓; 最后饱和度减小到 89.5% 不再变化, 且最终饱和度的大小与电流强度无关。此外, 地基的等效电阻随着砂土饱和度的减小而增大, 并且对比了孔隙水压力系数  $B$ 、含气水体积模量  $K_{wa}$ 、压缩波速  $v_p$  和地基等效电阻等 4 种评价指标在分析饱和砂土减饱和试验中的适用性, 结果表明等效电阻在电解减饱和法中最易测得, 且对砂土饱和度的敏感范围更大以及适用于各类试验, 因此可将地基等效电阻作为评价砂土减饱和和状态的有效指标。

**关键词:** 减饱和法; 电解; 饱和砂土地基; 电流强度; 地基等效电阻

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)08 - 1434 - 08

作者简介: 何森凯(1990 - ), 男, 主要从事土动力学与土工抗震方面的研究。E-mail: 616478470@qq.com。

## Electrical characteristics of electrolytic desaturation method for liquefiable foundation

HE Sen-kai<sup>1, 2</sup>, CHEN Yu-min<sup>1, 2</sup>, FANG Zhi<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The electrolytic desaturation method is an innovative method for mitigation of soil liquefaction in recent years. In this method, the air bubbles produced by electrolysis in the pore water of the saturated sandy foundation can reduce the saturation degree of the soil, and improve liquefaction resistance. In this study, the desaturation model tests on sand foundation under constant current intensity are carried out by using the conductive plastic drainage plates as the electrodes. Besides, the electrical properties of the sand foundation in the process of electrolysis are analyzed. The results show that at the initial stage of electrolytic desaturation process, the decreasing rate of saturation increases linearly with the current intensity, then the saturation continues to decrease in a gradual decrease rate, and finally the saturation reduces to 89.5%, which is independent of the current intensity. In addition, the equivalent electrical resistance of the foundation increases with the decrease of the saturation of sand. Meanwhile, four kinds of indices including the pore water pressure coefficient  $B$ , the gas bearing water bulk modulus  $K_{wa}$ , the compression wave velocity  $v_p$  and equivalent electric resistance of foundation are also evaluated here for analyzing the state of desaturation of sand foundation. The results show that the equivalent electric resistance is most easily measured, and has the largest sensitive range of sand saturation. Therefore, the equivalent electric resistance of foundation can be adopted as an effective index to evaluate the state of desaturation of sand foundation.

**Key words:** desaturation method; electrolysis; saturated sand foundation; current intensity; equivalent electric resistance of foundation

## 0 引 言

减饱和法是通过工程措施减小饱和砂土地基中的饱和度, 将饱和砂土地基变成不饱和的砂土地基, 从而提高地基的抗液化强度, 减轻地震所产生液化震害的一种抗液化方法<sup>[1]</sup>。现有研究表明, 砂土地基的饱和

度只要轻微地减小, 其抗液化强度就能明显提高<sup>[2-9]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51379067); 重点国际合作研究项目 (5141001028); 河海大学中央高校基本科研业务费项目 (2015B17314)

收稿日期: 2015 - 08 - 07



表 1 常用的减饱和法

Table 1 Commonly used desaturation measures

序号	减饱和方法	基本原理
1	物理充气法 <sup>[10-11]</sup>	通过充气泵, 将空气注射到砂土中 (或通过挤密砂桩注入到地基中), 在注射点附近排出孔隙水, 形成有效的减饱和区域。
2	化学气泡法 <sup>[5, 12]</sup>	通过化学物质一水过硼酸钠 ( $\text{NaBO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 在砂土中的反应, 会产生双氧水 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )。然后双氧水的分解可以产生氧气, 达到减小砂土饱和度的目的, 可以通过所加化学物质的量来控制砂土饱和度。
3	生物气泡法 <sup>[9, 13-14]</sup>	通过微生物的反硝化作用产生氮气的方法来减小砂土的饱和度。
4	降低水位法 <sup>[2]</sup>	通过井点降水将地下水位下降, 使得饱和砂土变成不饱和砂土。
5	电解法 <sup>[1, 7]</sup>	在饱和砂土中布置电极, 在稳流模式下对砂土电解, 产生无毒环保物理及化学性质稳定且不易溶于水的氢气和氧气, 将电极附近孔隙水排出, 达到减饱和目的。

目前常见的减饱和法主要有 5 种<sup>[2, 5, 9-14]</sup>, 其基本原理见表 1。相比较于传统昂贵的处理可液化场地的措施, 减饱和法将是一种更具有经济效益的有效方法<sup>[14]</sup>。通过比较分析 5 种减饱和法措施, 其中降水法处理可液化场地的费用不仅费用昂贵, 还可能因为长时间抽取地下水导致地表沉降的问题<sup>[2]</sup>; 而物理充气法的气泡分布不均匀, 通常导致减饱和效果较差; 虽然从气泡分布的均匀性考虑, 化学气泡法和生物气泡法比物理充气法的效果更好, 但有可能引起环境污染问题。

电解减饱和法是在饱和砂土地基中布置电极, 通过电解孔隙水产生气体的方式减小地基的饱和度, 目前该方法仍然处于理论研究的阶段。Yegian 等<sup>[8]</sup>采用小型剪切箱开展了电解减饱和砂土的振动台试验, 试验中的矩形网状电极分为上下两层布置在砂土中, 该电极材料是覆盖有氧化物的金属钛, 具有很高的电解效率和耐腐蚀性。经电解试验发现, 在电极间距 290 mm, 电解电流为 525 mA 的稳流模式下对饱和砂土开展电解作业 3~5.5 h, 可以使饱和度从 100%减小到 96.3%。陈育民等<sup>[1]</sup>用可导电的塑料排水板 (EKG) 为电极, 开展了电解减饱和砂土的振动台试验, 验证了电解法降低砂土地基饱和度的可行性。

目前对基于电解作用的减饱和法研究, 已有一些实验室进展, 但仍然存在两大问题: ①电解过程中的电学特性规律不明确。已有的试验只对电解减饱和法引起的不饱和地基的抗液化强度做出了定性判断, 并没有对电解过程中砂土地基的电学特性开展深入地研究; 而地基的电学性质则是电解减饱和法区别于其他减饱和原理的重要特性, 亟待进行深入分析。②表征砂土地基减饱和状态的物理指标仍不明确。目前用于分析减饱和状态的指标包括孔隙水压力系数  $B$ <sup>[2, 6, 15-16]</sup>、含水气体积模量  $K_{wa}$ <sup>[17-18]</sup>和压缩波速  $v_p$ <sup>[6, 8, 14, 16, 19-20]</sup>等, 但针对电解减饱和法, 这些物理指标是否适用, 以及相应指标与饱和度之间的关系如何, 目前仍无法确定。

本文采用 EKG 作为排水电极, 在确定电解试验中所采用的电极间距和电极布置型式等参数后, 开展了饱和砂土地基的电解减饱和试验。研究饱和砂土地基在电解过程中, 电流强度对电解减饱和法的影响、砂土地基的电学性质以及初步确定电解法表征砂土地基减饱和状态的物理指标。

## 1 电解减饱和和试验

### 1.1 试验原理和方案

电解减饱和和试验是根据电解水的基本理论, 在饱和砂土地基中布置电极, 使阴极和阳极在电解过程中不断产生性质稳定且不易溶于水的氢气和氧气, 将砂土地基中孔隙水排出土体, 达到降低砂土饱和度的目的。电解试验所采用的排水电极为 EKG 可导电塑料排水板, 这种材料除了塑料板内的铜丝可以导电之外, 整个塑料板也可以导电, 而且还可以加快孔隙水的排出, 其详细规格为 200 mm×50 mm, 以满足电解试验的减饱和效果, 同时也不影响后续波速试验中压缩波速的测试。电极采用梅花形布置 (图 1, 2), 间距为 20 cm; 加速度传感器和激振器的布置形式如图 2 所示。

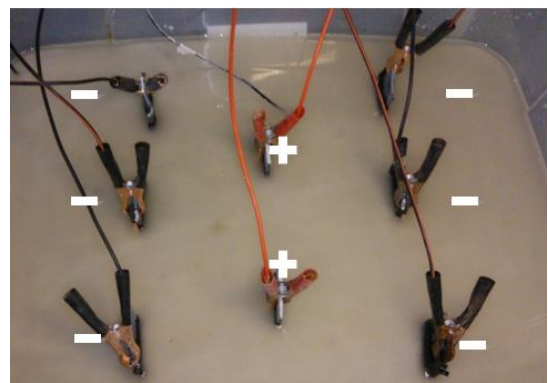


图 1 模型箱中的电极布置

Fig. 1 Arrangement of electrodes in model box

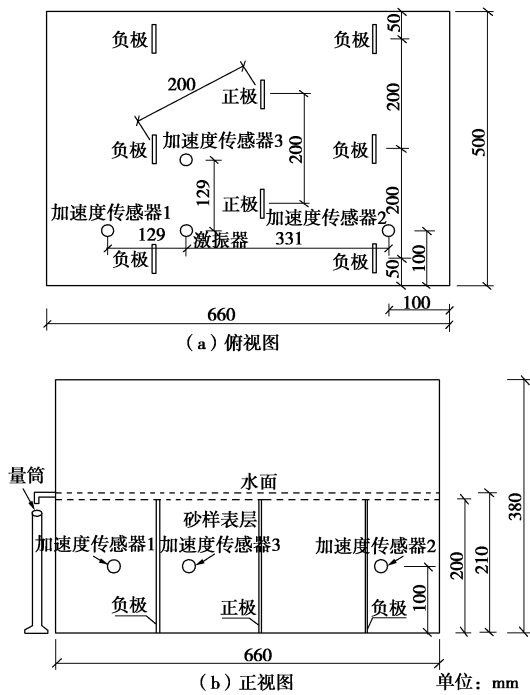


图2 试验装置

Fig. 2 Experimental device

1.2 试验条件

电解减饱和和试验的主要设备包括可编程直流电源，其输出电压为0~500 V，电流0~4.8 A，最大输入功率2400 W。选用颗粒级配不良的#7 硅砂作为电解减饱和和法试验的砂样，该砂被广泛用于砂土地基液化问题的室内试验研究<sup>[21-22]</sup>。其基本物理性质为： $D_{60} = 1.75 \text{ mm}$ ， $D_{10} = 0.0083 \text{ mm}$ ，平均粒径为0.017 mm，不均匀系数 $C_u = 2.11$ ，比重 $G_s = 2.64$ ，最大干密度 $\rho_{d,max} = 1.65 \text{ g/cm}^3$ ，最小干密度 $\rho_{d,min} = 1.34 \text{ g/cm}^3$ 。此外众多学者还使用丰浦砂<sup>[4, 10, 19-20]</sup>来研究砂土地基的减饱和特性和抗液化性质，其级配曲线如图3所示。由图可知，#7 硅砂和丰浦砂的级配曲线相当接近。因此在研究砂土地基液化问题时，可以相互参照并比较试验结果。

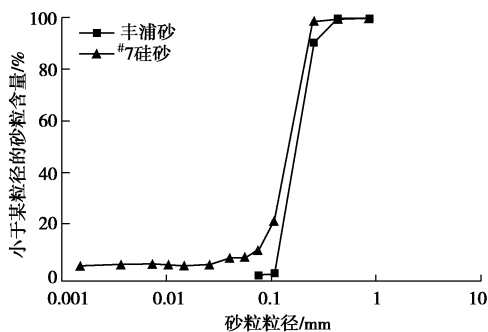


图3 #7 砂和丰浦砂的颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution for #7 sand and Toyoura sand

试验采用空中砂雨法进行制样，制样过程用无气水进行饱和，以确保获得高饱和的砂样，提高电解过

程中所测砂土饱和度的精度。装样饱和后，以恒定电流强度进行电解减饱和模型试验，并连续记录电解过程中不同时刻的砂土地基的电解电压值和排出砂土地基表面的孔隙水量。为了更好的研究砂土地基在电解过程中的电学特性与地基饱和状态的关系，试验采用不同电流强度进行分析，分别为工况 I 电流为 0.6 A，工况 II 电流为 0.8 A 和工况 III 电流为 1.0 A。

2 试验结果与分析

2.1 地基饱和度的变化

(1) 饱和度的计算方法

在电解减饱和模型试验中，假定砂土地基的孔隙率保持不变，随着电解的持续进行，在砂土孔隙中产生越来越多的气泡，使孔隙水逐渐排出砂土地基，在砂土表面形成自由水层（图4）<sup>[8]</sup>。因此，可以通过量测砂土地基的排水量来获得砂土的饱和度。

图5为排水速率和通电时间的关系曲线，从图中可以明显得出，工况 III 在电解初期的 60 min 内，其排水速率维持在最大值 14 mL/min，而此时工况 II 和工况 I 的排水速率分别为 11 和 8.1 mL/min。由此可见，电解初期的排水速率和电流强度成线性关系，且排水速率随着电流强度的增大而越大。同时结合图6所示排水量和通电时间的关系曲线可知，在该时间内，工况 III 的排水量为 860 mL，占总排水量的 70.7%；而工况 II 和工况 I 的排水量仅为 670 和 520 mL，分别占总排水量的 54.9%和 42.1%，远远小于工况 III 的 70.7%。该现象表明，在电解初期，电流强度越大，排水效果越好。

表2还对比了3种工况的排水效率，从中可以得出：随着电流强度的增大，初始稳定排水速率持续的时间越短，依次为 90, 70, 60 min，分别占总排水时间的 42.9%, 43.8%和 50%，均不大于 50%。但是排出的孔隙水却可以达到总排水量的 62.1%, 63.8%和 70.7%，稳定排水效率系数  $E$  均达到 1.4。稳定排水效率系数  $E$  为初始稳定排水速率时间内的排出孔隙水量占总排出孔隙水的百分比除以该时间占总排水时间的百分比。该现象表明，在不影响排水效率的前提下，可以在电解初期增大电流强度，将孔隙水以更短的时间排出砂土地基。

然而，随着电解的继续进行，3种工况的排水速率均开始逐渐减小，直至减小到零，砂土停止排出孔隙水。这是因为在模型的试验中，围压始终处于较低状态，气泡只能存在于浅层的砂土中，因此保留在砂土孔隙中的气泡总体积量有限。此时，电解作用虽然持续进行，但产生的气体将全部排出砂土，不会存留

在砂土孔隙中, 因此不能继续排出孔隙水和降低砂土的饱和度。

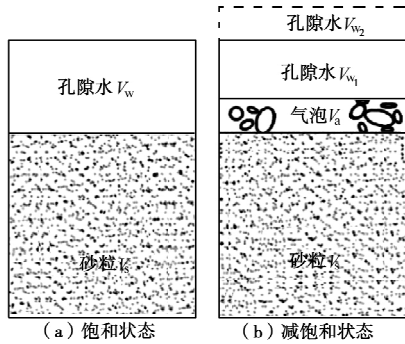


图 4 砂土饱和度计算示意图

Fig. 4 Calculation of saturation of sand

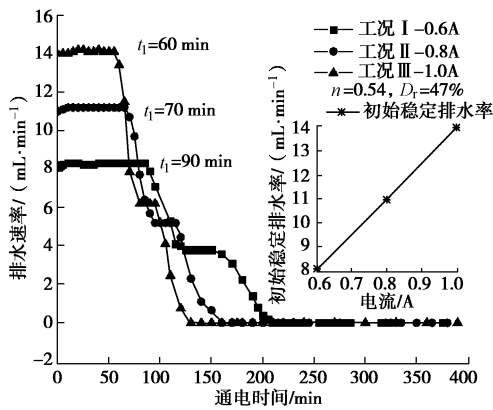


图 5 排水速率和时间的关系

Fig. 5 Relation between drainage rate and time

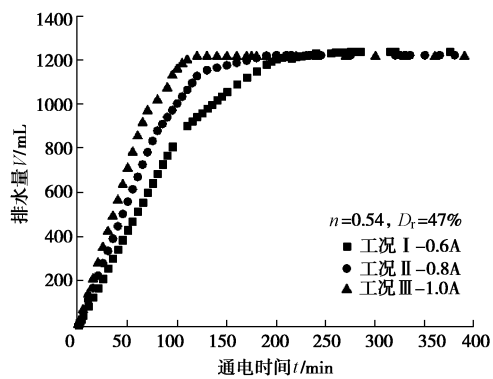


图 6 排水量和时间的关系

Fig. 6 Relation between drainage volume and time

表 2 排水效率

Table 2 Drainage efficiency

电流强度	初始稳定排水速率 时间/min	占总排水时间 比例/%	排出孔隙水/mL	占总排出孔隙水比 例/%	稳定排水效率 系数 E
0.6A-工况 I	90	42.9	770	62.1	1.4
0.8A-工况 II	70	43.8	780	63.8	1.4
1.0A-工况 III	60	50.0	860	70.7	1.4

(2) 饱和度与时间的关系

图 7 为电解过程中, 饱和度和排水速率相对于时间的变化曲线。从图中可以明显得出, 在电解初期, 由于排水率固定不变, 砂土饱和度保持恒定的速率线性减小, 下降速率与电流强度呈正比; 随后饱和度继续下降, 但降低速率逐渐变缓; 最后饱和度减小至 89.5%不再变化, 且最终饱和度的大小与电流强度无关。本试验中砂土饱和度没有继续减小的原因是, 模型试验中的围压始终处于较低状态, 气泡只能存在于浅层砂土中, 电解减饱和法所产生的气体在砂土孔隙中会达到一个饱和量, 使其排水能力和减饱和效果有限。

对比图中 3 个工况的曲线关系可知, 排水速率开始减小时, 砂土地基的饱和度已经大幅度降低, 减小到 93%以下。这表明在电解初期, 排水速率处于稳定状态时, 电解法已经达到很好的减饱和效果。而且电流强度越大, 饱和度减小至 93%所需时间越短, 电解减饱和效果越好; 随后其减饱和作用逐渐衰弱。因此在实际工程运用中, 可以通过高电流强度加快初期饱和度的降低, 而到了后期则可以减弱电流, 达到经济环保的目的。

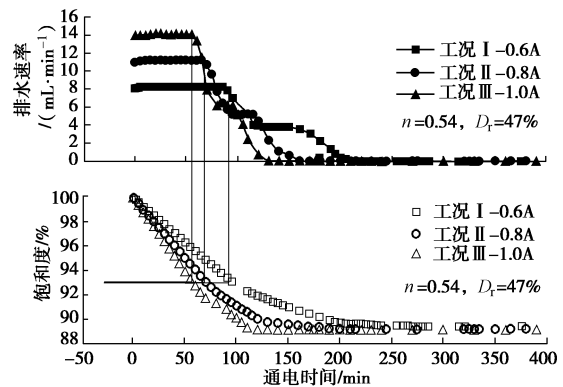


图 7 饱和度和排水速率相对于时间的关系

Fig. 7 Relation between saturation and drainage rate relative to time

2.2 地基的电学特性

(1) 等效电阻变化规律

图 8,9 分别为电解减饱和和模型试验中的电压响应曲线和电阻响应曲线, 结合两图可以得出: 在开始电解时, 电阻均会有短暂的轻微波动。这是因为试验考虑实际工程中电极布置的可操作性, 采用最大有效范围的电极布置间距和梅花形的空间布置方案, 其电解所产生的气泡需要一定的时间才能作用至模型箱内最大有效范围。电阻 R 经历了短暂波动后, 随着电解时间的推移, 产生的气泡越来越多, 改变了砂土的三相体系, 使得砂土的导电性降低, 电阻逐渐增大。相比

较于工况 I 和 II，工况 III 的电解试验中，电压和电阻的增长速度最快，在通电时间为 120 min 时，其电压和电阻就抵达最大值 304 V 和 304 Ω。该现象表明，在电解减饱和和模型试验中，电流强度越大，砂土地基的电阻增长速度也越快，越先达到平衡状态，其电解效果越好。

需要注意的是本文试验所测得的电阻实际上是砂土地基中阳极与阴极之间的等效电阻，其阻值与电极间距、电极布置形式、地基深度和砂土密实度等因素有关。由于试验情况较为复杂，本文定性分析等效电阻与通电时间的关系。

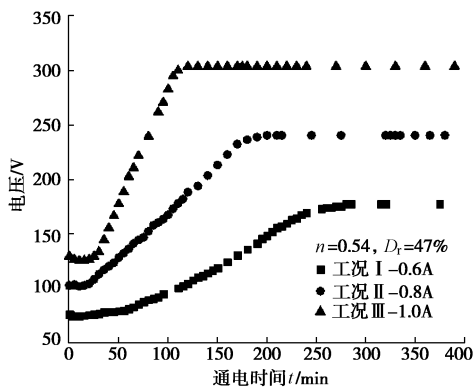


图 8 电压和通电时间的关系

Fig. 8 Relation between voltage and time

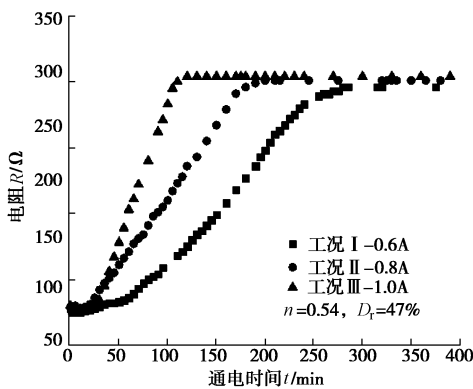


图 9 电阻和通电时间的关系

Fig. 9 Relation between electrical resistance and time

(2) 等效电阻和饱和度的关系

图 10 为电解过程中，等效电阻随饱和度的变化曲线。从图中可以明显得出，3 条曲线的整体变化趋势均一致，虽然电阻在 150~220 Ω 阶段，电解减饱和和模型试验所得的等效电阻和饱和度的关系曲线有所偏差；但与等效电阻和饱和度的拟合曲线进行比较后，彼此的拟合度很好。试验结果表明电流强度对地基等效电阻和砂土饱和度之间的关系影响很小，即在电解减饱和过程中，地基电阻和饱和度呈现出明显的单值函数关系，电阻值随着饱和度的减小而增大。这种关

系表明等效电阻是表征砂土减饱和状态的重要指标。

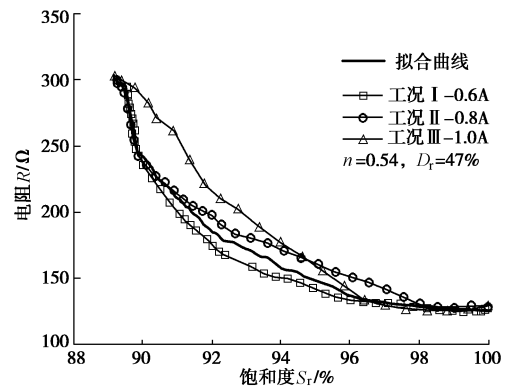


图 10 电阻和饱和度的关系

Fig. 10 Relation between electrical resistance and saturation

3 减饱和状态评价指标的对比分析

根据本文试验研究可知，目前主要有四种减饱和状态的评价指标，分别为孔隙水压力系数  $B$ 、含气水体积模量  $K_{wa}$ 、压缩波速  $v_p$  和等效电阻。

(1) 孔隙水压力系数  $B$

最初用于评价砂土饱和度和抗液化性的指标是孔隙水压力系数  $B$ ，其随着饱和度的增大而增大，对饱和度具有良好的灵敏性（图 11）。但是其只能在饱和度和处于 96%~99.5% 区段，才能确保所表征的砂土地基减饱和状态具有很高的精度。此外，孔隙水压力系数  $B$  难以测得，只适用于三轴试验；在振动台试验等其他模型试验及实际工程中无法通过该指标评价砂土的减饱和状态。

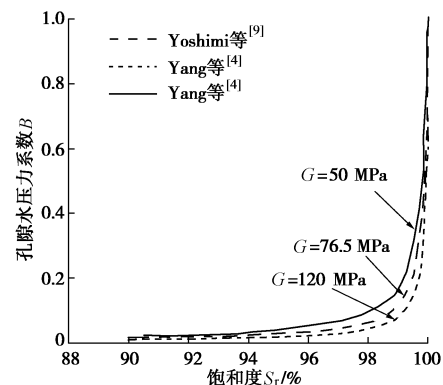


图 11 孔隙水压力系数和饱和度的关系

Fig. 11 Relation between pore pressure coefficient and saturation

(2) 含气水体积模量  $K_{wa}$

若孔隙水含有溶解（或分布）的气泡，则流体的体积模量将发生显著的变化。即含气水的体积模量受饱和度的影响非常大，尤其是在饱和度接近于 100% 的情况下，只要饱和度稍微减小到 99.7%，含气水的体积模量就会锐减。然而饱和度小于 99.4% 时，含气

表 3 评价地基减饱和状态的 4 种指标

Table 3 Four kinds of indices to evaluate state of desaturation of sandy foundation

评价 指标	与饱和度 $S_r$ 关系	饱和度 敏感范围	优点	缺点
$B$	随 $S_r$ 的增大而增大	95%~100%	①适用于三轴试验; ②成熟的评价指标;	① $S_r < 95\%$ 时, 无法评价 $S_r$ , 敏感范围较小; ②适用范围小, 实际工程无法运用。
$K_{wa}$	随 $S_r$ 的增大而增大	99.4%~100%	①邻近完全饱和时; ②非常灵敏;	①敏感范围非常小, 局限性大; ②测试指标困难, 在试验中难以运用。
$v_p$	随 $S_r$ 的增大而增大	93%~100%	①适用于模型试验; ②适用于现场监测 $S_r$ ; ③敏感范围较大;	① $S_r < 93\%$ 时, 无法继续评价饱和度; ②试验设备昂贵, 难以普及; ③波速试验要求精度高。
等效 电阻	随 $S_r$ 的增大而减小	89%~100% (本文)	①电阻特性容易测得; ②适用于各类试验; ③敏感范围大;	评价指标有待进一步完善

水体积模量变化不明显(图 12)。而且该指标测试困难, 因此难以在试验及工程中运用。

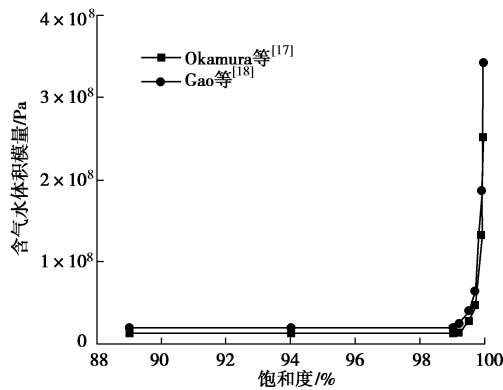


图 12 含气水体积模量和饱和度的关系

Fig. 12 Relation between bulk modulus of air-water mixture and saturation

(3) 压缩波速  $v_p$

图 13 为压缩波速和饱和度的变化关系曲线, 从图中可知: 在 3 种工况下, 电阻  $R$  和压缩波速度  $v_p$  分别对饱和度有着稳定的变化趋势, 其中饱和度与  $v_p$  之间存在非常好的单值函数关系, 当饱和度从 100%逐渐减小至 93%时, 压缩波速的响应非常灵敏。但是饱和度  $S_r$  小于 93%时, 波速已经基本不再变化, 无法用该指标精确评价饱和度。而且波速试验设备昂贵, 无法普及使用。

(4) 等效电阻

众多学者研究了土的电阻率性质<sup>[23-26]</sup>, 试验结果表明电阻是研究砂土的一个常用物理量。结合图 10 和表 3 可得, 相比较于前面 3 种评价指标, 电阻特性不仅在饱和度  $S_r$  处于 89%~100%范围内具备良好的灵敏性, 同时还可以在试验中轻松测得, 并且适用于各类模型试验以及具备更好的经济性能。因此, 评价

减饱和状态的最优指标是地基等效电阻。

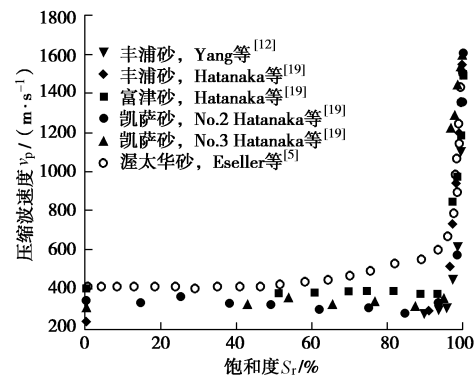


图 13 压缩波速度与饱和度的关系曲线

Fig. 13 Relation between compression wave and saturation

## 4 结 论

电解减饱和法进行可液化地基的处理, 目前在国际上已经开展了一些研究工作。该方法是在不改变砂土孔隙率和应力状态的前提下, 通过电解饱和砂土地基中的孔隙水来生成气体, 达到减小地基饱和度并提高地基抗液化强度的目的, 具有重要的应用前景, 但目前仍然处于初步研究阶段。本文对饱和砂土地基开展恒流电解模型试验研究, 可以得出了以下主要结论:

(1) 电解减饱和初期, 饱和度保持恒定的下降速率线性减小, 其下降速率与电流强度成正比, 并且在该阶段, 砂土地基的饱和度已经大幅度减小, 从 100%减小到 93%以下; 随后饱和度继续下降, 但降低速率逐渐变缓; 最后饱和度减小到 89.5%不再变化, 且最终饱和度的大小与电流强度无关。因此在实际工程运用中, 可以通过高电流强度加快初期饱和度的降低, 而到了后期则可以减弱电流, 达到经济环保的目的。

(2) 在电解减饱和初期, 电流强度越大, 砂土地

基的等效电阻增长速度也越快,越先达到平衡状态,其电解效果越好。同时研究分析地基的电学特性可知,电解过程中地基等效电阻和砂土饱和度存在明显的单值函数关系,电阻值随着砂土饱和度的减小而增大。

(3) 通过对比分析已知的四种减饱和状态的评价指标,包括孔隙水压力系数  $B$ 、含气水体积模量  $K_{wa}$ 、压缩波速  $v_p$  和地基等效电阻,结果表明在电解减饱和和法中地基等效电阻最容易测得,且对砂土饱和度的敏感范围更大以及适用于各类试验。因此,地基等效电阻是评价砂土减饱和状态的有效指标。

本文通过开展饱和砂土地基在恒定电流强度条件下的电解减饱和模型试验,初步探讨了电流强度对电解减饱和和效果的影响,以及砂土地基在电解过程中的电学特性。由于试验条件所限,没有深入分析地基正负极之间的等效电阻及其影响因素。下一步要着重开展电极间距、电极布置形式、地基深度和砂土密度等因素对等效电阻影响的研究。

#### 参考文献:

- [1] 陈育民, 何森凯, 吴海清, 等. 电解减饱和和法处理可液化地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 726 - 733. (CHEN Yu-min, HE Sen-kai, WU Hai-qing, et al. Modeling test on liquefaction resistance of desaturation measure of electrolysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 726 - 733. (in Chinese))
- [2] YOSHIMI Y, TANAKA K, TOKIMATSU K. Liquefaction resistance of a partially saturated sand[J]. Soils & Foundations, 1989, **29**(3): 157 - 162.
- [3] PANDE G N, PIETRUSZCZAK S. Assessment of risk of liquefaction in granular materials and its mitigation[C]// Proc 12th IACMAG Goa, 2008: 1 - 6.
- [4] OKAMURA M, NOGUCHI K. Liquefaction resistances of unsaturated non-plastic silt[J]. Soils and Foundations, 2009, **49**(2): 221 - 229.
- [5] ESELLER-BAYAT E, YEGIAN M K, ALSHAWABKEH A, et al. Liquefaction response of partially saturated sands. i: experimental results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(6): 863 - 871.
- [6] YANG J, SAVIDIS S, ROEMER M. Evaluating liquefaction strength of partially saturated sand[J]. Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(9): 975 - 979.
- [7] OKAMURA M, TERAOKA T. Shaking table tests to investigate soil desaturation as a liquefaction countermeasure[J]. Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations, 2006, **132**(2): 282 - 293.
- [8] YEGIAN M K, ESELLER-BAYAT E, ALSHAWABKEH A, et al. Induced-partial saturation for liquefaction mitigation: experimental investigation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(4): 372 - 380.
- [9] HE J, IVANOV V, CHU J. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas[J]. Géotechnique, 2013, **63**(4): 267 - 275.
- [10] OKAMURA M, ISHIHARA M, TAMURA K. Degree of saturation and liquefaction resistances of sand improved with sand compaction pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(2): 258 - 264.
- [11] OKAMURA M, TAKEBAYASHI M, NISHIDA K, et al. In-situ desaturation test by air injection and its evaluation through field monitoring and multiphase flow simulation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**: 643 - 652.
- [12] ESELLER-BAYAT E, YEGIAN M K, ALSHAWABKEH A, et al. Liquefaction response of partially saturated sands. ii: empirical model[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(6): 872 - 879.
- [13] HE J, CHU J, IVANOV V. Remediation of liquefaction potential of sand using the biogas method[J]. Geo-Congress, 2015: 879 - 887.
- [14] HE J, CHU J. Undrained responses of microbially desaturated sand under monotonic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014(12): 1 - 8.
- [15] Sherif. Saturation effects on initial soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, **102**: 914 - 917.
- [16] TAMURA S, TOKIMATSU K, ABE A, et al. Effects of air bubbles on B-value and P-wave velocity of a partly saturated sand[J]. Japanese Geotechnical Society, 2002, **42**(1): 121 - 129.
- [17] OKAMURA M, YASUMASA S. Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand[J]. Soils & Foundations, 2006, **46**(10): 695 - 700.
- [18] GAO Q, LIU Z, YU X B. Computer simulations on the effects of desaturation on soil liquefaction resistance[C]// International Conference on Geotechnical and Earthquake Engineering. Chengdu, 2013: 786 - 795.
- [19] HATANAKA M, MASUDA T. Experiment study on the relationship between degree of saturation and P-wave[J].



- Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, 2008: 346 - 351.
- [20] DELLA N. Laboratory testing of the monotonic behavior of partially saturated granular[J]. Earth Sciences Research Journal, 2010, **14**(2): 1 - 8.
- [21] TOKIMATSU K, UCHIDA A. Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity[J]. Soils and Foundations, 1990, **30**(2): 33 - 42.
- [22] VAID Y P, THOMAS J. Liquefaction and postliquefaction behavior of sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(2): 163 - 173.
- [23] 查甫生, 刘松玉. 土的电阻率理论及其应用探讨[J]. 工程勘察, 2006(5): 10 - 15, 44. (ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu. Study and application of the theory of soil resistivity[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(5): 10 - 15, 44. (in Chinese))
- [24] 郭秀军, 刘涛, 贾永刚, 等. 土的工程力学性质与其电阻率关系实验研究[J]. 地球物理学进展, 2003(1): 151 - 155. (GUO Xiu-jun, LIU Tao, JIA Yong-gang, et al. The study of the relationship between engineering mechanical properties and resistivity of soils[J]. Progress in Geophysics, 2003(1): 151 - 155. (in Chinese))
- [25] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004(1): 83 - 87. (LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(1): 83 - 87. (in Chinese))
- [26] 刘松玉, 查甫生, 于小军. 土的电阻率室内测试技术研究[J]. 工程地质学报, 2006(2): 216 - 222. (LIU Song-yu, ZHA Fu-heng, YU Xiao-jun. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2006(2): 216 - 222. (in Chinese))

## 2016年城市岩土工程西湖论坛（第2号通知）

随着中国新型城镇化的推进, 城市地下工程快速发展, 呈现出巨大的社会需求, 对地下空间资源的开发利用及城市安全也提出了更高的要求。针对城市岩土工程中重大国家需求, 举办本次“2016年城市岩土工程西湖论坛”。

**主办单位:** 中国工程院土木、水利与建筑工程学部中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心

**协办单位:** 泰昌建设有限公司; 浙江开天工程技术有限公司; 中淳高科桩业股份有限公司(浙东建材)中铁四局集团城市轨道交通分公司; 解放军理工大学; 等。

**会议宗旨:** 会议将就近年来城市岩土工程的热点与重点问题, 邀请著名专家、学者及相关企事业单位领导进行深入探讨, 寻找解决有关问题的思路和方法。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者、工程技术人员和研究生踊跃参加。

**会议主题:** ①城市地下综合体、城市地下管廊、城市地下交通和城市地质灾害防治; ②专题研讨会: 岩土本构理论前沿问题。

**会议时间:** 2016年10月10日—11日(9日报到)。

**联系方式:** 王笑笑, 13646828087, wangxiuxiu713@163.com; 陆水琴, 15967126989, lusq87@163.com。

(大会组委会 供稿)