

DOI: 10.11779/CJGE201604018

电解减饱和法处理可液化地基的振动台试验研究

陈育民^{1, 2}, 何森凯^{1, 2}, 吴海清³, 徐 君³

(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;

3. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

摘 要: 减饱和法是近年来提出的一种可液化地基处理方法, 其基本原理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, 减轻地震时产生的液化震害。根据电解水的原理, 采用新型可导电的塑料排水板为电极, 开展了饱和砂土地基的电解试验, 通过试验中产生气泡的宏观现象, 确定了电解试验应采用的电极间距、电解电压、电极布置型式。基于室内振动台对电解减饱和法的抗液化效果进行了试验研究, 考虑了电极在砂土地基中的竖向布置、水平布置和倾斜布置对地基抗液化效果的影响。结果表明, 3 种电极布置方案中水平电极布置方案在振动时产生的超孔压最小, 抗液化效果最好。同时开展了电解后静置工况下的振动台试验, 结果表明静置一段时间后, 电解产生的减饱和作用仍然明显, 但地基深部的气泡存在上移运动的趋势。在实际应用过程中, 可以定期进行地基土体的电解作业, 从而提高可液化地基的抗液化能力。

关键词: 减饱和法; 抗液化; 饱和砂土地基; 电解; 振动台试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)04 - 0726 - 08

作者简介: 陈育民(1981 -), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土动力学与土工抗震领域的教学与科研工作。E-mail: ymchenhu@163.com。

Model tests on liquefaction resistance of desaturation measures of electrolysis

CHEN Yu-min^{1, 2}, HE Sen-kai^{1, 2}, WU Hai-qing³, XU Jun³

(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; 3. Shanghai Shen Yuan Geotechnical

Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: It has been proposed that liquefaction resistance of saturated sandy foundation can be improved through reducing its saturation degree. The electrolysis method is adopted to produce desaturated sand soils. By means of a conductive plastic drainage plate used as the electrodes, the electrolysis tests on water and saturated sand are conducted to determine the electrode spacing, electrolysis voltage and electrode arrangements. The gas bubble distributions of the saturated sandy foundation are analyzed to confirm the feasibility of electrolytic process. The effect of electrolytic procedure is experimentally validated based on the shaking table tests. According to different locations of the electrodes in sandy foundation, three different electrode arrangements, including vertical, horizontal and inclined modes, are compared. The results show that the horizontal one possesses the best liquefaction resistance since the generating excess pore pressure during the vibration is the lowest. Simultaneously, the tests on desaturated sand standing for a period of time after electrolysis are also carried out to investigate the effective time of desaturation effect. The results indicate that the desaturation effect still works under this condition. In engineering practice, the electrolysis of ground can be operated at regular intervals to keep the enhanced liquefaction resistance.

Key words: desaturation method; liquefaction resistance; saturated sandy foundation; electrolysis; shaking table test

0 引 言

近几年来, 国内外学者正在致力于减饱和法进行可液化地基处理的研究。减饱和法 (desaturation method) 的基本原理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, 减轻地震时产生的

液化震害。

在开展土体液化三轴试验中, 人们发现如果试样的饱和度不能够达到 100%, 砂土的抗液化强度则会

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); 中央高校基本科研业务费项目 (2015B17314)
收稿日期: 2015 - 03 - 02

被大大高估^[1-2]。此后, 陆续有学者专门开展不同饱和度和情况下砂土的抗液化强度的试验研究。图1是已开展的部分试验结果^[3-7]。可以发现, 砂土的饱和度从100%减少到70%时, 砂土的抗液化强度变化明显, 随着饱和度的减小, 抗液化强度逐渐提高, 最大可以超过完全饱和和试样的3倍以上。类似的结论, 也获得了越来越多试验结果的支持^[8-10], 于是开始设想降低砂土地基饱和度的工程措施。

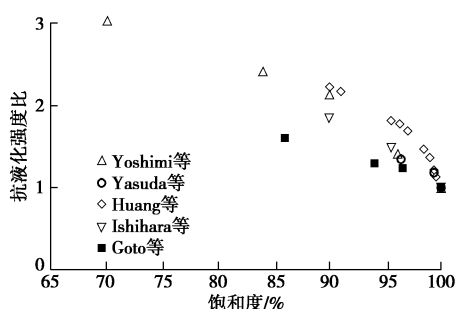


图1 抗液化强度比与饱和度的关系曲线

Fig. 1 Relation between liquefaction strength ratio and saturation

由于土是一种三相体, 对于饱和砂土而言, 在假定孔隙率不变的情况下, 要想降低土体的饱和度, 目前经济有效的方法是增加砂土试样(地基)中的气体含量。根据气体的产生方式, 可将减饱和法分成物理充气法^[11-12]、生物气泡法^[13-14]、化学气泡法^[10, 15]、电解法^[16]等。其中电解减饱和法, 是通过电解水产生气体的方法在饱和砂土中产生气体, 达到降低砂土饱和度的目的。

近年来, 一种新型的可导电排水板(EKG)^[17-18]应用到工程建设领域, 它综合了排水电极和排水板的双重作用, 在进行电渗的同时还具有竖向排水体的功能。本文采用EKG作为排水电极, 开展了饱和砂土地基的电解试验, 通过观察试验过程中的气泡生成情况, 确定了电解试验应采用的电极间距、电解电压、电极布置型式等参数。设计了电解减饱和法处理可液化地基的振动台试验方案, 考虑电极布置形式对试验结果的影响, 对EKG电极的电解减饱和法处理饱和砂土地基的效果进行了研究。

1 饱和砂土地基的电解性状试验

EKG作为排水电极, 一般主要应用于软黏土的电渗加固^[19], 而且在应用中还应当避免电渗过程中产生的电解现象, 因为电解作用将在电极周围产生酸碱环境, 从而腐蚀电极, 削弱电渗的效果^[20]。而本文试验要在饱和砂土中进行, 而且主要分析电解产生气体的效果, 因此没有成熟的方案可以参考。为了了解饱和

砂土地基的电解性状, 本节设计了两个试验, 包括电解水试验和电解饱和砂土地基试验, 从宏观的角度分析电解作用的强度。

1.1 电解水试验

根据电解水的基本理论, 电解水的电压与溶液的浓度、pH值、电极间的距离等有关。为了获得满足后续振动台试验要求的电解直流电压以及电极布置形式, 首先在透明的有机玻璃箱中进行电解水试验。有机玻璃箱(图2)的长宽高分别为50, 30和50 cm。排水电极采用了江阴市华宏盈飞电渗科技有限公司出厂的EKG可导电塑料板, 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。考虑到排水板本身的尺寸较大(10 cm宽), 将排水板制成长13 cm、宽5 cm的塑料排水板电极(以下简称电极, 图3)。电解水试验中的水采用的是实验室的自来水, 试验中采用电源电压量程0~90 V, 电流量程0~3 A, 最大输入功率270 W。试验中以电极周边产生的气泡为主要现象, 讨论电极间距、直流电压及电极布置形式对试验的影响。

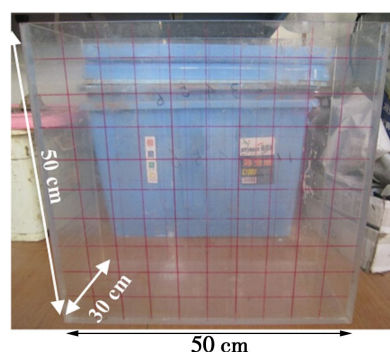


图2 电解试验模型箱

Fig. 2 Model box of electrolytic tests

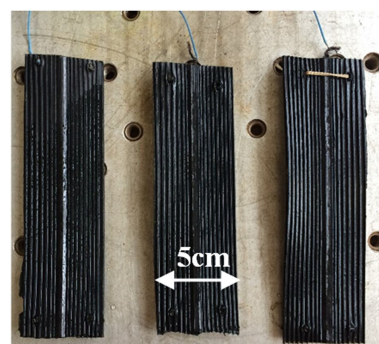


图3 电解试验采用的电极

Fig. 3 Photo of electrode in tests

(1) 电极间距的影响

尽管从电效率的角度考虑, 电极之间的距离越小电解越高效, 但是考虑到本试验所使用的电极本身具

有一定的宽度，因此需要通过试验来选取合适的电极间距。本组试验选用 30 V 直流电压条件下，电极间距（边到边）分别为 5、10 和 15 cm 的 3 种工况进行对比试验。试验结果见表 1 所示，当电极间距为 5 cm 时电解效果最明显，因此后续试验中将 5 cm 作为电极间距。

表 1 电解水的电极间距试验

Table 1 Electrode spacing tests

试验 序号	电极 间距 /cm	直流 电压 /V	试验现象
A-I	5	30	正负极两侧均匀有气泡均匀生成
A-II	10	30	正负极尽管都有气泡产生但是数量很少
A-III	15	30	直至电解 10 min 后才偶尔可以看到有气泡产生

(2) 直流电压的影响

由于 30 V 直流电压产生的电解效果并不十分明显，因此在保持电极间距 5 cm 不变的情况下，开展了不同直流的试验，结果见表 2 所示。可以发现，电解效果随着直流电压的增加逐渐明显，气泡产生明显增多，但到了 70 V 以后，电解现象不再产生明显变化。因此后续试验中采取 70 V 作为电解电压。

表 2 电解水的电压试验

Table 2 Voltage tests

试验 序号	电极 间距 /cm	直流电 压 /V	试验现象
B-I	5	30	正负极两侧均匀有气泡均匀生成，附着在电极的中下部，气泡较细小
B-II	5	50	正负极两侧气泡生成增多，但仍不够明显
B-III	5	70	两级均源源不断地产生气泡，可以明显观察到大量的气泡附着在电极上，此外还有不少气泡冒出水面
B-IV	5	80	现象相较于试验 B-III 变化不明显
B-V	5	90	现象相较于试验 B-III 变化不明显

(3) 电极布置形式的影响

在电解过程中， H^+ 向负极移动生成氢气， OH^- 向正极移动生成氧气，两者的体积比为 2：1，因此电极布置形式将会对电解结果产生影响。常用的排水板布置形式有矩形布置（图 4（a））和梅花形布置（图 4（b）），为了比较这两种布置形式的电解效果，进行了对比分析试验，试验结果如表 3 所示，可见梅花形布置且负极数量多于正极的布置形式效果更好，因此

确定电极布置形式采用梅花形布置。

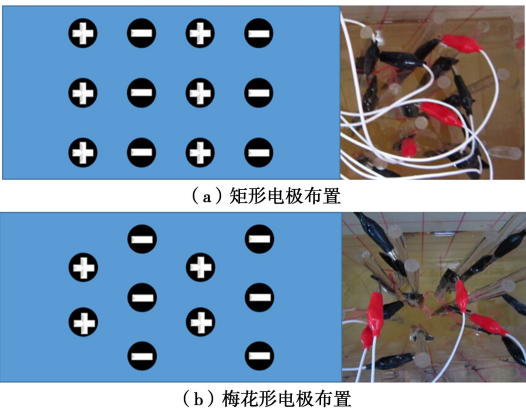


图 4 电极布置形式的试验方案

Fig. 4 Layout of electrode arrangement

表 3 电极布置型式的电解试验结果

Table 3 Results of electrode arrangement tests

试验 序号	电极间 距/cm	直流电 压/V	电极布 置形式	试验现象
C-I	5	70	矩形	两级均有的气泡冒出，其中负极多、正级少，气泡分布不均匀且产生速率较慢
C-II	5	70	梅花形	两级均源源不断地产生气泡，大量的气泡，均匀地附着在电极上且有不少气泡冒出水面

1.2 饱和砂土中的电解试验

上节中的试验是在水中进行的，因此还有必要进行水中充满砂土的电解试验，以确定在这些试验条件下模型箱中的砂土内能够产生充足的气泡。试验仍在上述模型箱（图 2）中进行，将电极贴在模型箱长度方向，按照 5 cm 的间距布置好后，用空中砂雨法进行装样，然后再通电电解，电压采用 70 V。

试验用砂取自南京河西地区长江边的场地，其颗粒级配曲线见图 5 所示，砂土的基本物理性质见表 4 所示，属于级配不良的中砂。

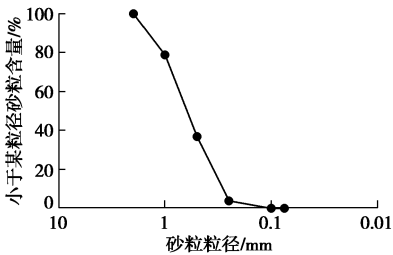


图 5 砂样的颗粒级配曲线

Fig. 5 Grain-size distribution for test sand

试验中发现，在通电的几秒钟，从透明有机玻璃箱外侧即可观察到电极附近附着大量气泡，随后在砂

土表面也可以观察到气泡生成的现象(图 6)。这说明本试验所选电解试验工况可以满足在饱和砂土中进行试验的要求。

表 4 试验用砂的参数

Table 4 Parameters of test sand

比重	$\rho_{d,max}$ /(g·cm ⁻³)	$\rho_{d,min}$ /(g·cm ⁻³)	e_{max}	e_{min}
2.65	1.652	1.397	0.897	0.604



图 6 电解饱和砂土地基产生气泡的现象
Fig. 6 Phenomena of electrolytic tests

2 电解减饱和法的振动台试验设计

根据电解水试验的结果, 确定后续试验中电极间距为 5 cm, 电解直流电压为 70 V, 电极布置形式为梅花形。为了对电解减饱和法处理可液化地基的效果进行分析, 采用小型振动台进行饱和砂土的液化试验。

试验采用河海大学土木与交通学院的小型振动台施加动力荷载, 振动台的频率范围为 5~2000 Hz, 台面尺寸为 500 mm×500 mm, 最大台面负荷为 200 kN, 额定正弦激振力为 5880 N, 最大输出加速度为 980 m/s², 最大台面位移为 51 mm。试验中采用的振动频率为 5 Hz, 水平加速度为 300g, 振动时间为 60 s。

振动台试验模型箱采用钢容器, 模型箱尺寸为: 长 55 cm, 宽 34 cm, 高 40 cm, 采用同步对比的试验方法, 在模型箱中间沿着宽度方向用胶带固定橡皮膜, 以便隔离两边试样孔隙水的相互影响, 以模拟实际场地中的柔性边界条件。在橡皮膜的一侧布置电极, 另一侧不布置电极。在橡皮膜两侧相同高度处布置动态孔隙水压力传感器, 为了避免电极通电对传感器的干扰, 传感器在水平方向距离电极 5 cm, 两侧传感器与模型箱底部的距离分别为 10 cm 和 17 cm, 共对称布置 4 个孔压传感器(图 7)。电极和传感器布置完成后, 将模型箱中充入 20 cm 深度的水, 采用空中砂雨法进行制样, 装样高度为 30 cm。装样完成后吸去砂土表

面多余的水, 并将模型箱静置 12 h 后进行振动台试验。

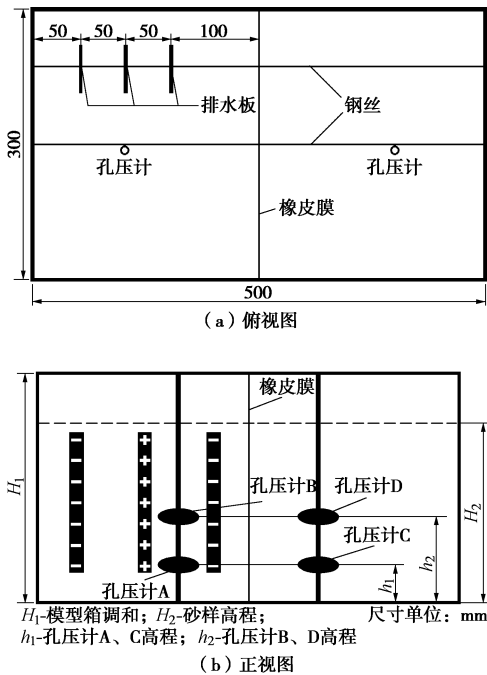


图 7 试验装置及传感器布置示意图

Fig. 7 Experimental devices and layout transducers

为了比较电极在竖直方向的布置形式对结果的影响, 试验中考虑了 3 种布置方案, 包括竖直布置、水平布置和倾斜布置(坡比为 2:1), 试验中电解与振动加载同步进行, 以模拟地震发生时电解减饱和和作业对砂土地基抗液化的效果。试验中还比较了电极倾斜布置时电解 30 min 后再静置 1 h 后进行振动试验的工况, 以模拟实际工程中提前对砂土地基进行电解减饱和和作业后遭遇地震时的情况。试验进行的工况见表 5。

表 5 振动台试验工况

Table 5 Test conditions of shaking table tests

试验序号	电极间距/cm	电压 V	电极布置形式	电极倾斜度	是否提前电解
DI	5	70	梅花形	竖直	否
DII	5	70	梅花形	水平	否
DIII	5	70	梅花形	倾斜(2:1)	否
DIV	5	70	梅花形	倾斜(2:1)	是

3.1 电极竖直布置试验结果

当加载开始时, 橡皮膜一侧布置有电极的砂土层中即开始电解, 可以明显观察到伴随振动台加载, 电极持续电解砂土层中的孔隙水, 砂土表面有不断产生的气泡冒出, 表明电解作用在持续进行。图 8 为振动过程中 4 个孔压计的超孔压时程曲线, 可以发现液化发生时由于孔压计所处高程不同, 下部孔压计 C 所能达到的最大超静孔隙水应力明显大于上部孔压计 D, 橡皮膜安放有电极的一侧布置的孔压计 A 和 B 同样反映了该规律。对比同一高度橡皮膜两侧的孔压计时, 从图中可知, 无论是下部的一组孔压计 A 和 C, 还是

上部的一组孔压计 B 和 D，试验过程中产生的最大超静孔隙水应力在安放有电极一侧略小于另一侧，但是变化幅度微小。其中上部的一组孔压计 B 和 D 由 0.60 kPa 下降到 0.55 kPa，下部的一组孔压计 A 和 C 由 1.35 kPa 下降到 1.27 kPa，分别降低了 8.88%和 6.35%。这说明竖直方向的电解作用对减小地基超孔压的发展不是十分明显，但是已经看出电解作用可以提高砂土地基的抗液化能力。

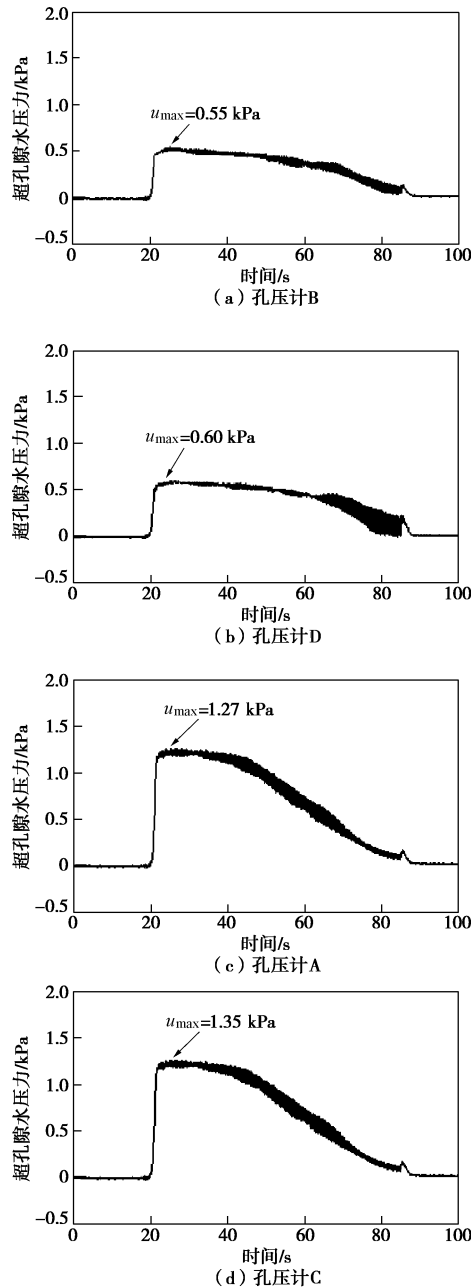


图 8 竖直电解超孔隙水压力随时间的变化曲线

Fig. 8 Time histories of readings of pore pressure gauge

3.2 电极水平布置试验结果

当加载开始时，橡皮膜布置有电极的一侧砂土层中即开始电解，图 9 为加载过程中拍摄的照片，时间分别是开始加载时、加载后 20 s、加载后 40 s 以及加载结束时。从图中可以明显观察到伴随振动台加载，

砂土表面不断有气泡冒出，表明水平布置的电极在不断地电解砂土层中的孔隙水。试验过程中的超孔压曲线见图 10 所示。比两侧上部的孔压计 B 和 D 时，可以发现安放电极一侧的孔压计 B 所测得的超静孔隙水应力明显小于未安放电极一侧的孔压计 D，其最大超静孔隙水应力从 0.71 kPa 下降到 0.53 kPa，降幅达到 25.22%。当对比两侧下部的孔压计 A 和 C 时，可知尽管安放有电极一侧的孔压计 A 测得的超静孔隙水应力小于未安放电极一侧的孔压计 C，但是变化幅度较小，其最大超静孔隙水应力从 1.31 kPa 下降到 1.22 kPa，降幅只有 7.20%，明显小于上部。

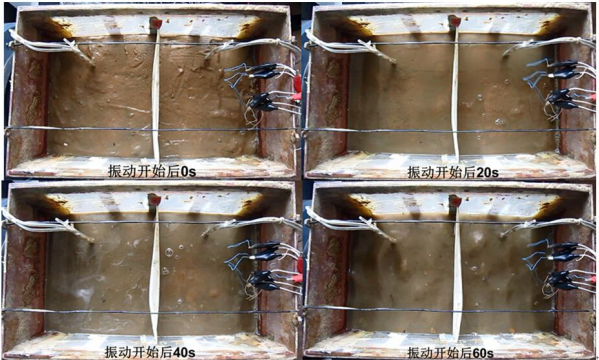


图 9 水平电解振动台加载过程

Fig. 9 The process of shaking table test

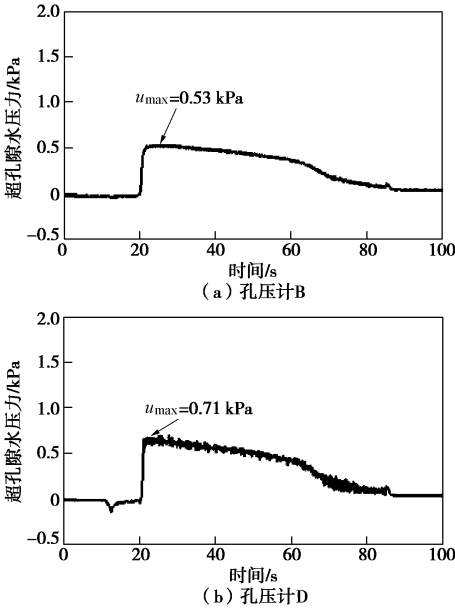


图 10 水平电解超孔隙水压力随时间的变化曲线

Fig. 10 Time histories of readings of pore pressure gauge

3.3 电极倾斜布置试验结果

图 11 为电极倾斜布置工况下 4 个孔压计在加载过程中读数的变化，从图中可以清楚地发现，无论是下部的一组孔压计 A 和 C，还是上部的一组孔压计 B 和 D，液化过程中产生的最大超级孔隙水应力在橡皮膜安放电极一侧的孔压计上度数均要小于另一侧的度数，其中最大孔隙水应力的变化幅度分别为 7.99 %和

7.21 %。此外,从橡皮膜一侧未放置电极的孔压计度数上明显可以看出在峰值超静孔隙水应力处有较大波动,而在另一侧则相对比较平稳,这样反映了电解水产生的气泡对于液化强度的削弱作用。

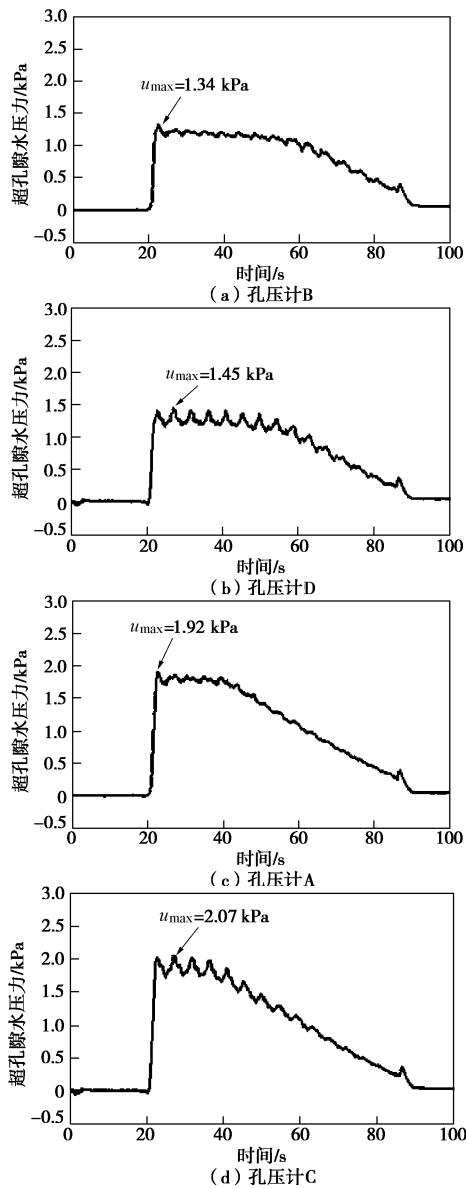


图 11 倾斜布置超孔隙水压力随时间的变化曲线

Fig. 11 Time histories of readings of pore pressure gauge

3.4 电极倾斜布置提前电解试验结果

本工况与 3.3 节中的倾斜布置方案类似,只是在试验操作过程中加入振动前对试样先电解 30 min 然后静置 1 h 再进行振动。如图 12 所示,上部的一组孔压计 B 和 D,液化过程中产生的最大超静孔隙水应力在橡皮膜安放电极一侧的孔压计上度数明显小于另一侧的度数,变化幅度达到 16.92%,超过倾斜布置时 7.99 % 的两倍,接近水平布置时降幅。而下部的一组孔压计 A 和 C 显示的最大超静孔隙水应力分别为 2.05 kPa 和 2.06 kPa,变化幅度不明显,究其原因可能是由于电解产生的气泡由底部逐渐向上移动,降低了上

部地基的饱和度,而使得下部地基的抗液化效果降低。

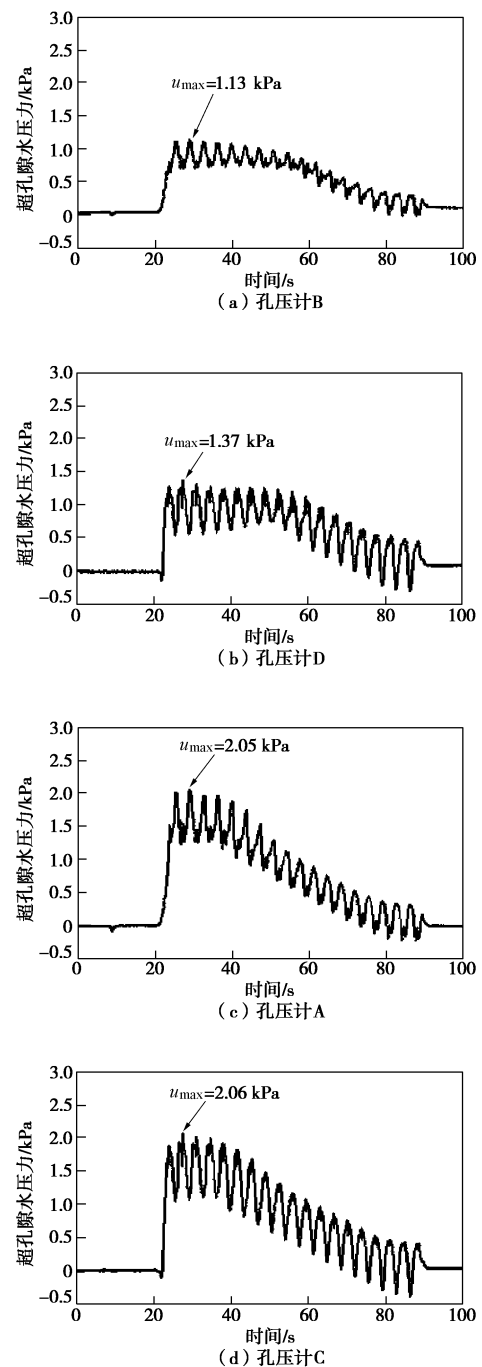


图 12 电解静置后超孔隙水压力随时间的变化曲线

Fig. 12 Time histories of readings of pore pressure gauge

3.5 对比分析

将以上 4 组振动台试验结果进行归纳整理,如表 6 所示。从表中整体上反映出电解作用对于地基液化过程中产生的超静孔隙水应力具有一定的抑制作用。根据试验工况的不同,其中电极水平布置时,从上部孔压计变化幅度的对比可以,该工况下抗液化效果最好,倾斜布置和竖直布置时由于同一高程横截面积均较小,效果最差。此外,当振动电解前先进行一段时间电解使得气泡能够布满整个砂土层,电解对于抗液

表 6 振动台试验结果

Table 6 Results of shaking table tests

试验 序号	电极 倾斜度	是否 提前电解	自由场地 最大超静孔隙水应力/kPa		电解场地 最大超静孔隙水应力/kPa		最大超静孔隙水应 力的变化幅度/%	
			上部	下部	上部	下部	上部	下部
I	竖直	否	0.60	1.35	0.55	1.27	8.88	6.35
II	水平	否	0.71	1.31	0.53	1.22	25.23	7.20
III	倾斜（坡比 2：1）	否	1.45	2.07	1.36	1.92	7.99	7.21
IV	倾斜（坡比 2：1）	是	1.37	2.06	1.13	2.05	16.92	0.24

化起到的效果也较为明显。比较下部孔压计变化幅度可知，前 3 种工况的均变化幅度较小且都小于上部的变化，这说明由于产生的气泡不断上升导致了砂土层中饱和度和降低不均匀，上部的降饱和效果显著好于下部，因此在实际工程中需要通过多布置下部电极来提高饱和度和降低后的均匀性。提前电解的试验表明，在振动之前进行电解作业可有效提高砂土地基的抗液化强度，但在实际操作时可能存在电解气泡逐渐上移的现象。

4 结 论

减饱和法进行可液化地基的处理是目前土动力学研究的新领域，国际上已经开展了一些研究工作。该方法核心思想是不改变砂土地基自身的土质条件和应力状态的情况下，利用土的气相来增强砂土的抗液化强度，降低地震时砂土液化的震害，具有重要的应用前景，但目前仍然处于初步研究阶段。本文对电解减饱和法处理可液化地基的效果进行了室内振动台试验研究，得出了以下主要结论：

（1）采用新型可导电的塑料排水板（EKG）为电极材料，分别开展了电解水和电解饱和砂土地基的模型试验，确定了电解试验应采用的参数：电极间距为 5 cm、电解电压为直流 70 V、电极布置型式为正负交错的梅花形布置。对电解饱和砂土地基中的气泡分布进行了宏观分析，证实了电解法减小砂土地基饱和度的可行性。

（2）基于室内振动台试验对电解减饱和法的抗液化效果进行了分析，结果表明电解作用可以在地基中产生明显的气泡，使得砂土地基的抗液化强度提高，地震作用时土体的超孔隙水压力相比于不电解的情况均有所降低。

（3）对比了竖向、水平和倾斜 3 种电极布置形式的抗液化效果，表明在相同条件下，水平电极布置方案振动时产生的超孔压最小，抗液化效果最好；倾斜方案次之；竖直方案抗液化效果最不明显。

（4）开展了电解后模型箱静置工况下的振动台试验，表明在振动施加之前的提前电解作用会进一步提高砂土地基的抗液化强度。由于地震的不可预见性，

在实际工程应用中，可以定期地进行地基土体的电解作业，从而提高可液化地基长期的抗液化能力。

本文对电解减饱和法的抗液化效果做了初步探索，由于试验条件所限，电解过程中砂土地基的饱和度参数暂时无法获取。目前，只是从宏观的抗液化强度角度进行了分析，下一步要着重开展地基土体饱和度和测试方法的研究。

参考文献：

[1] SHERIF M A, TSUCHIYA C, ISHIBASHI I. Saturation effects on initial soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(8): 914 - 917.

[2] CHANEY R C. Saturation effects on the cyclic strength of sands[C]// Earthquake Engineering and Soil Dynamics- Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference. Pasadena, 1978.

[3] YOSHIMI Y, TANAKA K, TOKIMATSU K. Liquefaction resistance of partially saturated sand[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(3): 157 - 162.

[4] YASUDA S, KOBAYASHI T, FUKUSHIMA Y. Effect of degree of saturation on the liquefaction strength of Masa[C]// Proceedings of 34th Japanese National Conference Geotechnical Engineering. Tokyo, 1999: 2071 - 2072.

[5] HUANG Y, TSUCHIYA H, ISHIHARA K. Estimation of partial saturation effect on liquefaction resistance of sand using P-wave velocity[C]// Proceedings of Japanese Geotechnical Society. Nerada: 1999: 431 - 434.

[6] ISHIHARA K, TSUCHIYA H, HUANG Y. Recent studies on liquefaction studied on sand-effect of saturation[C]// Proceedings of 4th International Conference on Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego, 2001: 1 - 7.

[7] 後藤茂, 社本康広. 不飽和砂の液状化抵抗の評価法(その 2)[C]// 地盤工学研究発表会発表講演集. 大阪, 2002:

- 1987 - 1988. (GOTO S, SHAMOTO Y. Evaluation method on liquefaction resistance of unsaturated sandy soil (Part2)[C]// Lectures on Geotechnical Engineering. Osaka, 2002: 1987 - 1988. (in Japanese))
- [8] GOTO S, SHAMOTO Y. Evaluation method on liquefaction resistance of unsaturated sandy soil (Part2)[C]// Proceeding of 37th Japanese National Conference of Geotechnical Engineering. Osaka, 2002: 1987 - 1988.
- [9] OKAMURA M, NOGUCHI K. Liquefaction resistances of unsaturated non-plastic silt[J]. *Soils and Foundations*, 2009, **49**(2): 221 - 229.
- [10] 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*, 2012, **139**(7): 863 - 871.
- [11] 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*, American Society of Civil Engineers, 2006, **132**(2): 258 - 264.
- [12] 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.
- [13] HE J, IVANOV V, CHU J. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(4): 267 - 275.
- [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] 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*, 2012, **139**(6): 872 - 879.
- [16] 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.
- [17] FOURIE A B, JOHNS D G, JONES C F. Dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**: 160 - 172.
- [18] 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 Geomembranes*, 2010, **28**: 181 - 190.
- [19] 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, **27**(5): 582 - 586. (HU Yu-chen, WANG Zhao, ZHUANG Yan-feng. Experimental studies on electro-osmotic consolidation of soft clay using EKG electrodes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(5): 582 - 586. (in Chinese))
- [20] 李 瑛, 龚晓南. 含盐量对软黏土电渗排水影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(8): 1254 - 1250. (LI Ying, GONG Xiao-nan. Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmotic dewatering in soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(8): 1254 - 1250. (in Chinese))