

DOI: 10.11779/CJGE201705007

电解减饱和法处理可液化地基的现场试验研究

陈育民^{1, 2}, 何森凯^{1, 2}, 方志^{1, 2}, 江强^{1, 2, 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. 江阴市人民政府重点工程建设办公室, 江苏 江阴 214400)

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, 通过电解饱和地基中的孔隙水生成气体, 达到减小地基饱和度并提高抗液化强度的目的。采用石墨毡为电极, 开展恒定电流强度下的现场电解减饱和试验研究。通过地基压缩波速试验测得电解作用下地基深部的饱和度从 98.2%减小至 94%。着重分析了地基土在电解过程中的电学特性, 试验结果表明: 等效电阻随着饱和度的减小而逐渐增大, 呈现出较好的单值函数关系; 随着电流强度的增大, 等效电阻的增长速率越高, 其电阻增幅也越快, 达到最大等效电阻所消耗的电量先逐渐增大, 然后再趋于平缓; 虽然增大电流强度会略微增加耗电量, 但是可以显著提高电解减饱和法效率。此外, 等效电阻的衰减过程可以分为快速衰减、平缓衰减和稳定 3 个阶段, 其中快速衰减阶段为停止电解 3 h 内, 等效电阻的平均衰减速率为 11 Ω/h; 由于试验场地位于河边, 电解产生的气泡易受渗流的影响, 使其难以长期维持在正负极间土层中; 然而在该阶段, 其电阻降幅也仅有 15%, 使可液化地基仍维持着较好的抗液化能力。对地基二次或多次电解, 可以大幅节省耗电量, 约为首次电解的 30%; 而且还能加快地基正负极间土层中气泡的生成量, 从而有效减小饱和度, 提高电解减饱和法效率以及地基的抗液化能力。

关键词: 减饱和法; 抗液化; 饱和砂土地基; 电解法; 现场试验; 等效电阻

中图分类号: TU472.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)05-0832-07

作者简介: 陈育民(1981-), 男, 副教授, 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: ymchenhh@163.com。

Field tests on liquefaction resistance of desaturation measure of electrolysis

CHEN Yu-min^{1,2}, HE Sen-kai^{1,2}, FANG Zhi^{1,2}, JIANG Qiang^{1,2,3}

(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. Jiangyin Construction Project Management Office, Jiangyin 214400, China)

Abstract: The electrolytic desaturation method, as an innovative mitigation of soil liquefaction, is proposed in recent years. Liquefaction resistance can be improved by the air bubbles produced by electrolysis of the pore water inside the saturated sandy foundation. Desaturation tests are carried out under the constant current intensity with graphite used as the electrodes. Based on the compression wave velocity tests, the saturation of soil in the deep foundation is found to be reduced from 98.2 % to 94 % in the process of electrolysis. By focusing on the electrical properties of the foundation soil in the process of electrolysis, some results are obtained. Firstly, the equivalent resistance gradually increases with the decrease of saturation, which shows a good single value function. Secondly, with the increase of current intensity, the equivalent resistance of the growth rate is higher, and the resistance increases more quickly, meanwhile to achieve that the maximum power consumption of equivalent resistance increases gradually, and then tends to be gentle. During the process, a slight increase in power consumption caused by the increase of current intensity is balanced by significant improvement of the efficiency of desaturation measure of electrolysis. In addition, the attenuation process of equivalent resistance can be divided into 3 stages: rapid attenuation, smooth attenuation and stability. 3 h after cessation electrolysis is the rapid attenuation phase, and the equivalent resistance of the average decay rate is 11 Ω/h. Even though it is difficult to maintain bubbles between the electrodes in the long term due to seepage factor resulted from river test site, 15% drop of electric resistance in the rapid attenuation stage indicates that the liquefiable foundation can still maintain good liquefaction resistance. Then it can significantly save lots of power consumption by electrolyzing

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(51420105013); 河海大学中央高校基本科研业务费项目(2015B17314)

收稿日期: 2016-01-31

the liquefiable foundation twice or more times, which is about 30% of the first electrolysis. Furthermore, it can also accelerate the generation of bubbles between the positive and negative poles in the foundation soil. Thus, it can effectively reduce the saturation, and improve the efficiency of desaturation measure of electrolysis and the liquefaction resistance.

Key words: desaturation method; liquefaction resistance; saturated sandy foundation; electrolysis method; field test; equivalent resistance

0 引言

历次大地震发生时, 都会使饱和砂土地基发生大面积液化, 从而引起喷砂冒水、房屋倒塌、道路破坏以及建筑物下沉等现象发生, 给人们带来惨痛的灾难, 更给国家造成巨大的经济损失。例如在云南 1970 年通海发生的 7.7 级大地震, 引起大面积砂土地基发生液化, 致使大量建筑物桩基础遭到破坏, 使受灾面积达到 4500 多平方公里, 造成约 1.6 万人死亡, 3.2 万人受伤以及 34 万间房屋倒塌。

针对砂土地基液化问题, 目前常用的抗液化方法主要有密封法(阻止孔隙水的排出)、挤密法(强夯法^[1])、砂桩法(增加标准贯入击数, 提高抗剪能力, 即抗液化能力)、排水法(碎石桩或紧密砂桩排水^[2], 在日本应用较多)、刚性桩法^[3](直接支撑上部结构荷载, 如旋喷桩^[4]、搅拌桩^[5])、固化法(如固化土^[6]), 限制变形法(如在填土时铺设水平土工格栅^[7])等。然而这些抗液化措施均存在一些缺点: ①处理费用过于昂贵, 无法普及使用; ②在大面积液化场地中应用仍然受到限制。

因此, 为了寻求经济且有效的抗液化方法, 近年来有学者提出了减饱和法, 通过外部干预, 将原本饱和的可液化砂土的饱和度减小, 从而提高砂土地基的抗液化强度。Okamura 等^[8-9]提出了物理充气法, 通过充气泵或挤密砂桩将空气注入到砂土地基中, 在注射点附近排出孔隙水, 形成有效的减饱和区域; Eseller-Bayat 等^[10-11]提出了化学气泡法, 通过化学物质一水过硼酸钠($\text{NaBO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)在砂土中反应生成双氧水(H_2O_2), 然后双氧水将分解产生氧气, 达到减小砂土饱和度的目的, 并可以通过所加化学物质的量来控制砂土饱和度; He 等^[12-14]提出了生物气泡法, 利用微生物的反硝化作用, 使其在砂土地基中生成微小且稳定的 N_2 气泡, 从而减小砂土地基的饱和度。

Yegian^[15]提出电解法, 采用矩形网状钛金属作为电极, 进行电解减饱和法的振动台试验, 通过电解 H_2O 生成稳定环保的 H_2 和 O_2 , 从而有效减小砂土饱和度。陈育民等^[16]、何森凯等^[17]用可导电的塑料排水板(EKG)为电极, 开展了电解减饱和法处理可液化地基的振动台试验和电学特性分析, 验证了电解法降低砂土地基饱和度的可行性并且确定了等效电阻是评

价砂土减饱和状态的有效指标。但是目前尚无针对电解法处理可液化地基的现场研究。

本文结合江阴市某中学教学楼工程, 分别在试验桩周围埋设电极和加速度计进行现场试验, 对电解减饱和法处理可液化砂土地基的电学特性作进一步分析。

1 工程概况

江阴市某中学新校区位于江阴市南街南侧, 环城南路北侧, 环城西路东侧, 由 3 幢教学楼(4 层)、1 幢专业教室、行政办公楼(6 层)和一幢食堂、体育馆(3 层)组成, 属于典型长江中下游软土地区, 地貌单一, 地势稍有起伏, 分布着大量粉质黏土和粉土。根据现场地质资料(图 1, 2), 该地基处 6 号层为灰黄色湿状粉土, 天然含水率高, 饱和度高, 压缩性高, 强度低, 土质较差, 其局部夹粉砂, 层厚为 3.1 m。由于该校区位于河畔, 使土层的饱和度较高。因此, 若发生大地震, 则该校区容易发生粉土液化, 造成严重的危害, 所以为了避免该现象发生, 需要对其进行经济且有效的抗液化处理。根据现场施工状况及电解减饱和法所需条件, 选用新校区南部教学楼 17 剖面 127 处[#]769 桩点位置, 进行电解减饱和法处理可液化地基的现场试验。



图 1 现场试验平面图

Fig. 1 Geological map of test field

2 试验方案

2.1 试验材料和仪器布置

试验采用的电极材料为石墨毡, 其宽度为 40 mm, 厚度为 3 mm, 长度为 5000 mm, 可以长期运用于电

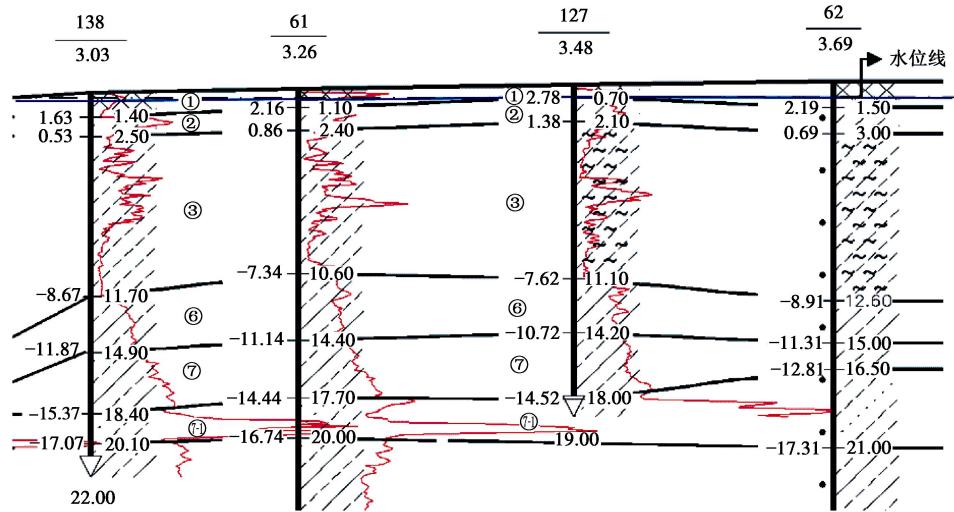


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological profile

解减饱和法处理的可液化地基土层中，并能保证良好的导电性。其布置方式为一字型，距离两桩承台中心 0.6 m 处成两个孔，将正负极分别布置在孔中。两孔连线与两桩承台中两桩走向相互垂直，且电极间距为 1.2 m（图 3），埋设深度为地下 10~15 m。然后通过绝缘导线将电极引出地表，与大功率可编程直流电源连接。



图 3 现场试验的电极布置

Fig. 3 Electrodes in field tests

试验仪器的埋设位置：①距离正极中心 0.1 m 处，沿着电极的长度方向，分别在深度 10.0, 11.2, 12.4 m 处各埋设一个加速度传感器；②负极处仪器的布置形式和正极一致，具体布置见图 4。

2.2 试验内容

本文以恒定电流强度进行电解减饱和试验，在电解过程中连续记录不同时刻地基土的等效电阻值。同时为了更好地研究地基土在电解过程中的电学特性，试验采用不同电流强度进行分析，分别为工况 I 电流为 1.5 A, 工况 II 电流为 2.0 A 和工况 III 电流为 2.5 A。本文着重分析了电解减饱和过程中首次通电时等效电阻的增长规律、断电后等效电阻的衰减规律以及二次通电后等效电阻的增长趋势。

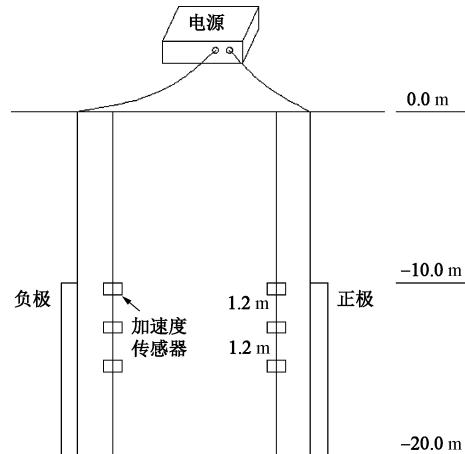


图 4 现场试验仪器剖面布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of instruments

3 试验结果与分析

3.1 压缩波速与饱和度的关系

图 5 为压缩波速和饱和度的变化关系曲线，对比分析了 Yang 等^[18]和 Hatanka 等^[19]试验所得的压缩波速和饱和度的关系，此次现场试验的压缩波是通过吊机将 3 t 重的夯锤提升 3 m 的高度，让其自由落地敲击地表所产生，然后通过竖向等间距布置的加速度传感器测得相应的波速值。

通过压缩波速的测试试验，可以得知地基的压缩波速值在电解减饱和试验前为 1150 m/s，在电解减饱和过程中，压缩波速值逐渐减小为 800, 650 m/s，电解试验结束后为 530 m/s。根据压缩波速和饱和度的变化关系曲线（图 5），可以计算出地基土初始状态下的饱和度为 98.2%；然后随着电解试验的进行，饱和度逐渐下降至 94%。从图中还可得知，现场试验所得的

压缩波速与饱和度的关系与国外学者研究所得的趋势基本一致, 呈现出明显的单值函数关系。

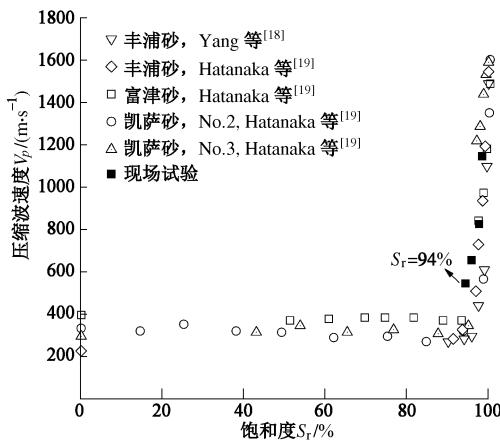


图 5 压缩波速度与饱和度的关系

Fig. 5 Relation between compression wave and saturation

3.2 等效电阻与饱和度的关系

地基土的等效电阻通过绝缘导线将正负极分别引出地表, 然后与大功率可编程直流电源连接, 进行电解减饱和试验。试验过程中的等效电阻并不是通过计算得到, 而是用万用表直接量测正负极间的电阻所获得。图 6 为电解过程中等效电阻和饱和度的变化关系曲线。从图 6 中可知: 现场电解减饱和试验所得的电阻与饱和度的关系和模型试验所得的整体变化趋势基本保持一致, 尤其是模型试验采用较大电流强度时。即地基土的等效电阻随着饱和度的减小而逐渐增大, 呈现出较好的单值函数关系。并且, 使用等效电阻表征地基土的减饱和状态不存在波速法的局限性。该指标在饱和度小于 94 % 时, 仍具备良好的灵敏性; 同时在试验中也可以轻松测得, 并且还适用于各类模型试验以及具备更好的经济性能, 便于在工程中应用。需要指出的是: 由于现场土质较为复杂并且试验条件有限, 因此在高饱和状态时所得的电学特性与室内模型试验的结果有所区别, 需要今后进一步深入研究。

3.3 地基的电学特性

(1) 首次电解时等效电阻的增长规律

图 7 为电解减饱和法现场试验中的电阻响应曲线。从图 7 中可以得出: 首次电解时, 在电解减饱和过程中, 随着电解产生的气泡越来越多, 逐渐改变了地基土的三相体系, 使其导电性降低, 等效电阻逐渐增大。现场电解减饱和法试验采用 3 种电流强度工况进行, 分别为 1.5, 2.0, 2.5 A。相比较于电流强度 I 为 1.5, 2.0 A 的试验结果, 当电流强度增大到 2.5 A 时, 等效电阻的增长速率最快, 最高峰值可以达到 $0.55 \Omega/\text{min}$, 其远大于另外两种工况下的电阻增长最快速

率 $0.35, 0.25 \Omega/\text{min}$ 。而且, 地基土等效电阻的增长幅度也随着电流强度的增大而增大。当电流强度增大到 2.5 A 时, 其等效电阻的增幅最先达到峰值 133 %, 即电解减饱和效果越好。

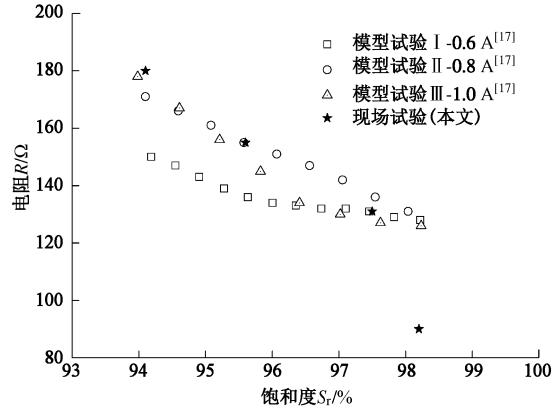


图 6 等效电阻和饱和度的关系

Fig. 6 Relation between electrical resistance and saturation

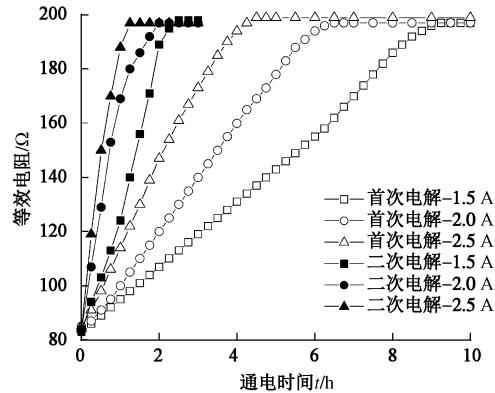


图 7 电阻和通电时间的关系

Fig. 7 Relation between electrical resistance and time

图 8 为各工况达到最大等效电阻时所需耗电量和通电时间的关系。从图 8 中可以看出: 首次电解时, 随着电流强度的增大, 达到最大等效电阻所消耗的电量也逐渐增大, 由 $4.0 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 增大到 $5.1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 再增加至 $5.3 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。虽然增大电流强度会导致耗电量增加, 但是可以显著提高电解减饱和法的效率, 达到最大等效电阻所需的时间明显缩短, 由 9.5 h 减小到 6.8 h 再减小至 4.5 h 。而且, 随着电流强度的增大, 电流对达到最大等效电阻时所消耗电量的影响也逐渐减弱。因此, 适当提高电流强度, 可以显著提高电解减饱和法的效率, 也能保证良好的经济效益。

(2) 断电后等效电阻的衰减规律

图 9 为等效电阻和通电时间的衰减变化关系曲线。从图中可以得出: 对可液化地基停止通电后, 地基土的等效电阻在峰值维持一段时间后, 会随着时间的推移而逐渐衰减。等效电阻的衰减过程可以分为 3

个阶段：快速衰减阶段、平缓衰减阶段和稳定阶段。再结合图 10 等效电阻降幅和通电时间的关系，可以进一步得知：①快速衰减阶段为断电时间 0~3 h 内，等效电阻的平均衰减速率为 $11 \Omega/h$ 。孔隙中气泡在该阶段容易受到地下水或者周边水流的影响，使其难以长期维持在电极周边。因此，土颗粒孔隙中的气泡会发生部分扩散现象，导致等效电阻减小。然而在断电时间为 3 h 时，其降幅也仅为峰值等效电阻的 15%，可液化地基仍维持着较好的抗液化能力。②平缓衰减阶段为断电时间 3~24 h 内，等效电阻的平均衰减速率为 $2.2 \Omega/h$ 。气泡在该阶段收到地下水或者水流的影响已经减弱，逐渐停止扩散，稳定在电极周边的地基土中。③稳定阶段为断电时间 24 h 之后，气泡在该阶段已经停止扩散，有效保存在电极周边的地基土孔隙中。

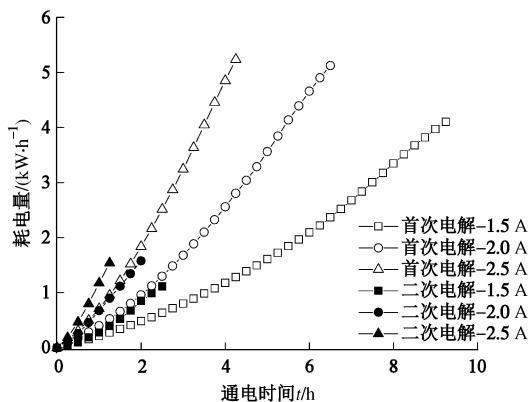


图 8 耗电量和通电时间的关系

Fig. 8 Relation between power consumption and time

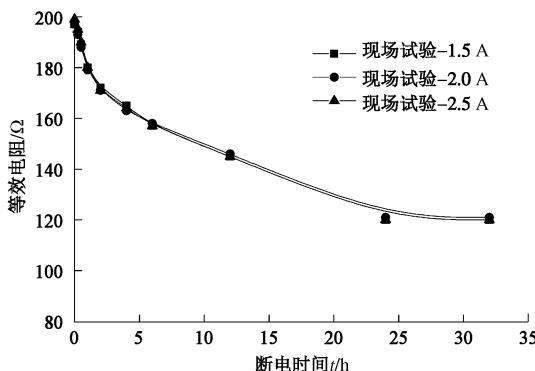


图 9 电阻和通电时间的衰减关系

Fig. 9 Attenuation relation between electrical resistance and time

(3) 二次电解时等效电阻的增长规律

a) 电阻和通电时间的关系

断电后地基土的等效电阻衰减结束后再次通电，分别采用 3 种不同电流强度对地基土进行稳流模式电解。从图 7 可以明显得出：在工况 I 电流强度为 1.5 A 稳流模式下电解时，首次电解试验中的等效电阻平均

增长速率仅为 $0.22 \Omega/min$ ，需要电解 550 min 才能达到 134% 的增幅；而二次电解试验中的电阻平均增长速率达到 $0.86 \Omega/min$ ，只需要电解 140 min 就可以达到同样的增幅，其电解效率约为第一次时的 4 倍。而且在其余 2 种工况下，地基土的等效电阻增长速率也明显比首次电解时更快。

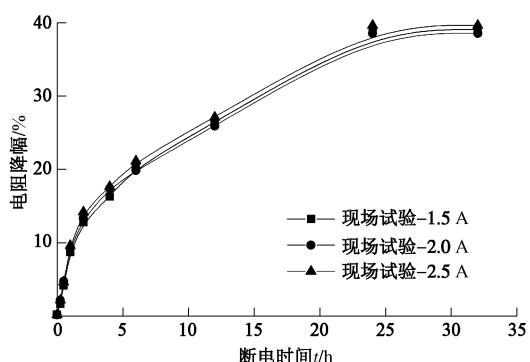


图 10 电阻降幅和通电时间的关系

Fig. 10 Relation between decrease of electrical resistance and time

b) 耗电量和通电时间的关系

图 8 为达到最大等效电阻时耗电量随时间的增长关系曲线。从图中可知：在各工况下，耗电量与通电时间均呈现出较好的线性关系。其中首次电解试验采用工况 I 电流强度为 1.5 A 进行电解时，达到最大等效电阻所消耗电量为 $4.0 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ，而在二次电解试验中采用相同的工况只需要消耗 $1.2 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 电量，其耗电量只有首次电解的 30%。此外，其达到最大等效电阻的时间也明显缩短。所以二次电解地基土不仅可以节约能源，还能提高电解减饱和法的效率。

c) 等效电阻和耗电量的关系

图 11 为等效电阻与耗电量的变化关系曲线。从图中可知：等效电阻随着耗电量的增大而逐渐增大，然后趋于平缓。当电流强度小于 2.0 A 时，随着电流强度的增大，达到最大等效电阻所消耗的电量也越大；当电流强度大于 2.0 A 时，达到最大等效电阻所消耗的电量与电流强度无关。即随着电流强度的增大，达到最大等效电阻所消耗的电量逐渐趋于一致。因此，在实际工程中的应用电解减饱和法时可以适当增大电流强度，从而提高电解减饱和法的效率。

之所以第二次通电电解可液化地基时可以明显提高等效电阻的增长速率，是因为地基土内的气泡虽然受到周边水流的影响而有所扩散，但是其扩散幅度有限，仍然有大部分气泡维持在电极周边土的孔隙中。同时在电解作用下，孔隙水会逐渐向阴极流动。因此，可以通过二次或者多次电解地基，使残留在电极周边的气泡重新取代土颗粒孔隙中的自由水，从而加快地

基正负极间土层中气泡的生成量。

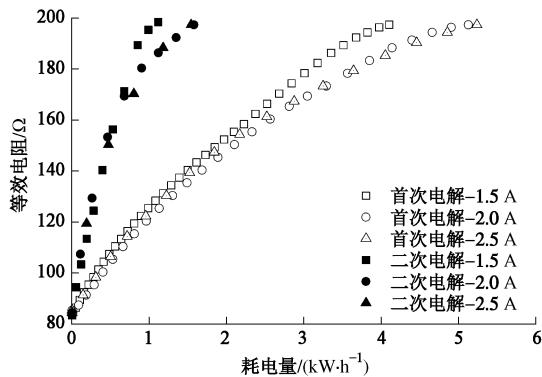


图 11 等效电阻和耗电量的关系(对比)

Fig. 11 Relation between equivalent electrical resistance and power consumption

4 结 论

电解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可液化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现场试验研究, 得出了以下 4 点结论。

(1) 在电解减饱和过程中, 随着电解产生的气泡越来越多, 逐渐改变了地基土的三相体系, 使其导电性降低, 等效电阻逐渐增大。随着电流强度的增大, 等效电阻的增长速率越高, 其增长幅度也越大。当电流强度增大到 2.5 A 时, 等效电阻增长速率的最高峰值可以达到 $0.55 \Omega/\text{min}$, 其远大于另外两种工况下的最快增长速率 $0.35, 0.25 \Omega/\text{min}$ 。同时, 等效电阻的增幅最先达到峰值 133%, 即电解减饱和效果越好。

(2) 随着电流强度的增大, 达到最大等效电阻所消耗的电量先逐渐增大, 然后趋于平缓。虽然增大电流强度会略微增加耗电量, 但可以显著提高电解减饱和法效率。

(3) 等效电阻的衰减过程可以分为 3 个阶段: ①快速衰减阶段在断电时间 0~3 h 内, 等效电阻的平均衰减速率为 $11 \Omega/\text{h}$, 气泡容易受到地下水或周边水流的影响, 使其难以长期维持在正负极间土层, 然而在快速衰减阶段, 电阻降幅也仅有 15%, 使可液化地基仍维持着较好的抗液化能力; ②平缓衰减阶段为断电时间 3~24 h 内, 等效电阻的平均衰减速率为 $2.2 \Omega/\text{h}$, 气泡在该阶段逐渐停止扩散, 稳定在正负极土层中; ③稳定阶段为断电时间 24 h 后, 气泡在该阶段

已经停止扩散, 有效保存在正负极间土层孔隙中。

(4) 对地基二次或多次电解, 可以大幅节省耗电量, 其达到最大等效电阻时耗电量约为首次电解的 30%; 并且, 达到最大等效电阻的时间也明显缩短。此外, 还能够加快地基正负极间土层中气泡的生成量, 从而有效减小饱和度, 提高电解减饱和法效率以及地基的抗液化能力。

本文对电解减饱和法的抗液化效果做了初步的现场试验研究, 由于试验条件所限, 无法在复杂场地运用该方法处理可液化地基土。目前, 只是从饱和度和耗电量角度分析电学特性, 下一步要着重研究孔隙水电阻率和孔隙率等因素对等效电阻关系的影响。

参 考 文 献:

- [1] 李万花, 郭小花, 李小林, 等. 青海 4·14 玉树地震地质作用对地质环境影响分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 685~696. (LI Wan-hua, GUO Xiao-hua, LI Xiao-lin, et al. Effects of 4·14 Yushu earthquake in Qinghai on geological environment[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(5): 685~696. (in Chinese))
- [2] 黄茂松, 陈云敏, 吴世明. 振冲碎石桩加固饱和粉砂粉土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 69~73. (HUANG Mao-song, CHEN Yun-min, WU Shi-ming. Experimental study on silt sand soil saturated gravel pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 69~73. (in Chinese))
- [3] 刘汉龙. 岩土工程技术创新方法与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 34~58. (LIU Han-long. Technology innovation and practice of geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 34~58. (in Chinese))
- [4] 周江平, 彭雄志, 赵善锐. 高水力坡降下砂层地基中高压旋喷桩的成桩效果及机理[J]. 勘察科学技术, 2003(5): 3~6. (ZHOU Jiang-ping, PENG Xiong-zhi, ZHAO Shan-rui. Mechanism and drilling of jet grouting pile for sand foundation under high seepage pressure[J]. Site Investigation Science and Technology, 2003(5): 3~6. (in Chinese))
- [5] 朱志铎, 刘松玉, 席培胜, 等. 钉形水泥土双向搅拌桩加固软土地基的效果分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2063~2067. (ZHU Zhi-duo, LIU Song-yu, XI Pei-sheng, et al. Analysis of effect of T-shaped bidirectional soil-cement deep mixing columns reinforcing soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2063~2067. (in Chinese))
- [6] 宁建国, 黄 新. 固化土结构形成及强度增长机理试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1): 97~102. (NING

- Jian-guo, HUANG Xin. Experiment on structural formation and mechanism of strength increasing of stabilized soil[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, **32**(1): 97 – 102. (in Chinese))
- [7] OKAMURA M, TERAOKA T. Shaking table tests to investigate soil desaturation as a liquefaction countermeasure[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2006, **145**: 282 – 293.
- [8] 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.
- [9] OKAMURA M, TAKEBAYASHI M, NISHIDA K. 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**(7): 643 – 652.
- [10] ESELLER-BAYAT E, ASCE M, YEGIAN M K. Liquefaction response of partially saturated sands I: experimental results[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(6): 863 – 871.
- [11] ESELLER-BAYAT E, ASCE M, YEGIAN M K. Liquefaction response of partially saturated sands II: empirical model[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(6): 872 – 879.
- [12] HE J, IVANOV V, CHU J. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(4): 267 – 275.
- [13] HE J, CHU J, IVANOV V. Remediation of liquefaction potential of sand using the biogas method[C]// *Geo-Congress*, 2013: 879 – 887.
- [14] HE J, CHU J. Undrained responses of microbially desaturated sand under monotonic loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014(2012): 1 – 8.
- [15] YEGIAN M K. Induced-partial saturation for liquefaction mitigation: experimental investigation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(4): 372 – 380.
- [16] 陈育民, 何森凯, 吴海清, 等. 电解减饱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))
- [17] 何森凯, 陈育民, 方志. 可液化地基电解减饱和法处理的电学特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(8): 1834 – 1441. (HE Sen-kai, CHEN Yu-min, FANG Zhi. Analysis of electrical characteristics of the electrolytic desaturation method for the liquefiable foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(8): 1834 – 1441. (in Chinese))
- [18] 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.
- [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.