

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230824002

# 隧道工程中电解减饱和处理的振动台试验研究\*

刘建华

(中铁十八局集团第五工程有限公司,天津 300459)

**摘要:** 隧道工程由于跨度较长,通常受到地震液化灾害的威胁。研究人员根据降低地基饱和度提高抗液化强度的原理提出了电解减饱和法。针对深厚可液化砂土层地基的明挖隧道工程,开展了电解减饱和法加固明挖隧道的振动台模型试验,对隧道周边土体加速度、孔压变化及隧道上浮位移进行了监测。试验结果表明,电解减饱和法具有良好的抗液化加固效果,可以有效地抑制隧道结构的上浮;孔压的变化是影响液化发生的关键要素,饱和砂土经电解作用后其超静孔压的降低十分显著,相较未处理工况,两组电解工况的超静孔压峰值最大降幅分别达到了68.1%和70.3%;最大降幅发生的位置均位于隧道模型底部,且正负电极的排布对减饱和和抗液化效果有一定的影响;两电解工况中隧道模型的最大上浮位移量均比未电解工况有所减小,且减小幅度都超过35%。研究表明电解减饱和法对液化地基中隧道工程的上浮变形有着良好的控制作用。

**关键词:** 隧道工程; 电解减饱和法; 振动台试验; 超静孔压; 上浮变形

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0468-09

## Study on Shaking Table Tests of Electrolytic Desaturation Treatment for Tunnel Engineering

LIU Jianhua

(China Railway 18th Bureau Group the 5th Engineering Co., Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** Tunnel engineering projects are particularly vulnerable to seismic liquefaction hazards due to their long spans. In this study, researchers propose an electrolytic desaturation method based on the principle that reducing foundation saturation improves liquefaction resistance. For cut-and-cover tunnel projects in deep liquefiable sandy soil foundations, shaking table model tests were conducted to evaluate the reinforcement performance of the electrolytic desaturation method. Additionally, the soil acceleration around the tunnel, pore pressure variation, and tunnel uplift displacement were monitored. The test results showed that the electrolytic desaturation method provided excellent anti-liquefaction reinforcement performance, significantly restraining the uplift of tunnel structures. Pore pressure variation was the key factor affecting liquefaction occurrence. After the electrolysis of saturated sandy soils, a significant reduction in excess pore pressure was observed. Compared with the untreated condition, two conditions with different electrolytic treatments achieved maximum reductions of 68.1% and 70.3% in peak excess pore pressure. The positions of maximum reductions were all located at the bottom of the tunnel model, and the anode-cathode arrangement had a certain effect on both desaturation

\* 收稿日期:2023-08-24;修回日期:2023-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(52179101,51679072)资助

作者简介:刘建华(1984—),男,高级工程师。主要从事土木工程施工技术研究。E-mail:23837366@qq.com

efficiency and anti-liquefaction performance. Both electrolytic treatments reduced the maximum uplift displacement of the tunnel model compared to the untreated condition, with reduction amplitudes exceeding 35%. The research findings demonstrate that the electrolytic desaturation method effectively controls the uplift deformation of tunnel structures in liquefiable foundations.

**Keywords:** tunnel engineering; electrolytic desaturation method; shaking table test; excess pore pressure; uplift deformation

## 0 引言

地震的发生往往会给人类的生命财产安全造成巨大的损失,经过多方面调查发现:地震所导致的土体液化是造成该损失的重要原因,约有50%的次生灾害是由于土体液化造成的<sup>[1-2]</sup>。所谓土体液化,就是饱和土体在振动作用下丧失强度和刚度而由固态转化为液态的一种现象<sup>[3-5]</sup>。地震液化会导致地下隧道产生上浮位移<sup>[6-7]</sup>,而造成地下构筑物的破坏,因此提高土体的抗液化能力是解决该类问题的重要措施。

减饱和方法能够有效提高土体的抗液化能力,其中减饱和法最核心的问题就是如何将气体引入地基,而在目前已有的几种减饱和方法中,电解法在此方面具有一定的优势,电解法可直接在土体内部生成气体并扩散,不需要施加任何高压压入,不需要消耗大量的物材,施工简单,对土体扰动较小,经济效益较高。这种运用电解法在地基中产生气体来降低砂土地基饱和度的思路最早是由M.K. Yegian等<sup>[8]</sup>于2006年提出的,其在特制的液化模型盒中进行电解试验,盒内土体经电解反应产生稳定的 $H_2$ 和 $O_2$ ,然后通过对减饱和和试样进行振动台试验,发现饱和度只要降低3%,地基的超孔隙压力就会显著减小,可以极大地降低液化的可能性。电解完成后再长期监测饱和度的变化,发现电解停止442 d后,饱和度仅从82.9%增加到83.9%,表明电解法产生的气体可长期稳定的存在于地基中。后来陈育民等<sup>[9-11]</sup>进行了多项电解减饱和法的试验研究、数值模拟及理论分析,引入新的研究思路与新型材料,分别针对液化地基各种特性、电阻率变化规律、饱和度变化规律、生成气体扩散规律等多个方面进行了更加深入地研究。

在电解减饱和法中土工合成材料EKG作为一种新型的排水材料和电极材料得到了较多的应用。

A. Fourie等<sup>[12-13]</sup>采用EKG进行了矿山尾矿原位脱水的试验,发现了EKG电渗脱水功能,且不会出现电极腐蚀的问题。之后,胡俞晨等<sup>[14]</sup>采用EKG材料进行软土地基电渗试验,对电渗前后土体含水率、抗剪强度等指标进行对比,发现电渗处理后土样的含水率下降,产生了显著的沉降,且靠近表面的土样电渗效果优于底部。沈扬等<sup>[15]</sup>采用EKG电极分别验证了电渗法、真空预压法、真空-电渗法作用下的排水效果,结果表明真空-电渗法处理后的排水量最大,沉降更明显。

然而目前将电解减饱和法应用于明挖隧道工程的研究尚未开展,由于土层条件、隧道形式、施工情况不同,其减饱和和作用效果和作用机理需要进一步探究。因此,本文基于电解减饱和法处理可液化地基的基本理论,利用EKG材料为电极,开展了明挖隧道工程中电解减饱和法处理效果的振动台模型试验,探究电解减饱和和抗液化措施对抑制隧道工程在地震时发生上浮变形的作用,并对其加固效果进行有效分析。

## 1 工程背景与试验方案

### 1.1 工程背景

本文依托安徽省亳州市汤王大道过河隧道工程,隧道工程的起点位于汤王大道与和平路交叉口,终点位于在建古泉路,路线全长约1 345 m,隧道段长1 241 m,其中暗埋段长882 m,水下段长约500 m。隧道工程的工程地质断面如图1所示。由该图可见,隧道所穿地层多为富水砂层和软土,属抗震不利地段,液化风险高。根据项目工程地质报告结合地层揭露情况综合分析确定:K0+715~K0+820段第③层粉土可能液化;K0+175~K0+715段第④层细砂可能液化;第⑤层细砂层可能液化。综上所述,针对该项目开展过河隧道地震液化上浮方面的研究具有重要的科学意义和现实价值。

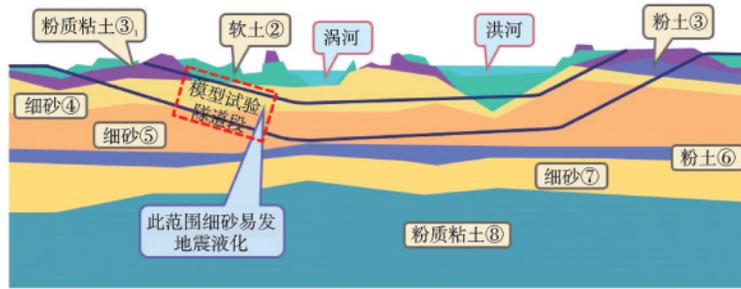


图1 隧道工程地质断面

Fig.1 Geological cross-section of tunnel project

## 1.2 试验材料和设备

试验采用迪派大功率可编程直流稳压电源,其可输出电压为0~500 V,可输出电流0~4.8 A,最大输入功率2 400 W。试验采用EKG可导电塑料排水板作为电极材料,EKG电极材料除了板芯处的铜导线可以导电外,整个塑料板都可以导电。且因表面做了条形纹路处理,其与饱和土体中水的接触面积较大,利于电解发生。试验过程中考虑到模型剪切箱的尺寸,采取合理的相似设计,将EKG电极板制成长30 cm、宽5 cm的电极,使用时通过长导线与电极板中的导线连接。

试验所用砂样为从亳州市汤王大道过河隧道工程现场所取得的典型砂,即细砂④和细砂⑤,是该隧道工程穿越的主要砂层。细砂④天然密度为1.89~1.96 g/cm<sup>3</sup>,比重为2.65~2.66,孔隙比为0.730~0.850;细砂⑤天然密度为1.95~2.01 g/cm<sup>3</sup>,比重为2.65~2.66,孔隙比为0.650~0.730。

## 1.3 工况设计

为了验证电解减饱和和法抗液化措施对抑制隧道工程上浮变形的有效性,分析地基加固效果,同时为了进一步探究更高效合理的电解方案,也为了避免单一试验工况容易出现误差和偶然性,在此设计了两组电解工况(表1),分别为工况ET1和工况ET2。

如图2、图3所示,隧道模型的布置方案设置为

表1 试验工况设计

Table 1 Design of test conditions

工况编号	电极布置方式
RT	无
ET1	正、负两极分布在隧道走向两侧
ET2	正、负两极在隧道走向同侧交错布置

振动台激振方向垂直于隧道走向;在隧道模型内固定一个加速度传感器(A2)以测定振动时隧道结构模型的实际振动加速度响应,与周围土体振动加速度进行对比;在隧道顶部和底部各固定设置一个孔压传感器(P2、P3),以测定隧道模型顶部和底部的土体在受到振动荷载作用时的超静孔压和超静孔压差;另外在隧道上部土体和隧道下部土体分别埋置两层加速度和孔压传感器(A1、P1和A3、P4)以进行土体液化的判别与对比,并与隧道周边土体的加速度和孔压响应形成对比;位移传感器固定在振动台台面正上方的固定支架上,其拉线端固定在隧道模型上。

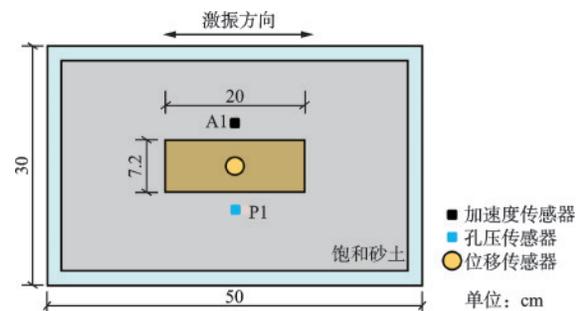


图2 试验布置方案平面

Fig.2 Plan view of test layout scheme

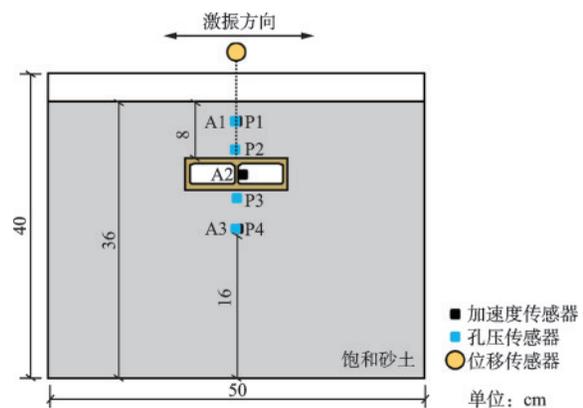


图3 试验布置方案前视

Fig.3 Front view of test layout scheme

工况 ET1 设置为隧道走向垂直于振动台激振方向。布置两组电极,并将其倾斜布置于隧道走向的两侧,电极倾角设计为  $50^\circ$ ,因 EKG 电极本身可弯曲,具有较高柔性,所以在此可以忽略电极刚度对试验结果的影响。传感器的布置方式同工况 RT,具体方案如图 4、图 5 所示。工况 ET2 的模型布置方式、传感器布置方式与上述工况相同,只有电极布置不同:由工况 ET1 中正、负两极分布在隧道走向两侧布置改为正、负两极在隧道走向同侧交错布置,这样使得电极的正负两极间距缩短,电阻率降低。

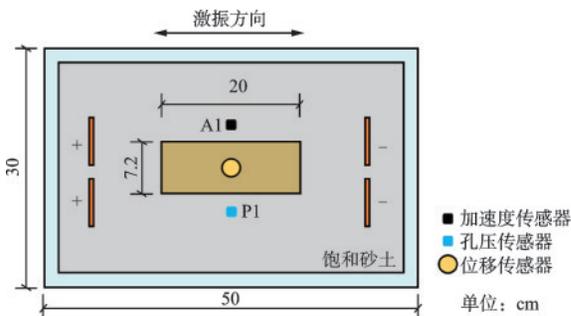


图 4 试验工况 ET1 平面

Fig.4 Plan view of test condition ET1

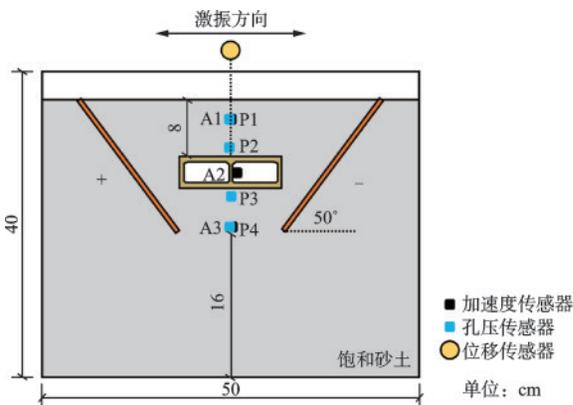


图 5 试验工况 ET1 前视

Fig.5 Front view of test condition ET1

#### 1.4 试验过程

为了确定有效的试验方案,在进行振动台模型箱内的电解试验之前,通过小型的电解水试验,获得高效的通电参数。

利用空中砂雨法将砂样装填好并静置 12 h 后,开始对 EKG 电极板进行通电,对饱和土体进行恒压电解。根据小型电解水试验结论,将供电电压设置为 80 V,通电时间设置为 4 h。在两个电解工况的

试验中,电解时电极露出部分的周边均有明显的源源不断的气泡冒出。并且通过观察对比,在工况 ET1 试验时发现,负极周边冒出气泡量要大于正极;而进行工况 ET2 试验时发现,总体上各个电极周边气泡冒出量与冒出速率等都要大于工况 ET1,电解反应更加显著,而与 ET1 相同的是负极周边冒出气泡量要大于正极周边,如图 6、图 7 所示。

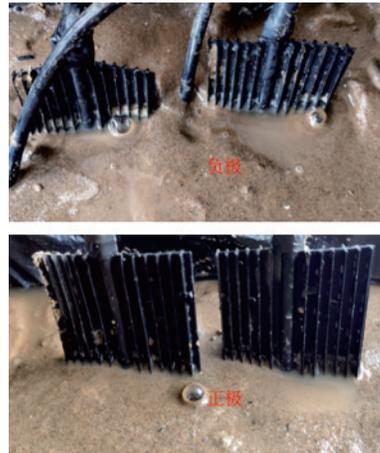


图 6 工况 ET1 负极、正极周边冒泡情况

Fig.6 Bubbles around anode and cathode in condition ET1

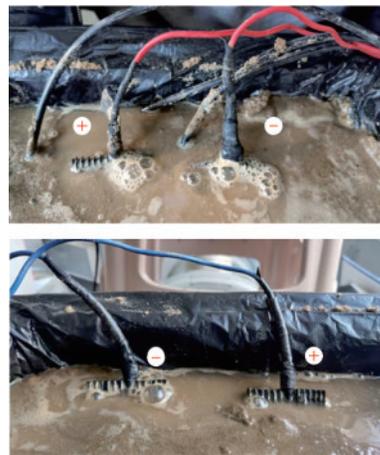


图 7 工况 ET2 电极周边冒泡情况

Fig.7 Bubbles around electrodes in condition ET2

## 2 试验现象与结果

### 2.1 表观试验现象

在工况 ET1 与 ET2 两组试验的过程中与试验结束后,可看到的最直观的三个表观现象为:①表面大量涌水,剪切箱边界处涌水量较大;②土体表面中间区域轻微隆起;③振动结束后还有较多的水

和气泡从周边涌出。而从监测图像观察对比ET1与ET2两个工况,表面隆起高度与范围相差不大,工况ET2的表面隆起高度与隆起范围略小于工况ET1。振动试验前后对比如图8、图9所示。



(a) 振动前 (b) 振动后

图8 工况ET1表观试验现象

Fig.8 Apparent test phenomena in condition ET1



(a) 振动前 (b) 振动后

图9 工况ET2表观试验现象

Fig.9 Apparent test phenomena for working condition ET2

## 2.2 试验结果

### 2.2.1 水平加速度响应

通过加速度传感器的采集情况(图10、图11)发现,工况ET1与工况ET2中两者加速度响应特征十分相似:A1、A2、A3三个测点处的加速度幅值都在振动后6~7s左右达到峰值,然后逐渐降低,至第7.5s左右时降至谷值,并保持稳定在该水平,直到最后振动结束。这说明从第6.5s左右开始因孔压

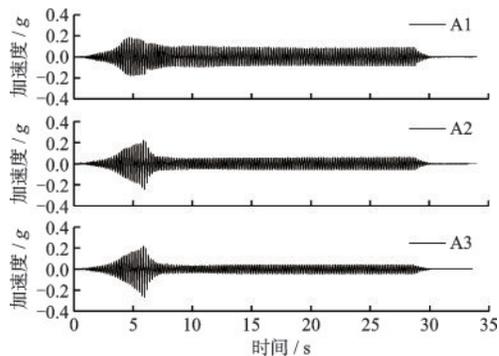


图10 工况ET1加速度响应曲线

Fig.10 Acceleration response curves of condition ET1

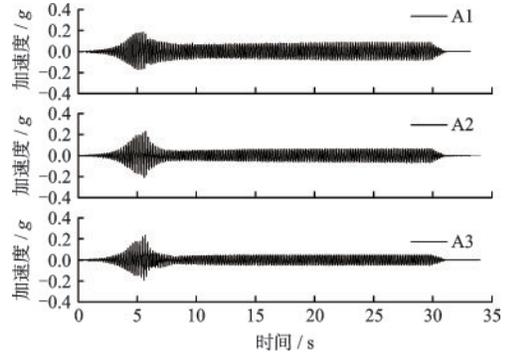


图11 工况ET2加速度响应曲线

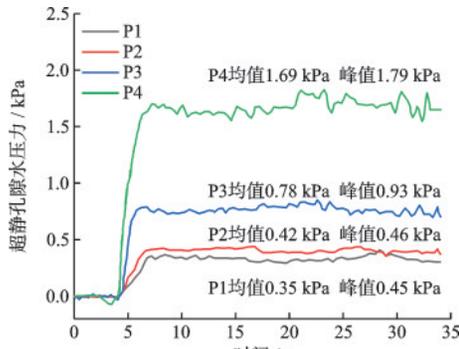
Fig.11 Acceleration response curves of condition ET2

积聚,土体开始发生液化,土体内部因为抗剪强度衰减,阻尼增大,所以振幅开始降低,到第7.5s左右时发生完全液化。

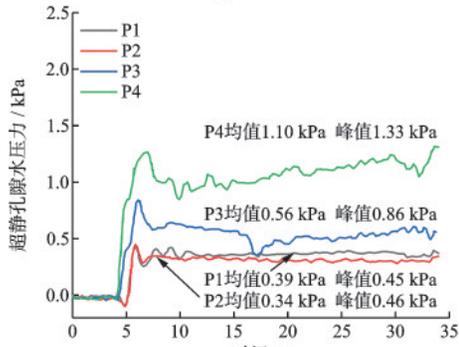
而通过对比两个工况中分别测得的A1、A2、A3三个测点处的加速度数据可见,较上部土体在振动稳定后的加速度幅值要高于下部土体,隧道模型的振动幅值介于两者之间,与工况RT不同。这是由于电解过程中产生的气泡会较多地集中在两边电极之间,也就是上部土体。通过对土体进行电解,上部土体受电解作用后的减饱和效果比下部土体要明显,其饱和度明显降低,并且产生了大量气泡,抑制了隧道模型周边和上部土体的进一步液化,土体抗剪强度的衰减与未电解工况对比相对减轻,所以上部土体与隧道的振动加速度幅值是要大于下部土体的。

### 2.2.2 孔隙水压力响应

通过孔压传感器的采集情况(图12)来看,两个工况中各测点处的超孔隙水压力曲线都在振动开始后7s左右达到峰值,然后趋于稳定。这与加速度振幅响应中先达到峰值后衰减至稳定的特征相匹配。并且由图12可见,埋深越大,超静孔压上升越快,且峰值越大,这与工况RT的现象是一致的。工况ET1中从上往下各测点处的超静孔压均值分别为0.345、0.419、0.778、1.691 kPa,超静孔压峰值为0.451、0.464、0.926、1.793 kPa;而工况ET2中从上往下各测点处的超静孔压均值为0.335、0.386、0.558、1.098 kPa,超静孔压峰值为0.464、0.454、0.861、1.332 kPa。对比两者的孔压曲线可以发现,总体上工况ET2中各点的超静孔压值都小于工况ET1,这说明工况ET2的电解减饱和和效果更明显。



(a) 工况ET1



(b) 工况ET2

图 12 超静孔隙水压力变化曲线

Fig.12 Variation curves of excess pore water pressure

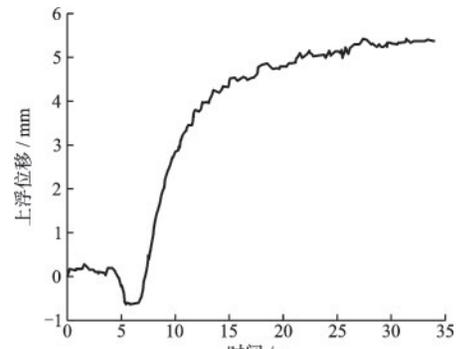
### 2.2.3 上浮位移响应

通过位移传感器的采集情况来看,电解工况 ET1 振动结束后位移的最大上浮量为 5.4 mm, 相较对比工况 RT 得到的位移数据减小了 39%, 工况 ET2 振动结束后位移的最大上浮量为 5.8 mm, 相较对比工况 RT 得到的位移数据减小了 35%, 说明电解减饱和法具有较为明显的抗液化与地基加固效果, 对地震液化时隧道的上浮破坏具有明显的抑制作用; 而电解试验工况 ET1 与 ET2 得到的位移数据十分接近, 数据差值小于 0.5 mm, 对比不明显, 这可能主要是由于模型试验的尺寸效应与测量误差引起的。两个工况具体的上浮位移量随时间的变化情况如图 13 所示。

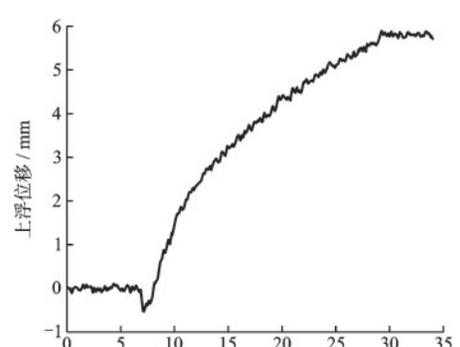
## 3 电解减饱和地基加固效果分析

### 3.1 超静孔压变化对比分析

根据图 14, 可以具体地看到各工况各测点处的超静孔压均值与峰值, 以及各工况之间进行对比的变化率。从图 14 中可以看到, 各个测点处的超静孔压均发生明显的变化, 两个电解试验工况得到的超静孔压值明显低于不电解工况, 表明电解法能够显著地降低砂土地基在发生振动时的孔压产生与积



(a) 工况ET1



(b) 工况ET2

图 13 隧道上浮位移变化曲线

Fig.13 Variation curves of tunnel uplift displacement

累。电解工况 ET1 相对未电解工况 RT, 孔压降幅最大的位置在 P3 测点处, 超静孔压均值相对下降了 72.1%, 峰值相对下降了 68.1%; 而电解工况 ET2 相对于未电解工况 RT, 孔压降幅最大的位置同样在 P3 处, 超静孔压均值相对下降了 79.0%, 峰值相对下降了 70.3%。两次电解工况中最明显的孔压降低都发生在同一位置是因为 P3 处传感器埋设的位置正是在倾斜 EKG 电极板的上方, 是离电极最近的一组传感器, 同时因其固定于隧道模型底部, 是电解生成气体上升后最容易积聚的位置, 即可能是电解影响效果最大的位置。所以该测点的超静孔压降低最明显, 变化率最大。两个电解工况 ET1 与 ET2 之间的超静孔压变化率相对较小, 尤其峰值对比相差甚小, 而通过均值对比, 则可发现工况 ET2 的超静孔压比工况 ET1 要更低一些, 说明工况 ET2 的电解减饱和效果要略优于工况 ET1。

图 15 展示了超静孔隙水压力变化与土体埋深的关系, 图中显示在浅层地表 (-8.0 cm 以上), 超静孔压值之间差距很小, 这可能与上部土体液化程度有关, 也可能是由于在振动试验过程中孔压计随隧道模型发生上移所致; 而在较深部土体 (-8.0 cm 以下), 超静孔压随土体深度增大而增大的趋势更为明显, 并且可能存在一定的线性关系, 在此不作赘述。

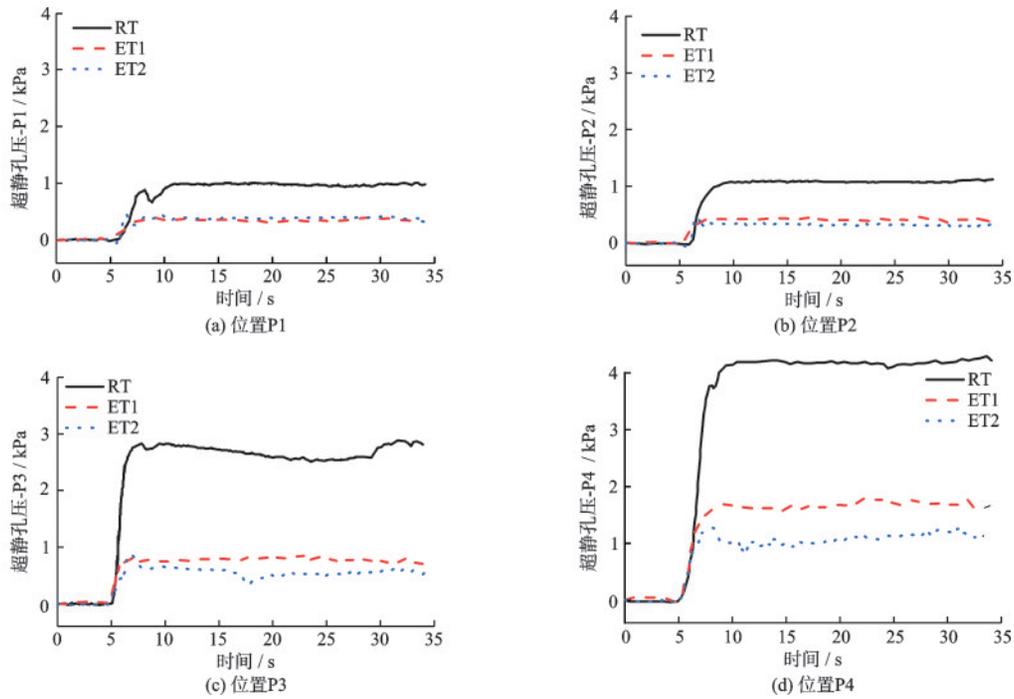


图 14 不同测点位置处超静孔压变化曲线

Fig.14 Variation curves of excess pore pressure at different measurement points

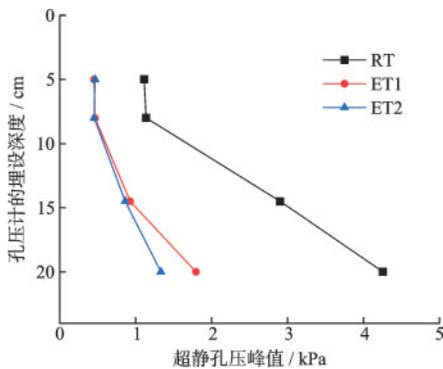


图 15 超静孔压峰值与土体埋深的关系

Fig.15 Relationship between peak excess pore pressure and soil burial depth

### 3.2 地表变形变化对比分析

将各个工况所得到的位移变化曲线进行汇总分析如图 16 所示,可以看到随着振动时间的增加,各工况中隧道模型的上浮位移都逐渐变大,而上浮上升速率都是逐渐变缓的,临近振动结束时,上浮位移都已基本趋于最大值,曲线变得平缓。并且各工况位移曲线的整体变化形式是相似的,而通过振动结束后的整体位移曲线来看,工况 ET1 与 ET2 的上浮位移量均明显小于未电解工况 RT,表明电解减饱和法是具有明显的抑制隧道上浮效果的。而 ET1 与 ET2 之间,可能是由于模型的尺寸效应或测

量误差等因素影响,位移曲线出现交叉,两者之间差距甚小且不具代表性。

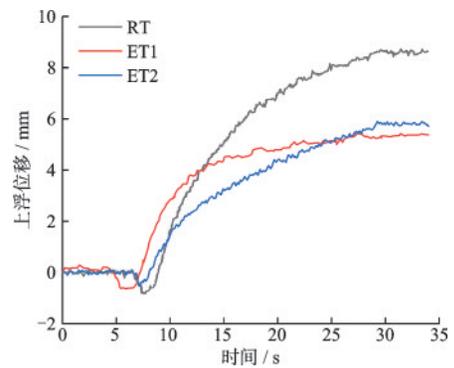


图 16 各工况上浮位移变化对比

Fig.16 Comparison of uplift displacement variations under different conditions

在此以振动试验前的砂土体水平表面为基准,根据各工况振动结束后测得的位移数据,假设隧道模型的最大上浮位移可作为地表隆起的最大高度,同时以超过原砂土表面标高的土体范围为地表隆起范围,据此可绘制地表隆起变化示意如图 17 所示,从该示意图可直观看出电解减饱和法的地基加固效果明显。以隧道走向为轴向,其横截面上土体的隆起宽度与隆起仰角如图 17 所示,工况 RT 中隆起宽度为 29.6 cm,工况 ET1、ET2 分别为 24.2、

23.4 cm,各工况中地表隆起仰角分别为 58.8°、76.0°、79.9°,两电解工况中地基加固效果明显,且工况 ET2 加固效果略优于工况 ET1。

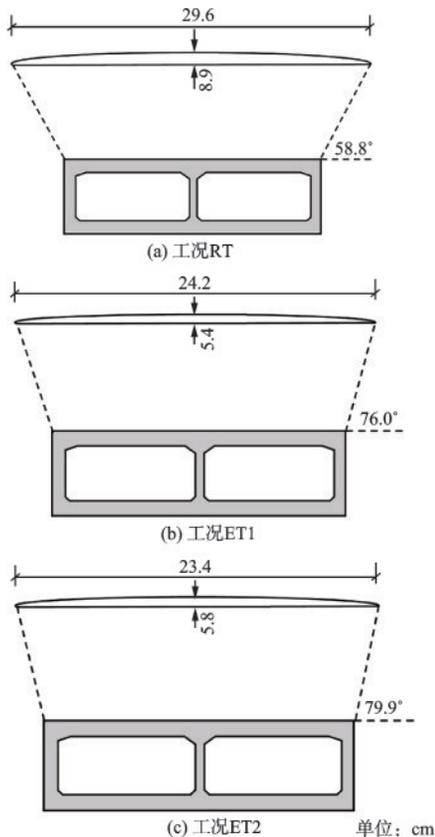


图 17 各工况地表变形示意

Fig.17 Schematic diagram of surface deformation under different conditions

## 4 结 论

本文以 EKG 板作为电极进行了电解减饱和和法的振动台试验,主要探究了电解法的减饱和和抗液化效果,及其在抑制隧道上浮、地基加固方面的作用,所得结论如下:

(1) 在振动试验过程中与试验结束后,会有大量的水与气泡不断地从地表,尤其是剪切箱边缘处冒出,说明电解生成气体在箱内减饱和砂土体中的扩散与分布是广泛的。

(2) 两次电解工况的加速度响应规律基本一致,而与未电解工况相比,两侧电极之间的上部土体在振动试验过程中加速度幅值的衰减相对减小,说明电解减饱和法抑制了土体抗剪强度的丧失,使得该范围土体抗液化效果显著。

(3) 电解工况下,各测点处的超静孔压均发生明显的降低,工况 ET1 中孔压峰值的最大降幅可达 68.1%,工况 ET2 中孔压峰值的最大降幅可达 70.3%。在各个孔压测点位置中,超静孔压降低最显著的地方位于隧道底部。

(4) 隧道模型上浮位移的变化能直观反映减饱和和法的实际加固效果,工况 ET1 中振动结束后的最大上浮位移为 5.4 mm,对比工况 RT 减小了 39%,工况 ET2 中振动结束后的最大上浮位移为 5.8 mm,相较工况 RT 减小了 35%,表明电解减饱和法对液化地基中隧道工程的上浮变形有着良好的控制作用。

## 参考文献:

- [1] 苏雷,赵卓,毕建巍,等.基于 FLAC<sup>3D</sup> 液化场地桩基动力反应振动台试验数值分析方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 454-463.  
Su L, Zhao Z, Bi J W, et al. Numerical simulation of shake table test on dynamic response of pile foundation in liquefiable ground using FLAC<sup>3D</sup>[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 454-463. (in Chinese)
- [2] 张雪东,侯瑜京,梁建辉,等.饱和砂土地基液化离心机振动台模型试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(增2): 105-111.  
Zhang X D, Hou Y J, Liang J H, et al. Dynamic centrifuge tests on liquefaction of saturated sand foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(Sup2): 105-111. (in Chinese)
- [3] 吴琪,徐雨,陈国兴.我国近 20 年 11 次地震的土壤液化灾害回顾[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 961-975.  
Wu Q, Xu Y, Chen G X. Review of soil liquefaction manifestation and its consequences for 11 earthquakes in china over the last 20 years[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 961-975. (in Chinese)
- [4] 陈育民,刘汉龙,邵国建,等.砂土液化及液化后流动特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1408-1413.  
Chen Y M, Liu H L, Shao G J, et al. Laboratory tests on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1408-1413. (in Chinese)
- [5] 黄雨,于淼, Bhattacharya S. 2011 年日本东北地区大

- 平洋近海地震地基液化灾害综述[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 834-840.
- Huang Y, Yu M, Bhattacharya S. Review on liquefaction-induced damages of soils and foundations during 2011 of the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 834-840. (in Chinese)
- [6] 张西文, 朱伟东, 李虎, 等. 地铁车站液化上浮响应及抗浮措施研究[J]. 世界地震工程, 2020, 36(1): 205-211.
- Zhang X W, Zhu W D, Li H, et al. Study on uplift behavior and anti-liquefaction measures for subway station during seismic loadings [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 205-211. (in Chinese)
- [7] 王文章, 廖晨聪, 周香莲, 等. 可液化土层中地下结构上浮及其控制措施[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 159-167.
- Wang W Z, Liao C C, Zhou X L, et al. The floating of underground structure in liquefiable soil layer and its control measures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 159-167. (in Chinese)
- [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] 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 Y M, He S K, Wu H Q, et al. Model tests on liquefaction resistance of desaturation measures of electrolysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 726-733. (in Chinese)
- [10] 陈育民, 何森凯, 方志, 等. 电解减饱和法处理可液化地基的现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 832-838.
- Chen Y M, He S K, Fang Z. Field tests on liquefaction resistance of desaturation measure of electrolysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 832-838. (in Chinese)
- [11] 何森凯, 陈育民, 方志. 电解减饱和法处理可液化地基的波速特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 472-477.
- He S K, Chen Y M, Fang Z, et al. Wave velocity characteristics of liquefiable foundation using electrolytic desaturation method[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(2): 472-477. (in Chinese)
- [12] Fourie A, Johns D, Jones C. Dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(2): 160-172.
- [13] Fourie A, Jones C. Improved estimates of power consumption during dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics (EKGs) [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(2): 181-190.
- [14] 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 Y C, Wang Z, Zhuang Y F. 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)
- [15] 沈扬, 邱晨辰, 宋顺翔, 等. 管状EKG电化学注浆软基加固室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增2): 57-61.
- Shen Y, Qiu C C, Song S X, et al. Experimental study on electro-osmosis chemical grouting reinforcement of marine soft clay using tubular EKG [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Sup2): 57-61. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)