第 38 卷第 10 期 岩 土 力 学 Vol.38 No. 10
2017 年 10 月 Rock and Soil Mechanics Oct. 2017

DOI：10.16285/j.rsm.2017.10.037

负压环境下新型地下水位测试装置研发

鲍树峰 1, 2，娄 炎 3，董志良 1, 2，牛 飞 1, 2，谢荣星 1, 2

（1. 中交四航工程研究院有限公司，广东 广州 510230；2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室，广东 广州 510230；
3. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029）

摘 要：现行负压环境下的地下水位测试方法均不能正确反映真空预压条件下地基中的地下水位变化情况。鉴于此，先深入分析了现行负压环境下地下水位测试方法的局限性，然后详细地介绍了一种负压环境下新型地下水位测试技术，即闭口测压管法–激光测试法，最后依托实际工程进行了现场试验研究并验证了其合理性。研究结果表明：现行闭口测压管测试法均存在一定的局限性，主要体现在两方面：①测试装置均非常复杂，不便于现场安装埋设；②测试结果的影响因素较多，测试结果均不能代表真空预压条件下地基土体中地下水位的真实值。文中提出的新型测试技术，即闭口测压管测试法–激光测试法是基于激光测距原理进行测试的，其方法简便、成本低、结果直观。现场试验结果表明：真空预压条件下，地基中的地下水位总体上随地基的沉降而下降，且总的下降幅度稍大于真空预压期间地基的固结沉降值；激光测试法能正确反映真空预压条件下地基中的地下水位变化情况，有助于对真空预压加固效果进行正确评价和分析。

关 键 词：真空预压法；激光测试法；地下水位变化情况

中图分类号：TU 46 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 10－3067－07

Development of a new apparatus for measurement of groundwater level under vacuum pre-loading

BAO Shu-feng[1, 2], LOU Yan[3], DONG Zhi-liang[1, 2], NIU Fei[1, 2], XIE Rong-xing[1, 2]

（1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510230, China; 2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou, Guangdong 510230, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China）

Abstract: Current methods for groundwater level testing could not accurately reflect the actual variation of the groundwater level under vacuum pre-loading, and thus their limitations were comprehensively analyzed in this paper. A new testing method, namely closed piezometric testing method-laser testing method, was described in detail. Moreover, field tests were conducted to verify the rationality of the developed method. The results show that some restrictions are found in the existing closed piezometric testing method. On the one hand, the employed devices are very complex and challenging to install. On the other hand, experimental results are affected by many factors, which indicates that the results could not truly represent the ground level under vacuum pre-loading condition. However, the proposed new testing method has merits of easy, low-cost and intuitive results, owning to its principle of laser ranging. The field testing results show that during vacuum pre-loading, the groundwater level falls with the subsidence of ground foundation. In addition, the overall decline is slightly greater than the consolidation settlement of the foundation. Therefore, the new method can accurately reflect the actual variation of the groundwater level, and is useful to evaluate and analyse the effect of vacuum pre-loading.

Keywords: vacuum preloading method; laser testing method; variation of groundwater level

1 引 言

地基中地下水位的变化会使土体重度同步发生变化，从而影响地基中土体的有效应力大小和固结程度，因此，研究真空预压法加固软基过程中地下水位的变化规律，有利于进一步认识真空预压法的加固机制，更有利于对真空预压加固效果进行评价和分析。然而，真空预压条件下（下文简称负压环境下）地基中地下水位的变化规律一直以来都是业界争论和分歧的焦点，目前主要有 3 种观点，分别为地下水位下降、地下水位不变以及地下水位可能会上升[1−8]。其中，第 1 种观点有大量现场实测数据

收稿日期：2015-11-27

第一作者简介：鲍树峰，男，1982 年生，博士，高级工程师，主要从事软基处理、桩基工程、以及基坑工程等方面的研究工作。E-mail: bshufeng@cccc4.com

佐证，而后两种观点目前仅停留在理论研究层面上，尚缺乏充分的现场实测数据验证。

负压与大气压力环境下的地下水位的本质区别在于：负压环境下，水位之上的气体压力是小于标准大气压力的[9]。因此，正确分析真空预压期间地基中地下水位变化的情况取决于负压环境下地下水位的测试方法是否合理、可靠。

本文首先对现行负压环境下地下水位测试方法的局限性进行深入分析，然后提出新的测试技术并进行详细地介绍，最后依托实际工程开展现场对比试验研究，以验证新测试技术的合理性。

2　现行负压环境下地下水位测试方法的局限性分析

目前，真空预压工程实践中较为常用的地下水位测试方法主要有两种，分别为改良的敞口测压管测试法[1]和闭口测压管测试法[4–7]。改良的敞口测压管测试法，是在传统的敞口测压管测试法基础上稍加改进的，具体为：在水位管管口上添加一个配套的顶盖，以确保真空预压期间水位管内腔与外界大气隔绝；在进行水位测试时，迅速打开、迅速测量，测试完成后再盖紧管口。这种方法到目前为止仍然广泛应用于真空预压工程实践中。而闭口测压管测试法，顾名思义，是在整个地下水位监测过程中保持水位管管口处于密闭状态，目前主要有张功新测试法[4]和刘汉龙测试法[5]。其中，张功新测试法的测试装置主要由水位管（直径 70 mm）、孔隙水压力计、真空度测头、砂垫层与水位管连通的塑料软管等组成，如图 1 所示。而刘汉龙测试法的测试装置主要由内、外管、磁环浮标、限位器、卡口、密封帽、电感应器等部分组成，如图 2 所示。

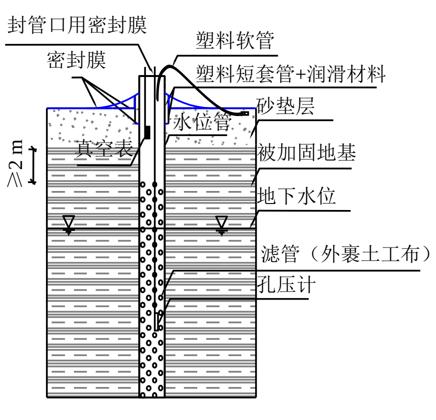
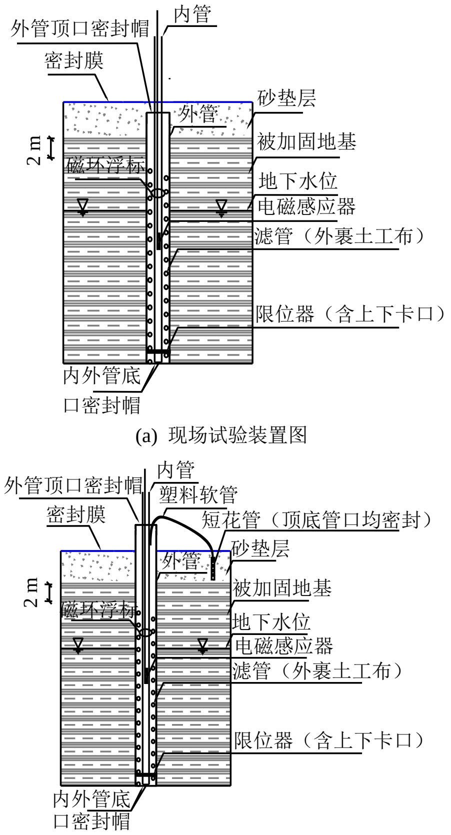


图 1　张功新地下水位测试装置示意图[4]

Fig.1　Schematic of testing apparatus for measuring groundwater level under vacuum pre-loading developed by Zhang Gong-xin[4]



(a) 现场试验装置图

(b) 局部改进图

图 2　刘汉龙地下水位测试装置示意图[5]

Fig.2　Schematic of testing apparatus for measuring groundwater level under vacuum pre-loading developed by Liu Han-long[5]

改良的敞口测压管测试法的局限性主要体现在：每次进行地下水位测试时，均须打开水位管管口的顶盖，这导致水位管内腔的气体压强迅速增大，进而管内水位迅速下降，因此，而产生的测试误差值随着测试次数的增多而累计增大，简而言之，即测试值仍然为近大气压环境下的地下水位，不能代表负压环境下地下水位的真实值。

闭口测压管测试法的局限性主要体现在：

（1）对于张功新测试法而言，其测试装置中的塑料软管将膜下砂垫层和水位管内腔连通，这样使得水位管近似于地基中的一根竖向排水通道，因此，其测试值相当于竖向排水通道内的水位高度。而竖向排水通道中的水位是真空预压期间地基土体发生固结而排出水分的汇集，呈上下间歇性变化规律，一般高于地基中的实际地下水位。抽真空初期，水位管内腔的气体压强大于其周围土体孔隙中的气体压强，这致使内腔的气体在压强差的作用下跑到水位管周围的土体孔隙中，进而导致内腔的气体质量发生变化，因此，抽真空初期水位管内腔的气体状态不严格满足气体三定律的前提条件，该法测试值存在一定的误差，不能完全代表负压环境下地下水

位的真实值。测试装置较复杂，不便于现场安装埋设，且涉及多种测试仪器，如孔压计、真空度测头等，因此，测试值的客观影响因素较多，如测试仪器的性能以及水位管的弯曲变形所引起的沉降计算误差等。

（2）对于刘汉龙测试法而言，其现场试验装置（见图 2(a)）未确保内、外管之间内腔的气体压强与外管周围地基土体中的气体压强一致，因此，其测试值不能完全代表负压环境下地下水位的真实值，存在一定的误差。之后，建议添加真空度补偿装置（钢丝软管+短 UPVC 花管），这一定程度上可减小管内外气体压强不一致所造成的误差，但未经实际工程验证。测试装置同样非常复杂，各连接处的密封效果很难保证，且不便于现场安装埋设，内、外管的轴线很难保证同轴，真空预压期间极易致使磁环发生卡位现象而不能自由浮动，最终影响测试结果甚至会出现装置失效的现象。

3　负压环境下新型地下水位测试技术

鉴于现行负压环境下地下水位测试方法存在以上不足，本文引进一种新型地下水位测试技术——一种适用于真空预压地基处理技术的地下水位测试装置及系统[9−10]。该技术是中交四航工程研究院有限公司研发出的专利技术。该专利技术是基于激光测距原理进行测试的，测试方法简便、测试成本低、测试结果直观。

3.1　测试装置设计

如图 3 所示，该测试装置主要由激光测距仪、透光片、反射片及水位管组成。详细介绍如下：

（1）激光测距仪：为德国 Leica 系列手持式激光测距仪，如图 4 所示，HT−307/310 型号的测试精度为±1.5 mm。垂直紧贴于水位管顶端向水位管内的水面上发射光束。

（2）透光片：为超白玻璃，是一种超透明低铁玻璃，厚度为 6 mm，透光率可达 91.5%以上，如图 5 所示。固定于水位管的管顶，其目的主要有两方面：①使水位管内腔与外界大气隔绝，②使激光测距仪所发射出的光束能集中透射到水位管内的水面上。

（3）反射片：为德国 Leica 系列全站仪专用的棱镜反光片，尺寸为 25 mm×25 mm，即使在光线弱的工作环境中（如水位管内），只要有光束照射，就能发现很亮的亮点，如图 6 所示。飘浮于水位管内的水面上，其目的主要是用于反射激光测距仪所发射出的光束。

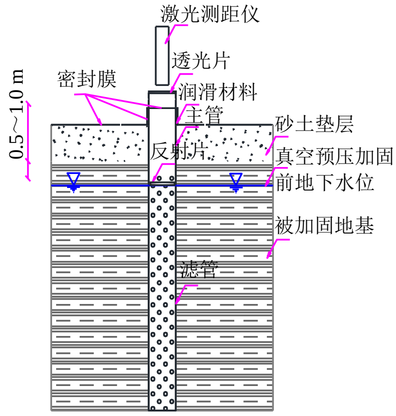


图 3　负压环境下新型地下水位测试装置示意图

Fig.3　Schematic of newly-developed testing apparatus for measuring groundwater level under vacuum pre-loading

图 4　Leica 牌手持式激光测距仪 HT−307/310

Fig.4　Hand-held laser range finder of Leica HT-307/310

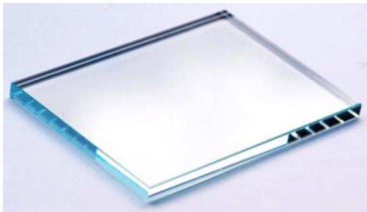


图 5　透光片

Fig.5　Translucent sheet

图 6　Leica 牌全站仪专用的棱镜反光片

Fig.6　Prism sheet for total station of Leica

（4）水位管：材质为 PVC 工程塑料或 ABS 工程塑料，外径至少为 53 mm、壁厚至少为 8 mm，由居于上部的主管及居于下部的滤管同轴连接而成。滤管的外壁须缠绕排水板滤膜，底部须封闭。主管与滤管的连接位置与砂土垫层底面的距离建议尽量按 0.5～1.0 m 控制，以最大程度保证真空预压

期间水位管内水位以上内腔的真空度与其周围地基土体中的真空度一致。

3.2 测试原理

该专利技术是基于激光测距原理进行测试的，具体测试原理为：光束以速度 c 在水位管管内传播，在管口与反射片之间往返一次所需时间为 t，则两者间的距离 d 为 $d=ct/2$。

真空预压加固地基过程中，当水位管管内的水位发生变化时，飘浮于水位管管内水面上的反射片也会随之移动，致使水位管管内水面至管口的距离同步发生改变，从而改变了激光测距仪的读数，根据读数的变化即可精确计算出地下水位的变化值。

3.3 测试装置安装及测试方法

（1）先利用满足技术要求的钻机设备将水位管安装到设计深度。安装过程中，须确保水位管的垂直度、滤管底端以及各管段连接处的密封性、主管管顶截面的平整性。需要注意的是，滤管外壁须外裹排水板滤膜，底端封闭，以避免周围的土体细颗粒进入管内出现严重淤堵现象而影响滤管的自由透水效果。另外，水位管滤管与水位管主管连接处的标高应不低于真空预压加固前地基中的地下水位标高。

（2）稳定一段时间后，往管内注入清水进行冲洗，直到管中的水不再浑浊。

（3）将反射片放入管中，使其飘浮于水面；将透光片水平固定于主管管顶处，并确保平整性。

（4）真空密封膜包覆于水位管主管露出砂垫层表面的部分管段外壁及其周围的砂垫层表面。

（5）真空密封膜与水位管主管露出砂垫层表面的部分管段外壁之间充填黄油或其他具有良好密封性和润滑性的胶体作为润滑密封材料，且两者之间通过真空密封膜材料绑扎固定，以避免因水位管与周围土体发生不均匀沉降而导致真空密封膜出现拉裂、漏气现象。

（6）抽真空前，通过激光测距仪采集水位管内水位的稳定读数，作为水位管管内水面至主管管口的初始距离 d_0；其中，激光测距仪的采集数据过程依次按下述步骤进行：①激光测距仪发射端紧贴固定于水位管主管管顶处的透光片；②激光测距仪发射端对准水位管管中浮于水面上的反射片；③激光测距仪连续发射激光束，同时自动获取并记录水位管管内水面至管口的距离；④每次测试时，重复①～③步骤。

（7）真空预压过程中，通过激光测距仪进行跟踪测试，作为实时读数 d_i。

3.4 地下水位计算方法

真空预压过程中，地下水位的计算方法如下：

$$H_{水位i}=H_{管口i}-d_i \tag{1}$$

$$\Delta H_{水位i}=(H_{管口i}-d_i)-(H_{管口0}-d_0) \tag{2}$$

式中：$H_{管口0}$ 为水位管主管管口的初始高程测试值；d_0 为水位管管内水面至主管管口的初始距离测试值；$H_{管口i}$ 为水位管主管管口第 i 次的高程测试值；d_i 为水位管管内水面至主管管口第 i 次的距离测试值；$H_{水位i}$ 为地下水位第 i 次的高程测试值；$\Delta H_{水位i}$ 为地下水位第 i 次的累计变化值。

4 现场对比试验

依托广州港南沙港区 3 期工程疏浚吹填及软基处理工程Ⅱ区工程科研试验区开展改良的敞口测压管测试法（下文简称传统测试法）、第 3 节所述的新型闭口测压管测试法−激光测试法（下文简称改进法 1）以及第 2 节所述的闭口测压管测试法−张功新（下文简称改进法 2）等 3 种方法的现场试验对比研究，以验证本文提出的新型测试技术的合理性。

4.1 依托工程土层条件

根据勘察报告及现场情况，土层自上而下分布情况见表 1。

表 1 各土层工程性质概述
Table 1 Properties of soil strata

土层名称	标高范围/m	层厚/m	标贯击数	工程性质
浮泥～流泥	7.40～−0.11	7.5	0	灰色，饱和，流动，含少量粉砂
②淤泥	−0.11～−11.41	11.3	0	灰色，饱和，很软，滑腻，含少量粉细砂，腐殖物，夹薄层粉细砂，含少量贝壳，具臭味
②$_1$淤泥质土	−11.41～−15.61	4.2	1～10	灰色，饱和，软，含少量粉细砂
⑤$_3$上部为黏性土夹砂	−15.61～−17.71	2.1	10～15	灰黄色，饱和，硬，以黏性土为主，夹薄层中砂，细砂，局部夹铁质胶结碎粒
⑤$_3$中部为黏土	−17.71～−21.81	4.1	9～10	灰黄色，含浅灰色，湿，硬，含少量粉细砂，局部含铁质胶结碎粒
⑤$_3$下部为黏性土混砂	−21.81～−24.11	2.3	14	灰黄色，饱和，硬，以黏性土为主，混约 30%中砂，粗砂，局部含砂混黏性土
夹层为⑤$_1$粗砂	−24.11～−30.21	6.1	22～24	灰黄色，饱和，中密，颗粒级配良好
⑤$_3$底部为黏性土混砂	−30.21～−31.61	1.4	10	浅灰色，饱和，硬，以黏性土为主，混约 30%中砂
⑥$_3$上部为黏性土夹砂	−31.61～−36.61	5.0	10～11	灰色，饱和，硬，以黏性土为主，夹 3～5 cm 薄层细砂
⑥$_3$下部为粉质黏土	−36.61～−42.21	5.6	11～16	灰色，湿，硬，含少量粉细砂，局部含泥质结核
⑩$_2$强风化变粒岩	−42.21～−45.71	3.5	50～55	浅灰白色，粗粒结构，裂隙极发育，岩芯呈坚硬状～半岩半土状，主要矿物为石英，云母等，在 44.80～45.60 m 夹较多中风化岩块

4.2　软基加固方案

科研试验区软基采用两种单管四排型直排式真空预压方案进行加固，具体方案详见表 2。

表 2　真空预压方案
Table 2　Vacuum pre-loading schemes

方案	水平排水系统		竖向排水体
	水平排水垫层	水平排水管路	
1	粉细砂排水垫层+平铺的排水板（间距 1 m）	主管+滤管，滤管间距为 4 m	反滤层：等效孔径为 0.106～0.118 mm 芯体：原生料插设深度：25 m 插设间距：1 m
2	中细砂排水垫层+平铺的排水板（间距 1 m）		

注：两方案的加固区域尺寸均为 73 m×111 m；两方案均布设了 9 台真空泵；两方案的抽真空时间均为 105 d，其中，逐级开泵时间为 10 d，恒载时间为 95 d。

4.3　试验区监测与检测方案

试验区监测与检测项目及方法概括如下：

（1）膜下真空度：包括水平排水滤管中的真空度（L1、L2、L3、L4）、垫层中的真空度（S1、S2、S3、S4）以及平铺板头中的真空度（P1、P2、P3），均通过设置真空表进行观测。

（2）地下水位，通过改进法 1（激光测试法）、改进法 2（张功新测试法）以及传统测试法进行对比观测。3 种测试法测点均在插板施工完成后和铺设密封膜前埋设完成，水位管底端均位于地表以下 12 m。改进法 1 的测试装置示意图如图 4 所示。改进法 2 的测试装置示意图如图 2 所示，水位管内的孔压计距管口 10 m。

（3）总沉降变形：在加固区域内均匀布设地表沉降盘对地表沉降进行观测。

（4）土体加固效果：其评价指标包括地基不同深度土体的原位抗剪强度和贯入阻力两方面，分别通过十字板试验、静力触探试验等方法进行评估。

地下水位监测点、十字板试验点以及静力触探试验点均布设在加固区域中心点位置附近。

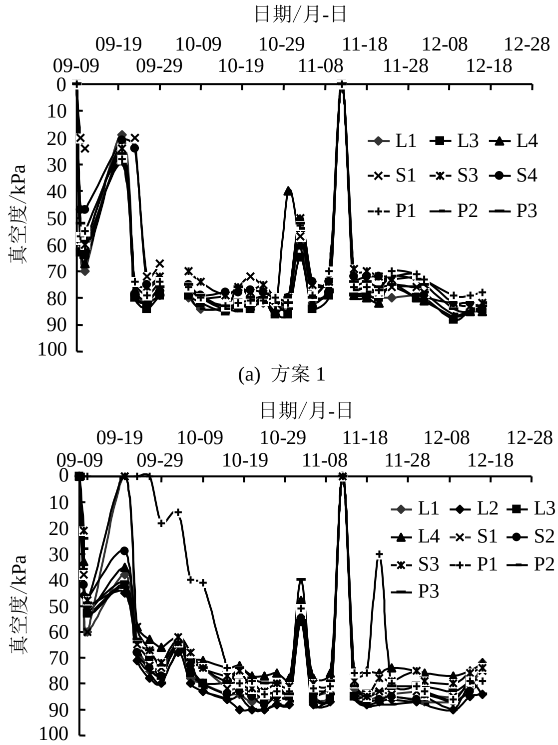
4.4　试验结果与分析

4.4.1 膜下真空度测试结果与分析

膜下各位置的真空度传递情况是直接评价真空预压排水系统成效的重要监测指标。试验区两方案的膜下真空度测试结果如图 7 所示。

图 7 中的测试曲线局部出现突变现象主要是由于试验区在真空预压期间出现停电、台风等方面的影响致使真空泵停泵造成的。同样地，图 8、9 中曲线突变也是因此而造成的。

由图 7 可知：两种方案真空压力在水平排水系统中的平面传递效果均较佳。卸载前，方案 1 滤管中、平铺板头中以及垫层中的真空度测试值分别为 81.5、76.0、75.0 kPa，方案 2 的为 84.5、83.0、81.0 kPa。方案 1、2 水平排水系统中的真空压力损失程度分别为 8%和 4%。但方案 1 中稍严重。这主要是由于一般回填土垫层中的真空压力传递效果稍差于中细砂垫层。



(a) 方案 1

(b) 方案 2

图 7　两种方案膜下真空度观测曲线
Fig.7　Monitoring results of vacuum degree under membrane for two schemes

4.4.2 地表沉降监测结果与分析

地基的沉降变化情况是评价地基排水固结效果的重要直观指标。

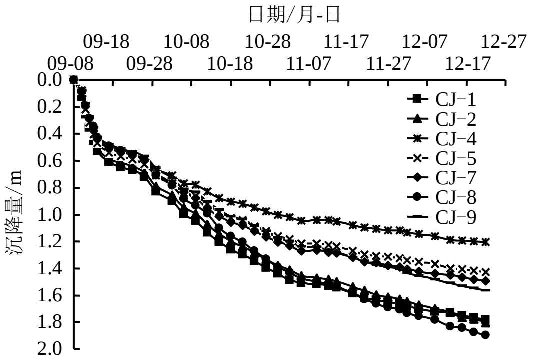
图 8 为试验区两种方案真空预压期间的地基固结沉降测试曲线。

由图可知，方案 1、2 真空预压期间的地基固结沉降平均值分别为 1.595、1.706 m，不均匀沉降值分别为 0.695、0.893 m。平均应变固结度计算值分别为 92.9%和 94.9%。因此，两种方案地基的排水固结效果均较佳，但方案 2 稍优，这主要有两方面原因：①方案 2 所加固的地基（包括新近吹填淤泥层和原位地基）在成因上的不均匀性更严重；②一般回填土垫层中的真空压力传递效果稍差于中细砂垫层。

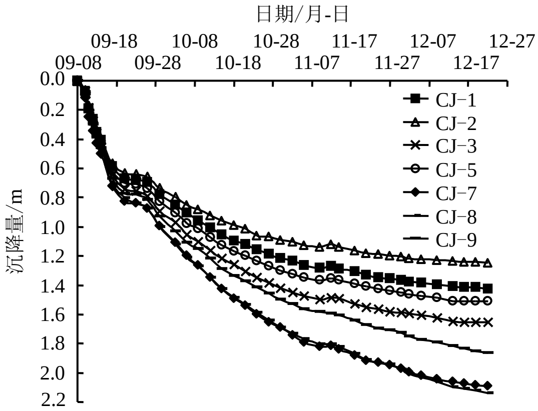
4.4.3 地下水位测试结果与分析

地下水位的变化情况是直接评价地基真空预压

加固效果的重要监测指标之一。试验区两种方案的地下水位测试结果如图 9 所示。



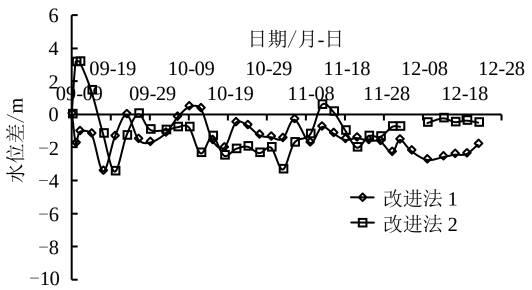
(a) 方案 1



(b) 方案 2

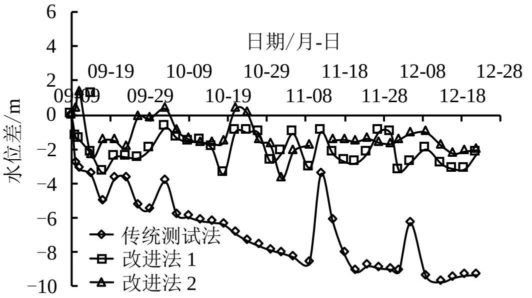
图 8　两方案地基固结沉降测试曲线

Fig.8　Monitoring results of settlements during vacuum pre-loading for two schemes



注：传统测试法水位管赌管，无法获取相应的地下水位监测数据。

(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 9　试验区两方案地下水位观测曲线

Fig.9　Monitoring results of groundwater level for two schemes

由图可知，传统测试法的测试值与改进法相差较大。如方案 2 传统测试法的地下水位下降值最终稳定在 9 m 左右，而改进法 1（激光测试法）和改进法 2（张功新测试法）的地下水位下降值最终分别稳定在 2.284、2.032 m。具体原因分析如第 4.4.2 节所述，在此不再赘述。改进法 1 的测试结果比改进法 2 更加准确、合理。改进法 2 测试值偏小，且抽真空前期的地下水位计算结果明显不合理。具体原因分析如第 4.4.2 节所述，在此不再赘述。由图中改进法 1 的测试结果可知，方案 2 的地下水位下降值最终稳定在 2.284 m，而方案 1 最终稳定在 1.853 m，均大于相应的地基真空固结沉降值。因此，两方案的排水固结效果均较佳，但方案 2 稍优。这与上述基于地表沉降的分析结果相吻合。综合分析，真空预压条件下，地基中的地下水位总体上随地基的沉降而下降，且总的下降幅度稍大于真空预压期间地基的固结沉降值。

4.4.4 十字板和静力触探试验结果与分析

为了进一步验证上面的分析结果，方案 1、2 各选取了两个有代表性的位置进行了十字板试验和静力触探试验，其探试验结果详见图 10、11。

由图 10、11 可知，测试深度范围内，方案 1 的原位抗剪强度值范围为 19.6～88.5 kPa，平均值为 37.9 kPa；方案 2 的原位抗剪强度值范围为 23.6～96.2 kPa，平均值为 39.1 kPa。测试深度范围内，方案 1、2 的平均比贯阻力值分别为 0.69、0.74 MPa。因此，方案 2 加固后地基土体的原位强度稍大于方案 1，相应地，方案 2 的加固效果也优于方案 1。这进一步有力地证明了闭口测压管测试法–激光测试法的合理性。

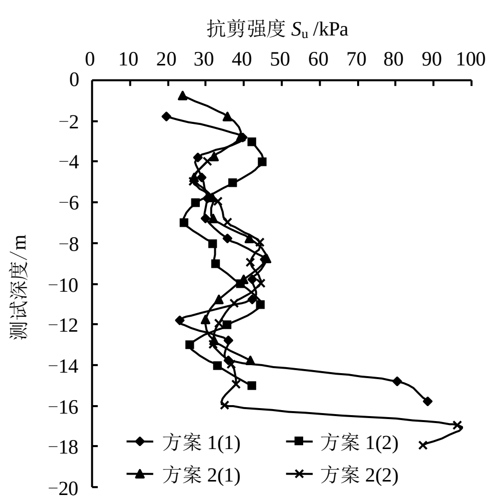


图 10　试验区两方案卸载后十字板试验结果

Fig.10　Results of vane shear tests for two schemes after improvement

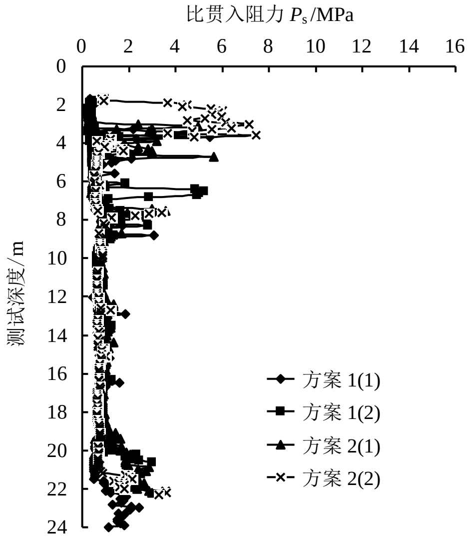


图 11　试验区两方案卸载后静力触探试验结果

Fig.11　Results of static cone penetration test for two schemes after improvement

5　结　论

（1）现行闭口测压管测试法均存在一定的局限性，主要体现在测试装置均非常复杂，不便于现场安装埋设以及测试结果的影响因素较多，测试结果均不能代表真空预压条件下地基土体中地下水位的真实值。

（2）本文提出的新型测试技术——闭口测压管测试法–激光测试法，是基于激光测距原理进行测试的，测试方法简便、成本低、结果直观。现场试验结果表明：真空预压条件下，地基中的地下水位总体上随地基的沉降而下降，且总的下降幅度稍大于真空预压期间地基的固结沉降值；激光测试法能正确反映真空预压条件下地基中的地下水位变化情况，有助于对真空预压加固效果进行正确评价和分析。

参 考 文 献

[1] 董志良. 堆载及真空预压法加固地基地下水位及测管水位高度的分析与计算[J]. 水运工程, 2001, 331(8): 15－19.
DONG Zhi-liang. Analysis and calculation of the soil foundtaion’s ground water level and measuring tube’s water level under the situations of surcharge preloading and vauum preloading[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2001, 331(8): 15－19.

[2] 明经平, 赵维炳. 真空预压中地下水位变化的研究[J]. 水运工程, 2005, 372(1): 1－6.
MING Jing-ping, ZHAO Wei-bing. Study on groundwater level in vacuum preloading[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2005, 372(1): 1－6.

[3] 辜清华, 李志勇, 何良德. 真空预压中地下水位变化的理论探讨[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2007, 20(3): 102－105.
GU Qing-hua, LI Zhi-yong, HE Liang-de. Theoretical discussion on groundwater level change in vacuum preloading[J]. **Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science)**, 2007, 20(3): 102－105.

[4] 张功新, 董志良, 莫海鸿, 等. 真空预压中地下水位测试技术探讨与改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1899－1903.
ZHANG Gong-xin, DONG Zhi-liang, MO Hai-hong, et al. Discussion and reform of groundwater level measuring technique in soft soil reinforced by vacuum preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(9): 1899－1903.

[5] 刘汉龙, 周琦, 顾长存. 真空预压条件下地下水位测试新方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 48－51.
LIU Han-long, ZHOU Qi, GU Chang-cun. New method for measuring groundwater level under vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(1): 48－51.

[6] 朱燕, 余湘娟. 真空预压地下水位测试方法分析[J]. 水运工程, 2010, 445(9): 113－116.
ZHU Yan, YU Xiang-juan. Measuring methods for groundwater level under vacuum preloading[J]. **Port & Waterway Enigeering**, 2010, 445(9): 113－116.

[7] 张敏, 李俊才, 王文, 等. 测量真空预压地下水位变化新方法[J]. 施工技术, 2009, 38(增刊): 231－233.
ZHANG Min, LI Jun-cai, WANG Wen, et al. A new method to measure the change of groundwater level in vacuum preloading[J]. **Construction Technology**, 2009, 38(Supp.): 231－233.

[8] 高志义, 候晋芳, 梁爱华. 真空预压法地下水位分析及测试方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 684－688.
GAO Zhi-yi, HOU Jin-fang, LIANG Ai-hua. Analysis and test method for groundwater level by vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.2): 684－688.

[9] 娄炎, 何宁. 地基处理监测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 322－323.
LOU Yan, HE Ning. Foundation treatment monitoring technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 322－323.

[10] 鲍树峰, 董志良, 娄炎, 等. 一种适用于真空预压地基处理技术的地下水位测试装置及系统: 中国, CN 203629640 U [P]. 2014-06-04.
BAO Shu-feng, DONG Zhi-liang, LOU Yan, et al. Underground water level test device and system applicable to vacuum preloading foundation treatment technology: China, CN 203629640 U [P]. 2014-06-04.