

含承压水软基真空联合堆载预压加固试验研究

金小荣¹, 俞建霖^{2*}, 龚晓南², 黄达宇³, 杨雷霞³

(1. 浙江大学建筑设计研究院岩土工程分院, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 3. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310007)

摘要: 运用真空联合堆载预压法加固含承压水软基, 简要介绍了防止承压水贯通的施工工艺。对港湾变电所软基加固试验中的地表沉降、分层沉降、土体深层水平位移和出水量等现场测试结果进行了分析。试验结果表明: 真空联合堆载能有效消除含承压水层软基沉降, 地基平均固结度为 83%, 工后沉降较小, 能满足变电所软基工后沉降要求。对地基土体的加固效果进行了室内和现场试验。结果表明: 真空联合堆载预压后土体的抗剪强度和承载力显著提高, 加固效果十分明显。从单泵出水量和承压水层的压缩量来看, 真空联合堆载预压过程中并未贯通承压水地层。加固后软基地部含水率比中部小, 表明底部软土层向圆砾层排水加速软基固结。试验的成功进一步拓展了该法的应用领域, 对类似地质条件下的真空联合堆载预压设计、施工和科研具有借鉴意义。

关键词: 真空联合堆载预压; 承压水; 现场试验; 加固效果

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)05-0789-06

作者简介: 金小荣(1977-), 男, 浙江萧山人, 博士研究生, 主要从事地基处理和基坑工程方面的研究工作。E-mail: jxr27@126.com。

Field tests on soft soil with confined underground water by vacuum-surge preloading

JIN Xiao-rong¹, YU Jian-lin², GONG Xiao-nan², HUANG Da-yu³, YANG Lei-xia³

(1. Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University, Hangzhou, 310012, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Zhejiang Provincial Electric Power Design Institute, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Soft clay deposits with confined underground water were strengthened by vacuum-surge. Technology of the tearing membrane combined with the non-tearing membrane was introduced. The details of settlements, multi-point settlements and deep horizontal displacements were presented and analyzed for the field tests on Gangwan substation. It was shown that the main settlements could be eliminated effectively by vacuum-surge preloading at soft foundation with confined underground water, the average degree of consolidation of soft soil was 83% which would last for more than 100 years. The shear strength and bearing capacity of silt would increase obviously after preloading as indicated by indoor and outdoor comparison tests. Viewed from the flow of single pump and the compression of stratum with confined underground water, the lower confined underground water was not influenced by vacuum loading. The success of this technology would promote greatly the application of vacuum-surge preloading.

Key words: vacuum-surge preloading; confined underground water; field test; reinforcing result

0 前言

真空联合堆载预压法是加固软土地基的一种有效的处理方法^[1], 综合了真空预压法与堆载预压两者的优点。近年来, 该法在码头堆场、机场、发电厂、高速公路和高等级公路桥头段等软基处理中得到广泛应用^[2-4]。该技术用于加固变电所软基较少^[5], 在台州地区的 220 kV 港湾变电所软基作为试验项目成功实施, 为解决变电所软基的不均匀沉降、长期沉降等质量问题提供了一种较好的处理方法。

当变电所位于软基上时, 为满足一般建(构)筑物、构支架等沉降控制要求, 必须对软基进行处理。目前主要采用堆载预压和复合地基或桩基础^[6-7]。传统的堆载预压法虽然造价低, 但工期长, 工后沉降较大; 复合地基工期短, 工后沉降和不均匀沉降较小, 但处理费用较高。若采用桩基础, 则造价相对更高, 通常

收稿日期: 2006-02-27

*通讯作者

表 1 地基土的物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土样编号名称	厚度/m	含水率 w/%	比重 G_s	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比 e_0	饱和度 $S_r/\%$	竖向固结 系数 $c_v/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	水平固结 系数 $c_h/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	锥头阻力 q_c/MPa	侧摩阻力 f_s/kPa
1 耕土	0.5~0.6									1.1	36.9
2 黏土	0.5~1.7	37.9	2.73	18.01	0.939	96.4	0.96×10^{-3}	1.05×10^{-3}	3.67	0.4	29.2
3 淤泥	3.9~10.8	64.5	2.75	16.47	1.754	99.7	0.43×10^{-3}	0.67×10^{-3}	1.70	0.3	5.60
3-1 黏土夹砂	0.5~1.1									1.7	20.6
4 圆砾	2.0~7.3									4.9	57.5
5 黏土	1.9~9.4	34.0	2.75	18.98	0.940	98.8			6.03	1.1	36.9

变电所内重要建筑物及支架采用桩基础，其他如电缆沟等采用天然浅基础。故所内场地、道路和电缆沟沉降大，而建筑物和支架沉降较小，严重时会造成变电所内开关闸刀的电缆保护套拉出、水管拉断和设备倾斜等不良后果，已严重威胁变电所的正常运行^[8]。

港湾变电所地基属于软土地基，软土最大厚度约 11.0 m，软土层下为承压水层。针对以往处理方法的不足，220 kV 港湾变电所软基采用了真空联合堆载预压处理，并进行试验课题研究。本文对港湾变电所真空联合堆载预压加固软基现场试验的的监测成果和加固效果进行了分析。

1 工程概况

1.1 工程概况及水文地质条件

220 kV 港湾变电所地基处理面积自围墙每边外 3.85 m 共 25920 m²。塑料排水板间距 1.2 m，平面呈梅花型分布，为防止承压水贯通打设塑排板采用撕膜和非撕膜施工工艺。加固区共布置 32 台真空泵（包括备用泵），一般开 24~25 台泵。2005 年 5 月 8 日开始抽真空，8 月 18 日开始堆载，11 月 21 日塘渣填筑完毕，开始真空联合堆载预压，2006 年 1 月 15 日停止抽真空，加固区累计最大沉降为 1252 mm，真空联合堆载加固软基的效果较为明显。抽真空初期由于砂垫层流失导致密封膜损坏而难于维持设计规定的真空度，进行三次主要维修，真空预压过程中经历了海棠、麦莎、泰利和卡努四个较强台风。

场地自然地面平均标高为 2.2 m，设计场地标高取 5.50 m。变电所所址西侧为沙岙村，南面为低山。场地地形平坦，原为文旦树地，水田和养殖塘。土层分布与物理力学性质指标见表 1，其中 3 层淤泥为软基主要压缩层，场地部分区域存在 3-1 夹砂层且靠南面山坡处较明显。所址场地地下水类型浅部为潜水，埋深一般为 0.8~1.2 m。另据勘测调查，深部圆砾层为承压水层，承压水水头在-0.67~-1.54 m 之间。

1.2 防止承压水贯通施工工艺介绍

当软土层不均匀时，采用撕膜施工工艺，即将塑排板下端 1.5 m 长度的滤膜撕掉，塑料排水板打设至圆砾层，可防止承压水贯通。直接撕膜从技术讲较为可靠，但直接撕膜相当于损失 1.5 m 长的排水板且需人工实施，对于大面积软土处理工程极为不经济。当软土层厚度均匀时，采用非撕膜施工工艺，即首先把加固区划分成 15 m×15 m 方格，在四个角点和中心点用施工排水板机械空插来确定软土层厚度，打设的塑排板的长度为软土层厚度减去 1.5 m，这样既可以节约 1.5 m 长塑排板，又可以防止承压水贯通。实践证明：撕膜与非撕膜施工工艺应用在含承压水地层既可靠又经济。

2 现场测试方案布置

现场测试元件埋设包括：真空度测头、孔压计、深层沉降管和磁环、沉降标、测斜管、水位管、出水量观测池。由图 1 可见，在加固区内共埋设 22 个沉降标；加固区外共设置 19 个沉降标，以监测影响区的地表沉降特征；同时在周围建筑物、铁塔、临时办公用房设置沉降观测点，监测真空预压对周围环境的影响。在本试验场地共打设 6 根分层管（FC1~FC6），其中 FC5 位于加固区外，其余各分层管位于加固区内，打设深度为 8~14 m，磁环沿深度方向每隔 2 m 布置一个。本次试验在淤泥中共布置 5 组孔压计，1~4 组在加固区内，每组钻孔 2 个；另外场地不同处的两个砂井内各埋设 4 个孔压计。试验中共打设 7 根测斜管（CX1~CX7），其中 CX1 和 CX2 分别位于应力释放沟（深 2 m，宽 2 m，长 15 m）两侧，释放沟距加固区边线 4 m；CX3~CX5 位于场地东侧布置距加固区边线依次为 2.5，12.5 和 27.5 m；CX6 和 CX7 分别位于三排双向Φ600@450 mm 水泥搅拌桩两侧，搅拌桩距加固区边线 4m，打设深度至 4 层圆砾层。加固区内外分别布置 4 根水位管（SW1~SW8）。在抽真空过程中对出水量进行观测，研究含承压水层下真空联合堆载预压的出水量的变化规律。

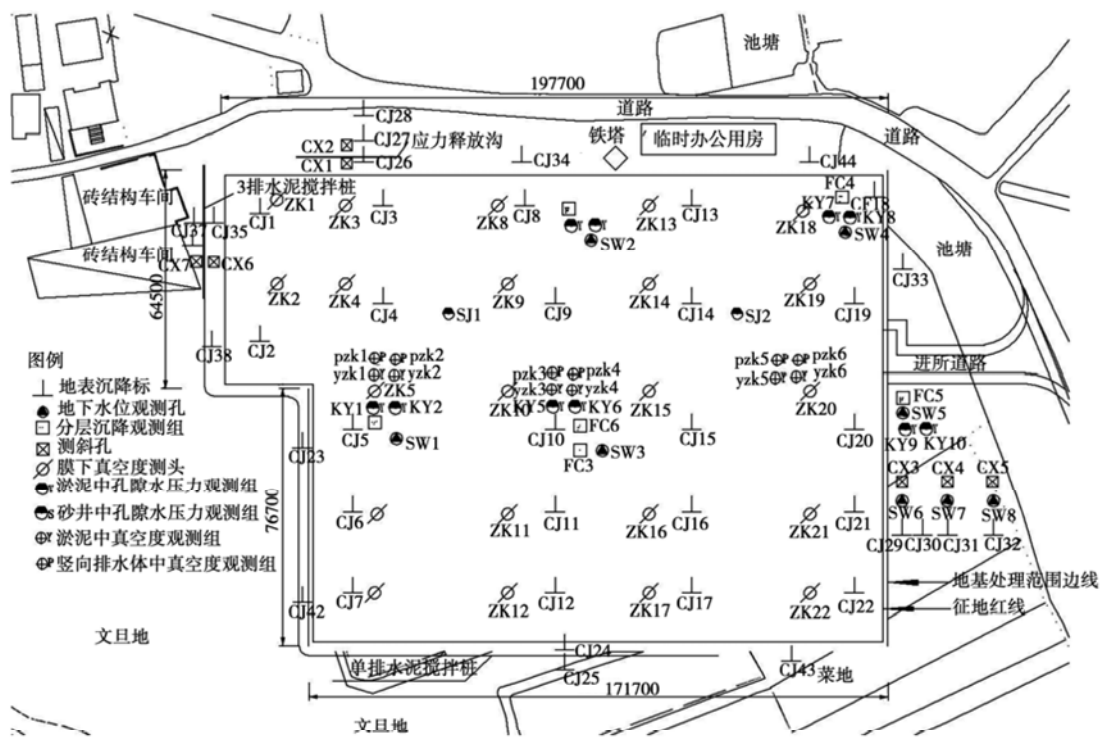


图 1 真空联合堆载监测平面布置图

Fig. 1 Layout of monitoring in vacuum-surge preloading

3 测试成果及分析

真空联合堆载预压法处理变电所软基和在含承压水地层应用都尚未有报道, 因此有必要在施工过程中进行动态观测和试验研究, 及时指导现场施工和对真空联合堆载预压加固含承压水软基的力学性状进行研究, 为该工法在类似地质条件应用积累经验。

3.1 地表沉降

从图 2 中可以看出, 在真空预压的前期地基沉降发展较快, 但随着时间的增长沉降速率逐渐减小; 开始堆载后, 沉降再次呈现出快速增长趋势, 堆载结束后, 沉降速率又逐步开始减小。

沉降速率在 2.5~3.5 mm/d。抽真空结束后, 加固区出现一定的反弹, 其值在 1~10 mm 之间。场地东侧反弹不明显, 截止 2006 年 2 月 10 日场地内平均沉降速率已接近 0 mm/d, 地基土沉降基本稳定。

加固区 22 个沉降标在抽真空结束时平均沉降量为 1014 mm, 场地内各沉降点用固结度对数配合法(曾国熙, 1985)推算的最终沉降量平均值为 1219 mm, 从图 3 中可以看出, 加固区东北处沉降最大, 朝西侧和南侧方向软土较浅处依次减小。截止 2006 年 2 月 10 日场地内已消除的平均沉降量为 1018 mm, 地基平均固结度已达 83%。场地平均工后沉降为 200 mm, 需上百年地基才能达到完全固结, 说明工后沉降较小, 完全能满足变电所软基的工后沉降要求。

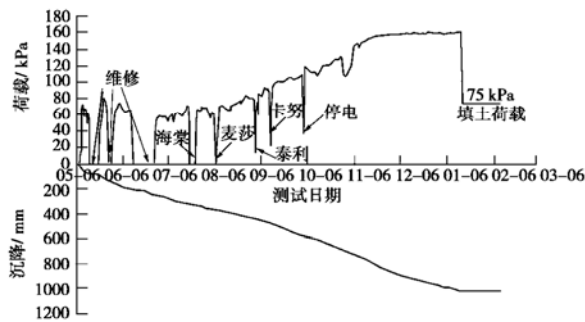


图 2 荷载、沉降随时间变化图

Fig. 2 Variation of load and surface settlement with time

抽真空结束时堆载结束相对较早的场地西部沉降速率已减小至 1~3 mm/d; 场地东侧因最后完成堆载,

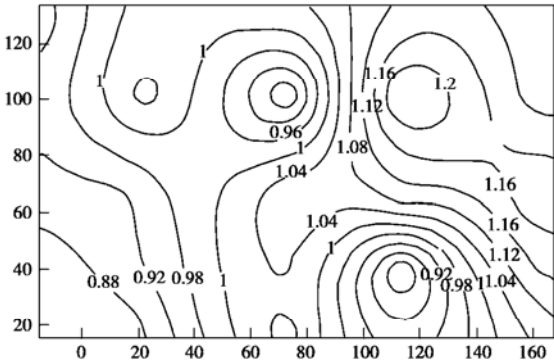


图 3 抽真空结束时地表沉降等值线

Fig. 3 Contour of surface settlement at the moment of unloading

3.2 分层沉降

从图 4 中可以看出, 自 5 月 8 日开始抽真空至 8 月 18 日的真空预压阶段, 不同深度的磁环在开始阶段迅速下降, 随着抽真空时间的增加, 各点的沉降速率逐渐变小。浅部的沉降大于深部的沉降, 其中 2~9 m 的淤泥层压缩量最大, 约占总沉降量的 81%, 4 层圆砾层 (承压水层) 几乎没有压缩量, 下卧层沉降量较小, 只占总沉降量的 2%。从分层沉降的结果看, 真空预压的有效影响深度可以达到塑排板打设深度下 1.5 m。自 8 月 18 日开始堆载后, 深层沉降速率又开始增大, 真空联合堆载预压效果开始体现, 堆载后期深部磁环损坏而无法观测。在 1 月 15 日抽真空结束后, 各磁环沉降速率明显变小。

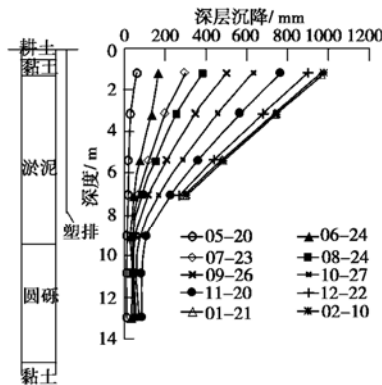


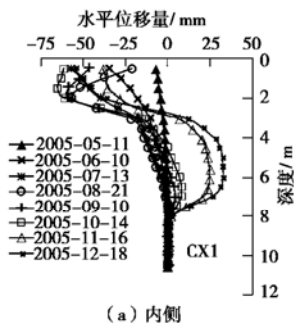
图 4 FC6 土体深层沉降随时间变化图

Fig. 4 Variation of deep settlement with time for FC6

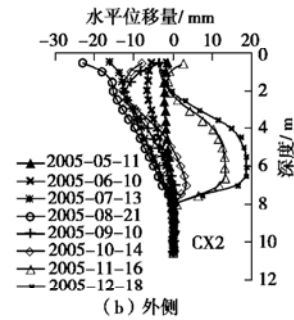
3.3 深层土体水平位移

真空预压加固软基时, 被加固土体出现收缩变形, 周围土体往往因为收缩变形而开裂。已有许多文献对水平位移随深度的变化规律进行了研究, 也有文献对加固区土体水平位移随水平距离的变化进行了研究, 而研究如何减小周围土体侧向变形的作用则较少。如图 1 所示, 本试验分别对采用水泥搅拌桩隔离、应力释放沟开挖减小周围土体变形的作用进行了深入的探讨。

图 5, 6 分别为释放沟 (CX1~CX2) 和隔离墙 (CX6~CX7) 两侧深层土体水平位移随时间变化曲线 (负值表示位移朝加固区), 两者在真空联合堆载预压下的水平位移具有如下主要特点:



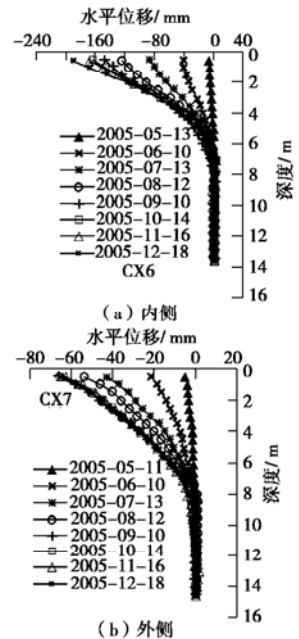
(a) 内侧



(b) 外侧

图 5 应力释放沟内外侧土体侧向变形图

Fig. 5 Lateral displacements of soil inside and outside release trench



(b) 外侧

图 6 搅拌桩内外侧土体侧向变形图

Fig. 6 Lateral displacements of soil inside and outside mixed piles

(1) 真空预压引起的土体侧向变形主要发生在地表下 6 m, 桩外侧最大土体水平位移仅为内侧的 1/3, 表明搅拌桩的隔离保护作用比较明显。

(2) 堆载后搅拌桩内侧水平位移继续朝加固区发展, CX6 最大水平位移接近 200 mm, 而外侧的水平位移变化较小。加载前后搅拌桩内外侧 6 m 以下土体变形量都较小, 最大水平位移仅为 6 mm; 无隔离桩处深部水平位移在加载后发生明显挤出 (见图 5), 表明水泥搅拌桩的遮拦效用明显。

(3) 真空预压阶段设置应力释放沟可大大减小加固区外土体水平位移。沟内侧最大水平位移为 60 mm, 仅为搅拌桩内侧水平位移的 3/10; 沟外侧最大水平位移为 25 mm, 为桩外侧水平位移的 3/8, 说明为减小侧向变形设置应力释放沟要优于设置水泥搅拌桩。

(4) 堆载后应力释放沟下部土体向外挤出较为明显。在真空联合堆载预压工程中, 当填土较高或较快时应慎用应力释放沟。

3.4 加固区出水量

通过场地出水量的观测, 可研究含承压水层真空联合堆载预压的出水量的变化规律。图 7 为 2005 年 5 月 9 日至 2006 年 1 月 15 日近 8 个月时间内加固区总出水量的变化情况。由图 7 可知, 抽真空初期出水量较大, 总出水量一般在 1000 m³/d 以上, 随着抽真空时间增加出水量又迅速减小。抽真空初期由于砂垫层流失导致密封膜损坏而难于维持设计规定的真空度, 进行三次主要维修, 同时抽真空过程中经历海棠、麦莎、泰利和卡努四个较强台风。在维修和台风过后, 加固区出水量有较大上升, 随后迅速减小。在真空联合堆载预压后期总出水量较小且比较稳定, 一般在 200 m³/d 左右, 单泵出水量为 10 m³/d, 出水量小于台州某桥头段深厚软基真空联合堆载预压的单泵出水量值 20 m³/d (详见文献 9)。由此可见, 本次真空联合堆载预压并未贯通承压水地层。

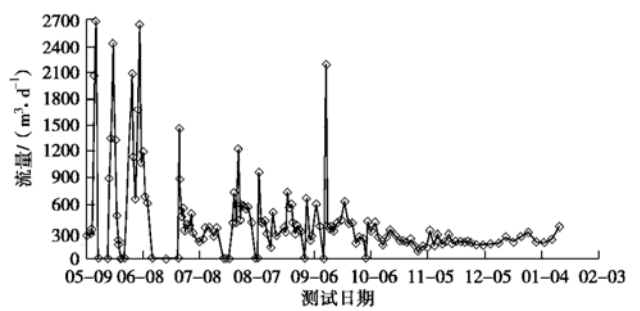


图 7 加固区总出水量随时间变化

Fig. 7 Variation of total water flux in treating zone

3.5 加固效果分析

对真空联合堆载预压加固前后的土的物理力学性质指标进行了室内和现场试验比较分析。室内试验表明加固后淤泥的含水率为 54.7%, 比原状土减小了 15.2%, 加固后的土体的孔隙比为 1.479, 比原状土减小了 15.7%, 土体压缩模量由 1.7 MPa 提高到 2.34 MPa, 直剪和三轴剪切试验表明土体抗剪强度指标也有大幅提高。加固前后 3 层淤泥土的主要物理力学性质指标见表 2。

表 2 加固前后 3 层淤泥土的主要物理力学性质指标

Table 2 Physical and mechanical properties of silt before and after

soil treatment								
土样 状态	含水率 w/%	重度 γ/(kN·m ⁻³)	孔隙比 e ₀	压缩模量 E _{s1-2} /MPa	直剪		三轴	
					c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)
加固前	64.5	16.47	1.754	1.70	9.2	9.0	15.3	1.7
加固后	54.7	16.71	1.479	2.34	13.6	11.9	23.3	3.3

图 8, 图 9 (a) 为土体加固前后静力触探和十字板现场试验对比图。由图 8 中可知, 加固土的锥尖阻力和侧摩阻力比原状土分别都有大幅度增长。锥尖阻力浅部增长幅度稍大, 深部增长幅度略小, 加固后在

整个加固区内土质较为均匀。从图 9 (a) 可以看出, 土体加固后的抗剪强度在整个加固区范围内有较大幅度的提高, 说明真空联合堆载预压可以大幅度提高软土地基的承载力。承载力提高幅度从加固区的不同区域来看, 场地中央>场地边缘>场地角落, 反映出真空联合堆载预压的空间效应。由图 9 (b) 可知, 加固后土体含水率较加固前已大大减小, 一般场地中央含水率的减少大于场地边缘和角落; 浅部减少程度远大于深部, 场地中央加固区底部含水率也有较大变化, 表明加固区底部软土层向圆砾层排水加快软基固结。原位测试结果表明真空联合堆载预压加固效果显著。

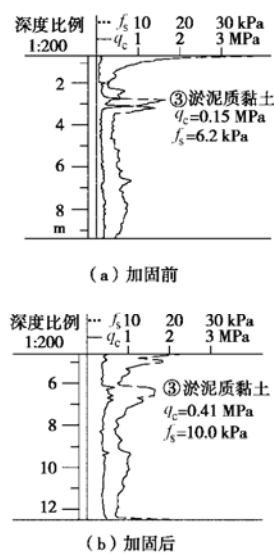


图 8 加固前后静力触探试验对比

Fig. 8 CPT before and after soil treatment

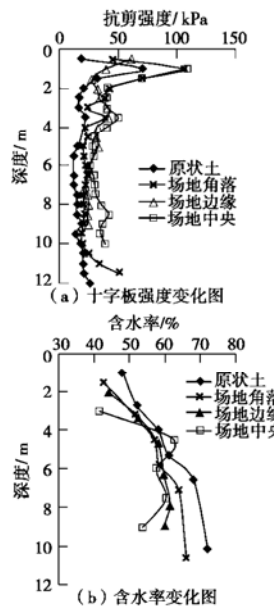


图 9 加固前后十字板强度、含水率变化图

Fig. 9 Vane strength and water content before and after soil improvement

4 结 语

(1) 加固后, 变电所软基平均固结度已达加固区固结度为 80% 的设计要求, 平均工后沉降较小, 可见真空联合堆载预压能有效解决变电所软基长期沉降和不均匀沉降等常见问题。

(2) 分层沉降监测成果表明, 浅部的沉降大于深部的沉降, 其中 2~9 m 的淤泥层压缩量最大, 4 层圆砾层几乎没有压缩量, 下卧层沉降量较小。

(3) 真空预压引起的土体侧向变形主要发生在地表下 6 m, 桩外侧最大土体水平位移仅为内侧的 1/3, 加载前后搅拌桩内外侧 6 m 以下土体变形量都较小; 无隔离桩处深部水平位移在加载后发生明显挤出, 表明水泥搅拌桩的遮拦效用明显。

(4) 堆载后应力释放沟下部土体向外挤出较明显, 当填土较高或较快时应慎用应力释放沟。

(5) 加固后土体抗剪强度和含水率的减少程度从大到小依次为场地中央>场地边缘>场地角落, 反映出真空联合堆载预压的空间效应。场地中央加固区底部含水率也有较大变化, 表明底部软土层向圆砾层排水加速软基固结。

(6) 从单泵出水量和承压水层的压缩量来看, 本次真空联合堆载预压并未贯通承压水地层。室内试验表明加固后的软基物理力学性质具有较大改善; 现场十字板剪切试验与静力触探试验比较分析说明, 真空联合堆载预压可以大幅度提高软土地基的承载力, 加固效果十分显著。

参考文献:

- [1] 娄 炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (LOU Yan. Technique of vacuum drainage preloading[M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 范志强, 刘小峰, 马建宏. 真空联合堆载预压处理深圳机场软土地基[J]. 人民长江, 2001, 32(4): 22 - 24. (FAN Zhi-qiang, LIU Xiao-feng, MA Jian-hong. Soft foundation of shenzhen airport improved by vacuum-surge preloading[J]. Yangtze River, 2001, 32(4): 22 - 24. (in Chinese))
- [3] 黄知元. 真空联合堆载预压法在高速公路软基加固中的应用[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(2): 80 - 84. (HUANG Zhi-yuan. Application of vacuum-surge preloading in soft ground of expressway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 2003, 22(2): 80 - 84. (in Chinese))
- [4] 朱建才, 陈兰云, 龚晓南. 高等级公路桥头软基真空联合堆载预压加固试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2160 - 2165. (ZHU Jian-cai, CHEN Lan-yun, GONG Xiao-nan. Testing study on reinforcing soft foundation of highway bridge-head by vacuum combined with surge preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2160 - 2165. (in Chinese))
- [5] 冯仁祥, 黄达宇, 毛志兴. 真空预压法处理变电所场地软基[J]. 浙江建筑, 2002, 2: 24 - 25. (FENG Ren-xiang, HUANG Da-yu, MAO Zhi-xing. Soft foundation of transformer substations improved by vacuum preloading[J]. Zhejiang Jianzhu, 2002, 2: 24 - 25. (in Chinese))
- [6] 闫明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. Technique and practice of composite foundation of CFG piles[M]. Beijing: Chinese Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [7] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (GONG Xiao-nan. New technique of soil treatment[M]. Xi'an: Shangxi Science Press, 1997. (in Chinese))
- [8] 毛志兴. 宁波 500 kV 天一变、河姆变地基不均匀沉降原因分析[J]. 浙江电力, 2005, 3: 52 - 54. (MAO Zhi-xing. Analysis on unbalanced sedimentation of 500 kV Hemu and Tianyi transformer substations in Ningbo[J]. Zhejiang Electric Power, 2005, 3: 52 - 54. (in Chinese))
- [9] 朱建才. 真空联合堆载预压加固软基机理及工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. (ZHU Jian-cai. Mechanism and technology of vacuum combined with surge preloading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))