

文章编号:1673-2049(2011)02-0079-05

# 软土地基高真空击密法与低位高真空分层 预压击密法加固效果分析

李镜培<sup>1,2</sup>, 马 原<sup>1,2</sup>, 杨培芳<sup>3</sup>, 饶平平<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 吴江城市投资发展有限公司, 江苏 吴江 215220)

**摘要:**以江苏省吴江市高等级道路地基处理工程为例,探讨了高真空击密法和低位高真空分层预压击密法的适用性,介绍了2种方法的原理,并与现场静力触探试验进行对比分析,研究了2种方法对软土的加固规律。结果表明:2种方法处理后的软土地基强度得到了不同程度的提高,采用低位高真空分层预压击密法处理后的地基加固效果更好。

**关键词:**软土地基;地基处理;高真空击密法;低位高真空分层预压击密法

**中图分类号:**TU449 **文献标志码:**A

## Analysis of Strengthening Effect of HVDM with SHVLPDM in Soft Soil Foundation

LI Jing-pei<sup>1,2</sup>, MA Yuan<sup>1,2</sup>, YANG Pei-fang<sup>3</sup>, RAO Ping-ping<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Wujiang City Investment and Development Co., Ltd., Wujiang 215220, Jiangsu, China)

**Abstract:** Taking the project-foundation treatment with advanced road in Wujiang district, Jiangsu Province as an example, authors discussed the two updated skills of soft foundation treatment, i. e. high vacuum densification method (HVDM) as well as shallow high vacuum layered preloading and densification method (SHVLPDM). Based on theories of the two methods, authors analyzed the data of static cone penetration test measured on site correlatively to explain the advantage of SHVLPDM while dealing with soft foundation. The results indicate that the bearing capacities of soil foundation after treating are improved in different degrees by two methods, and the treatment effect by SHVLPDM would be better.

**Key words:** soft soil foundation; foundation treatment; high vacuum densification method; shallow high vacuum layered preloading and densification method

## 0 引言

近年来,随着中国经济建设的飞速发展,高等级道路的建设需求也不断增大。但由于不同地质条件

形成的特殊性,尤其在长江三角洲地区,沿线道路路基下经常存在深厚的软土层。在软土地基上修建道路时,若对地基处理不当,有可能因为地基差异沉降过大而影响道路的正常使用功能。软土地基的处理

收稿日期:2011-04-09

基金项目:苏州市科技计划项目(WS200927)

作者简介:李镜培(1963-),男,江西信丰人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lijp2773@tongji.edu.cn。

质量直接影响到路基的承载力与变形,也是保证道路建成后安全、高效运营的关键,因此,探索和改进软土地基处理工艺,进而选择最适用的软土地基处理方法,具有重要的社会效益和经济价值。

目前,对于软土地基常规的处理方法主要有排水固结法、换土垫层法、强夯法和拌入法等,这些方法都有各自的适用范围和局限性。针对上述地基处理方法中存在的不足,上海港湾软地基处理工程有限公司提出了高真空击密和低位高真空分层预压击密 2 种新方法处理软土地基,并将其应用在江苏省吴江市高等级道路软基处理工程中。根据现场静力触探监测资料分析,2 种处理方法均取得了一定程度的处理效果,但具有一定差别,现对以上 2 种处理方法的加固效果进行对比分析。

## 1 工程背景

江苏省吴江市地处长江三角洲核心区域,是苏州对沪浙一带的重要门户,其快速增长的经济极大地促进了该地区交通运输的发展,特别是高等级公路建设项目日益增多。吴江市滨湖新区毗邻太湖,区内河道、湖泊众多,造成该地区工程条件比较复杂,淤泥层厚度不一,各类土的工程性能相差较大,其地貌单元属于长江三角洲太湖流域冲积、湖积平原区,拟建道路穿越鱼塘、河道、农田及少量民房。

吴江市滨湖新区道路软土地基处理工程位于吴江市松陵镇滨湖新区,拟修建 4 条道路,分别为鲈乡南路、高新路、人民路和学院路。道路长度为 0.5~4.8 km,道路宽度为 44~60 m,总地基处理面积约为  $62.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。道路软土地基处理的目的是提高地基承载力,满足道路使用要求。根据该工程的特点及要求,处理后的地基需达到以下指标:地基承载力满足 110 kPa;工后沉降小于 20 cm。

## 2 方法介绍

### 2.1 高真空击密法

高真空击密法是一种新型快速真空动力排水固结方法,它通过对需处理的软土体施加数遍高真空,并施加数遍相应的变能量击密,达到降低土体含水量,提高土体密实度和承载力,减少地基的工后沉降量与差异沉降量。高真空击密法将强夯与真空排水固结有机结合起来,有效地避免了单纯使用强夯对高饱和软粘土加固时出现的“橡皮土”现象,使得夯击能可以向地基深处扩散,起到更好的加固效果,并且大大缩短了工期,节约了造价<sup>[1-5]</sup>。具体施工步骤

如下<sup>[6-13]</sup>:

步骤 1:在研究地质资料的基础上,对施工现场需处理土体进行详细勘察,取得土体的岩性、粒度、含水量和渗透系数等基础资料,分析场地饱和软土的分布规律及竖向变化,为确定施工参数提供依据。

步骤 2:按快速动力排水固结法原理确定施工参数和控制工后沉降量。

步骤 3:进行第 1 遍高真空击密,实施第 1 遍处理后的效果现场检测。

步骤 4:按步骤 3 调整施工参数,进行第 2 遍高真空击密以及第 2 遍处理后的效果检测。

步骤 5:进一步调整参数,进行第 3 遍高真空击密。

步骤 6:进行处理后的主要指标检测,包括静力触探试验、标贯试验、荷载试验及瑞利波法等测定加固土体的各项指标。

### 2.2 低位高真空分层预压击密法

上海港湾软地基处理工程有限公司经过多年实践积累,在快速高真空击密等工法的基础上,研究开发了快速低位高真空分层预压击密软地基处理方法,该方法是在高真空击密前首先进行一段时间的低位高真空分层预压,具体施工过程如下:

(1)低位预压阶段:①回填部分素填土;②铺设 40 cm 砂垫层;③插设塑料排水板,排水板长度为 8~11 m,因淤泥层厚度不一,排水板长度以插设到淤泥层底部为准(施工中可控制),塑料排水板间距为 0.9~1.0 m;④铺设土工布和真空膜,进行低位预压,预压时间约 3~4 个月;⑤在低位预压稳压后向预压区内覆水,覆水高度为 1.0~1.5 m,因道路有起伏,故覆水高度不一。

(2)高真空击密阶段:①插设真空管,真空管分深管和浅管,深管间距(3.0~4.0) m $\times$ 3.5 m,长度 6 m,浅管间距(6.0~8.0) m $\times$ 3.5 m,长度 3 m;②进行高真空排水,每遍高真空排水后进行 1 遍击密,共进行 2 遍点击密,2 遍击密后击密点间距为 3.0 m $\times$ 3.0 m。

## 3 加固效果对比

选取吴江市人民路部分路段为例,分析高真空击密法的加固效果。人民路的场地土层从上至下分布为:淤泥、素填土、粉质粘土、淤泥质粉质粘土和粘土。其中,淤泥层厚 0.10~2.50 m,压缩性极高,工程性能差;素填土层的成分以粘性土为主,层厚 0.30~4.40 m,压缩性高,工程性能较差;粉质粘土

层厚 0.50~2.40 m,压缩性中等,工程性能一般;淤泥质粉质粘土层含有少量有机质及腐质物,局部夹有粉土薄层,层厚 0.40~8.20 m,压缩性高,工程性能差;粘土层厚 1.20~5.10 m,压缩性中等,工程性能较好。由此可见,人民路软土地基中主要待处理的是淤泥层和素填土层。

利用现场静力触探试验对处理后的地基土进行检验,结果表明,高真空击密法对场地地面以下 0~5 m 的土体均能起到不同程度的加固作用。处理前后的压力值对比结果如图 1 所示,其中,  $P_s$  为压力,  $Z$  为深度。

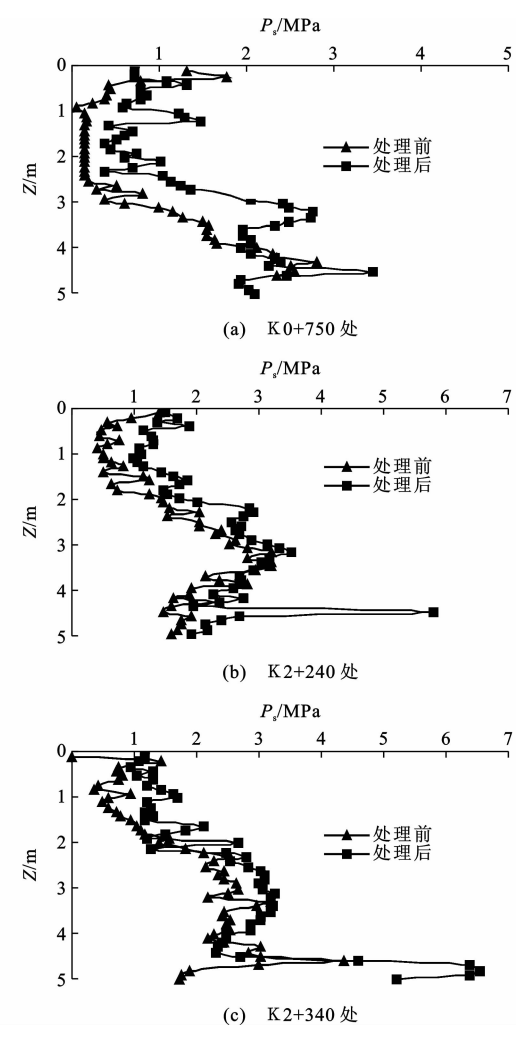


图 1 高真空击密法加固前后静力触探曲线  
Fig. 1 Static Cone Penetration Curves of HVDM Before and After Strengthening

由图 1 可以看出,浅层土(地面以下 1.5 m 以内)经过高真空击密处理后强度有了一定的提高,处理后的淤泥层在强度与变形性质方面都有较明显的改善。K0+750 处浅层土经过处理后的  $P_s$  平均值为 0.895 MPa,比处理前的初始  $P_s$  值提高了

92.4%;K2+240 处浅层土经过处理后的  $P_s$  平均值为 1.339 MPa,比处理前的初始  $P_s$  值提高了 91%;K2+340 处浅层土经过处理后的  $P_s$  平均值为 1.262 MPa,比处理前的初始  $P_s$  值提高了 83.6%。图 1(a)中,K0+750 处 0.3~2.5 m 处理前的  $P_s$  值偏小,平均值为 0.238 MPa,可以推断该区域是淤泥层,处理后的  $P_s$  平均值达到了 0.828 MPa,提高了 2.48 倍。此外,由图 1 还可以看出,高真空击密法对浅层以下土体也起到了一定的加固效果。这是由于高真空排水与高夯能击密的共同循环作用使饱和软土体在短时间内迅速形成低含水量、高密实度的硬壳层,因此施加强夯后夯击效应得到迅速提高,并且可以向地基深处扩散,起到一定的加固效果,没有出现“橡皮土”的现象,说明该处理技术在软土地基路段有较好的适用性。

选取吴江市鲈乡南路部分路段为例,分析低位高真空分层预压击密法的加固效果。鲈乡南路的场地土层从上至下分布为:淤泥、素填土、粉质粘土、淤泥质粉质粘土和粉质粘土。其中,淤泥层厚 0.30~1.30 m,压缩性极高,工程性能差;素填土层成分以粘性土为主,层厚 0.50~3.60 m,压缩性高,工程性能较差;粉质粘土层厚 1.0 m 左右,压缩性中等,工程性能一般;淤泥质粉质粘土层厚 0.6~16.6 m,部分路段缺失,压缩性高,工程性能差;粉质粘土层厚 1.5~4.4 m,压缩性中等,工程性能一般。与人民路情况类似,鲈乡南路软土地基中主要待加固的也是淤泥层和素填土层。

利用现场静力触探试验对处理后的地基土进行检验,结果表明,地基加固效果十分明显。低位高真空分层预压击密法加固前后静力触探曲线如图 2 所示。

由图 2 可以看出:浅层土(地面下 1.5 m 以内)经过低位高真空分层预压击密处理后,强度有了不同程度的提高,K1+930 处浅层土经过处理后的  $P_s$  平均值为 1.685 MPa,比处理前的初始  $P_s$  值提高了 185.54%;K1+960 处浅层土经过处理后的  $P_s$  平均值为 1.681 MPa,比处理前的初始  $P_s$  值提高了 318.77%;K2+020 处浅层土经过处理后的  $P_s$  平均值为 1.416 MPa,比处理前的初始  $P_s$  值提高了 173.36%。此外,由图 2 还可以看出,3 个路段深度在 1.5~5 m 范围土层的  $P_s$  值都有所增加,且整体性较好,但整体提高幅度没有浅层土的  $P_s$  值明显。究其原因是:深度在 1.5~5 m 范围土层的  $P_s$  值提高主要靠第 1 阶段的低位预压,深层土的整体强度

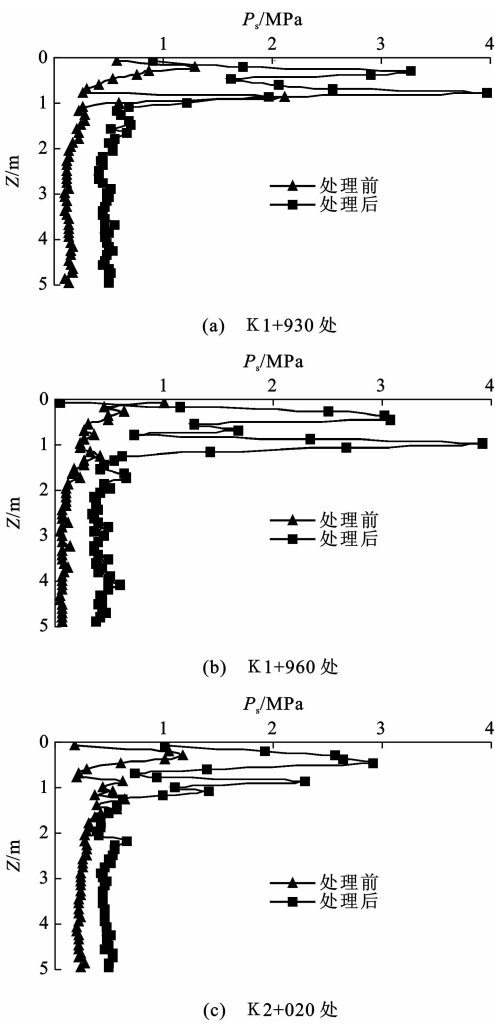


图2 低位高真空分层预压击密法加固前后静力触探曲线

Fig. 2 Static Cone Penetration Curves of SHVLPDM Before and After Strengthening

虽得到一定程度提高,但毕竟低位预压产生的荷载不大,故深层土体的强度提高幅度有限;而第2阶段的高真空击密产生的能量大部分被浅层软土吸收,使得这一部分土层的强度得到了较大的提高,形成了超固结的硬壳层。

高真空击密法与低位高真空分层预压击密法对软土地基的加固效果对比如表1所示。由表1可知,2种处理方法对软土地基的加固都有一定的效果,但低位高真空分层预压击密法无论是对软土地基整体的强度提高还是对浅层淤泥质土的性能改善都更加明显。高真空击密法对0~5 m范围内土层的 $P_s$ 值提高幅度为31%~99%,而低位高真空分层预压击密法对相应土层的 $P_s$ 值提高幅度为132%~286%,处理后的地基表层形成了理想的超固结层,能够有效地防止路面出现差异沉降的现象。

表1 2种方法加固效果对比

Tab. 1 Strengthening Effect Comparisons of Two Methods

深度/m	高真空击密法		低位高真空分层预压击密法	
	桩号	静力触探平均值提高幅度/%	桩号	静力触探平均值提高幅度/%
0.0~1.0	K0+750	44.14	K1+930	190.65
1.0~2.0		353.70		168.47
2.0~3.0		281.53		291.23
3.0~4.0		51.39		312.28
4.0~5.0		-7.62		240.56
0.0~1.0	K2+240	100.87	K1+960	334.22
1.0~2.0		62.96		259.05
2.0~3.0		32.25		318.28
3.0~4.0		8.79		366.67
4.0~5.0		50.03		517.81
0.0~1.0	K2+340	88.37	K2+020	215.75
1.0~2.0		57.65		54.29
2.0~3.0		15.98		102.60
3.0~4.0		18.65		117.62
4.0~5.0		57.50		140.63

由于软土存在着较为特殊的工程特性,饱和度很高,因此,在动力固结时产生的超静孔隙水压力难以消散,容易出现“橡皮土”现象,所以,能否让超孔隙水压力快速消散,使软土中的水排出,直接影响到后期的击密效果,也是对比这2种方法的重要依据。鉴于此,用低位高真空分层预压击密法在第1阶段首先对土体进行了一定程度的高真空排水预压,使得地基土有了个前期固结的过程,超静孔隙水压力得到充分的消散。这样在第2阶段进行高真空击密时,可以让击密产生的能量能够更好地向地基深处传递,减少因荷载不均匀而产生的不均匀沉降,因此,低位高真空分层预压击密法对提高地基土的强度更有优势。

4 结 语

(1)根据江苏省吴江地区内河道、湖泊众多,淤泥层厚度不一的地质特点,采用高真空击密法和低位高真空分层预压击密法处理软土地基,处理后的地基强度得到了一定程度的提高。

(2)采用2种处理方法都获得了一定的处理效果,高真空击密法在浅层形成了硬壳层,提高了地基土的承载力,而低位高真空分层预压击密法在深部处理的效果相对于高真空击密法更加明显。

(3)2种方法都能使软土地基强度得到一定程度的提高,但在工期、造价等方面,高真空击密法明

显占有优势,低位高真空分层预压击密法的施工工期较长,成本较高。

## 参考文献:

## References:

- [1] 彭 博,邵永明.高真空击密法在软地基处理中的应用[J].海岸工程,2008,27(3):77-80.  
PENG Bo,TAI Yong-ming. Application of HVDM in Soft Soil Foundation Treatment[J]. Coastal Engineering,2008,27(3):77-80.
- [2] 吴连祥,邵锦周,宋雄兵.高真空击密法在软土路基加固中的应用[J].江苏建筑,2009(1):56-59.  
WU Lian-xiang,SHAO Jin-zhou,SONG Xiong-bing. Application of High Vacuum Compacting Method in Strengthening Soft Soil Roadbed [J]. Jiangsu Construction,2009(1):56-59.
- [3] 武亚军,章长松,张孟喜.高真空击密法油罐地基处理应用研究[J].港工技术,2007(6):44-46.  
WU Ya-jun,ZHANG Chang-song,ZHANG Meng-xi. Study on Application of Ground Treatment for Oil Tank Foundation with High Vacuum Compact Method[J]. Port Engineering Technology,2007(6):44-46.
- [4] 颜庆智,崔 亮,江立群.高真空击密法加固吹填土地基试验研究[J].建筑结构,2010,40(增2):605-608.  
YAN Qing-zhi,CUI Liang,JIANG Li-qun. In-situ Test Study on Hydraulic Fills Ground Reinforcement by High Vacuum Compaction Method[J]. Building Structure,2010,40(S2):605-608.
- [5] 徐士龙,楼晓明.高真空击密法加固吹填粉煤灰地基的实例[J].粉煤灰,2004(6):19-21.  
XU Shi-long,LOU Xiao-ming. Practical Example of High Vacuum Compacting Method Consolidating Dredge-fill Fly Ash Foundation[J]. Coal Ash China, 2004(6):19-21.
- [6] 王松臣.高真空击密法地基处理方法的应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2009.  
WANG Song-chen. Applied Research of High Vacuum Compacting Method in Foundation Treatment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2009.
- [7] 石 刚,支喜兰,谢永利,等.冲击压实和强夯加固地基效果分析[J].交通运输工程学报,2006,6(4):52-56.  
SHI Gang,ZHI Xi-lan,XIE Yong-li,et al. Effect Analysis of Percussive Compaction and Dynamic Compaction on Roadbed Reinforcement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2006,6(4):52-56.
- [8] 石 刚,王晋国,支喜兰,等.黄土地区公路工程地基承载力分区计算方法[J].交通运输工程学报,2005,5(4):48-52.  
SHI Gang,WANG Jin-guo,ZHI Xi-lan,et al. Calculation Method of Foundation Bearing Capacity Based on Division in Loess Area for Highway Engineering[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(4):48-52.
- [9] 姜 蓉,李昌宁.软土地基 CFG 桩加固技术[J].交通运输工程学报,2004,4(3):4-7.  
JIANG Rong,LI Chang-ning. CFG Pile Strengthening Technology of Soft Ground[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2004,4(3):4-7.
- [10] 全炳炎,卫建军,袁广林,等.煤矸石地基承载力与变形的试验研究[J].西安科技大学学报,2009,29(6):718-721.  
TONG Bing-yan,WEI Jian-jun,YUAN Guang-lin, et al. Experiment on Using Coal Slack as Building Foundation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2009,29(6):718-721.
- [11] 胡新民.粉喷和浆喷水泥桩加固软土地基的力学特性[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(6):42-44.  
HU Xin-min. Mechanical Characteristics of Soft Soil Foundation Reinforced with Powder-jetting and Grout-jetting Cement Piles [J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2010,27(6):42-44.
- [12] 王雪莲.塑料排水板加固处理软土地基的施工质量控制[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(5):52-54,66.  
WANG Xue-lian. Quality Control for Construction of Soft Soil Foundation Strengthened with Plastic Drainage Bar[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2010,27(5):52-54,66.
- [13] 周文明,于建军,邵国强,等.真空-堆载联合预压地基加固技术[J].筑路机械与施工机械化,2008,25(6):38-40.  
ZHOU Wen-ming,YU Jian-jun,SHAO Guo-qiang, et al. Foundation Reinforcement with Vacuum-heaped Load Combining Pre-compression[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2008,25(6):38-40.