

文章编号: 1000-1573(2011)04-0112-03

## 强夯法加固软土地基的试验研究

贾东远<sup>1</sup>, 王秉宇<sup>2,3</sup>, 朱宏权<sup>4</sup>, 邹红喜<sup>1</sup>

(1. 秦皇岛市建筑设计院, 河北 秦皇岛 066001; 2. 河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001;  
3. 河北省建筑科学研究院, 河北 石家庄 050021; 4. 唐山工程建设有限公司, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 采用强夯法新工艺对饱和软土地基进行了成功的加固处理。对强夯后地基土体的侧向位移、超静水压力的增长与消散规律等进行了现场试验研究。用静力触探实验和载荷实验对地基加固的效果进行了检验。探讨了强夯法有效加固深度的确定方法。实践表明, 采用现场试验手段确定强夯法的有效加固深度及其他设计参数是可靠的。

**关键词:** 强夯法; 饱和软土; 现场试验; 有效加固深度; 新工艺  
**中图分类号:** TU 472.31 **文献标志码:** A

### Experimental study on dynamic consolidation method to improve saturated soft soil foundation

JIA Dong-yuan<sup>1</sup>, WANG Bing-yu<sup>2,3</sup>, ZHU Hong-quan<sup>4</sup>, ZOU Hong-xi<sup>1</sup>

(1. Qinhuangdao Design Institute of Architecture, Qinhuangdao 066001, China;  
2. College of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China;  
3. Hebei Academy of Building Research, Shijiazhuang 050021, China;  
4. Tang Shan Engineering Construction Company Ltd, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** A new technology of dynamic compaction method is successfully used to reinforce the saturated soft soil foundation. The field monitoring laws of lateral displacement of the foundation after dynamic compaction, the increasing and dissipation regularity of the excess pore water pressure are analyzed and discussed. The improvement effect is verified by static cone penetration test and loading test. The determination methods of effective reinforcement depth after dynamic compaction are put forward. The experiment shows that such field-testing methods as static cone penetration test and pore water piezometer test to determine the effective reinforcement depth after dynamic compaction and other design parameters are reliable.

**Key words:** dynamic compaction method; saturated soft soil; field tests; effective reinforcement depth; new technology

强夯法是由法国 Menard 公司于 1969 年首创的, 后迅速在全国推广应用。目前, 强夯法处理一种地基加固方法, 由于其具有设备简单、施工方便、地基的范围包括工业与民用建筑、仓库、油罐、储仓、适用范围广、经济易行、效果显著和节省材料等优点, 公路、铁路路基, 机场飞机跑道、港口码头及护岸工程很快传播到世界各地。我国于 20 世纪 70 年代末引等。强夯技术虽然在处理碎石土、砂土、湿陷性黄土、

收稿日期: 2011-03-13

作者简介: 贾东远(1975-), 男, 河北省唐山人, 硕士, 国家注册岩土工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计与施工工作。  
E-mail: 15232350011@163.com.

杂填土和低饱和度黏土或粉土等地基的加固中取得了广泛的应用,但是对于饱和软黏土,特别是淤泥、淤泥质土等地基的加固经验尚少。实践表明,强夯引起的超静水压力能否迅速消散是决定强夯法在此类地基中加固成败的关键因素。现行规范的强夯工艺特点是大能量,先重夯,多击数不排水,严重破坏了软黏土的结构性,孔隙水压力居高不下,出现了“橡皮土”,导致强夯失败。针对此种情况,郑颖人等<sup>[1]</sup>提出了用强夯法处理软黏土地基的一种新工艺。该工艺的主要特点是“先轻后重,逐渐加能,少击多遍,逐层加固”;

改变收锤标准不破坏土体结构性,采用人工排水

(如打设塑料排水板等),增大强夯加固效果。本研究采用新工艺并结合多种监测与检测手段,对强夯法处理软土地基的加固效果进行试验研究。

## 1 强夯试验设计

### 1.1 工程地质条件

某工业厂房扩建工程,建设场地原为虾塘,后经素土(欠压实、局部含少许建筑垃圾)回填而成,回填时间已超过1年。地下水埋藏深度2.2 m。试验场地自上而下各土层的物理力学性质如表1。设计要求地基有效加固深度为8 m,处理后的地基承载力特征值不小于120 kPa。

表1 地基土的物理力学性质指标

Table 1 The Physical Mechanics Properties Index of Foundation Soil

土层名称 Soil name	厚度/m Thickness	含水量/% Moisture content	孔隙比 Void ratio	液限/% Liquid limit	压缩模量/Mpa Compression modulus	承载力/kPa Bearing capacity
素填土	2.0				3.50	75
淤泥质土	5.0	49.2	1.348	43.21	2.60	70
粉土	1.6	35.4	0.956	33.69	4.01	100
粉质黏土	>6.0	27.0	0.737	28.05	4.72	115

### 1.2 强夯实验方案

本工程采用的起重机为国产50 t履带式,夯锤为直径2.15 m,底面积3.63 m<sup>2</sup>,锤重10 t,并采用自动脱钩装置。试夯时按照“先轻后重,逐级加能,少击多遍,逐层加固”的原则。先将表层填土整平,在其上铺设0.6 m厚中砂垫层。然后,插设塑料排水板,平面间距1.5 m,梅花形布置,板长11 m。铺设软式透水管,试验区周围均设明沟,以便排水。强夯施工时分5遍夯击,前4遍每遍2击,第5遍1击,每1遍夯击能依次为:600、800、1000、1200、600 kN·m。前4遍夯点间距为3.5 m,夯点的布置采用梅花型布置;第5遍为满夯,锤印搭接1/4,单点总夯沉量控制在0.6 m以内。2遍夯击间歇时间为4 d。

## 2 强夯效果及分析

### 2.1 土体侧向位移

在强夯过程中及强夯结束时均进行了水平位移测试,采用滑动式测斜仪,其精度为0.1 mm/0.5 m,导轮间距500 mm。测点距夯点中心距离2.5 m,侧斜管埋深9.0 m。测试每50 cm的水平位移值,图1为强夯结束时的深层水平位移曲线。由图示监测结果可知,土体最大侧向位移发生在原地面下3.5 m左右,在此深度之下迅速减少,至地面8.5 m以下位移很小或基本未产生侧向位移。区外地表隆起观测表明基本未产生隆起现象,说明在选定的参

数下不仅达到了加固效果,且未破坏土体结构。

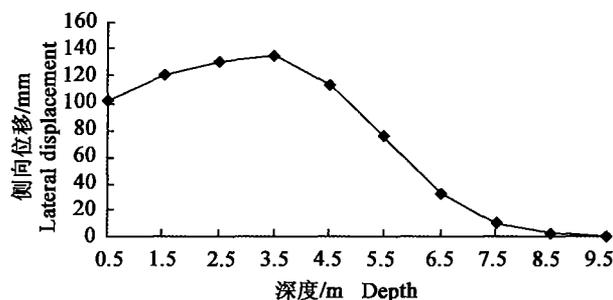


图1 深层水平位移曲线

Fig. 1 Horizontal displacement curve of deep soil

### 2.2 超静水压力监测结果分析

强夯施工前,在试夯区中心位置埋设孔隙水压力计1组,共计6个测点,各测点的埋深分别为KY-1埋深2.3 m、KY-2埋深3.8 m、KY-3埋深5.3 m、KY-4埋深6.8 m、KY-5埋深7.8 m、KY-6埋深8.8 m。其中测点KY-1~KY-4设置于淤泥质土层中,KY-5位于粉土层的中间,KY-6位于粉质黏土层顶面下0.2 m处。图2为各遍夯击结束时孔隙水压力随深度的变化曲线。图3为超静水压力的消散过程曲线。

由图2、图3可见,每遍夯击后孔隙水压力的增长与消散规律基本一致。每遍夯击后的孔隙水压力最大值均发生在原地面下3.8 m左右。第1天的超静水压力消散幅度最大,以后逐渐减缓。孔隙水压

力在 24 h 内消散 60%~66%，经 4 d 消散率基本都达到了 90%，说明插设塑料排水板提供了良好的排水通道，且大面积施工时两遍强夯间隔时间控制为 4 d 是合理的。

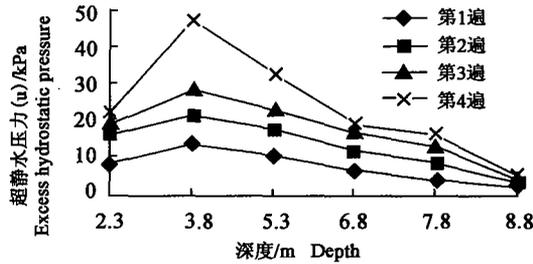


图 2 孔隙水压力随深度变化曲线

Fig. 2 Variation of pore water pressure with depth

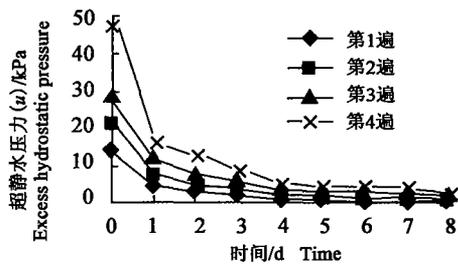


图 3 孔隙水压力消散过程

Fig. 3 Dissipation curves of excess pore water pressure

### 2.3 地基承载力检测

考虑到软土层由于强夯后的触变固化阶段时间较长，所以检测工作在强夯结束后 15 d 进行。载荷试验的承压板尺寸为 1 m×1 m，采用 10 级加荷，最后一级荷载为 250 kPa。图 4 为静载荷试验 p-s 曲线。共打静力触探孔 2 个，且前后尽量保持在同一位置。图 5 为 CPT-1 孔强夯加固前后的静力触探试验结果对比图。由图 5 可知，素填土和淤泥质土层的值分别提高了 1.1 倍和 2 倍左右。综合载荷试验和静力触探的检测结果，强夯加固后的地基承载力特征值已达 120 kPa 以上，满足了设计要求。

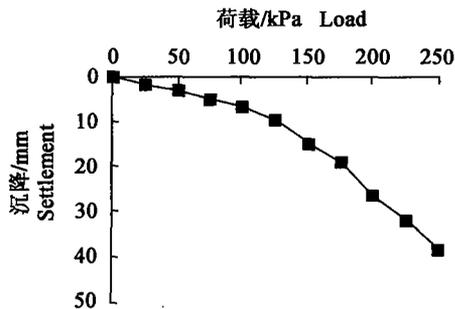


图 4 荷载试验曲线

Fig. 4 Loading-settlement curve

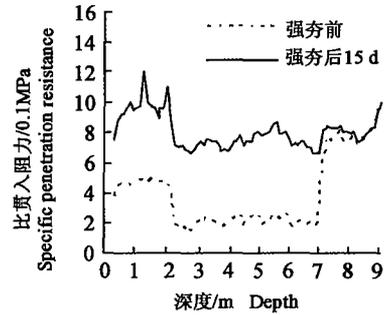


图 5 强夯前后静力触探结果对比

Fig. 5 Comparison of the static cone penetration test results before and after dynamic compaction

### 2.4 有效加固深度的确定

强夯加固深度问题是强夯设计与施工中最关键的问题之一，它关系到强夯的经济和适用性，许多学者对此进行了一系列的研究和探讨。但目前有关强夯法加固地基有效深度的定义还不明确<sup>[2]</sup>。一般都是针对不同的工程目的而言。通常所说的加固深度是指强度而言，即指加固深度内土体强度得到提高<sup>[3]</sup>。由图 5 可知，本工程由加固前后静力触探检测结果的比较而确定的加固深度为 8.1 m 左右。若根据王成华提出的方法<sup>[4]</sup>，将超静水压力值达到土自重应力 0.2 倍处为加固深度，由图 2 的孔隙水压力监测结果可见，第 4 遍夯击结束后深度 7.8 m 处的超静水压力值为 16.2 kPa，这与该深度处自重应力值的 0.2 倍已十分接近，故按此法确定出的有效加固深度也大致在 8 m 左右。上述结果与土体侧向位移监测结果所揭示出来的规律基本吻合。

### 3 结论

(1)按照“先轻后重，逐渐加能，少击多遍，逐层加固”的原则，采用强夯法配合插设塑料排水板的施工工艺，处理饱和软土地基是可行的。这一新工艺可大大提高软土地基的承载力，减小沉降量，缩短施工工期，经济效益显著。

(2)影响强夯有效加固深度的因素很多，包括夯锤重、落距、夯击遍数、夯点布置、土体含水量、锤底静压力以及土体的物理力学性质等。本文的实践表明，采用现场试验手段(如土体侧向位移监测、超静水力量测及静力触探试验等)确定强夯法的有效加固深度及其它设计参数可以取得满意的效果。

(下转第 130 页)

### 3 故障排除

找出了故障原因,为排除故障指明了方向。将接反了的电机接线插头拔出,换位后重新插入即可。将刀架安装后测试刀架换刀,一切正常,重复数次换刀动作均无异常。至此,刀架换刀故障得以排除。

### 4 结论

数控车床在使用过程中,常见故障时有发生。故障后机床暂时不能使用,造成了时间以及人力、物力资源浪费。然而,有很大比例的故障是一些比较简单、且易于排除的故障,本研究对其进行一些基本的维修,便可节约成本,节省时间,创造一定的经济效益。此次对刀架故障的分析中,笔者发现及早将电机接线作对调试验,问题的排除会简单得多。即使笔者在后来通电试验电机时,及时发现电机反转,同样也可以缩短维修时间,将问题简单化。

#### 参考文献:

- [1] 王爱玲. 数控机床结构及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 刘坚. 机械加工设备[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [3] 徐二当. 谈数控车床刀架系统故障维修[J]. 中国高新技术企业,2008(10):89-89.
- [4] 李春荣. 简易数控车床刀架故障[J]. 金属加工,2009(2):56.
- [5] 徐进扬,金玉. 数控车床常见故障与维修[J]. 设备管理与维护,2009(1):36-37.
- [6] 王侃夫. 数控车床故障与维修[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [7] 郑海东. 数控机床日常维护[J]. 设备管理与维护,2010(12):60.

(编辑:张月清)

(上接第114页)

#### 参考文献:

- [1] 郑颖人,陆新,李学志,等. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(1):18-22.
- [2] 周健,张思峰,贾敏才,等. 强夯理论的研究现状及最新技术进展[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(3):510-516.
- [3] 陆新,郑颖人,周良忠. 软粘土地基强夯加固机理、计算与推广应用[J]. 四川建筑科学研究,2002,28(1):50-52.
- [4] 王成华. 强夯地基加固深度估算方法评述[J]. 地基处理,1991,2(1):20-24.
- [5] 郑颖人,李学志,冯遗兴. 软粘土地基的强夯机理及其工艺研究[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(5):571-580.
- [6] 王成华. 强夯地基加固深度估算方法评述[J]. 地基处理,1991,2(1):20-24.
- [7] 周健,曹宇,贾敏才. 强夯-降水联合加固饱和软粘土地基试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(3):376-380.
- [8] 张平仓,汪稔. 强夯法施工实践中加固深度问题浅析[J]. 岩土力学,2000,21(1):76-80.

(编辑:张月清)