

# 强夯法加固不同饱和土地基的比较试验研究

刘利平, 孙运青, 郭 军

(河北建设勘察研究院有限公司, 河北 石家庄 050031)

**摘 要:**通过室内试验就中海石油炼化山东公司东营港(堆场区)场地的土性条件和加固前、加固后的变形和强度特征的变化进行了比较。此外,根据3个场地的现场实测资料的比较,分析了不同地层条件下强夯荷载作用引起的孔隙水压力的分布特征,最后研究强夯法加固饱和土地基的土性适用条件。

**关键词:**强夯法;饱和软土;孔隙水压力;剪切强度;变形特征

中图分类号:TU472.3 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2011)06-0055-04

**Comparative Experiment on the Dynamic Compaction Consolidation for Various Saturated Soil Foundation/LIU Li-ping, SUN Yun-qing, GUO Jun** (Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co. Ltd., Shijiazhuang Hebei 050031, China)

**Abstract:** By the laboratory tests, the soil conditions of a container yard in Shandong were compared as well as the variations of ground deformation and strength characteristics before and after the consolidation. According to the comparative analysis on the field test data of 3 sites, analysis was made on the distribution of pore water pressure caused by dynamic compaction loading in different formations; and the applicable conditions for consolidation of saturated soft soil with dynamic compaction was discussed.

**Key words:** dynamic compaction; saturated soft soil; pore water pressure; shear strength; deformation characteristics

## 0 引言

强夯法早期的应用主要是处理碎石填土或砂砾石土,最大处理深度可达到30 m。近年来,利用强夯法的夯击机具并与排水固结法中排水系统(如塑料排水板、轻型井点法)相结合进行软土地基处理也已经比较成熟<sup>[1,2]</sup>。白冰等<sup>[3]</sup>利用“动静结合排水固结法”对饱和软土地基进行了加固。孟庆山等<sup>[4]</sup>通过现场测试对动力排水固结法的机理进行过探索。郑颖人等<sup>[5]</sup>对该法的施工参数进行了研究。

实际上,用强夯法加固饱和软土地基时应特别注意下面一些问题:强夯加固地基的土性条件;地层条件(即软硬不同的典型的地基场地);强夯的影响深度和范围;合理强夯能量的选择<sup>[6]</sup>。

本文以3个不同地层条件(即软硬不同的典型的地基场地)的强夯试验结果来说明强夯荷载作用下孔隙水压力的分布特征,重点对中海石油炼化山东公司东营港(堆场区)吹填土地基的物理力学指标进行分析。

## 1 三个场地的基本物理性质

3个不同地质条件的场地包括:场地1,东营中

海油加固地基场地,本文重点给出加固前和加固后该场地的变形和强度特征的室内试验结果;场地2,山东大唐东营电厂厂区吹填粉土地基;场地3,京沪高速铁路某路段松软土地基。

### 1.1 东营中海油加固地基场地

对拟进行试验的场地在降水后的现场吹填软土地基进行取样(深度为表层1 m)进行了室内试验,测定土的基本物理、力学性质指标。室内试验得到的表层土塑限、液限和塑性指数分别为 $w_p = 20.2\%$ ,  $w_L = 29.4\%$ ,  $I_p = 9.2$ 。按照“建筑地基基础设计规范(GB 50007-2002)”分类法,属于粉土。表层土的密度 $G_s = 2.71 \text{ g/cm}^3$ 。现场软土的含水量 $w = 17.7\% \sim 22.2\%$ ,重度为 $21.2 \text{ kN/m}^3$ 。结合液塑限试验结果,为流塑状态。对降水后的吹填软土层土样(强夯前)进行了变水头渗透试验,测定的渗透系数 $k = 1.18 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。对现场取得的土样进行室内颗粒分析试验(包括强夯前和强夯后),采用筛分法和密度计法联合测定,颗粒级配曲线见图1。

### 1.2 山东大唐东营电厂厂区吹填粉土地基

山东大唐东营电厂厂区吹填粉土地基场地上部地层主要为饱和吹填粉土(灰色,均匀),吹填区域内表面积水较多。吹填土层厚度一般在 $3.0 \sim 3.5$

收稿日期:2010-12-08

作者简介:刘利平(1968-),男(汉族),河北人,河北建设勘察研究院有限公司,岩土工程专业,从事岩土工程设计施工工作,河北省石家庄市建华南大街58号,hbjk2010@126.com。

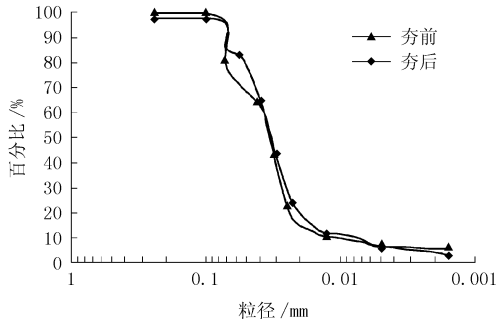


图1 吹填软土颗粒级配曲线

m 之间,平均厚度约 3.3 m。现场软土层摇振反应迅速,平均含水量  $w = 31.8\%$ ,重度为  $21.2 \text{ kN/m}^3$ ,液性指数  $I_L = 1.33$ ,呈流塑状态。吹填软土层的塑限、液限和塑性指数分别为  $w_p = 20.2\%$ ,  $w_L = 28.9\%$ ,  $I_p = 8.7$ ,土粒密度  $G_s = 2.70 \text{ g/cm}^3$ 。

首先用水冲法冲孔埋设竖向排水管(直径 32 mm),然后再敷设横向排水管(直径 63 mm)。竖向排水管井点排距 2 m。

经过降水后(大约 15 天),进行强夯试验。分 3 遍进行,前两遍为点夯,最后一遍为满夯。每遍夯点为正方形排列,两遍错落布置。夯锤直径为 2.25 m,夯锤高度为 0.7 m,夯锤质量为 10 t。

### 1.3 京沪高速铁路某路段松软土地基

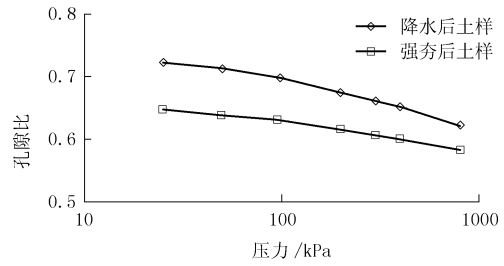
试验场地为冲湖积平原,地形平坦,地势开阔,原大部辟为耕地。地表覆盖第四系全新统冲湖积层( $Q_3^{al+1}$ )粉质粘土,黄褐色,坚硬~硬塑,含姜石、砂砾,平均厚度为 3.0 m。其下为花岗片麻岩,较为坚硬。场地地下水位深度为 1.79 m。现场地基土的平均含水量  $w = 19.5\%$ ,孔隙比  $e = 0.55$ ,重度为  $21.0 \text{ kN/m}^3$ ,干密度为  $1.8 \text{ g/cm}^3$ 。塑限、液限和塑性指数分别为  $w_p = 24.8\%$ ,  $w_L = 38.8\%$ ,  $I_p = 14.0$ ,土颗粒密度  $G_s = 2.72 \text{ g/cm}^3$ 。液性指数  $I_L = -0.38$ ,为坚硬状态。

## 2 加固前后地基土的力学指标比较

对于东营中海油加固地基场地,对降水后不同条件下(强夯加固前、强夯加固后)的土样进行了室内侧限固结试验。试样厚度为 2 cm,试样直径为 6.18 cm。 $e - \log p$  曲线见图 2。

经过计算,降水后但未进行强夯处理的土样的压缩系数  $a_{1-2} = 0.12 \text{ MPa}^{-1}$ ,为中压缩性土。进行夯击处理后,压缩系数  $a_{1-2} = 0.28 \text{ MPa}^{-1}$ 。

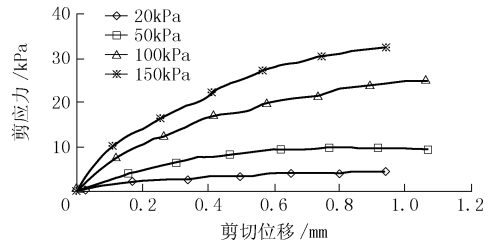
由图 2 可以看出,对于降水但未进行处理的土样,其  $e - \log p$  曲线要比强夯后的  $e - \log p$  曲线陡峭,

图2 不同工况下的  $e - \log p$  曲线

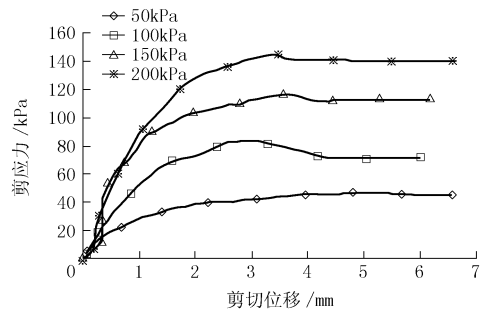
但呈直线压缩特征,说明强夯后土层的压缩性有一定改善。

对土样进行室内直剪试验(不固结快剪)。试样厚度为 2 cm,试样直径为 6.18 cm。剪切速率为  $0.4 \text{ mm/min}$ 。图 3 给出剪应力 - 剪切位移之间相互关系。图 4 给出四种土样的抗剪强度包线。表 1 给出抗剪强度包线拟合方程及强度指标。

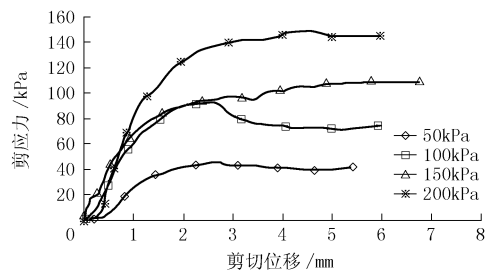
由图 3a 可以看出,未经过加固的吹填土(原始状态)的应力应变关系呈现应变硬化的特征。当采取降水措施后(图 3b),土样强度就比原始状态土样强度(图 3a)有明显增大,此时土样的应力应变关系



(a) 原始状态

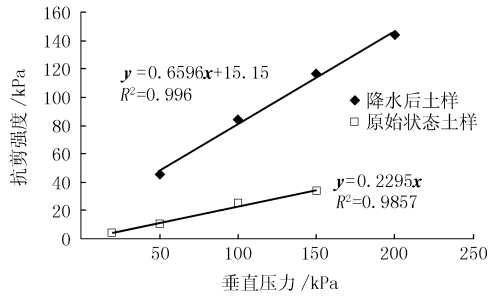


(b) 降水后土样

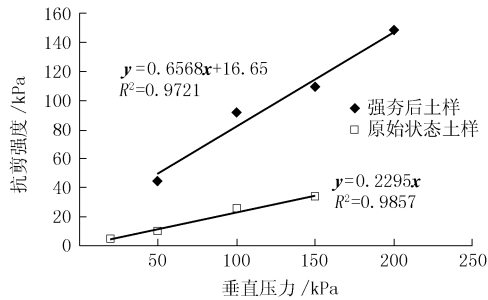


(c) 强夯后土样

图3 剪应力 - 剪切位移相互关系曲线



(a) 降水后土样



(b) 降水和强夯后土样

图 4 抗剪强度包线

表 1 抗剪强度包线拟合方程及强度指标

土样类型	R <sup>2</sup>	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
原始状态	0.986	0	12.9
降水后土样	0.996	15.15	33.4
强夯后土样	0.972	16.65	33.3

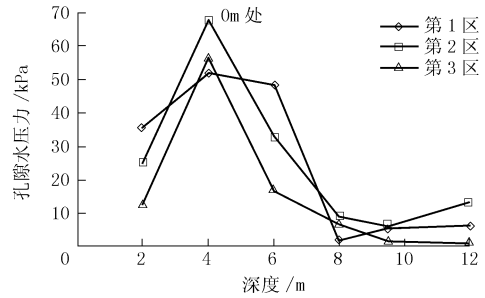
也呈现超固结土的一些性状,即呈现一定的应变软化的特征。当采取强夯措施后(图 3c),土样强度也有较大程度增大,并且呈现更为明显的应变软化的特点(特别是在围压较小时),即在剪切位移较大时出现峰值,然后剪切应力减小。

由表 1 和图 4 所给出的抗剪强度指标来看,经过降水过程(即降水后)以及强夯后,土样的抗剪强度比未经过处理的原始状态(降水前)的土样抗剪强度明显增大,而内摩擦角的增加量则更为明显。

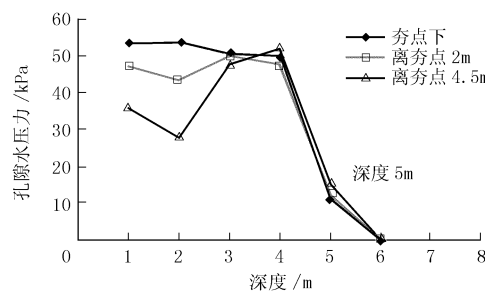
### 3 不同土性条件孔隙水压力的比较

图 5 给出 3 个不同土性条件(即不同地质条件)下强夯荷载作用下地层中孔隙水压力的分布特征。其中,图 5(a)为东营中海油加固地基场地的不同的强夯能量对地层孔隙水压力的影响范围(第一遍强夯,单点强夯能量分别为 1000、2000、3000 kN·m)。

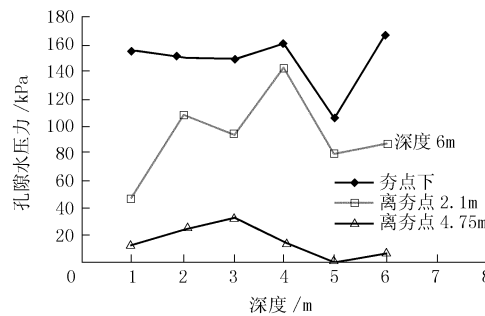
由图 5(a)可以看出,东营中海油加固地基场地产生的孔隙水压力值大小介于场地 2(即山东大唐东营电厂厂区吹填粉土地基)和场地 3(京沪高速铁路某路段松软土地基)之间。而其地质条件也介于这两个场地之间。所以,对于较为坚硬的土层一般



(a) 场地 1: 东营中海油加固地基



(b) 场地 2: 吹填粉土地基



(b) 场地 3: 松软土地基

图 5 孔隙水压力沿深度方向分布

产生较大的孔隙水压力。另一方面,孔隙水压力分布与场地 2(即山东大唐东营电厂厂区吹填粉土地基)显示的孔隙水压力比较接近。

由图 5(b)可以看出,对于场地 2,吹填粉土地基在第 1、2、3 遍强夯作用下,孔隙水压力在深度 5 m 范围内的反映是明显的,而深度 6 m 处孔隙水压力几乎为零。这里需要说明,第一遍强夯能量为 800 kN·m。因此,可以认为孔隙水压力的影响深度在 5 m 以内。测试结果表明,在水平距离 6 m 范围内,超孔隙水压力上升比较明显(水平距离 6 m 处为 8 kPa)。

对于场地 3,由图 5(c)可以看出,第一、二遍强夯荷载作用下,深度 6 m 处孔隙水压力分别可达 170.1 和 103.2 kPa,表明强夯作用的影响在深度 6 m 以上是非常显著的。这里需要说明,第一遍强夯能量为 2000 kN·m。这一影响深度可以使得本场 4~5 m 深度范围内土层的密实度和强度得到明显改善。而第三遍强夯作用下,浅层土的孔隙水压

力仍然较大,但此时土层较深处的孔隙水压力则相对较小(如深度6 m处的孔隙水压力为15.5 kPa)。测试结果表明,在水平距离4.75 m的范围内,超孔隙水压力上升比较明显。由此可以认为,在夯击能量为2000 kN·m时,其水平影响距离可以达到4.75 m。

上述分析表明,在水平方向,较硬土层地基(如京沪松软土地基)所产生的孔隙水压力似乎比超软弱土层(如吹填粉土地基)的孔隙水压力要小。然而,由于较硬土层地基有更强的向下的荷载传递效应,因此较硬土层在深度方向产生的孔隙水压力远大于超软弱土层的孔隙水压力。

由上述3个不同地质条件的强夯试验结果可以看出,随着场地地质条件增强,强夯荷载作用下的影响深度一般也增大。

#### 4 结论

(1)对于降水但未进行处理的土样,其压缩曲线要比降水及强夯后的土样的压缩曲线陡峭,但呈直线压缩特征,说明强夯后土层的压缩性有一定改善。

(2)当采取降水措施后,土样强度就比原始状态土样强度有明显增大,此时土样的应力应变关系

也呈现超固结土的一些性状。当采取强夯措施后,土样强度也有较大程度增大,并且呈现更为明显的应变软化的特点。

(3)经过降水过程(即降水后)以及强夯后,土样的抗剪强度比未经过处理的原始状态的土样抗剪强度明显增大,而内摩擦角的增加量则更为明显。

(4)3个不同地质特征的强夯试验表明,对于较为坚硬的土层一般产生较大的孔隙水压力。而且,土层地质条件不同,其孔隙水压力的分布特征也不同。

#### 参考文献:

- [1] 丘建金,张矿成. 动力排水固结法在软基加固工程中的应用[J]. 工程勘察,1995,(6):7-10.
- [2] Gunaratne M, Ranganath M, Thilakasiri S, et al. Study of Pore Pressure Induced in Laboratory Dynamic Consolidation[J]. Computers and Geotechnics,1996,18(2):127-143.
- [3] Bai Bing. Consolidation Characteristics and Undrained Shear Strength under Repeated Impact Loading[J]. Geotechnical Testing Journal,2006,29(4):289-297.
- [4] 孟庆山,汪稔. 冲击荷载下饱和软土动态响应特征的试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(1):17-21.
- [5] 郑颖人,陆新,李学志. 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.
- [6] 蔡袁强,陈超,徐长节. 强夯加固回填土地基的三维数值模拟[J]. 岩土力学,2007,28(6):1108-1112.

## 阿特拉斯·科普柯聚焦新疆市场

**本刊讯** 新疆目前是国内投资和建设方面增长最快的市场之一。为了能够参与到这个经济蓬勃的市场中并为其做出贡献,2011年5月27日,阿特拉斯·科普柯携多款世界领先的采矿与建筑设备亮相中国新疆国际矿业技术装备展览及论坛,包括CDM75回转式爆破孔钻机、Boomer 281液压掘进台车、ST 3.5铲运机、ROC L6和PowerROC T35露天凿岩钻机、C6岩芯钻机、破碎锤、各种钻具和手持式设备等,将世界先进的矿山与岩石开挖技术介绍给这里的客户。

在仅3天的展会期间,阿特拉斯·科普柯身着黄衣的设备显得光彩夺目,成为展会上毋庸置疑的主角,吸引了400多名业内专业观众前来展台咨询和洽谈。同时也成为此次展会中展出设备种类和数量方面最多的企业之一。



目前,阿特拉斯·科普柯建筑与矿山技术领域在中国已经设立了3家客户中心以及5家工厂。

2011年2月,阿特拉斯·科普柯决定在南京建立新的研发中心,这将增强公司在国内本土的设计和开发能力,并能为客户提供专门



设计、满足特殊需要的产品;3月18日,阿特拉斯·科普柯(上海)贸易有限公司新疆分公司开业,它将在设备交货时间和业务便利性方面更加贴近客户,为新疆客户提供无微不至的服务;将于2011年完成建立的新物流中心,将很大程度上改善东南亚客户的产品和零件交付时间。这些都源自阿特拉斯·科普柯以客户为中心的服务理念。

“我们的成功建立在我们长期对客户恪守承诺、接近客户、理解客户面临的挑战并通过提供持续创新的产品开发和服务而满足客户的需求。”阿特拉斯·科普柯集团高级副总裁兼建筑与矿山技术部总裁 Bjorn Rosengren 先生说道。