

# 高能级强夯在大型石化工程中的应用

高广运<sup>1</sup>, 水伟厚<sup>1,2</sup>, 王亚凌<sup>3</sup>, 李 伟<sup>1</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011; 3. 中化岩土工程有限公司, 北京 102600)

**摘 要:** 大面积的多孔隙、粗颗粒非饱和土地基的加固处理宜采用强夯法。加固深厚地基, 特别是大孔隙湿陷性地基、山区大厚度非均匀块石回填地基和抛石填海地基, 应该施加高能级强夯进行处理。我国的高能级强夯主要用于石化工程施工中的生产装置和大型储罐地基。结合青岛重交沥青有限公司 4 座 5 万 m<sup>3</sup> 原油储罐和配套附属设施地基处理工程, 对高能级强夯的关键技术、检测方法和综合评价进行了阐述, 可供强夯设计施工参考。

**关 键 词:** 高能级强夯; 有效加固深度; 施工机具; 施工工艺

中图分类号: TU 472.3<sup>+</sup>1

文献标识码: A

## Application of high energy level dynamic compaction to high-capacity oil tank foundation

GAO Guang-yun<sup>1</sup>, SHUI Wei-hou<sup>1,2</sup>, WANG Ya-ling<sup>3</sup>, LI Wei<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 Shanghai Shenyan Geotechnical Engineering Co.Ltd., Shanghai 200011, China; 3. China Zhonghua Geotechnical Engineering Co.Ltd., Beijing 102600, China)

**Abstract:** In order to improve the deep ground, especially heterogeneous block ground of mountain area and rock filling out the sea, high energy level dynamic compaction (HELDC) is necessary to strengthen the ground. The HELDC is mainly used in the production facilities and high-capacity oil tank of petrochemical project, so as to eliminate the collapsibility of loess and treat the non-uniformly stone backfill foundation of mountain area and coast. The succeed experiences of ground treatment using HELDC of 4 oil tanks (50 000 m<sup>3</sup>) foundation in Qingdao Zhongjiao Asphalt Co. Ltd are described in detail. Finally, some referable conclusions are obtained.

**Key words:** high energy level dynamic compaction(HELDC); effective depth of improvement; construction machines; construction technology

## 1 引 言

土体有效加固深度既是反映地基处理效果的重要参数, 又是选择地基处理方案的重要依据<sup>[1]</sup>。当有效加固深度大于 10 m 时, 常规的强夯方法及设备难以满足要求, 故需发展应用高能级强夯 (high energy level dynamic compaction, 简称 HELDC) 方法与设备<sup>[2]</sup>。

高能级强夯一般是指单击夯击能大于 6 000 kN·m 的强夯。与常规强夯法相比, 高能级强夯的有效加固深度可达 10~30 m, 可加固处理大厚度非饱和土、大面积重堆载场地、大中型油库、塔基、大型筏板地基、高堤坝、大厚度湿陷性黄土和

新填土等, 可进一步提高地基土强度和均匀性, 降低压缩性, 消除湿陷性, 改善其抵抗振(震)动液化的能力等, 使强夯法的经济高效性得以更加充分地施展<sup>[3,4]</sup>。

目前, 我国使用高能级强夯处理的石化项目工程已有 10 多项, 如大连西太平洋石油化工有限公司炼油 80 万 m<sup>3</sup> 原油库区工程, 青岛黄岛中国石油奥里油中转库工程, 秦皇岛 10 万 m<sup>3</sup> 原油储罐地基处理工程, 洛阳石化大化纤工程装置区及库区工程, 广东惠州马鞭洲输油首站地基强夯处理工程等, 积累了一定的工程经验<sup>[5]</sup>, 如大型原油储罐 5 万 m<sup>3</sup> 原油储罐和 105 万 m<sup>3</sup> 原油储罐等, 属于国家一级建

筑物,罐体直径达 60~80 m,附加应力影响深度可达数十米,在地表下 10 m 深度范围内,附加应力几乎没有衰减。油罐地基承载力要求高,而且对地基的沉降变形和差异沉降要求十分严格,设计人员在制定地基处理方案时都十分慎重。本文结合青岛重交沥青有限公司原料库项目强夯处理工程,对高能级强夯的关键施工技术、检测方法和综合评价进行了阐述,可供类似工程参考。

## 2 工程及地质概况

青岛重交沥青有限公司原料库项目位于青岛经济技术开发区内,由 4 座 5 万  $\text{m}^3$  原油储罐和配套附属设施构成。场地表层土为厚度不等的人工填土,主要成份为中粗砂及残积土,回填时未经碾压,处于松散状态,强度较低,不能满足荷载要求;其下还分布数层厚度不等的原状土层,包括淤泥质土和粘性土,强度同样不能满足设计要求。经过多种方案的经济性与工期比较,决定采用强夯法对地基进行加固处理,其中 A 区采取 7 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$  能级强夯,B 区采用 5 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$  能级强夯,总处理面积约为 3 万  $\text{m}^2$ ,要求夯后地基承载力特征值达到 250  $\text{kPa}$ 。

## 3 强夯试验与施工

### 3.1 单点夯试验

为了验证强夯方案的适宜性和设计参数是否合理,按国家规定,强夯施工前应首先在场区内有代表性的区域进行试验施工。本工程根据具体情况,在罐基位回填深度最大的区域做强夯试验,面积约 400  $\text{m}^2$ 。试验施工时,首先进行了单点夯试验,确定夯击后夯坑及周边地面变形,并据此确定施工时的夯击数、夯点间距、填料量等参数。

单点夯试验方法较为简单。夯前分别在夯锤上和夯印周围地面相互垂直的两个方向等距离设置观测标识,用水准仪测量每夯一击时夯锤和地面标识的位移,计算夯沉量和地面水平位移,直至贯入度达到控制值。绘制夯击数和夯沉量关系曲线,通过分析确定控制击数等有关施工参数。

### 3.2 施工方案

根据设计有效加固深度、主夯夯击能,以及场地地质条件拟分四遍进行施工,其中,第一遍和第二遍均为主夯,能级 7 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,第三遍为夯间加固,夯击能 3 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,第四遍为普夯,夯击能为 1 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。第一和第二遍主夯点的间距均为 9 m

$\times 9$  m 正方形布置,第二遍主夯点位于第一遍主夯点的正方形的中心位置,第三遍为加固夯,夯点在已夯完的第一和第二遍夯点之间布置,呈梅花形,第四遍满夯夯印搭接 1/3。夯点的整体布置形式为等边三角形。由于本场地强夯有效范围内为砂石土,孔隙水压力消散很快,因此,施工时两遍之间的间歇时间可不予考虑。主夯点和加固夯的布置形式分别见夯点平面布置图图 1。

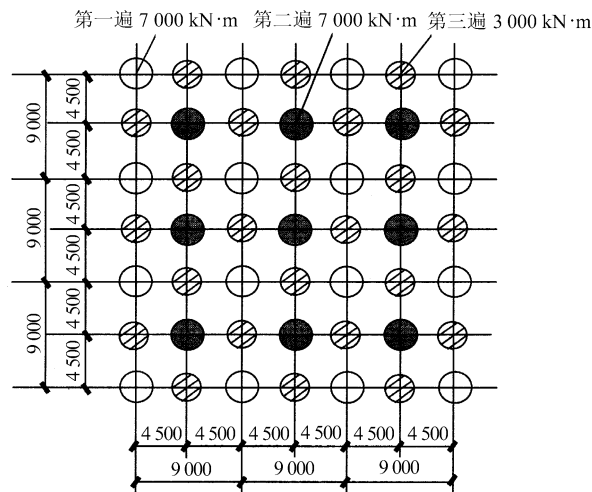


图 1 夯点平面布置图 (单位: mm)

Fig.1 Grid location of drop points (unit: mm)

### 3.3 主要施工机械的选择

(1) 主机 选用杭重 W200A 型 50 t 履带式吊车,臂杆长度为 27 m,配重型门架,可满足 7 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$  能级强夯施工需要,去掉门架、缩短臂杆后即可进行 3 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$  的第三遍夯和 1 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$  能级的普夯。

(2) 夯锤 :7 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$  主夯拟选用 40 t 铸钢锤,底面直径为 3.0 m,底面积为 7.0  $\text{m}^2$ ,底面静压力为 57  $\text{kPa}$ ,加固夯和满夯选用 17.5 t 铸钢锤,底面直径为 2.5 m,底面积 4.9  $\text{m}^2$ ,底面静压力为 33  $\text{kPa}$ 。

(3) 脱钩器:选用 40, 20 t 级的脱钩装置,该脱钩器具有操作灵活、安全、耐磨等优点,可满足正常施工需要。

(4) 重型门架:选用截面尺寸为 0.8 m $\times$ 0.8 m,长 26 m 的门架,强度完全满足 7 000~8 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$  能级强夯施工需要。

另外,为满足正常施工需要,还配备了 TY220 型推土机、J2 型经纬仪、DS3 型水准仪、塔尺、钢卷尺等辅助施工设备。

### 3.4 施工顺序

本工程总体遵循先试验、后工程施工的原则安排施工。工程开始施工前应结合工程主夯点进行一组单点夯试验,继而进行群夯试验,以确定夯击数、夯后所达到的指标,尽可能达到最佳夯实效果。

具体施工顺序为先主夯,后加固夯,再满夯,强夯主机开行路线自东向西或自西向东,这样可减少吊车转向和移锤次数,提高施工效率。

### 3.5 工艺流程

场地整平 测量放线 第一遍主夯点 场地整平 测量放线 第二遍主夯点 场地整平 测量放线 第三遍加固夯 场地整平 测量放线 第四遍满夯 场地整平 测量 竣工验收。

### 3.6 强夯工程质量控制标准

(1) 强夯施工的锤重、锤底面积、落距、夯点布置、夯击遍数、夯击数、最后两击平均夯沉量、主夯后地面下沉量、终夯后地面下沉量均符合施工设计要求。

(2) 强夯施工工艺符合设计要求。

(3) 强夯地基允许偏差项目满足下列要求:

定位放线控制点位移  $< 20$  mm; 夯点放线与设计图纸要求误差  $< 50$  mm; 夯击点中心位移  $< 150$  mm, 同时控制夯锤就位误差不得超过 50 mm; 顶面标高  $+20$  mm; 表面平整度  $< 30$  mm / 2 000 mm。

## 4 强夯加固效果的分析

场区地基经强夯加固处理后,采用了室内试验、平板载荷试验、动力触探及波速试验等方法对地基进行检测评价和综合分析。

### 4.1 平板载荷试验

平板载荷试验是一种最为直观的试验,它是在一定面积的承压板上向地基土逐级施加荷载,测求地基土的压力与变形特性的原位测试方法。它反映承压板下 1.5 ~ 2.0 倍承压板宽度范围内地基土的强度、变形的综合特性。平板载荷试验可以测求地基土承载力和变形模量。为考察较深土层的情况,宜选用较大尺寸的荷载板(如 2 m × 2 m 板),但荷载板过大、试验周期长、难度大,因此,相应还是选用一般尺寸的载板(1 m × 1 m 板)进行试验。

在现场 3 个典型点位进行了静载试验,试验承压板周围未出现裂隙或变形现象,曲线比较平滑,如图 2 所示。其中,1<sup>#</sup>试验点承压板为 1 m × 1 m 板,2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 试验点承压板为 2 m × 2 m 板。从载荷试验结果来看,该回填土地基经高能级强夯加固处理

后,承载力有显著提高,提高幅度达 30% ~ 100%。

因荷载板试验仅能反映一定板宽度范围土的承载力,欲了解深部土层的性质和大面积强夯的施工效果,还必须通过其它手段进行试验。可以采用瑞雷波测试、剪切波测试、原状样室内试验和动力触探试验等方法检验各层土尤其是深部土的力学特性<sup>[6]</sup>。

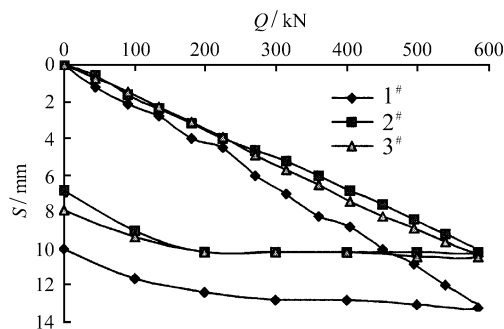


图 2 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>点静载试验曲线  
Fig. 2 Static loading test results of sites #1, #2 and #3

### 4.2 瑞雷波测试

瑞雷波是一种新兴的岩土原位测试勘探方法,根据瑞雷波沿地层传播时在非均匀介质中具有频散特性,即波速值  $v_R$  随频率变化而变化,同一频率的  $v_R$  在水平方向的变化反映地质条件的横向不均匀性,不同频率的变化  $v_R$  则反映地质条件在深度方向的不均匀性。利用瑞雷波频散特性的变化情况与岩土物理力学性质的相关性可以了解各土层情况,确定夯击加固深度、加固范围及夯后地基的设计参数,也可对场地的整体性以及承载力、压缩模量等指标进行较为全面的评价。

本工程采用瞬态激振工作方法,在场区共布置了总长为 1 700 m 共 100 个测点的 10 条瑞雷波测线,现场典型测线剖面的瑞雷波等值线如图 3 所示,其加固深度等值线如图 4 所示。可以看出, T-T 测线处地层加固后均匀性良好,表层的瑞雷波波速达到了 180 ~ 200 m/s; G-G 测线处局部区域波速较高,这与回填时该区域表层的粒径较大的施工情况相对应; 10 m 深度内平均波速在 250 m/s 左右,场地整体均匀性较好。

### 4.3 剪切波测试

场地深度范围内波速均匀性较好,平均剪切波速为 207.2 m/s,下伏无低速夹层;局部浅层存在不均匀区域,其竖向土层剪切波速小于 160.0 m/s,分布区域见表 1。此结果与瑞雷波测试基本一致,可以看出,强夯后填土层的剪切波速明显增大。

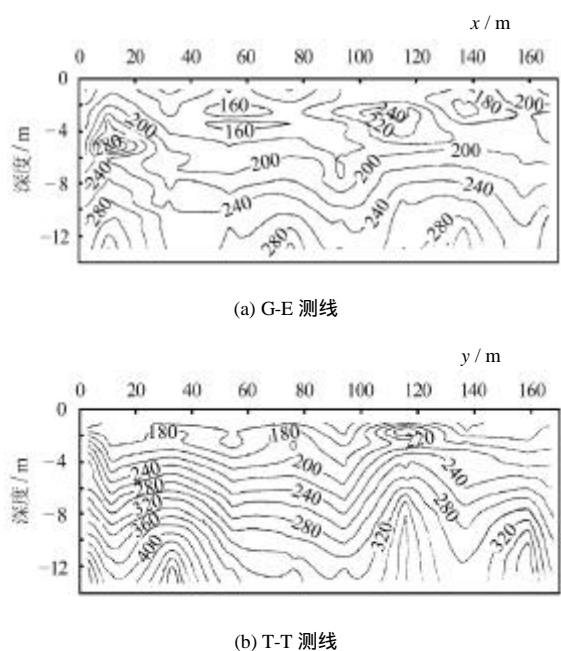


图3 典型测线剖面瑞雷波速等值线图

Fig.3 Contours of Rayleigh wave velocity

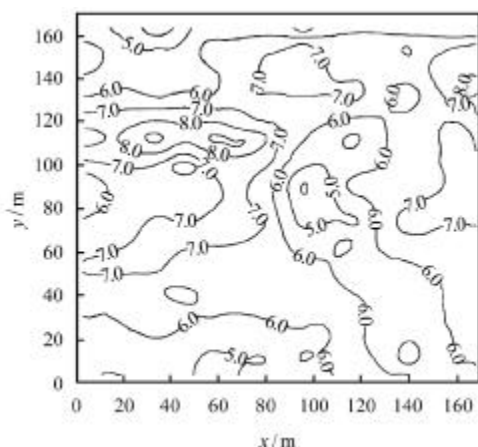


图4 强夯加固深度等值线图

Fig.4 Contours of improvement depth of dynamic compaction

表1 剪切波速实测结果

Table 1 Measured values of shear wave velocity

测点的分布区域	深度范围	分层剪切波速值	平均剪切波速
	$h/m$	$v_s/m \cdot s^{-1}$	$V_s/m \cdot s^{-1}$
UU1, UU3, UU8, SS3, SS8	0.0~7.1	180~220	207.2
H22, H27, H32, N13, N18, N22, N27, DT11	0.0~4.1	160~227.5	
C1, C3	0.0~3.2	180~206.2	
A37, A39	0.0~2.7	178~232.5	

## 5 结语

本次地基检测运用了载荷试验、动力触探、瑞雷波等多种测试手段, 从不同角度对地基夯实际情况

进行了评价, 可得出以下结论:

(1) 填土层强夯处理效果明显, 罐区承载力标准值为 290 kPa, 变形模量为 25.5 MPa, 可满足地基承载力 250 kPa 的设计要求。

(2) 回填土地基的承载力提高幅度达 30% ~ 100%, 填土层下伏原始土层承载力也有相应提高。

(3) 场地范围强夯处理水平方向波速均匀性较好, 场地大部分区域平均剪切波速大于 200.0 m/s。

(4) 5 000 kN·m 区域强夯有效加固深度最大达到 7.5 m, 影响深度基本达到该能量加固区基岩面, 7 000 kN·m 区域强夯有效加固深度最大达 9.4 m。

油罐建成后, 先后进行了两次充水试验。油罐沉降监测证明, 环墙沉降符合油罐基础施工及验收规范要求, 现已投入正常生产运行。

## 参考文献

- [1] 王铁宏. 全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.  
WANG Tie-hong. Case Histories in Ground Treatment of Great Engineering of China[M]. Beijing: China Construction Industrial Press. 1998.
- [2] Ganbin M P. Dynamic Compaction[Z]. Ground Engineering Reference Book. Cornwall: Robert Hartnoll Ltd., Bodmin, 1987.
- [3] 水伟厚. 冲击应力与 10 000 kN·m 高能级强夯系列试验研究[博士论文 D]. 上海: 同济大学. 2003.
- [4] Menard L, Broise Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[A]. **Ground Treatment by Deep Compaction**[C]. London: Telford Ltd., 1976, 3 - 18.
- [5] 王亚凌, 水伟厚, 王铁宏, 等. 高能级强夯工程实践与推广应用[J]. 地基处理, 2003, 14(3): 29 - 37.  
WANG Ya-ling, SHUI Wei-hou, WANG Tie-hong, et al. Practice and state-of-the-art report on high Energy level dynamic compaction[J]. **Ground Improvement**, 2003, 14(3): 29 - 37.
- [6] Jessberger H L, Beire R A. Heavy Tappings: Theoretical and practical aspects[A]. **Proceeding of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. [s.l.]: [s.n], 1981, 695 - 699.