

预排水动力固结法处理吹填粉土地基的试验研究*

聂庆科^{①②} 王国辉^{①②} 李友东^① 陈军红^{①②}

(①河北建设勘察研究院有限公司 石家庄 050031)

(②河北省岩土工程技术研究中心 石家庄 050031)

摘要 为加固新近吹填的处于流塑状态的粉土地基,首先采用轻型井点降水和动力碾压的方法使地基具有一定的初始承载力。然后,施加较大的强夯动力荷载,从而使地基承载力得到显著提高。这一新的综合加固技术称之为“预排水动力固结法”。通过现场测试,研究了施工过程中诸如井点降水的影响范围、强夯时孔隙水压力的变化范围、深层沉降的变化等问题。同时,对强夯夯击遍数、每点夯击次数、遍与遍之间的间隙时间等有关问题进行讨论。研究表明,预排水动力固结法可显著提高吹填粉土地基的承载力。

关键词 轻型井点 预排水动力固结法 孔隙水压力 现场测试

中图分类号:TU443 **文献标识码:**A

IN-SITU TESTS ON TREATMENT OF SOFT HYDRAULIC FILL GROUND USING DYNAMIC CONSOLIDATION WITH PRE-DEWATERING

NIE Qingke^{①②} WANG Guohui^{①②} LI Youdong^① CHEN Junhong^{①②}

(①Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co. Ltd., Shijiazhuang 050031)

(②Hebei Research Center of Geotechnical Technology, Shijiazhuang 050031)

Abstract This paper presents the in-situ tests for improving saturated soft soil ground formed by hydraulic fill method. The well-point dewatering method and roller compaction method are used firstly in order to obtain initial bearing capacity. After this, the bearing capacity can be advanced obviously by dynamic compaction method. This new method is named as “dynamic compaction method with pre-dewatering” in this paper. According to a large number of in-situ test results, this paper studies the problems such as the affecting scopes of well-point dewatering, pore water pressure induced by dynamic compaction, deep settlements of soil layers. In the meantime, number of passes, number of drops per pass, duration time between various passes, and other factors are also discussed. The studies show that the bearing capacity of soft soil ground can be greatly increased using dynamic consolidation with pre-dewatering method.

Key words Dewatering, Dynamic consolidation, Pore water pressure, In-situ tests, Hydraulic fill, Ground treatment

* 收稿日期: 2008-09-20; 收到修改稿日期: 2009-10-28.

第一作者简介: 聂庆科, 现主要从事岩土工程设计、施工与理论分析研究. Email: nieqingke@126.com

1 引言

动力固结法(即强夯法)无论在理论上还是在工程实践方面均取得长足的进展。Menard 等^[1]关于动力固结法理论的阐述具有开拓性。Thilakasiri 等^[2]利用自行设计的一套动力固结设备对土体表面的接触动应力及内部动应力进行了量测,有重要的参考价值。钱家欢等^[3]是国内较早对动力固结理论进行深度研究的学者之一。孔令伟等^[4]进行了大量的理论探索,研究了强夯时地基土的应力场分布特征,并就成层弹性地基空间轴对称动力问题进行研究,提出了强夯作用下边界接触应力的理论计算方法。这些研究主要针对碎石、砂土、黄土等粗颗粒或非饱和地基土。

近年来,通过改进传统的施工工艺,例如增设竖向排水体或与其它加固方法相结合(所谓复合式的加固技术),已使动力固结法推广到饱和黏性土地基的加固中。白冰等^[5,6]通过改善地基土的排水条件,将强夯法和填土预压法相结合,发展了动静结合排水固结法的基本思想,并强调了预压荷载的重要意义。姜志全等^[7]对动力固结法加固软土路堤软土内的孔隙水压力增长与消散、软土的分层沉降、路堤的表层沉降等进行了现场测试分析。孟庆山等^[8]通过淤泥质饱和软黏土的三轴固结不排水剪切试验,研究了海相沉积原状土、重塑土以及超固结土在动力固结后的应力-应变性状,研究了强夯法加固饱和软土地基的机理。周健等^[8]结合上海市某集装箱堆场工程中上部为吹填细砂、下部为饱和软黏土的地基进行了现场试验研究,对加固过程以及加固后的土体变形、孔压变化、工艺参数等进行了分析。但是,这些方法对于高含水率的几乎处于流塑状态的吹填土类地基的加固尚不能满足要求。

本文所提出的“预排水动力固结法”是将轻型井点降水、动力碾压及强夯法等多种加固方法联合的一种软土地基加固技术。该法充分利用轻型井点降水、动力碾压和强夯法各自的技术优势且相互作用,从而形成一种独特的软土地基加固技术。该法已在山东大唐东营电厂饱和吹填软土地基加固中获得成功的应用。本文针对该法进行了现场试验研究,并就其加固效果和机理进行探讨。

2 现场试验

勘察表明,场地上部地层主要为吹填的粉土,灰色,均匀,区域内积水较多。该层吹填土摇振反应迅速,厚度一般在 3.0 ~ 3.5m 之间,平均厚度约 3.3m。其塑限、液限和塑性指数分别为 $w_p = 20.2\%$, $w_L = 28.9\%$, $I_p = 8.7$, 土粒比重为 $G_s = 2.70$, 含水率为 $w = 31.8\%$, 重度为 $21.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。结合液塑限试验结果,可以得到液性指数 $I_L = 1.33$, 为流塑状态。通过对吹填软土层土样进行的常水头渗透试验,测定的渗透系数为 $k = 1.8 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 渗透性一般。

2.1 试验方案

试验目的是确定强夯参数、强夯影响范围(包括影响深度、水平范围),并对加固效果进行检测。

试验区面积为 $30\text{m} \times 40\text{m}$,首先用水冲法冲孔埋设井点管,然后再铺设地面集水系统。井点管直径为 32mm,横向排水管直径为 63mm。井点管排距为 2m,井点深度为 4m,外包装 2 层 120 目有纺滤布,然后用砂袋包裹。

2.2 传感器布设

考虑强夯夯点的实际施工次序,对分层沉降管、孔隙水压力计、水位管等各种传感器进行了布设(图 1)。

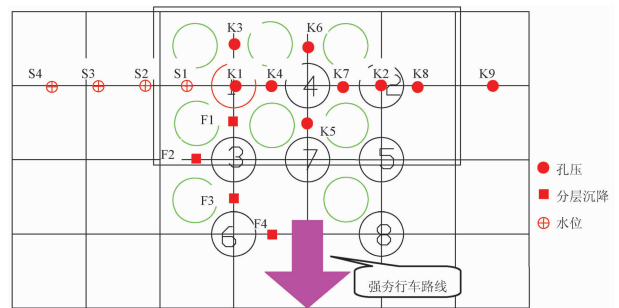


图 1 传感器布置

Fig. 1 Laying sketch of transducers in field tests

2.3 测试方法

(1) 地表沉降

在加固区域的代表性点处设置沉降标进行试验区的地表沉降变化监测。精密水准仪测量,精确到 0.1mm。

(2) 地层深层沉降(分层沉降)

在加固区域的代表性点处设置分层沉降观测点,沿深度方向分别为 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m 处布置沉降磁环。

采用 ABS 分层沉降管 ($\Phi 70$) 以及 $\Phi 70$ 沉降磁环。采用钢尺沉降仪进行探测。采用水冲法冲孔进行埋设,水力冲孔后将沉降管置入孔中,定位到预定深度,然后将中砂或现场粉土充满管周围的空隙,保证沉降磁环与周围土层紧密贴合。

(3) 孔隙水压力

围绕某典型夯击点(图 1, 夯点 1),在不同的径向距离和不同的地层深度处布设孔隙水压力传感器。传感器布设时,考虑夯击点的施工次序,以及对孔压的累积作用。径向距离每间隔 1.5m, 2m 或 4m 布置一个孔,共 9 个孔,测试范围 14m。深度方向每间隔 1m 或 2m 布置一个孔隙水压力传感器,测试深度 6m。采用水冲法冲孔进行埋设。

采用振弦式频率测定仪测定孔隙水压力变化,测量范围为 300 ~ 6000Hz,分辨率为 0.1Hz。孔隙水压力计算精度为 0.1kPa。

(4) 地下水位

水位测试孔位置见图 1,深度 6m。分别在距离试验区不同的距离处布置。采用 PVC 水位管 ($\Phi 53\text{mm}$),用水冲法冲孔进行埋设。

3 排水及强夯试验过程

首先进行水位、孔隙水压力、分层沉降磁环等的初始值的量测,然后开始抽水。1h 后开始对出水量、水位、孔隙水压力以及分层沉降进行全面观测。抽水 5d 后,用 14t 履带式挖掘机进行了第一次碾压。抽水 8d 后,又用 16t 轮胎式铲土机进行了碾压。抽水 11d 后,进行了第 3 次碾压。

从现场加固效果来看,经过 5d 抽水后,无论是 14t 履带式挖掘机,还是后面的 16t 轮胎式铲土机均可在试验区内安全行走。因此,降水过程对于加固浅层地基土的强度有明显的效果。

抽水 5d 后,用 14t 履带式挖掘机进行了第一次碾压,其后测得的单位时间出水量迅速增大,为 $1.67\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,但持续时间并不长(大约 4h 即恢复到碾压前的状态,单位时间出水量 $0.71\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)。结合场地浅层的压密情况,认为碾压效果是明显的,除可显著改善场地的出水量外,也明显增加了软土地基硬壳层的厚度。

抽水 8d 后,用 16t 轮胎式铲土机又进行了连续

两次碾压(记为第 2 次碾压),然后进行量测,结果单位时间出水量也有增大,但增加量不大(为 $0.83\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)。这表明,第 2 次碾压也有一定效果。

抽水 11d 后,进行了第 3 次碾压,但从场地的变化情况和出水量来看,无明显的变化,碾压效果不明显。可见,从单位时间出水量变化和场地的压密效果来看,进行两遍碾压是合适的,过多的碾压遍数意义不大。

经过井点降水及碾压后(大约 15d)后,进行了第一遍强夯。夯锤直径为 2.25m,夯锤高度为 0.7m,夯锤重量为 10t。第一遍强夯的夯击能量为 $800\text{kN} \cdot \text{m}$,每个点夯击两次。现场试验表明,采用该能量($800\text{kN} \cdot \text{m}$)和夯击次数(2 次)进行强夯是合适的。第 1 击的夯坑深度一般为 20 ~ 30cm,第 2 击的累积夯坑深度一般为 45 ~ 55cm,而夯坑周围并没有明显的隆起(隆起量小于 10cm)。因此,第 2 击的夯击效果是明显的。按照上述夯击能量($800\text{kN} \cdot \text{m}$),对个别夯点进行了 3 次夯击,但产生了较大的隆起。

第一遍强夯后经过 2d,进行了第二遍强夯。夯击能量提高到 $1000\text{kN} \cdot \text{m}$,每个点夯击两次。从夯击效果来看,两次夯击后,夯坑累积深度一般为 40 ~ 50cm,隆起量小于 10cm,效果明显。

第二遍强夯后经过 3d,进行了第三遍强夯,夯击能量为 $600\text{kN} \cdot \text{m}$,此时土层的表层密实程度又得到显著提高。

4 孔隙水压力测试结果

4.1 强夯过程中孔压随时间变化过程

图 2 给出降水后强夯过程中(包括第 1, 2, 3 遍强夯荷载作用),由于强夯动力荷载作用引起的超孔隙水压力的变化过程。第 1 遍强夯荷载作用前,地下水位为 2.57m。

由图 2 可以看出,强夯荷载作用下,孔隙水压力的上升量是十分明显的。第 1 遍(夯击能量为 $800\text{kN} \cdot \text{m}$,每点夯击次数一般为 2 次)强夯作用下,夯点下深度 2m 处的孔隙水压力峰值分别为 65.8kPa,而距离夯点水平距离 2m, 4.5m 处的孔隙水压力也有明显的增大。观测结果表明,第 1 遍强夯作用后,经过 48h 后,孔隙水压力消散很快。例如,夯点下 2m 处孔压水压力消散至 5.7kPa(图 2(a)),消散率为 91.4%。其它各孔的孔隙水压力也

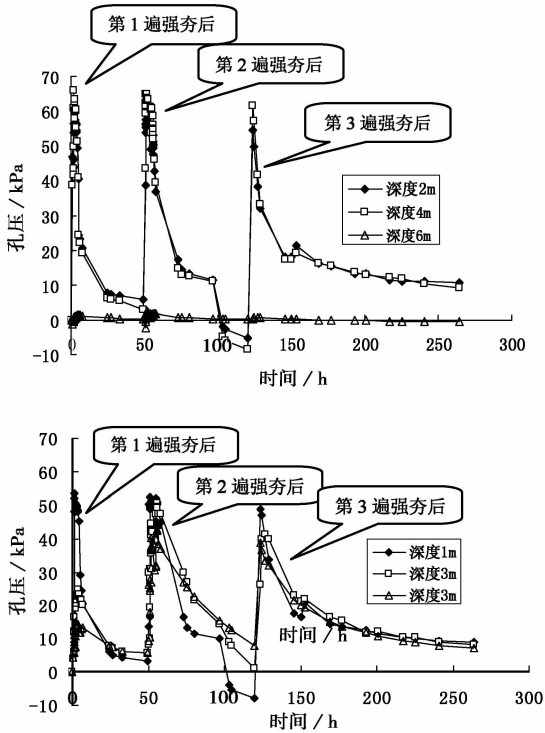


图2 强夯过程孔隙水压力随时间变化

Fig. 2 Variations of pore water pressure with time during dynamic compaction

a. 孔压观测孔 K1(夯点下); b. 孔压观测孔 K2(夯点下)

均消散到90%以上。

由图2可以看出,第1遍强夯作用下,孔隙水压力在深度5m范围内的反映是明显的,而深度6m处孔压几乎为零。因此,可以认为强夯的影响深度在5m以内。关于这一点将在后面孔隙水压力的影响范围中给予详细说明。

第2遍(夯击能量为 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$,每点夯击次数一般为2次)适当增大了夯击能量,结果孔隙水压力仍然有较大的上升,离夯点较近处的孔隙水压力峰值可上升至 55.9kPa ,而其影响深度一般也在5m以上。在第2遍强夯作用后,经过约72h(约3d),孔压也消散至95%以上,表明消散速率很快。但相比第一遍夯击后,孔隙水压力消散速度减弱。

第3遍为满夯,夯击能量为 $600\text{kN}\cdot\text{m}$,目的是提高表层土的密实程度。夯击中发现,孔隙水压力仍然较大(可达到 61.5kPa)。之后,由于已经停止抽水,因此孔压消散相对慢些。经过140h(大约6d)后,孔隙水压力最终稳定在 $10\sim 15\text{kPa}$ (实际上已为静水压力作用)。

为详细分析每点夯击次数对孔隙水压力的影

响,图3给出孔压观测孔K1(第1个夯点下面)和孔压观测孔K2(夯点下,距离第1个夯点水平距离为14m)在第1遍强夯后的孔隙水压力增长以及消散过程。由图3a可以看出,第1击及第2击作用下,深度2m处的孔隙水压力分别为 46.7kPa 和 53.8kPa 。其中,第2击的增量为 7.1kPa ,有一定程度增大。而孔压观测孔K2的孔隙水压力相对小得多(第1击和第2击的孔压累积值分别为 4.3kPa 和 9.1kPa ,图3b),而第2击对于第1击的增量更小。

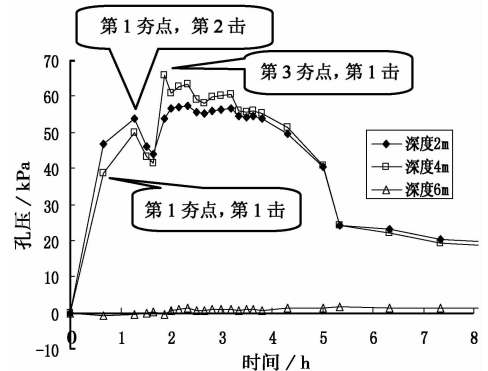


图3 夯点下不同深度土层孔隙水压力随时间变化

Fig. 3 Variations of pore water pressure with time under the pounder point

十分有意义的是,在第3夯点第1击作用下(夯点布置见图1),深度4m处的孔压值反而比深度2m处有更大的增加量。这是由于,根据夯击的动应力影响范围,对于夯点1(距离夯点3的水平距离为4m),深度4m处比深度2m处将有更大的动应力,所引起的孔隙水压力相应也大。

4.2 强夯过程中孔压的影响范围分析

图4给出孔隙水压力沿夯击点处不同的径向距离的分布特征。可见,在水平距离6m的范围内,超孔隙水压力上升比较明显,如在水平距离6m处为 8kPa 。在此范围内,孔隙水压力随着径向距离的增大逐渐减小。

图5给出强夯中心点下以及离开强夯点水平距离2m处,孔隙水压力沿深度方向的分布规律。可以看出,在深度5m范围内,孔压上升比较明显(如深度5m处的孔压为 $10\sim 15\text{kPa}$),这一深度可作为本次试验的强夯作用的影响深度。图5还给出第1遍强夯作用完毕后,消散过程中不同阶段的孔隙水压力沿着深度的分布。可见,随着时间的增长,孔隙水压力逐渐趋于平缓。

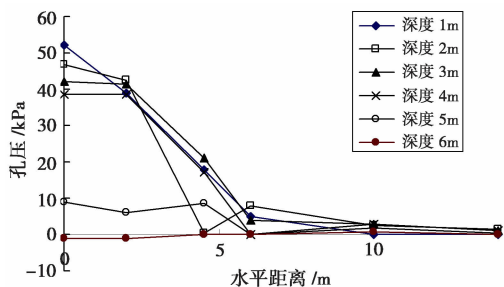


图4 孔隙水压力沿径向距离分布

Fig. 4 Distributions of pore pressure along radial distances

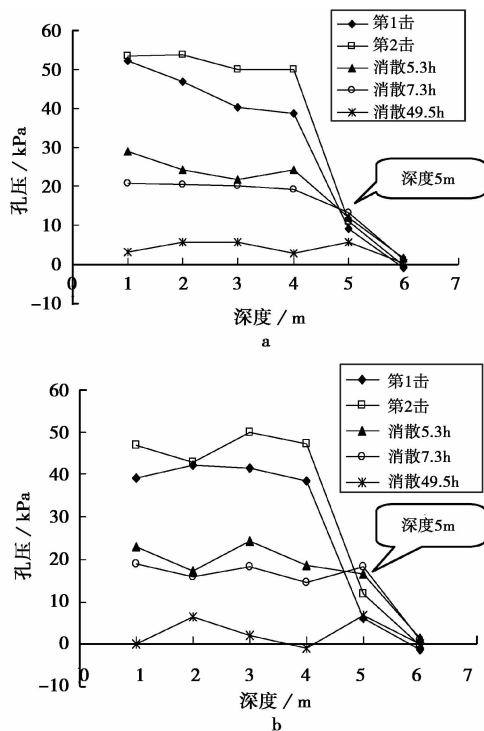


图5 孔隙水压力沿深度分布

Fig. 5 Distributions of pore pressure along depth of soils

a. 强夯中心点下; b. 离开强夯点水平距离2m

5 变形和沉降

5.1 分层沉降测试结果

图6给出强夯过程中不同深度沉降随时间变化。可见,每遍夯击后不同深度土层均有不同程度的沉降,而在其后,由于孔隙水压力的消散,不同深度的沉降仍在持续发展(此即固结过程)。值得注意的是,第3遍(满夯)夯击作用下,夯击前、后的沉降量(大致为4.5~8cm)比第1,2遍强夯夯击前、后的沉降量要大(大致为1~2cm)。这是由于满夯时,夯锤直接靠近沉降管的原因。

由图6可以看出,深度4.6m处的沉降量累积

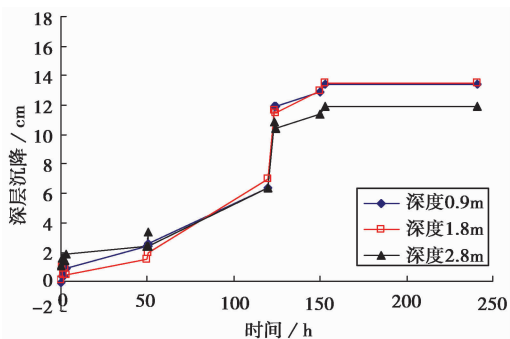


图6 土层深层沉降随时间变化过程

Fig. 6 Variations of deep settlement of soil layers with time

可以达到10.4cm,说明强夯荷载作用下的压密效果可以达到4.6m以上,加固效果明显。

5.2 地表沉降

表1给出降水及碾压以及每遍强夯并整平场地后,地表沉降量变化情况。可见,每个阶段所引起的地表沉降量是显著的。经过预降水强夯法加固后,地表的最终沉降量为50.8cm,表明地层的密实程度得到显著提高,加固效果十分令人满意。

表1 地表沉降变化情况

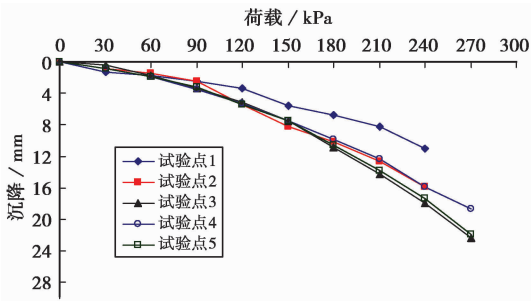
Table 1 Variations of ground surface settlement

施工工况	地表累积沉降量/cm	地表沉降增加量/cm
降水及碾压	17.8	17.8
第1遍强夯	31.5	13.7
第2遍强夯	39.6	8.1
第3遍满夯	50.8	11.2

6 现场荷载板试验

本次荷载试验所用荷载板为圆形荷载板,其直径为0.8m,面积为0.5m²。荷载板试验结果见图7。根据预估的承载力特征值,设定施加的每级荷载增量为30kPa。图7给出5个典型试验点的试验结果。

由图7可以看出,在施加荷载范围内,5个试验点的荷载-沉降曲线并未出现明显的转折点(比例极限荷载),而呈现沉降速率逐渐增大的连续变化过程。按照“建筑地基基础设计规范(GB50007-2002)”的规定,可按一定的地基沉降值(如可取沉降值 $s=0.01b$, b 为承压板直径)所对应的荷载作为承载力特征值。

图7 荷载试验 $p-s$ 曲线Fig. 7 Curves $p-s$ in field bearing tests

根据上述试验结果,可确定采取“预降水强夯法”加固地基后,地基承载力特征值可达到 135kPa。

7 结论

(1)现场试验表明,经过“预排水动力固结法”加固后,地基的加固效果明显,所拟定的降水参数及措施、强夯夯点布置及能量设计是完全可行的,达到了预期的效果。

(2)改进的“轻型井点”预排水方法对渗透性一般的新近吹填土地基是可行的。一般在 3h 内,场地内的水位即由降水前的 1.5m 降至 3.0m,再经过 72h(3d) 水位可降至 4.5m。但由于上部土层滞水的存在,浅层的含水率仍然比较高。因此,建议当水位降至一定深度后,继续抽水一段时间再进行后续的强夯。

(3)强夯荷载作用下,孔隙水压力的上升量十分明显。第 1 遍(夯击能量为 $800\text{kN}\cdot\text{m}$,每点夯击次数一般为 2 次)、第 2 遍(夯击能量为 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$,每点夯击次数一般为 2 次)、第 3 遍(满夯,夯击能量为 $600\text{kN}\cdot\text{m}$)强夯作用下,夯点下深度 2m 处的孔隙水压力峰值分别为 65.8kPa, 64.8 kPa, 61.6 kPa。而距离夯点 2m, 4.5m 处的孔隙水压力也有明显的增大。

(4)观测结果表明,第 1 遍强夯作用后,经过 48h(约 2d)后,孔隙水压力均消散到 90% 以上。第 2 遍强夯作用后,经过约 72h(约 3d),孔压也消散至 95% 以上,消散速率很快。第 3 遍强夯作用后,经过 140h(大约 6d)后,孔隙水压力最终稳定。

(5)分层沉降观测资料表明,在预排水、碾压以及第 1, 2, 3 遍强夯作用下,不同深度的土层均有明显的沉降(特别是在强夯荷载作用下),说明土体的深层得到明显的压密,影响深度可达 4.6m 以上,加固效果明显。

(6)地表沉降观测资料表明,预排水、碾压以及第 1, 2, 3 遍强夯作用所引起地表沉降量是显著的。地表的最终沉降量为 50.8cm,表明地层的密实程度得到显著提高,加固效果十分明显。

(7)根据现场荷载板试验结果,采取“预排水动力固结法”加固后,地基承载力特征值可达到 135kPa。

参考文献

- [1] Menard L, Broise Y. Theoretical and practical aspects of dynamic compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1975, **25**(1): 3~18.
- [2] Thilakasih H S, Gunaratne M., Mullins G, Stinnette P, Jory B. Investigation of impact stress induced in laboratory dynamic compaction of soft soil. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 1996, **20**(10): 753~767.
- [3] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳. 动力固结的理论与实践[J]. *岩土工程学报*, 1986, **8**(6): 1~17.
Qian Jiahuan, Qian Xuede, Zhao Weibin. Stress field distribution characteristics offoundation during dynamic consolidation and its application. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, **8**(6): 1~17.
- [4] 孔令伟, 袁建新. 强夯时地基土的应力场分布特征及应用[J]. *岩土力学*, 1999, **20**(3): 13~23.
Kong Lingwei, Yuan Jianxin. Stress field distribution characteristics offoundation during dynamic consolidation and its application. *Rock and soil Mechanics*, 1999, **20**(3): 13~23.
- [5] Bai Bing. Consolidation characteristics and undrained shear strength under repeated impact loading. *Geotechnical testing Journal*, 2006, **29**(4): 289~297.
- [6] 白冰. 强夯荷载作用瞬间饱和和土层固结变形计算[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(1): 57~64.
Bai Bing. Calculation of consolidation deformation of saturated stratum under dynamic compacting loading. *Rock and soil Mechanics*, 2003, **24**(1): 57~64.
- [7] 姜志全, 李廷芥, 倪光乐. 动力固结法加固软土路基试验分析[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(12): 2033~2036.
Jiang Zhiquan, Li Tingjie, Ni Guangle. Test on a soft foundation consolidated by dynamic consolidation method. *Rock and soil Mechanics*, 2004, **25**(12): 2033~2036.
- [8] 孟庆山, 汪稔, 刘观仕. 动力固结后饱和和软土三轴剪切性状的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(22): 4025~4029.
Meng Qingshan, Wang Ren, Liu Guanshi. Experimental study on behaviour of triaxial shear test of saterated soft clay treating with dynamic consolidation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(22): 4025~4029.
- [9] 周健, 曹宇, 贾敏才, 黄茂松. 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.
Zhou Jian, Chao Yu, Jia Mincai. In-situ test study on soft soils improvement by the DCM combined with dewatering. *Rock and soil Mechanics*, 2003, **24**(3): 376~380.
- [10] 聂庆科, 胡建敏, 王国辉等. 山东大唐东营电厂新近吹填软土地基处理试验研究报告[R]. 石家庄: 河北建设勘察研究院有限公司, 2006, 10.