

不同能级强夯处理深厚填土地基的效果分析

张忠雄¹, 徐文涛^{2*}, 孙 莱³, 丁亚峰⁴, 曾 涛⁵

(1. 宁夏强夯机械工程有限公司, 宁夏 银川 750003; 2. 中汽智诚(洛阳)岩土工程有限公司, 河南 洛阳 471000;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 4. 机械工业第四设计研究院有限公司, 河南 洛阳 471000;
5. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了解 12 000 kN·m 能级以上的强夯在深厚填土地基的处理效果, 开展 12 000 kN·m、15 000 kN·m、18 000 kN·m、25 000 kN·m 四个能级的对比试验研究, 通过现场监测、标准贯入试验、平板载荷试验等方法评价强夯处理效果, 基于检测结果探讨夯沉量、土体密实深度与强夯能级的关系, 并建立夯沉量、夯后地表沉降量预测模型。试验结果表明: 以最后两击平均夯沉量作为收锤控制标准, 部分夯点在 2~3 击后即达到收锤标准, 强夯处理效果难以保证, 应设计强夯的最低单点夯击次数, 以控制强夯处理效果达到设计标准; 通过对夯沉量、夯后地表沉降量与强夯能级的关系进行拟合分析, 发现两者与强夯能级均呈线性关系, 基于此建立了夯沉量、夯后地表沉降量预测模型; 不同能级强夯处理后, 检测深度范围内, 土体密实深度随强夯能级的增加而增大; 强夯后地基承载力特征值不小于 200 kPa, 夯后载荷试验的沉降范围为 8.2~9.8 mm。

关键词: 强夯能级; 深厚填土; 夯沉量; 标准贯入试验; 承载力

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0026-08

Effect of different energy level of dynamic compaction in deep fill foundations

ZHANG Zhong-xiong¹, XU Wen-tao^{2*}, SUN Mo³, DING Ya-feng⁴, ZENG Tao⁵

(1. Ningxia Dynamic Compaction Machinery Engineering Co., Ltd., Yinchuan 750003, Ningxia, China;
2. China Automobile Zhicheng (Luoyang) Geotechnical Engineering Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China;
3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China;
4. SCVIC Engineering Corporation, Luoyang 471000, Henan, China;
5. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: To comprehend the treatment effect of dynamic compaction beyond an energy threshold of 12 000 kN·m in deep fill foundations, comparative experimental studies of four distinct energy levels: 12 000 kN·m, 15 000 kN·m, 18 000 kN·m and 25 000 kN·m were carried out. Dynamic compaction treatment impact through on-site monitoring, standard penetration tests, and plate loading tests were evaluated. Through a comprehensive analysis of the results, we explored the correlations among compaction settlement, soil compaction depth, and dynamic compaction energy level. In light of these findings, a predictive model for compaction settlement and post-compaction surface settlement was developed. The results show that the average compaction settlement in the last two blow counts is used as the closing control standard. Part of the compaction points reach the closing standard after 2-3 blow counts. To ensure the effectiveness of dynamic compaction, the minimum blow counts of single point should be designed to control the compaction effect to meet the design standards. By fitting and analyzing the relationship between compaction settlement, post-compaction surface settlement, and dynamic compaction energy level, it is found that both settlements have a linear relationship with the dynamic compaction energy level. Based on this, a predictive model for compaction settlement and post-compaction surface settlement is established. After dynamic compaction treatment with different energy levels, within the detection depth range, the soil compaction depth increases with the increase of dynamic compaction energy levels. The characteristic value of the bearing capacity of the foundation after dynamic compaction is not less than 200 kPa, and the settlement of the loading test after dynamic compaction is 8.2

收稿日期: 2023-07-11

作者简介: 张忠雄 (1980—), 男, 宁夏银川人, 工程师, 主要从事地基与基础施工技术研发与应用。E-mail: 313614222@qq.com。

*通信作者: 徐文涛 (1998—), 男, 河南洛阳人, 硕士, 主要从事勘察、设计与施工技术研发与应用。E-mail: wyjcdx1412@163.com。

to 9.8 mm.

Key words: dynamic compaction energy level; deep fill; dynamic compaction settlement; standard penetration test; bearing capacity

0 引言

近年来, 填沟造地工程在我国西部地区不断涌现, 关于深厚填土地基处理工程也随之而来。在深厚填土地地区进行地基处理的过程中, 以增强土体密实性、提高地基承载力为主要目的, 目前最常用的地基处理方法为强夯法^[1-4]。强夯法作为一种古老的地基处理方法, 在不断的改进之中沿用至今, 离不开它施工操作简单、经济高效、地基处理效果好等优点^[5-7], 在处理填土地基时, 还可减少土体孔隙, 增强土体强度, 提高地基承载力^[8-10]。

强夯法在工程中不断应用的同时, 众多学者对强夯的试验研究也在不停的跟进当中, 特别是强夯法在填土地基中的工程应用研究, 得到了大量实用的结论和建议。梁永辉等^[11]通过在高填方场地进行强夯试验, 检测得出了夯后土体的干密度增大、孔隙比减小、土体的密实性提高; 董炳寅等^[12]指出了随着强夯能级的增大, 有效加固深度增加速度变慢, 20 000 kN·m 能级相较于 10 000 kN·m, 能级提升了 100%, 有效加固深度仅增加了约 50%; 徐文涛等^[13]进行了 8 000 kN·m、12 000 kN·m、16 000 kN·m、25 000 kN·m 4 个高能级强夯的对比试验研究, 发现了地基处理过程中, 土体干密度随着强夯能级的增大而增大, 当强夯能级达到 16 000 kN·m 后, 增大强夯能级以提高土体干密度的效果减弱; 朱德良等^[14]在丘陵填方地区开展强夯试验, 结果表明夯后的地基承载力特征值、变形模量与动探击数基本呈线性关系, 可根据动探击数对地基承载力进行判别; 魏子扬等^[15]在强夯法处理完回填土地基后, 采用多种检测方法测试地基承载力, 分析平板载荷试验、动力触探试验、瑞雷波试验之间的相关性, 提出了拟合相关曲线并验证; 胡瑞庚等^[16]对碎石土、湿陷性黄土、砂土 3 种回填土地基进行高能级强夯试验研究, 发现了夯点间距、锤底面积对不同回填土地基加固效果的影响规律, 得到了高能级强夯优化设计参数。

基于上述的研究成果, 本文在某场平工程中开展 12 000 kN·m、15 000 kN·m、18 000 kN·m、25 000 kN·m 4 个超高能级强夯对比试验, 强夯完成后通过对地基土的工程特性指标进行测定, 评价不同强夯能级的地基处理效果, 总结相关规律, 形成

的经验规律可为相关工程提供参考。

1 试验概况

1.1 地质条件

拟建工程场区位于某市工业园区, 3 个地块整平标高由东向西大致为: 1 349.5 m、1 345.5 m、1 340.5 m。在该场区勘察深度范围内, 除素填土外, 均为第四系洪积相堆积角砾及第三系砂岩地层。整个场区地层自上而下可分为下述 4 层, 各岩土层的岩性分述如下:

①杂填土层 Q_4^m : 杂色-黄褐色, 松散-稍密, 稍湿, 主要为砂岩、泥岩碎块、角砾, 间隙充填砾砂、粉细砂, 含大量建筑垃圾, 属堆填时间小于 3 年的新近填土。该层土土质均匀性较差, 欠固结, 该层土多为粗粒土, 无法有效采取不扰动土样, 场区内普遍分布。

②素填土层 Q_4^m : 杂色-黄褐色, 松散-稍密, 稍湿, 主要为砂岩、泥岩碎块、角砾, 间隙充填砾砂、粉细砂, 属堆填时间小于 3 年的新近填土。该层土土质均匀性较差, 欠固结, 该层土多为粗粒土, 无法有效采取不扰动土样, 场区内普遍分布。

③角砾层 Q_4^l : 杂色, 中密, 稍湿, 以次棱角为主, 成分以石英岩、灰岩为主, 分选性差, 磨圆度差。粒径大于 2 mm 的颗粒超过总质量的 50%, 孔隙间充填有粉细砂及中粗砂, 局部夹薄层砾砂、细砂。该层场区内分布不连续。

④泥质砂岩 E: 红褐色-灰褐色, 全风化-强风化, 为第三系沉积软质岩, 稍湿, 局部夹薄层全分化砂质泥岩。胶结差, 极破碎, 散体状结构, 矿物风化蚀变显著, 风化裂隙发育, 裂隙多为张裂隙, 裂隙面多为黏性土充填, 岩芯多呈散粒状-碎块状, 采取率 83%~90%, RQD (岩石质量指标) 极差, 质量等级 V 级, 易风化崩解。地层强度较高, 变形量较低, 层顶起伏较小。地层厚度较大, 变化较小。场区内普遍分布。密实度自上而下呈增强趋势, 场地地层剖面图如图 1 所示。

根据勘察报告可知, 第①、②层为欠固结土层, 总厚度介于 9.00~17.00 m, 由于拟建物需满足长期使用不产生沉降的设计要求, 需对第①、②层填土进行地基处理, 处理后的地基承载力不小于

200 kPa, 地基土达到密实状态。

1.2 夯前地基土工程特性分析

夯前在场地进行了重型动力触探试验、波速测

试等试验确定地基土的工程特性, 以期为夯后的检测试验提供对比的指标, 天然地基土指标统计如表 1 所示。

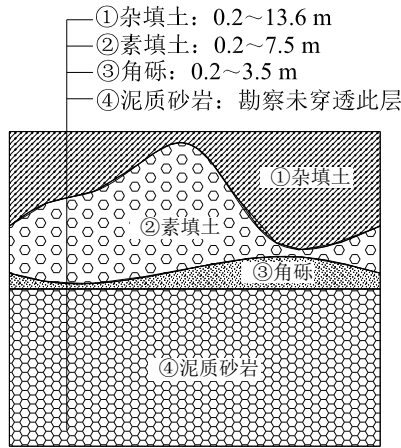


图 1 地层剖面图

Fig. 1 Stratigraphic profile

表 1 天然地基土指标统计表

Table 1 Statistical table of natural foundation soil index

土层	重型动力触探击数 $N_{63.5}$ /击	承载力特征值 f_{ak} /kPa	等效剪切波速 v_{se} /(m/s)
①杂填土层 Q_4^m	4.2	—	120~140
②素填土层 Q_4^m	4.0	—	120~140
③角砾层 Q_4^d	15.3	200	380~400
④泥质砂岩 E	31.0	260	450~800

1.3 试夯方案

由于场地中各个区域的地基设计处理深度不同, 因此本次试夯分为 4 个能级, 探究不同能级强夯处理深厚填土的效果, 4 个试夯区布置如图 2 所示, 试夯区位于各区域中具有代表性的道路上, 尺寸均为 20 m×20 m。

强夯能级分别为 12 000 kN·m、15 000 kN·m、18 000 kN·m、25 000 kN·m, 夯点布置图如图 3 所示。夯点布置形式为梅花形, 其中, 主夯的主要作用是为了加固深层土体, 插夯和加固夯是为了加固主夯无法处理到的浅层土体, 试夯试验参数如表 2 所示。

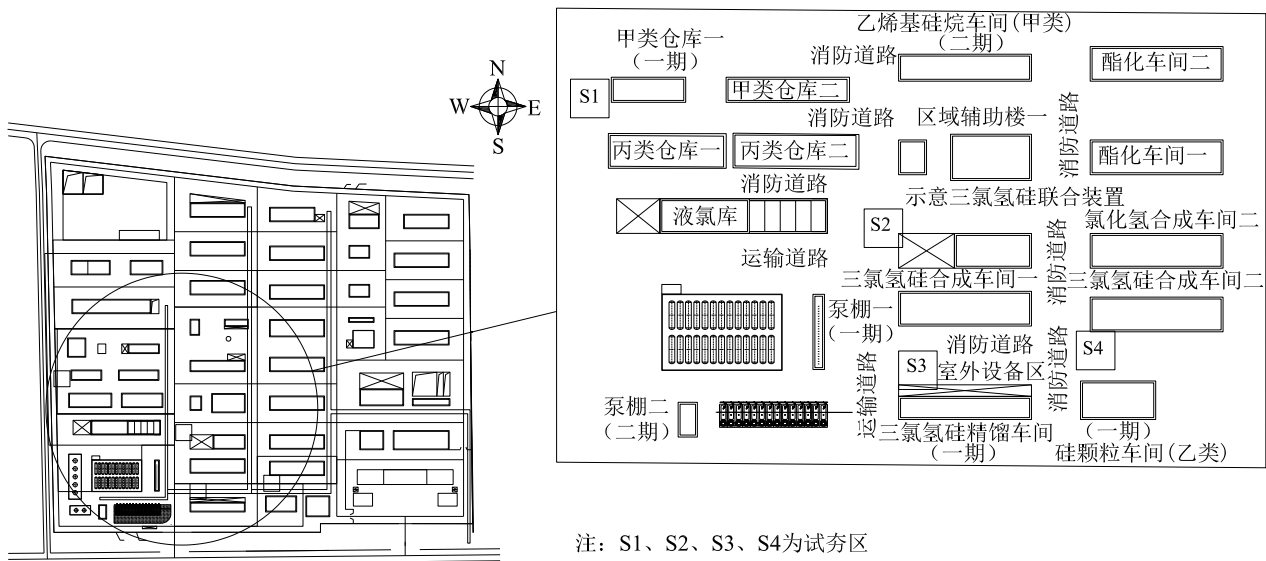


图 2 试夯区布置图

Fig. 2 Plan of compaction trial test area

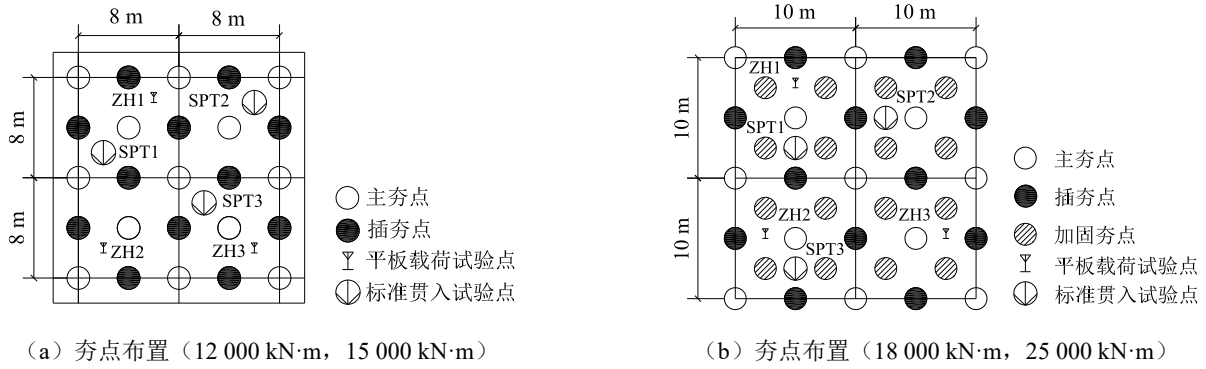


图 3 夯点布置图

Fig. 3 Layout of tamp spots

表 2 试夯试验参数

Table 2 Compaction trial test parameters

试夯区	夯击类型	能级/ (kN·m)	夯点间 距/m	夯锤直 径/m	最低击数 控制值/击	最后两击夯沉量平 均值不大于/mm	满夯控制标准
S1	点夯	25 000			12	300	
	插夯	8 000	10	2	10	150	2 000 kN·m, 锤印 1/4 搭接
	加固夯	4 000			6	50	
S2	点夯	18 000			12	250	
	插夯	8 000	10	2	10	150	2 000 kN·m, 锤印 1/4 搭接
	加固夯	4 000			6	50	
S3	点夯	15 000			10	250	
	插夯	8 000	8	2	10	150	2 000 kN·m, 锤印 1/4 搭接
S4	点夯	12 000			6	200	
	插夯	6 000	8	2	6	100	2 000 kN·m, 锤印 1/4 搭接

图 3 (a) 为 12 000 kN·m、15 000 kN·m 能级的夯点布置图, 夯点间距均为 8 m, 主夯分 2 遍进行, 主夯完成后, 在主夯点之间进行插夯, 待插夯完成后整片试夯区进行 1 遍满夯。图 3 (b) 为 18 000 kN·m、25 000 kN·m 能级的夯点布置图, 夯点间距均为 10 m, 主夯分 2 遍进行, 主夯完成后, 在主夯点之间进行插夯, 插夯完成后, 在主夯点、插夯点、各夯点之间进行加固夯, 待加固夯完成后整片试夯区进行 1 遍满夯。

1.4 试夯过程

试夯开始前对试夯场地场平处理, 保证整片场地的标高差异不大, 进行测量放点, 放出第一遍强

夯的点位, 强夯机械就位进行强夯, 达到收锤标准后, 挪至下一点位开始强夯, 逐点完成第一遍强夯, 完成后再次对场地进行场平处理, 然后开始下一遍强夯, 基于此施工程序, 依次完成主夯、插夯、加固夯以及满夯。

1.5 试验检测

此次试夯主要研究地基土承载力以及密实程度与强夯能级的关系, 主要采取的检测方法为平板载荷试验以及标准贯入试验, SPT1、SPT2、SPT3 分别代表 3 个标准贯入试验点, ZH1、ZH2、ZH3 分别代表 3 个平板载荷试验点, 见图 3。检测内容、方法及要点见表 3。

表 3 检测内容、方法及要点

Table 3 Detection content, method and key points

检测内容	检测方法	检测要点
强夯处理效果	标准贯入试验	试验采用自动落锤法, 锤重 63.5 kg, 落距 76 cm, 钻杆直径 42 mm, 试验从施工桩顶标高开始连续贯入, 记录每贯入 30 cm 的锤击数
地基承载力特征值	平板载荷试验	进行慢速维持荷载法平板载荷试验 (载荷板直径为 1.59 m、面积约为 2.0 m ²), 首级压力为 63 kPa, 分级压力增量约为 60 kPa, 最大加载量为 500 kPa

2 试验结果与分析

2.1 夯沉量关系曲线分析

夯后对各个试夯区的第一遍夯沉量进行统计分析,平均夯沉量与夯击次数关系曲线如图4所示,S表示试夯区,1H表示夯点。试夯区S1的平均累计夯沉量为310.2 cm,每击的平均单点夯沉量为1.8~78.8 cm,夯击次数达到6击后,满足最后两击夯沉量平均值不大于30 cm;试夯区S2的平均累计夯沉量为248.6 cm,每击的平均单点夯沉量为4.3~62.3 cm,夯击次数达到6击后,满足最后两击夯沉量平均值不大于25 cm;试夯区S3的平均累计夯沉量为99.9 cm,每击的平均单点夯沉量为2.9~

18.7 cm,第2击后,夯沉量均满足最后两击夯沉量平均值不大于25 cm;试夯区S4的平均累计夯沉量为59.7 cm,每击的平均单点夯沉量为4.1~14.9 cm,第2击后,夯沉量均满足最后两击夯沉量平均值不大于20 cm。

结合试夯区S3、试夯区S4的夯沉量数据,进行分析研究发现,在进行强夯参数设计时,如果收锤标准仅按最后两击平均夯沉量控制,由于地基土表层结构性强,夯锤作用于地表时的冲击能量相对较小,对土层结构的破坏程度未达到理想状态,造成的直接结果就是强夯的夯沉量小,导致试夯区S3、试夯区S4在第2击时就达到了最后两击平均夯沉量控制标准,因此有必要控制强夯的最低强夯击数,最大程度保证强夯的地基处理效果。

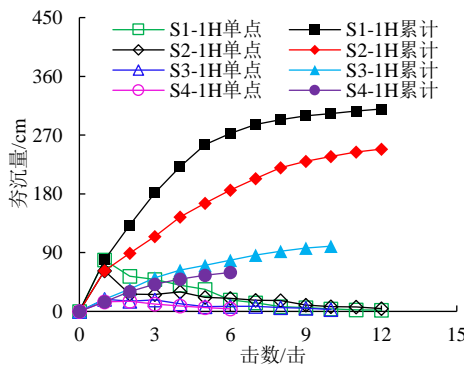


图4 平均夯沉量与夯击次数关系曲线

Fig. 4 Relationship between average compaction settlement and compaction times

将强夯第一遍夯沉量和强夯完成后地表沉降量分别与强夯能级进行数据拟合,结果如图5所示,第一遍夯沉量与强夯能级拟合公式的 R^2 为0.8864,夯后地表沉降量与强夯能级拟合公式的 R^2 为0.9982,表明两者与强夯能级均呈线性关系。

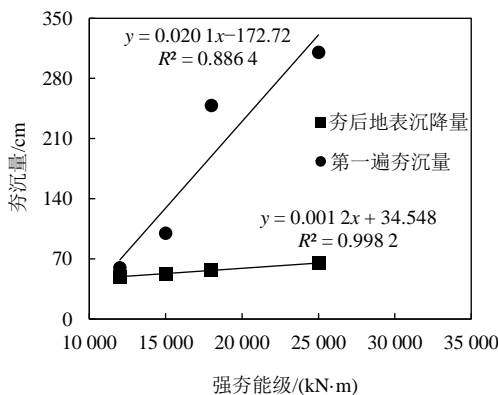


图5 第一遍夯沉量、夯后地表沉降量与强夯能级拟合结果

Fig. 5 Fitting results of compaction settlement, post-compaction settlement and dynamic compaction energy level

在今后的填土地区,即可按照下列的拟合公

式,计算不同强夯能级的夯沉量或夯后地表沉降量,为后续施工提供一定的参考。

$$h = aW + b \quad (1)$$

式中: h 为夯沉量或夯后地表沉降量; W 为强夯能级; a 、 b 为拟合系数,在实际工程中,可根据试夯数据进行取值。

2.2 标准贯入试验结果分析

夯后检测完成时,根据检测结果得到标准贯入试验结果如图6所示,SPT位置见图3。

根据检测结果可知:试夯区S1夯后检测深度1~17 m范围内均为填土,标准贯入击数为31.4~52.0击,平均击数为48.0击,较夯前标准贯入击数提升1070.7%;试夯区S2夯后检测深度1~14 m范围内均为填土,标准贯入击数为28.7~52.0击,平均击数为48.8击,较夯前标准贯入击数提升1090.2%;试夯区S3夯后检测深度1~12 m范围内均为填土,标准贯入击数为26.9~53.0击,平均击数为48.1击,较夯前标准贯入击数提升了1073.2%;试夯区S4夯后检测深度1~9 m范围内

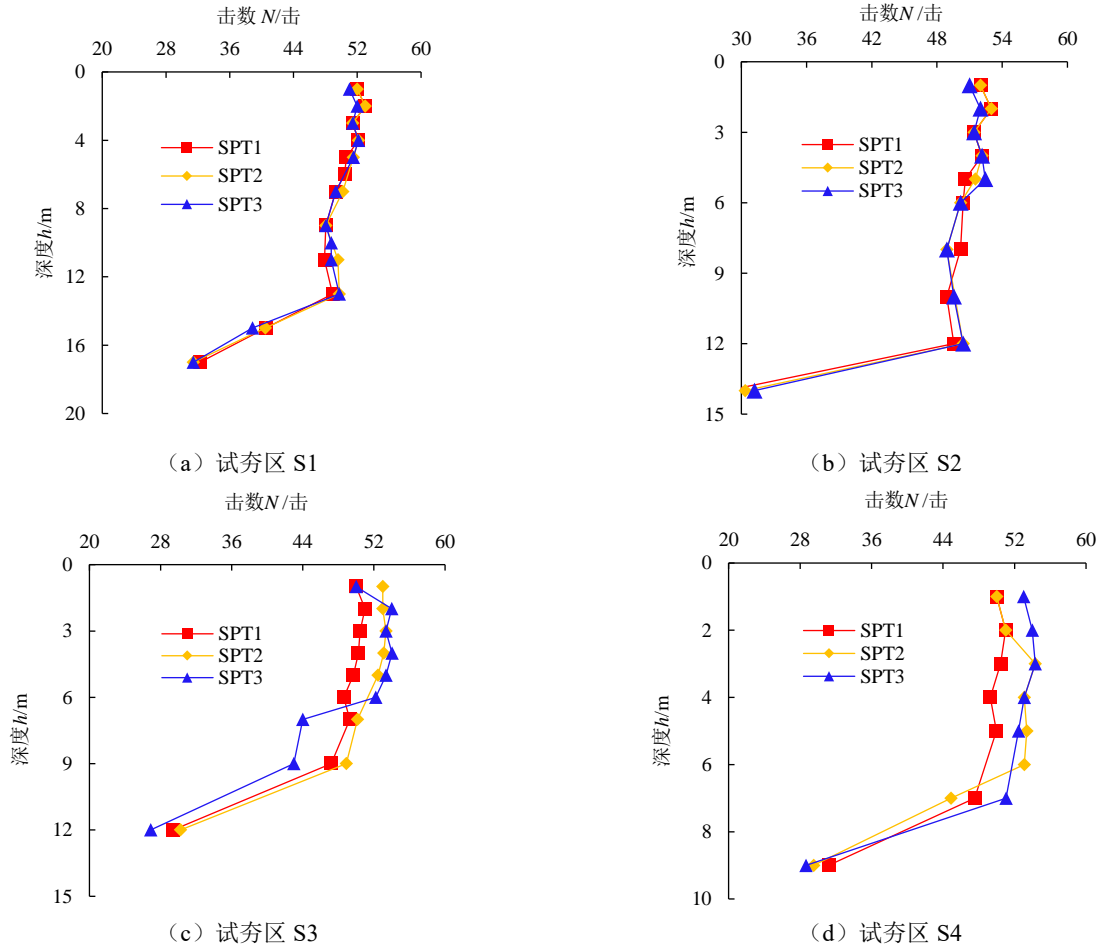


图 6 标准贯入试验结果

Fig. 6 Standard penetration test results

均为填土，标准贯入击数为 28.7~53.0 击，平均击数为 48.4 击，较夯前标准贯入击数提升了 1080.5%。

由图 6 可知，各个试夯区检测深度范围内的标准贯入击数在夯后都得到了巨大的提升，击数随着深度的增加而逐渐衰减，在达到某一深度时，标准贯入击数衰减程度加剧。试夯区 S1 中，当深度达到 13 m 左右时，标准贯入击数衰减程度加剧；试夯区 S2 中，当深度达到 12 m 左右时，标准贯入击数衰减程度加剧；试夯区 S3 中，当深度达到 9 m 左右时，标准贯入击数衰减程度加剧；试夯区 S4 中，当深度达到 7 m 左右时，标准贯入击数衰减程度加剧。

将标准贯入击数衰减程度加剧以上的深度称为标贯最优深度，即最优深度范围内，标准贯入击数相差不大，土体密实程度均匀。统计分析四个试夯区的最优深度与强夯能级拟合结果如图 7 所示，由图 7 可知，最优深度与强夯能级呈线性关系，随着强夯能级的增加，最优深度逐渐增大。

2.3 标准贯入击数与强夯能级关系分析

对不同试夯区的标准贯入击数进行统计分析，标准贯入击数与强夯能级关系曲线如图 8 所示。

检测深度范围内，最大标准贯入击数和最小标准贯入击数与强夯能级关联性不强，不同能级的最大标准贯入击数相差不大，同理最小标准贯入击数也相差不大。不同能级的标准贯入击数结果区别在于密实深度的不同，强夯能级越大，土体密实深度越大。

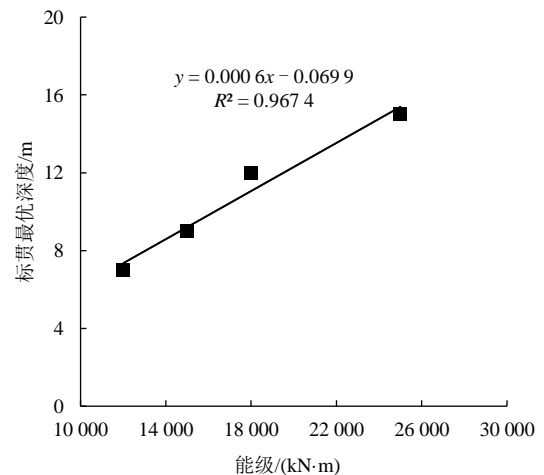


图 7 最优深度与强夯能级拟合结果

Fig. 7 Fitting results of optimal depth and dynamic compaction energy level

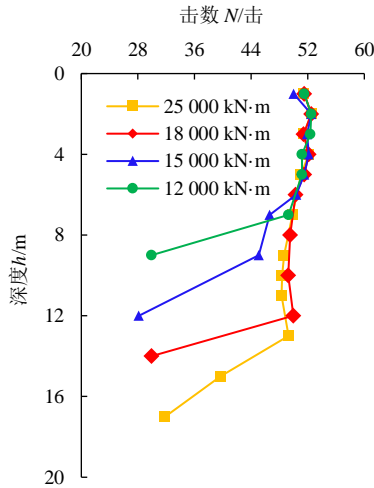


图8 标准贯入击数与强夯能级关系曲线

Fig. 8 Relationship between standard penetration blow counts and dynamic compaction energy level

2.4 强夯地基的承载力特征值

强夯完成后地基土的平板载荷试验曲线如图9所示,最大加载为500 kPa,试夯区S1的总沉降量为8.5 mm,试夯区S2的总沉降量为9.8 mm,试夯区S3的总沉降量为8.5 mm,试夯区S4的总沉降量为8.2 mm。根据平板载荷试验曲线可知,在试验中,各检测点均未达到极限荷载,且没有出现比例界限,加压荷载为250 kPa时,检测点的“ s/d ”(相对变形值)取值均为0.01,综合判定4个试夯区的地基承载力特征值不小于200 kPa。

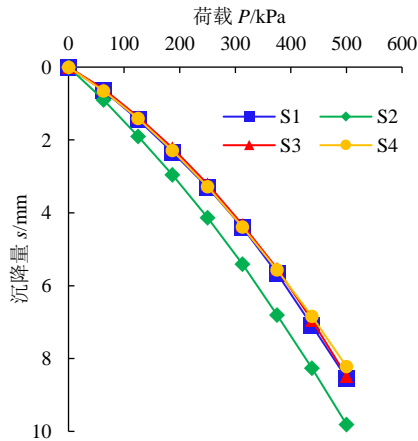


图9 平板载荷试验曲线

Fig. 9 Curves of plate loading tests

2.5 不同土层的差异性对比分析

由试验结果可知,4个试夯区地基土层在检测深度范围内属于①、②层填土层,①杂填土层中因存在大量建筑垃圾,承载力等工程性质与②素填土层有较大差异,结合图6的标准贯入试验结果发现,强夯法处理后,部分深度的②素填土层的标准贯入击数发生突降,强夯后两种土层的承载力仍具有差

异。根据图6、图9可知,各个浅层土体的标准贯入击数相差不大,密实程度相同,浅层土体的承载力特征值不小于200 kPa,满足设计要求,因此,在上部荷载的作用下,浅层土体相当于硬壳层,将作用力均匀地传至下部土体,避免了因两土层的差异性而导致不均匀沉降出现。

3 结论

(1) 强夯设计参数中收锤控制标准应增加单点的最低夯击次数,以最大程度保证强夯的地基处理效果。

(2) 根据本试验结果建立了夯沉量或夯后地表沉降量的预测模型: $h=aW+b$,按照该预测模型,计算不同强夯能级的夯沉量和夯后地表沉降量,为今后填土地基进行强夯法处理时提供一定的参考。

(3) 标准贯入最大值与强夯能级关联性不强,不同强夯能级的标准贯入击数区别在于密实深度的不同,试夯区S1地基土17 m深度范围之内达到密实状态;试夯区S2地基土14 m深度范围之内达到密实状态;试夯区S3地基土12 m深度范围之内达到密实状态;试夯区S4地基土9 m深度范围之内达到密实状态。

(4) 夯后平板载荷试验的沉降为8.2~9.8 mm,通过载荷试验曲线判定强夯后地基承载力特征值不小于200 kPa,表明地基土具有较高的地基承载能力和抗变形能力。

参考文献

- [1] 腊润涛,张荣.强夯法处理湿陷性黄土地基的效果评价[J].公路,2020,65(1):54-57.
LA Run-tao, ZHANG Rong. Effect evaluation of dynamic compaction method in treating collapsible loess foundation[J]. Highway, 2020, 65(1): 54-57.
- [2] 滕光亮.大厚度黄土地区单击夯击能影响强夯加固效果的试验研究[J].地震工程学报,2020,42(3):759-763.
TENG Guang-liang. Experimental study on the effect of single tamping energy on dynamic compaction reinforcement in large-thickness-loess area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 759-763.
- [3] 朱彦鹏,师占宾,杨校辉.强夯法处理山区机场高填方地基的试验[J].兰州理工大学学报,2018,44(5):120-125.

- ZHU Yan-peng, SHI Zhan-bin, YANG Xiao-hui. Experiment on high-filled foundation treatment of airport in mountainous area with dynamic compaction method[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(5): 120-125.
- [4] 赵永祥, 刘波, 高玉杰, 等. 预成孔置换强夯法在软土地基中的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 116-120, 127.
- ZHAO Yong-xiang, LIU Bo, GAO Yu-jie, et al. Experimental investigation on treatment of soft soil foundation by prebored dynamic replacement[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(10): 116-120, 127.
- [5] 王家磊, 韩进宝, 马新岩, 等. 高能级强夯加固深厚杂填土地基现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1154-1163, 1189.
- WANG Jia-lei, HAN Jin-bao, MA Xin-yan, et al. Field test research on strengthening deep and thick backfilled foundation soil by 12 000 kN·m high energy dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1154-1163, 1189.
- [6] 赵家琛, 吕江, 赵晖, 等. 高能级强夯处理抛填路基的有效加固深度[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 27-33.
- ZHAO Jia-chen, LV Jiang, ZHAO Hui, et al. Effective reinforcement depth of high energy dynamic compaction for filled subgrade[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 27-33.
- [7] 吴帅峰, 蔡红, 严俊, 等. 强夯沉降模型及参数特征分析研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 112-118.
- WU Shuai-feng, CAI Hong, YAN Jun, et al. Dynamic compaction settlement model and parameter characteristic analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 112-118.
- [8] 苏亮, 时伟, 水伟厚, 等. 高能级强夯法处理深厚吹填砂土地基现场试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1560-1569.
- SU Liang, SHI Wei, SHUI Wei-hou, et al. Field test of high energy dynamic compaction on hydraulic sandy filling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1560-1569.
- [9] 隋秀华, 张帅珂. 分层强夯填筑法在湿陷性黄土高填方路基中的应用[J]. 鄂州大学学报, 2022, 29(6): 103-105, 109.
- SUI Xiu-hua, ZHANG Shuai-ke. The application of layered dynamic compaction method in collapsible loess high filling subgrade[J]. Journal of Ezhou University, 2022, 29(6): 103-105, 109.
- [10] 徐文涛, 董宝志, 于永堂, 等. 直接强夯法处理低含水量大厚度湿陷性黄土的效果分析[J]. 地基处理, 2022, 4(增刊 1): 134-143.
- XU Wen-tao, DONG Bao-zhi, YU Yong-tang, et al. Effect analysis of direct dynamic compaction on collapsible loess with low moisture content and large thickness[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S1): 134-143.
- [11] 梁永辉, 王卫东, 冯世进, 等. 高填方机场湿陷性粉土地基处理现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1027-1035.
- LIANG Yong-hui, WANG Wei-dong, FENG Shi-jin, et al. Field study on treatment of collapsible silt for high-fill airport project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1027-1035.
- [12] 朱德良, 王玉林, 陈道栩, 等. 丘陵山区填方地基强夯加固及现场试验[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 57-63.
- ZHU De-liang, WANG Yu-lin, CHEN Dao-xu, et al. Dynamic compaction reinforcement and field tests for filled foundation in hilly areas[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 57-63.
- [13] 魏子扬, 黄彦森, 黄质宏. 强夯法加固回填料地基综合检测技术研究[J]. 采矿技术, 2021, 21(4): 178-182.
- WEI Zi-yang, HUANG Yan-sen, HUANG Zhi-hong. Study on comprehensive detection technology of backfill foundation strengthened by dynamic compaction[J]. Mining Technology, 2021, 21(4): 178-182.
- [14] 周立新, 皮进, 李丽伟, 等. 山区机场高填方地基填挖交界处理技术研究[J]. 施工技术, 2019, 48(12): 49-51.
- ZHOU Li-xin, PI Jin, LI Li-wei, et al. Treatment technology for filling and excavating junction of high filling foundation in mountainous airport[J]. Construction Technology, 2019, 48(12): 49-51.
- [15] 胡瑞庚, 时伟, 水伟厚, 等. 深厚回填料地基高能级强夯有效加固深度计算方法及影响因素研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(3): 35-40.
- HU Rui-geng, SHI Wei, SHUI Wei-hou, et al. Study on the effective depth of improvement and influential factors for deep backfilled soils by using high energy dynamic compaction[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(3): 35-40.