

# 14 000 kN·m 超高能级强夯处理晋南地区 湿陷性黄土的效果分析

董宝志<sup>1</sup>, 徐文涛<sup>2,3,4</sup>, 徐晓<sup>5</sup>, 于永堂<sup>2,3\*</sup>, 姚振旺<sup>1</sup>

(1. 山西金宝岛基础工程有限公司, 山西 太原 030031; 2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077;  
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 4. 中汽智诚(洛阳)岩土工程有限公司, 河南 洛阳 471000;  
5. 山西省勘察设计研究院有限公司, 山西 太原 030013)

**摘要:** 为评价 14 000 kN·m 超高能级强夯处理晋南地区湿陷性黄土地基的效果, 在山西省临汾市翼城县某工业园区场平工程中开展了试夯试验, 并进行了地面高程观测、探井取样、室内试验、动力触探试验和地基承载力检测。试验结果表明, 单击夯沉量随着夯击次数的增加而逐渐降低, 随着夯击遍数的增加, 夯沉量趋于平稳所需击数减少; 地基土夯后较夯前干密度提高约 9.3%, 压缩模量提高约 106.3%, 孔隙比降低约 20.1%, 压缩系数降低约 48.1%, 检测深度 9 m 范围内, 黄土湿陷性全部消除; 强夯处理后地基承载力特征值均不小于 200 kPa, 不同深度土层的动力触探击数介于 3~13 击, 平均击数 6 击。试夯试验成果可以为晋南地区湿陷性黄土的强夯处理设计和施工提供参考。

**关键词:** 超高能级强夯; 晋南黄土; 湿陷性; 地基承载力; 湿陷系数; 孔隙比

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)05-0414-07

## Effect of 14 000 kN·m ultra-high energy level dynamic compaction on collapsible loess in southern Shanxi

DONG Bao-zhi<sup>1</sup>, XU Wen-tao<sup>2,3,4</sup>, XU Xiao<sup>5</sup>, YU Yong-tang<sup>2,3\*</sup>, YAO Zhen-wang<sup>1</sup>

(1. Shanxi Jinbaodao Foundation Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030031, Shanxi, China;

2. China United Northwest Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China;

3. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

4. China Automobile Zhicheng (Luoyang) Geotechnical Engineering Corporation, Luoyang 471000, Henan, China;

5. Shanxi Survey Design Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030013, Shanxi, China)

**Abstract:** In order to assess the impact of 14 000 kN·m dynamic compaction on collapsible loess foundation in southern Shanxi, a compaction test was conducted during the site leveling project of an industrial park in Yicheng County, Linfen City, Shanxi Province. The investigation involved ground elevation observations, exploratory well sampling, indoor tests, dynamic penetration tests, and foundation bearing capacity detection. The test results indicate that the settlement from a single-click tamping decreases with increasing tamping times. Furthermore, the number of blows required for the tamping settlement to stabilize reduces with increasing tamping times. After compaction, the dry density of foundation soil increase by 9.3%, the compression modulus increased by 106.3%, the void ratio is reduced by 20.1%, and the compression coefficient is reduced by 48.1% compared with that before compaction. Within the detection depth of 9 m, the collapsibility of loess is wholly eliminated. After dynamic compaction, the characteristic value of the bearing capacity of the foundation is not less than 200 kPa, and the number of dynamic penetration blows of soil layers at different depths ranges from 3 to 13, with an average of 6. The test results can provide a valuable reference for the design and construction of dynamic compaction treatment of collapsible loess in southern Shanxi.

收稿日期: 2022-10-09

作者简介: 董宝志 (1971—), 男, 河北滦南人, 学士, 高级工程师, 主要从事地基处理技术的研发与应用。E-mail: 66619996@qq.com。

\*通信作者: 于永堂 (1983—), 男, 辽宁鞍山人, 博士, 正高级工程师, 主要从事湿陷性土地基处理技术和岩土原位测试技术的研发与应用。E-mail: yuyongtang@126.com。

**Key words:** high energy level dynamic compaction; loess in southern Shanxi; collapsibility; foundation bearing capacity; coefficient of collapsibility; void-ratio

## 0 引言

强夯法具有加固效果显著、经济高效、节能环保等优点<sup>[1-2]</sup>,在大面积湿陷性黄土、吹填土地基处理中广泛应用<sup>[3-5]</sup>。湿陷性黄土广泛分布于我国西北、华北等地区<sup>[6]</sup>,受水浸湿后,在一定压力下土体会发生显著的湿陷变形,强度降低,影响建筑结构的安全使用<sup>[7-8]</sup>。因此在湿陷性黄土地区进行地基处理时,消除湿陷性是主要目标。李连祥等<sup>[9]</sup>介绍了高能级强夯用于处理湿陷性黄土的技术优势,在降低地基土压缩性提高承载力的同时,可以有效消除黄土湿陷性<sup>[10-11]</sup>。湿陷性消除情况受强夯能级和场地条件影响较大,随着强夯能级增加,消除湿陷性土层的厚度随之增大,但不同的试验场地之间的强夯加固效果存在差异,例如梁永辉等<sup>[12]</sup>采用 2 000 kN·m 和 3 000 kN·m 低能级强夯对湿陷性黄土场地进行处理,发现 2 种低能级强夯虽未消除湿陷性,但场地的湿陷性由强烈变为中等和轻微,表明强夯法可显著地降低地基土的湿陷性。胡长明等<sup>[13]</sup>研究了 2 000 kN·m、3 000 kN·m、6 000 kN·m 能级强夯处理湿陷性黄土的效果,试验结果显示 3 种能级消除黄土湿陷性深度分别为 4.6 m、5.7 m、

9.7 m。郝东雷等<sup>[14]</sup>进行了 8 000 kN·m 能级强夯试验研究,结果显示 8 000 kN·m 能级消除湿陷性深度为 7.0 m。目前,在湿陷性黄土中开展强夯试验研究的强夯能级范围大部分在 10 000 kN·m 之内,对于 10 000 kN·m 能级以上的相关研究工作较少。

本文在山西省临汾市翼城县某工业园区场平工程中开展了 14 000 kN·m 能级试夯试验,试夯前对场地的地质条件进行勘察,获取了试夯场地地基土的基本物理力学性质指标,试夯过程对夯沉量、地面高程变化进行测量,试夯后进行了探井取样、室内试验、动力触探试验和地基承载力检测,相关成果可为相关工程提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 地质条件

试验场地的平面位置如图 1 所示,强夯处理区域分为高度强夯区(备煤工程装置区)、中度强夯区(焦炉区)、低度强夯区(煤气净化及公辅区)以及化产区(煤气净化及公辅区),试夯区初步设计 6 个,施工初期以焦炉区作为工程夯区,因此本文主要研究分析具有代表性的中度强夯区 B2。

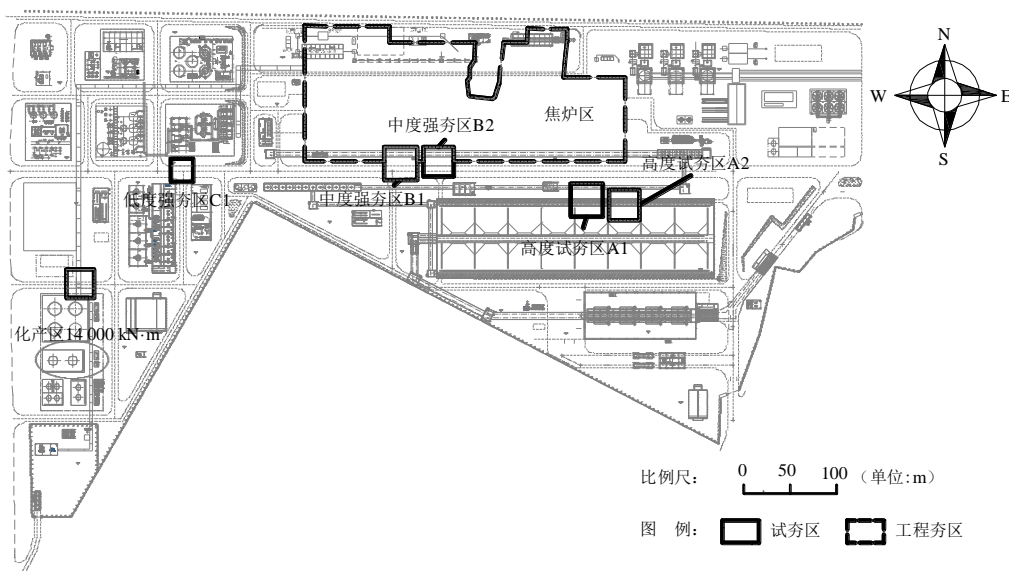


图 1 试夯区位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram for location of test compaction area

地层剖面图如图 2 所示,本工程场地地处黄土丘陵沟壑区,地基处理深度范围内的主要地层自上而下分别为:第四系全新统杂填土( $Q_4^{ml}$ )和素填土( $Q_4^{ml}$ ),上更新统黄土( $Q_3^{eol}$ ),中更新统粉土

( $Q_2^{al+pl}$ )、粉砂( $Q_2^{al+pl}$ )组成,各岩土层的岩性分述如下:

①杂填土( $Q_4^{ml}$ ):杂色,松散,稍湿,物理力学性质较差,该层薄厚变化较大,分布极不均匀。

②素填土 ( $Q_4^{ml}$ ): 粉土为主, 原建筑地基, 灰褐色、黄褐色、灰白色, 中密-密实, 稍湿, 该层薄厚变化较大, 且分布不均匀。

③上更新统黄土 ( $Q_3^{col}$ ): 粉土, 浅黄-淡黄色, 稍密, 稍湿, 该层普遍分布, 在拆迁区地基处理深度以下局部地段有分布, 厚薄变化不大, 分布较均匀。

④中更新统黄土状土 ( $Q_2^{al+pl}$ ): 粉土, 黄褐色、红褐色, 中密-密实, 稍湿, 该层普遍分布, 薄厚变化不大, 分布较均匀。

⑤中更新统冲洪积土 ( $Q_2^{al+pl}$ ): 由⑤<sub>1</sub>层粉土和⑤<sub>2</sub>层粉砂组成。⑤<sub>1</sub>层: 黄褐色、红褐色, 中密-密实, 稍湿, 该层普遍分布, 层厚变化不大, 且分布较均匀; ⑤<sub>2</sub>层: 红褐色、棕红色, 密实, 该层为⑤层的夹层, 层厚变化较大, 且分布不均匀。

根据勘察结果可知: ③层为湿陷土层, 深度介于 9.5~16.5 m, 湿陷系数介于 0.015~0.112, 湿陷程度轻微-强烈, 湿陷下限深度为 16.5 m, 湿陷量为 807.0~995.7 mm, 自重湿陷量  $\Delta_{zs}$  为 154.5~238.5 mm, 属于自重湿陷性场地, 湿陷等级为III级

(严重)。

结构设计方要求消除处理深度 9 m 范围内的黄土湿陷性, 处理后的地基承载力特征值不小于 200 kPa, 压缩模量不低于 10 MPa。为达到地基处理要求, 笔者团队在当地首次采用 14 000 kN·m 超高能级进行试夯试验, 试验前测得处理深度范围内土体的基本物理力学性质指标如表 1 所示。

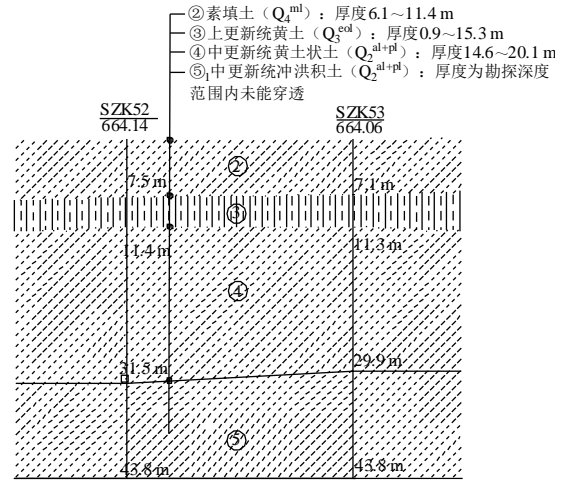


图 2 试夯区的地层剖面图

Fig. 2 Stratigraphic section of the test compaction area

表 1 天然地基土的主要物理力学性质指标统计表

Table 1 Statistics of main physical and mechanical property indexes of natural foundation soil

指标	$w/\%$	$G_s$	$\rho/(g/cm^3)$	$\rho_d/(g/cm^3)$	$S_r/\%$	$e$	$a_{v1-2}/MPa^{-1}$	$E_{s1-2}/MPa$	
统计个数	20	20	20	20	20	20	20	20	
②素填土	最大值	23.50	2.700	2.020	1.730	89.200	0.783	0.260	10.300
	最小值	14.10	2.700	1.820	1.510	55.000	0.559	0.150	6.300
	平均值	17.70	2.700	1.950	1.660	75.500	0.632	0.210	8.000
	标准差	2.59	0.000	0.056	0.057	8.663	0.057	0.028	1.050
统计个数	144	149	149	149	149	149	149	149	
③上更新统黄土	最大值	19.90	2.700	1.750	1.520	64.000	1.258	0.990	8.400
	最小值	5.90	2.700	1.280	1.200	14.100	0.771	0.220	2.200
	平均值	11.60	2.700	1.510	1.350	32.900	1.003	0.480	4.600
	标准差	3.16	0.000	0.110	0.073	11.627	0.111	0.161	1.393
统计个数	85	85	85	85	85	85	85	85	
④中更新统黄土状土	最大值	21.80	2.700	1.920	1.630	76.600	0.903	0.390	8.900
	最小值	10.30	2.700	1.600	1.420	33.600	0.658	0.190	4.900
	平均值	6.70	2.700	1.760	1.510	57.600	0.790	0.260	6.900
	标准差	2.68	0.000	0.072	0.053	9.892	0.062	0.034	0.785
统计个数	56	56	56	56	56	56	32	32	
⑤中更新统冲洪积土	最大值	26.30	2.710	2.010	1.730	96.400	0.794	0.370	13.500
	最小值	14.70	2.700	1.880	1.510	70.400	0.559	0.120	4.600
	平均值	20.80	2.700	1.960	1.630	84.700	0.661	0.240	7.300
	标准差	2.68	0.003	0.026	0.048	5.946	0.050	0.062	1.946

### 1.2 试夯方案

本次试夯共分五遍进行: 第一遍点夯, 正方形布点, 夯点间距为 10 m, 夯击能级为 14 000 kN·m; 第二遍点夯, 位于第一遍夯点形成的正方形中心, 夯点间距为 10 m, 夯击能级为 14 000 kN·m; 第三遍点夯, 位于第一遍和第二遍两相邻夯点中间, 夯点间距为 10 m, 夯击能级为 7 000 kN·m; 第四遍加固夯, 位于第一、二遍夯点处, 夯击能级为 3 000 kN·m; 第五遍满夯, 夯击能级为 2 000 kN·m, 夯击次数 3 击, 锤印搭接 1/4, 试夯试验的夯点布置如图 3 所示, 试夯试验参数见表 2。

### 1.3 试夯过程

试夯前清理、平整场地, 标出夯点位置, 测量地面高程。夯机就位、夯锤对准夯点位置, 测量夯前锤顶高程, 将夯锤吊到预定高度脱钩自由下落进行夯击, 测量锤顶高程, 往复夯击, 按表 2 中规定的夯击次数及控制标准完成夯点的夯击。重复以上工序, 完成第一遍全部夯点的夯击, 用推土机将夯坑填平, 测量场地高程。按上述程序逐次完成全部夯击遍数后, 采用低能级进行满夯, 将场地表层松土进行夯实, 并测量夯后场地高程变化。

### 1.4 试验检测

强夯试验前后分别在场内开挖探井取样, 并按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) [15] 对不同深度土样的物理力学性质指标 (包括干密

度、压缩模量、压缩系数和湿陷系数等) 进行测试; 按照《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015) [16] 进行重型动力触探试验和现场平板载荷试验, 判定场地强夯处理效果, 确定地基承载力特征值。试验及检测点在试夯场地内的平面位置见图 3, 其中每个检测点的具体检测内容、方法及测点布置情况如表 3 所示。

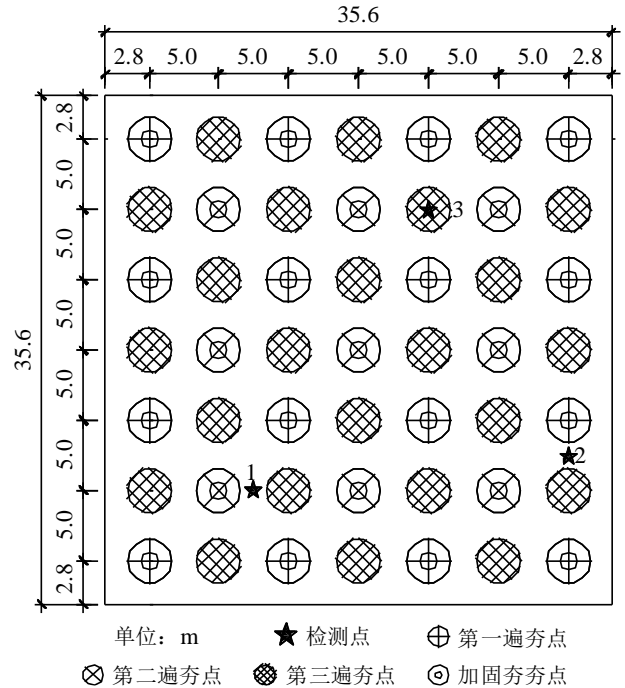


图 3 夯点布置图

Fig. 3 Layout of tamping points for dynamic compaction test

表 2 试夯试验参数

Table 2 Parameters of dynamic compaction test parameters

试夯遍次	类别	能级/(kN·m)	夯锤参数		落距/m	夯点间距/m	最后两击平均夯 沉量控制值/mm	最低击数 控制值/击
			直径/m	锤重/kN				
第一遍	点夯	14 000	2.8	750	19.1	10.0	250	12
第二遍	点夯	14 000	2.8	750	19.1	10.0	250	12
第三遍	点夯	7 000	2.8	380	18.8	10.0	150	10
第四遍	加固夯	3 000	2.5	180	16.7	5.0	50	6
第五遍	满夯	2 000	2.5	180	11.4	1/4 搭接	—	3

表 3 检测内容、方法及测点布置情况

Table 3 Detection content, method and arrangement of measuring points

检测内容	检测方法	检测点布置及检测要点
物理力学 性质指标	常规土工 试验	在试夯区内随机选点, 开挖探井取样进行室内含水率试验、密度试验、压缩试验和湿陷性试验等, 竖向取样间距均为 1.0 m
判定强夯 处理效果	重型动力 触探试验	采用重型 (N <sub>63.5</sub> ) 圆锥动力触探试验, 试验采用自动落锤法, 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 10 cm 的锤击数
地基承载 力特征值	平板载荷 试验	在试夯区内随机选点, 进行慢速维持荷载法平板载荷试验 (载荷板为直径 1.6 m、面积约为 2.0 m <sup>2</sup> ), 首级压力为 40 kPa, 分级压力增量为 40 kPa, 最大加载量为 400 kPa

## 2 试验结果与分析

### 2.1 夯沉量与夯击次数关系

夯后根据每个夯点夯沉量变化值得到试验场地的夯沉量与夯击次数的关系曲线如图4所示。由图可知，第一遍夯坑平均深度为7.47 m，第二遍夯坑平均深度为5.79 m，第三遍夯坑平均深度为2.46 m，第四遍夯坑平均深度为1.32 m，其中第一、二遍的能级相同，但夯坑深度相差较大，表明第一遍强夯加固效果较好，第二遍夯实的土体与第一遍夯实的土体相比，可压缩性降低，地基土的密实性提高。随着强夯遍数的提高，达到最后两击夯沉量控制值所需的夯击次数也逐渐降低，第一遍在13击后达到夯沉量控制值要求，第二遍在11击后达到夯沉量控制值要求，第三遍在8击后达到夯沉量控制值要求，第四遍在6击后达到夯沉量控制值要求。

因此在强夯方案设计中，对于第一遍后的强夯，可适当降低收锤标准，避免造成能级浪费，同时因为地基土物理性质的不同，所以在规范中要求满足最后两击夯沉量控制值的同时，也应设计最低夯击次数，以保证达到地基处理的要求。

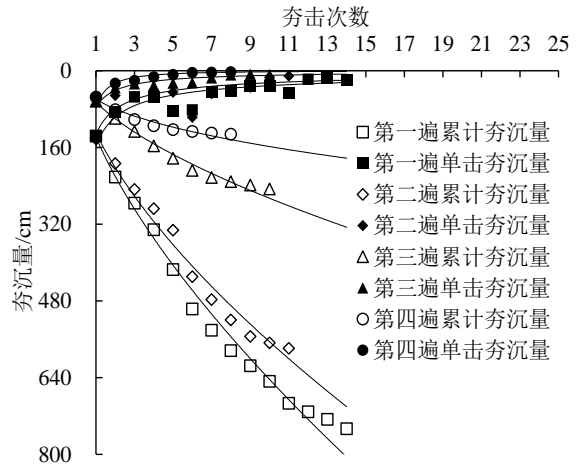


图4 夯坑的夯沉量与夯击次数关系曲线  
Fig. 4 Relation curve between tamping settlement and tamping times

### 2.2 强夯前后地基土基本物理参数指标分析

强夯前后试验区填土地基的主要物理力学参数统计结果如表4所示，其中夯后地基土湿陷系数和压缩模量随深度的变化曲线如图5所示。由图5和表4可知，在检测深度范围内，夯后较夯前干密度提高约9.3%，压缩模量提高约106.3%，孔隙比降低约20.1%，压缩系数降低约48.1%，9 m深度范围内地基土的湿陷性消除。

表4 强夯处理前后的地基土物理力学性质指标统计结果

Table 4 Statistical results of physical and mechanical properties of foundation soil before and after dynamic compaction treatment

工况	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$		孔隙比 $e$		压缩系数 $a_{v1-2}/MPa^{-1}$	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
夯前	1.20~1.73	1.51	0.559~1.258	0.818	0.15~0.99	0.35
夯后	1.35~1.82	1.65	0.486~1.009	0.649	0.08~0.35	0.18

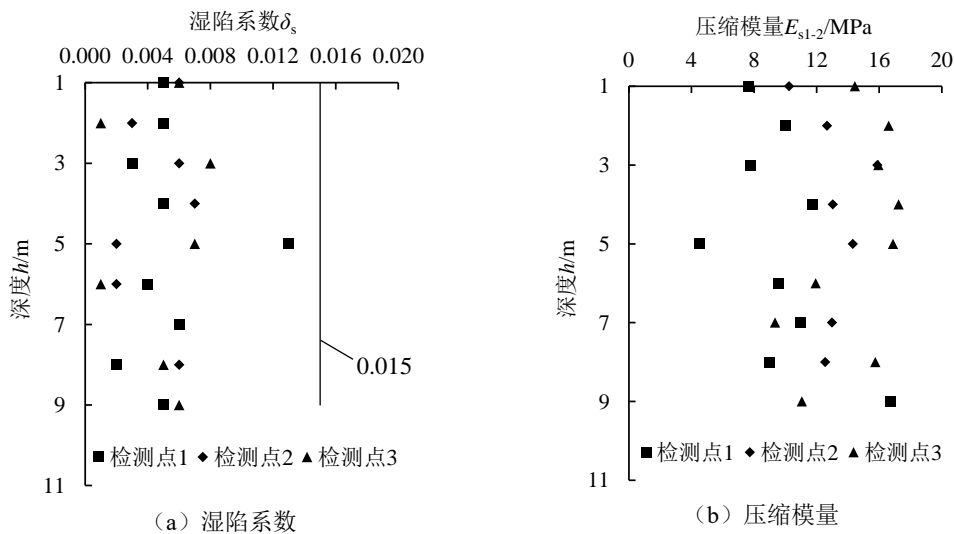


图5 试夯区夯后湿陷系数、压缩模量变化散点图

Fig. 5 Scatter diagram of collapsible coefficient and compressive modulus change after tamping in test tamping area

综上所述,本工程场地采用 14 000 kN·m 超高能级强夯后,地基土干密度提高,孔隙比减小,湿陷性已消除(湿陷系数  $\delta_s$  小于 0.015),压缩模量有了较大提高,表明 14 000 kN·m 超高能级强夯在处理上层填土(杂填土+素填土)+中层风积黄土+下层冲洪积粉土及粉砂的地质条件下的建筑地基时,具有较好的加固效果。

### 2.3 强夯地基的承载力特征值

试夯区强夯后的重型动力触探试验曲线如图 6 所示。由图可知,本次检测强夯区域终夯面下 9.5 m 深度范围内可分为第四系全新统素填土( $Q_4^{ml}$ )、上更新统黄土( $Q_3^{col}$ )两层,上部土层厚度 1.5 m,重型圆锥动力触探试验击数介于 3~10 击之间,平均击数 5 击;下部土层厚度 8 m,重型圆锥动力触探试验击数介于 4~13 击之间,平均击数 7 击,根据《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015) [16] 中动探击数与地基承载力的关系,估算地基承载力特征值为:上部厚度约为 1.5 m 的素填土,地基承载力特征值可取为 210 kPa;下部厚度约为 8 m 的上更新统黄土,地基承载力特征值可取为 265 kPa。夯点与夯间相比,土体直接受到冲击荷载的作用,土体密实效果好,因此在 4 m 深度范围内,夯点处的动力触探击数(检测点 3)高于夯间(检测点 1、检测点 2)。

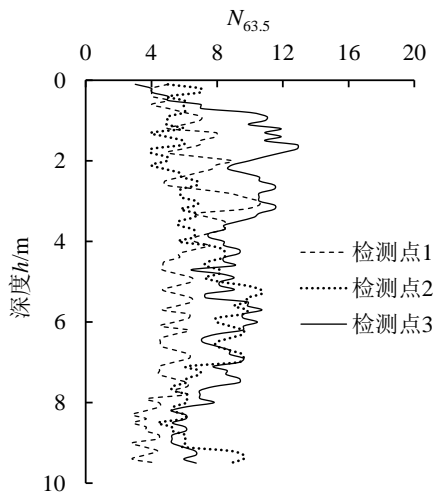


图 6 强夯后重型动力触探试验曲线

Fig. 6 Heavy-duty dynamic penetration test curve after dynamic compaction

各试夯区平板载荷试验的荷载-沉降关系曲线如图 7 所示,由图可知,各试验点在最大荷载为 400 kPa 下均未发生破坏,加压荷载为 200 kPa 时,各试验点的“ $s/d$ ”(s 为沉降量, d 为承压板直径)值介于 0.005 0~0.009 3,均小于 0.010。根据规范[16]中关于平板载荷试验取值的有关规定,地基

承载力特征值不超过 1/2 最大加载量,本试夯区经 14 000 kN·m 能级强夯处理后,地基承载力特征值不小于 200 kPa。

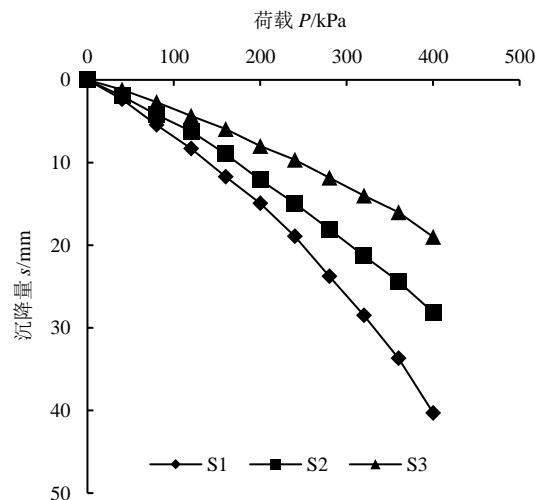


图 7 平板载荷试验曲线

Fig. 7 Curves of plate load tests

## 3 结 论

(1) 14 000 kN·m 能级强夯处理时,第一遍、第二遍、第三遍、第四遍的单点击数分别为 13 击、11 击、8 击和 6 击时,最后两击的平均夯沉量分别可控制在 25 cm、25 cm、15 cm 和 5 cm。

(2) 地基土夯后较夯前平均干密度提高约 9.3%,压缩模量提高约 106.3%,孔隙比降低约 20.1%,压缩系数降低约 48.1%。检测深度 9 m 范围内的黄土湿陷性全部消除,地基处理效果较好。

(3) 夯后不同深度土层的动力触探击数介于 3~13 击,平均击数 6 击,根据规范[16]的经验关系,得到浅层地基土的承载力特征值为 210 kPa,深层地基土承载力特征值为 265 kPa,结合载荷试验结果可判定强夯后地基承载力特征值不小于 200 kPa。

### 参考文献

[1] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 1-17.  
 QIAN Jia-huan, QIAN Xue-de, ZHAO Wei-bing, et al. Theory and practice of dynamic consolidation[J]. Yantu Gongcheng Xuebao, 1986, 8(6): 1-17.  
 [2] 董炳寅, 水伟厚, 秦劭杰. 中国强夯 40 年之技术创新[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 1-16.  
 DONG Bing-yin, SHUI Wei-hou, QIN Shao-jie. Technological innovation of dynamic compaction in China

- for forty years[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(1): 1-16.
- [3] 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.
- [4] 罗纬邦. 高能级强夯在干燥松散深厚湿陷性土处理中的应用[J]. *人民长江*, 2021, 52(增刊 2): 145-148.  
LUO Wei-bang. Application of high-energy dynamic compaction in the treatment of dry, loose, thick, and collapsible soils[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(S2): 145-148.
- [5] 张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 等. 基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 117-125.  
ZHANG Jun-jian, LI Peng, YIN Kun-yu, et al. An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 117-125.
- [6] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1297-1312.  
XU Zhang-jian, LIN Zai-guan, ZHANG Mao-sheng. Loess in China and loess landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1297-1312.
- [7] 苗天德, 刘忠玉, 任九生. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(4): 383-387.  
MIAO Tian-de, LIU Zhong-yu, REN Jiu-sheng. Deformation mechanism and constitutive relation of collapsible loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(4): 383-387.
- [8] 罗宇生. 湿陷性黄土地基评价[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(4): 87-91.  
LUO Yu-sheng. Assessment of collapsibility of collapsible loess foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(4): 87-91.
- [9] 李连祥, 符庆宏, 郑英杰, 等. 中国强夯三十年[J]. *工业建筑*, 2015, 45(增刊 1): 836-843.  
LI Lian-xiang, FU Qing-hong, ZHENG Ying-jie, et al. Dynamic compaction in China for thirty years[J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(S1): 836-843.
- [10] 刘继鹏, 闫芳, 高一帆. 豫西山地区强夯法处理湿陷性黄土地基施工技术[J]. *施工技术*, 2017, 46(18): 103-106.  
LIU Ji-peng, YAN Fang, GAO Yi-fan. Dynamic compaction ground treatment for collapsible loess in western mountain of He'nan[J]. *Construction Technology*, 2017, 46(18): 103-106.
- [11] 姚雪贵, 姚志华, 周立新, 等. 某机场自重湿陷性黄土地基处理试验研究[J]. *建筑技术*, 2016, 47(3): 213-217.  
YAO Xue-gui, YAO Zhi-hua, ZHOU Li-xin, et al. Foundation treatment of self weight collapse loess of removal airport project[J]. *Architecture Technology*, 2016, 47(3): 213-217.
- [12] 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 the treatment of collapsible silt for high filling airport project[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(6): 1027-1035.
- [13] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 2903-2909.  
HU Chang-ming, MEI Yuan, WANG Xue-yan. Experimental research on dynamic compaction parameters of collapsible loess foundation in Lishi region[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(10): 2903-2909.
- [14] 郝东雷, 韩辅州, 赵晓磊, 等. 高能级强夯在处理湿陷性黄土地基的应用研究[C]//2016年全国工程勘察学术大会论文集(上册). 太原, 2016: 125-130.  
HAO Dong-lei, HAN Fu-zhou, ZHAO Xiao-lei, et al. Application research of high energy dynamic compaction in collapsible loess foundation[C]//Proceedings of 2016 National Engineering Survey Academic Conference (Volume I). Taiyuan, 2016: 125-130.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Soils: JGJ 340—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.