

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2023.04.001

【强夯技术专栏】（专栏主持人：水伟厚）

# 25 000 kN·m 高能级强夯地基标贯和 动探试验对比研究

何立军<sup>1,2</sup>, 秦劲杰<sup>1,2</sup>, 刘增华<sup>1,2</sup>, 水伟厚<sup>1,2</sup>

(1. 大地巨人(北京)工程科技有限公司, 北京 100176; 2. 大地巨人(广东)岩土工程有限公司, 广东 广州 510670)

**摘要:** 目前文献和规范规定的最高强夯能级只到 18 000 kN·m, 而随着填土厚度的不断增加, 强夯施工机械设备能力不断提高, 目前 25 000 kN·m 能级已经得到广泛应用。以黏性土为主的强夯地基处理检测中, 标准贯入试验和重型圆锥动力触探试验均可以采用。两种试验主要区别于探头和试验方法的不同, 标准贯入试验非常成熟, 在计算承载力或变形模量时, 经验公式丰富且应用范围广泛; 而重型圆锥动力触探试验因其具有贯入连续、设备简单、工期短等特点得到应用, 但根据动探指标确定地基承载力或变形模量主要是通过查询一些表格确定。如果有了两种试验数据之间的换算关系, 通过其中一种试验数据想得到另一种试验数据就变得容易。对于两种试验数据之间的相关性, 有人通过勘察数据进行过相关的探讨。本文通过四川达州高填方场地强夯地基处理试验, 研究了 25 000 kN·m 能级强夯对黏性土为主填土地基的加固效果, 从强夯检测角度探讨圆锥动力触探击数与标准贯入击数的相关性及其适用性, 以供类似工程 25 000 kN·m 能级强夯设计、施工及地基检测参考。

**关键词:** 地基处理; 强夯; 25 000 kN·m; 原位测试; 重型圆锥动力触探试验; 标准贯入试验

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)04-0271-08

## Comparative study on SPT and DPT of 25 000 kN·m high energy dynamic compaction foundation

HE Li-jun<sup>1,2</sup>, QIN Shao-jie<sup>1,2</sup>, LIU Zeng-hua<sup>1,2</sup>, SHUI Wei-hou<sup>1,2</sup>

(1. Dadi Juren (Beijing) Engineering and Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;

2. Dadi Juren (Guangdong) Geotechnical Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510670, Guangdong, China)

**Abstract:** At present, the highest energy level of dynamic compaction stipulated in literature and codes is only 18 000 kN·m. With the increase of fill thickness and the improvement of the capacity of dynamic compaction construction machinery and equipment, the energy level of 25 000 kN·m has been widely used at present. Both the standard penetration test (SPT) and heavy cone dynamic penetration test (DPT) can be used in the detection of dynamic compaction foundation treatment mainly composed of cohesive soil. The main difference between those two tests is in the probe and test method. The SPT is very mature, and there are rich empirical formulas and a wide range of applications when calculating the bearing capacity or deformation modulus. The heavy cone DPT has been applied because of its continuous penetration, simple equipment, and short construction period. However, the determination of foundation bearing capacity or deformation modulus based on dynamic detection index is mainly determined by querying some tables. If there is a conversion relationship between the two test data, it will be easier to obtain the other test data with one test data. For the correlation between the two testing methods, some studies have discussed it through the survey data. In this work, the reinforcement effect of 25 000 kN·m energy level dynamic compaction on the clay-based fill foundation is studied through the test of dynamic compaction foundation treatment at a high fill site in Dazhou, Sichuan Province. At the same time, from the perspective of dynamic compaction detection, the correlation and applicability of the number of cone power penetration hits and standard penetration blow count are discussed. The results of this work can be used as a reference for the design, construction and foundation inspection of 25 000 kN·m energy level dynamic compaction for similar projects.

**Key words:** soil improvement; dynamic compaction; 25 000 kN·m; in-situ test; DPT; SPT

收稿日期: 2022-10-20

作者简介: 何立军(1972—), 男, 河南信阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地基处理设计、施工和检测工作。E-mail: 18017232979@qq.com。

## 0 引言

在深厚回填土地基处理中,以高能级强夯加固为主,目前文献和规范规定的最高强夯能级只到 $18\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{[1-6]}$ 。由于填土厚度的不断增加,强夯施工机械设备能力不断提高,目前 $25\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 强夯能级已经开始广泛使用。

以黏性土为主的地基处理的效果检测中,标准贯入试验和重型圆锥动力触探试验均可以采用。通过标贯击数或动探击数可以直接判断深层填土的密实状态,并间接得到承载力或变形模量,因此在填方场地中得到了广泛的应用。

两种试验主要是在探头上的差别和试验方法的不同,标准贯入试验非常成熟,在计算承载力或变形模量(压缩模量)时,经验公式丰富且应用范围广泛;而重型圆锥动力触探试验因其具有贯入连续、设备简单、工期短等特点得到广泛的应用,但是根据动探指标确定地基承载力主要是通过规范中的一些表格查询确定。

在工程实践中,通常会根据现场实际情况,选择标准贯入试验和重型圆锥动力触探试验中的一种手段进行试验或检测。例如在勘察阶段采用标准贯入试验,地基处理完成后的检测采用重型圆锥动力触探试验,那么在评价地基处理效果时,如果有了两种试验手段之间简单易用的击数换算关系,就可以利用检测数据与勘察数据之间的对比分析确定地基处理效果。对于两种试验数据之间的相关性,虽然已经有人做过相关研究,但主要集中在对勘察数据<sup>[7-8]</sup>的相关探讨上。

本文通过四川达州高填方场地强夯地基处理试验,在对 $25\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯对黏性土为主填土地基的加固效果研究的同时,首次从强夯检测角度探讨圆锥动力触探击数与标准贯入击数的相关性及其适用性,以供类似工程 $25\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯设计、施工及地基检测参考。

## 1 工程实例分析

### 1.1 工程概况

四川达州新物流园项目为开山回填场地,用地面积约 $360\,000\text{ m}^2$ ,由多栋仓库、餐厅、办公楼等组成。

本项目对沉降控制要求较高,拟采用不同能级强夯对场地内填土进行处理,为此先进行强夯试验,通过试验结果确定地基处理设计参数后进行大

面积地基处理施工。

### 1.2 地层条件

根据勘察报告,本地地地层条件如下:

①<sub>1</sub>杂填土,灰褐、灰黄、褐红、肉红、浅灰色,稍湿,欠压实-稍压实,主要由粉质黏土、石英砂、碎石及混凝土块、砖块等建筑垃圾组成,碎石、混凝土含量 $25\%\sim 40\%$ ,直径 $2\sim 10\text{ cm}$ ,分布不均匀,堆填时间约12年。厚度 $1.50\sim 4.30\text{ m}$ ,平均厚度 $2.55\text{ m}$ 。

①<sub>2</sub>素填土,灰褐、灰黄、肉红、紫褐、褐红色,稍湿-饱和,欠压实-稍压实,主要为粉质黏土、中粗砂、碎石块堆填而成,碎石含量 $5\%\sim 40\%$ ,局部碎石含量 $80\%\sim 90\%$ ,直径 $2\sim 10\text{ cm}$ ,堆填时间约12年。厚度 $0.30\sim 20.00\text{ m}$ ,平均厚度 $5.51\text{ m}$ 。

②<sub>1</sub>淤泥质土,深灰、灰黑色,具腐臭味,手捏滑腻,局部含较多淤泥质石英砂,富含有机质,饱和,流塑。厚度 $1.10\sim 2.10\text{ m}$ ,平均厚度 $1.58\text{ m}$ 。

②<sub>2</sub>粉质黏土,灰褐、褐黄、灰黄、褐红、灰红、深灰、红褐色,稍湿-饱和,可塑状,局部软塑状,无摇晃反应,刀切面稍光滑,干强度高,韧性中等,局部石英砂含量较高,石英砂含量约 $10\%\sim 30\%$ 。厚度 $0.80\sim 8.10\text{ m}$ ,平均厚度 $3.91\text{ m}$ 。

②<sub>3</sub>粗砂(砾砂),黄褐、灰褐、灰黄、红褐色,饱和,稍密-中密,分选性较差,级配较好,主要为次圆状,矿物成分主要为石英,局部含较多 $2\sim 6\text{ cm}$ 的碎石,碎石含量约 $5\%\sim 20\%$ ,局部黏粒含量高,黏粒含量约 $30\%\sim 40\%$ ,粗砂为主,少部砾砂。厚度 $2.80\sim 8.50\text{ m}$ ,平均厚度 $6.09\text{ m}$ 。

其下分布依次为残积层( $Q^{el}$ )粉质黏土、全风化-中风化砂砾岩和全风化-中风化泥质粉砂岩。典型地层见图1,勘察土层标贯数据见表1。

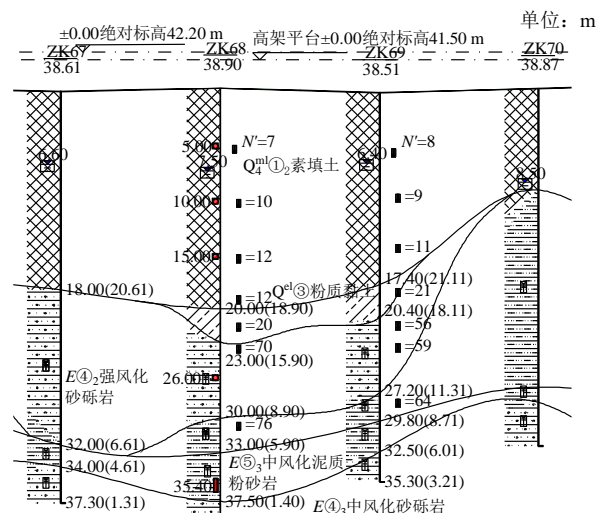


图1 典型地层分布(25 000 kN·m试验区)

Fig. 1 Typical stratigraphic profile (25 000 kN·m test area)

表 1 25 000 kN·m 试验区勘察标贯数据  
Table 1 SPT survey data of 25 000 kN·m test area

序号	试验深度/m	实测 N/击
1	5.55~5.85	7
2	6.45~6.75	10
3	10.45~10.75	10
4	10.95~11.25	12
5	14.15~14.45	12
6	15.45~15.75	12
7	18.45~18.75	21
8	19.15~19.45	12
9	21.65~21.95	20

稳定水位埋深为 0~11.50 m, 稳定水位埋深平均值 6.29 m。

### 1.3 试验设计

本场地设计了 6 个试验区, 根据填土厚度分别采用 4 000~25 000 kN·m 能级进行强夯, 具体试验区设计见表 2。

表 2 试验区设置情况  
Table 2 Setting of test area

序号	项目	能级/kN·m	填土厚度/m
1	试夯 1 区	4 000	4~8
2	试夯 2 区	6 000	9
3	试夯 3 区	10 000	12
4	试夯 4 区	15 000	15
5	试夯 5 区	20 000	14~19
6	试夯 6 区	25 000	16~20

夯前、夯后分别采用重型圆锥动力触探、标准贯入试验和平板载荷试验进行检测, 通过对比分析判定加固深度和加固效果, 处理后地基承载力不小于 250 kPa, 加固深度范围内加权平均复合压缩模量不小于 10 MPa。

试夯区设计施工参数见表 3, 除特别标明外, 其他点夯均按规范要求满足收锤标准。

### 1.4 标贯和动探试验结果统计

根据现场施工情况, 所有试夯区施工过程中未出现异常情况, 夯坑深度 2~4 m, 施工顺利且均满足收锤标准。

以下分试夯区分别进行夯前、夯后的标贯和动探对比分析。

#### (1) 4 000 kN·m 试验区

4 000 kN·m 试验区夯前、夯后动力触探和标准

贯入试验对比曲线见图 2 和图 3。

表 3 试验区强夯参数设计  
Table 3 Parameters of dynamic compaction test

试夯区	设计施工参数
1 区	第一遍 4 000 kN·m 点夯, 间距 7 m, 第二遍 4 000 kN·m 点夯为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 6 击。满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
	第一遍 6 000 kN·m 点夯, 间距 7 m, 第二遍 6 000 kN·m 点夯为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 8 击。满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
3 区	第一遍 10 000 kN·m 点夯, 间距 9 m, 第二遍 10 000 kN·m 点夯为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 10 击。第三遍点夯为第一遍、第二遍夯点之间插点, 能级 4 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第一遍满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4, 第二遍满夯 1 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
	第一遍 15 000 kN·m 点夯, 间距 12 m, 第二遍点夯 15 000 kN·m 为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 12 击。第三遍点夯为第一遍、第二遍夯点之间插点, 能级 6 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第四遍点夯为第一遍、第二遍点夯原点加固, 能级 3 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第一遍满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4, 第二遍满夯 1 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
4 区	第一遍 20 000 kN·m 点夯, 间距 12 m, 第二遍点夯 20 000 kN·m 为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 12 击。第三遍点夯为第一遍、第二遍夯点之间插点, 能级 6 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第四遍点夯为第一遍、第二遍点夯原点加固, 能级 3 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第一遍满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4, 第二遍满夯 1 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
	第一遍 25 000 kN·m 点夯, 间距 12 m, 第二遍点夯 25 000 kN·m 为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 12 击。第三遍点夯为第一遍、第二遍夯点之间插点, 能级 8 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第四遍点夯为第一遍、第二遍点夯原点加固, 能级 3 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第一遍满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4, 第二遍满夯 1 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
5 区	第一遍 20 000 kN·m 点夯, 间距 12 m, 第二遍点夯 20 000 kN·m 为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 12 击。第三遍点夯为第一遍、第二遍夯点之间插点, 能级 6 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第四遍点夯为第一遍、第二遍点夯原点加固, 能级 3 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第一遍满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4, 第二遍满夯 1 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
	第一遍 25 000 kN·m 点夯, 间距 12 m, 第二遍点夯 25 000 kN·m 为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 12 击。第三遍点夯为第一遍、第二遍夯点之间插点, 能级 8 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第四遍点夯为第一遍、第二遍点夯原点加固, 能级 3 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第一遍满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4, 第二遍满夯 1 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
6 区	第一遍 20 000 kN·m 点夯, 间距 12 m, 第二遍点夯 20 000 kN·m 为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 12 击。第三遍点夯为第一遍、第二遍夯点之间插点, 能级 6 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第四遍点夯为第一遍、第二遍点夯原点加固, 能级 3 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第一遍满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4, 第二遍满夯 1 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。
	第一遍 25 000 kN·m 点夯, 间距 12 m, 第二遍点夯 25 000 kN·m 为第一遍夯点之间插点, 每点夯击数不小于 12 击。第三遍点夯为第一遍、第二遍夯点之间插点, 能级 8 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第四遍点夯为第一遍、第二遍点夯原点加固, 能级 3 000 kN·m, 每点夯击数不小于 6 击。第一遍满夯 2 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4, 第二遍满夯 1 000 kN·m, 每点 2 击, 夯印搭接 1/4。

夯前、夯后动探击数平均值相差不大, 基本在

9.8 击左右。夯前、夯后标贯击数平均值分别为 19 击和 20 击。夯后标贯击数平均值是动探击数平均值的 2 倍。根据动探和标贯对比曲线判定强夯有效加固深度为 6 m。

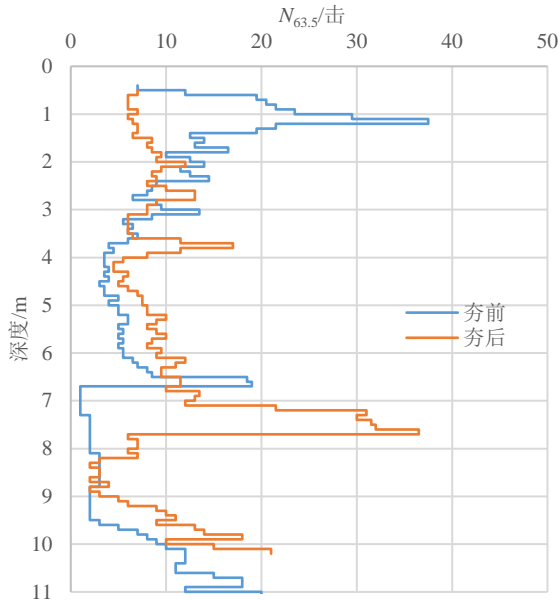


图 2 4 000 kN·m 试验区动探对比曲线  
Fig. 2 Testing curves of 4 000 kN·m DPT

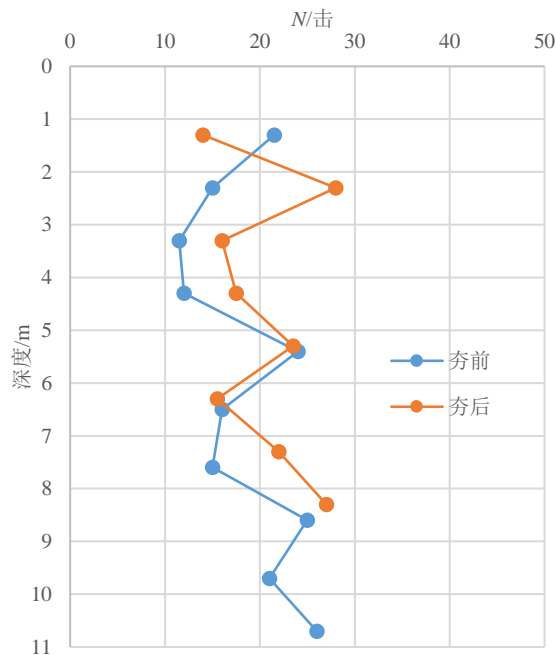


图 3 4 000 kN·m 试验区标贯对比曲线  
Fig. 3 Testing curves of 4 000 kN·m SPT

(2) 6 000 kN·m 试验区

6 000 kN·m 试验区夯前、夯后动力触探和标准贯入试验对比曲线见图 4 和图 5。

夯前、夯后动探击数平均值分别为 6 击和 9 击。夯前、夯后标贯击数平均值在 19~20 击之间, 夯后

标贯击数平均值是动探击数平均值的 2 倍。根据动探和标贯对比曲线判定强夯有效加固深度为 7.5 m。

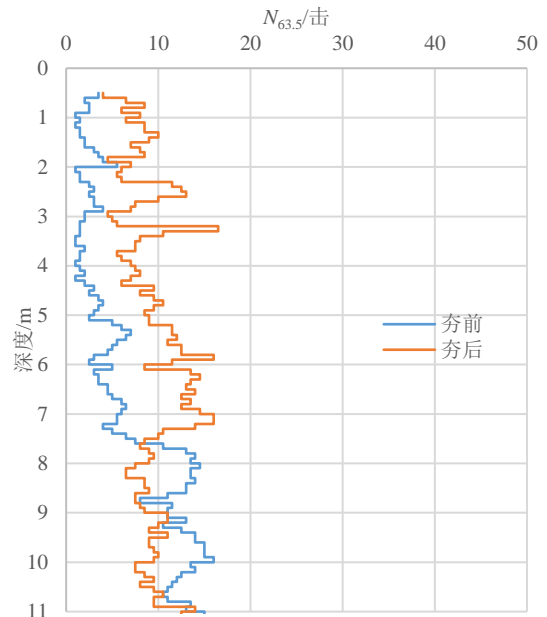


图 4 6 000 kN·m 试验区动探对比曲线  
Fig. 4 Testing curves of 6 000 kN·m DPT

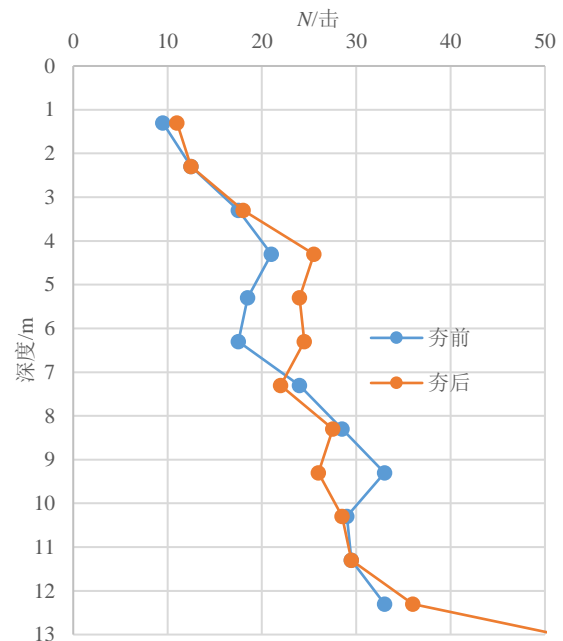


图 5 6 000 kN·m 试验区标贯对比曲线  
Fig. 5 Testing data of 6 000 kN·m SPT

(3) 10 000 kN·m 试验区

10 000 kN·m 试验区夯前、夯后动力触探和标准贯入试验对比曲线见图 6 和图 7。

夯前、夯后动探平均击数分别为 7.5 击、8.2 击。夯前、夯后标贯击数平均值分别为 14.2 击、16.6 击。夯后标贯击数平均值是动探击数平均值的 2 倍。根据动探和标贯对比曲线判定有效加固深度为 10.0 m。

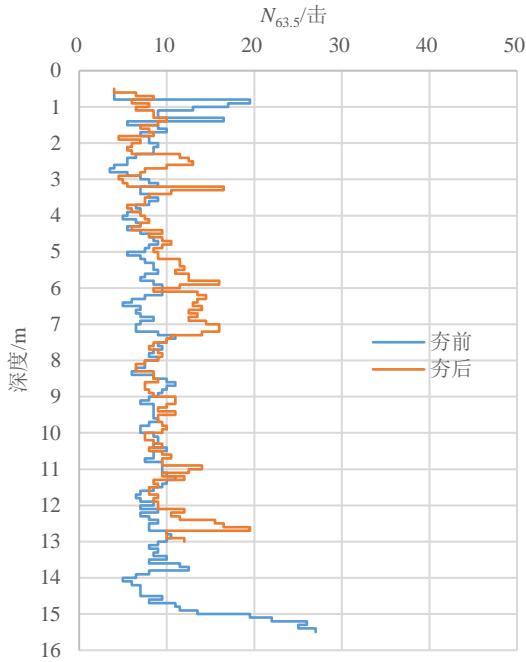


图 6 10 000 kN·m 试验区动探对比曲线  
Fig. 6 Testing data of 10 000 kN·m DPT

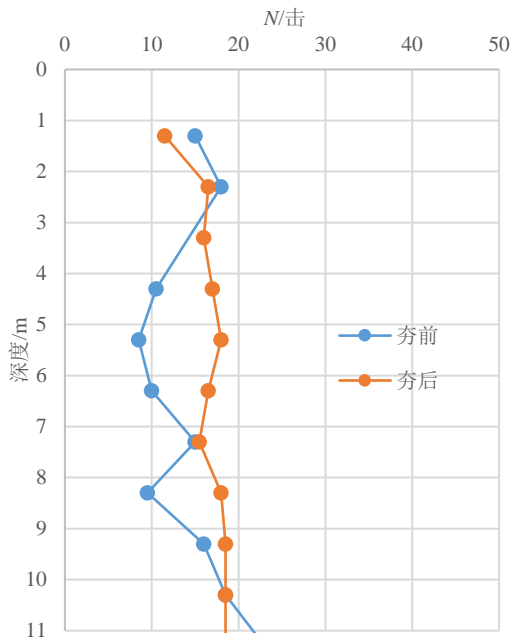


图 7 10 000 kN·m 试验区标贯对比曲线  
Fig. 7 Testing data of 10 000 kN·m SPT

(4) 15 000 kN·m 试验区

15 000 kN·m 试验区夯前、夯后动力触探和标准贯入试验对比曲线见图 8 和图 9。

夯前、夯后动探击数平均值分别为 15 击、10 击，无法根据动探判定加固深度。夯前、夯后标贯击数平均值分别为 20 击、18 击，标贯击数平均值是动探击数平均值的 1.8 倍。由于夯前地层标贯击数较高，接近或超过 20 击，造成实测数据在 4.0~8.0 m 范围内夯后标贯值小于夯前，10.0~12.0 m 范围内夯后、夯

前标贯值相近。结合强夯影响深度，根据标贯对比曲线判定强夯有效加固深度为 12.5 m。

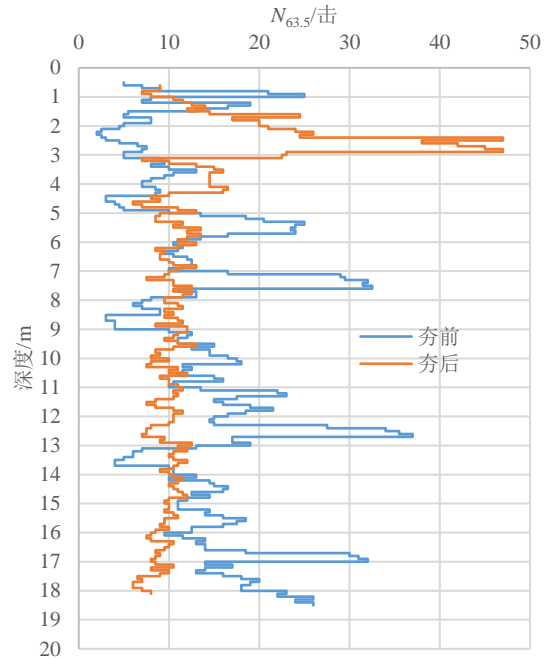


图 8 15 000 kN·m 试验区动探对比曲线  
Fig. 8 Testing data of 15 000 kN·m DPT

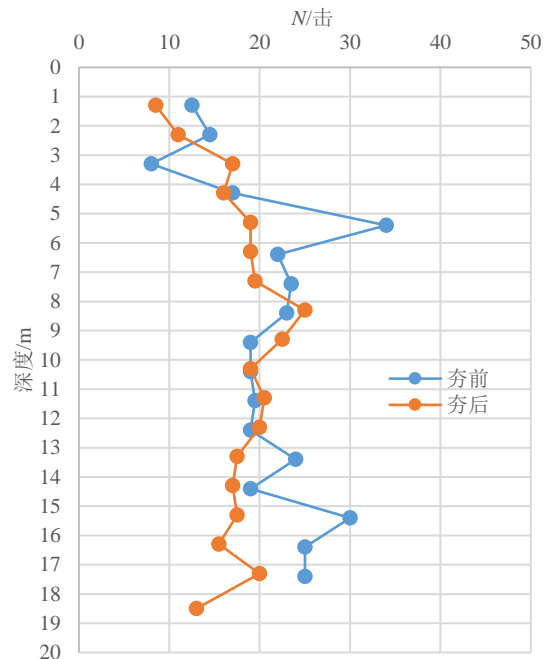


图 9 15 000 kN·m 试验区标贯对比曲线  
Fig. 9 Testing data of 15 000 kN·m SPT

(5) 20 000 kN·m 试验区

20 000 kN·m 试验区夯前、夯后动力触探和标准贯入试验对比曲线见图 10 和图 11。

夯前、夯后平均动探击数分别为 21.6 击和 10.3 击，无法根据动探判定加固深度。夯前、夯后标贯击数平均值分别为 19 击和 26 击，根据标贯对比曲

线判定强夯有效加固深度为 16.5 m。根据夯后标贯和动探数据对比, 标贯击数平均值是动探击数平均值的 2.5 倍。

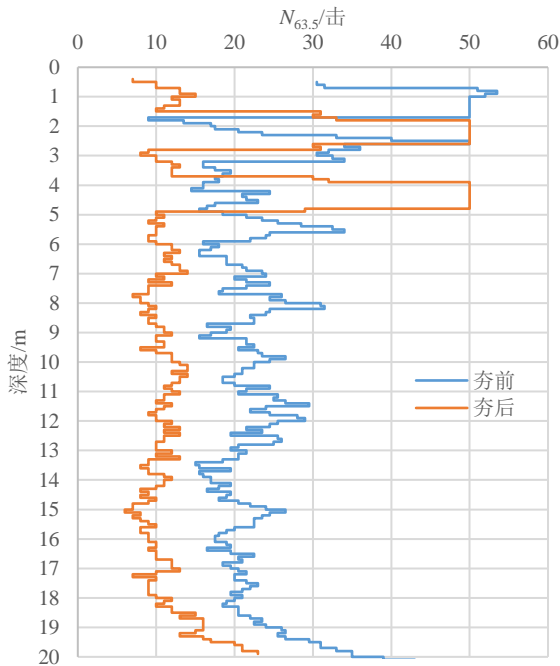


图 10 20 000 kN·m 试验区动探对比曲线  
Fig. 10 Testing data of 20 000 kN·m DPT

标贯击数平均值分别为 21 击和 26 击。根据夯后标贯对比曲线判定有效加固深度为 16.5 m。根据夯后标贯与动探数据对比分析, 标贯击数平均值是动探击数平均值的 1.8 倍。

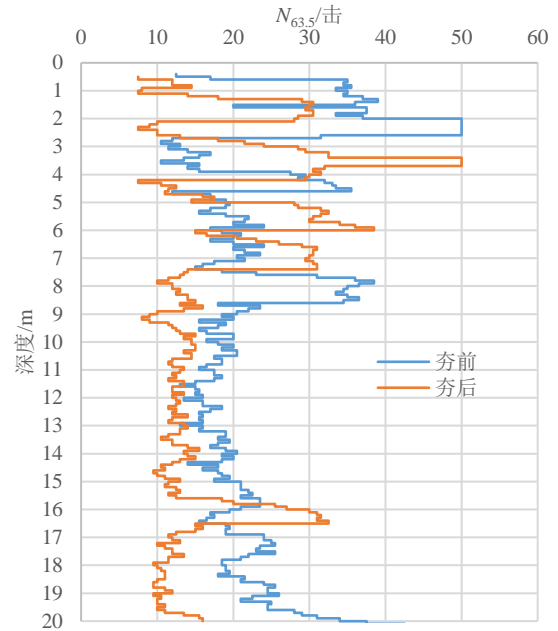


图 12 25 000 kN·m 试验区动探对比曲线  
Fig. 12 Testing data of 25 000 kN·m DPT

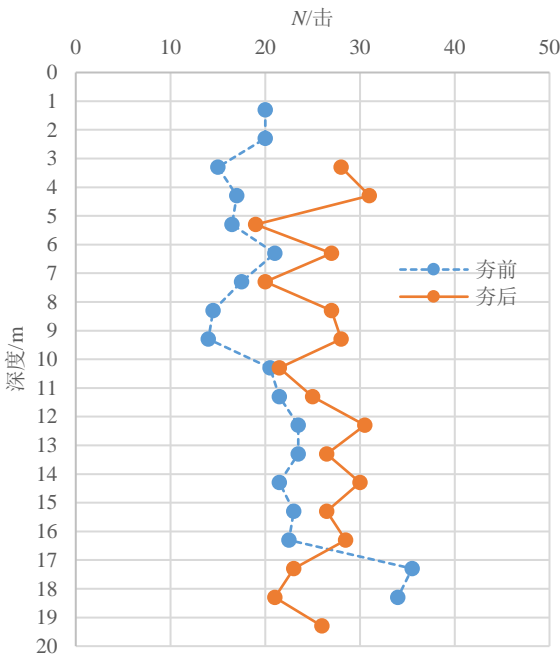


图 11 20 000 kN·m 试验区标贯对比曲线  
Fig. 11 Testing data of 20 000 kN·m SPT

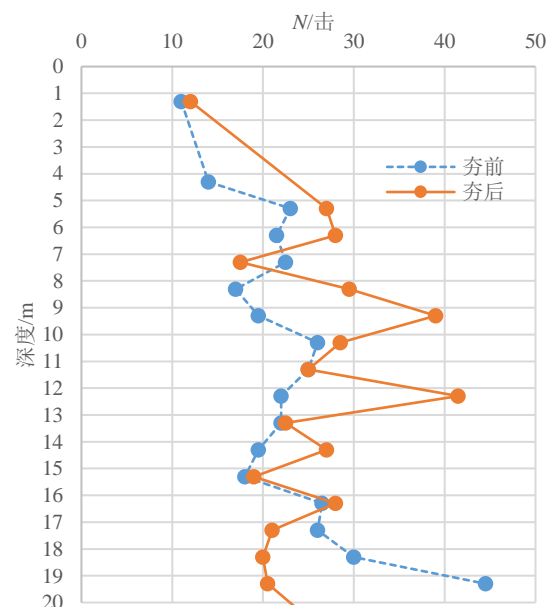


图 13 25 000 kN·m 试验区标贯对比曲线  
Fig. 13 Testing data of 25 000 kN·m SPT

(6) 25 000 kN·m 试验区

25 000 kN·m 试验区夯前、夯后动力触探和标准贯入试验对比曲线见图 12 和图 13。

夯前、夯后动探击数平均值分别为 19.5 击和 14.1 击, 无法根据动探判定加固深度。夯前、夯后

1.5 试验结果评价分析

根据夯后平板载荷试验结果、标准贯入试验和重型圆锥动力触探结果, 地基承载力特征值均不小于 250 kPa, 加固深度范围内压缩模量不小于 10 MPa, 其中不同强夯能级夯后标贯与动探结果统计见表 4。

表4 不同强夯能级夯后标贯与动探结果统计  
Table 4 Statistics of SPT and DPT results after dynamic compaction with different dynamic compaction levels

序号	能级/ kN·m	填土厚度/ m	标贯击数	动探击数	标贯与动探
			平均结果	平均结果	比值
1	4 000	4~8	20.0	9.8	2.0
2	6 000	9	20.0	9.0	2.2
3	10 000	12	16.6	8.2	2.0
4	15 000	15	18.0	10.0	1.8
5	20 000	14~19	26.0	10.3	2.5
6	25 000	16~20	26.0	14.1	1.8

根据以上试验数据分析,本项目试验结果有以下特点:

(1) 本项目场地地基填土时间较长(10年以上),虽然填土层形成一定结构强度,但均匀性较差。从动力触探结果可以看出,动探击数最低仅1~3击,最高却达到30~40击。对于夯前动探击数较高区域,由于间歇期较短,夯后动探击数普遍降低。从数据来看,夯后动探击数基本上在10击左右。

(2) 本场地地层填土以黏性土为主,适合标准贯入试验,且夯前、夯后标贯数据区分度较大,可以通过标贯对比分析判定加固深度。

(3) 通过夯后标贯数据与动探数据的对比分析,夯后标贯击数平均值为动探击数平均值的1.8~2.5倍。

## 2 结 论

根据试验区重型圆锥动力触探和标准贯入试验结果对比分析得到以下结论:

(1) 本项目未经处理的填土,虽然经过多年自重固结沉降,填土强度有不同程度的提高,但仍具有显著的不均匀性,为提高地层的均匀性,仍需要进行强夯处理。

(2) 以黏性土为主的填土场地通过夯前、夯后对比进行强夯加固深度判定,采用标贯试验检测比动力触探检测区分度好。本项目填土是以黏性土为主的混合土,夯后检测间歇期较短且在有地下水情况下,夯后动力触探击数一般在10击左右,如果夯前动探击数较高,则出现夯后击数普遍降低的情况,无法通过动探检测判断强夯加固深度,而标准贯入试验却有较好的区分度。

(3) 各能级的有效加固深度:4 000 kN·m 能级为6.0 m,6 000 kN·m 能级为7.5 m,10 000 kN·m 能级为10.0 m,15 000 kN·m 能级为12.5 m,20 000 kN·m 和25 000 kN·m 能级不小于16.5 m,可为地基处理规范编制12 000 kN·m 以上能级的强夯有效加固深度提供参考。

(4) 通过夯后标贯和动探击数统计分析,夯后标贯击数平均值是动探击数平均值的1.8~2.5倍。结合相关经验,一般可按 $N=2N_{63.5}$ 进行初步换算处理。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢制储罐地基处理技术规范: GB/T 50756—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Steel Tanks: GB/T 50756—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [4] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第五版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
Editorial Committee of Geological Engineering Handbook. Geological Engineering Handbook[M]. Fifth Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [5] 水伟厚, 王铁宏, 王亚凌. 瑞雷波检测10 000 kN·m 高能级强夯地基[J]. 建筑结构, 2005, 35(7): 46-48.



- SHUI Wei-hou, WANG Tie-hong, WANG Ya-ling. Application of Rayleigh wave to testing the ground treated with (10 000) kN·m high energy level dynamic compaction[J]. Building Structure, 2005, 35(7): 46-48.
- [6] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌. 高能级强夯技术发展研究与工程应用 (2006—2015)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- WANG Tie-hong, SHUI Wei-hou, WANG Ya-ling. Development Research and Engineering Application of High Energy Dynamic Compaction Technology (2006—2015)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [7] 张毅, 房明. 关于标贯击数与重型动探击数的相互关系的探讨[J]. 山西建筑, 2021, 47(18): 66-67.
- ZHANG Yi, FANG Ming. Discussion on the relationship between the blow count of standard penetration test and that of cone heavy dynamic penetration test[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(18): 66-67.
- [8] 牛建光, 孙成科, 蒯志要, 等. 动力触探试验和标准贯入试验指标相关性研究[J]. 港工技术, 2013, 50(5): 52-54.
- NIU Jian-guang, SUN Cheng-ke, KUAI Zhi-yao, et al. Correlation study of dynamic penetration test index and standard penetration test index[J]. Port Engineering Technology, 2013, 50(5): 52-54.
- [9] 郑伟, 肖雄丙, 张宏明. 动探与标贯试验在地基液化检测中的相关性研究[J]. 港工技术, 2015, 52(6): 105-107.
- ZHENG Wei, XIAO Xiong-bing, ZHANG Hong-ming. Correlation study of dynamic sounding and standard penetration test applied in foundation liquefaction detection[J]. Port Engineering Technology, 2015, 52(6): 105-107.
- [10] 曹厚明. 重型动力触探、标准贯入试验在振动挤密碎石桩复合地基检测中的应用[J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2004(2): 25.
- CAO Hou-ming. Application of heavy dynamic penetration test and standard penetration test in the detection of composite foundation of vibro compaction gravel pile[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004(2): 25.

### 专栏主持人 水伟厚



同济大学博士, 教授级高级工程师, 大地巨人(北京)工程科技有限公司总经理, 大地巨人(广东)岩土工程有限公司总经理, 曾任中化岩土集团有限公司副总经理, 华东建筑集团股份有限

公司(原上海现代建筑设计集团)副总工程师。获北京市“科技创新领军人才”, 上海市“十大杰出青年”提名奖, 上海市“五一劳动奖章”等荣誉称号。主编参编《建筑地基处理技术规范》、《复合地基技术规范》、《高填土地基技术规范》、《建筑地基检测技术规范》等 19 部国家和行业规范。编写学术专著 6 部, 主持国家重大地基处理工程项目 60 余项, 长期从事高填方场地形成和强夯法地基处理设计施工研究和工程实践。