

# “真空联合堆载预压 + 强夯法”在软土地基中的应用研究

——记珠海华润燃气分布式能源项目施工实践

刘 辉

华润电力(珠海)智慧能源有限公司, 广东 珠海  
Email: hliu-009@163.com

收稿日期: 2020年10月7日; 录用日期: 2020年10月23日; 发布日期: 2020年10月30日

## 摘 要

软土地基属不良土质地基, 需加固后才能进行工程建设, 本文简要介绍了珠海华润燃气分布式能源项目场地软土地基的工程特性和采用“真空联合堆载预压 + 强夯法”对其进行加固的施工过程。通过对珠海华润燃气分布式能源项目场地预处理工程的实践分析, 并根据监测、检测数据对软基处理前后其物理力学性质指标的比较, 得出采用“真空联合堆载预压 + 强夯法”处理软土地基是一种工期较短、效果较好、无后期隐患、行之有效的方法, 可为后续类似工程提供借鉴。

## 关键词

软土地基, 真空联合堆载预压, 强夯, 监测, 检测

# Study on the Application of “Vacuum Combined Load Preloading and Dynamic Compaction” in Soft Soil Foundation

—Recording the Construction Practice of Zhuhai China Resources Gas Distributed Energy Project

Hui Liu

China Resources Power (Zhuhai) Smart Energy Co., Ltd., Zhuhai Guangdong  
Email: hliu-009@163.com

Received: Oct. 7<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2020; published: Oct. 30<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Soft soil foundation is a bad soil foundation, which needs to be reinforced before engineering construction. This paper briefly introduces the engineering characteristics of soft soil foundation of Zhuhai China Resources gas distributed energy project and the construction process of strengthening it with “vacuum combined surcharge preloading and dynamic compaction method”. Based on the analysis of Zhuhai China Resources gas distributed energy project site pretreatment engineering, and according to the comparison of physical and mechanical property indexes before and after soft foundation treatment shows that “vacuum combined surcharge preloading and dynamic compaction” is an effective method with short construction period, good effect, no late hidden danger, and can be used for similar projects in the future.

## Keywords

Soft Soil Foundation, Vacuum Combined Surcharge Preloading, Dynamic Compaction, Monitoring, Testing

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

软土地基广泛分布于我国沿海地区，特别是珠三角地区，其具有孔隙比大、含水率高、灵敏度高、压缩性高、抗剪强度低等特点，对工程建设极为不利。为确保工程场地不影响建筑物的使用功能和生产安全，需对软土地基进行预处理，处理效果的好坏与地基承载能力、变形和稳定安全有直接关系。沈珠江分析了软土的工程特性与变形机理，提出了软土地基的本构模型与设计计算理论[1]。郑刚等对包括软土地基在内的各类型地基的处理方法进行总结归纳并提出针对不同地基特性的处理建议[2]。王婧研究了珠海地区软土的固结特性与微观结构，从微观上分析了真空预压法处理软土的固结机理[3]。Schaefer 等介绍了应用于美国各类地基的 47 项地基改良加固技术[4]。软土地基处理方法有复合地基法、置换法、换填法、预压法、强夯法等[5]，胡海英等较为充分地考虑了桩土变形协调原则，优化了刚性桩复合地基的设计计算并在工程中得到验证[6]。白冰等在实测资料和理论分析的基础上，对强夯置换法加固松软土地基的若干问题进行研究[7]。曹杰等验证和评价真空预压法在软土地基中的处理效果，并探讨了真空-堆载联合预压的结合时机问题[8]。根据工程设计要求，结合工期和造价选择行之有效的方法是一项技术难度较大的工作，本文以珠海华润燃气分布式能源项目为例，阐述了“真空联合堆载预压+强夯法”在软土地基处理中的应用，为后续类似工程提供借鉴意义。

## 2. 场区工程地质条件

华润电力(珠海)智慧能源有限公司燃气分布式能源项目位于广东省珠海市富山工业园区，厂址面积约为 4.68 公顷，南北向长约为 202 m，东西向长约 230 m，基本呈方形。地貌单元为海陆交互相冲积平原，区域内河网发育，鱼塘密布，地形平缓开阔。鱼塘内常年有水，水深约 1.50~2.00 m，常水位高程约为 2.00 m。场地地面平均标高约为 0.50 m。厂区用地平面图见图 1。

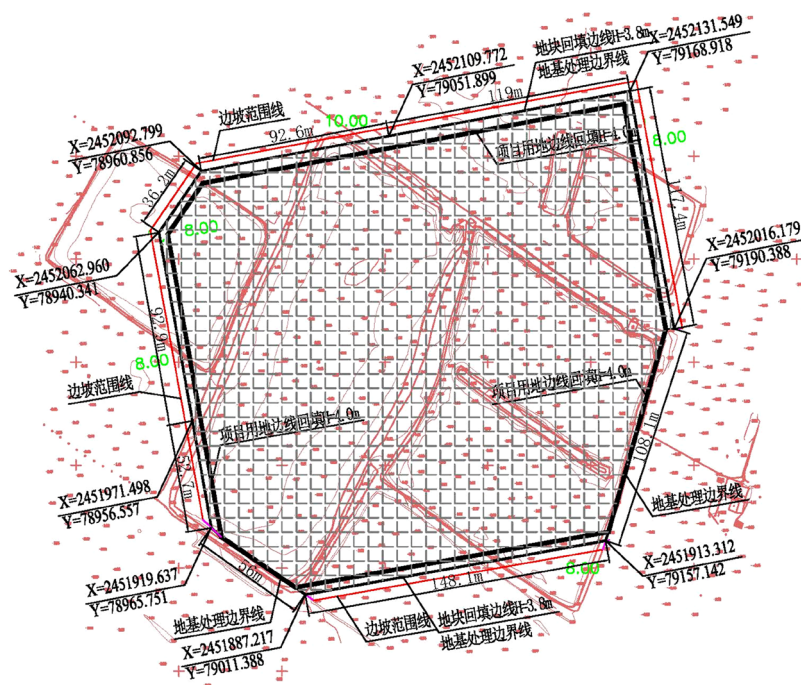


Figure 1. Site plan  
图 1. 场区用地平面图

据勘察钻孔揭露，场区地层自上而下按成因类型分为：人工填土层 Q4ml(素填土①)、海陆交互相沉积层 Q4mc(淤泥②、粉质粘土②<sub>1</sub>、中砂②<sub>2</sub>)、残积层 Q4el(砂质粘性土③)和基岩  $\gamma 53(1)$ ，各土层厚度详见表 1。

Table 1. Statistical table of thickness of each soil layer  
表 1. 各土层厚度统计表

| 层号             | 地层名称   | 土层厚度(m)    | 平均厚度(m) | 备注 |
|----------------|--------|------------|---------|----|
| ①              | 素填土    | 1.70~4.50  | 2.99    |    |
| ②              | 淤泥     | 4.60~13.00 | 7.35    |    |
| ② <sub>1</sub> | 粉质粘土   | 3.40~14.80 | 7.83    |    |
| ② <sub>2</sub> | 中砂     | 2.60~3.20  | 2.90    |    |
| ③              | 砂质粘性土  | 3.90~16.40 | 10.48   |    |
| ④ <sub>1</sub> | 全风化花岗岩 | 0.80~11.30 | 4.63    |    |

### 3. 软土地基的特点

场地普遍分布一层平均厚度约为 8 m 的淤泥层，为新近海陆交互相沉积而成，呈流塑~软塑状，具有含水率高、透水性差、压缩性高、灵敏度高、抗剪强度低、承载力低、欠固结等特征，其物理力学性质指标见表 2。鉴于淤泥层的特点，若不对其进行加固处理，可能会造成场地填筑过程中地基失稳、使用过程中沉降和不均匀沉降过大，对结构物下的桩基础产生负摩阻力、外部扰动作用下(如震动)出现强度骤降引起塌陷等问题。

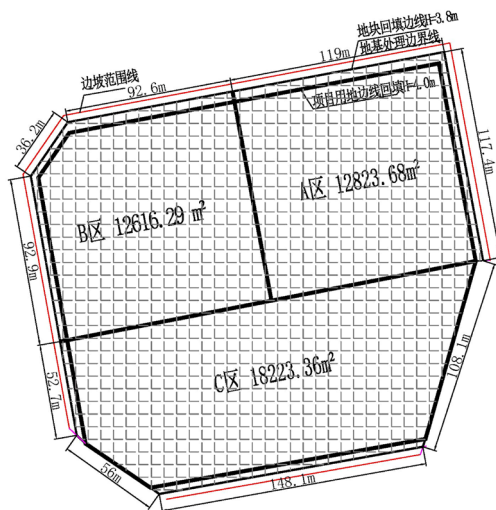
**Table 2.** List of main physical and mechanical properties of silt layer  
**表 2.** 淤泥层主要物理力学性质指标一览表

| 指标类别                               | 样本数                | 范围值           | 平均值       | 变异系数  |       |
|------------------------------------|--------------------|---------------|-----------|-------|-------|
| 天然含水量 $w$ (%)                      | 21                 | 55.1~98.0     | 73.2      | 0.205 |       |
| 天然重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 21                 | 14.6~16.7     | 14.9      | 0.038 |       |
| 孔隙比 $e$                            | 21                 | 1.480~2.567   | 1.941     | 0.064 |       |
| 塑性指数 $I_p$                         | 22                 | 4.9~28.1      | 22.9      | 0.167 |       |
| 渗透系数 $k_v$ (cm/s)                  | 9                  | 6.0E-8~4.4E-7 | 2.3E-7    | 0.530 |       |
| 固结快剪                               | 内聚力 $C$ (kPa)      | 10            | 11.0~15.0 | 12.3  | 0.225 |
|                                    | 内摩擦角 $\varphi$ (°) | 10            | 7.5~14.0  | 8.6   | 0.454 |
| 直剪快剪                               | 内聚力 $C$ (kPa)      | 6             | 3.8~6.0   | 5.0   | 0.255 |
|                                    | 内摩擦角 $\varphi$ (°) | 6             | 2.8~3.3   | 2.4   | 0.231 |
| 压缩模量 $E_{s1-2}$ (MPa)              | 13                 | 0.95~2.21     | 1.57      | 0.279 |       |

#### 4. 软土地基的处理方法

基于上述淤泥软土层对厂区使用的危害，需对其进行预处理。场地预处理目标值：回填土承载力特征值不低于 120 kPa，软土的承载力特征值不低于 80 kPa，软土固结度不小于 90%，工后沉降不大于 200 mm。处理软土地基预处理的方法很多，结合本工程场地地质条件、水文条件、场地要求、工期需求及本项目原貌都是鱼塘并需大量回填才能达到设计标高等多方面因素，选取采用“真空联合堆载预压+强夯法”对其进行预处理。巧妙、合理安排回填土和场地预处理计划，两者同步合理交叉施工，使几种地基处理方法巧妙有机结合，利用机械抽真空高效分离淤泥中孔隙水，场地回填堆载加速淤泥固结，最后采用强夯再进一步提高回填土密实度，达到事半功倍的效果。

本项目场地预处理总面积约 43,663.33 m<sup>2</sup>，共分 A、B、C 三个区，如图 2 所示。



**Figure 2.** Construction master plan

**图 2.** 施工总平面分区图

##### 4.1. 真空联合堆载预压法

真空联合堆载预压法加固原理是在场地内通过打设塑料排水板和铺设砂垫层形成竖向和水平排水系

统；在处理区四周设置密封墙和密封沟并在砂垫层之上铺设密封膜，使其形成一个相对密闭的系统；然后利用抽真空产生的大气负压联合膜上填土堆载产生的重力对软基进行预压，使其中的孔隙水在联合压力作用下通过排水系统排出，从而达到排水固结、消除沉降、提高强度和承载力的目的[9] [10] [11]，典型真空联合堆载预压断面图如图 3 所示。

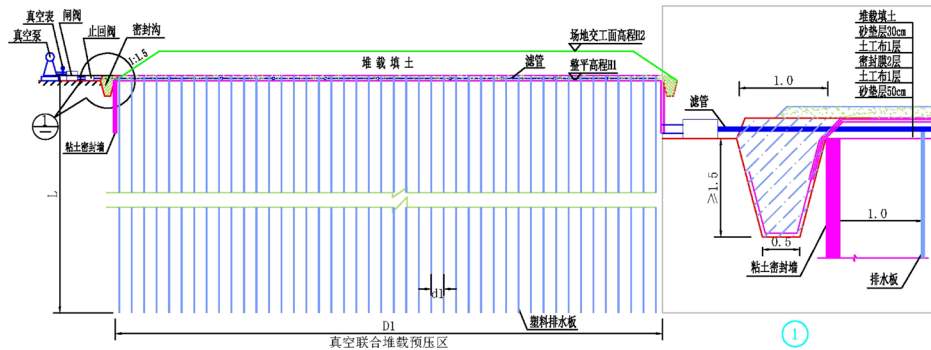


Figure 3. Section view of vacuum combined preloading  
图 3. 真空联合堆载预压断面图

真空联合堆载预压法正式施工前，在加固区四周进行补充勘察，查明是否存在透水层。处理范围内有透水层时，需采取有效措施切断透气层和透水层。

1) 真空预压施工：疏干积水后，填土至绝对标高 1.50 m 处，铺设砂垫层，再进行塑料排水板和真空系统布设(两膜一布、排水管及密封沟设置、真空泵架设，抽真空排水等)。恒压抽真空试运行一定天数后，先行铺设一层编织土工布；再铺设膜上砂层作为保护层，保护层不得含石块等尖锐物。

2) 堆载预压施工：待膜下真空度稳定后，在膜上保护层之上进行回填，回填严格执行分层填筑并压实，堆载总高度不应小于设计总荷载的折算高度。在恒载预压一定天数后，场地沉降趋于稳定，停止抽真空卸载，进行强夯施工。

3) 真空联合堆载处理软土地基施工过程中，需对地基沉降、水平位移和孔隙水压力等进行监测，一方面评估施工过程质量，另一方面预测施工过程安全并指导填土施工。

## 4.2. 强夯法

根据使用要求，场地填土厚度约为 4 m，采用强夯法密实填土层。强夯法加固原理是利用重锤，从高处自由落下对土体进行动力夯击，在极短的时间内对土体施加一个巨大的冲击能量，使其密实，达到提高地基承载力的目的[12]，典型强夯断面图如图 4 所示。

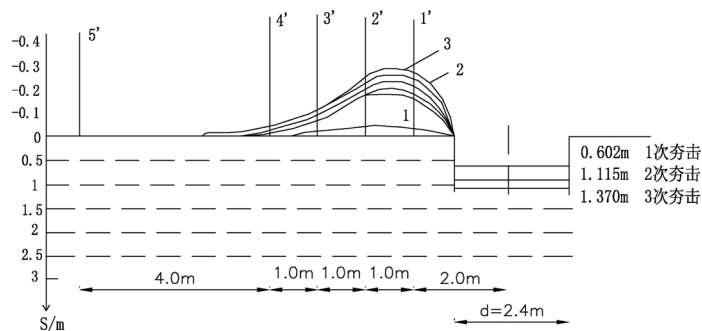


Figure 4. Dynamic compaction section view  
图 4. 强夯断面图

1) 大面积施工前必须试夯, 试夯夯击能分别选用 1200 kN·m、1500 kN·m、2000 kN·m、3000 kN·m。根据试夯过程中观测的各能级下夯沉量、隆起量、填土层底面高程及压实度综合分析, 最终点夯夯击能选为 2000 kN·m, 夯锤锤重 20 t, 直径 2.4 m, 夯点 5 m × 5 m 正方形角和中心梅花形布置。

2) 完成一遍点夯的夯击后, 用推土机将夯坑填平, 并测量场地高程。最后用 800 kN·m 低能量满夯, 将场地表层土夯实, 并测量夯后场地高程。强夯施工过程中必须有专人负责监测, 并按照相关现行规程、规范要求对各项参数及情况做好详细的施工记录。

### 5. 场地预处理效果

为了全程监控地基预处理过程, 和检验地基预处理前后软土物理力学性质的改善情况和强夯密实表层填土的效果, 在地基预处理过程中开展了监测和检测工作。

#### 5.1. 监测成果

地基预处理过程中的监测工作包括: 沉降、水平位移、孔隙水压力等内容。

根据地表沉降监测数据, 采用真空联合堆载预压对地基进行预处理期间, 整个场地平均累计沉降量达到 95.7 cm, 图 5 是典型荷载 - 时间 - 沉降曲线。

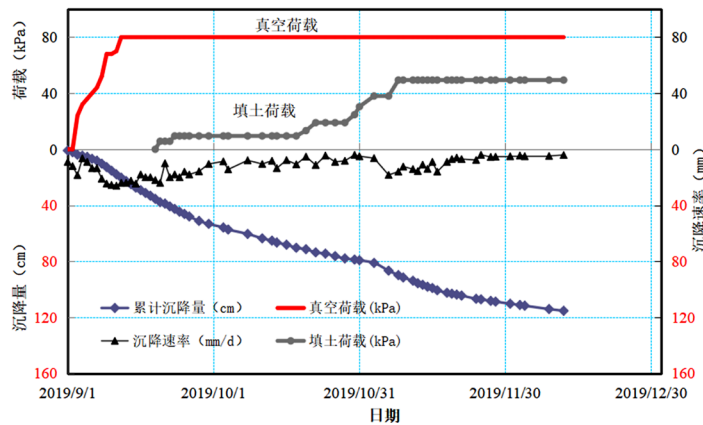


Figure 5. Typical load-time-settlement curve  
图 5. 典型荷载 - 时间 - 沉降曲线

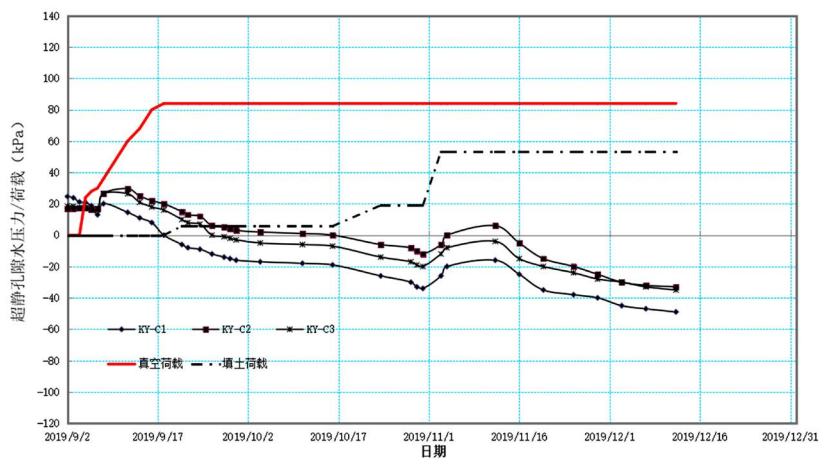


Figure 6. Typical load-time-pore water pressure curve  
图 6. 典型荷载 - 时间 - 孔隙水压力曲线

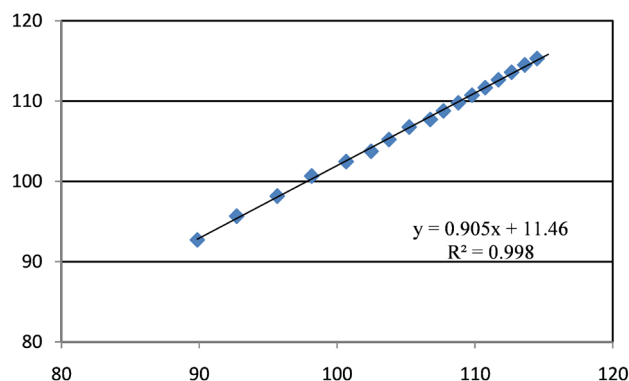


Figure 7. Typical degree of consolidation calculation  
图 7. 典型固结度推算

根据孔隙水压力监测数据, 采用真空联合堆载预压对地基进行预处理期间, 真空预压初期, 孔隙水压力处于消散状态, 随着真空压力趋于稳定, 膜上开始填土, 孔隙水压力略有增大, 随着预压时间的延长, 孔压持续消散, 但消散速率渐缓。值得说明的是, 本场地由于软土层厚度较薄, 真空压力传递效果明显, 部分孔压计测得土中超孔压为负值, 图 6 是典型荷载 - 时间 - 孔隙水压力曲线。

采用 Asaka 法根据沉降实测曲线推算固结度, 本场地推算的固结度平均值达到 90.3%。平均工后残余沉降为 10.2 cm, 图 7 是采用 Asaka 法推算固结度的拟合曲线。

## 5.2. 检测成果

- 1) 现场钻孔取土试验, 场地处理前后淤泥层指标参数对比详见表 3。

Table 3. Comparison table of physical and mechanical properties of silt layer before and after treatment  
表 3. 处理前后淤泥层物理力学性质指标对比表

| 指标                                  | A 区   |       | B 区   |       | C 区   |       | 平均增长/降低率% |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                                     | 处理前   | 处理后   | 处理前   | 处理后   | 处理前   | 处理后   |           |
| 含水率 W(%)                            | 69.1  | 58.7  | 63.4  | 53.6  | 71.9  | 59.4  | 16.0      |
| 孔隙比 e                               | 1.810 | 1.556 | 1.676 | 1.419 | 1.884 | 1.582 | 15.1      |
| 天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$   | 1.59  | 1.64  | 1.62  | 1.68  | 1.58  | 1.63  | 3.7       |
| 压缩模量 $E_{s0.1\sim 0.2}(\text{MPa})$ | 1.33  | 2.10  | 1.47  | 2.51  | 1.23  | 2.22  | 69.7      |
| 直快 C(kPa)                           | 4.8   | 4.8   | 5.1   | 5.6   | 4.6   | 5.1   | 6.6       |
| 直快 $\varphi(^{\circ})$              | 3.3   | 3.5   | 3.4   | 4.0   | 3.4   | 3.4   | 8.4       |
| 固快 C(kPa)                           | 13.7  | 14.4  | 14.0  | 15.2  | 13.4  | 13.8  | 5.8       |
| 固快 $\varphi(^{\circ})$              | 9.8   | 12.0  | 11.1  | 11.3  | 10.7  | 11.2  | 9.8       |
| 无侧限抗压强度 $q_u(\text{kPa})$           | 17.6  | 20.7  | 15.6  | 22.4  | 18.7  | 21.4  | 25.2      |
| 灵敏度 St                              | 2.0   | 2.1   | 1.9   | 2.4   | 2.1   | 2.1   |           |

注: 表内值均为平均值。

从表 3 中可看出, 场地淤泥层经真空联合堆载预压处理前后, 含水率从 63.4%~71.9%下降至 53.6%~59.4%, 平均降低约 16.0%; 孔隙比从 1.676~1.884 下降至 1.419~1.582, 平均降低约 15.1%; 天然密度从 1.58 g/cm<sup>3</sup>~1.62 g/cm<sup>3</sup> 增长到 1.63 g/cm<sup>3</sup>~1.68 g/cm<sup>3</sup>, 平均增长约 3.7%; 压缩模量从 1.23 MPa~1.47 MPa 提高到 2.10 MPa~2.51 MPa, 平均提高约 69.7%; 直剪快剪强度指标粘聚力和摩擦角从 4.6 kPa~5.1 kPa、3.3°~3.4° 提高到 4.8 kPa~5.6 kPa、3.4°~4.0°, 平均提高约 6.6%和 8.4%; 固结快剪强度指标粘聚力和摩擦

角从 13.7 kPa~14.0 kPa、9.8°~11.1°提高到 13.8 kPa~15.2 kPa、11.2°~12.0°，平均提高约 5.8%和 9.8%；无侧限抗压强度从 15.6 kPa~18.7 kPa 提高到 20.7 kPa~22.4 kPa，平均提高约 25.2%。

根据试验结果，本场地淤泥层经真空联合堆载预压处理后加固效果明显，各项物理力学性质显著改善。

2) 场地处理前后淤泥层静力触探指标统计数据见表 4，推算承载力详见表 5，图 8 是典型场地处理前后静力触探对比图。

**Table 4.** Comparison table of results of static cone penetration test of silt layer before and after treatment

**表 4.** 处理前后淤泥层静力触探试验成果对比表

| 指标               | A 区  |      | B 区  |      | C 区  |      | 平均增长/降低率% |
|------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
|                  | 处理前  | 处理后  | 处理前  | 处理后  | 处理前  | 处理后  |           |
| 锥尖阻力 $q_c$ (MPa) | 0.50 | 0.66 | 0.44 | 0.68 | 0.51 | 0.72 | 29.6      |
| 侧壁阻力 $f_s$ (kPa) | 6.6  | 8.3  | 7.2  | 9.8  | 6.7  | 9.3  | 25.2      |

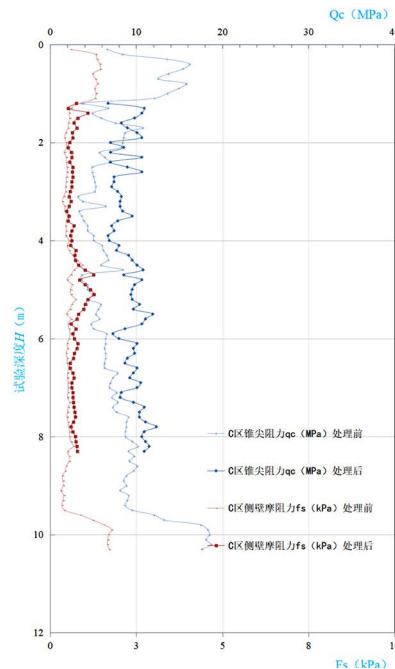
根据《工程地质手册》经验公式推算承载力，选取适用于软土的经验公式，分别进行计算，根据锥尖阻力推算淤泥层承载力[13]。

$$f_0 = 112pS + 5 \quad \text{软土: } 0.085 < ps < 0.9$$

**Table 5.** The static exploration results calculate the bearing capacity of the silt layer before and after treatment

**表 5.** 静探成果推算处理前后淤泥层承载力

| 指标         | A 区  |      | B 区  |      | C 区  |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|
|            | 处理前  | 处理后  | 处理前  | 处理后  | 处理前  | 处理后  |
| 地基承载力(kPa) | 61.0 | 78.9 | 54.3 | 81.2 | 62.1 | 85.6 |
| 地基处理前平均值   |      |      | 59.1 |      |      |      |
| 地基处理后平均值   |      |      | 81.9 |      |      |      |



**Figure 8.** Comparison of static cone penetration test before and after treatment of typical site

**图 8.** 典型场地处理前后静力触探对比图



### 5.3. 填土层检测

回填层强夯加固后需对地基土性质及均匀性进行检测，检测方法采用浅层平板静载荷试验、动力触探试验和多道瞬态面波试验。

1) 浅层平板静载荷试验：分别在场地真空预处理三个区选取 3 个试验点。每个试验点分 8 级加载 4 级卸载共 12 级进行实验，首级加载值为 60 kPa，并按 30 kPa 逐级增加，总加载量为 240 kPa，满载时按 60 kPa 逐级卸载。根据最终的试验 A 区、B 区、C 区三块场地地基处理后的载荷试验承载力特征值均达到 120 kPa 的设计要求。典型静载试验应力应变曲线见图 9。

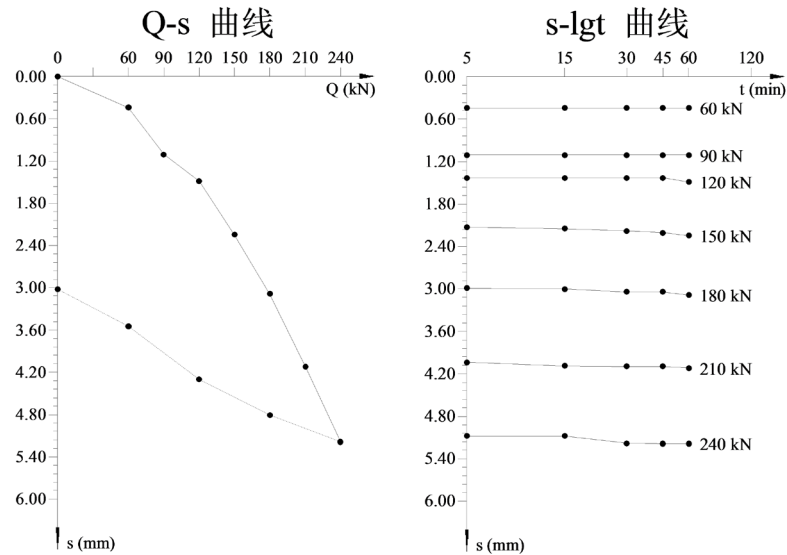


Figure 9. Typical site static load test stress-strain curve diagram

图 9. 典型场地静载试验应力应变曲线图

2) 动力触探试验：A 区、B 区和 C 区填土层重型动力初探试验击数均不小于 2 击，根据规范中“粘性土、粉土  $N_{63.5}$  与承载力  $f_k$  的关系”经验数据表 6，对比分析  $N_{63.5}$  重型动力触探试验曲线图，可判断三个区填土层地基承载力也均不小于 120 kPa。典型动探击数曲线见图 10。

Table 6. The relationship between cohesive soil and silt  $N_{63.5}$  and bearing capacity  $f_k$

表 6. 粘性土、粉土  $N_{63.5}$  与承载力  $f_k$  的关系

| 状态 | $N_{63.5}$ | $f_k$ (Kpa) |
|----|------------|-------------|
| 流塑 | 1          | 60          |
|    | 1.5        | 90          |
| 软塑 | 2          | 120         |
|    | 3          | 150         |
|    | 4          | 180         |
|    | 5          | 210         |
| 可塑 | 6          | 240         |
|    | 7          | 265         |
|    | 8          | 290         |

Continued

|       |    |     |
|-------|----|-----|
|       | 9  | 320 |
| 硬塑~坚硬 | 10 | 350 |
|       | 11 | 375 |
|       | 12 | 400 |

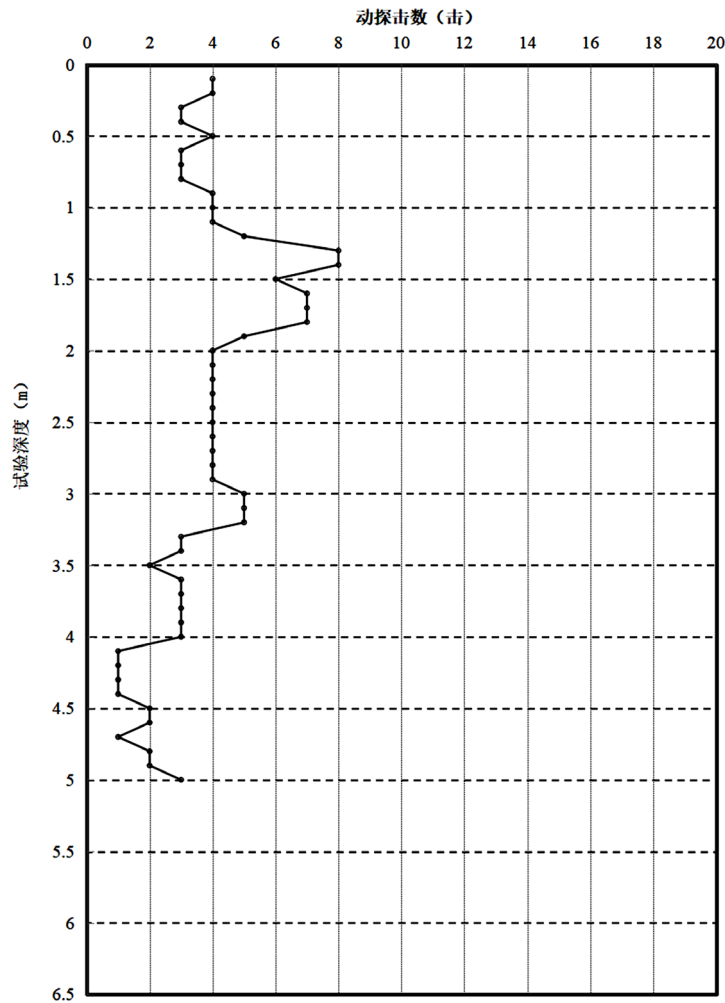


Figure 10. Dynamic penetration curve of a typical site

图 10. 典型场地动力触探曲线图

3) 多道瞬态面波试验: 通过地震面波检测工作的研究表明, 面波勘探方法能够对地下地层结构做出较明显的反映, 反演出的测深映像图符合真实的回填层情况。强夯方法能够有效压实回填土, 有良好的加固效果。

## 6. 结束语

结合本工程中监测收集到的地基处理结果有关数据及积累的相关经验, 做出如下总结与建议:

1) 监测结果表明, 真空联合堆载预压法处理软土地基效果较为明显, 场地的固结度平均值达到 90.3%, 含水率平均降低 16%, 压缩模量提高 70%左右, 处理后的淤泥层各项物理力学性能指标均有显著改善, 能够很好地满足工程要求的地基处理效果。

2) 根据监测到的累计沉降量及沉降速率,在恒定真空荷载作用下,沉降趋近稳定,再施加填土荷载后,沉降速率大幅提升,累计沉降明显增加。故可考虑根据工程实际尽早施加填土荷载,促使累计沉降提前稳定,以提升工程进度。

3) 采用真空联合堆载预压法预处理地基土后,使用强夯法压实回填土,能够良好地加固回填土,较为快速地满足设计要求的地基承载力。

## 参考文献

- [1] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998(1): 3-5.
- [2] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 李广信. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
- [3] 王婧. 珠海软土固结性质的宏微观试验及机理分析[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [4] Schaefer, V.R., Filz, G.M. and Vanzler, L.S. (2014) SHRP2 R02 Phase 1—Geotechnical Solutions for Soil Improvement, Rapid Embankment Construction, and Stabilization of the Pavement Working Platform. *Shrp Report*.
- [5] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.
- [6] 胡海英, 杨光华, 张玉成, 陈伟超, 姜燕, 钟志辉, 姚丽娜. 基于沉降控制的刚性桩复合地基设计方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2135-2146.
- [7] 白冰, 徐华轩, 刘海波, 范强惠. 强夯置换法处理松软土地基若干问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3001-3006.
- [8] 曹杰, 郑建国, 刘智, 李波, 李攀, 杨超, 何丹, 赵海圆. 真空预压法处理软土地基的工程应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S2): 124-127.
- [9] 朱建才. 真空联合堆载预压加固软基机理及工艺研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [10] 朱建才, 陈兰云, 龚晓南. 高等级公路桥头软基真空联合堆载预压加固试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(12): 2160-2165.
- [11] López-Acosta, N.P., Espinosa-Santiago, A.L., Pineda-Núñez, V.M., Ossa, A., Mendoza, M.J., Ovando-Shelley, E. and Botero, E. (2019) Performance of a Test Embankment on Very Soft Clayey Soil Improved with Drain-to-Drain Vacuum Preloading Technology. *Geotextiles and Geomembranes*, 47, 618-631. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103459>
- [12] 左名麒. 震动波与强夯法机理[J]. 岩土工程学报, 1986(3): 55-62.
- [13] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.