



# 强夯垫层法在海港软土路基处理中的应用

贺 立, 廖小明

(广西北部湾国际港务集团有限公司, 广西 南宁 530021)

**摘要:** 北海某海港区铁路专用线区域范围内存在深厚软土路基需要处理, 以此为工程背景, 结合现场条件、施工工期、工程造价等综合因素, 提出了强夯垫层法处理软基的技术方案。通过现场足尺度软基加固试验, 并借助静力触探、标贯试验以及载荷试验 3 种检测方法, 验证强夯垫层法处理软基效果。结果表明: 强夯垫层法技术方案可行, 并且可处理上覆 6 m 厚的软土路基, 点夯和满夯相结合的强夯垫层法可有效提高软基处理效率。研究成果可为类似软基加固工程提供技术参考。

**关键词:** 换填法; 强夯法; 软基处理; 地基加固

中图分类号: U 614

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0185-06

## Application of dynamic compaction cushion method in soft soil subgrade treatment of harbor

HE Li, LIAO Xiaoming

(Beibu Gulf Port Group Co., Ltd., Nanning 530021, China)

**Abstract:** Taking the deep soft soil subgrade in the railway special line of a port area in Beihai as the engineering background, this paper considers comprehensive factors such as site conditions, construction period, and project cost and puts forward the technical scheme of soft foundation treatment by dynamic compaction cushion method. Through the field full-scale test of soft foundation reinforcement, the paper verifies the effect of the dynamic compaction cushion method on soft foundation treatment by static cone penetration test, standard penetration test, and load test. The results show that the proposed technical scheme of the dynamic compaction cushion method is feasible, and it can deal with the soft soil subgrade with a thickness of 6 m. The dynamic compaction cushion method combining point compaction and full compaction can effectively improve the efficiency of soft foundation treatment. The research results can provide technical references for similar soft foundation reinforcement projects.

**Keywords:** replacement method; dynamic compaction cushion method; soft foundation treatment; foundation reinforcement

软土地基普遍存在沿海、沿江等地区, 具有含水量高、强度低等特点。因此工程建设前需进行软基处理<sup>[1]</sup>。常用单一的软基加固方式不能达到预期效果, 复合加固处理技术逐渐占据主导地位<sup>[2]</sup>。近年来国内学者<sup>[3-7]</sup>针对不同领域的软基处理方法进行了深入探讨。地基处理是一项技术难度系数大的非常规工程, 在复杂工况下软基处理方法的选取关系到工期、质量和造价等方面, 因此选取适当的软基处理方法可有效保证主体建设

质量<sup>[8]</sup>。为探明软基加固是否满足验收标准, 目前加固效果检测方法以静力触探试验、标准贯入试验和载荷试验为主<sup>[9-10]</sup>。

本文以北海某海港区铁路线工程为背景, 依托类似工程经验, 结合工程上覆软弱土层分布特点及力学性能指标, 提出预先将表层软弱土层置换为砂土、块石土填料, 再进行强夯法施工的软基加固方案。根据换填法、强夯法的加固原理, 确定换填厚度、强夯击能、夯点布置等参数。最

收稿日期: 2022-07-13

作者简介: 贺立 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程建设、规划、设计、咨询工作。

终结合现场的足尺度试验和多种承载力检测手段,分析软基处理的加固效果,其试验成果为本项目大规模应用及为类似项目施工提供指导意见。

## 1 工程概况

广西北海某海港区铁路专用线工程,正线全长3.60 km,站线辅轨18.99 km。铁路等级为Ⅲ级、双线铁路,港区车场到发线7条。工程属滨海平原及滨海吹填地貌,地形局部有起伏,且地势平坦开阔,相对高差5~20 m。

根据岩土工程勘察报告,工程场地地层分布依次为:①层主要为淤泥,厚度2.40~5.30 m,深灰、灰黑色,含腐植物及贝壳屑,味腥,流塑-软塑状;②层主要为粉细砂,厚度1.10~2.60 m,灰白、灰红色,呈松散、局部稍密状,标准贯入击数平均 $N=6.0$ 击;③层主要为粉质黏土,厚度0.60~1.30 m,棕黄色、褐黄色,硬塑状,含砂量较多,标准贯入击数平均 $N=14.5$ 击。工程建设范围内地质条件复杂,大部分铁路线基础区域处于软弱淤泥土层,最厚淤泥层约6 m。表1

为各土层的物理力学参数,软基未处理时的表层淤泥承载力特征值为50 kPa,远低于设计要求值150 kPa。因此,本工程单独采用换填法或强夯法不能满足地基加固效果和经济性要求,需要选择适合本场地的加固方式并进行现场软基加固试验。

表1 土层物理力学参数

土号及 名称	含水率 $\omega/\%$	塑性 指数 $I_p$	液性 指数 $I_L$	快剪 $C_q$	固结快剪 $C_q$	承载力 推荐值/ kPa		
						$\varphi_q$	$\varphi_q$	
①淤泥	55.4	17.1	2.00	4.5	2.7	12.0	13.7	50
②粉细砂	55.0	17.9	1.87	4.8	2.5	11.1	13.5	50
③黏土	24.7	28.6	0.08	4.4	3.5	12.3	22.5	180
	21.1	19.1	0.04	5.1	3.2	19.8	15.0	350

## 2 软基处理方案及原理

### 2.1 软基处理方案

根据工程地质条件、软土层特点,可选择的软基处理方案主要有4种,分别为换填法、强夯法、注浆法和复合地基法。表2介绍了4种地基处理方法的优缺点和适用范围,考虑经济性和工期发现换填法和强夯法具有一定优势。

表2 软基处理方案对比

加固方案	适用范围	优缺点
换填法	处理深度主要在2 m以内,一般不超过3 m,处理后的地基承载力参考值为120~150 kPa	优点:易于施工、操作简单、工期短、成本低、效果好、范围大; 缺点:现场因素影响大,适用性不足
强夯法	处理深度主要为5~8 m,软基处理后的地基承载力为100~120 kPa	优点:施工简单、快速、经济、压实度高、应用广泛; 缺点:振动大,对周围建筑有影响,有噪声,不适用于市区
注浆法	适用于深厚软土层,处理深度在60 m以内	优点:有效控制地基变形,适用范围广、处理深度大、效果较好、质量易控制、绿色环保; 缺点:造价偏高、浆液条件有限制
复合地基处理法	适用于处理淤泥、黏土、粉土、砂土和部分素填土等	优点:有效提高地基强度、刚度和承载力,且不需施加预压力、处理效果显著; 缺点:造价偏高、工期较长

根据表2可知,换填法处理的地基最大深度通常不超过3.0 m,本工程的勘查报告显示软土层厚度超过3.0 m,最大超过5.3 m。强夯法处理的加固厚度可达8.0 m,但是对于饱和软土地基,强夯产生的动能进一步破坏结构性软土,重塑后的软土强度降低,强夯后的地基承载力未有效提高。因此,单独采用换填法或强夯法均不能完全

满足软基处理要求。综合考虑换填法和强夯法的优缺点,结合工程经济效益,工程试验区域拟采用换填法和强夯法的联合处理方式进行软基处理试验。

### 2.2 换填法和强夯法原理

换填法的机理主要表现在用良好土体置换表层软土,形成强度较高的表层硬垫层,有效提高

表层地基的承载性能, 并降低表层地基变形量。强夯法加固机理指通过很高的冲击能使土体颗粒移动, 从而将孔隙的气泡、水体迅速排出或压缩, 孔隙体积减小后形成密实度较高的结构。

换填垫层铺设厚度需根据置换软弱土层的厚度、设计荷载值等确定, 要求作用在垫层底面处土的自身重力与附加应力之和不大于软弱下卧层土的承载力特征值。其表达式为:

$$P_z + P_{cz} \leq f_{az} \quad (1)$$

式中:  $P_z$  为置换后垫层底面处的附加压力(kPa);  $P_{cz}$  为垫层底面处土体的自身重力(kPa);  $f_{az}$  为垫层底面处的地基承载力特征值。置换后垫层底面处的附加压力值  $P_z$  可根据软弱下卧层验算公式计算。根据地基土应力扩散原理, 上覆换填良好土层越厚、强度越高, 上部应力扩散到软弱下卧层顶面的应力附加越小, 地基稳定性越好。

### 3 试验方案与实施

#### 3.1 换填材料与主要设备

为充分利用现场条件, 降低软基加固处理成本, 工程的换填材料主要为现场海港港池及航道开挖得到的海砂中砂和块石, 无需外部购买和运输, 节省大量建造成本。根据工程场地不同区域上覆淤泥软弱土层的厚度分布, 强夯前将上覆软弱土层换填为厚度 1.5~3.0 m 的海砂中砂。为确保施工质量, 并以最短的工期完成工程, 采用强夯机、强夯钢锤、载荷试验设备、标准贯入仪、静力触探贯入仪进行施工。

#### 3.2 强夯施工要求

##### 3.2.1 场地要求

强夯垫层法施工工艺需要根据土体性质、夯击功能与有效加固深度等因素综合确定, 因此在强夯施工前需对回填土进行场地平整, 清除回填土表层的植被、建筑垃圾或软弱土层等。另外, 回填土顶面应满足施工设备的安全行走。场平回填土强夯加固目的是通过强夯加固使回填土达到密实, 并作为铁路轨道基础, 从而提高地基承载力。

此外, 设计要求强夯处理范围不小于地基处理深度的 2/3, 即换填区超出基础外边缘不少于 4 m。

#### 3.2.2 加固方案设计

强夯垫层法施工初步方案设计的夯击点以梅花形布置, 点夯 2 遍(图 1), 预计可加固表层软基厚度约 6 m。点夯的布点网度为 6 m×6 m, 采用 2 000 kN·m 的单锤夯击能进行夯击。点夯后夯坑采用海砂、中砂等良好土体回填。夯坑周围的地面未发生过大隆起以及未发生提锤困难时的总次数为每个夯点的夯击总次数。在大规模采用强夯法加固前, 局部区域开展技术方案可行性的现场试验与验证, 点夯 2 遍后进行标准贯入试验确定软基加固效果。结果表明: 6 个测点揭示的软基加固后的地基承载力分别为 135、142、152、148、144 和 167 kPa, 其中部分试验点未满足设计要求, 但与要求设计承载力 150 kPa 相差不大。究其原因主要有: 1) 铁路路基的线路较长, 整个线路的原状土层厚分布不均, 局部软土层厚大, 局部软土层厚小, 回填砂石土压密实度不同; 2) 点夯是间断布设, 通常点夯的夯锤中心地基受力最大, 密实度较好; 边缘受力最少, 密实度较差, 因此测点的随机选择可能位于夯锤边缘, 以致局部测点承载力不满足要求。

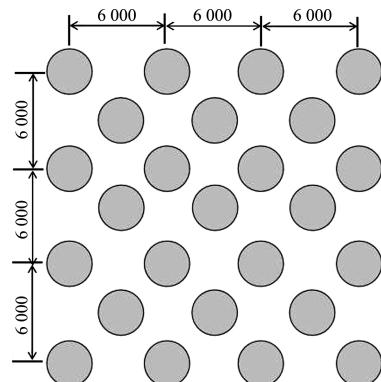


图 1 点夯夯击点布置 (单位: mm)

为解决上述问题, 提出了满夯 1 遍的技术方案并实施。既保证全部测点满足设计要求, 又兼顾现场地基处理操作的便利性, 夯击能的选择是关键。综合研究表明: 2 遍点夯后地基局部点承载力只比

设计值小 10% 左右, 2 次点夯总能量为 4 000 kN·m, 因此预测增加 1 次夯击能为 1 000 kN·m 的满夯可达到设计效果。满夯的夯击方案见图 2, 主夯点间出现隆起的松动区, 需进行满夯, 且夯坑用块石回填。采用 1 000 kN·m 单击夯击能进行满夯夯击, 且夯击锤印相切。点夯 2 遍、满夯 1 遍, 最后 2 遍的平均强夯沉量小于 100 mm 为最终夯击标准。

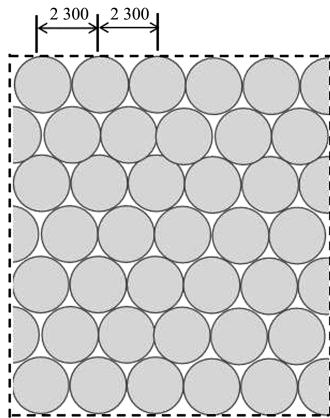


图 2 满夯夯击点布置 (单位: mm)

#### 4 检测结果与分析

目前, 地基承载力检测方法主要有标准贯入法、静力触探法和载荷试验法, 其中标准贯入法和静力触探法属于间接方法, 需借助大量工程经验建立相应的承载力换算公式, 具有检测成本低等优点。而载荷试验方法最为直观可靠, 一般作为其他检测方法的检定手段, 但试验成本高昂。结合本工程实际情况, 并满足规范验收标准, 本次试验段的地基处理效果检测同时采用上述 3 种方法进行验证。

##### 4.1 标贯检测结果

根据 TB 10018—2018《铁路工程地质原位测试规程》<sup>[11]</sup>, 软基处理点夯 2 遍后采用标准贯入试验进行地基承载力评估。将标贯的贯入器竖直打入土层中, 记录累计打入 30 cm 深度的贯入击数  $N$ , 并按公式(2)换算打入 30 cm 的击数  $N$ :

$$N = 30n/\Delta s \quad (2)$$

式中:  $n$  为累计击数;  $\Delta s$  为实际贯入度。

实际工程中, 标准贯入试验已积累大量确定地基承载力的实践资料, 可根据击数  $N$  估计天然

地基容许承载力, 换算地基承载力的经验关系见表 3。

表 3 锤击数与地基承载力对应关系

$N/\text{击}$	3	5	7	9	11	13	15	17
容许承载力/kPa	120	160	200	240	280	320	360	420

本工程采用点夯 2 遍+满夯 1 遍地基处理后进行地基承载力标准贯入试验, 均匀采集 6 个测点, 检测结果见表 4。地基处理后全部测点的地基承载力特征值最小为 208 kPa, 最大为 236 kPa, 且均满足不小于 150 kPa 的设计要求, 表明本次软基加固的处理方案效果良好。

表 4 软基处理后标准贯入检测结果

测点编号	标贯深度/cm	实测锤击数/击	技术要求/kPa	承载力特征值/kPa	评定结果
1#	30	16		222	符合
2#	30	14		208	符合
3#	30	14	$\geq 150$	208	符合
4#	30	18		236	符合
5#	30	16		222	符合
6#	30	18		236	符合

##### 4.2 静力触探检测结果

静力触探原理为试验时以一恒定的贯入速率将圆锥探头通过一系列探杆压入土中, 并按一定深度间距, 根据测得的探头贯入阻力大小间接判定土的物理力学性质。采用双桥探头, 参照 TB 10018—2018《铁路工程地质原位测试规程》表 9.5.16-1 “天然地基基本承载力算表” 确定地基基本承载力。计算结果见表 5, 测点承载力平均值超过 200 kPa, 与标准贯入检测结果相当, 且均满足承载力设计值不少于 150 kPa 的技术要求, 再次说明软基加固技术方案可行。

表 5 软基处理后静力触探检测结果

测点编号	强夯面高程/m	触探面高程/m	技术要求/kPa	测点承载力平均值/kPa
1#	3.77	3.27		226
2#	3.77	3.27		209
3#	3.77	3.27	$\geq 150$	233
4#	3.77	3.27		201
5#	3.77	3.27		232
6#	3.77	3.27		244

### 4.3 载荷试验结果

载荷试验是确定软基加固后承载力最为可靠、认可度最高的检测方法, 也是验证标贯试验、静力触探试验等检测手段准确性的主要方式, 但检测成本相对较高, 耗时较长。因此, 本工程还进行了软土路基加固后的浅层平板载荷试验, 以确定软基加固效果是否满足设计要求。列出3个典型试验点的承载力载荷试验结果, 其中正方形荷载压板尺寸为1.10 m×1.10 m, 压板面积为1.21 m<sup>2</sup>。根据TB 10106—2010《铁路工程地基处理技术规程》<sup>[12]</sup>, 载荷试验的最大加载压力为设计值的2倍, 试验点地基承载力特征值需满足不小于150 kPa的技术要求, 即最大试验荷载为300 kPa(37 t), 压重反力平台提供的反力需大于最大试验荷载的1.2倍, 即平台配重大于44.4 t。

试验点1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>的载荷试验结果见图3, 其荷载沉降曲线均较为光滑, 没有陡降拐点。最大加载至300 kPa时, 试验点1<sup>#</sup>的最大沉降为16.66 mm, 卸载回弹值为8.77 mm, 残余沉降值为7.89 mm,  $s/b = 0.01$ ( $s$ 为沉降量,  $b$ 为压板尺寸)所对应的压力为203 kPa; 试验点2<sup>#</sup>的最大沉降为16.57 mm, 卸载回弹值为9.06 mm, 残余沉降值为7.51 mm,  $s/b = 0.01$ 所对应的压力为202 kPa; 试验点3<sup>#</sup>的最大沉降为16.70 mm, 卸载回弹值为9.17 mm, 残余沉降值为7.53 mm,  $s/b = 0.01$ 所对应的压力为202 kPa。综上, 3个试验点的地基承载力特征值评定为150 kPa, 满足设计要求。

此外, 工程软基加固后还抽取了部分试验段进行平板载荷试验, 均采用慢速维持荷载法, 极差不超过平均值的30%, 取平均值为地基承载力特征值, 地基容许承载力为150 kPa达到设计要求。综合标准贯入试验、静力触探试验和载荷试验结果可知, 采用换填和强夯地基处理方式能够达到地基承载力不少于150 kPa的设计要求, 证明地基处理效果良好。

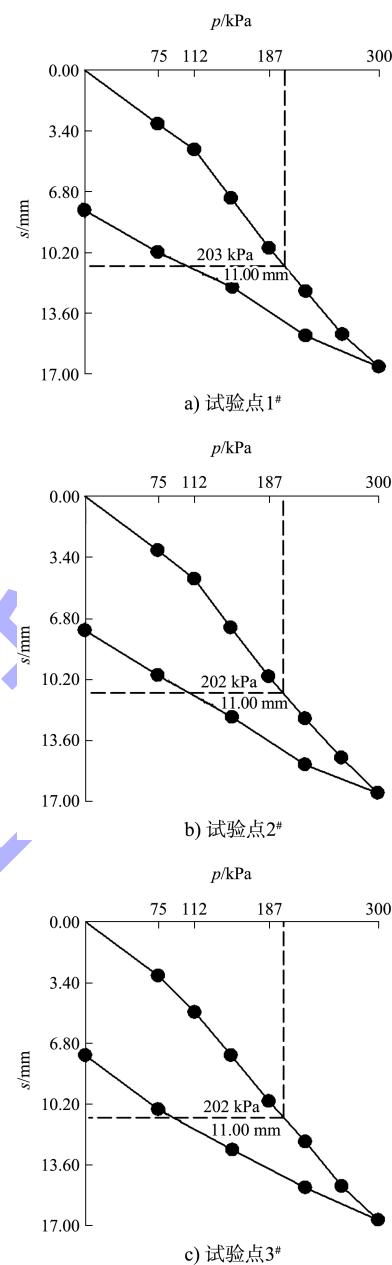


图3 压力-沉降量曲线

### 4.4 地基加固流程

结合上述局部区段的软基加固试验效果, 总结工程后续大规模应用的软基加固方案, 其中换填与强夯联合加固的施工流程主要为: 换填表层软弱土→测量放线→场地平整→第1遍强夯→回填中砂→第2遍强夯→回填中砂→满夯→试验检测。具体施工次序为: 1) 强夯场地范围大于铁路线外围轮廓线, 且每边外伸长度设计为处理深度的1/2~2/3, 并不小于3m; 2) 标明第1遍夯点位置, 对每一个夯点进行标记, 并测量高程; 3) 强

夯起重机就位,对准夯击加固点位置,夯击后通过推土机用换填材料填平夯坑,视土体的超孔隙水压力消散情况进行第2遍施工;4)标记第2遍夯击点位置,开展第2遍强夯施工;5)强夯后再次填平夯坑,待前1遍强夯后土中孔隙水压力消散后,再逐次完成全部夯数。

## 5 结论

1) 工程建设场地存在超过6 m的上覆软弱土层时,不宜采用单一软基处理方法,建议采用复合加固手段更为经济合理。

2) 强夯垫层法只采用点夯2遍工艺不一定满足设计要求,通过点夯2遍加满夯1遍的技术方案可有效加固6 m以下软土路基,承载力检测均能满足设计要求。

3) 采用强夯法与换填法相结合的复合方法处理软基可有效避免单一加固技术所面临成本较高、适用范围小、加固效果不明显等难题。

## 参考文献:

- [1] 张季超,陈一平,蓝维,等.新编地基处理技术与工程实践[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] 黄绍铭,高大钊.软土地基与地下工程[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3] 盛利,袁方龙.港口堆场复杂场地地基强夯和插板强夯加固效果对比试验研究[J].中国港湾建设,2020,40(12):40-43.
- [4] 张哲,张桂平,马晓雪,等.滨州港软基处理相关问题及解决措施[J].港工技术,2021,58(6):100-103.
- [5] 张馨心,杨晓东,马文灿.运用真空预压技术对深层软土地基进行设计处理[J].中国水运(下半月),2021,21(11):161-163.
- [6] 曾华健,李军,梅军,等.真空降水联合不同强夯工艺在仓储软土地基处理中的应用[J].地基处理,2021(1):64-70.
- [7] 刘勇文,胡畔,马力.利用粉煤灰-矿渣地聚合物的软基淤泥改良[J].水运工程,2022(4):30-36.
- [8] 苑佳,周新雨.软土地基处理的几种方法综述[J].能源与环保,2021,43(1):39-42.
- [9] 乔伟刚,刘健.海港软土工程地基处理后综合检测方法分析[J].水运工程,2014(9):150-152,158.
- [10] 张林,郭嫣嫣.静力触探技术(CPT)在砂性地基处理验收检测中的应用[J].水运工程,2022(5):191-197.
- [11] 中铁第四勘察设计院集团有限公司.铁路工程地质原位测试规程:TB 10018—2018[S].北京:中国铁道出版社,2018.
- [12] 中铁二院工程集团有限责任公司.铁路工程地基处理技术规程:TB 10106—2010[S].北京:中国铁道出版社,2010.

(本文编辑 赵娟)

(上接第184页)

## 参考文献:

- [1] KJELLMAN W. Consolidation of clay by means of atmospheric pressure [C]// Proc. Conference on soil stabilization. Boston: [s. n.], 1952: 258-263.
- [2] HALTON G R, LOUGHNEY R W, WINTER E. Vacuum stabilization of subsoil beneath runway extension at philadelphia International airport[C]// Proc. of IV ICSMFE. Montreal: [s. n.], 1965: 61-65.
- [3] 吴跃东,惠炜.真空预压法中开泵率对加固效果的影响[J].地下空间与工程学报,2018,14(4):1077-1082.
- [4] 董志良,郑新亮,戚国庆.软土地基无砂垫层预压排水固结法:CN1837498[P].2006-09-27.
- [5] 夏玉斌,陈允进.直排式真空预压法加固软土地基的试验与研究[J].工程地质学报,2010,18(3):376-384.

- [6] 彭勘,刘志明,李琦梦,等.软土地基无砂垫层真空预压联合水袋堆载加固装置及方法:CN105780754A[P].2016-07-20.
- [7] 王海建,杨建贵,曹健勇,等.无砂垫层真空预压联合水袋堆载法加固超软地基应用研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(1):66-71.
- [8] 河海大学,上海港湾基础建设(集团)有限公司.吹填土地基处理技术规范:GB/T 51064—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [9] 胡建斌,潘曼,李维安,等.增压式真空预压法加固海相吹填土的现场试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(9):124-129.

(本文编辑 赵娟)