

· 地基与基础 ·



直排直连真空联合水袋预压法在软基处理中的创新性应用

罗建平，余立志，李斌，黄剑波，余细强

(保利长大工程有限公司，广东 广州 510062)

摘要：针对直排真空预压联合堆载传统堆载料能耗高、生态环境被破坏及污染隐患、成本较高、堆载料运输受限、施工工期较长等问题，采用直排真空预压联合水袋堆载法进行监测检测试验，使得实测总沉降量、残余沉降量、固结度、沉降速率、孔隙水压力等指标均满足设计技术要求。结果表明：真空预压联合水袋堆载施工工艺简单便捷、绿色环保、性能安全可靠、施工工期较短、成本较低，取得了良好的经济和社会效益，对于促进软基处理领域发展进步有重要的意义和价值。

关键词：真空预压；直排；节能环保；真空联合水袋堆载预压

中图分类号：U 651

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)04-0180-05

Innovative application of direct drainage and direct connection vacuum combined with water bag preloading in soft foundation treatment

LUO Jianping, YU Lizhi, LI Bin, HUANG Jianbo, YU Xiqiang

(Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510062, China)

Abstract: The traditional stacking materials with direct drainage vacuum preloading face the problems of high energy consumption, ecological environment damage and potential pollution, high costs, limited transportation of stacking materials, and a long construction period. To solve these problems, this paper adopts the method of direct drainage vacuum preloading combined with water bag stacking for the monitoring and detection tests on site. The measured total settlement, residual settlement, degree of consolidation, settlement rate, pore water pressure, and other indicators meet the design requirements. The results show that vacuum preloading combined with water bag stacking has the advantages of simple construction processes, environmental protection, safe and reliable performance, a short construction period, and low costs. It has achieved good economic and social benefits, which is of great significance and value for promoting the development and progress of soft foundation treatment.

Keywords: vacuum preloading; direct drainage; energy conservation and environmental protection; vacuum preloading combined water bag stacking

真空预压法最早由瑞典 Kjellman^[1]提出采用真空预压原理加快软弱土地基排水固结的工艺，经过几十年的演变发展，地基中最大的真空度最早是由 1958 年美国抽真空设备创造的 50 kPa 膜下压力^[2]，目前吴跃东等^[3]已能将膜下真空压力稳定在 90 kPa，真空压力不断提高对真空预压工艺的处理效果起到了保障作用。国内早在 2006 年由

董志良等^[4]研发了软土地基无砂垫层预压排水固结法，在此基础上夏玉斌等^[5]解决了取消砂垫层后软基水平方向排水的难题，使用水平管路连接排水板取代中粗砂水平排水垫层，实现了在无砂的情况下使用真空预压法，提高真空压力竖向传递效率，施工不再受砂料供应的限制，降低了工艺成本。为了加快处理速度减少抽真空时间，彭

收稿日期：2022-07-01

作者简介：罗建平（1984—），男，工程师，从事港口与航道、市政公用工程管理工作。

勘等^[6]采用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减少了传统堆载料资源使用, 王海建等^[7]进行直排真空预压与真空联合水袋堆载预压的纵向对比验证, 但并未解决场地实际吹填高程、总沉降量、实际使用高程、设计预压荷载的有机结合及辩证统一关系。因此本文着重对真空联合堆载水袋堆载与传统料堆载的施工条件、工效、经济及社会成本效益的价值进行横向比较论述。

1 真空预压原理

真空联合堆载预压的原理是在真空预压孔隙水降低、孔压消散转化为有效应力的基础上, 随着堆载的进行增加一正向压力, 两者共同作用下加快土体内孔隙水的排出, 从而加快土体固结速度, 缩短软基处理的时间。

在常见的真空联合堆载预压工艺中, 堆载料一般为开山土石或海砂等资源, 获得大量的砂或开山土石资源的成本较高, 对自然生态造成破坏, 并在运输和施工堆载料过程中产生一定的扬尘噪声等环境污染。

为解决上述问题, 采用堆载方式或增加软基处理区域内正应力等方式尝试优化: 1)采用水袋堆载预压。通常软基处理区域沿海或沿河可就地取材, 水袋可充盈海水、河水或地下水, 卸载时直接将其排放入海或入河, 操作简单方便、成本低, 且不会对生态环境造成污染, 高压水袋还可重复使用。2)采用对软基土体增压的方式。在软基处理区域内打设增压管, 间歇性地对软基增压, 短时间内增加深层土体的超孔隙水压力, 加速土体排水固结, 同时形成新的水平向裂缝, 即水平排水通道, 使孔隙水在该裂缝通道内流动, 加速土体固结从而缩短软基加固处理时间。

高压水袋主要规格有 20.0 m(长)×10.0 m(宽)×2.5 m(高)、10.0 m×5.0 m×2.5 m, 充水介质可为海水或河水, 充盈速度约为 60 m³/h, 其中水袋充盈至 2 m 高时变形稳定性最好。

水袋堆载或增压固结的工艺选择应从场地平

均高程角度考虑其适用范围, 综合考虑达到设计固结度时的压缩沉降量与堆载料的堆载高度。吹填场地实际平均高程与设计高程通常不相等, 在尽量考虑场内土方平衡的前提下, 减少场内土方采购及外运。吹填场地设计高程^[8]可按下式计算:

$$H_R = H_d + \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad (1)$$

式中: H_R 为吹填场地设计高程, m; H_d 为吹填场地使用高程, m; Δh_1 为吹填土层的压缩量 (S) 及原地基沉降量 (S_d) 之和, S 、 S_d 根据工程经验确定, m; Δh_2 为吹填土因工后沉降而需增加的超填高度, m, 根据上部结构和处理方法按计算沉降量或经验确定。

假设现场场地的吹填实际平均高程为 H_c , 1)当 $H_c \geq H_R$ 时, 代表场地实际平均高程大于或等于设计高程, 场内挖方高度为 $\Delta h = H_c - H_R$, 因挖除的土通常是不良材料, 不作为堆载料考虑, 当采用真空联合堆载工艺进行处理时, 宜先将场地平整至 H_R 高程再加水袋水载预压, 不宜采用堆载土石方料堆载, 以免反复填挖和运输造成成本增加和资源浪费。2)当 $H_c < H_R$ 时, 代表场地实际平均高程小于设计高程, 场内填方高度 $\Delta h = H_R - H_c$, 假设设计堆载料高度为 H_s , 采用真空联合堆载工艺进行处理时, 当 $H_s \geq \Delta h$, 宜使用填筑 Δh 厚的开山土石或粉细砂等堆载料加上等同于 $H_s - \Delta h$ 堆载荷载的水袋水载荷堆载, 此时 Δh 堆载料将成为永久地基土的一部分, 填筑的堆载料应满足压实度等设计要求; 当 $H_s < \Delta h$, 可按 H_s 高度填筑设计堆载料, 无须外加水袋预压。

采用增压管进行间歇增压方式对土体内进行水平增压相当于超载预压, 也相当于真空联合堆载预压的处理效果, 大幅缩短软基处理时间, 胡建斌等^[9]进行增压式真空预压法加固海相吹填土的现场试验研究, 得出了增压式真空预压法可增加一定土层的沉降固结度和缩短前期处理的时间, 但增压正压力后是否会消减真空负压力, 从而延迟预压时间和影响预压效果, 将是未来研究的方向。

2 工程概况

工程位于广东省阳江市阳江港吉树作业区。场地已基本形成陆域，场地内高程约为 3.7~7.0 m，高程系统为当地理论最低潮面。陆域后场拟建区域为吹填软土，需经过地基处理后才能达到场地的

使用要求。

工程软基处理区域约 6.58 万 m²。场地划分为 A、B 区两区，A 区采用真空预压处理方式，B 区采用真空联合堆载预压处理方式，且 B 区分为 B₁、B₂、B₃ 三区，地基处理指标要求见表 1。

表 1 地基处理指标要求

区域	处理方法	处理面积/万 m ²	使用荷载/kPa	工后残余沉降量/cm	预压荷载/kPa	卸载条件	交工面高程/m	竖向排水通管道	水平排水通道
A	真空预压	1.65	40	≤30	85	1)按实测沉降曲线推算的固结度≥80%; 2)恒定真空度 85 kPa 时间≥60 d; 3)推算场地残余沉降数量≤300 mm; 4)实测地面沉降速率连续 10 d 平均沉降量≤2 mm/d	4.58~4.65	B 型塑料排水板正方形布置, 间隔 0.8 m 打设深度 18 m	排水板与钢丝软管连接成支管, 支管与主管连接方式见图 1
B ₁	真空	1.64	50	≤30					
B ₂	联合堆载	1.64	80	≤30	115				
B ₃	预压	1.64	80	≤30					

试验区地质情况如下：

①素填土：层顶高程 4.68~7.45 m，层厚 2.40~6.30 m，平均 3.32 m。灰色、灰黄色，松散，湿-饱和，主要由淤泥、淤泥类土等吹填而成，含少量砂土及块径约 2~3 cm 的贝壳。

②₁ 淤泥(Q₄^m)：层顶高程-2.39~4.45 m，层顶埋深 0.00~6.30 m，层厚 3.00~19.00 m，平均 11.99 m。深灰色，流塑-软塑，味臭，含较多粉砂及少量腐殖质，局部为淤泥质土。

②₄ 淤泥质黏土(Q₄^{mc})：层顶高程-9.88~-4.57 m，层顶埋深 9.50~15.00 m，层厚 2.20~11.70 m，平均 6.54 m。深灰色，软塑-可塑状，局部含多量粉砂和少量腐殖质。

③砂质黏性土：层顶高程-20.59~-5.28 m，层顶埋深 5.00~24.00 m，层厚 1.10~16.00 m，平

均 7.70 m。棕红色、黄褐色为主，多为硬塑-坚硬状，为花岗岩风化残积而成，细粒土状，遇水易软化、崩解。各土层的常规物理力学指标见表 2。

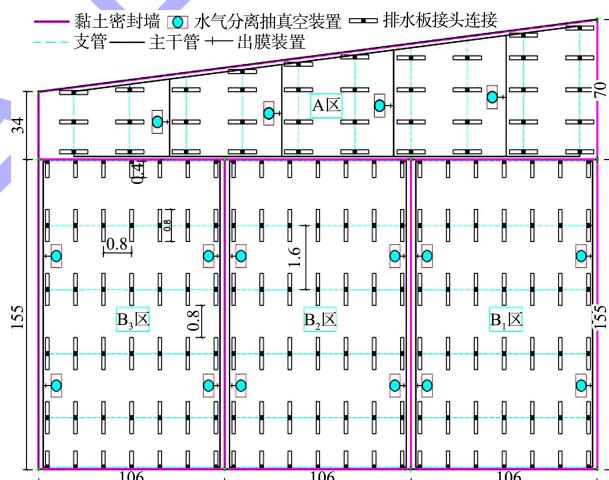


图 1 软基处理管板连接 (单位: m)

表 2 土体物理力学指标

土层编号	岩土名称	含水率 w/%	土粒比重 G _s	湿密度 ρ _w /g·cm ⁻³	干密度 ρ _d /g·cm ⁻³	饱和度 S _r	孔隙比 e	孔隙率 n/%	液限 w _L /%	塑限 w _p /%	塑性指数 I _p	液性指数 I _L
①	素填土吹填	70.3	2.64	1.53	0.90	95.7	1.939	66.0	52.0	31.4	20.6	1.89
② ₁	淤泥质土	54.4	2.66	1.65	1.07	96.0	1.506	59.7	46.6	28.4	18.2	1.41
② ₄	淤泥质黏土	48.4	2.67	1.69	1.14	95.2	1.355	57.3	44.1	26.9	17.2	1.24
③	砂质黏性土	21.1	2.68	1.89	1.56	78.9	0.721	41.7	32.2	19.8	12.4	0.13

根据地质勘察报告和太沙基一维固结理论，采用分层总和法计算竖向总沉降量，按 $e-p$ 曲线计算最终竖向沉降量，得出的理论总压缩量为 1.3 m，

当 $H_c \geq H_R$ 时，可采用先平整场地至设计使用高程-0.5 m 后，打设排水板，并与抽真空管网装置连接，铺设密封膜其上是一层土工垫，在土工垫上

先回填 0.5 m 黏土, 再充水 2 m 高水袋堆载, 地基表层的应力达到设计预压力 115 kPa, 其中真空压力约为 85 kPa, 0.5 m 厚黏性土压力约为 10 kPa, 水袋堆载压力约为 20 kPa, 见图 2。



图 2 真空聯合水袋堆载预压实景

水袋施工工艺流程为: 预压面清理→定位布展→分级充水加载→日常巡查→卸载打包, 见图 3。真空预压联合水袋堆载与传统堆载施工对比见表 3。



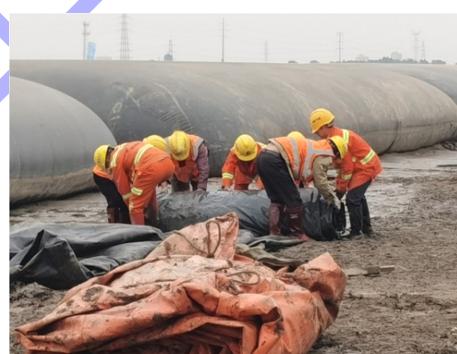
a) 定位布展



b) 充水加载



c) 日常巡查



d) 卸载打包

图 3 水袋施工流程

表 3 真空预压联合水袋堆载与传统堆载施工对比

堆载方式	施工条件	工效	经济成本/(元·m ⁻²)	社会效益及其他
传统堆载	堆载砂土充足; 非雨天, 道路通行良好; 同一工作面只能循环作业	堆载土方约 5 万 m ³ ; 运输车辆 2 000 车(约 25 m ³ /车) 运输时间 24 d(14 台, 12 h 工作制, 每趟装卸往返运输 2 h) 卸载方式及时间基本等同堆载	78(含土方及运输、摊铺平整、挖除弃方)	传统方案认知接受度高可靠性高; 车辆频繁往返运输和交叉作业, 噪声、扬尘、尾气污染环境; 环保要求取/弃土难度加大, 土成本上升; 受雨天及交通管制等影响工期
水袋堆载	水源充足; 需电源或小发电机; 所有工作面可以同时作业	水荷载约 10 万 m ³ ; 水泵数量 14 台(60 m ³ /h); 加载时间 5 d(24 h 工作制); 卸载方式及时间理论上可同时全部开启卸载, 20 m×10 m×2 m 水袋, 8 h 卸完	36(含水袋摊铺、注水、 卸载、打包, 水袋按 3 个月内的租赁计)	新工艺认知度和可靠性需要时间验证; 绿色环保、性能安全可靠、工艺简单; 通常软基处理附近水源丰富取水方便; 施工工具简单仅为水泵、水管、水袋; 需加强密封水袋日常巡查和安全检修

注: 工效按长 318、宽 155 m、等载 1 m 传统堆载料计, 经济成本按 20 kPa 载荷计。

3 监测与检测

真空预压场地施工完成后对场地进行监测和检测, 监测点布置见图 4。对 B_3 区沉降观测点的沉降量、固结度和孔隙水压力测量结果见表 4。

由图 4 和表 4、5 可知, 以上监测检测效果均达到了设计要求的卸载条件, 通过进一步平板载荷、十字板剪切, 静力触探试验检测地基承载力均满足设计要求, 加固前后吹填土层的含水率、孔隙比、液限指数见表 6。

根据表 6 数据, 表层吹填土的含水率由 70.3% 下降到 30.5%, 下降比例 56.6%; 孔隙比由 1.939 下降至 0.898, 下降比例 53.7% 左右; 液限指数下降比例约 90.5%, 且都小于 1。综上, 真空预压联合水袋堆载达到了设计目标, 处理效果良好。

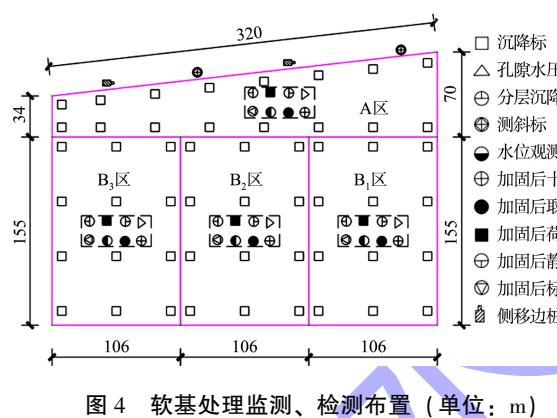


图 4 软基处理监测、检测布置 (单位: m)

表 4 B_3 区沉降量和固结度

测点编号	实测总沉降量/mm	最终沉降量/mm	残余沉降量/mm	固结度/%	最后 10 d 沉降速率/(mm·d ⁻¹)
C ₁	685.9	850.7	164.8	80.6	-1.0
C ₂	548.6	635.1	86.5	86.4	0.5
C ₃	753.4	796.0	42.6	94.6	0.1
C ₄	636.7	679.5	42.8	93.7	0.6
C ₅	891.2	1 097.9	206.7	81.1	0.0
C ₆	849.6	1 037.3	187.7	81.9	1.0
C ₇	1 135.9	1 186.4	50.5	95.7	-0.2
C ₈	564.1	626.8	62.7	90.0	0.5
C ₉	693.4	864.3	170.9	80.2	-1.0
C ₁₀	778.7	940.2	161.5	82.8	-0.1
C ₁₁	665.1	755.5	90.4	88.0	0.3
C ₁₂	497.3	595.2	97.9	83.6	0.1

表 5 B_3 区孔隙水压力观测成果

传感器编号	埋设高程/m	原始孔压/kPa	最终孔压/kPa	孔压消散值/kPa
04832	-2	54.74	7.95	-46.79
04785	-5	51.66	22.38	-29.29
041075	-8	82.93	49.01	-33.92
04962	-11	94.45	75.16	-19.28
041062	-14	127.98	105.32	-22.66

注: 各区域分层、水位测点与该区域孔压测点埋设及监测时间相同。

表 6 加固前后吹填土体的主要土工力学指标

土样编号	取土深度/m	含水率 w/%		变化率/%	孔隙比 e		变化率/%	液限指数 I_L		变化率/%
		加固前	加固后		加固前	加固后		加固前	加固后	
C ₃₋₁	1.5	70.3	30.5	-56.6	1.939	0.898	-53.7	1.89	0.18	-90.5
C ₃₋₂	3.0	69.3	27.0	-61.0	1.991	0.830	-58.3	1.91	0.20	-89.5
C ₃₋₃	4.5	68.7	25.3	-63.2	1.941	0.796	-59.0	1.83	0.15	-91.8

4 结语

1) 选用直排真空预压联合水袋堆载应将现场实际吹填平均场区高程、设计使用高程、预沉降量与设计预压荷载相结合, 充分减少资源浪费, 达到资源的合理配置。

2) 相比于传统运输堆载料加载, 直排真空预压联合水袋堆载加载至满载高度的衔接时间短、

效率高, 水袋卸载的速度快、工期短。

3) 真空预压联合水袋堆载预压工艺简单, 受限制条件少, 水袋可重复使用, 河海水源丰富, 成本较低, 相比传统堆载料堆载, 无污染、无扬尘、无噪声, 且无须使用传统开山土石或砂资源, 生态环保效益明显, 值得推广。

(下转第 190 页)