

· 地基与基础 ·



静动力排水固结法处理吹填海相 泥沙软基试验研究

邓安华^{1,2,3}, 孙振涛⁴, 张磊^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 4. 长江武汉航道局, 湖北 武汉 430040)

摘要: 为加固吹填海相泥沙形成的软土地基, 在汕头市东海岸围海造地的吹填区域内, 进行堆载预压的静态排水固结法、强夯施工的动力排水固结法等试验, 采用“降水+堆载+强夯”的静动力排水固结法加固吹填海相泥沙形成的软土地基。通过现场测试, 研究施工过程中各层地基沉降、水位和孔隙水压力、土体位移变化情况, 对处理前后的地基进行土工试验和原位测试研究, 并验证该方法对海相泥沙的处理效果。研究表明, 静动力排水固结法显著提高吹填软土地基的承载特性, 可广泛应用于围海造地软基加固工程中。

关键词: 围海造地; 静动力排水固结法; 吹填海相泥沙; 软基加固

中图分类号: TU447; U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0162-06

Treatment of hydraulic fill marine soft soil ground using static and dynamic drainage consolidation method

DENG Anhua^{1,2,3}, SUN Zhentao⁴, ZHANG Lei^{1,2,3}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China;

3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of
Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China; 4. Changjiang Wuhan Waterway Bureau, Wuhan 430040, China)

Abstract: To reinforce the soft soil foundation formed by dredged and filled marine sediment, experiments such as static drainage consolidation methods with surcharge preloading, and dynamic drainage consolidation methods with dynamic compaction construction are conducted in the backfill area of the coastal reclamation in Shantou City. The static-dynamic drainage consolidation method of “dewatering + surcharge loading + dynamic compaction” is used to reinforce soft soil foundation formed by marine silt and sand backfill. Through field tests, the settlement of various foundation layers, water level and pore water pressure, and soil displacement changes during construction are studied. Geotechnical tests and in-situ tests are conducted on the foundation before and after treatment, verifying the treatment effect of this method on marine silt and sand. The research shows that this static-dynamic drainage consolidation method can significantly improve the bearing capacity characteristics of the backfilled soft soil foundation, and can be widely used in soft foundation reinforcement projects for land reclamation from the sea.

Keywords: land reclamation; static-dynamic drainage consolidation method; marine silt and sand backfill; soft foundation reinforcement

吹填造陆不仅能解决沿海城市快速发展带来的土地资源不足的问题, 也可满足疏浚航道和港

池抛泥的需求, 在沿海地区工程建设中应用广泛。但吹填场地多为超软土地基, 处理难度大, 单一

收稿日期: 2023-08-08

作者简介: 邓安华 (1972—), 男, 高级工程师, 从事水运工程、水利水电工程施工技术管理工作。

软基处理方法难以适应吹填造陆工程。

静动力排水固结法可充分发挥各自优势,具有工艺简单、固结速度快等优点,在工程应用和科研工作中逐渐得到重视。白冰等^[1-2]在大量试验研究的基础上,建立一个冲击荷载作用下孔隙水压力的计算模式,并阐述了静动结合排水固结法处理吹填软土的机理和效果;张小龙等^[3]发现深厚淤泥软土在真空负压、超载正压和动力冲击三者优化组合作用下,主固结沉降可在短时间内完成,且地表吹填土在动力冲击下形成超固结的硬壳层;周顺万等^[4]在围堰吹填砂场地地基处理中,采用轻型井点降水联合强夯法进行处理,取得了较好的加固效果;张大军等^[5]研究竖向排水体系对超软土地基静动力排水固结法加固效果的影响;李彰明等^[6]以大型淤泥地基处理工程为背景,确定静动力排水固结法最佳冲击能,并建立该法软土地基最佳冲击能理论模型。然而,这些研究大多基于理论或室内试验分析加固机理和效果,采用静动力排水固结法现场加固过程中的沉降、孔隙水压力等关键参数和加固效果的系统性研究相对缺乏。

本文采用“降水+堆载+强夯”的静动力排水固结法进行吹填海相泥沙形成的超软土地基加固处理,以静载作用为基础,进行反复的动力加载,形成静动叠加压力,不断提高孔隙水压力,并在与之配套的降排水条件下,加速超孔隙水压力的消散,使地基抗剪强度持续增大,从而提高吹填场地的加固效果。针对该方法进行现场试验研究,分析探讨该方法处理吹填海相泥沙的加固效果。

1 试验概况

试验场地位于某围海造地工程,吹填物料主要来源于海相泥沙,具有含水量高、厚度不一、强度低的超软松散性质。为研究动力排水固结法处理海相泥沙的关键工艺参数和处理效果,开展现场原位试验。

1.1 试验场地地层

本试验场地地层以吹填的砂层、淤泥及淤泥质土为主,处理深度约 20 m 的范围内,地层自上而下主要分为 3 层:①₂吹填细砂层:细砂混有少量淤泥、砾砂,稍密、渗透性大,中等-严重液化;②₁淤泥层:淤泥夹有细砂,流塑、饱和,高压缩性;④₁淤泥质土层:淤泥质土夹有细砂、粗砂,流塑、饱和,高压缩性。深度约 20 m 以下地层为黏土及中粗砂层,地基承载力特征值大于 140 kPa,工程地质性质较好。

1.2 试验过程

首先进行降排水系统施工,通过两级堆载形成静力加载,每级堆载后通过强夯施加动力荷载,形成动静联合加载,根据监测和检测结果,沉降稳定且土体指标满足要求后卸载。

按照 20 m×20 m 方格网进行高程测量工作,布设监测设备,进行原位试验。试验过程主要包括:塑料排水板打设——截水井、降水井及降水施工——堆载施工——强夯施工——卸载。试验关键参数采用理论计算和工程经验相结合的方法选取,试验过程工艺参数见表 1。

表 1 试验过程工艺参数设计

项目	工艺参数
塑料排水板	采用 B 形塑料排水板,间距 1 m×1 m,板底穿过淤泥质土层底±0.5 m,平均深度为 20.5 m
降水管井	井管材料为 φ300 mm 波纹管,降水井间距 28 m,井口高出堆载面 0.3 m,长 8.5~13.0 m。管井井身按照间距 20 cm 开孔,共 5 排,管井井壁回填 0.1 m 厚中粗砂作为滤水层;堆载前开始降水,碾压完成且沉降稳定后停止降水施工
堆载	两级堆载,第 1 级堆载厚度为 1 m,第 2 级堆载厚度为 2 m
强夯	第 1 级堆载完成进行普夯及第 1、2 遍点夯施工,第 2 级堆载完成后再进行第 3、4 遍点夯施工,最后进行满夯施工。1)普夯单击能 800~1 200 kN·m,每点 2~3 击;2)第 1 遍点夯单击能 1 500~2 500 kN·m,每点 6~8 击,7 m×7 m 正方形布设;3)第 2 遍点夯单击能 2 500~3 500 kN·m,每点 8~10 击,7 m×7 m 正方形布设;4)第 3、4 遍点夯单击能 1 500~2 000 kN·m,每点 6~8 击,7 m×7 m 正方形布设,与上一遍夯点间隔跳打;5)满夯单击能 800~1 200 kN·m,每点 2 击,1/4 锤印搭接
卸载	强夯完成且沉井稳定后移除上层堆载

1.3 监测与检测方法

1.3.1 监测方法

监测内容包含沉降监测、水位监测、孔隙水压力监测、位移监测。

沉降监测分为表层沉降监测和分层沉降监测。表层沉降监测采用几何水准测量法，表层沉降板沿地基处理中心线及两侧每隔 50 m 间距布置 1 个，共布设 9 个。分层沉降监测可以测试地基土不同深度土体的压缩程度，通过埋设分层沉降系统实现。分层沉降监测系统主要由电磁式沉降仪、沉降管、沉降磁环及其他配套设备组成，沿道路中线 50 m 间距布设 3 个。

试验区布置 3 个水位孔，采用电测水位计进行水位监测。

孔隙水压力采用孔隙水压力计(简称孔压计)进行监测。孔隙水压力计沿道路中线 50 m 间距布设 3 个点位，每个点位中埋设 3 个孔隙水压力计。

位移监测指土体水平位移监测。通过埋设位移边桩，2 d/次进行测量的方式进行水平位移监测。

1.3.2 检测方法

检测方法包含土工试验、原位测试。

土工试验内容包括：常规物理力学试验、淤泥(淤泥质土)以上液化砂层颗粒分析试验、密实度试验。根据预压前后土质变化情况，判断地基处理效果，并为卸载时间提供依据。

原位测试包含标准贯入试验、静力触探试验、十字板剪切试验、载荷试验等。

2 试验结果与分析

2.1 沉降监测结果与分析

2.1.1 表层沉降检测结果

表层沉降观测共 9 组数据，其中未包括塑料排水板施工沉降量 0.22 m。试验区表层沉降曲线见图 1。

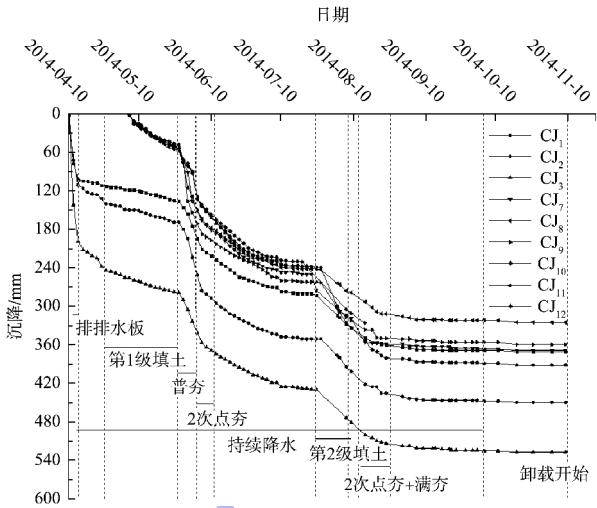


图 1 试验区表层沉降-时间曲线

由图 1 可知施加荷载对地基沉降的影响显著，沉降主要发生在插板、强夯、堆载施工期间。3 个沉降板数据完整点沉降量分别为 590、669、747 mm，CJ₇~CJ₁₂(除去 CJ₁₀、CJ₁₂ 数据中断外)共计 4 个测点，监测期间沉降均值为 361 mm，加上前期沉降量 394 mm(排水板施工期间沉降量 220 mm，排水板施工后至测点设置前已完成沉降量 174 mm)，累计各测点完成总沉降量均值为 755 mm，与数据完整点数据接近。7 个表层沉降监测点恒载后期沉降速率最大为 0.14 mm/d，最小为 0.07 mm/d，平均为 0.09 mm/d，满足连续 10 d 沉降不大于 1 mm/d 的沉降速率控制要求，沉降已稳定。

2.1.2 分层沉降监测结果与分析

分层沉降观测共 3 组数据。在排水板施工后，各孔的累积压缩量见表 2。

表 2 试验区分层沉降监测

位置	累积测点间压缩量/mm		
	2-FC ₁	2-FC ₂	2-FC ₃
磁环 1~2	28.5	55.0	58.5
磁环 2~3	54.0	48.5	63.5
磁环 3~4	86.5	39.5	33.0
磁环 4~5	59.0	42.0	35.5
磁环 5~6	39.0	—	—
累积压缩量/mm	267.0	185.0	190.5
沉降环埋设 高程/m	0.925	0.925	0.840
	-1.075	-1.075	-1.983
	-4.075	-4.075	-5.111
	-7.075	-7.075	-9.084
	-10.075	-10.075	-13.763
	-13.075	-13.075	

2-FC₁ 中测点间磁环 3~4、5~6 位于②₁ 层淤泥中,压缩量分别为 86.5、39.0 mm,对应压缩率分别为 2.88%、1.30%;2-FC₂ 与 2-FC₃ 中测点间磁环 2~3、4~5 位于②₁ 层淤泥中,磁环 2~3 层压缩量分别为 48.5、63.5 mm,对应压缩率分别为 1.62%、2.03%;磁环 4~5 层压缩量分别为 42.0、35.5 mm,对应压缩率分别为 1.40%、0.76%。

2.2 水位监测结果与分析

试验区 3 个水位孔编号为 SW₁、SW₂、SW₃,每个水位孔中埋设 3 个水位管,其中,1、2 号水位管处于吹砂层中;3 号水位管埋设较深,位于淤泥层中,其所处地下水位属于深层水,因此其水位受施工过程的影响较大。其中 SW₁ 水位变化见图 2,SW₂、SW₃ 类似。

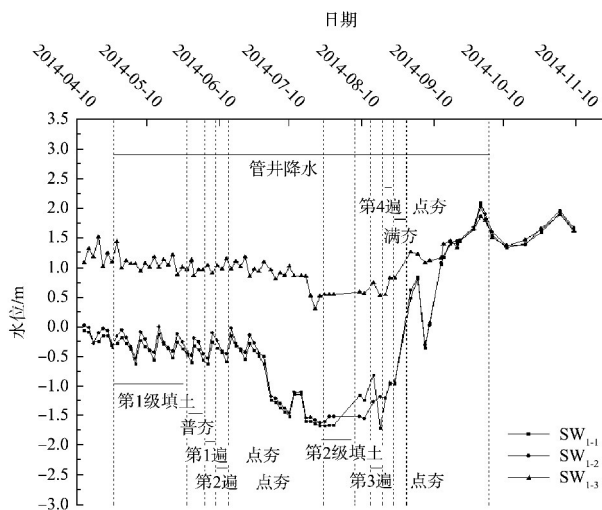


图2 SW₁ 孔水位-时间曲线

根据测量结果,3 个水位观测孔中的 1、2 号水位管内水位明显低于 3 号水位管,原因为 3 号水位管埋设较深,主要受承压水影响。1、2 号水位管内水位施工期间维持约 -2.5 ~ -1.5 m,主要由于采用管井降水方案,人为将场地内水位降低了 2~3 m,增加预压荷载约 20~30 kPa,且有效排除了淤泥层中的水流。

2.3 孔隙水压力监测结果与分析

试验区 3 个孔隙水压力监测点位,分别为 K₁、K₂、K₃,每个点位中埋设 3 个孔隙水压力计,其中,K₂ 号孔隙水压力变化见图 3,其余类同。

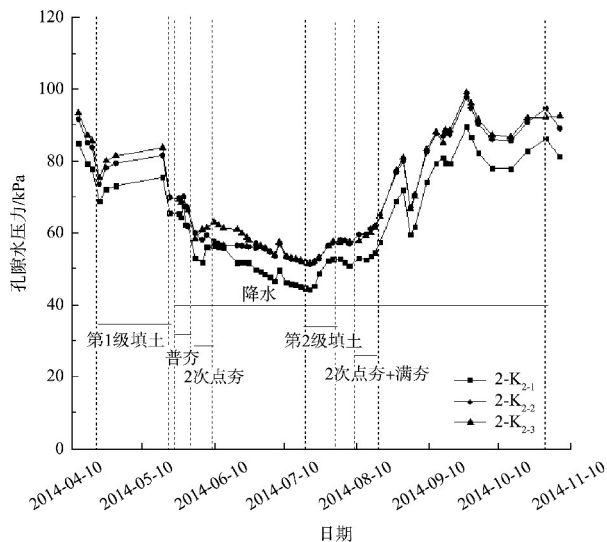


图3 K₂ 号孔隙水压力变化曲线

根据监测结果,试验区在强夯、堆载期间恒载增加,由于进行管井降水,孔隙水压力增加较小,强夯施工完成后期的恒载期间,受降雨影响,场地水位有所升高,孔隙水压力总体呈增大趋势。

2.4 位移监测结果与分析

位移边桩埋设后,立即测定初始位置,填土期间按 2 d/次的频率监测,记录相邻场地填土高度,监测的场地水平位移见图 4。

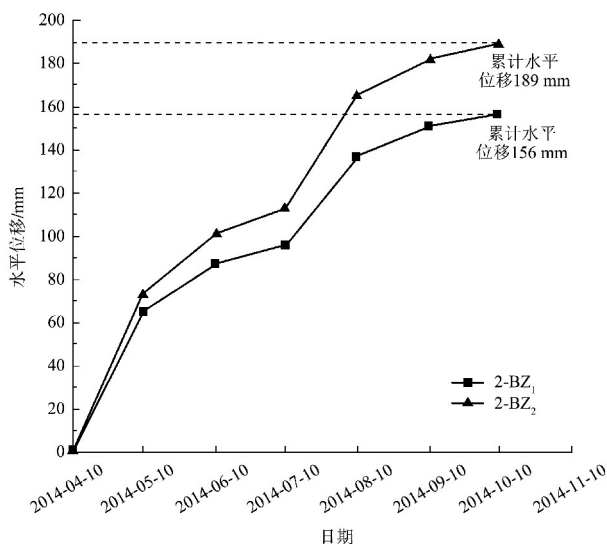


图4 试验区水平位移-时间曲线

由图 4 可知,试验区水平位移主要发生在堆载、强夯施工期间,由于分级堆载、单遍强夯施工时间间隔较长,最大水平位移速率 2.43 mm/d,均未超过 10.00 mm/d,施工加载速率控制较好。

2.5 土工试验检测结果与分析

工前试验共 2 个孔；工中试验共 3 个孔，于满夯完成后进行；工后试验共 3 个孔，在恒载完

成、卸载施工开始前进行。根据试验数据进行对比分析，结果见表 3。

表 3 试验区土工试验数据对比

试验节点	含水率/%		孔隙比		液性指数		直接快剪				压缩模量	
							内黏聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi/(\circ)$		$E_{s1.2}/\text{MPa}$	
	② ₁	④ ₁	② ₁	④ ₁	② ₁	④ ₁	② ₁	④ ₁	② ₁	④ ₁	② ₁	④ ₁
处理前	53.6	49.6	1.468	1.431	1.075	0.825	8.7	17.2	4.0	5.8	2.35	2.73
处理中	41.6	30.3	1.138	0.847	0.932	0.641	21.4	26.3	14.4	19.0	2.89	3.89
处理后	41.9	28.2	1.134	0.801	0.912	0.544	19.4	31.4	14.0	17.6	3.26	4.46
(处理中-处理前)/%	-22.4	-38.9	-22.5	-40.8	-13.3	-22.3	146.0	52.9	260.0	227.6	23.1	42.5
(处理后-处理前)/%	-21.8	-43.2	-22.8	-44.0	-15.2	-34.1	122.6	82.6	250.0	203.5	38.8	63.7

通过表 3 可知：试验区②₁、④₁ 的含水率分别下降 21.8%、43.2%，孔隙比相应下降 22.8%、44.0%，液性指数分别下降 15.2%、34.1%，压缩模量分别提高 38.8%、63.7%。根据广东省沿海地区淤泥和淤泥质土经验可知，②₁、④₁ 层承载力特征值可达 80 kPa 以上。④₁ 层提升幅度明显高于②₁ 层，原因为②₁ 层仍处于地下水横向补水通道内，而④₁ 层处于②₁ 层及上覆夹砂层之下，

地下水横向补水微弱，在穿透④₁ 层的排水板作用下，其中孔隙水被排至表层砂垫层中，改善效果明显。

2.6 原位测试结果与分析

2.6.1 标准贯入试验

试验区卸载前进行 3 个孔标贯试验，采用标准贯入试验判别砂土液化情况，试验结果见表 4。

表 4 试验区标准贯入试验数据对比

孔号	标贯深度/m	锤击数/击	液化判别(公路工程抗震规范)		液化判别(建筑抗震设计规范)		砂土密实判别 (岩土工程勘察规范)
			临界值	液化指数	临界值	液化指数	
2-1	1.2	46					密实
	3.2	35	10.78		10.44		密实
	5.2	19	12.78	不液化	13.33	不液化	中密
	13.0	28	20.58		20.05		中密
2-2	3.2	26					中密
	5.2	19	10.68	3.70	11.31	4.03	中密
	7.2	14	12.68		13.53		稍密
	9.2	10	14.68		15.33		松散
2-3	3.2	25					中密
	5.2	21	10.52	1.89	11.16	2.77	中密
	7.2	11	12.52		13.38		稍密
	9.2	24	14.52		15.18		中密

由表 4 可知，根据《建筑抗震设计规范》及《公路工程抗震规范》公式计算出 3 个贯入点液化指数均满足不大于 8，砂层由中等-严重液化改变为轻微液化。2-2 区通过两种规范判定液化指数最大分别为

3.70、4.03，说明强夯对浅层砂层的处理效果显著。

2.6.2 静力触探试验

试验区共进行 6 个点位的静力触探试验，地基加固前后的试验数据对比见表 5。

表5 试验区静力触探试验数据对比

点位	土层	静力触探锥尖阻力/MPa		工后 改变率/%
		工前	工后	
JT ₂₋₁	① ₂	3.86	13.02	237
	② ₁	0.39	0.95	144
	④ ₁	0.79	1.03	30
JT ₂₋₂	① ₂	5.66	13.76	143
	② ₁	0.45	0.80	77
	④ ₁	0.79	0.97	24
JT ₂₋₃	① ₂	4.79	9.23	93
	② ₁	0.53	0.78	47
	④ ₁	0.81	0.91	12
JT ₂₋₄	① ₂	2.58	12.32	378
	② ₁	0.53	0.80	51
	④ ₁	0.80	0.89	11
JT ₂₋₅	① ₂	3.60	15.00	317
	② ₁	0.49	0.83	70
	④ ₁	0.82	0.94	15
JT ₂₋₆	① ₂	4.82	15.50	222
	② ₁	0.51	0.79	55
	④ ₁	0.76	0.84	11
平均	① ₂	4.22	13.14	211
	② ₁	0.48	0.83	71
	④ ₁	0.79	0.93	17

根据静力触探锥尖阻力数据对比可知,试验区工后①₂层平均为 13.14 MPa, 平均提高 211%; ②₁层平均为 0.83 MPa, 平均提高 71%; ④₁层平均为 0.93 MPa, 平均提高 17%。

根据静力触探确定地基承载力经验公式,试验区①₂层承载力特征值均达 200 kPa 以上, ②₁层承载力特征值均达 70 kPa 以上, ④₁层承载力特征值均达 200 kPa 以上。

2.6.3 十字板剪切试验检测

分别统计处理前后软土层中十字板抗剪强度指标见表6,表中所列数据为各点次十字板剪切强度的平均值。

表6 试验区十字板剪切试验数据对比

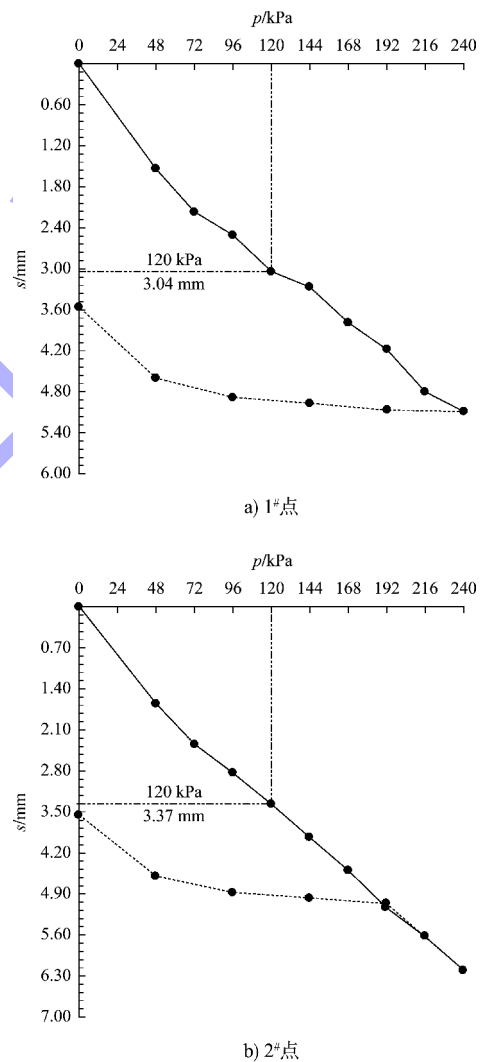
施工节点	剪切强度 c_u /kPa	
	② ₁	④ ₁
排水板施工前	19.1	28.7
卸载施工前	24.8	30.2
强度提升/%	29.8	21.8

注:剪切强度为各钻孔的平均剪切强度。

由表6可知,试验区经过处理后,②₁剪切强度提升 29.8%, ④₁层软土剪切强度提升 21.8%, 软土的剪切强度提高明显。

2.6.4 载荷试验检测

试验区布设 2 个载荷试验点,沿场地中线布设,承载板 1 m×1 m,荷载-位移曲线(p - s 曲线)见图5。根据静载荷试验 p - s 曲线推算,2 个点的地基极限荷载均不小于 240 kPa,承载力特征值均不小于 120 kPa。

图5 p - s 曲线图

3 结论

1) 现场试验结果表明,经过静动力排水固结法加固后,吹填超软土地基的承载性能得到有效提升,各项指标满足相关技术要求,所拟定的加固方法及工艺参数可行,达到了预期的效果。

(下转第 195 页)