

# 微劈裂多层面真空预压技术 在淮河入海水道北堤的应用研究

姚 达<sup>1,3</sup>, 李 辉<sup>1,3</sup>, 张礼强<sup>1,3</sup>, 丛赛飞<sup>2</sup>, 别学清<sup>1,3</sup>

(1. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000;

2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127;

3. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225000)

**摘要:**深厚淤土地基加固是软基处理中经常遇到的难题,本研究针对淮河入海水道二期工程堤防加固中存在长距离、大面积深厚淤土地基的特点,提出微劈裂多层面真空预压技术并在入海水道北堤进行工程性试验,试验过程中通过对真空度、地面沉降、十字板不排水抗剪强度等指标的监测以及对监测数据的分析,表明微劈裂多层面真空预压技术加固深厚淤土地基效果显著,土体有效加固范围更大,在排水板打设范围内的土体均能得到不同程度地有效加固。

**关键词:**深厚淤土;地基加固;多层面真空预压

中图分类号:TV523

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)04-0053-06

## Application research of micro split multi-layer vacuum preloading technology in the north dike of flood way of Huaihe River flowing into sea

YAO Da<sup>1,3</sup>, LI Hui<sup>1,3</sup>, ZHANG Liqiang<sup>1,3</sup>, CONG Saifei<sup>2</sup>, BIE Xueqing<sup>1,3</sup>

(1. Jiangsu Engineering Surveying Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu;

2. Jiangsu Provincial Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou 225127, Jiangsu;

3. Jiangsu Hongji Water Source Technology Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu Province)

**Abstract:** Reinforcement of deep silting soil foundation is a difficult problem in soft foundation treatment. In view of the characteristics of long-distance and large-area deep silting soil foundation in embankment reinforcement of flood way of Huaihe River flowing into sea Phase II Project, a micro split multi-layer vacuum preloading technology was proposed and an engineering test was carried out on the north dike. Through the monitoring of the vacuum degree, ground subsidence, vane-undrained shear strength of the cross plate and the analysis of monitoring data during the test showed that the micro split multi-layer vacuum preloading technology was effective in strengthening deep silt soil foundation, and the effective reinforcement range of soil was larger. The soil in the range of drainage plates could be effectively strengthened to varying degrees.

**Key words:** deep silting soil; foundation reinforcement; multi-layer vacuum preloading

## 0 引言

淮河入海水道工程是扩大淮河洪水出路,提高

洪泽湖防洪标准,确保淮河下游地区 2000 万人口、3000 万亩耕地防洪安全的战略性骨干工程。入海水道二期工程在现状工程基础上扩挖河道,加固堤

收稿日期:2018-09-14

基金项目:江苏省水利科技项目(2016004)

作者简介:姚达(1990—),男,本科,主要从事软基处理技术研究工作。

防,局部堤防适当退建,基本不改变现有南北堤线位置。堤防加固是二期工程的主要内容之一,地质勘探结果表明,长距离、大面积的堤防深厚淤土是二期工程堤防加固的关键性难题。二期工程软土段长达 52 km,河道开挖范围内,淤土深度位于地表以下 4~40 m,厚度达 8~34 m。入海水道大面积的深厚淤土问题不可避免地给工程建设与运行带来系列难题。①堤防退建、大面积占用土地;②增加大规模土方需求,增加工程投资;③工程运行期存在沉降隐患。因此,针对入海水道长距离、大面积深厚淤土带来的堤防退建、堤身填筑断面大,占地多、土源紧缺等系列问题,有必要寻求一种经济可行的深厚淤土地基处理方案,通过地基处理,缩小入海水道二期工程堤防填筑断面,尽可能减少软土段退堤,从而节省工程用地,并减少远距离调土,降低工程造价,同时通过软基处理减少堤防运行期的沉降,以利于工程建成后的运行安全。

## 1 微劈裂多层面真空预压技术

真空预压法是基于土的固结原理而发展起来的经济可靠的软土地基处理方法,近年来在各类软土地基处理工程中得到广泛应用,且取得了一定的效果<sup>[1-5]</sup>。但将其应用于深厚淤土地基加固时由于受竖向排水板井阻和涂抹作用等的影响,真空度在沿排水板向地基深处传递时损失明显<sup>[6]</sup>,这导致真空预压技术进行深厚淤土地基处理时,经常会出现地基深处真空度小、加固效果不理想、抽真空时间长等问题,极大地限制了真空预压技术的应用。故真空能否沿着排水板向深度方向有效传递,是真空预压排水技术能否成功应用于深厚淤土地基处理的关键。王南江等在淮河入江水道整治工程运河西堤崇湾段加固工程中提出了“微劈裂管路真空预压法”,并且得到成功应用,该技术实施 75d 实现地基平均固结度大于 90%,且不同深度的地基承载力均达到设计要求<sup>[7]</sup>。虽然“微劈裂管路真空预压法”在入江水道崇湾段深层软土加固工程中达到了预期的加固效果,但该技术仍然存在因排水板传递损失带来的深层真空度值低以及真空度传递深度有限的问题,见下图 1。

对于淮河入海水道二期工程软土层上高度达 4~10 m 的覆土及堤身而言,排水板的真空传递处理的深厚淤土范围非常有限,实际工程意义不明显,因此亟需对“真空传递”这一软基处理技术中的瓶颈进行再一次突破,以适应入海水道二期工程深

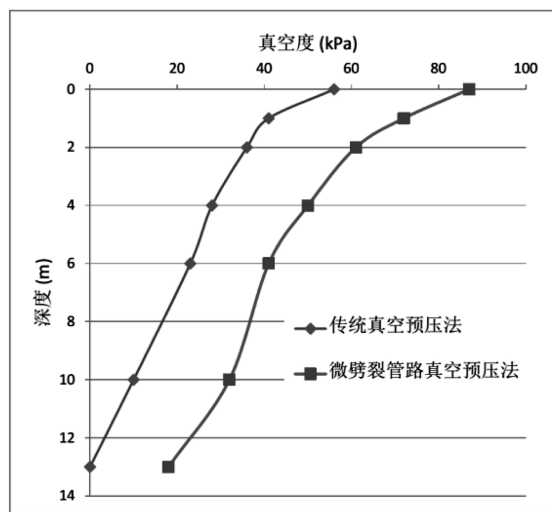


图 1 崇湾段软土加固工程排水板中真空度衰减情况  
厚淤土加固需要。

针对以上问题,提出采用“微劈裂多层面真空预压技术”进行入海水道二期工程深厚淤土加固处理,该技术方案采用多真空作用面的排水板代替传统的表层单一真空作用面的排水板,多真空作用面的排水体可以将负压源由传统的表层单一真空作用面变成分布于深厚淤土地基的多层次真空作用面,通过多层次真空作用面共同作用,排水体全断面内维持在高真空度值,大幅度加快软土固结速率,缩短施工工期,保证深厚淤土地基整体加固效果。微劈裂多层面真空预压技术示意图 2。

## 2 技术实施

微劈裂多层面真空预压技术在淮河入海水道北堤 N85.5K 附近进行了工程性试验,同时为了明确该技术的加固效果,现场划分出一块场地采用微劈裂管路真空预压法进行加固处理。2 个区除排水板结构不同之外,排水板均为正方形布设,布设间距 1.0 m,打设深度 18.0 m,微劈裂管布设间距 3.0 m,深度 13.0 m,密封层从下至上依次为编织布 1 层、土工布 1 层、聚乙烯 PE 膜 3 层。排水板及微劈裂管平面布置见图 3。

## 3 加固效果分析

本次将微劈裂多层面真空预压技术加固区域定义为 A 区,微劈裂管路真空预压法加固区定义为 B 区,加固过程中分别对 A、B 区真空度、地面沉降进行监测,加固前后对场地十字板不排水抗剪强度进行检测,对比分析微劈裂多层面真空预压技术在入海水道北堤加固效果。

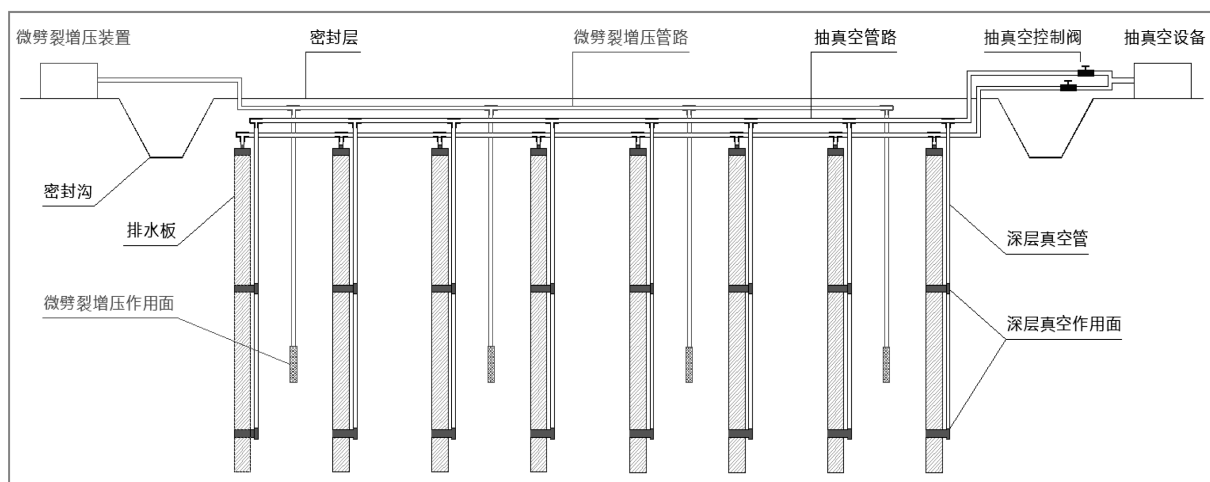


图2 微劈裂多层面真空预压技术示意图

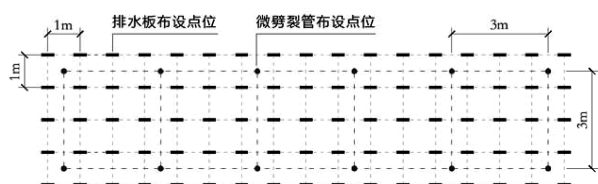


图3 排水板及微劈裂管平面布置图

### 3.1 真空度衰减情况分析

本次微劈裂多层面真空预压3个真空面分别位于深度0 m(即膜下真空面)、8 m、16 m。A区和B区沿排水板深度方向真空度的传递规律如图4所示。从图4中可以看到,A、B两区膜下真空度都达到90 kPa,说明两区场地密封良好,然而两个区沿排水板深度方向的真空度传递规律却有着显著的差异。B区沿排水板深度方向的真空度衰减明显,排水板打设的最深处18 m监测不到真空度,排水板打设范围0~18 m内真空度的平均衰减率约为5 kPa/m。A区沿排水板深度方向的真空度衰减减小,排水板打设最深处18 m的真空度约57 kPa,排水板打设范围0~18 m内的真空度平均衰减率仅约为1.8 kPa/m。与B区相比,A区真空度衰减明显减小,4 m以下不同深度处的真空度也明显大于B区。

此外,还可以看出A区沿排水板深度方向的真空度在0~4 m范围内衰减较大,平均衰减率约为4.5 kPa/m;在4~16 m范围内衰减很小,平均衰减率约为1.1 kPa/m;16 m以下的衰减又转而变大,平均衰减率约为4.5 kPa/m。这主要是由于试验场地上覆约4 m厚的填土层,真空度传递时损失较大;4~16 m为软弱淤土层,介于3个真空作用面之间,在3个真空面共同作用下,尤其是8 m真空面和

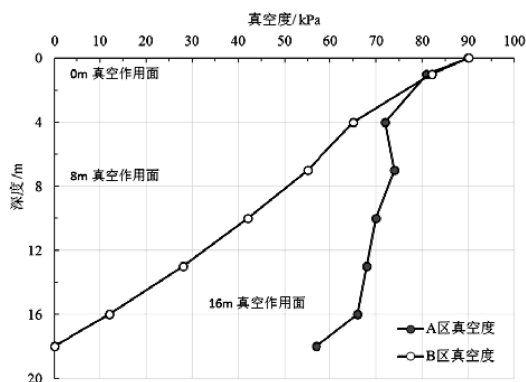


图4 A区与B区沿排水板深度方向真空度的传递规律

16 m真空面作用下,该范围真空度维持在较高值,该范围真空度介于57~72 kPa,平均真空度约为68 kPa;16 m以下离3个真空面的距离渐远,影响渐弱,衰减又转而变大。

真空度传递规律分析表明多层面真空预压中真空传递管路的设计能有效地将真空荷载引导到土层深处,使得真空负压源由传统的表面单一真空作用面变成分布于深厚淤土地基的多层次真空作用面,有效减少真空度沿土层深度方向的衰减,解决传统排水板中真空度沿深度方向衰减大的问题,使得深部的淤土层也能在较大的真空度下进行真空固结。

### 3.2 地面沉降变化规律分析

A区与B区的平均地面沉降历时曲线如图5所示,从图5中可以看到,A区和B区的平均地面沉降量都随时间逐渐增大,到第122d卸载时,B区的平均总地面沉降量SB122约为55.8 cm,平均固结度约为96.1%;A区的平均总地面沉降量SA122约为66.5 cm,平均固结度约为98.9%。与B区相比,A区的平均总地面沉降量增加10.7 cm,提高了

约 19%。可见微劈裂多层真空预压技术固结效果更好,不仅有利于堤防填筑时的稳定性,而且有利于工后沉降控制。

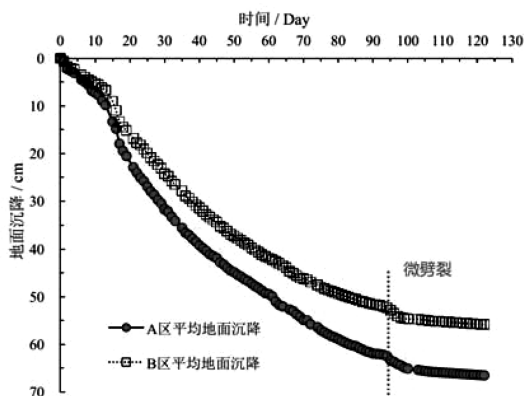


图5 A区与B区的平均地面沉降历时曲线

为了提高固结效果,在满足微劈裂系统开启标准后,从第95d开始开启微劈裂系统。从图5中可以看到,微劈裂系统开启前,A区的平均地面沉降量SA95约为62.4 cm,开启微劈裂系统直至卸载时,A区的平均地面沉降量增加4.1 cm,提高了约6.6%;微劈裂系统开启前,B区的平均地面沉降量SB95约为52.3 cm,开启微劈裂系统直至卸载时,B区的平均地面沉降量增加3.5 cm,提高了约6.3%。可见,微劈裂系统使得在施加真空负压荷载的同时,增加了正压加载,通过正负压的联合作用,加速了土体孔隙水压力的消散速率,进一步提高了固结效果。

### 3.3 十字板不排水抗剪强度

A区和B区试验前后深度4 m以下的饱和软弱淤土层的不排水抗剪强度Cu见图6。从图6中可以看到,试验前土体的不排水抗剪强度随深度增加而逐步提高,4~10 m范围土体的不排水抗剪强度随深度明显线性增长,表明其与有效上覆压力呈线性关系,这与国内外大量的现场实测结果是一致的<sup>[8-9]</sup>,10 m以下土体的不排水抗剪强度随深度增长缓慢。实际上,除去上覆硬壳土层,十字板强度与深度是呈线性分布的,这一结论已被国内外大量的工程实践所证实<sup>[10]</sup>。

根据十字板强度随深度增加的特征,通过统计回归的方法推算土体的抗剪强度指标<sup>[11]</sup>。4~10 m范围土体强度指标:内摩擦角 $\varphi \approx 5.2^\circ$ ,粘聚力 $c \approx 13.5$  kPa,强度较低,是工程中该区域需要重点处理的软弱层。

与试验前相比,B区4~10 m范围土体的不排水抗剪强度得到不同程度的提高,提高幅度介于

4%~45%,试验前不排水抗剪强度越低,试验后不排水抗剪强度提高幅度越大(见表1);推算B区试验后4~10 m范围土体强度指标:内摩擦角 $\varphi \approx 6.3^\circ$ ,粘聚力 $c \approx 18.8$  kPa,10 m以下土体的不排水抗剪强度则没有明显提高,这主要是由于试验前10 m以下土体的不排水抗剪强度较大以及B区10 m以下真空度较小共同导致的。

与试验前相比,A区4~13 m范围土体的不排水抗剪强度得到不同程度的提高,提高幅度介于2%~69%,试验前不排水抗剪强度越低,试验后不排水抗剪强度提高幅度越大(见表1);推算A区试验后4~10 m范围土体强度指标:内摩擦角 $\varphi \approx 7.1^\circ$ ,粘聚力 $c \approx 22.8$  kPa,13 m以下土体的不排水抗剪强度则没有明显提高,虽然A区13 m以下的真空度值仍然维持在较高值,但由于试验前13 m以下土体的不排水抗剪强度较大,土体在真空加固作用下不排水抗剪强度提高效果有限。

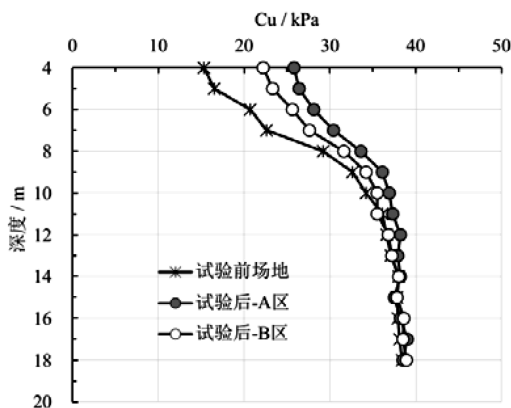


图6 A区和B区不排水抗剪强度试验前后对比图

从图6中还可以看到,试验后A区4~13 m范围土体的不排水抗剪强度比B区对应深度的不排水抗剪强度明显较大,提高幅度介于2%~16%;A区和B区13 m以下土体的不排水抗剪强度基本相同。

不排水抗剪强度分析结果表明,与微劈裂管路真空预压法相比,微劈裂多层真空预压技术固结效果更好,不仅土体强度提高幅度更大,而且土体有效加固深度也更大。

根据《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ83-2011),饱和黏性土的地基承载力特征值可以采用公式 $f_{ak} = 10 + 2.5C_u$ 进行计算。A区和B区深度4 m以下的饱和软弱淤土层的地基承载力特征值 $f_{ak}$ 见图7。从图7中可以看到,试验前4~10 m范围土体的地基承载力特征值随深度增长,介于48.3~95.5 kPa;10 m以下土体的地基承载力特征值随

表 1  A 区和 B 区不同深度土体的不排水抗剪强度

深度/m	试验前/kPa	试验后 A 区 Cu/kPa	试验后 A 区提高	试验后 B 区 Cu/kPa	试验后 B 区提高	A 区较 B 区 提高
4	15.3	25.8	69%	22.2	45%	16%
5	16.5	26.4	60%	23.3	41%	13%
6	20.7	28.1	36%	25.6	24%	10%
7	22.6	30.4	35%	27.6	22%	10%
8	29.2	33.6	15%	31.6	8%	6%
9	32.6	36.1	11%	34.2	5%	6%
10	34.2	36.9	8%	35.5	4%	4%
11	36.1	37.3	3%	36	0%	4%
12	36.6	37.7	3%	36.8	1%	2%
13	37.1	37.9	2%	37.2	0%	2%
14	38	38	0%	38	0%	0%
15	37.8	38	1%	37.8	0%	1%
16	37.9	38.2	1%	38.1	1%	0%
17	38.1	38	0%	38	0%	0%
18	38.4	38.3	0%	38.5	0%	-1%

深度增长缓慢,介于 100.0 ~ 106.3 kPa。

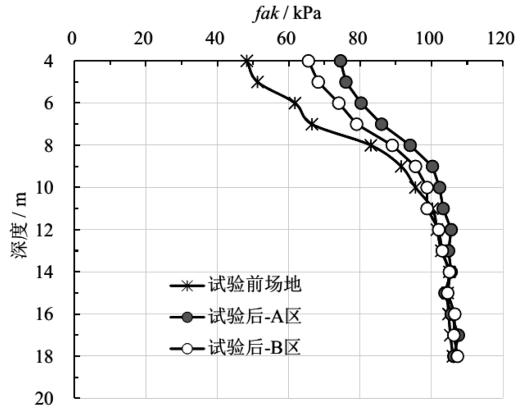


图 7  A 区和 B 区地基承载力特征值试验前后对比图

试验后,B 区 4 ~ 10 m 范围土体的地基承载力特征值得到不同程度的提高,介于 65.5 ~ 98.5kPa; 10 m 以下土体的地基承载力特征值没有明显提高,介于 100.0 ~ 106.3 kPa。

试验后,A 区 4 ~ 13 m 范围土体的地基承载力特征值得到不同程度的提高,介于 74.5 ~ 103.0 kPa;13 m 以下土体的地基承载力特征值没有明显提高,介于 105.0 ~ 106.3 kPa。

4  结论

本次通过微劈裂多层面真空预压技术在入海

水道北堤 N85.5K 附近的应用并分析其加固深厚淤土效果,主要结论如下:

(1)微劈裂多层面真空预压技术中真空传递管路的设计能有效地将真空荷载引导到土层深处,使得真空负压源由传统的表面单一真空作用面变成分布于深厚淤土地基的多层次真空作用面,有效减少真空度沿土层深度方向的衰减,解决传统排水板中真空度沿深度方向衰减大的问题,使得深部的土层也能在较大的真空度下进行排水固结。

(2)微劈裂多层面真空预压技术在入海水道北堤的 N85.5K 附近应用时,土体的加固效果显著。与微劈裂管路真空预压法相比,微劈裂多层面真空预压技术的固结效果更好,不仅土体强度提高幅度更大,而且土体有效加固范围也更大,排水板打设范围内的土体均能得到不同程度地有效加固,有利于入海水道二期工程的实施。

参考文献:

[1] 冯汉英.真空预压软基加固技术在天津港区的应用与发展[J].港口工程,1998(04):26-30.  
[2] 吴加武.真空预压处理珠三角大面积软土的监测及效果分析[J].中国水运,2018(06):46-47.  
[3] 刘宝勤,张应奎,孙玉玥,等.潮间带塑料排水板真空预压固结法在软基加固中的应用[J].江苏水利,

- 2013(10):32-33.
- [4] 曹杰,郑建国,刘智,等.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.
- [5] Shang J Q, Tang M, Miao Z. Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(5):740-749.
- [6] 刘勇.真空预压机理及考虑变井阻效应的数值分析[D].天津大学,2016.
- [7] 王南江,冯英,翁佳兴,等.微劈裂管路真空预压法加固深淤土地基应用研究[J].江苏水利,2016(09):1-4+8.
- [8] 候钊.天津软土地基[M].天津科学技术出版社,1987.
- [9] Bishop A W. The strength of soils as engineering material[J]. Geotechnique, 1966, 16(2):91-130.
- [10] Skempton A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory [J]. Géotechnique, 2015, 35(1):3-18.
- [11] 闫澍旺,封晓伟,侯晋芳,等.用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用[J].岩土工程学报,2009,31(12):1805-1810.
-