



白洋淀疏浚底泥电渗真空 预压试验研究

程 瑾, 曹 凯, 吴玉涛

(中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

摘要: 为了寻求吹填湖库底泥技术可行、经济合理、环境合规的脱水处理方案, 以白洋淀疏浚底泥为研究对象, 采用模型试验、中试试验和应用示范的系统化工程研究方法, 进行电渗真空预压技术的试验研究, 结果表明: 电渗真空预压技术成熟, 脱水效果明显优于真空预压, 双面排水脱水效果明显优于单面排水, 比真空预压技术的脱水费用高约 1/3, 满足生态合规性要求, 便于进行后续资源化利用。研究成果可为工程设计施工提供技术依据。

关键词: 电渗; 疏浚底泥; 真空预压; 白洋淀

中图分类号: X 52; U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0006-05

Experimental study on electroosmosis vacuum preloading for dredged sediment of Lake Baiyangdian

CHENG Jin¹, CAO Kai¹, WU Yu-tao¹

(CCCC Tianjin Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

Abstract: To seek a technically feasible, economical, and environmentally compliant dewatering treatment scheme for dredged sediment of lakes and reservoirs, this study takes the dredged sediment of Lake Baiyangdian as the research object for the experiment on electroosmotic vacuum preloading technology by systematic engineering research methods of model tests, pilot tests, and application demonstration. The results reveal that the electroosmotic vacuum preloading technology is mature and extraordinarily outperforms vacuum preloading in dewatering, and the dewatering effect of double-sided drainage is significantly better than that of single-sided drainage. In addition, the cost of electroosmotic vacuum preloading technology is about 1/3 higher than that of vacuum preloading technology. The technology meets the requirements of ecological compliance and can be used for subsequent resource utilization. The research results can provide a technical basis for engineering design and construction.

Keywords: electroosmosis; dredged sediment; vacuum preloading; Baiyangdian

疏浚底泥土颗粒中的水分子按其存在形式可分为结合水、吸附水、间隙水、自由水。在温度变化幅度不太大的情况下, 水分子有效应力的变化对渗透系数的影响较大^[1]; 用不同方式加热, 发现真空预压联合加热的排水固结方式可促进土

体沉降, 加快土体固结速度, 缩短地基处理的工期^[2]。在压力、温度、电极等外部因素变化条件下, 水分子在土中的存在形式和分布可以发生重新分布, 见图 1。

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 程瑾(1965—), 男, 教授级高工, 从事岩土工程勘察、设计、技术咨询和相关专业应用型科学研究。

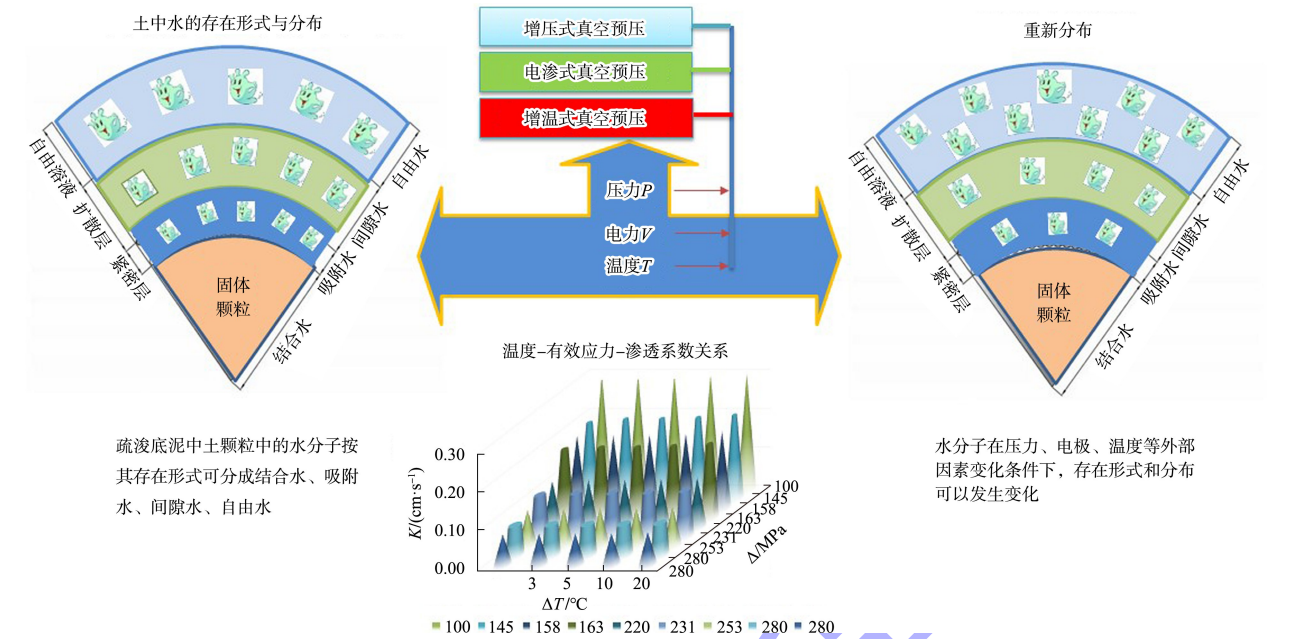


图1 土体中水分子形态在外部条件下的变化

电渗法作为一种有效的软基处理方法, 已有 200 多年历史, 目前已发展成为一门较成熟的软基处理工艺^[13-6]。电渗法通过设置外加电源, 使得土体内的水分在电场的作用下向阴极移动, 从而达到排出土体内水分、提升土体强度的目的。此外, 试验发现, 电渗法不仅可以排出土中的游离水, 还可以排出土颗粒周围的弱结合水。

1 试验概况

1.1 疏浚底泥土质特征

试验研究对象为白洋淀疏浚底泥, 采用环保

疏挖水力输送的方式排入纳泥池塘。通过室内土工试验得到该土样的各项物理力学指标的平均值为: 含水率 180%, 天然密度 1.29 kg/m³, 比重 G_s 为 2.73, 孔隙比 e 为 4.86, 塑限 W_p 为 21.1, 液限 W_L 为 41.8, 塑性指数 W_L 为 20.7, 液性指数 I_L 为 7.67, 判定为流泥。

1.2 试验方案

本次试验采用系统工程的试验研究方法, 分模型试验、中试试验和工程应用示范 3 个阶段进行, 各阶段技术参数见表 1。

表 1 试验阶段技术参数

研究阶段	单元规模/m ³	试验方案	研究目的
模型试验	0.012	单、双面电渗排水真空预压	确定技术可行性、目标效果
中试试验	144	单、双面排水真空预压; 单、双面排水电渗真空预压	确定工序流程、工艺参数
应用示范	13 200	单面电渗排水真空预压, 两种板间距	确定经济合理性、环保合规性

1.3 试验方案设计

验, 控制参数见表 2。

1.3.1 模型试验

模型试验设计了 A、B、C、D 等 4 个单元试

表 2 模型试验控制参数

单元	试验方法	排水板类型
A	真空预压试验	常规 B 型塑料排水板
B	真空预压试验	导电塑料排水板
C	真空预压联合电渗试验	导电塑料排水板, 电压 30 V, 间距 10 cm, 排水板宽度 5 cm, 电势梯度 3 V/cm
D	真空预压联合电渗试验	导电塑料排水板, 电压 30 V, 间距 10 cm, 排水板宽度 5 cm, 电势梯度 3 V/cm

1.3.2 中试试验

中试试验坑底面积为 288 m²，分为 A1、A2、B1、B2 等 4 个试验单元，其中 A1、A2 单元设计采用顶面单面排水，B1、B2 单元设计采用顶、底

面双面排水；A1、B2 单元设计采用常规真空预压脱水技术；A2、B1 单元设计采用电渗联合真空预压脱水技术。各单元控制参数见表 3。

表 3 中试试验控制参数

单元	方法	排水	供电	材料
A1	单面真空预压法	顶面排水	不供电	塑料排水板
A2	单面排水 电渗联合真空预压法	顶面排水	直流供电	导电塑料排水板
B1	双面排水 电渗联合真空预压法	顶、底双面排水	直流供电	导电塑料排水板
B2	双面排水 真空预压法	顶、底双面排水	不供电	塑料排水板

1.3.3 示范工程

本示范工程为模型试验和中试试验优选方案的现场实施，主要验证湖库塘污染底泥电渗真空预压快速脱水方法和工艺参数的成效性、经济性、环保合规性。

示范工程处理面积 2 134 m²，坑底高程为 -0.490~-0.399 m，吹填底泥厚度平均为 6.0 m，分为 A1-1、A1-2 两个示范单元，其中 A1-1 单元排水板间距 0.6 m，A1-2 单元排水板间距 0.8 m。

(其中电渗真空预压 25 d)，排水固结后各单元处理前后膜顶高程见图 2、3。

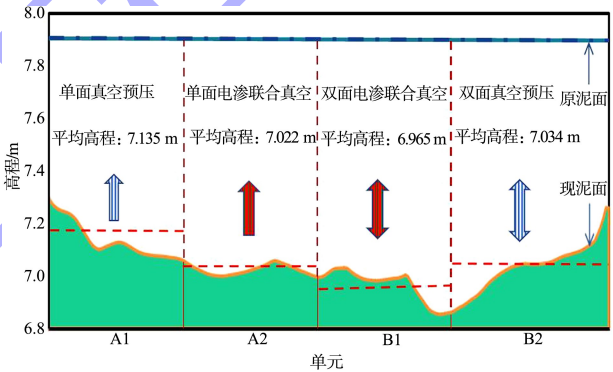


图 2 各单元膜顶高程

2 试验结果

2.1 模型试验

试验前每单元底泥体积均为 1.2 万 cm³，含水量为 200%，经过 180 h 排水固结后各单元体积及对应体积压缩率、土体十字板强度指标见表 4。

表 4 模型试验主要土质特征

单元	试验后体积/cm ³	体积压缩率/%	含水量/%	固结度/%	抗剪强度/kPa
A	8 958	25.4	109.0	56.1	12.3
B	9 644	19.6	125.0	47.2	8.4
C	5 611	53.2	30.9	99.5	66.3
D	5 592	53.4	30.5	99.7	69.8

2.2 中试试验

试验前每单元底泥体积均为 144 m³，平均厚度 2.0 m，含水量为 180%，经过 45 d 真空预压

中试试验按其真空预压排水量可以分为 5 个时段，各时段加载及排水量特征见表 5。竖向沉降量、体积压缩率、土体十字板强度等指标见表 6。

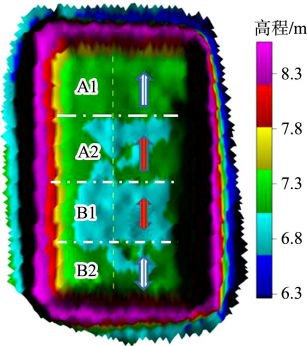


图 3 各单元膜顶高程模型

表 5 中试试验时段划分及特征

时段序号	时段划分	加载及排水量特征
1	试抽气段	真空负压 <60 kPa, 未加电渗电压, 常规塑料排水板出水量大于电渗排水板出水量
2	真空预压达压段	真空 60~80 kPa, 电渗电压 <30 V, 常规塑料排水板出水量大于电渗排水板出水量, 总排量以常规真空预压为主
3	电渗真空预压低电压段	真空恒压 80 kPa, 电渗电压 <30 V, 常规塑料排水板出水量大于电渗排水板出水量, 总排量以常规真空预压为主
4	电渗真空预压中电压段	真空恒压 80 kPa, 电渗电压 30~60 V, 常规塑料排水板出水量小于电渗排水板出水量, 总排量以电渗真空预压为主
5	电渗真空预压高电压段	真空恒压 80 kPa, 电渗电压 >60 V, 电渗排水板出水量急减, 常规塑料排水板出水量减缓, 总排量以真空预压为主

表 6 工后主要土质特征

单元	沉降量/ mm	压缩率/ %	含水量/ %	固结度/ %	抗剪强度/ kPa
A1	721.3	36.1	43.2	86.0	16.5
A2	854.3	42.7	38.2	88.8	24.3
B1	931.2	46.6	35.3	90.4	33.3
B2	774.2	38.7	39.5	88.1	21.3

2.3 示范工程

示范工程按施工工艺参数不同分为 A1-1、A1-2 两个示范单元, 经过 45 d 电渗真空预压(其中电渗真空预压 20 d), 排水固结结果见表 7。示范单元工后膜顶高程见图 4。

表 7 工后主要土质特征

单元	沉降量/ mm	压缩率/ %	工前含水量/%	工后含水量/%	固结度/ %	抗剪强度/kPa
A1-1	1 688	28.1	99.4	36.0	85.4	35.8
A1-2	1 651	27.5	108.3	38.9	83.9	33.4

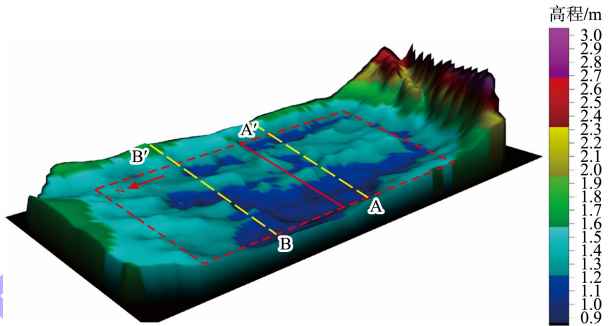


图 4 示范工程工后膜顶高程模型

3 试验结果分析

3.1 技术可行性

通过模型试验、中试试验和工程示范的系统研究可以看出, 疏浚底泥采用真空预压和电渗真空预压可以实现快速脱水, 其含水量、沉降量、十字板强度的变化关系见表 8。电渗真空预压效果明显优于真空预压, 且不同排水方式效果差异性较大。

表 8 真空预压与电渗真空预压脱水固结成果

试验阶段		真空预压			电渗真空预压		
		含水率/%	沉降量/mm	十字板强度/kPa	含水率/%	沉降量/mm	十字板强度/kPa
模型试验	工前	180.0	300.0	0.5	180.0	300.0	0.5
	工后	117.1	232.5	10.3	30.7	140.1	68.1
	变化率/%	35.0	22.5	2 060.0	82.9	53.3	13 610.0
中试试验	工前	110.0	2 000.0	0.5	110.0	2 000.0	0.5
	工后	41.4	747.8	18.9	36.8	892.8	28.8
	变化率/%	62.4	37.4	3 780.0	66.5	44.6	5 760.0
工程示范	工前	103.9	6 000.0	0.5	103.9	6 000.0	0.5
	工后	60.0	5 152.0	12.5	37.5	4 330.0	34.6
	变化率/%	42.3	14.1	2 500.0	63.9	27.8	6 920.0

以单面排水真空预压为基准, 以差异沉降指标对比双面排水真空预压、单双面电渗真空预压的处理效果, 双面排水真空预压比单面排水真空

预压差异沉降贡献率为 24%, 单面电渗真空预压比单面排水真空预压差异沉降贡献率为 62%, 双面电渗真空预压比单面排水真空预压差异沉降贡

献率为 100%。基于 A1 单元的差异沉降量关系见图 5。

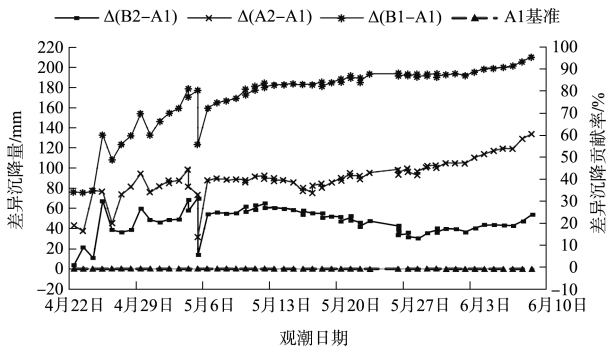


图 5 基于 A1 单元的差异沉降量关系

电渗真空预压模型试验底泥含水率由 180% 降至 30.7%，真空抽气 200 h(8.3 d)，电渗时长 160 h(6.7 d)，体积压缩率可达 53.3%(泥量 0.012 m³)。

电渗真空预压中试试验底泥含水率由 110% 降至 36.8%，真空抽气 45 d，间歇电渗时长 25 d，竖向压缩率可达 44.6%(泥量 560 m³)。

电渗真空预压示范应用工程底泥含水率由 100.4% 降至 37.5%，真空抽气 45 d，电渗时长 20 d，竖向压缩率可达 27.8%(泥量 12 560 m³)。

从室内模型试验、现场中试试验到工程应用示范均充分证明，目前电渗真空预压脱水技术已经成熟，相应配套设备、电极材料、施工工法等关键环节技术可行，尤其是双面电渗真空预压，具有重大应用意义。

3.2 经济合理性

近 30 a 来，电渗真空预压脱水技术在电极材料、配电设备、自动化控制、安全防护、施工工法等关键技术方面进行了长足的创新，尤其是导电塑料排水板、综控配电设备的研制成功与应用改进，极大地降低了施工成本。与相关脱水技术相比，真空预压脱水时长大约是电渗真空预压的 3 倍，根据应用示范工程的费用精算对比，采用真空预压脱水技术处理底泥费用为 32 元/m³，而采用电渗真空预压技术处理等量底泥费用为 42 元/m³，高约 1/3，随着人力成本的快速增长和处理规模的增加，成本差距在逐步缩小；与板框压滤、管袋渗滤等机械脱水相比，除产能优势明显外，成本可

降低约 1/3。因此电渗真空预压脱水技术经济上是合理的。

3.3 生态合规性

电渗真空预压脱水技术采用纯电力，不向底泥中增添任何化学制剂或填料，抽出的污水便于收集集中处理，同时底泥中的重金属在极性电流的作用下可定向富集，便于随水排出。

根据试验前、后的土质环境化学分析结果，主要指标高值平均值见表 9。

表 9 试验前、后的土质主要指标高值平均值

阶段	pH 值	全氮(TN)/ (mg·kg ⁻¹)	全磷(TP)/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)
试验前	8.48	2 360	1 078	36.0
试验后	7.75	3 965	1 181	50.8

工后白洋淀疏浚底泥 pH 值、TN、TP、有机质等指标含量均满足 CJ/T 340—2011《绿化种植土壤》I 类场地要求，脱水后可用于回填土、机制黏土砖、建筑材料充填料等资源化应用。因此电渗真空预压脱水技术具有生态合规性和较大的生态环境意义。

4 结论

1)通过室内模型试验、现场中试试验和工程示范的应用，采用电渗真空预压脱水技术，脱水后底泥含水率降至 40% 以下，通电时长控制在 20 d 以内，最优电压 30~60 V，脱水效果最佳，技术上充分可行，尤其是双面排水电渗真空预压脱水技术，具有重大的工程应用意义。

2)根据示范工程的费用精算计算底泥处理费用，电渗真空预压技术为 42 元/m³，比真空预压技术 32 元/m³ 高约 1/3，与板框压滤、管袋渗滤等机械脱水工艺相比，成本低约 1/3，产能优越。

3)电渗真空预压脱水技术采用纯电力，不向底泥中增添任何化学制剂或填料，抽出的污水便于集中处理，同时底泥中的部分重金属离子在电流极性作用下，随水部分排出，含量有所降低，满足 CJ/T 340—2011《绿化种植土壤》I 类场地对底泥的要求，具有较大的生态环境意义。