

· 地基与基础 ·



蓄能式真空预压排水系统及其节能效率*

祝文龙^{1,2}, 孙慧³, 张民曦¹, 喻国良¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038;
3. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 200082)

摘要: 针对真空预压系统的高能耗问题, 提出一种蓄能式真空预压排水系统, 并通过室内单板真空预压排水试验, 探究该系统的排水固结与节能效率。研究发现: 真空室容积对该系统的排水固结效率存在一定影响, 且对表层的影响大于深部, 但与常规真空预压固结效率相差不大。该系统的节能效率与真空室容积密切相关, 在试验条件下, 对于功率 1.5 kW、抽气速率 7.2 m³/h 的真空泵, 当真空室容积大于排水固结土体的孔隙体积约 3‰ 时, 该系统耗能比常规真空预压系统减少 50%; 真空室容积越大, 节能效率越高。该研究可为解决真空预压系统的高能耗问题提供理论支撑。

关键词: 真空预压; 软黏土地基加固; 真空室容积; 节能效率

中图分类号: TV 223.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0218-06

Energy-storage vacuum preloading system and its energy-saving efficiency

ZHU Wen-long^{1,2}, SUN Hui³, ZHANG Min-xi¹, YU Guo-liang¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

3. CCCC National Engineering Research Center Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: To solve high energy loss in the vacuum preloading drainage system, we propose an energy-storage vacuum preloading system and probe into the drainage consolidation and energy-saving efficiency via vacuum preloading experiments with a single drainage board. It is found that the volume of the vacuum chamber has some influence on the vacuum consolidation efficiency, and the influence on the surface layer is greater than that on the deep layer. The consolidation efficiency of the proposed vacuum preloading system has little difference from that of the conventional one. The energy consumption of the vacuum system is closely related to the vacuum chamber volume. For the vacuum pump with a power of 1.5 kW and a pumping rate of 7.2 m³/h, when the volume ratio of the vacuum chamber and pore in the soil is about 3‰, the energy consumption of the proposed system would be reduced by 50%. The larger the vacuum chamber volume is, the higher the energy-saving efficiency would be. This study can provide theoretical support for the reduction of high energy loss in the vacuum preloading system.

Keywords: vacuum preloading; soft clay foundation treatment; vacuum chamber volume; energy-saving efficiency

真空预压排水法是用于加固大面积软黏土地基、促进土体排水固结的有效且经济的方法之一, 其基本概念由 Kjellman 教授于 1952 年首先提出^[1], 目前已被广泛应用于国内外多项软黏土地基加固工程中^[2-5]。经过多年的发展, 该技术的施

工工艺已较为完善, 但真空预压系统的节能问题仍是加固软黏土地基中急需解决的问题^[6], 也是绿色加固工程的必然要求。一个软黏土地基加固工程通常占地多达数十万平方米, 需要安装多套真空泵同步持续抽真空, 且加固周期会长达数月

收稿日期: 2020-09-09

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51779137)

作者简介: 祝文龙(1991—), 男, 博士, 工程师, 从事围海造陆及疏浚土资源化利用研究。

甚至 1 年之久。因此, 真空泵成为电力消耗的主要设备, 也直接影响着施工成本。尤其在真空预压后期, 真空泵甚至存在空转现象^[7], 能量利用率非常低。现有技术多是从改善土体的渗透性或改变真空荷载的加载方式等角度, 采取一些技术手段节省能量, 如劈裂真空预压排水技术^[8]、透气真空预压排水技术^[9]以及分级加载真空预压排水技术^[10]等。然而, 真空预压系统的耗时、耗电等问题仍需要进一步探究^[11]。

本研究提出一套可有效节能的蓄能式真空预压排水系统(图 1)。该系统在真空泵和真空滤管之间设置真空室, 真空泵对真空室抽真空以蓄存真空能量; 真空能量随着土体渗流过程耗散, 真空度相应减小; 真空泵的工作状态根据系统内的真空度自动调控, 从而改变真空泵的持续抽真空工作模式, 达到节能目的(图 2)。本文通过室内单板真空预压排水试验, 探究该系统的节能特性, 分析真空室容积对其排水节能效率的影响。

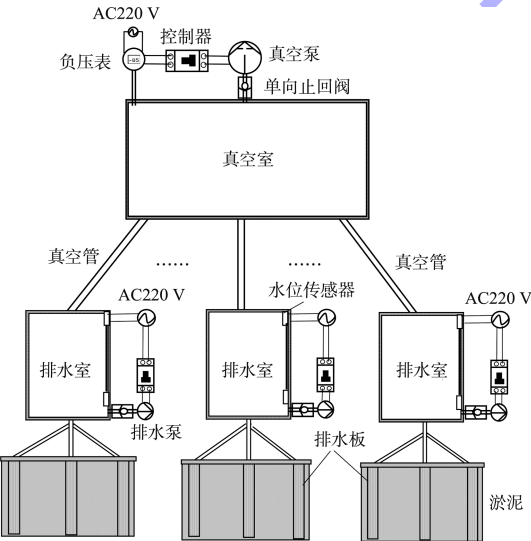


图 1 蓄能式真空预压系统结构

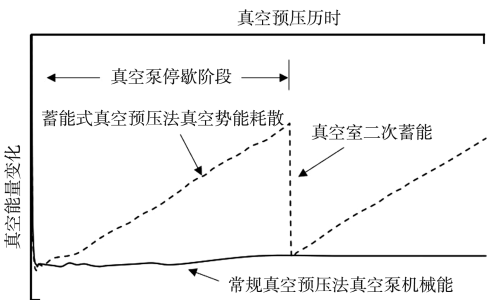


图 2 蓄能式真空预压系统能量转化过程

1 试验装置和材料

1.1 试验设备

蓄能式真空预压排水系统试验布置如图 3 所示。其中真空室采用不同容积的不锈钢罐体。试验真空泵功率 1.5 kW, 抽气速率 7.2 m³/h。土体出流量通过精度 0.1 g 电子天平实时测量汇聚至排水室的孔隙水质量获得。数显式负压表量程 -100~0 kPa, 精度 0.1 kPa, 可设置真空度上下限值来自动控制真空泵的通断电。根据试抽试验, 真空度上下限值分别设置为 -85 kPa 和 -70 kPa, 在此区间内真空泵停歇。长 10 mm、直径 5 mm 的微型孔隙水压传感器和直径 20 mm、厚度 10 mm 的微型土压力计埋置于土体中深度 200 mm、距排水板水平向 100 mm 处, 分别用于监测土体中孔隙水压和土压力的变化, 且在试验前将孔隙水压计探头充分浸润。土体表面放置有精度为 1 mm 的沉降尺, 用来监测土体的表层沉降量。模拟现场排水板间距 1.2 m 工况, 几何比尺取为 1:3, 装泥桶直径选择 400 mm, 高度 1 500 mm; 排水板宽度取 33 mm, 插板深度分别取 350、500、680、900 及 1 200 mm。各部件间通过硬质 PU 管连通, 土体表面采用密封膜密封, 并在密封膜上方覆盖一层薄膜水, 以防长时间试验中土体水分蒸发产生龟裂缝隙影响密封效果。

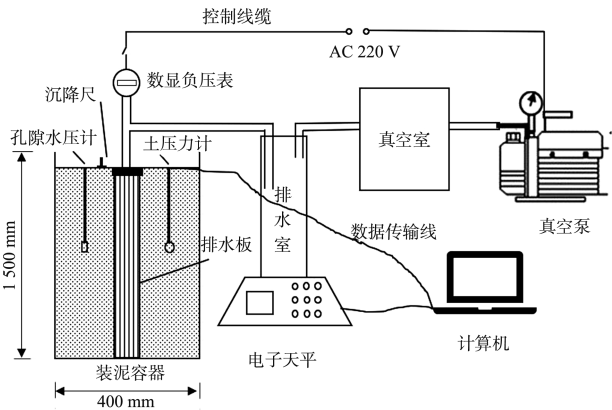


图 3 试验布置

1.2 试验泥沙

试验泥沙取自上海闵行区一处河流的河床, 其中粒径小于 65 μm 的黏性颗粒占比高达 85% 以上。试验前先将泥样烘干粉碎, 去除其中的砾石、

贝壳、树枝杂草等杂物，然后加水并用搅拌机缓慢均匀搅拌，将试验泥样的含水率重塑至 1.5 倍液限。

试验泥沙的粒经 d_{50} 比重 G_s 、密度 ρ 、含水率 w 、液限 W_L 和塑限 W_p 、孔隙比 e 及初始剪切强度 τ 等基本物理性质与力学指标如表 1 所示。

表 1 试验泥沙的基本物理性质及力学指标

| $d_{50}/\mu\text{m}$ | G_s | $\rho/(g\cdot\text{cm}^{-3})$ | $w/\%$ | $W_L/\%$ | $W_p/\%$ | e | τ/kPa |
|----------------------|-------|-------------------------------|--------|----------|----------|------|-------------------|
| 14.42 | 2.72 | 1.88 | 80 | 52 | 24 | 1.46 | 1.06 |

2.3 试验工况

为探究蓄能式真空预压系统的排水固结效率及节能效率，设置 7 组不同真空室容积的蓄能式真空预压排水试验作为对比组，常规真空预压排水试验作为参照组，试验工况如表 2 所示。因时间有限，仅对试验工况 4~8 组的土体孔隙水压、土压力、累计排水量和表层沉降量等做了对比分析。

表 2 试验工况

| 组次 | 工况 | 真空室容积/L |
|-----|----|---------|
| 对比组 | 1 | 1 |
| | 2 | 6 |
| | 3 | 36 |
| | 4 | 56 |
| | 5 | 96 |
| | 6 | 156 |
| | 7 | 171 |
| 参照组 | 8 | - |

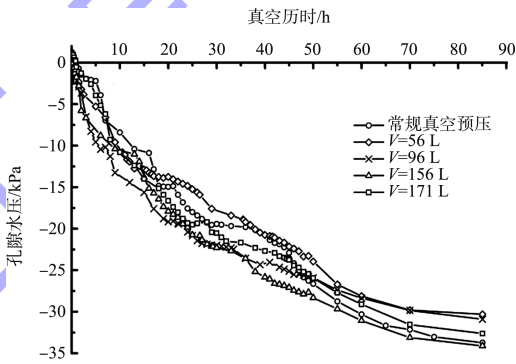
2 试验结果与分析

每组试验持续 85 h，试验过程中记录各工况的真空度、孔隙水压、土压力、累计排水量、土体表层累计沉降量及真空势能耗散周期等。试验结束后，卸载真空载荷，测量不同位置处的土体剩余含水率分布。

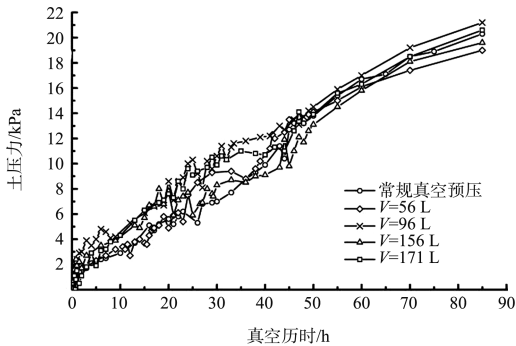
2.1 蓄能式真空预压系统的排水固结效率

对于相同土体体积、不同真空室容积下的孔隙水压 u 、土压力 σ 、累计排水量 Δm 、累计沉降量 S_t 如图 4 所示。结果表明，与常规真空预压排水相比，蓄能式真空预压排水的孔隙水压 u 、土压力 σ 、累计排水量 Δm 等的变化过程基本相同。真空荷载加载后，土体在较短时间内开始进入出流状态，累计排水量开始进入增长阶段，孔隙水压减小，而土压力则在出流几小时后才开始出现明显变化。这可能是因为真空预压初期的真空荷载

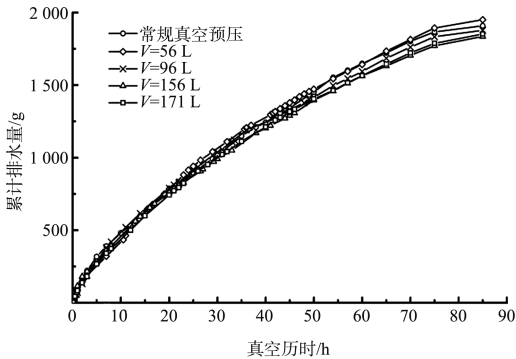
主要由土体中的自由水承载；随着排水的持续进行，土体骨架才渐渐承受真空荷载，土压力增大。蓄能式真空预压与常规真空预压排水的累计沉降量变化趋势相同，但各真空室容积下的最终沉降量略小于常规真空预压排水，整体呈现出真空室容积越大，沉降量越小。



a) 孔隙水压随真空历时变化



b) 土压力随真空历时变化



c) 累计排水量随真空历时变化

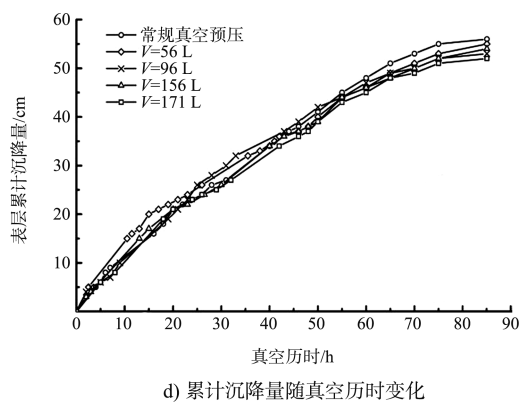


图 4 不同工况下试验参数随真空历时变化

此外, 采用烘干法测量试验结束后的含水率沿排水板径向分布, 结果见图 5。含水率测量分别选取土体表层和深 20 cm 处土层, 每层土体分别在排水板径向距离 0 cm(排水板所在位置)、10 cm 和 20 cm(边缘处)选取 5 个测点。结果显示采用蓄能式真空预压和常规真空预压排水后, 各工况下土体内部含水率分布基本一致, 整体表现出以排水板为中心沿径向向边缘处递增, 表层土体含水率普遍低于 20 cm 深度相同测点处的含水率, 且相同测点处的含水率值最大相差约 3%。这是由于排水板板心处真空度最大, 该处含水率降幅最大, 固结度最高; 而土体的低渗透性使得真空度沿径向和垂向向土体传递过程中存在衰减, 故远处土体的固结效率低于板心处。

综上所述, 蓄能式真空预压系统对土体的排水固结效率存在一定影响, 且对表层的影响大于深部, 但相较于常规真空预压系统差别不大。采用该系统加固土体能够达到理想的固结效果。

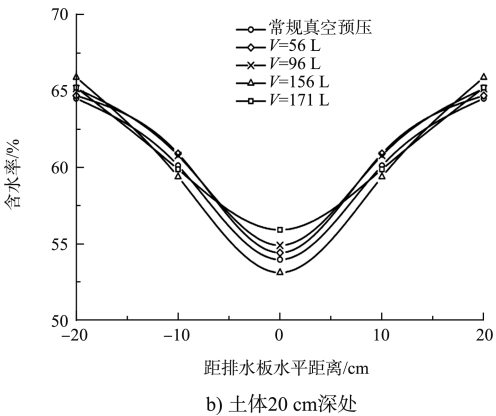
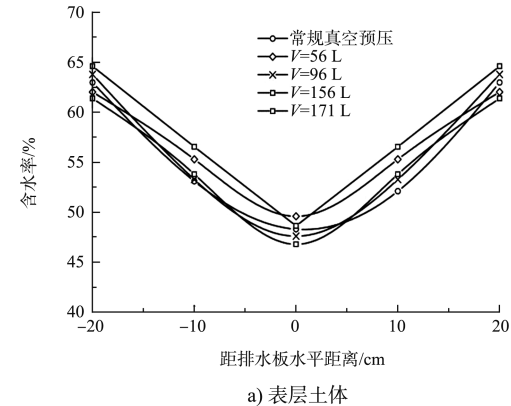


图 5 土体含水率沿排水板径向分布

2.2 蓄能式真空预压系统的节能效率

以工况 4~8 为例, 各真空室容积下的真空度随真空预压历时变化曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出, 真空室容积会直接影响真空泵的单次抽真空运转时长和停歇时间, 进而影响真空泵的耗能和真空势能的耗散周期。真空室容积越大, 真空势能耗散周期越长, 亦即真空泵的单次停歇时间越长, 相同真空预压历时内真空泵运转次数越少, 耗能越低。例如, 对于真空室容积 56 L 和 96 L 分别经过约 57 h 和 80 h 后真空度便降至下限值, 需再次开启真空泵抽真空; 而真空室容积更大的 156 L 和 171 L 真空度下降持续时间更长。然而, 真空室容积越大, 真空泵单次抽真空至真空度上限值的运转时长也越长, 耗能越多。

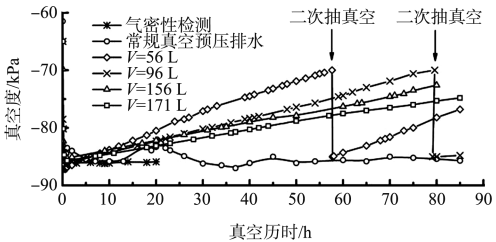


图 6 真空度随真空预压历时的变化

将真空度从下限值抽至上限值, 并耗散至下限值的时长称为一个周期。一个周期内, 蓄能式真空预压系统仅真空泵抽真空蓄能阶段产生耗能。这里, 定义无量纲参数—能耗比 η 来表征蓄能式真空预压系统相对常规真空预压系统的能耗高低, 其定义式如下:

$$\eta = \frac{p t_w}{p(t_w + t_s)} = \frac{t_w}{t_w + t_s} \tag{1}$$

式中： t_w 为一个周期内真空泵将真空度从下限值抽至上限值的运转时间； t_s 为一个周期内真空度从上限值降至下限值时真空泵的停歇时间； p 为真空泵功率。

由式(1)可见，能耗比 η 越小说明 t_w 越小或 t_s 越大，系统耗能越少，节能效果越突出。

蓄能式真空预压系统的真空泵总能耗为：

$$W = p t_0 + \sum_0^n (p t_w) \tag{2}$$

式中： t_0 为真空泵将真空度从初始状态 0 抽至上限值的首次运转时间； n 为真空泵首次停歇起至试验结束时真空泵的运转总次数。

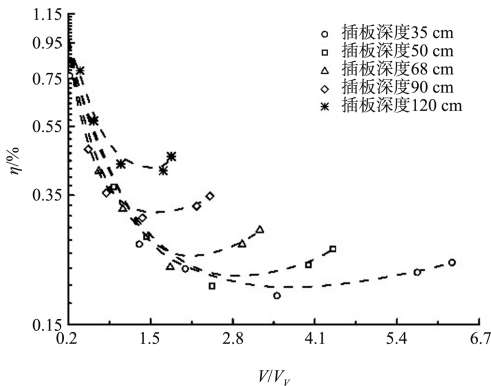
试验过程中各工况真空室容积 V 、试验时长内真空泵的运转次数 n 、能耗比 η 及真空泵总能耗 W 如表 3 所示。

表 3 各工况真空泵的耗能结果

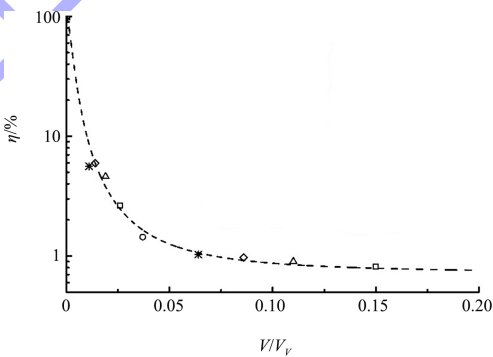
| 工况 | V/L | t_w/h | t_s/h | $n/\text{次}$ | $\eta/\%$ | $W/(\text{kW}\cdot\text{h})$ |
|----|-------|---------|---------|--------------|-----------|------------------------------|
| 1 | 1 | 0.01 | 0.33 | 253 | 2.94 | 4.55 |
| 2 | 6 | 0.03 | 2.43 | 34 | 1.32 | 2.45 |
| 3 | 36 | 0.07 | 24.50 | 2 | 0.30 | 0.97 |
| 4 | 56 | 0.10 | 45.83 | 1 | 0.22 | 0.9 |
| 5 | 96 | 0.13 | 73.17 | 1 | 0.18 | 0.95 |
| 6 | 156 | 0.20 | 96.33 | 0 | 0.21 | 0.75 |
| 7 | 171 | 0.28 | 102.50 | 0 | 0.23 | 0.75 |
| 8 | 常规法 | 85.00 | 0 | 连续 | 100.00 | 127.50 |

从表 3 可以看出，常规真空预压系统在 85 h 内的总能耗为 127.5 kW·h，蓄能式真空预压系统总能耗最大不超过常规真空预压系统的 3%。并且，真空室容积越小，能耗比 η 越大，耗能越多。

为便于分析并考虑土体孔隙率的影响，对真空室容积做无量纲化处理，分析真空室容积 V 与土体孔隙体积 V_v 的比值和能耗比 η 的关系，其中土体孔隙体积等于土体体积与孔隙率的乘积。对于功率为 1.5 kW、抽气速率 7.2 m³/h 的真空泵，图 7 为不同体积比 V/V_v 下的能耗比 η 。各组工况的试验时间设置为从真空泵抽真空开始至真空度从 -85 kPa 耗散至 -70 kPa 的持续时间。



a) 不同插板深度



b) 拟合曲线

图 7 能耗比 η 随 V/V_v 变化

由图 7 可看出，在试验条件下真空室的加入显著降低了真空预压系统的能耗，且各工况下能耗比 η 均随着体积比(真空室)的增大而减小。当体积比 V/V_v 超过 20% 时，能耗比 η 将小于 1%，意味着节能效率高达 99%。但体积比达 20% 时真空室需要相当大的占地空间，实际工程中难以操作且不现实，通常系统节能 30% ~ 40% 以上就已相当可观。因此，这里主要对 V/V_v 小于 20% 的情况进行讨论。对试验结果进行拟合，发现能耗比 η 与相对体积比 V/V_v 满足式(3)：

$$\eta = 0.007 + \frac{1}{1 + 3.9 \times 10^4 \left(\frac{V}{V_v} \right)^{1.82}} \tag{3}$$

据此推算真空室容积大于土体孔隙体积约 3% 时, 蓄能式真空预压系统相对于常规真空预压系统的节能效率将提高 50% (或耗能降低 50%), 其节能效果明显。

3 结语

1) 蓄能式真空预压排水系统将真空泵抽真空的机械能转化为真空势能并存储在真空室中, 根据系统真空度控制真空泵的运转, 使真空泵在一个稳定的真空度区间内停歇, 减少真空泵运转频率和单次运转时间, 从而实现高效节能。

2) 真空室对土体的排水固结效率存在一定影响, 且对表层的影响大于深部, 但与常规真空预压系统差别不大。采用蓄能式真空预压系统也能使土体达到理想的固结效果。

3) 真空室容积与系统的节能效率密切相关。在试验条件下, 当真空室容积大于土体孔隙体积约 3% 时, 蓄能式真空预压系统的耗能比常规真空预压系统减少 50%。

4) 蓄能式真空预压系统的节能效率除了与真空室容积有关外, 理论上还与真空度的上下限值、真空泵的性能密切相关。本次研究对这一问题暂未涉及, 有待后续研究。

参考文献:

[1] KJELLMAN W. Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure[C]//Proceedings of a Conference on Soil Stabilization. Boston: MIT, 1952 : 258-263.

[2] INDRARATNA B. Recent advances in the application of

vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilization[J]. Australian geomechanics journal, 2010, 45(2) : 1-44.

[3] KUMAR S G, SRIDHAR G, RADHAKRISHNAN R, et al. A case study of vacuum consolidation of soft clay deposit[J]. Indian geotechnical journal, 2015, 45(1) : 51-61.

[4] ZHUANG Y, CUI X Y. Evaluation of vacuum preloading with vertical drains as a soft soil improvement measure[J]. Soil mechanics and foundation engineering, 2016, 53(3) : 210-217.

[5] 刘国祥, 王松林, 姜云鹏, 等. 真空联合堆载预压加固海相软基的环境效应研究[J]. 水运工程, 2018(9) : 177-180.

[6] 高长胜, 朱群峰. 高性能塑料排水板通水性能模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014.

[7] ZHU W L, ZHANG M X, YU G L, et al. Flow resistance in dredged soil under a vacuum preloading system with vertical drainage boards[J]. Journal of coastal research, 2019, 36(2) : 327-338.

[8] LIU S Y, ZHANG D W, DU G Y, et al. A new combined vacuum preloading with pneumatic fracturing method for soft ground improvement[J]. Procedia engineering, 2016: 143, 454-461.

[9] 周源, 高玉峰. 透气真空排水法对疏浚淤泥表面水的促排作用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(2) : 165-169.

[10] 宋晶. 分级真空预压法加固高粘性吹填土的模拟试验与三维颗粒流数值分析[D]. 长春: 吉林大学, 2011.

[11] 王建华, 刘志, 丁小冬, 等. 新型真空预压法在堆场深厚软土地基处理中的应用[J]. 水运工程, 2017(2) : 160-165. (本文编辑 郭雪珍)

(上接第 187 页)

3) 在施工临时航道建设规模的论证过程中, 除考虑施工工期因素外, 还须结合地形条件、工程投资、海事监管和通航安全等多方面因素综合确定。

参考文献:

[1] 商剑平. 黄骅港航道通过能力的仿真模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.

[2] 吴澎, 商剑平. 沿海港口航道通过能力仿真模型研

究[J]. 中国港湾建设, 2010(S1) : 42-45.

[3] 王更, 许才广. 基于 Flexsim 的深圳港铜鼓航道通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2019(9) : 181-185, 195.

[4] 李绍武, 曾冬, 祁泽鹏. 秦皇岛港航道通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2016(11) : 108-113.

[5] 宁双林, 宋向群, 郭子坚, 等. 单线航道通过能力仿真研究[J]. 水道港口, 2008(3) : 166-169.

[6] 鲁子爱. 港口服务系统仿真与港口规模优化研究[D]. 南京: 河海大学, 2002. (本文编辑 王璁)