

套筒辅助水下真空预压法模型试验研究

周游^{1,2,3}, 郭伟^{1,2,3}, 任宇晓^{1,2,3}, 闫澍旺^{1,2,3}, 郎瑞卿⁴

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;
3. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350; 4. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘要: 水下真空预压技术长期以来因海洋环境中真空压力难以稳定施加, 被限制了其在深水环境中的应用。为解决这一瓶颈问题, 提出了一种新水下真空预压方法, 通过在海洋软黏土中锚固大直径套筒, 作为真空泵的无水作业系统, 从而有效克服了真空泵在海洋环境中压力损失的问题, 实现了深水环境下的高效应用。通过4个模型试验, 对比研究了不同覆水深度下新水下真空预压方法和传统无上覆水真空预压法在加固水下软黏土时的固结效果。结果显示, 新水下真空预压法固结效果显著, 且随上覆水深度的增大加固效果显著提升。上覆水深度为7.2、4.6、1.4 m的试验T1、T2、T3相较于上覆水深为0 m的对照组试验T4的土体平均含水率减少量分别提高了43.8%、31.3%和12.5%, 土体平均不排水抗剪强度分别提高了39.5%、25.7%和8.7%。根据改进Asaoka法, T1、T2、T3、T4试验在40 d后的固结度分别为90.2%、90.2%、92.7%和95.3%。该研究为水下真空预压技术在深水区域的应用提供了有效途径, 具有重要的工程应用前景。

关键词: 水下真空预压; 固结; 地基加固; 海洋软黏土

中图分类号: TU 42

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2026) 04—1262—11

Experiment study on sleeve-assisted underwater vacuum preloading method

ZHOU You^{1,2,3}, GUO Wei^{1,2,3}, REN Yu-xiao^{1,2,3}, YAN Shu-wang^{1,2,3}, LANG Rui-qing⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

4. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The application of underwater vacuum preloading technology has long been limited by difficulties in stabilizing vacuum pressure in marine environments, which restricts its effectiveness in deep-water conditions. To address this bottleneck, this paper proposes a novel underwater vacuum preloading method, which utilizes a large-diameter sleeve anchored in marine clay as the waterless operation system of the vacuum pump, thereby overcoming vacuum-pump pressure loss in the marine environment. Four model experiments compare the consolidation performance of the new underwater vacuum preloading method at different overlying-water depths with a traditional vacuum preloading method that has no overlying water, using underwater soft clay as the test material. Results show that the new method achieves significant consolidation, and the reinforcement effect increases with greater overlying water depth. Compared to the control test T4 with an overlying water depth of 0 m, the reductions in average water content for tests T1, T2, and T3 with overlying water depths of 7.2 m, 4.6 m, and 1.4 m were 43.8%, 31.3%, and 12.5% greater, respectively. The average undrained shear strength of the soil of tests T1, T2, and T3 increased by 39.5%, 25.7%, and 8.7%, respectively, compared to test T4. According to the improved Asaoka's method, the consolidation degrees of tests T1, T2, T3, and T4 after 40 days were 90.2%, 90.2%, 92.7%, and 95.3%, respectively. This study provides an effective approach for applying underwater vacuum preloading technology in deep-water regions, presenting significant prospects for engineering applications.

Keywords: underwater vacuum preloading; consolidation; ground improvement; marine clay

收稿日期: 2025-04-07

录用日期: 2025-08-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52108335, No.51878446, No.52171273, No.42277133)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52108335, 51878446, 52171273, 42277133).

第一作者简介: 周游, 男, 1996年生, 博士, 主要从事海洋软土地基处理方面的研究。E-mail: zhouyou03@163.com

通信作者: 任宇晓, 男, 1991年生, 博士, 副研究员, 主要从事海洋岩土工程方面的研究。E-mail: renyx66@163.com

1 引言

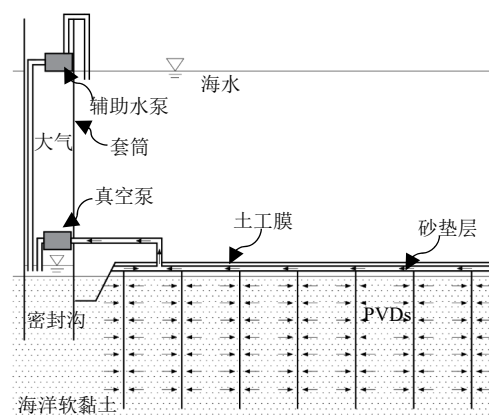
近年来,在沿海地区及长江中下游地区,海底沉管隧道、过江隧道等大型水下工程项目的建设地点常位于深厚的软黏土层。此类土体具有高含水率、高孔隙比、高压缩性和低承载力等特点^[1-3]。此外,黏土层的不均匀分布进一步增加了水下大型结构因差异沉降发生破坏的风险^[4]。因此,在此类大型水下工程施工前,往往需要采用水下地基处理技术加固软黏土层。

真空预压法在同等荷载下相比其他附加荷载预压法更为高效、经济、快捷,特别是在加固海洋软黏土时展现出更好的固结效果^[5-12]。当前水下真空预压技术主要应用于浅水区域、尤其是在潮间带区域的水下软黏土。该方法无需设置临时围堰,简化了施工流程,大幅缩短了施工周期,在疏浚物水下存储等工程中取得了显著成效^[13-18]。有学者通过现场试验探讨了排水板(prefabricated vertical drain, 简称PVD)长度和间距、固结时间、真空压力及上覆水深度等因素对水下软黏土固结行为的影响^[19-21]。

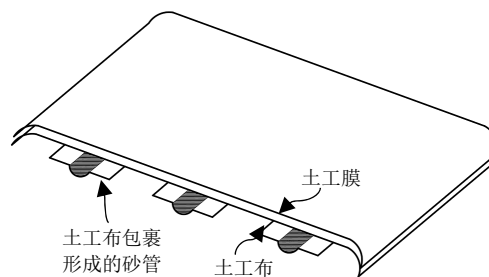
然而,水下真空预压法的固结效果受多种因素的影响,如土工膜的完整性、密封沟的密封效果、真空泵系统的效率、处理土层的厚度以及上覆水深度等^[22-23]。室内模型试验表明,随着上覆水深度增加,真空压力呈非线性下降。当水深超过4 m时,真空压力的衰减率显著增加,随着水深进一步增加,最终稳定在-40 kPa^[24]。也就是说,随着上覆水深增加,水下真空预压法的固结效果减弱,难以达到预期的加固效果,限制了水下真空预压法在深水工程中的应用。

本文提出了一种新水下真空预压方法(underwater vacuum preloading method, 简称UVPM),旨在解决传统方法在海洋环境中因压力损失带来的应用局限性,其示意图如图1(a)所示。不同于传统方法,该系统采用底端插入海洋软黏土中的大直径套筒作为真空泵系统,其中钢管采用直径0.8~1.0 m、长度超出水深4~5 m的规格设计,并贯入海床黏土层3~5 m深度以确保结构稳定性。真空泵安装在套筒内,通过套筒侧壁的预留孔洞配合气动快接头与真空管相连。在预压过程中,抽排水体首先储存在套筒内,随后通过辅助水泵排出,以降低水位,减少水位对真空泵效率的影响,从而确保能够稳定维持-80~-90 kPa的工作负压。在密封系统方面,针对海洋环境的特殊工况,提出了砂管复合膜密封结构,如图1(b)所示。该结构采用3

层复合设计:底层为土工布包裹形成的砂管,中层为高强度固定土工布,顶层采用高性能密封土工膜,各层之间通过缝纫与胶结等工艺实现可靠连接,最终在驳船上预制为整体模块,通过深水铺缆船进行精准沉放定位,并采用预挖沟槽中的海泥压实密封边缘,形成完整的防水气密封体系。这些设计不仅解决了海洋环境中真空泵效率低下问题,还通过套筒内外水头差为真空预压过程提供附加荷载来高效固结海洋软土地基。本文通过3组采用新水下真空预压方法、不同上覆水深的模型试验,以及一组采用传统真空预压方法、无上覆水的对照组模型试验,对比分析真空压力、沉降、孔隙水压力、含水率以及不排水抗剪强度等关键参数的发展,验证新水下真空预压方法的可行性,并系统研究不同上覆水深度对海洋软黏土固结行为的影响。研究成果可为水下真空预压法处理深水区域软黏土地基提供新的思路。



(a) 系统示意图



(b) 砂管复合膜示意图

图1 新水下真空预压方法示意图

Fig.1 Schematic of the proposed new underwater vacuum preloading method.

2 室内模型试验

2.1 试验土样

试验用软黏土取自中国天津临港工业区某项目现场地表以下1~2 m深度。该软黏土的相对密度

为 2.67, 液限为 52%, 塑限为 27%。土样的其他物理和力学性质列于表 1 中。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)^[25]可知, 该海洋软黏土被归类为高液限黏土。根据现场软黏土试样的平均含水率, 将该土样含水率统一调配至 64%, 约为其液限的 1.2 倍。将土样转移到试验箱中, 初始深度为 0.65 m。土样静置 1 d 后, 清理上层水, 最终高度为 0.6 m。

表 1 土样的物理和力学性质

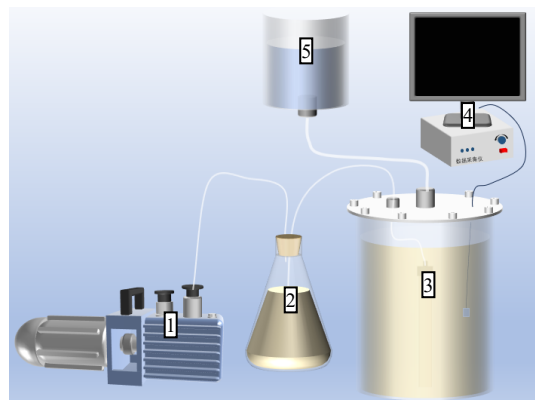
Table 1 Physical and mechanical properties of the soil samples

重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对 密度	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	十字板剪切强度 /kPa
16.2	2.67	64	52	27	25	1.5

2.2 试验装置

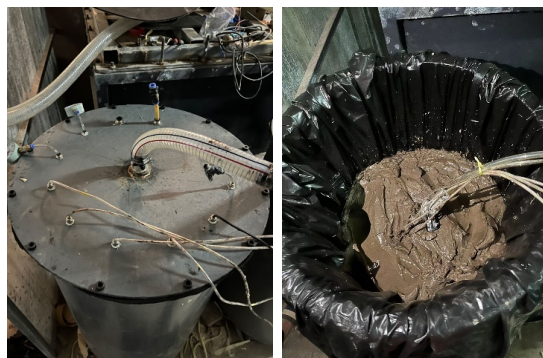
试验装置如图 2 所示, 主要由模型桶、上覆水压力施加系统(水箱)、真空压力施加系统(真空泵和水气分离瓶)和数据采集系统(数据采集仪)4 个部分组成。模型桶采用直径为 0.6 m、高度为 1 m、壁厚为 0.2 cm 的钢制模型桶。密封盖的厚度为 2 cm, 并通过螺栓与模型桶上沿的橡胶垫压紧密封。密封盖上安装了气动快接头和防水电缆接头, 用于将真空探头、孔隙水压力传感器和位移传感器连接至外部设备, 如图 2(b)所示。上覆水压力施加系统包括位于高处的水箱、连接水箱的 PVC 管和自动补水装置组成, 水箱安装在地面上方的指定高度保证水位线高于模型箱不同高度, 并通过内径为 3.8 cm 的 PVC 管与模型箱连接, 用以模拟不同的上覆水深度。为了保持水位恒定, 水箱连接了一个自动补水装置。真空压力施加系统包括真空泵、真空表、真空软管、排水板、土工膜以及水气分离瓶组成。需要指出的是, 将真空泵置于钢桶外部的的方法, 是对图 1 所示 UVPM 的一种简化处理方式, 由外置在箱体外部的真空泵所处大气环境等效替代图 1 所示真空泵所处的套筒内大气环境, 由外置在模型桶外具有一定高度水头的水箱等效替代图 1 所示套筒外的上覆水。真空泵调节控制真空度在 80 kPa 附近, 真空表用于显示真空压力值。真空软管的外径为 8 mm。在模型桶内铺设一层完整的土工膜, 倒入软黏土试样后, 在试样表面铺设一层土工织物, 将土工膜密封以形成一个独立密封的饱和软黏土试样单元, 如图 2(c)所示。之后将 PVD 穿过土工膜插入软黏土试样, PVD 置于模型箱的中心, 宽度为 10 cm、厚度为 0.6 cm。PVD 与土工膜接口用玻璃胶密封, PVD 顶部连接到手型接头, 再通过真空管与水气分离瓶连接。数据

采集系统由计算机、静态应力应变仪、微型孔隙水压力计以及防水激光位移传感器组成。



1—真空泵; 2—水气分离瓶; 3—模型桶; 4—数据采集仪; 5—水箱

(a) 模型装置示意图



(b) 模型桶内部布置图

(c) 模型桶外部布置图

图 2 模型试验装置图

Fig.2 Model test setup

在整个试验阶段测试了土体沉降、真空压力和孔隙水压力。防水激光位移传感器安装在钢制密封盖的下方, 如图 3 所示, 测量范围为 0~60 cm, 用于测量黏土表面的位移变化。3 个真空压力表 V1、V2、V3 分别安装在距地表 10、30 cm 和 50 cm 深处的 PVD 内, 如图 3 所示, 其测量范围为 0~-100 kPa。另有 3 个孔隙水压力传感器, 测量范围为 -100~100 kPa, 安装在距 PVD 10 cm 处, 深度分别为 10、30 cm 和 50 cm, 传感器的具体位置如图 3 所示。真空预压结束后, 在 W1 和 W2 位置取土样测量含水率。真空预压结束后, 在图 3 所示的 U1 和 U2 位置进行了十字板剪切试验, 测量不排水抗剪强度。

3 模型试验结果分析

为了研究新提出的水下真空预压方法中上覆水深度的影响, 进行了 4 组模型试验。上覆水深度分别为 7.2、4.6、1.4 m 和 0 m, 分别对应 T1、T2、

T3 和 T4。当上覆水深度为 0 m 时, 即常规真空预压方法, 作为对照组。各试验组真空系统均施加相同的 -80 kPa 真空压力。

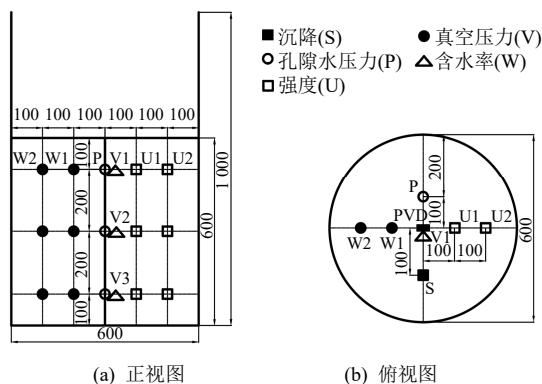


图3 试验测点位置 (单位: mm)

Fig.3 Locations of the measured points (unit: mm)

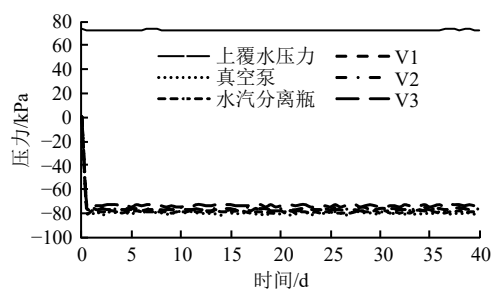
3.1 真空压力和上覆水压力

图 4(a)显示了在 T1 中, 真空泵、水气分离瓶以及 PVD 不同深度处测得的真空压力随时间变化的曲线。T1 中通过高位水箱维持的土表上覆水压力基本恒定, 约为 74 kPa。真空泵和水气分离瓶中的真空压力保持在 -80 kPa 附近。PVD 中的真空压力随深度逐渐减小, 距土体表面 10 cm 处的真空压力为 -77 kPa, 而 50 cm 处的压力则减小至 -74 kPa。这种衰减主要源于 PVD 内孔隙水流动的沿程阻力, 导致真空压力在传递过程中的逐渐减弱。此外, 固结过程中土体引起的 PVD 弯曲或变形进一步加剧了真空压力的衰减^[26]。

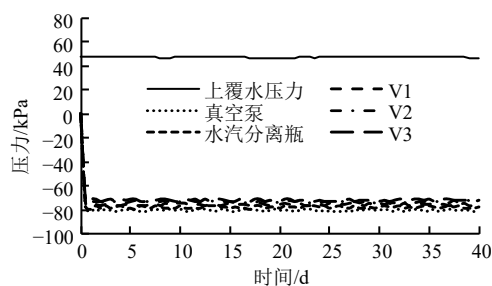
图 4(b)和图 4(c)展示了 T2 和 T3 中的压力变化趋势。与 T1 中观察到的情况类似, 真空泵和水气分离瓶中的真空压力维持在 -80 kPa, PVD 中的真空压力范围介于 $-77 \sim -74$ kPa。然而, 通过调整水箱高度, 膜上方的水压力分别维持在 47 kPa 和 12 kPa 附近。图 4(d)显示了 T4 中的真空压力变化情况。在该试验中, 真空泵和水气分离瓶的真空压力同样保持在 -80 kPa, PVD 中的真空压力范围为 $-77 \sim -74$ kPa, 该试验中未施加额外的上覆水压力。这些结果表明, 在新水下真空预压法中, 上覆水压力不会影响土体中真空压力的施加。

3.2 土体表面沉降

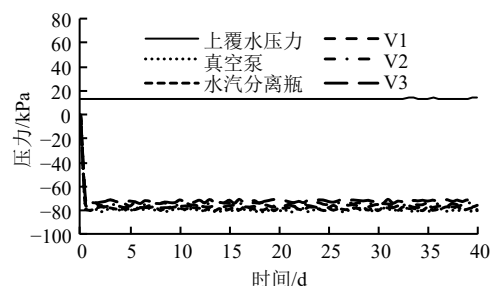
4 组模型试验中沉降随时间变化的曲线如图 5 所示。在 T1 中施加真空压力后, 沉降在前 26 d 迅速增加, 随后逐渐趋于平缓, 最后稳定至 7.2 cm。T2 和 T3 的沉降随时间变化趋势相似, 最终分别稳定在 6.4 cm 和 4.8 cm。在 T4 中观测到的沉降约为



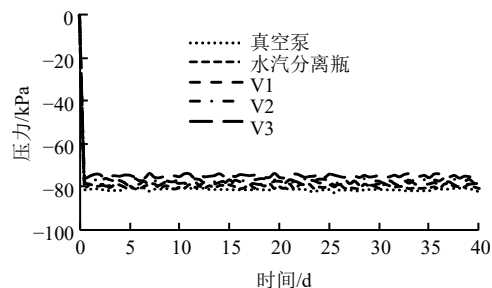
(a) T1



(b) T2



(c) T3



(d) T4

图4 压力变化曲线

Fig.4 Variation of the pressure

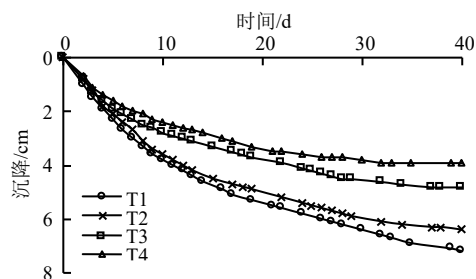


图5 整个过程中地表沉降随时间变化曲线

Fig.5 Time-dependent variation curves of the surface settlement during overall process

3.9 cm。无上覆水条件下的 T4 产生的沉降最小,而覆水深度最高的 T1 产生的沉降最大,约为 T4 的 1.8 倍。从 T4 到 T1,沉降逐渐增加。这表明,在该新水下真空预压方法中,随着上覆水深度的增加,沉降量显著提高。其主要原因是上覆水压力与真空压力共同作用,增加了土体中的有效应力。在 T1 中,上覆水压力(约 74 kPa)与真空压力($-77\sim-74$ kPa)共同形成了较高的固结驱动力,促进了孔隙水的快速排出和土体的固结。而 T2、T3 和 T4 的上覆水压力依次降低(分别约为 47、12 kPa 和 0 kPa),导致有效应力减小,固结效果逐渐减弱,从而使沉降量依次减少。

3.3 孔隙水压力

4 个试验中孔隙水压力的变化规律如图 6 所示。图 6(a)展示了 T1 中不同深度处孔隙水压力随时间的变化。在上覆水压力作用下,初始孔隙水压力在 10、30 cm 和 50 cm 深度处分别为约 75、77 kPa 和 78 kPa。随着真空压力的施加,孔隙水压力迅速消散,并在约 30 d 时逐渐趋缓,40 d 左右接近稳定状态。10、30 cm 和 50 cm 深度处的总孔隙水压力消散量分别为约 132、111 kPa 和 93 kPa。不同深度的孔隙水压力在真空预压后的差值增大,原因是真空压力随深度衰减,表层测点靠近土工布、受较强真空压力,孔隙水排出快,压力降低多;而深层测点真空压力较弱,排水路径长,固结慢,压力降低少,这一现象反映了土体固结的不均匀性。

图 6(b)和图 6(c)分别显示了 T2 和 T3 中的孔隙水压力变化情况。在 T2 中,由于水箱被升至设定高度,在上覆水压力作用下,10、30 cm 和 50 cm 深度处的初始孔隙水压力分别为 48、53 kPa 和 55 kPa;而在 T3 中,相同深度处的初始孔隙水压力分别为 15、16 kPa 和 18 kPa。施加真空压力后,孔隙水压力同样迅速消散,随后逐渐减缓,趋势与 T1 相似。然而,最终的孔隙水压力消散量较 T1 有所减少,T2 减少了约 14.2%,而 T3 减少了约 37%。

图 6(d)展示了作为对照组的 T4 中的孔隙水压力变化情况。在该试验中未施加覆水压力,仅真空压力作用于土体。尽管孔隙水压力的消散趋势与其他试验类似,但其最终消散量相对较小,明显低于 T1、T2 和 T3。从试验结果可见,上覆水深度对孔隙水压力的消散过程具有显著影响。随着上覆水深度的增加,土体孔隙水压力的初始值明显提高,同时其最终的消散量显著增加。这表明,在新的水下真空预压法中,增加上覆水深度有助于提高土体的固结效果。

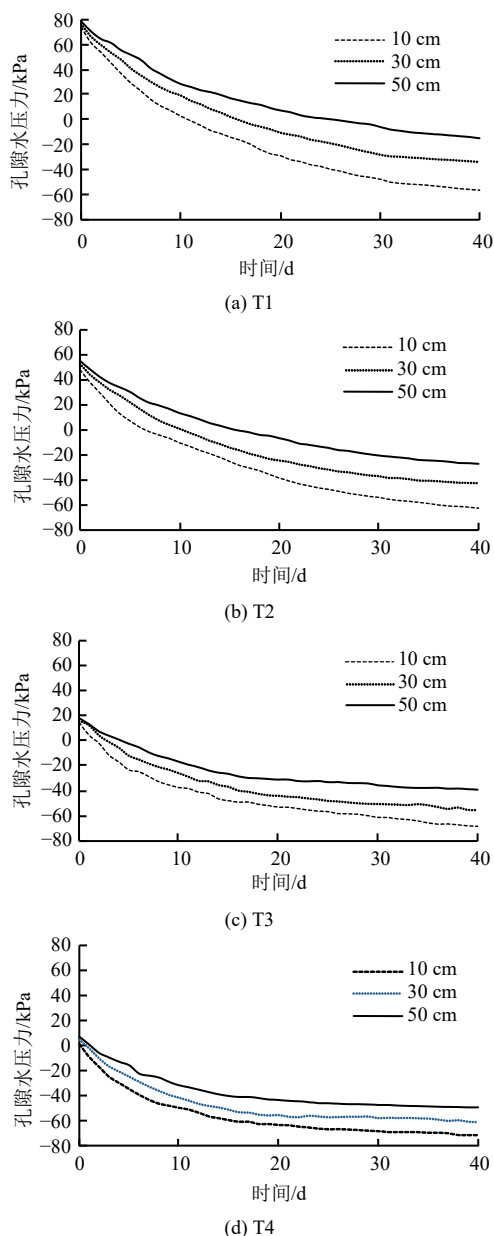


图 6 孔隙水压力变化曲线

Fig.6 Time-dependent variation curves of the pore water pressure

3.4 含水率

在 W1 和 W2 位置的 10、30 cm 和 50 cm 深度处(见图 3)取土样进行含水率测量来评估真空预压后的含水率变化。图 7(a)展示了 T1 在固结前后的含水率变化。土体的初始平均含水率约为 63%。进行水下真空预压后,在 W1 和 W2 位置的含水率均随深度增加而增大。更靠近排水板的 W1 的含水率明显小于远离排水板的 W2 的含水率。W1 和 W2 位置的含水率平均值相较初始含水率减少了约 23%。类似的趋势在 T2、T3 和 T4 中也被观察到,如图 7(b)~7(d)所示。对于 T2、T3 和 T4,试验后测得平均含水率相较初始平均含水率分别减少了约

21%、18%和 16%。这些结果表明, 增加上覆水深对新水下真空预压法加固海洋软黏土具有积极作用。

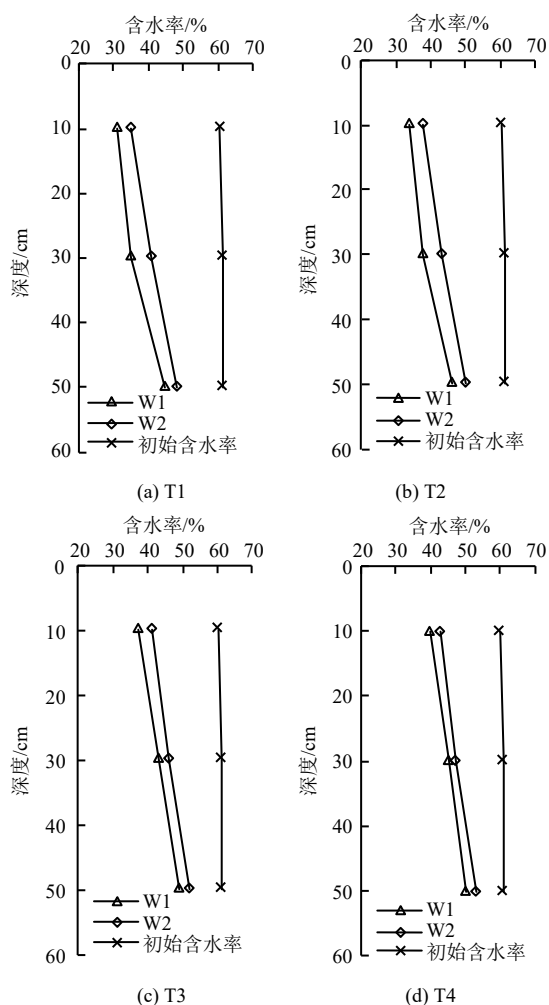


图7 试验前后含水率

Fig.7 Water content before and after underwater vacuum preloading improvement

3.5 不排水抗剪强度

试验后, 在 U1 和 U2 位置进行了十字板剪切试验, T1 的结果如图 8(a)所示, 将试验前测得的初始抗剪强度(平均约为 1.5 kPa)也绘制到图中。可以看出, 水下真空预压试验后, 水下真空预压后上层土体的不排水抗剪强度普遍高于底层土体, U1 位置顶部的不排水抗剪强度比底部高出 60.8%, 同时 U2 位置的顶部比底部高出 84.4%。更靠近排水板的 U1 位置由于固结效率更高, 其强度略高于 U2 位置。U1 位置的平均不排水抗剪强度约为 30.4 kPa, U2 位置约为 27.3 kPa。类似趋势也出现在 T2、T3 和 T4 中, 分别见图 8(b)~8(d)。

对比图 8 的 4 个分图, T1 的平均不排水抗剪强度比 T2 高出约 9%, 比 T3 高出 29.3%, 比 T4 高出

40.9%。这些结果表明, 较大的上覆水深能够显著增强土体的不排水抗剪强度, 在新水下真空预压方法中, 上覆水深的增加能够显著增加固结效果。

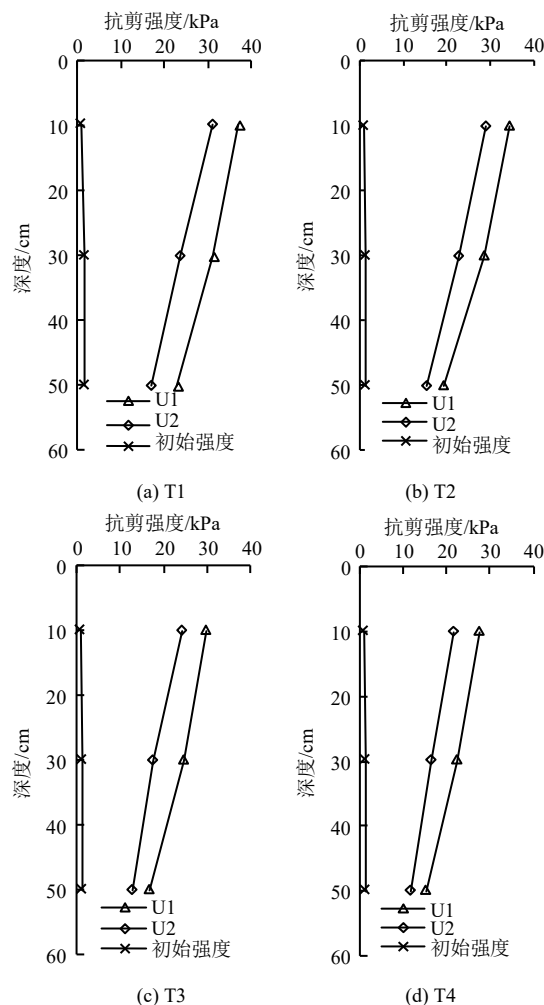


图8 水下真空预压改良前后未排水强度变化

Fig.8 Undrained strength before and after underwater vacuum preloading improvement

3.6 固结度

平均固结度可以通过当前沉降量与最终沉降量的比值来计算, 最终沉降量通常使用观测法进行估算^[27]。常用的两种观测方法是: ①改进 Asaoka 法^[28], 该方法基于沉降的时间序列数据, 通过多个阶段的沉降观测值, 采用线性回归法来估算最终的沉降量; ②改进双曲线法^[29], 该方法利用沉降时间曲线的双曲线特征, 通过拟合曲线预测最终沉降量。

改进 Asaoka 法基于 $(\delta_n)^{1/\xi}$ 与 $(\delta_n-1)^{1/\xi}$ 之间的线性关系来预测最终沉降量, 如图 9 所示。该方法使用一阶近似公式来表达沉降量, 其中 δ_n-1 和 δ_n 是从监测数据中选取的两个连续时刻的沉降值, δ_n 为 t_n 时刻的沉降量, ξ 为曲线拟合常数, 时间间隔 Δt 保持恒定^[28]。利用改进 Asaoka 方法, 通过图 5 中监

测数据估算最终沉降量。通过 $(\delta_h)^{1/\xi}$ 对 $(\delta_h-1)^{1/\xi}$ 关系曲线,采用时间间隔 $\Delta t=3$ d,估算 T1、T2、T3 和 T4 的最终沉降量分别为 7.9、7.1、5.2 cm 和 4.1 cm。30 d 后的平均固结度 $U_{t=30\text{ d}}$ 分别为 81.3%、83.2%、86.9%和 92.9%;而在 40 d 后, $U_{t=40\text{ d}}$ 接近完全固结,详细结果见表 2。

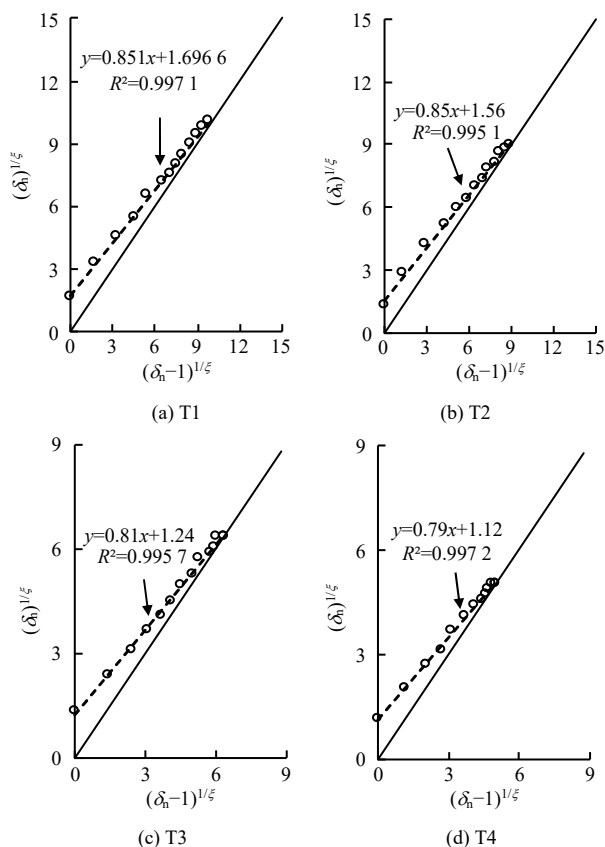


图9 改进 Asaoka 法

Fig.9 Application of a modified Asaoka's observational method

表2 利用实测沉降和孔隙水压力数据的固结度分析
Table 2 Analysis of degree of consolidation based on measured settlement and pore water pressure data

模型	沉降固结度/%						孔压固结度/%		
	改进 Asaoka 法 ^[28]	改进双曲线法 ^[29]	改进双曲线法 ^[29]	改进双曲线法 ^[29]	改进双曲线法 ^[29]	改进双曲线法 ^[29]	Chu 等 ^[30]	Chu 等 ^[30]	Chu 等 ^[30]
	$U_{t=10\text{ d}}$	$U_{t=30\text{ d}}$	$U_{t=40\text{ d}}$	$U_{t=10\text{ d}}$	$U_{t=30\text{ d}}$	$U_{t=40\text{ d}}$	$U_{t=10\text{ d}}$	$U_{t=30\text{ d}}$	$U_{t=40\text{ d}}$
T1	45.7	81.3	90.2	46.0	77.5	87.2	45.5	72.3	76.9
T2	47.9	83.2	90.2	50.9	83.4	90.5	45.7	73.1	77.8
T3	50.2	86.9	92.7	50.7	83.3	86.9	52.5	74.6	79.8
T4	56.2	92.9	95.3	55.4	87.8	90.1	57.9	78.4	82.3

改进双曲线法基于 t/δ 与 t 图中由 α_{60} 和 α_{90} 确定的线性关系来预测最终固结沉降量,如图 10 所示。最终固结沉降量 δ_{ult} 可以表示为 λ/α ,其中 α 是双曲线图中 α_{60} 与 α_{90} 之间线性段的斜率, λ 为线性段的斜率^[31]。通过该方法,T1、T2、T3 和 T4 的

最终沉降量分别估算为 8.3、7.1、5.5 cm 和 4.3 cm。30 d 后的平均固结度 $U_{t=30\text{ d}}$ 分别为 77.5%、83.4%、83.2%和 87.8%;在 40 d 后, $U_{t=40\text{ d}}$ 接近完全固结,该结果与改进 Asaoka 法所得结果一致,详细结果见表 2。

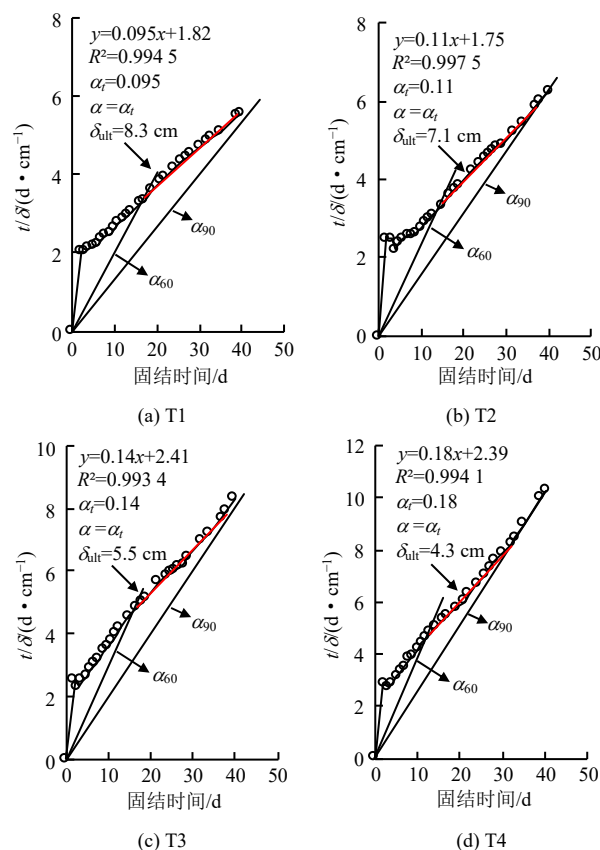


图10 改进双曲线法

Fig.10 Application of a modified hyperbolic observational method

十字板剪切强度试验结果表明,强度提升幅度大的试验组,其计算固结度数值反而略低,这反映了固结度是一个相对于其施加荷载的固结进程指标。例如,在较高水压力和真空压力净压力差下的 T1,即使固结进程尚未达到较高完成度(改进 Asaoka 法下 90.2%,修改后的双曲线法 87.2%),但土体也已表现出显著的工程强度改善,强度提升幅度高达 39.5%。

此外,基于 Chu 等^[30]提出的孔隙水压力分布方法,可以用于估算固结度。通过监测数据绘制孔隙水压力与深度的分布曲线,涵盖初始状态、最终状态以及任意中间状态的变化情况,如图 11 所示。根据孔隙水压力数据计算,T1、T2、T3 和 T4 固结 30 d 后的平均固结度 $U_{t=30\text{ d}}$ 分别为 72.3%、73.1%、74.6%和 78.4%,40 d 后的平均固结度 $U_{t=40\text{ d}}$ 分别为

76.9%、77.8%、79.8%和 82.3%。与沉降法相比, 孔隙水压力法计算的固结度略低, 这主要是由于软黏土在固结过程中渗透系数和压缩系数的非线性变化, 以及 PVD 加固下三维排水路径的复杂性, 例如涂抹效应和井阻作用。此外, 测量位置的差异或潜在的淤堵效应也可能对结果产生一定影响。详细的固结度计算结果见表 2。

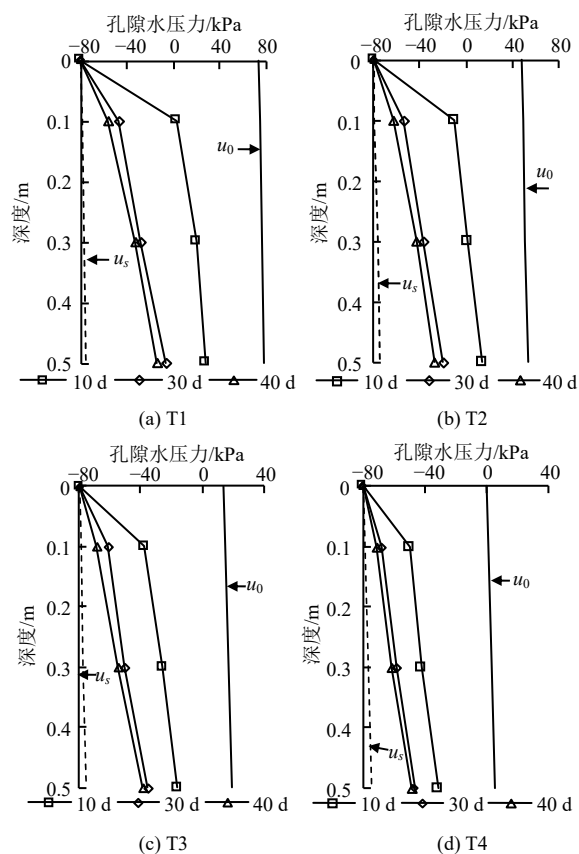


图 11 孔压计算固结度

Fig.11 Degree of consolidation calculated by pore water pressure

4 讨论

本文提出了一种新水下真空预压方法, 旨在提升海洋软黏土地基的加固效率。该系统用锚固于海洋软黏土中的大直径套筒为核心结构, 为真空泵提供无水工作环境, 从根本上解决了真空泵在海洋环境中因静水压力损失而导致效率降低的问题, 从而实现了深水环境下的高效加固应用。

图 12 展示了新型、传统水下及陆上真空预压方法的原理, 包括孔隙水压力和有效应力的变化、系统布局等方面。图 12(a)、12(d)、12(g)对比了新型、传统水下及陆上真空预压方法的系统布局示意图。图 12(a)中, 新水下真空预压系统通过大直径套筒与

排水板 (PVDs) 的合理布置, 确保真空泵在无水环境中高效运行, 消除了海水环境中的压力损失问题, 提升了真空压力的稳定性。图 12(d)则展示了传统水下真空预压系统的布局, 其设计需要克服静水压力 p_0 对真空泵的显著影响, 无论真空泵位于水面平台上还是水底, 都难以避免真空吸力随深度增加而逐渐衰减的问题, 导致系统效率显著降低^[24]。图 12(g)则为陆上真空预压系统的布局示意, 由于不存在水压影响, 系统运行更为稳定, 但其适用范围局限于陆地环境。图 12(b)、12(e)、12(h)分析了 3 种方法下孔隙水压力的变化规律。图 12(b)表明, 在新水下真空预压方法中, 由于真空泵被置于无水环境, 其吸力未受静水压力损失的影响, 孔隙水压力曲线 $u_t(z)$ 从海床表面的 $-u_s$ 非线性下降至处理后海洋软黏土层底部的 $u_t(z)$, 形成较大的孔隙水压力消散梯度, 显著增强了固结效果。相比之下, 图 12(e)中的传统水下真空预压方法, 真空吸力随深度增加而显著衰减, 孔隙水压力梯度减小, 消散量不足, 固结效果较差。而图 12(h)展示了陆上真空预压方法下孔隙水压力的变化规律。由于陆地环境中不存在水深影响, 真空吸力稳定, 孔隙水压力能够充分消散, 固结效果良好, 但无法获得上覆水压力所带来的固结增益。图 12(c)、12(f)、12(i)对比了 3 种方法下正常固结黏土的有效应力变化规律。图 12(c)表明, 新水下真空预压方法通过利用上覆水压力的增益效应, 其有效应力曲线 $\sigma_v'(t)$ 从海床表面的 $u_s + \gamma_w H$ 非线性下降至黏土层底部的 $\sigma_0' + \Delta u$, 其中 $\Delta u = \gamma_w (\Delta h + H)$ 。随着上覆水深 H 的增加, 静水压力 $u_0(z)$ 增大, 真空吸力曲线 $u_s(z)$ 与孔隙水压力曲线 $u_t(z)$ 之间的梯度显著提升, 从而增强了有效应力增长, 固结效果显著提升。而在图 12(f)中, 传统水下真空预压方法的有效应力曲线 $\sigma_v'(t)$ 从海床表面的 $u_s - \gamma_w H$ 非线性下降至 $\sigma_0' + \Delta u$, 其中 $\Delta u = \gamma_w \Delta h$ 。随着水深增加, 静水压力的负面影响使得孔隙水压力梯度减小, 有效应力增长受限, 固结效果较差。图 12(i)则表明陆上真空预压方法中, 由于没有静水压力的干扰, 有效应力变化较为理想, 但其固结效果无法与新水下真空预压方法相比, 尤其是在无法利用上覆水压力增益的情况下。因此, 新水下真空预压方法通过创新设计套筒结构和优化真空泵工作环境, 不仅避免了静水压力对真空吸力的干扰, 还充分利用上覆水压力增益, 显著增大孔隙水压力的消散量和有效应力增长, 在深水环境下对海洋软黏土地基的加固效果远优于传统水下真空预压方法, 同时也在应用范围和固结性能上也优于陆上真空预压方法,

展现出显著的技术优势。

尽管模型试验表明,所提出的新水下真空预压方法相较于传统方法具有更高的效率,但这些试验可能无法全面反映海底环境的复杂动态特性,例如

沉积物成分变化、波浪作用、潮汐力及生物活动等因素的影响。因此,研究结果在实际场景中的适用性以及经济性仍需未来通过现场数据进一步验证。

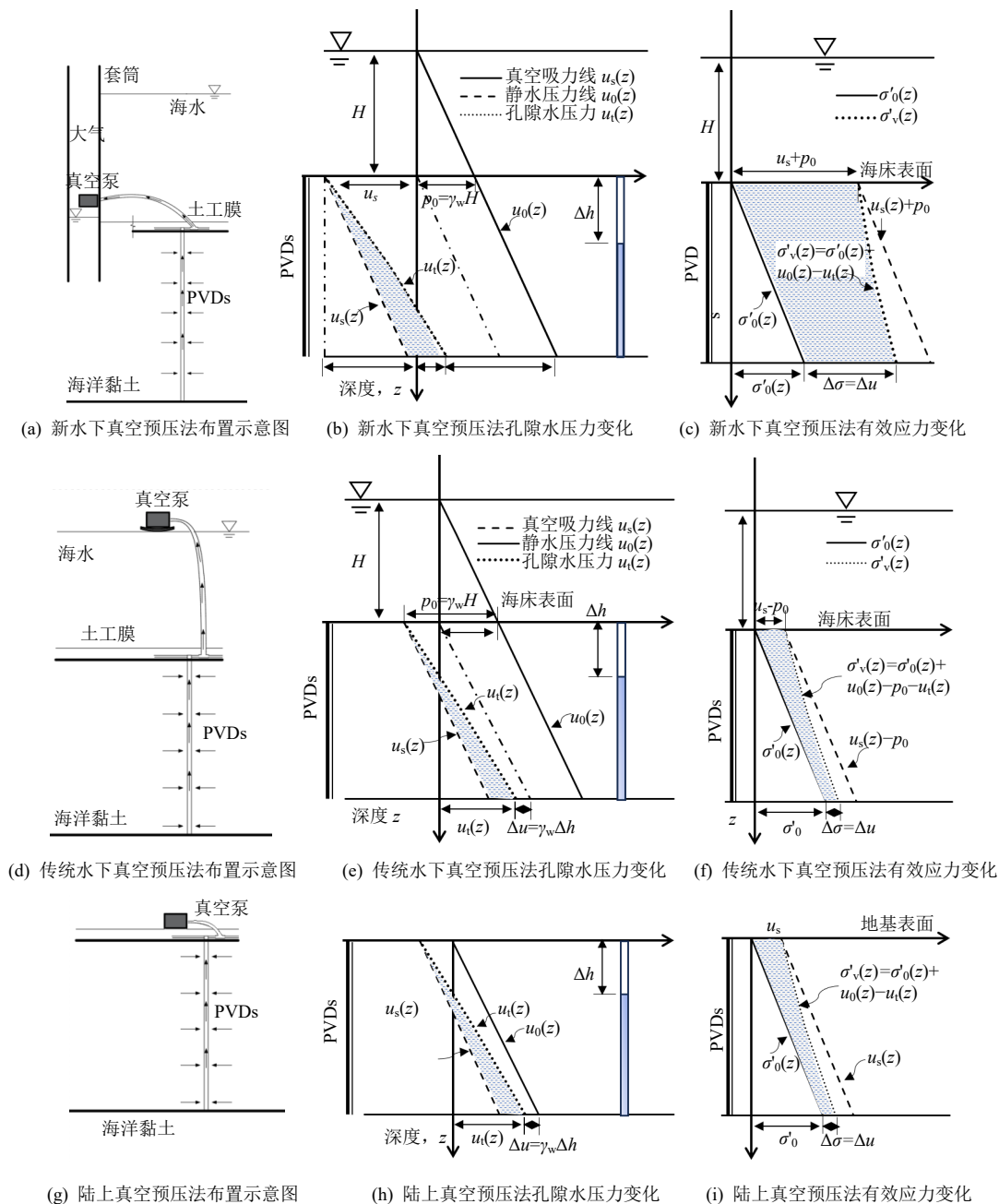


图 12 新型、传统水下及陆上真空预压法的布置图、孔隙水压力与有效应力变化

Fig.12 Layouts, pore water pressure, and effective stress variations for new, traditional underwater vacuum preloading, and land vacuum preloading

5 结 论

本文提出了一种新型水下真空预压方法,采用底端插入海洋软黏土中的大直径套筒为真空泵提供无水工作环境,有效解决了真空泵在海洋环境中因压力损失导致的效率问题。为评估该方法的加固效

果,设计了4组不同上覆水深度的试验,得到以下结论:

(1) 模型试验表明,随上覆水深增大,新水下真空预压法固结效果显著增强。与无上覆水的对照组 T4 相比,上覆水深度为 7.2、4.6、1.4 m 的 T1、T2、T3 经过 40 d 的真空预压处理后,土体平均含

水率降幅提升了 43.8%、31.3%和 12.5%，土体平均不排水抗剪强度分别提高了 39.5%、25.7%和 8.7%。T1、T2、T3、T4 中，基于沉降数据、采用改进 Asaoka 法得到的固结度分别为 90.2%、90.2%、92.7%和 95.3%；而基于孔隙水压力分布的固结度分别为 76.9%、77.8%、79.8%和 82.3%，T1 和 T2 试验固结度较小的原因是其上覆水压力较大、所需固结时间较长。

(2) 模型试验中，所提出的新水下真空预压法，使真空压力稳定达到约 -80 kPa 且不受水深干扰。同时有效利用了上覆水压力，扩大了吸力线与孔隙水压力线之间的梯度，从而提高了有效应力，进一步增强了固结效果。

参考文献

- [1] ZHOU Y, SUN L, REN Y. Consolidation analyses of PVD-improved marine clay considering long-term natural sedimentation[J]. **Applied Ocean Research**, 2023, 141: 103795.
- [2] WANG X Y, SUN H, NIU F J. Microstructure study of natural marine clay in loading and unloading processes[J]. **Engineering Geology**, 2023, 327: 107363.
- [3] 牟聪. 低应力下高含水率疏浚黏土固结性状试验研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
MOU Cong. Experimental investigation of consolidation behaviour for dredged clays with high water contents under low stress levels[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [4] ZHAO K, WANG Q Z, WU Q, et al. Stability of immersed tunnel in liquefiable seabed under wave loadings[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 102: 103449.
- [5] GUO W, ZHOU Y, SUN L Q, et al. Large-strain consolidation of vacuum preloading combined with partially penetrating prefabricated vertical drains[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2024, 48(9): 2450-2467.
- [6] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 201-225.
CAI Yuan-qiang. Consolidation mechanism of vacuum preloading for dredged slurry and anti-clogging method for drains[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(2): 201-225.
- [7] CHU J, GUO W. Land reclamation using clay slurry or in deep water: challenges and solutions[J]. **Japanese Geotechnical Society Special Publications**, 2016, 2(51): 1790-1793.
- [8] 田乙, 吴文兵, 张霖, 等. 堆载-真空联合预压下的未打穿竖井地基固结理论[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 533-540.
TIAN Yi, WU Wen-bing, ZHANG Lin, et al. Consolidation theory of soft foundation with partially penetrating vertical drains under surcharge-vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(3): 533-540.
- [9] 曾玲玲, 王其忠, 林晓鑫. 真空作用下高含水率疏浚泥颗粒迁移规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(8): 1776-1782.
ZENG Ling-ling, WANG Qi-zhong, LIN Xiao-xin. Experimental investigation on particle migration behaviour of dredged clays with high initial water contents under vacuum pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2024, 46(8): 1776-1782.
- [10] 王军, 张凯宇, 倪俊峰, 等. 考虑土体盐碱化影响的注浆絮凝-真空预压法加固疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(4): 801-810.
WANG Jun, ZHANG Kai-yu, NI Jun-feng, et al. Experimental study on consolidation of dredged sludge by grouting flocculation-vacuum preloading method considering the influence of soil salinization[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2025, 47(4): 801-810.
- [11] 雷华阳, 王磊, 刘景锦, 等. 化学改性联合真空预压法加固吹填土试验分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 891-900.
LEI Hua-yang, WANG Lei, LIU Jing-jin, et al. Experimental analysis of chemical modification combined with vacuum preloading method for reinforcing dredger fill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(4): 891-900.
- [12] 蒲诃夫, 潘友富, KHOTEJA Dibangar, 等. 絮凝-水平真空两段式脱水法处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1502-1509.
PU He-fu, PAN You-fu, KHOTEJA Dibangar, et al. Model test on dewatering of high-water-content dredged slurry by flocculation-horizontal vacuum two-staged method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(5): 1502-1509.
- [13] 林澍, 闫澍旺, 付登峰. 考虑上覆水综合作用的水下真空预压沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 241-244.
LIN Shu, YAN Shu-wang, FU Deng-feng. Settlement analysis by considering combined effect of covering water

- in underwater vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.1): 241-244.
- [14] GAO Y B, ZHANG Z. Vertical compression of soft clay within PVD-improved zone under vacuum loading: Theoretical and practical study[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2020, 48(3): 306-314.
- [15] KIYAMA M, OSHIMA A, HIGASHI S, et al. The new accelerated consolidation method combining vacuum consolidation and plastic-board-drain by floating system (PDF) methods[J]. **Journal of the Society of Materials Science Japan**, 2004, 53(1): 37-40.
- [16] LIU F Y, LI H, WANG J, et al. Experimental analysis of a staged vacuum preloading method with PHD-PVD for waste slurry treatment[J]. **Acta Geotechnica**, 2024, 19: 2487-2497.
- [17] NGUYEN B P, DO T H, KIM Y T. Large-strain analysis of vertical drain-improved soft deposit consolidation considering smear zone, well resistance, and creep effects[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 123: 103602.
- [18] SAOWAPAKPIBOON J, BERGADO D T, VOOTIPRUEX P, et al. PVD improvement combined with surcharge and vacuum preloading including simulations[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2011, 29(1): 74-82.
- [19] FENG Y, ZHANG L. The applied research of underwater vacuum preloading method in soft soil foundation[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2014, 580-583: 742-745.
- [20] KWONG A K L, HAN X, SO T C. Constructional aspect of underwater vacuum preloading technique[C]//Hong Kong Institution of Engineers (HKIE) Geotechnical Division Annual Seminar. Hong Kong: HKIE, 2008.
- [21] BHOSLE S, DESHMUKH V. Experimental studies on soft marine clay under combined vacuum and surcharge preloading with PVD[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 15(4): 461-470.
- [22] YEUNG A, SO S, KWONG A, et al. Field-scale constructability evaluation of underwater vacuum preloading[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2009, 27(3): 245-252.
- [23] LIU A M, YAN S W, YIN C Q. Improvement of underwater soft subsoil in tidal zones by vacuum preloading technique[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011, 71-78: 3643-3652.
- [24] 张敬, 刘爱民. 水下真空预压的加固机理分析[J]. **岩土工程学报**, 2007, 29(5): 644-649.
- ZHANG Jing, LIU Ai-min. Analysis of mechanism of consolidation of soil improved with underwater vacuum preloading method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 644-649.
- [25] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50145 — 2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [26] CAI Y Q, QIAO H H, WANG J, et al. Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading[J]. **Engineering Geology**, 2017, 222: 10-19.
- [27] ASAKA A. Observational procedure of settlement prediction[J]. **Soils and Foundations**, 1978, 18(4): 87-101.
- [28] GUO W, CHU J, NIE W. An observational method for consolidation analysis of the PVD-improved subsoil[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2018, 46(5): 625-633.
- [29] GUO W, CHU J, NIE W. Design chart for the modified hyperbolic method[J]. **Soils and Foundations**, 2018, 58(2): 511-517.
- [30] CHU J, YAN S W, YANG H. Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(6): 625-632.
- [31] TAN S A. Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains[J]. **Soils and Foundations**, 1995, 35(1): 101-113.