



## 真空预压对浅层加固效果是否好于深层

陈富<sup>1,2,4,5,6</sup>, 刘爱民<sup>3,4,5,6</sup>, 李鹏<sup>3,4,5,6</sup>

(1. 中交集团粤港澳大湾区创新研究院, 广东 深圳 518000;

2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222;

4. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222; 5. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222;

6. 中交集团岩土工程重点实验室, 天津 300222)

**摘要:** 真空预压是一种广泛应用于软土排水固结的地基处理技术, 该工艺利用抽真空和塑料排水板共同作用增大各个深度土层的有效应力从而加固土体, 但有部分学者认为真空度沿深度衰减从而使真空预压对浅层加固效果好于深层, 给真空预压的设计和施工带来了认识争议。为解决上述认识争议, 从真空附加荷载分布、土层压缩量、不排水抗剪强度3个角度对浅层和深层土层进行对比分析, 结合理论研究和实测数据证明真空预压在各个深度处的附加荷载是相等的, 其对不同深度土层的加固效果是相同的。实际工程中浅层土体的加固质量评价指标如压缩沉降量和不排水抗剪强度的增长比例等大于深部土层, 但并不意味着真空预压对浅层加固效果好于深层。该差异是由于土体自身的初始有效应力状态导致的, 即浅层土体的初始竖向有效应力小于深层土体。

**关键词:** 真空预压; 不同深度; 塑料排水板; 真空度衰减; 加固效果

中图分类号: U652.2; TU472

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0221-07

## Whether improvement effect on shallow layers is better than deep layers in vacuum preloading

CHEN Fu<sup>1,2,4,5,6</sup>, LIU Aimin<sup>3,4,5,6</sup>, LI Peng<sup>3,4,5,6</sup>

(1. CCCC Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Innovation Research Institute, Shenzhen 518000, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

4. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of communication, Tianjin 300222, China;

5. Key Laboratory of Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China;

6. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, CCCC, Tianjin 300222, China; )

**Abstract:** Vacuum preloading is a ground improvement technology for the drainage consolidation of soft soil. This technology combines vacuum pumping and prefabricated vertical drains (PVD) to increase the effective stress of the soft soil at different depth to reinforce the soft soil. However, some scholars believe that the vacuum pressure gradually decreases with depth, thus vacuum preloading has a better reinforcing effect on the shallow layers than on the deep layers, bringing controversy on the design and construction of vacuum preloading. In order to settle this controversy, a comparative analysis is conducted on shallow and deep soil layers from three perspectives: vacuum load distribution, ground settlement, and undrained shear strength. Combining theoretical research and field data, it is proven that the additional load of vacuum preloading at different depths is equal, and its reinforcement effect on soil layers at different depths is the same. In actual engineering, the reinforcement quality evaluation indicators such as ground settlement and the increase ratio of undrained shear strength are larger in shallow layer than in deep layer, but this does not mean that the reinforcement of vacuum preloading is better

收稿日期: 2025-07-21 录用日期: 2025-09-10

作者简介: 陈富(1986—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事真空预压和海上新能源等方面的工作。

for shallow layer than for deep layer. The difference in the above reinforcement quality evaluation indicators is due to the initial effective stress state of the soil itself, that is, the initial vertical effective stress of shallow soil is lower than that of deep soil.

**Keywords:** vacuum preloading; different depths; prefabricated vertical drains; vacuum pressure decay; reinforcement effect

在港口、公路等基础设施建设中经常面临软黏土地基处理问题，目前大多采用排水固结方法将土体内的孔隙水排出而产生压缩固结沉降。相比于堆载预压，真空预压不存在地基加载失稳问题，因此在软黏土地基处理中得到了广泛的应用。

真空预压方法首先由瑞典 Kjellman<sup>[1]</sup> 提出，但美国、日本等国家在现场应用中一直未解决真空度偏低的问题，一直到 1980 年我国一航局科研队在天津新港现场试验中取得成功，关键突破是采用射流泵抽真空和对真空预压区域有效密封<sup>[2]</sup>，并明确真空预压加固机理是负压排水固结<sup>[3]</sup>。

大量真空预压项目证明，真空预压对塑料排水板打设深度范围的各个土层都有加固效果<sup>[4]</sup>，但朱群峰<sup>[5]</sup>、武亚军等<sup>[6]</sup>认为真空度沿塑料排水板会产生衰减，导致真空预压对浅层的加固效果好于深层。部分学者提出了增压法<sup>[7]</sup>、深部多层抽真空<sup>[8]</sup>、反向塑料排水板<sup>[9]</sup>等新方法来解决底部真空度衰减过大的问题，但实际加固效果存疑，并给真空预压的设计和施工带来了认识争议。

本文从真空度大小、土层压缩量、不排水抗剪强度 3 个角度对于浅层和深层土体进行对比，结合理论研究和实测数据对比真空预压对不同深度土层的加固效果，以期真空预压的设计和施工提供参考。

### 1 真空预压工艺与加固机理简介

真空预压的完整排水路径是从土体内部的孔隙水水平渗流至塑料排水板 (prefabricated vertical drains, PVD)，再从塑料排水板竖向移动到地表砂垫层，最终从射流真空泵排出到密封膜之外<sup>[10]</sup>，即  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ ，见图 1<sup>[11]</sup>。

根据负压排水固结机理，真空预压过程中土体总应力不变，孔隙水压力下降，使有效应力增

加。即抽真空后首先快速在塑料排水板内形成负的超静孔隙水压力，从而在土体内部 A 点与塑料排水板 B 点之间形成孔隙水压力差。土体内部的孔隙水不断向塑料排水板水平渗流，使 A、B 点之间的孔隙水压力差不断减小，从而完成固结过程，水平固结过程见图 2。

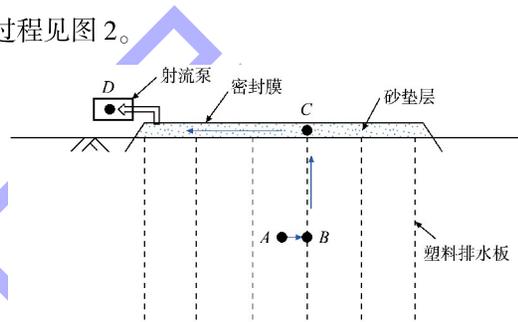


图 1 真空预压完整排水路径  
Fig. 1 Complete vacuum preloading drainage path

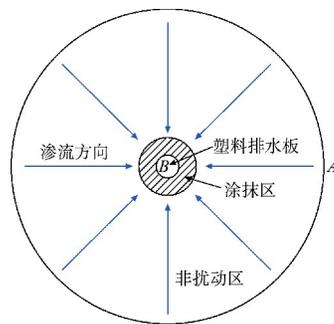


图 2 土体向塑料排水板的水平 (径向) 固结  
Fig. 2 Horizontal (radial) consolidation from soil to PVD

真空预压加固效果的评价指标主要是真空预压期间发生的压缩沉降量和卸载后的不排水抗剪强度。根据固结理论，上述两个评价指标受真空附加荷载大小影响，也与土体自身的初始有效应力状态相关。

### 2 不同深度的真空附加荷载对比

#### 2.1 塑料排水板内部

目前，不同学者对真空度沿塑料排水板是否衰减持有不同观点。在真空预压有限元模拟中，沈

珠江<sup>[12]</sup>设定砂井井底的真空度是顶部的 1/3 并按线性衰减。武亚军等设置塑料排水板(总深度 18 m)内的真空度从顶部的-85 kPa 线性衰减至-31 kPa。但闫澍旺等<sup>[13]</sup>认为真空度不衰减,其设定抽真空瞬间砂井内各个深度和砂垫层中达到设计的同一真空度并保持不变。

在现场监测结果方面,采用真空表和孔隙水压力计对真空附加荷载(真空度或者负压)的观测结果差异很大。通过真空表观测发现塑料排水板内的真空度沿竖向有明显衰减,而采用孔隙水压力计测得真空度沿塑料排水板不衰减<sup>[14-21]</sup>,见图 3。

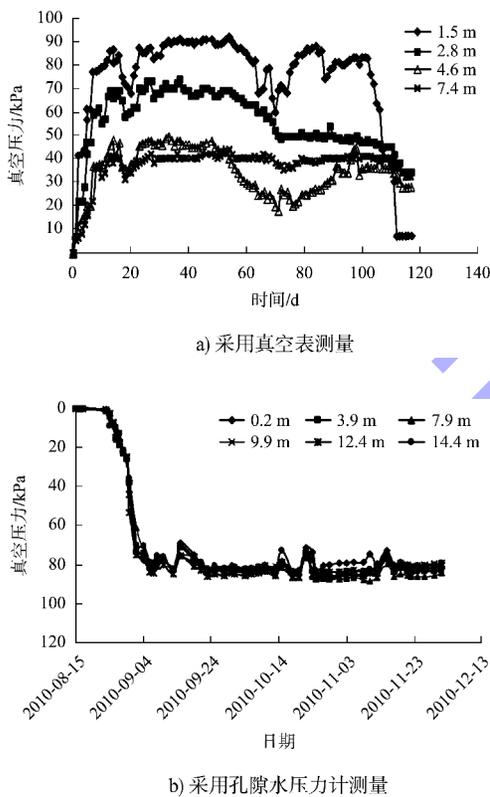


图 3 塑料排水板内的真空压力  
Fig. 3 Vacuum pressure in PVD

实际上,真空表只适合测量地下水位之上的气体状态的真空度,而地下水位以下由于连接管内水柱的影响,其测量真空度(负压)结果是不可信的<sup>[22]</sup>。同时从图 3a)可以发现,用真空表测量出现深处 7.4 m 处真空度在 50 d 后反而大于浅处 4.6 m 处真空度的异常现象,进一步证明真空表不适用于测量地下水位以下的真空度。张功新等<sup>[23]</sup>发现真空表测量膜下 3 m 处(地下水位以下)的真

空度只有实际值的 60%左右,见图 4。

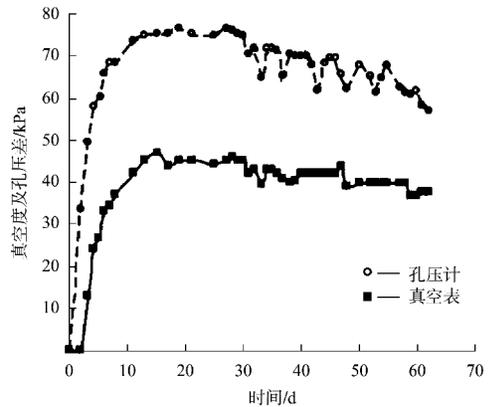


图 4 膜下 3 m 处的真空表和孔隙水压力计测量结果  
Fig. 4 Measurement results of vacuum gauge and pore water pressure transducer at 3 m below the geomembrane

同时文献[18]发现,即使在真空预压过程中塑料排水板发生明显弯折后真空负压沿塑料排水板也不会衰减。综上,真空附加荷载沿塑料排水板深度方向不衰减,因此不同深度的土层在真空预压过程中的附加荷载是相同的。

## 2.2 土体内部

根据负压固结理论,塑料排水板的负压会逐渐沿水平方向向土体内部传递,负压传递过程也就是超静孔隙水压力消散过程,不应理解成真空度在土体内衰减。在真空预压实际工程中发现各个深度的孔隙水压力总消散值基本相等,甚至某些深层土体的孔隙水压力总消散值大于浅层。例如,黄骅港散杂货码头地基处理项目的 B4 区的塑料排水板打设深度约 18 m,沿深度方向分别布设 7 个孔隙水压力计测头,埋设高程分别为 3.0、0.5、-2.0、-4.5、-7.0、-9.5、-12.0 m。通过同时观测总孔隙水压力和地下水位高程,可以得到不同深度的超静孔隙水压力,即超静孔隙水压力等于总孔隙水压力减去地下水位对应的静水压力。为了显示清晰,间隔选取 3 个高程测头(分别是 0.5、-4.5、-9.5 m),超静孔隙水压力随时间变化见图 5。

通过图 5 可以看出,吹填软土在插设塑料排水板之前处于欠固结状态。2011-10-24 完成塑料排水板打设时还有 10~20 kPa 的超静孔隙水压力尚未消散,2011-11-30 开始抽真空时欠固结引起的超静孔隙水压力基本消散完毕,仅剩余 5 kPa 左

右。真空预压开始后，土体内的孔隙水压力不断减小，直至 2012-04-16 真空预压卸载后孔隙水压力快速反弹。真空预压过程中的超静孔隙水压力变化见表 1。可以看出，各个深度土层在真空预压期间的超静孔隙水压力消散值基本相等，随深度逐渐增大，这主要是因为未对孔隙水压力计进行沉降量修正。

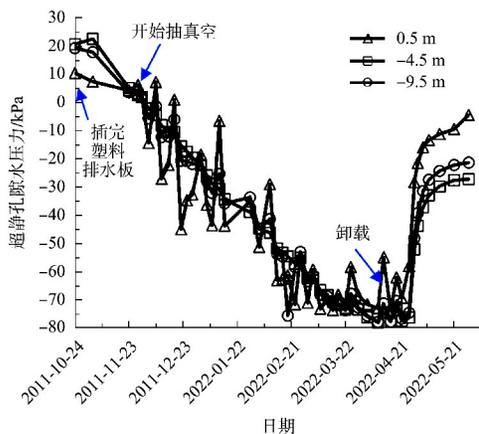


图 5 真空预压前后不同土层的超静孔隙水压力变化  
Fig. 5 Variation of excess pore water pressure at different depth before and after vacuum preloading

表 1 散杂货码头 B4 区不同深度土层超静孔隙水压力变化  
Tab. 1 Variation of excess pore water pressure at different depth in B4 area of bulk cargo wharf

高程/m	真空预压开始时的超孔隙水压力值/kPa	真空预压结束时的超孔隙水压力值/kPa	真空预压期间的超静孔隙水压力消散值/kPa
3.0	5.5	-64.3	69.8
0.5	3.1	-73.6	76.7
-2.0	6.1	-72.4	78.5
-4.5	1.8	-77.5	79.3
-7.0	6.8	-72.7	79.5
-9.5	1.9	-77.7	79.6
-12.0	-2.0	-83.6	81.6

综上，不同深度土体处在相同的真空附加荷载下完成的总孔隙水压力消散值也基本相等。根据固结理论，不同深度的土层加固效果应该是相等的，但为什么有学者认为真空预压加固后浅层的压缩量和十字板抗剪强度等评价指标好于深层<sup>[24]</sup>，这是对评价指标的差异认识不够客观准确，忽视了土体的初始有效应力状态的影响，具体分析分别见第 3 节和第 4 节。

### 3 不同深度土层压缩沉降量对比

在真空预压过程中，随着超静孔隙水压力的消散，土体不断发生压缩沉降。因此真空预压期间发生的总沉降量是评价真空预压效果的重要指标，直接影响工程的工后沉降。

真空预压期间的压缩沉降量可以通过室内压缩试验的  $e-\lg p'$  曲线进行计算。压缩沉降量计算以湛江软土为例<sup>[25]</sup>，其  $e-\lg p'$  曲线见图 6。

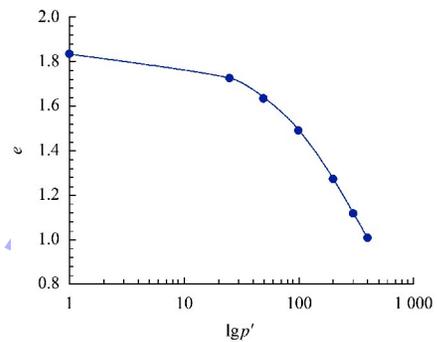


图 6 湛江软土的  $e-\lg p'$  压缩曲线  
Fig. 6 Curve  $e-\lg p'$  of Zhanjiang soft clay

假定地下水位位于地表，软土有效重力密度为  $10 \text{ kN/m}^3$ ，真空预压膜下真空度为  $80 \text{ kPa}$ ，土体达到 100% 固结度后卸载。计算各个土层在真空预压前后有效应力值，然后通过查图 6 的  $e-\lg p'$  曲线得到对应孔隙比  $e$ ，见表 2。可以看出，浅层土体的真空预压前后孔隙比变化幅值大于深层，这主要是因为浅层的初始自重应力小，对应初始孔隙比较大，真空预压附加荷载  $80 \text{ kPa}$  相对于自重应力的增长幅度较大，施加同样真空预压荷载可导致较大的压缩沉降量，这符合土体压缩试验规律，并不意味着真空预压对于浅层的加固效果好于深层。

表 2 不同深度土层真空预压前后的孔隙比  
Tab. 2 Void ratio of soil layers at different depths before and after vacuum preloading

埋深/m	初始自重竖向应力/kPa	加固前孔隙比	100% 固结度时的竖向应力/kPa	卸载后孔隙比	$\Delta e$
2.0	20	1.74	100	1.50	0.24
12.0	120	1.42	200	1.28	0.14
22.0	220	1.24	300	1.12	0.12

#### 4 不同深度土层不排水抗剪强度对比

另一个评价真空预压效果的重要指标是真空预压前后的软黏土不排水抗剪强度增长情况, 可以根据修正剑桥本构模型(modified Cam-clay model, MCC)计算得到。

剑桥本构模型常用于软黏土有效应力分析, 该本构模型中并不直接包括不排水抗剪强度  $S_u$ , 实际上通过引入应力状态参数可推导出  $S_u$ <sup>[26]</sup>, 见式(1)。

$$S_u = R_{OCR} \sigma'_{vi} g(\theta) \cos\theta \cdot \frac{1 + 2K_{0,NC}}{6} \cdot (1 + B^2) \left[ \frac{2(1 + 2K_{0,OC})}{(1 + 2K_{0,NC}) \cdot R_{OCR} \cdot (1 + B^2)} \right]^{\kappa/\lambda} \quad (1)$$

其中,

$$B = \frac{\sqrt{3}(1 - K_{0,NC})}{g(\theta)(1 + 2K_{0,NC})} \quad (2)$$

$$K_{0,NC} = 1 - \sin\varphi'_{cs} \quad (3)$$

$$K_{0,OC} = K_{0,NC} R_{OCR}^{\varphi'_{cs}} \quad (4)$$

$$g(\theta) = \frac{\sin\varphi'_{cs}}{\cos\theta + \sin\theta \sin\varphi'_{cs} / \sqrt{3}} \quad (5)$$

式中:  $R_{OCR}$  为超固结比;  $K_{0,NC}$  为正常固结状态下的水平侧向压力系数;  $K_{0,OC}$  为超固结状态下的水平侧向压力系数;  $\varphi'_{cs}$  为内摩擦角;  $\sigma'_{vi}$  为竖向有效应力;  $\kappa$  为膨胀曲线  $e-\ln p'$  的斜率;  $\lambda$  为压缩曲线  $e-\ln p'$  的斜率;  $\theta$  为洛德(Lode)角,  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  时,  $\theta$  取为  $-30^\circ$ 。

不排水抗剪强度计算以曼谷超软黏土为例, 其修正剑桥模型部分输入参数为  $\varphi'_{cs} = 20.7^\circ$ ,  $\kappa = 0.087$ ,  $\lambda = 0.693$ <sup>[27]</sup>。假定地下水位位于地表, 软土有效重力密度为  $10 \text{ kN/m}^3$ , 真空预压膜下真空度为  $80 \text{ kPa}$ , 土体达到 100% 固结度后卸载。

超软黏土在真空预压前处于正常固结状态, 即超固结比为 1.0。真空预压卸载后竖向有效应力和超固结比见表 3。可以看出, 真空预压前后土体的竖向有效应力数值不变, 但是软黏土由正常固结状态变为超固结状态, 浅层土体的超固结比最大, 从而导致土体的不排水抗剪强度增大。

表 3 不同深度土层真空预压前后的应力状态

Tab. 3 Stress state of soil layers at different depths before and after vacuum preloading

埋深/ m	初始自重 有效应力/ kPa	100%固结度 时的竖向有 效应力/kPa	卸载后的 竖向有效 应力/kPa	卸载后 超固结比
2.0	20	100	20	5.0
12.0	120	200	120	1.7
22.0	220	300	220	1.4

根据式(1)计算各个深度处的真空预压前后不排水抗剪强度, 见表 4。可以看出, 真空预压前后的浅层土体不排水抗剪强度增长比例远大于深层土体, 2 m 埋深处的增长比例分别是 12 和 22 m 处的 5.3 和 9.2 倍。这主要是因为浅层土体的初始竖向有效应力较小从而不排水抗剪强度较小。但实际上不同深度土体的不排水抗剪强度的增长绝对值基本相等, 为  $14.0 \sim 16.7 \text{ kPa}$ 。

表 4 不同深度土层真空预压前后的不排水抗剪强度

Tab. 4 Undrained shear strength of soil layers at different depths before and after vacuum preloading

埋深/ m	初始不排水 抗剪强度/ kPa	真空预压卸载后 不排水抗剪强度/ kPa	增长 绝对值/ kPa	增长 比例/ %
2.0	4.3	18.3	14.0	325.6
12.0	25.7	41.5	15.8	61.5
22.0	47.2	63.9	16.7	35.4

在黄骅港散杂货码头地基处理项目采用十字板剪切试验测定真空预压前后的不排水抗剪强度。沿深度每隔 1 m 进行一次试验, 部分加固区地基内存在粉砂夹层导致无法进行十字板剪切试验, 选取粉砂夹层干扰较小的 A10、A11 区进行展示, 见图 7。

从图 7 可以看出, 真空预压后沿深度方向的十字板抗剪强度数值增长幅值基本一致, 与表 4 的理论公式计算结果基本吻合。其中 A10 区和 A11 区的十字板抗剪强度分别增大  $15 \sim 20 \text{ kPa}$  和  $20 \sim 25 \text{ kPa}$ , 这主要是由不同加固区的土体内摩擦角、初始有效应力状态、膜下真空度等差异导致的。

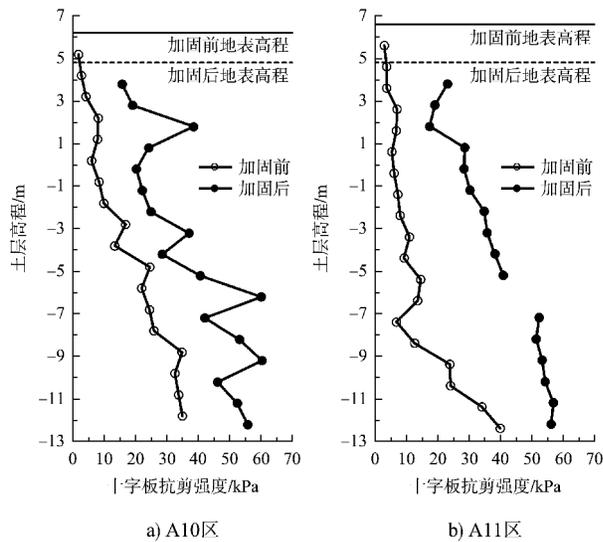


图7 真空预压前后十字板抗剪强度对比

Fig. 7 Comparison of vane shear strength before and after vacuum preloading

## 5 结论

1) 真空预压过程中不同深度的土体处在相同的真空附加荷载下, 完成的超静孔隙水压力消散值也基本相等, 其对不同深度土体的加固效果是相同的。

2) 不同深度土体的压缩沉降量和不排水抗剪强度增长等评价指标存在差异, 并不意味着真空预压对于浅层的加固效果好于深层, 主要是由于不同深度土体自身的初始有效应力状态存在差异。

3) 真空预压前后浅层土体的压缩沉降量大于深层, 主要因为浅层土体的初始竖向有效应力较小、施加同样大小的真空预压附加荷载可产生较大的压缩沉降量。

4) 真空预压前后的浅层土体不排水抗剪强度增长比例大于深层土体, 但不同深度的增长幅值基本相等。

## 参考文献:

[1] KJELLMAN K. Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure[C]//Proceedings of Conference on Soil Stabilization. [S. l. : s. n. ], 1952.

[2] 高志义. 真空预压法的理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

GAO Z Y. Theory and practice of vacuum preloading method[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.

[3] 陈环, 鲍秀清. 负压条件下土的固结有效应力[J]. 岩土

工程学报, 1984, 6(5): 39-47.

CHEN H, BAO X Q. Consolidation effective stresses in soil under the negative pressure condition [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1984, 6(5): 39-47.

[4] 闫澍旺, 侯晋芳, 程栋栋. 真空预压有效加固深度的探讨[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 774-778.

YAN S W, HOU J F, CHENG D D. Effective depth of vacuum preloading for reinforcing soft soil[J]. Journal of hydraulic engineering, 2007, 38(7): 774-778.

[5] 朱群峰, 高长胜, 杨守华, 等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1429-1433.

ZHU Q F, GAO C S, YANG S H, et al. Transfer properties of vacuum degree in treatment of super-soft muck foundation [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2010, 32(9): 1429-1433.

[6] 武亚军, 陈浩, VU Quoc Vuong, 等. 正反向排水板真空预压法在地基处理工程中的应用[J]. 水运工程, 2024(7): 217-225, 238.

WU Y J, CHEN H, VU QUOC V, et al. Application of vacuum preloading method of prefabricated vertical drain and reverse prefabricated vertical drain in foundation treatment engineering [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 217-225, 238.

[7] 金亚伟, 金亚军, 蒋君南. 增压真空预压固结处理软土地基/尾矿渣/湖泊淤泥的方法: CN200810156787. 5 [P]. 2011-01-12.

JIN Y W, JIN Y J, JIANG J N. Method of pressurized vacuum preloading consolidation treatment for soft soil foundation/tailings slag/lake silt: CN200810156787. 5 [P]. 2011-01-12.

[8] 林木水, 周军平, 陈建民, 等. 无砂多层增压式真空分层预压软基加固施工工法[Z]. GGG(闽)A1-2021, 2021.

LIN M S, ZHOU J P, CHEN J M, et al. Construction method for sand free multi-layer pressurized vacuum layered preloading soft foundation reinforcement [Z]. GGG (Min) A1-2021, 2021.

[9] 谢忠武, 高明伟, 温作佳, 等. 含夹砂层吹填淤泥地基正-反向排水板真空预压法室内试验研究[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(4): 49-55, 84.

XIE Z W, GAO M W, WEN Z J, et al. Indoor experimental study on F-RPVD vacuum preloading method for dredged fill foundation with sand-layer [J]. China harbour engineering, 2025, 45(4): 49-55, 84.

[10] CHEN F, TANG A P. Study on drainage mechanism of

- complete path for vacuum preloading based on thermodynamics theory [J]. *Soils and foundations*, 2024, 64(6): 101542.
- [11] 陈富. 真空预压完整排水路径机理及对争议问题的解释[J/OL]. *地基处理*. <https://link.cnki.net/urlid/33.1416.TU.20250430.1651.002>  
CHEN F. Mechanism of vacuum preloading for complete drainage path and explanation of controversial issues[J/OL]. *Foundation treatment*. <https://link.cnki.net/urlid/33.1416.TU.20250430.1651.002>.
- [12] 沈珠江, 陆舜英. 软土地基真空排水预压的固结变形分析[J]. *岩土工程学报*, 1986, 8(3): 7-15.  
SHEN Z J, LU S Y. Analysis of consolidation and deformation of soft subsoil under vacuum [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 1986, 8(3): 7-15.
- [13] 阎澍旺, 陈环. 真空预压法的机理及有限元分析[J]. *港口工程*, 1985, 5(4): 5-10.  
YAN S W, CHEN H. Mechanism and finite element analysis of vacuum preloading method [J]. *China harbour engineering*, 1985, 5(4): 5-10.
- [14] 陈环. 真空预压法机理研究十年[J]. *港口工程*, 1991, 11(4): 17-26.  
CHEN H. Ten years' studies on the mechanism of vacuum preloading [J]. *China harbour engineering*, 1991, 11(4): 17-26.
- [15] 刘佳有, 吴正友, 席平. 国产 SPB—I 型和日本丸红 GEODRAIN—L 型塑板真空度传递性能的现场试验研究[J]. *水运工程*, 1990(12): 1-8.  
LIU J Y, WU Z Y, XI P. In-situ test and study on the vacuum transfer behavior by use of domestic SPB-I type and Japanese GEODRAIN-L type plastic sheetings[J]. *Port & waterway engineering*, 1990(12): 1-8.
- [16] 朱建才. 真空联合堆载预压加固软基机理及工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
ZHU J C. Mechanism and technology of vacuum combined with surcharge preloading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [17] MATSUMOTO K, NAKAKUMA K, SHIMA H, et al. Ground behavior during the consolidation by vacuum preloading of soft clay layer [C]//*Proceedings of the International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice*. [S. l. : s. n. ], 2000.
- [18] 占鑫杰. 市政污泥的化学调理和真空预压联合作用固结机理及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
ZHAN X J. Study on the consolidation mechanism of sewage sludge under combined effect of chemical conditioning and vacuum preloading and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [19] 胡铀, 诸葛爱军, 陈智军. 塑料排水板内部真空压力的现场测试[J]. *中国港湾建设*, 2012, 32(3): 45-48.  
HU Y, ZHUGE A J, CHEN Z J. Field monitoring test of vacuum pressure in prefabricated vertical drains [J]. *China harbour engineering*, 2012, 32(3): 45-48.
- [20] 明经平. 真空预压加固机理及加卸荷变形特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2009.  
MING J P. Research on mechanism of vacuum preloading reinforcement and deformation characteristics of loading and unloading [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Water Resources Science, 2009.
- [21] CHEN L Z, GAO Y B, ELSAYED A, et al. Soil consolidation and vacuum pressure distribution under prefabricated vertical drains [J]. *Geotechnical and geological engineering*, 2019, 37(4): 3037-3048.
- [22] 岑仰润, 俞建霖, 龚晓南. 真空排水预压工程中真空度的现场测试与分析[J]. *岩土力学*, 2003, 24(4): 603-605.  
CEN Y R, YU J L, GONG X N. Field test and analysis of vacuum pressure in vacuum drainage preloading [J]. *Rock and soil mechanics*, 2003, 24(4): 603-605.
- [23] 张功新, 董志良, 莫海鸿, 等. 真空预压中真空度及其测试和分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(10): 57-61.  
ZHANG G X, DONG Z L, MO H H, et al. Measurement and analysis of vacuity under vacuum preloading [J]. *Journal of South China University of Technology (natural science)*, 2005, 33(10): 57-61.
- [24] 周庆礼, 常高奇. 软土真空预压法加固效果分析[J]. *港工技术*, 2022, 59(5): 104-107.  
ZHOU Q L, CHANG G Q. Analysis of reinforcing effect on soft clay by using vacuum preloading method [J]. *Port engineering technology*, 2022, 59(5): 104-107.
- [25] 刘捷华. 湛江地区结构性土压缩性数学模型研究及其固结预测[D]. 广州: 广州大学, 2018.  
LIU J H. Study on mathematical model of structural soil compression in Zhanjiang area and its consolidation forecast [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.
- [26] POTTS D M, ZDRAVKOVIĆ L. Finite element analysis in geotechnical engineering: theory [M]. London: Thomas Telford, 1999.
- [27] CHEN F. Numerical analysis of thermo-consolidation problems [D]. London: Imperial College, 2017.