

# 增压法真空预压加固机理的分析

陈富<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

**摘要:** 本文从固结过程中有效应力和超静孔隙水压力变化角度对增压法真空预压的防淤堵、加压、卸载作用的加固机理进行分析。对于正常固结软黏土, 真空预压过程中发生颗粒移动及其滤膜淤堵的可能性较小。高压充气虽能一定程度上冲刷滤膜防淤堵, 但会减小塑料排水板内的真空度及真空度向深层土体传递。停止高压充气后孔压计读数迅速下降, 与排水固结理论中超静孔隙水压力逐渐消散的规律存在明显的差异, 增压法的高压充气不能施加额外的压力增量。高压充气会使膜下真空度降低, 在某种意义上起了卸载的负面作用, 导致能源浪费和延误工期。与普通真空预压相比, 增压法真空预压加固后土体的孔隙比大、超固结比小、不排水抗剪强度低。

**关键词:** 真空预压; 增压法; 加固机理; 防淤堵; 压力增量; 卸载作用

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)01-0032-08

## Improvement mechanism analysis of pressurization vacuum preloading technique

CHEN Fu<sup>1,2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** In this paper, the improvement mechanism of anti-clogging effect, pressurization effect and unloading effect is analyzed from the perspective of the change of effective stress and excess pore water pressure during consolidation process. The particle movement and clogging effect in the vacuum preloading process for normal consolidation clay are not significant. Although high-pressure inflation gas can scour the filter membrane from clogging to a certain extent, it reduces the vacuum degree in the prefabricated vertical drains and the transmission to a deep layer. The reading of pore water pressure gauge drops rapidly after stopping high-pressure inflation, which is fundamentally different from the gradual dissipation of excess pore water pressure of drainage consolidation theory. Thus, the high-pressure inflation cannot supply extra pressure increment. The inflation process reduces the vacuum degree under the membrane and plays a negative unloading role, resulting in increased energy consumption and construction period. Compared with ordinary vacuum preloading, the soil strengthened by pressurization vacuum preloading has larger void ratio, smaller over consolidation ratio (OCR) and lower undrained shear strength.

**Key words:** vacuum preloading; pressurization method; improvement mechanism; anti-clogging; pressure increment; unloading effect

## 0 引言

自1980年中交一航局在天津新港进行真空预压现场试验成功以来, 真空预压软基处理技术在大面积深厚软黏土地基处理工程中得到了广泛的应用, 随着现场实践的发展, 对真空预压的加固机理

也基本明确, 即负压作用下的排水固结<sup>[1-2]</sup>。软黏土进行真空预压处理一般需要3个月以上的固结时间, 同时由于软黏土的自身特性导致真空预压加固后的工后沉降量比较大。

针对传统真空预压的不足之处, 国内外学者或者技术人员提出了若干真空预压改进工艺, 包括直

排式、分级式、低位式、增压式、电渗式、膨胀气囊式、自密封式、水汽分离式等。增压式真空预压在真空预压的基础上增设增压管向地基内充入高压气体。2019 年实施的江苏省地方标准《气压劈裂真空预压加固软土地基技术规程》(DB 32/T 3643—2019)明确了增压法真空预压的设计和施工方法<sup>[3]</sup>,进一步促进了增压法真空预压的现场应用。

随着增压法真空预压现场应用的进行,对增压法真空预压的加固机理研究也取得了一系列成果。本文从防淤堵、加压、卸载作用三方面分析和总结增压法真空预压的加固机理,相关结论供同行参考。

## 1 增压法真空预压介绍

### 1.1 施工工艺简介

增压法真空预压主要由金亚伟和刘松玉提出<sup>[4-5]</sup>,当真空预压固结度达到 40%后或者真空预压后期的 10~15 d 时,真空泵不停止工作的条件下<sup>[6-8]</sup>,采用空气压缩机及增压管向土体中打气增压。待膜下真空度降低至 40 kPa 后停止打气,待膜下真空度恢复到 80 kPa 后,重复上述过程若干次。

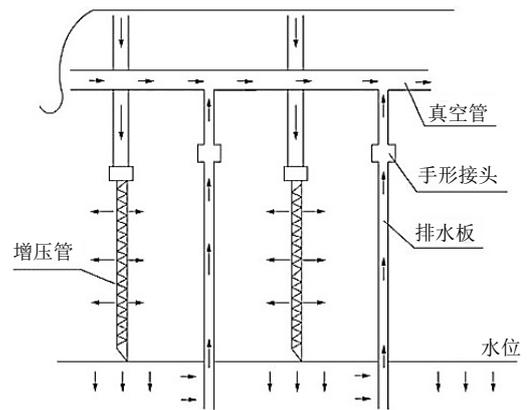
《气压劈裂真空预压加固软土地基技术规程》(DB 32/T 3643—2019)规定了增压管的布置要求,竖向注气管间距应根据注气压力、地基土类型等确定,一般为 3.0~4.8 m,可取塑料排水板间距的 3~4 倍。竖向注气管的打设深度应根据拟劈裂土层深度确定,一般为 5~8 m,气压劈裂点竖向间距宜为 2.0~3.0 m<sup>[3]</sup>。

增压管的布置方式分为间隔和紧贴两种方式,间隔布置方式为增压管位于塑料排水板围成的形心位置,见图 1。紧贴布置方式为增压管紧贴近塑料排水板,或增压管和排水板两者集成一体<sup>[7]</sup>。

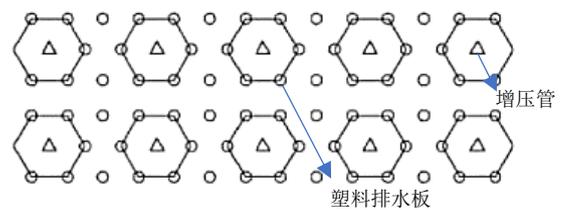
增压法真空预压需要密切观察膜下真空度的降低幅度,及时调整注气压力,避免注气气体顶起密封膜导致失败<sup>[8]</sup>。《气压劈裂真空预压加固软土地基技术规程》(DB 32/T 3643—2019)未给出注气压力的确定依据。实践中注气气体的压力值为 200~800 kPa,注气持续时间约 2~8 h,其经验性较强<sup>[8-11]</sup>,屠红珍等<sup>[12]</sup>指出在不冲破土层的情况下,注气压力越大,促进加固的效果越好。

### 1.2 加固机理

根据现有研究成果,增压法真空预压加固机理包括以下 6 个方面:



(a) 布置断面图<sup>[6]</sup>



(b) 平面布置图<sup>[10]</sup>

图 1 增压法真空预压工艺的布置面

Fig. 1 Diagram of air-boosted vacuum preloading

#### (1) 产生劈裂裂缝, 加速排水固结

金亚伟等<sup>[4]</sup>认为在真空预压过程中采用增压管向土体注入高压气体,可以增强真空渗流场,迫使孔隙水排出。史吏等<sup>[8]</sup>认为增压管与排水板之间产生微小的劈裂裂缝,提高了土体的渗透性,并且该裂缝在增压结束后继续提供额外的排水通道,从而在增压后仍能加快孔隙水压力消散和固结。雷华阳等<sup>[13]</sup>认为注入气体发生断裂形式扩张,导致土体形成微劈裂裂缝,加速土中水的排出,能够提高加固效果。

#### (2) 高压气体将饱和土变成非饱和土,提高抗剪强度

龚永康等<sup>[14]</sup>认为增压法充入高压气体后土体饱和度和含水率均下降,饱和土变为非饱和土,基质吸力增大会使土体抗剪强度大幅提高。

#### (3) 高压气体冲刷滤膜防淤堵

CAI 等<sup>[15]</sup>认为增压过程可以直接冲刷增压板的排水通道和滤膜表面上的细颗粒,起到防止塑料排水板滤膜淤堵的作用。

#### (4) 降水预压

杨子江等<sup>[6]</sup>认为增压气流可以挤迫土中自由水进入塑料排水板,降低地下水位起到降水预压的作用。谢立全等<sup>[16]</sup>认为注气结束后气体排开的水体在重力作用下将会流到注气过程中所形成的非饱和区,降低地下水位。

### (5) 高压气体施加压力增量

蔡袁强<sup>[7]</sup>认为增压系统充入高压气体可以对土体单元施加压力增量 $\Delta\sigma_{bp}$ ,能够实现真空联合堆载的处理效果。沈宇鹏等<sup>[10]</sup>认为增压法真空预压可以在土体深层产生相当于3~5 m土体堆载的压力。杨子江等<sup>[6]</sup>指出增压法真空预压将土体内外压差由普通真空预压的0.015~0.045 MPa提高到0.070~0.120 MPa。雷华阳等<sup>[13]</sup>认为高压气体在土体内部赋存形式以具有一定气压的封闭空间为主,使得注气管与塑料排水板之间的压力差增大。

### (6) 高压气体促进真空度深层传递

杨子江等<sup>[6]</sup>认为增压法可以减缓真空度沿塑料排水板深度方向的衰减,提高深层土体的真空度及其加固效果。

## 2 增压法真空预压加固机理的分析

笔者对增压法真空预压的增强真空渗流场、饱和土变非饱和土、促进真空度深层传递、降水预压等加固机理已进行了分析<sup>[17]</sup>,本文进一步分析高压气体的防淤堵作用、加压作用和卸载作用的加固机理。

### 2.1 高压气体的防淤堵作用

CAI等<sup>[15]</sup>认为真空预压过程中黏土颗粒会发生向塑料排水板的移动,继而在塑料排水板滤膜处淤堵,不利于超静孔隙水压力的消散,可采用高压气体“冲洗”滤膜,起到防淤堵的作用,加快固结速率。

高压气体“冲洗”滤膜的效果受增压管的布置方式影响,以增压管间隔布置和增压管紧贴布置两种情况为例,当增压管间隔布置时,高压气体喷射口与塑料排水板滤膜之间存在较厚的软黏土土体阻隔,因此高压气体很难对较远处的塑料排水板滤膜起到冲刷防淤堵的作用;当增压管紧贴布置时,高压气体“冲洗”滤膜上颗粒,但会减小塑料排水板内的真空度和膜下真空度。

分析增压法真空预压的防淤堵作用,首先要确定真空预压过程中土体颗粒是否发生移动及其淤堵程度。现已有真空预压研究发现颗粒移动一般发生在超高含水量的吹填淤泥中。蔡袁强<sup>[7]</sup>通过PTV技术观测到超高含水量的吹填淤泥在真空预压过程中细颗粒发生移动,该土样的初始含水量106%~159%,是其液限含水量的2.0~3.0倍。娄晨晖<sup>[18]</sup>通过室内模型试验发现高含水率淤泥中的塑料排水板滤膜淤堵更严重。但对于正常固结软黏

土含水量远小于上述研究的超高含水量的吹填淤泥,在自重应力及其他先期固结应力的作用力下,正常固结软黏土内部黏土颗粒已经形成较为稳定且连成一体的土体骨架,因此正常固结软黏土在真空预压的压差作用下,发生颗粒移动及其滤膜淤堵的可能性较小。

由于超高含水量淤泥的真空预压是否符合太沙基排水固结理论还有待商榷,为此本文后续章节只针对正常固结软黏土的真空预压的增压效果进行研究。

### 2.2 高压气体对土体单元的加压作用

联合堆载由于砂石料及费用问题,开发堆载替代技术实现堆载附加应力效果,成为真空预压的研究重点。陈富等<sup>[19]</sup>借鉴扁铲侧胀试验的构造及其加压原理,发明了扁带侧胀联合真空预压地基处理装置,在土体内插入密闭的扁带,然后向扁带内充入高压气体使之侧向膨胀对周围土体加压,实现对周围土体的水平向附加压力。李雪苑等<sup>[20]</sup>基于模型试验对冲填土地基在内部竖向气囊施加的侧向压力产生的沉降固结进行分析研究,发现气囊侧向压力引起的附加应力增量沿竖向分布均匀,该侧向压力对提高土体的固结度有明显的作

用。增压法真空预压的高压气体为开敞式充气,主要表现在增压管为打孔构造,高压气体直接喷射进土体内部,同时增压管侧壁也不会发生侧向膨胀,因此增压法开敞式充气引起的附加应力与上述密闭气囊侧胀的附加应力也将不同。

现行的《气压劈裂真空预压加固软土地基技术规程》没有给出高压气体引起的附加应力的确定方法<sup>[3]</sup>,相关学者对于真空预压过程中开敞式充入高压气体是否能够提供附加应力进行了研究。陈环<sup>[2]</sup>指出大气压力是一种流体压力,不能直接作用于颗粒间成为有效应力。蔡袁强<sup>[7]</sup>认为增压法真空预压充入的高压气体可以对土单元施加各方向均等的压力增量 $\Delta\sigma_{bp}$ ,见图2。

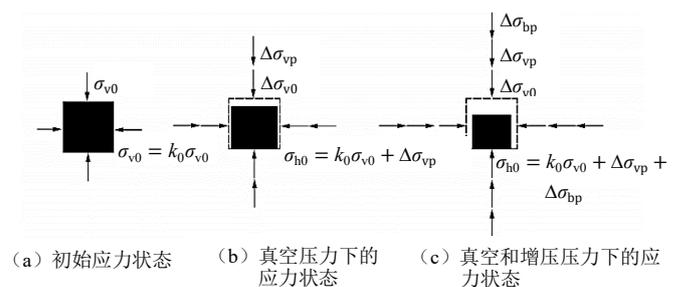


图2 真空和增压压力作用下土单元的应力状态<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Stress states of soil element subjected to vacuum pressure and air-boosted pressure

史吏等<sup>[8]</sup> 通过室内模型试验研究增压法真空预压充入高压气体过程中的孔隙水压力的实时响应, 发现在增压开始后约 60 s 内, 各孔压计读数上升至稳定值, 增压期间孔压在此稳定值上下波动, 在停止增压的同时各孔压计读数迅速下降(大约用时 40 s), 具体见图 3。

由图 3 可知, 增压停止后土体中孔压迅速下降, 即软黏土中超静孔隙水压力快速消失, 传统正常软黏土中超静孔隙水压力难以在图 3 显示的短时间内消散, 因此充入高压气体引起的孔隙水压力的短暂升高并不是引起软土排水固结的超静孔隙水压力, 即高压充气不能够对土体单元施加用于排水固结的附加应力, 即图 2 中的压力增量 $\Delta\sigma_{bp}$ 。

由于真空预压的加固机理是总应力不变条件下的超静孔隙水压力逐渐转换成有效应力, 充入的高压气体很有可能在升高孔隙水压力的同时减小了土体的有效应力, 无法产生真空联合堆载的效果。

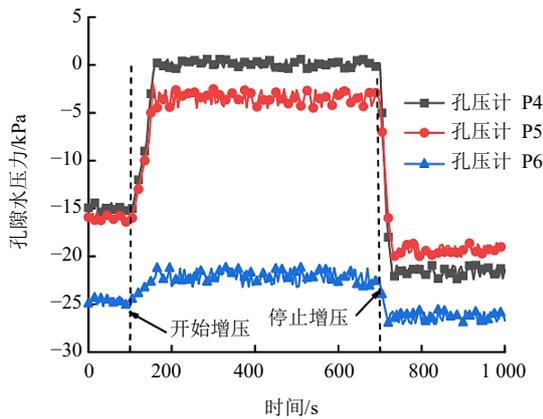


图 3 增压过程中孔隙水压力实时变化<sup>[8]</sup>

Fig. 3 Real-time variations of pore water pressure during the air-boostered period

对于高压气体可能加快渗流速度的作用, 史吏等<sup>[8]</sup> 进一步指出间歇式增压的持续过程较短, 即使增压时长内(每天 10 min)的渗流速度加快, 相对于持续时间 35 d 的固结试验而言, 其提高效果基本可以忽略不计。如果选择增加每天增压时长或者频次, 则可能有顶起密封膜导致真空预压失败的风险, 因此增压法真空预压的高压气体压力值和持续时间选择面临相互矛盾或者制约的难题。增压法真空预压现场施工时主要由操作人员决定高压气体的压力值和持续时间, 经验性较强, 无法事先确定两个参数的具体数值。

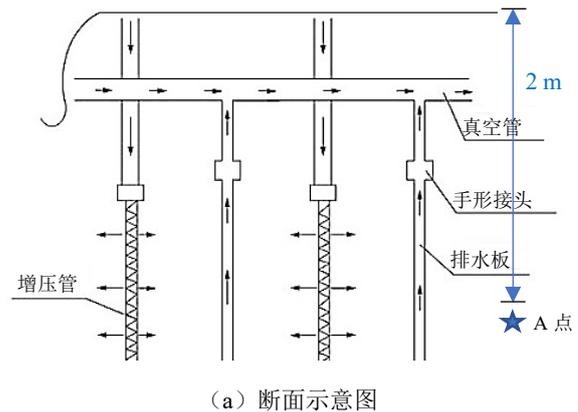
### 2.3 高压气体的卸载作用

上述 2.2 节分析得出增压法真空预压中高压气

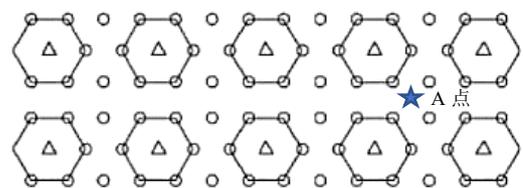
体无法起到“联合加载”的作用, 增压法真空预压还是遵循真空预压的加固机理, 即总应力不变条件下超孔隙水压力(负压)转换为有效应力。充入高压气体是否会降低真空预压效果, 是需要进一步研究的问题。

真空预压影响区是指在真空预压区外一定范围区域内, 该区域会受到区内负压的外扩影响, 发生土体沉降和水平位移, 对附近的建筑物产生不良影响。为保护附近建筑物, 高志义<sup>[1]</sup> 在平行于真空预压区的边线处插入 2 排高压管, 深度与加固区排水板的深度基本一致, 高压管上布置喷射眼, 通过喷射眼向土体内注入高压气体。注入的高压气体可以减弱或者阻断加固区外的负压传递, 因此加固区外的土体在负压压差作用下的渗流固结也将减弱或者消失, 减小土体发生固结沉降和变形, 起到了保护附近建筑物的作用。

增压法真空预压中充入高压气体与高志义<sup>[1]</sup> 采取的影响区喷射气体类似, 也会影响土体真空度(负压)的大小, 降低排水固结的效果。下面结合真空预压过程中土体单元应力和变形变化的算例, 对充入高压气体的卸载作用进行深入分析。该算例的增压管与塑料排水板为间隔式布置, A 点位于 4 根塑料排水板的形心位置(此处无增压管), 埋深为 2 m。地下水位位于地表处, 土的浮重度和水的重度均为 10 kN/m<sup>3</sup>, 假定真空预压的膜下真空度为 80 kPa, 算例的断面示意图见图 4。



(a) 断面示意图



(b) 平面示意图

图 4 计算算例 A 点的示意图

Fig. 4 Location of point A

土体的  $e-\log\sigma'$  压缩曲线可以直观表达真空预压过程中的应力及变形情况, 假定普通真空预压固结度达到 100% 后卸载, 而增压法真空预压在固结度达到 50% 后注入高压气体, 当膜下真空度由 80 kPa 下降至 40 kPa 时停止增压充气并继续抽真空使膜下真空度恢复。两种真空预压过程中 A 点的有效应力及孔隙比变化过程见图 5, 普通真空预压的变化过程见蓝色箭头, 增压法真空预压的变化过程见红色箭头。

一般情况下, 真空预压塑料排水板内首先形成 80 kPa 的负压, A 点的孔隙水在压差的作用下向塑料排水板发生水平向排水固结, 在此过程中, 总应力不变, 静孔隙水压力逐渐变小 (负值), 有效应力增大, 当固结度达到 100% 时, 80 kPa 的真空负压全部转换成 A 点的有效应力。真空预压卸载后土体恢复为初始应力状态。各个状态点的总应力、有效应力和孔隙水压力值见表 1。

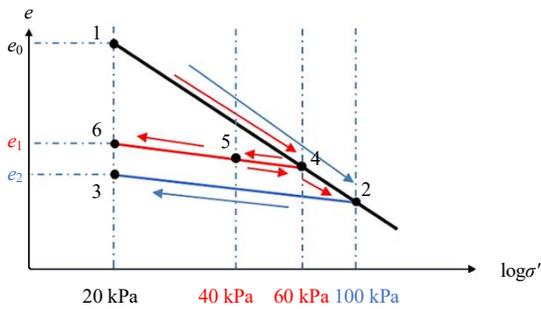


图 5 普通真空预压和增压法真空预压的有效应力及孔隙比变化轨迹

Fig. 5 Variations of effective pressure and void ratio subjected to vacuum pressure and air-boosted pressure

表 1 普通真空预压的应力变化

Table 1 Variations of pressure during vacuum preloading

图 5 对 应点	状态点	总应力 $\sigma/\text{kPa}$	有效应力 $\sigma'/\text{kPa}$	孔隙水压力 $u/\text{kPa}$
1	真空预压前	40	20	20
2	固结度 100% 时	40	100	-60
3	真空卸载后	40	20	20

通过表 1 和图 5 可以看出, 在普通真空预压中 A 点的轨迹为 1→2→3, 对于卸载后的土体而言, 先期固结有效压力为 100 kPa, 卸载后土体的超固结比 OCR 为 5.0, 孔隙比为  $e_2$ 。

增压法真空预压过程如下, 前期不进行增压充气, 在抽真空作用下塑料排水板内首先形成 80 kPa 的负压, 前期抽真空阶段 A 点的孔隙水在压差的作用下向塑料排水板发生水平向排水固结, 在此过程中, 总

应力不变, 静孔隙水压力逐渐变小 (负值), 有效应力增大, 当 A 点的固结度达到 50% 时, 即有 40 kPa 的真空负压转换成有效应力, 即图 5 中的 4 号点。紧接着开始注入高压气体, 膜下真空度由 80 kPa 下降至 40 kPa, 受此影响 A 点的负压受到影响开始变小, 有效应力也相应减小。后续停止增压充气并继续抽真空, 并不断重复此步骤, 最终真空预压卸载后土体恢复为初始应力状态。

由于 A 点位于塑料排水板围成的土体中央, 与排水板之间存在土体的阻隔作用, 增压充气后 A 点的超静孔隙水压力变化幅度小于排水板内的变化幅度, 假定增压后 A 点的减小幅度为远处塑料排水板内真空度减小幅度的 50%, 即 20 kPa (注: 此处假定 A 点负压的变化幅度不会影响最终卸载后超固结比 OCR 的数值)。各个状态点的总应力、有效应力和孔隙水压力值见表 2。

表 2 增压法真空预压的应力变化

Table 2 Variations of pressure during air-boosted vacuum preloading

图 5 对 应点	状态点	总应力 $\sigma/\text{kPa}$	有效应力 $\sigma'/\text{kPa}$	孔隙水压力 $u/\text{kPa}$
1	真空预压前	40	20	20
4	增压充气前 (固结度 50%)	40	60	-20
5	增压充气后	40	40	0
6	真空卸载后	40	20	20

通过表 2 和图 5 可以看出, 增压法真空预压的轨迹为 1→4→5→6 (→4→5 重复次数与增压充气的重复次数相同), 对于卸载后的土体而言, 先期固结有效压力为 60 kPa, 卸载后土体的超固结比 OCR 为 3.0, 孔隙比为  $e_1$ 。

通过表 1、表 2 和图 5 对普通真空预压和增压法真空预压的加固效果对比可以发现, 增压充气过程减小了膜下真空度, 进而减小了真空预压过程中土体的有效应力增长, 造成卸载后土体的孔隙比大、超固结比小。卸载后土体的孔隙比和超固结比是评价真空预压加固效果的重要指标。孔隙比的大小反映了土体的压缩性能, 加固后的孔隙比越大则地基工后沉降越大, 影响后续构筑物的正常运营。超固结比 OCR 直接决定土体不排水抗剪强度  $S_u$ , 继而影响加固后的地基承载力, 不排水抗剪强度  $S_u$  与超固结比 OCR 的关系可以由修正剑桥本构模型推导出<sup>[21]</sup>, 见式 (1)。

$$S_u = \text{OCR} \cdot \sigma'_{vi} \cdot g(\theta) \cdot \cos \theta \cdot \frac{1+2K_0^{\text{NC}}}{6} \cdot (1+B^2) \left[ \frac{2(1+K_0^{\text{NC}})}{(1+2K_0^{\text{NC}}) \cdot \text{OCR} \cdot (1+B^2)} \right]^{\frac{k}{\lambda}} \quad (1)$$

式中： $B = \frac{\sqrt{3}(1-K_0^{\text{NC}})}{g(-30^\circ)(1+K_0^{\text{NC}})}$ ； $K_0^{\text{NC}} = (1 - \sin \phi'_{cs})$ ； $K_0^{\text{OC}} = K_0^{\text{NC}} \cdot \text{OCR}^{\phi'_{cs}}$ ； $g(\theta) = \frac{\sin \phi'_{cs}}{\cos \theta + \frac{\sin \theta \sin \phi'_{cs}}{\sqrt{3}}}$ ；OCR 为超固结比； $K_0^{\text{OC}}$  为水平侧向压力系数； $\phi'_{cs}$  为内摩擦角； $\sigma'_{vi}$  为竖向有效应力； $k$  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，取  $-30^\circ$ 。

以参考文献[22]中的曼谷超软黏土的  $\phi'_{cs}$ 、 $k$ 、 $\lambda$  的具体取值为例输入公式 (1) 计算不同超固结比 OCR 对于不排水抗剪强度  $S_u$  的影响。以埋深 2 m 的 A 点为例，普通真空预压卸载后 A 点的 OCR 为 5.0，计算得到不排水抗剪强度  $S_u$  为 33.91 kPa，增压法真空预压卸载后 A 点的 OCR 为 3.0，计算得到不排水抗剪强度  $S_u$  为 21.36 kPa，因此普通真空预

卸载后的不排水抗剪强度  $S_u$  为增压法真空预压的 1.6 倍。

林岩等<sup>[11]</sup> 在连云港旗台作业区进行了普通真空预压和增压法真空预压的现场比对试验，卸载后的十字板不排水抗剪强度的结果见图 6。

从图 6 表示的埋深 2~3 m 处卸载后十字板剪切强度可以发现，增压法真空预压卸载后的十字板不排水抗剪强度约为 10 kPa，而普通真空预压卸载后的十字板不排水抗剪强度约为 15 kPa，两者的比值与上述公式 (1) 理论计算得出的 1.6 倍接近。

因此从卸载后土体不排水抗剪强度和孔隙比的角度，增压法真空预压充入高压气体在某种意义上起了“卸载”的负面作用，导致其最终加固效果要比普通真空预压差。除上述连云港地区的比对试验外，邹峰等<sup>[23]</sup> 在天津港进行的增压法和普通真空预压的现场比对试验也证实了增压法真空预压的加固效果要比普通真空预压差。对于正常固结黏土的真空预压，增压法高压充气会浪费能源和工期，需要引起足够的重视。

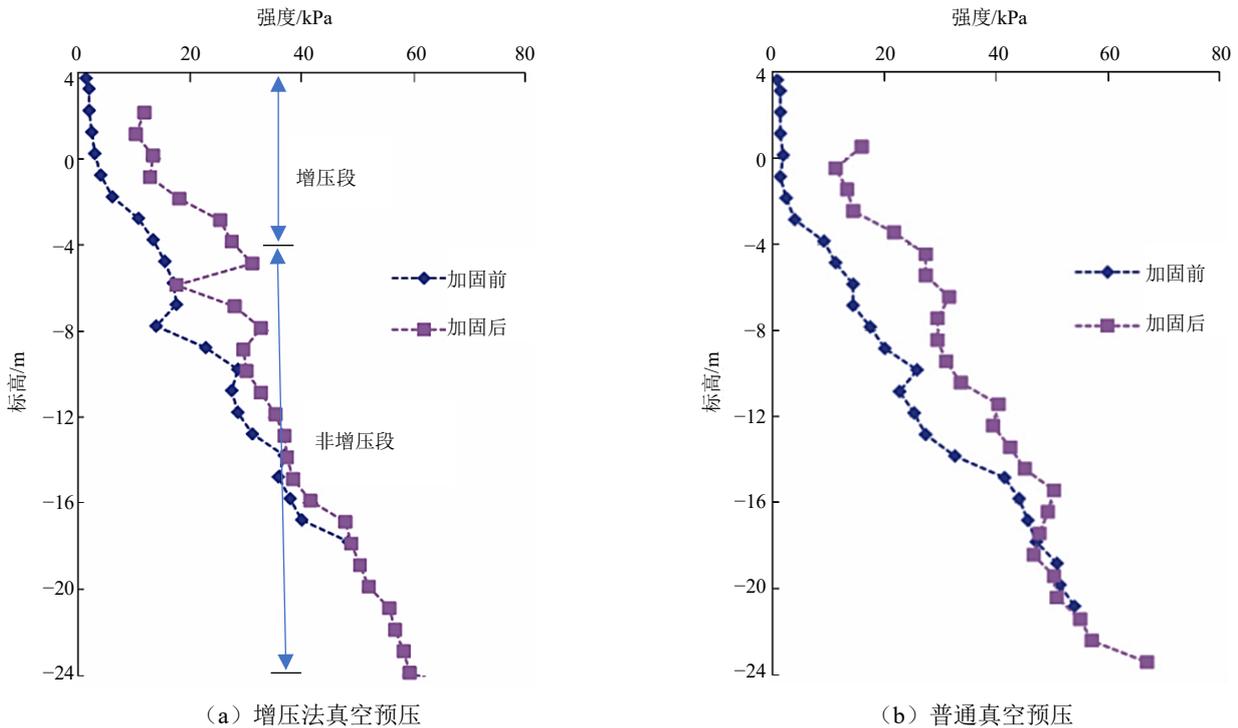


图 6 连云港普通真空预压和增压法真空预压十字板剪切强度对比<sup>[11]</sup>

Fig. 6 Comparison of vane shear test results between vacuum preloading and air-boasted vacuum preloading

### 3 结 论

(1) 对于正常固结软黏土，真空预压过程中发生颗粒移动及其滤膜淤堵的可能性较小。高压气体“冲洗”滤膜的实际效果受增压管的布置方式影

响。当增压管间隔布置时，高压气体很难对远处塑料排水板滤膜起到冲刷防淤堵的作用；当增压管紧贴布置方式时，高压充气虽能直接“冲洗”滤膜防淤堵，但会减小塑料排水板内的真空度和膜下真空度，甚至导致真空预压失败。

(2) 增压法真空预压的高压气体压力不能直接作用于颗粒间成为有效应力。停止增压充气后不能维持住稳定的超静孔隙水压力, 高压充气不能对土体单元施加能够带来排水固结的附加应力, 无法产生真空联合堆载的效果。

(3) 增压充气过程减小了膜下真空度, 在某种意义上起了卸载的负面作用, 可能在一些情况下浪费能源, 并延误工期。对于正常固结软黏土的软基处理, 增压法真空预压与普通真空预压相比, 其加固后土体的孔隙比大、超固结比小、不排水抗剪强度低。

### 参考文献

- [1] 高志义. 真空预压法的理论与实践[M]. 人民交通出版社, 2015.  
GAO Zhi-yi. Theory and Practice of Vacuum Preloading Method[M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [2] 陈环. 真空预压法机理研究十年[J]. 港口工程, 1991(4): 17-26.  
CHEN Huan. Reviews of mechanism of vacuum preloading method[J]. China Harbor Engineering, 1991(4): 17-26.
- [3] 江苏省市场监督管理局. 气压劈裂真空预压加固软土地基技术规程: DB 32/T 3643—2019[S]. 江苏南京: 2019.  
Jiangsu market supervision and administration bureau. Technical Code for Combined Vacuum Preloading with Pneumatic Fracturing Technique to Improve Soft Soils: DB 32/T 3643—2019[S]. Nanjing, Jiangsu: 2019.
- [4] 金亚伟, 金亚军, 蒋君南, 等. 增压式真空预压固结处理软土地基/尾矿渣/湖泊淤泥的方法: CN101418566[P]. 2009-04-29.  
JIN Ya-wei, JIN Ya-jun, JIANG Jun-nan, et al. The Treatment Method for Soft Soil Foundation/Tailing Slag/Lake Silt by Air-Booster Vacuum Preloading: CN101418566[P]. 2009-04-29.
- [5] 刘松玉, 洪振舜, 章定文. 气压劈裂真空法预压法加固软土地基操作方法: ZL200510038644.0[P]. 2007-10-3.  
LIU Song-yu, HONG Zhen-shun, ZHANG Ding-wen. A Combined Pneumatic Fracturing and Vacuum Preloading Method for Soft Ground Improvement: ZL 200510038644.0[P]. 2007-10-3.
- [6] 杨子江, 余江, 刘辉, 等. 增压式真空预压施工工艺研究[J]. 铁道标准设计, 2011(8): 26-31.  
YANG Zi-jiang, YU Jiang, LIU Hui, et al. Pressurized vacuum pre-compacting technology[J]. Railway Standard Design, 2011(8):26-31.
- [7] 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.
- [8] 史吏, 胡东东, 蔡袁强, 等. 增压式真空预压吹填淤泥孔压实时响应及加固机制初探[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 185-193.  
SHI Li, HU Dong-dong, CAI Yuan-qiang, et al. Preliminary study of real-time pore water pressure response and reinforcement mechanism of air-booster vacuum preloading treated dredged slurry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 185-193.
- [9] 曾芳金, 位会星, 王军, 等. 深层增压式真空预压法处理软土地基室内模型试验[J]. 工业建筑, 2014, 44(7): 90-94.  
ZENG Fang-jin, WEI Hui-xing, WANG Jun, et al. Laboratory model test of treating soft soil ground using deep air-boosted vacuum preloading[J]. Industrial Construction, 2014, 44(7): 90-94.
- [10] 沈宇鹏, 余江, 刘辉, 等. 增压式真空预压处理站场软基效果试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(5): 97-103.  
SHEN Yu-peng, YU Jiang, LIU Hui, et al. Experimental study on air-boosted vacuum preloading of soft station foundation[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(5): 97-103.
- [11] 林岩, 李彪, 诸葛爱军. 增压式真空预压在连云港软土地基处理中的应用[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(11): 46-51.  
LIN Yan, LI Biao, ZHUGE Ai-jun. Application of air-boosted vacuum preloading on soft soil foundation treatment in Lianyungang[J]. China Harbour Engineering, 2016, 36(11): 46-51.
- [12] 屠红珍, 徐衍徽, 谢立全. 软基真空预压加固的注气增效机制与数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 600-606.  
TU Hong-zhen, XU Yan-hui, XIE Li-quan. Mechanism and numerical analysis of effect of air injection on vacuum preloading for weak foundation improvement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 600-606.
- [13] 雷华阳, 王鹏, 刘旭, 等. 基于气体运移规律的增压式真空预压法加固机制分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 943-953.

- LEI Hua-yang, WANG Peng, LIU Xu, et al. Influence of gas migration patterns on reinforcement of dredged slurry by air-booster vacuum preloading method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(4): 943-953.
- [14] 龚永康, 郑丽华, 蔡建. 真空预压法处理新近吹填淤泥非饱和带研究[J]. *水运工程*, 2017(2): 155-159.  
GONG Yong-kang, ZHENG Li-hua, CAI Jian. Treatment of newly blown muck unsaturated zone by vacuum preloading[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2017(2): 155-159.
- [15] CAI Y Q, XIE Z W, WANG J, et al. New approach of vacuum preloading with booster prefabricated vertical drains (PVDs) to improve deep marine clay strata[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(10): 1359-1371.
- [16] 谢立全, 李洋, 梁鑫. 真空预压-注气增压加固软土地基的孔压增长与消散机制现场试验[J]. *结构工程师*, 2019, 35(3): 243-251.  
XIE Li-quan, LI Yang, LIANG Xin. Field test of the mechanism of increase and dissipation of pore pressure of air injection on vacuum drainage for soft ground improvement[J]. *Structural Engineers*, 2019, 35(3): 243-251.
- [17] 陈富. 增压法和加热法真空预压新工艺的机理和加固效果探讨[J]. *水运工程*, 2020(8): 172-177.  
CHEN Fu. Discussion on mechanism and treatment effect of new techniques of overpressure and thermal vacuum preloading[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2020(8): 172-177.
- [18] 娄晨晖. 排水板与初始含水率对真空预压加固吹淤泥效果及影响范围试验研究[D]. 浙江温州: 温州大学, 2019.  
LOU Chen-hui. Experimental on the effect of PVDs and initial water content on vacuum preloading reinforcement and range of drainage dredger fill[D]. Wenzhou, Zhejiang: Wenzhou University, 2019.
- [19] 陈富, 张健. 扁带侧胀联合真空预压地基处理装置: CN 205475195[P]. 2016-02-29.  
CHEN Fu, ZHANG Jian. Flat belt side expansion device combined vacuum preloading for ground improvement: CN 205475195[P]. 2016-02-29.
- [20] 李雪苑, 周航, 刘汉龙, 等. 气囊增压联合堆载加固冲填土地基模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S1): 3085-3094.  
LI Xue-yuan, ZHOU Hang, LIU Han-long, et al. Model test study on dredger fill foundation treatment by airbag pressurization combined with surcharge preloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S1): 3085-3094.
- [21] POTTS D M, ZDRAVKOVIC L. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*[M]. London: Thomas Telford, 1999.
- [22] 陈富, 李宁. 基于修正剑桥模型的真空预压表面硬壳层不排水抗剪强度分析[J]. *地基处理*, 2021, 3(4): 271-276.  
CHEN Fu, LI Ning. Analysis of the undrained shear strength of hard crust in vacuum preloading based on Modified Cam Clay(MCC) constitutive model[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2021, 3(4): 271-276.
- [23] 邹锋, 陈运涛, 刘文彬. 不同真空预压施工工艺的应用效果及经济性[J]. *中国港湾建设*, 2018, 38(8): 20-23.  
ZOU Feng, CHEN Yun-tao, LIU Wen-bin. Application effect and economic efficiency of different vacuum preloading technology[J]. *China Harbour Engineering*, 2018, 38(8): 20-23.