

DOI: 10.11779/CJGE201710016

# 真空预压负压分布规律模型试验研究

姜彦彬, 何 宁, 许滨华, 周彦章, 张中流

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029)

**摘 要:** 负压分布规律是真空预压机理研究的重要课题。通过讨论真空预压负压空间分布特点及负压相关概念, 广义地定义了负压, 分析了负压的测量方法及影响因素。设计高 15.0 m 的竖向大比尺室内模型, 开展真空预压负压分布规律试验研究。试验结果表明, 饱和黏土中真空度测量存在滞后效应, 本次试验真空度存在的极限深度为 8.9 m; 膜下真空度稳定后, 零压面之上孔压及板中真空度沿深度呈对称线性分布, 斜率均近似为静水压力梯度; 负压沿深度为分段线性分布, 在地下水位之上的非饱和段因提水做功而衰减, 稳定期负压平均衰减值为 21.4 kPa, 在水位之下排水板埋深范围内基本均匀分布而无衰减, 稳定期平均负压为 -67.0 kPa。结合试验规律及等效排水管中气液两相流的流型分布, 给出了真空预压稳定期竖向排水板中的分段线性负压边界。

**关键词:** 真空预压; 负压分布; 模型试验; 竖向大比尺; 滞后效应; 两相流

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)10 - 1874 - 10

**作者简介:** 姜彦彬(1989 - ), 男, 博士研究生, 主要从事软土地基加固方面的研究。E-mail: 903885593@qq.com。

## Model tests on negative pressure distribution in vacuum preloading

JIANG Yan-bin, HE Ning, XU Bin-hua, ZHOU Yan-zhang, ZHANG Zhong-liu

(Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The rule of negative pressure distribution is an important subject in the studies on vacuum preloading mechanism. By discussing the spatial distribution characteristics of vacuum preloading and the associated concepts, the negative pressure is defined in a broad sense, and the methods and influencing factors for the negative pressure measurement are analyzed. The tests are carried out, with a well-designed large scale indoor model 15 m in vertical height, to study the negative pressure distribution in vacuum preloading. The test results show that there is hysteresis effect in vacuum measurement in saturated clay soil, and the limit depth where vacuum exists is 8.9 m. The pore water pressure and vacuum degree in drain board exhibit a symmetrical linear distribution above zero pressure plane at the vacuum stable stage, and the slope is similar to hydrostatic pressure gradient. The negative pressure distribution along the depth is of piecewise linear type, due to the energy consumption in water lifting, attenuation is found in the unsaturated soil above the underground water level, and the average attenuation value is 21.4 kPa in the stable period. The negative pressure is uniform with no attenuation under the average water level, and the corresponding average negative pressure is -67.0 kPa within the depth scope of drainage board in the stable period. Based on the experimental results and the flow pattern distribution of gas-liquid two-phase flow in the equivalent drainage tube, the piecewise linear negative pressure boundary of the vertical drainage board in the stable period of vacuum preloading is put forward.

**Key words:** vacuum preloading; negative pressure distribution; model test; vertical large scale; hysteresis effect; two-phase flow

## 0 引 言

真空预压是排水固结地基处理方法的一种, 广泛应用于中国沿海、沿江地区软基处理及吹填造陆超软土处理工程, 其理论及技术研究是目前岩土工程领域的热点问题之一。真空预压技术通过真空发生装置及密封系统在密封膜下形成稳定负压, 借助排水系统传递负压使地基排水固结, 实现地基加固。地基中负压分布(包括排水系统及土中分布)直接决定真空预压

加固效果(包括加固深度、影响范围等), 是其加固机理的重要研究问题<sup>[1-2]</sup>。

地基中预先打设的竖向排水板兼具负压传递和排水功能, 板中负压分布是真空预压解析及数值分析的重要边界条件<sup>[3-4]</sup>, ①多数学者认为负压沿排水板竖向有衰减, 但对衰减的形式描述不一, 部分学者<sup>[2, 5-7]</sup>认

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379131)

收稿日期: 2016 - 08 - 03

为负压为线性衰减分布或以浅层某一深度(砂垫层地面、地下水位面、硬壳层底面)为分界分段线性衰减分布(但不同学者所测衰减率不一),部分学者<sup>[8-9]</sup>认为负压以非线性形式或分段非线性形式分布。②也有学者<sup>[10]</sup>认为负压在竖向排水体中均匀分布。真空度、孔压和地下水位等均是计算负压分布的相关指标,而对负压及地下水位的概念认识尚不一致,地下水位及土中真空度测试方法尚有不足<sup>[2-3]</sup>,直接导致上述负压分布规律观点不一致。

室内试验是真空预压机理研究的重要手段,利用常规(或改进的)试验仪器(如三轴固结仪),亦或自制模型箱模拟真空预压是最常用的室内试验手段,但模型尺寸普遍较小(3 m 以内),尤其是沿深度缩尺严重。无法通过室内试验研究更大的竖向范围内真空预压负压分布规律。本文讨论了真空预压广义负压的概念及相关测量方法,设计并开展真空预压竖向大比尺室内模型试验,探讨真空预压负压分布规律。

## 1 负压分布及广义负压

与负压相关的名词有“真空”、“真空度”、“负压”、“真空负压”等<sup>[11]</sup>,分别为不同的概念,如不加区分容易使文义含糊不清。岑仰润<sup>[2]</sup>、邱青长等<sup>[6]</sup>均指出了真空预压负压相关概念使用混乱的现象并予以指正,但仍不够完备。仲彦等<sup>[12]</sup>较为全面地讨论了“真空荷载”的表述及应用,认为表述真空荷载的名词较多且不清晰。总结发现,负压相关概念的分歧主要表现为两点:①“真空”能否用于描述液体状态;②如何统一描述抽真空后使软基发生固结的孔隙流体力学状态,而不只限于流相。

### 1.1 压力空间分布

《水力学》<sup>[13]</sup>中有关真空、负压的定义为:当液体中某点的绝对压强 $P$ 小于当地大气压强 $P_a$ 时,称该点存在“真空”,大小用“真空度” $P_k$ (式(1))表示,为正值;真空度存在,相对压强为负,故真空也称“负压”,可见负压属于相对压强的范畴。

$$P_k = P_a - P \quad (1)$$

土体含固、液、气三相,气相与液相相比其密度可以忽略不计(重力场因素),液相与气相相比其压缩性可以忽略不计,使得负压在地下水位之上、下区域的分布与传递规律存在差异。不妨在绝对压强系及以 $P_a$ 为零点的相对压强系中,以地下水位为界分别讨论负压的空间分布特点(图1)。

#### (1) 地表至地下水位之间的 A 区

从工程应用的角度关注抽真空对 A 区孔隙流体压力的改变情况,可以忽略地下水位以上的毛细饱和带

高度<sup>[14]</sup>,认为地下水位以上均为非饱和区且孔隙中气相连通,将孔压计置于地下水位之上的 A 区任意深度,绝对孔压值为当地大气压 $P_a$ ,其相对压力值为零。抽真空后, A 区孔隙气相变得稀薄,可以认为绝对孔压同时降为 $P_{mk}$ ,降幅为膜下真空度 $P_v$ ,根据《水力学》定义,此时 A 区土体孔隙中存在负压(或真空)并处于负压(或真空)状态,可用超静孔隙压力绝对值 $|\Delta u|$ 或真空度 $P_v$ ( $|\Delta u| = P_v$ )评价负压大小。

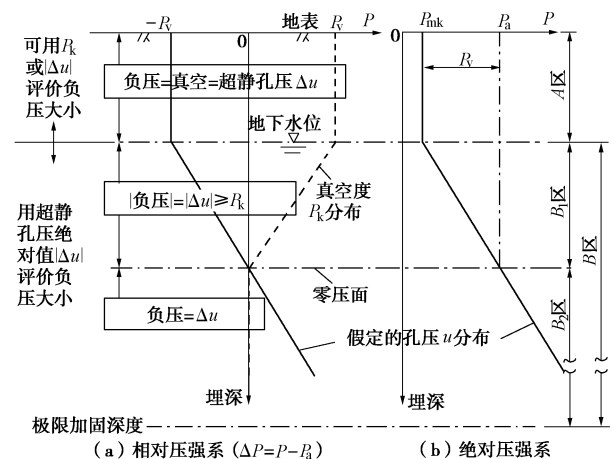


图 1 真空预压负压空间分布示意图

Fig. 1 Schematic of spatial distribution of negative pressure in vacuum preloading

#### (2) 地下水位之下的 B 区

自然状态下,水位之下饱和土中孔隙(水)压力在相对压强系中为静水压力 $P_w$ ,绝对压强大于 $P_a$ 。抽真空后,负压由 A 区通过竖向排水板和土体孔隙向 B 区传递,使得地下水位之下一一定深度范围内的饱和土孔隙水压力低于 $P_w$ ,产生了负的超静孔隙水压力 $\Delta u$ 。B 区的上半部区域孔隙水压力 $u$ 低于当地大气压 $P_a$ (记作 $B_1$ 区), $B_1$ 区绝对孔隙压强范围为 $[P_{mk}, P_a]$ ,因而处于负压状态且存在真空度。认为孔隙水密度不因抽真空而改变,水位之下 $P_w$ 随深度线性增长,所以 $B_1$ 区土中真空度 $P_k$ 随深度增大而减小,且始终小于等于其超静孔压绝对值 $|\Delta u|$ (仅在水位面处二者相等),因而不应用再用真空度评价该区内负压大小,此时负压与负的超静孔隙水压力 $\Delta u$ 概念一致,可以直接用 $|\Delta u|$ 评价负压大小。

将 B 区的下半部分区域记作 $B_2$ 区, $B_1$ 区与 $B_2$ 区的分界面就是所谓的“零压面”,零压面处孔隙水压力为一个当地大气压 $P_a$ ,零压面是真空度存在的下限。处于零压面之下的 $B_2$ 区绝对孔压值大于 $P_a$ 而没有真空,虽然如此,但 $B_2$ 区存在负的超静孔隙水压力 $\Delta u$ ,而排水固结由 $\Delta u$ 消散、有效应力增长实现,因此 $B_2$ 区也有加固效果。

由真空度的定义及抽真空后孔压分布特点不难发

现, 零压面之上  $A$ ,  $B_1$  区的孔压与真空度在相对压强坐标系中对称分布 (图 1 (a))。抽真空后, 负压优先沿竖向排水板传递, 地下水位及零压面均不水平, 因此  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  区的分界面并非平面, 为便于分析, 文中将上述分界面均假设为水平面。

## 1.2 广义负压概念

图 1 的  $A$ ,  $B_1$  区均处于负压 (或真空) 状态, 均存在真空度, 但因孔隙流体密度不同, 真空度竖向分布不同。为统一描述土中负压状态, 方便评价负压大小, 并考虑零压面以下  $B_2$  区亦有加固效果的事实, 避免采用真空度描述负压存在的不足, 建议广义地定义负压: 只要土中当前孔隙压力  $u$  低于其自然重力场稳态孔隙压力  $P_w$ , 即处于负压状态。负压描述的是一种相对状态, 应采用应力状态的改变量评价负压的大小, 即“广义负压”与“超静孔压”等效, 正是由抽真空引起的使地基排水固结的“荷载”, 相当于文献[12]所述的“真空荷载”以及文献[15]所述的“有效真空压力”, 广义负压既可以描述非饱和土中孔隙压力状态, 也可以描述饱和土中孔隙水压力状态, 所以有真空一定有负压 ( $A$  区,  $B_1$  区), 但有负压不一定有真空 ( $B_2$  区)。诸如“真空度沿深度均匀分布”的表述<sup>[3]</sup>显然是不合理的, 广义地定义负压可以避免产生“土中没有真空度就没有加固效果”的错误的感性认识。

## 2 负压测量方法

影响真空预压负压分布的主要因素有: 膜下真空度、地下水位、土中真空度、孔压及分层沉降等, 文中统称为“负压相关指标”, 相关测法可参考文献[16], 本文着重讨论土中真空度测量技术。

真空预压工程中常用弹簧管式真空表测量土中真空度 (图 2), 当测点处流体压力低于一个大气压时, 会吸走连接真空表的细管及弹簧管空腔 (简称测管空腔  $V$ ) 内的空气, 表盘读数为相应的真空度。而将弹簧管式真空表用于土中真空度测量时, 存在以下问题:

### (1) 滞后效应

土中测点位置孔隙压力变化时, 真空度测头内、外流体产生压差, 测管空腔  $V$  通过测头与土中发生流体交换, 测头内外压力达到平衡时真空表读数才趋于稳定。因此, 使用弹簧管式真空表测量土中真空度时, 测值的变化依赖于测管空腔  $V$  内流体体积的变化。①当测头处于非饱和土中或渗透性好的饱和土 (如砂土) 中时, 测管空腔  $V$  内流体可以通过测头快速地与土中流体交换, 测头处土中孔压变化会很快体现在真空表读数上, 真空度测量无明显滞后; ②当测头处于渗透性较差的饱和黏性土中时, 测头与土中流体交换缓慢,

将孔压变化反映为测管空腔  $V$  内的流体体积变化需要相对较长的时间, 真空表读数变化缓慢且明显滞后于测点周边局部孔隙压力变化, 表现出“滞后效应”。测点处土的渗透性越低、压差越小、测管空腔  $V$  体积越大, 滞后效应越显著。

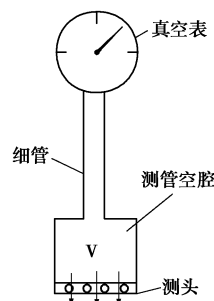


图2 弹簧管式真空表工作原理

Fig. 2 Working principle of spring tube type vacuum gauge

### (2) 细管水头高度影响

如图 3 所示, 密闭容器水面上的真空度为  $P_v$ , 真空度测头位于  $F$  点, 低于静水位  $h_3$ , 测头与真空表之间由较长的细管相连。假设细管中水头分别位于  $A \sim F$  点, 且自该点至测头  $F$  点的细管中水柱连续, 讨论细管水位对真空表读数的影响。

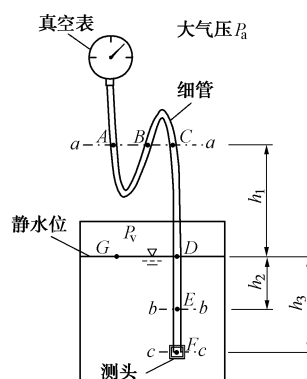


图3 细管水头高度影响真空度读数

Fig. 3 Water head in the tube affects the vacuum degree reading

当细管水头位于  $a-a$  平面上的  $A$ ,  $B$ ,  $C$  点时, 取静水位为参考面进行压力平衡计算, 真空表读数为

$$P_A = P_B = P_C = P_v + \gamma_w h_1 \quad (2)$$

当细管水头与水位面重合时, 真空表读数为

$$P_D = P_v \quad (3)$$

当细管水头低于水位面时, 真空表读数为

$$P_E = P_v - \gamma_w h_2, \quad P_F = P_v - \gamma_w h_3 \quad (4)$$

不难发现, 当水位面上的真空度及测头位置均不变, 仅连接真空表的细管水头与静水位的相对高差变化时, 真空表读数也随之变化。根据细管水头、测头、地下水位间的高差及真空表读数, 由式 (2) ~ (4) 可以准确计算测头处的真空度, 但在真空预压现场,



表 1 土样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil samples

指标	$w$ /%	$G_s$	$\rho$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$S_r$ /%	$e$	$w_L$ /%	$w_P$ /%	$I_p$	$E_s$ /MPa	$q_u$ /kPa	$k_v$ /( $10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
数值	42.6	2.74	1.86	100	1.101	33.8	17.4	16.4	3.2	6.3	6.86

表 2 模型试验详细设计

Table 2 Detailed design of model tests

项目	描述
水力边界	通过细管将顶部补水桶与模型底部连接, 调节补水桶水位模拟外部水头边界, 根据桶中水位变化可以计算补水量及补水速率。补水桶中初始水头与模型中初始地下水位等高 (初始埋深 2.0 m)
应力及位移边界	有机玻璃筒可以约束圆柱土样的径向变形, 在内壁涂抹透明润滑油并贴一层透明塑料薄膜, 可以在不影响可视化的前提下减少土样沉降时的侧向摩擦阻力
排水	模型顶部铺设 30 cm 厚砂垫层, 排水板顶部埋于砂层中, 将外径 16 mm 的 PU 气管打孔后外包滤膜, 螺旋盘于砂垫层中作为集水滤管, 量测补水桶和气水分离桶中水位变化, 可计算补水量、排水量和净排水量
抽真空控制	采用上海南光 2XZ-4 型真空泵, 利用电接点真空表控制泵的运作, 使膜下真空度 $P_v$ 稳定在 85~90 kPa
密封控制	将外径 41 cm、高 40 cm 的小桶嵌入到模型筒内, 用密封膜连接进行活塞式密封。各段模型筒通过法兰盘、橡胶垫连接密封, 传感器数据线穿出处需加以保护并密封

表 3 传感器布置说明

Table 3 Detailed distribution of sensors

项目	描述
孔压	#2~#7 段各布置一个孔压传感器, 相邻间隔 2 m 深度。采用 YY-2B 小型压阻式孔隙水压力传感器, 精度 0.2% FS, 外形尺寸为 $\phi 20\times 53\text{ mm}$ , 使用前在正、负压下分别标定
真空度	每个断面同时布置板中、土中真空度测头。将外径 8 mm 的 PU 气管一端用滤膜包扎后作为测头, 通过出线引至模型筒外, 连接高于出线口的真空表。考虑细管水头与出线口相对高差的影响, 并分析滞后效应
地下水位	采用外径 2 cm 的透明有机玻璃管制作, 共长 5 m, 下部 1 m 为花管段, 上部 4 m 是可视段, 紧贴于模型筒内壁布置在基准面以下 2~7 m 范围, 可直接读出水位
分层沉降	每 2 m 紧贴模型筒内壁放置一块土工布作为沉降标, 标记其初始位置, 量测相对初始位置的距离可得沉降量

连接测头和真空表的细管有相当部分埋在土中, 细管水头的确切位置及管内水柱是否有间断常常不可知, 无法由真空表读数准确计算测头处的压力。换句话说, 当真空度测头低于地下水位时, 不经过细管水头修正的真空表读数通常不是测头处真正的真空度。

对于量程为-0.1~0 MPa 的弹簧管式真空表, 只有当压力小于一个当地大气压  $P_a$  时读数才不为零; 由式 (2) ~ (4) 式算得测头位置的真空度小于等于零时, 测管空腔 V 中的压力大于等于  $P_a$ , 测头位置无真空, 真空表读数为零; 图 1 零压面以下  $B_2$  区的真空度理论测值为零。

3 真空预压室内模型试验设计

针对现有真空预压室内模型竖向尺寸偏小的不足, 设计竖向大比尺室内模型 (图 4), 以单根排水板加固的圆柱体土单元为研究对象, 模拟现场边界约束条件、水流补给条件、真空加载方式等, 开展真空预压负压产生、传递、分布及变化规律相关试验研究。

3.1 试验模型概述

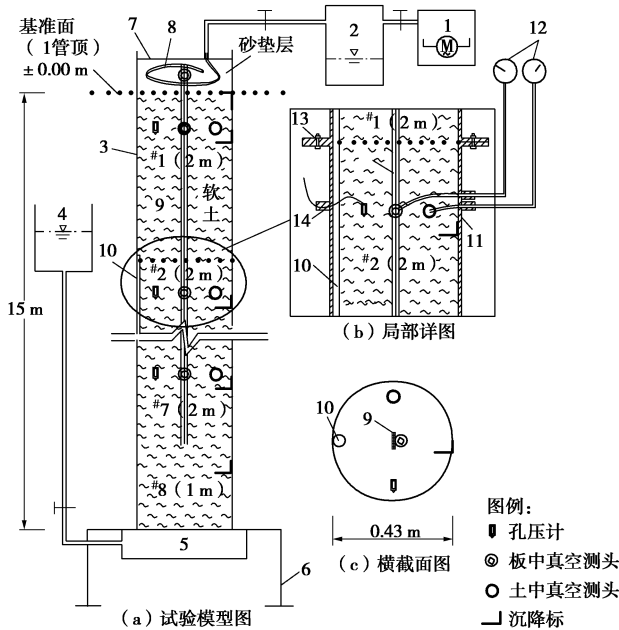
以南京水利科学研究院铁心桥试验基地土工试验厅内高 18.0 m、两跑净宽 0.55 m 的楼梯井为场地, 进行室内模型试验。如图 4, 模型主体为高 15.0 m、内径 0.43 m 的透明有机玻璃筒, 分 8 段自下向上组装而成, 依次为 1.0 m 的#8 管, 2.0 m 的#7~#1 管, #1 管顶部连接 0.4 m 高的小段作为砂垫层排水及表层密封段。土样取自连云港徐圩港区航道疏浚吹填区 (孔隙水含盐分), 属于低液限黏土, 试验时土样的相关物理力学参数见表 1, 自下而上填筑土样时, 在截面形心布置一根 14.0 m 深 (分布在#1~#7 管内, 底部#8 管内无排水板) 的 SPB100 B 型排水板。模型中土样加固前为总高 15.0 m, 直径 0.43 m 的圆柱体, 以#1 管顶面为基准面, 每 2.0 m 深为一个试验断面 (图 5), 预埋孔压传感器、板中真空度测头、土中真空度测头和沉降标, 在基准面以下 2~7 m 范围内紧贴筒内壁预置水位管。

3.2 模型分部设计

为使模型试验与真空预压现场条件相似, 模拟了

水力边界、应力及位移边界、排水及真空控制等条件，详见表 2，传感器布置说明见表 3 及图 5。文中不特别说明时，传感器埋深及相关指标的竖向尺度均以顶部 #1 管顶作为  $\pm 0.00\text{ m}$  基准面（图 4，5）。

与现有真空预压相关室内模型试验相比，本试验具有以下特点：①模型筒中土样高  $15.0\text{ m}$ ，排水板预埋深度  $14.0\text{ m}$ ，具有竖向大比尺的特点，孔压、真空度等负压相关指标与现场相近；②可以模拟单根排水板控制单元体的应力边界及水力边界；③模型主体为透明有机玻璃筒，分层沉降，水位管，补、排水桶及真空表的细管水位的可视效果好，测量方便、准确。



注：1-真空泵及其控制系统，2-气水分离桶，3-透明有机玻璃筒主体，4-可调节式补水桶，5-底部补水装置，6-底座，7-顶部密封，8-水平排水管，9-排水板，10-水位管，11-沉降标签，12-真空表，13-法兰盘，14-出线器

图 4 竖向大比尺真空预压室内试验

Fig. 4 Vertical large-scale vacuum preloading laboratory tests

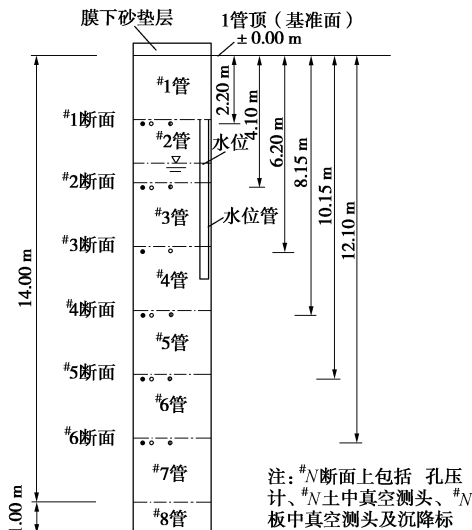


图 5 模型中传感器分布

Fig. 5 Distribution of sensors in model

## 4 试验规律分析

装样完成静置 1 个月开始试验，试验持续 1 个月，分为抽真空初期、真空度稳定期（下文简称稳定期）和动态测量 3 个阶段。试验结果分析如下。

### 4.1 水位变化分析

试验前后水位降低了  $1.343\text{ m}$ ，埋深波动为  $1.8\sim 3.8\text{ m}$ ，波幅  $2.0\text{ m}$ （图 6）。自第 5 天开始净排水量增长平缓（图 7），而水位曲线却表现为“上升—平稳—下降”；管内外压差及流体交换是管中水位变化的必要条件，压力再平衡会影响水位面的空间分布，水位管中水位只反映空间某点的水位值，其升降变化证明真空预压地下水位存在局部波动性，水位管中水位不是整体平均地下水位。试验前后地表沉降  $0.222\text{ m}$ ，水位下降量大于地表沉降量。

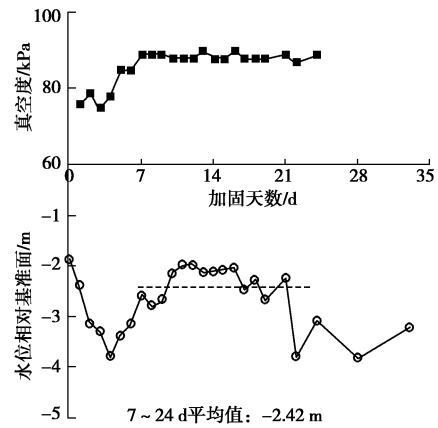


图 6 水位与真空度变化

Fig. 6 Change of water level and vacuum degree

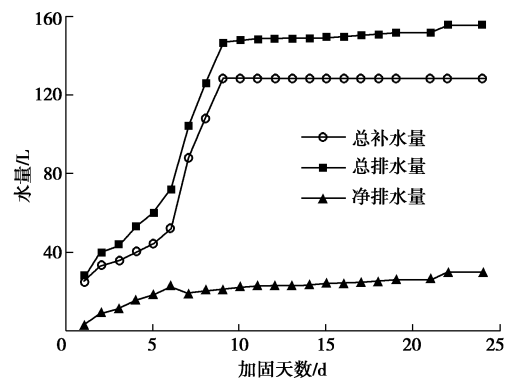


图 7 水量变化

Fig. 7 Change of water quantity

### 4.2 真空度变化分析

文中测头位置的真空度均在考虑测头沉降和细管水头高度后参照式（2）～（4）计算得到。排水板及土中真空度时空分布如图 8 和图 9 所示。

（1）不同深度板中真空度曲线均与膜下真空度

$P_v$  曲线相似, 在同一时间段表现出同样的增、减规律, 即当  $P_v$  波动时, 不同深度处的真空度几乎即时、等值地波动, 说明相对于测量频率 (一天一次), 排水板中压力竖向传递没有滞后。同一位置土中真空度整体上低于板中, 加载初期尤为明显; 随着  $P_v$  持续稳定, 板、土真空度差距逐渐缩小并渐趋一致。 $P_v$  波动时, 板中真空度变化明显而土中变化相对缓慢。以上说明真空表所测土中压力变化滞后于板中压力变化。

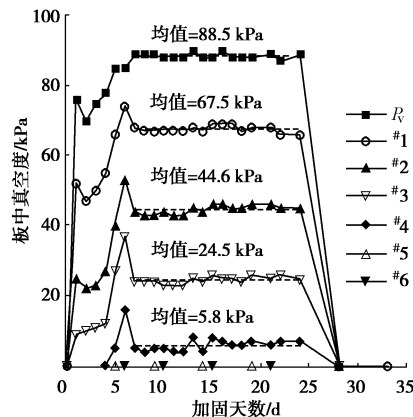


图 8 各断面排水板中真空度分布

Fig. 8 Distribution of vacuum of monitoring sections in drain board

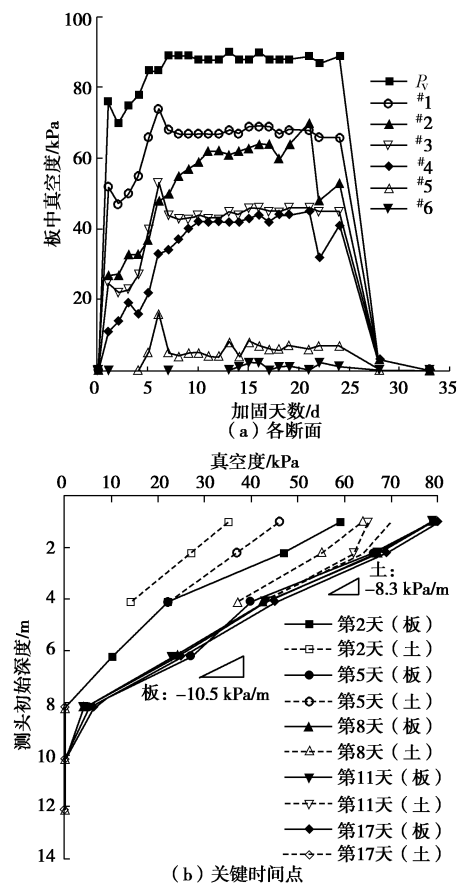


图 9 排水板及土中真空度时空分布对比

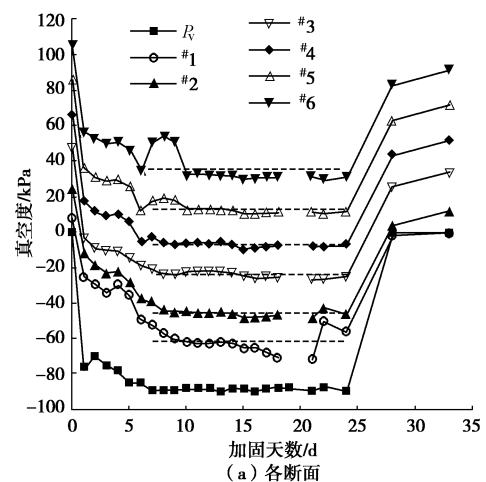
Fig. 9 Spatial and temporal distribution of vacuum comparison in drain board and soil

(2) 抽真空第 5 天后, 排水板中真空度竖向分布随膜下真空度  $P_v$  的稳定而基本稳定 (图 9 (b))。8.15 m 埋深之内的板中 #1~#4 测头均有真空度, 真空度值随深度递减; 10.0 m 之下的板 #5、#6 测头自始至终无真空度, 所以排水板中真空度存在的极限深度为 8.15~10.0 m。同理, 土中真空度存在的极限深度为 8.0~10.0 m。因此, 本次试验零压面埋深为 8.0~10.0 m。关键时间点板中及土中真空度 (不为零的范围) 竖向呈线性分布, 板中真空度斜率均值为 -10.5 kPa/m, 土中真空度斜率均值为 -8.3 kPa/m。

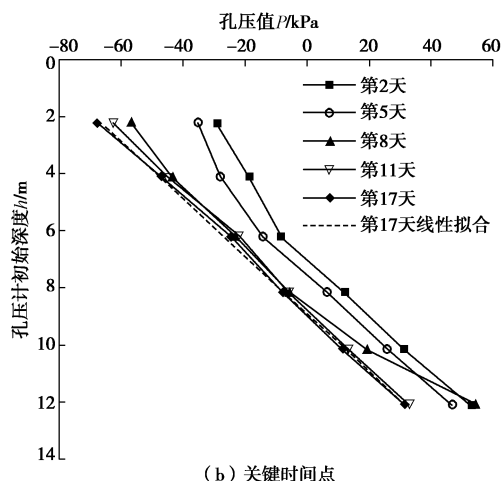
#### 4.3 孔压及负压分布分析

##### (1) 孔压分析

a) 如图 10 (a), 抽真空后不同深度孔压均随时间逐渐减小, 且均与膜下真空度  $P_v$  表现出同样的增、减规律; 第 7~23 天  $P_v$  稳定, 各断面孔压总体呈水平等间距分布, 竖向梯度为 10.0 kPa/m (图 10 (b)), 等于静水压力梯度 10.0 kPa/m (滨海吹填土孔隙水含盐分)。由图 9 及图 10 可作出孔压和真空度的对比分布图 11, 稳定期零压面之上的孔压与板中真空度分布对称 (图 11 (b)), 板中真空度随深度平均线性衰减 -10.1 kPa/m, 土中孔压随深度平均线性增长 10.2 kPa/m, 而真空表测得土中压力平均线性衰减 -10.7 kPa/m。土中孔压与板中压力线性变化程度近乎相等说明负压由板向土中径向传递时没有明显衰减, 流体压力在竖向近似以静水水力梯度线性增长说明水位之下负压 (超静孔压  $\Delta u$ ) 在竖向无明显衰减,  $\Delta u$  分布如图 11 (b) 所示; 真空表测值反算土中孔压  $|P_s|$  偏小于孔压值  $|u|$ , 是饱和黏土真空度测量存在滞后效应的一种表现。图 11 (a) 所示水位之下的 #2 和 #4 断面孔压  $u$  与板中真空表测值反算孔压  $P_{pvd}$  一致, 而  $|u|$  均略大于土中真空表测值反算孔压  $|P_s|$  值, 同样为上述压力径向分布规律及滞后效应的表现, 因此, 建议尽量避免使用真空表测量水位之下的土中压力。



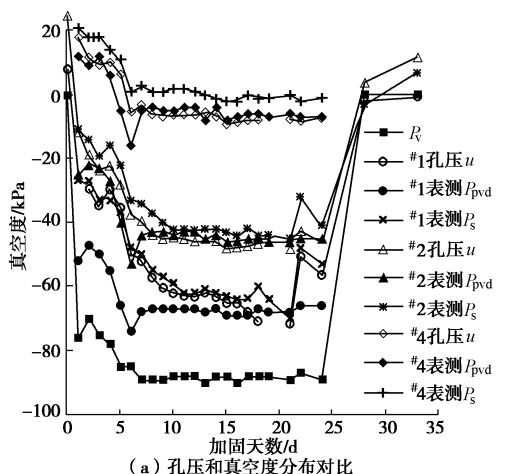
(a) 各断面



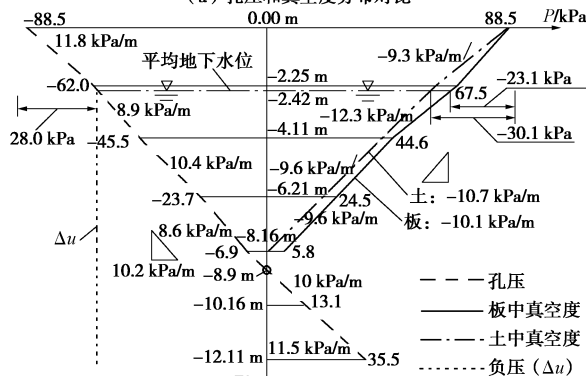
(b) 关键时间点  
图 10 孔隙水压力时空分布

Fig. 10 Spatial and temporal distribution of pore water pressure

b) 图 11 (b) 中孔压线与 Z 轴交点为 -8.9, 说明本次试验土中真空度存在的极限深度 (作为零压面深度) 为 8.9 m。平均地下水位埋深 2.42 m, 地下水向上排出需增加其重力势能, 负压做功而衰减, 由图 11, 非饱和区板中负压衰减 23.1 kPa, 土中衰减 28.0 kPa。



(a) 孔压和真空度分布对比



(b) 稳定期孔压和真空度竖向分布对比

图 11 孔压和真空度分布对比

Fig. 11 Comparison of pore water pressure and vacuum degree

## (2) 负压分布分析

a) 膜下  $P_v$  稳定时 (取第 10~21 天), #1 至 #6 断面的超静孔压  $\Delta u$  平均值依次为: -66.6, -66.4, -64.6, -67.6, -68.4, -68.3 kPa, 总体平均为 -67.0 kPa (图

12 (a))。不同深度超静孔压  $\Delta u$  (#1~#6) 整体变化相近, 说明稳定期模型内部压力变化较为同步, 负压在传感器分布范围内分布均匀, 平均负压为 -67.0 kPa; 此间膜下平均真空度为 88.4 kPa,  $P_v - |\Delta u|$  即是负压在地下水位之上的非饱和段提水做功而衰减的幅度 (图 12 (c)), 各断面  $P_v - |\Delta u|$  初期大, 稳定期小 (整体平均为 21.4 kPa), 说明初期负压在浅层损耗大于稳定期。

b) 图 12 (b) 所示, 第 8 天底部补水阀门打开, #4 至 #6 的  $|\Delta u|$  自上而下递减; 第 17 天顶部 #1、#2 管的出线器阀门打开, #2 孔压以下深度的  $|\Delta u|$  均小幅小于第 11 天的  $|\Delta u|$ , 说明补水和漏气均会损耗负压。

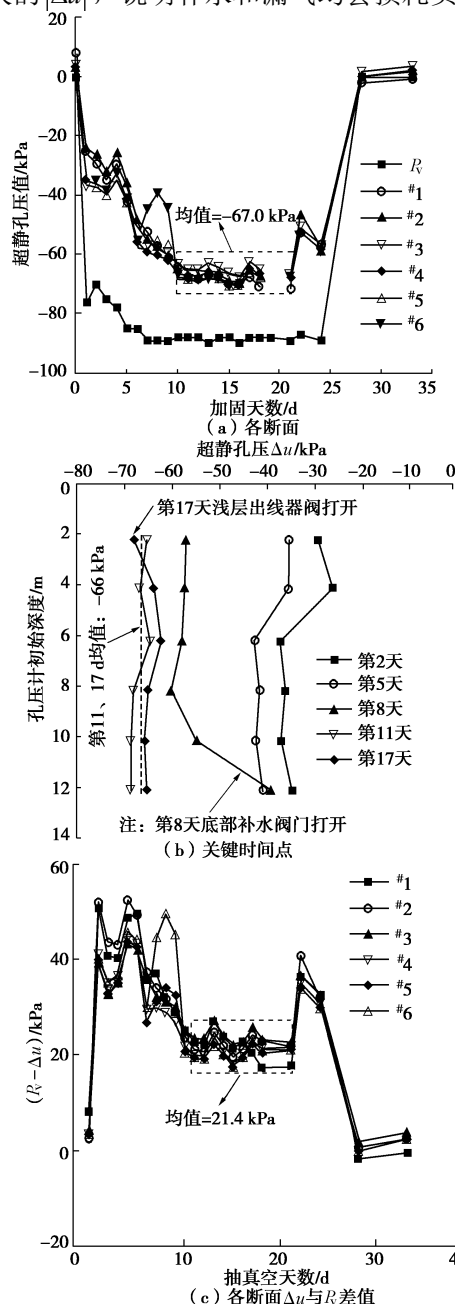


图 12 超静孔隙水压力  $\Delta u$  时空分布

Fig. 12 Spatial and temporal distribution of excess pore water pressure  $\Delta u$



#### 4.4 动态测试负压分析

试验动态测试包含两部分:①第 22 天临时卸载后再加载,加密测量孔压和真空度相关指标短时变化(图 13);②第 25 天进入动态测量阶段(图 14),依次调整膜下真空度  $P_v$  为:  $90 \rightarrow 65 \rightarrow 35 \rightarrow 0 \rightarrow 35 \rightarrow 65 \rightarrow 90 \rightarrow 0$  (单位: kPa), 每次调整后立即加密观测浅层#1、#2 断面的孔压、土中真空度、板中真空度及地下水位, 分析负压相关指标短时变化规律。

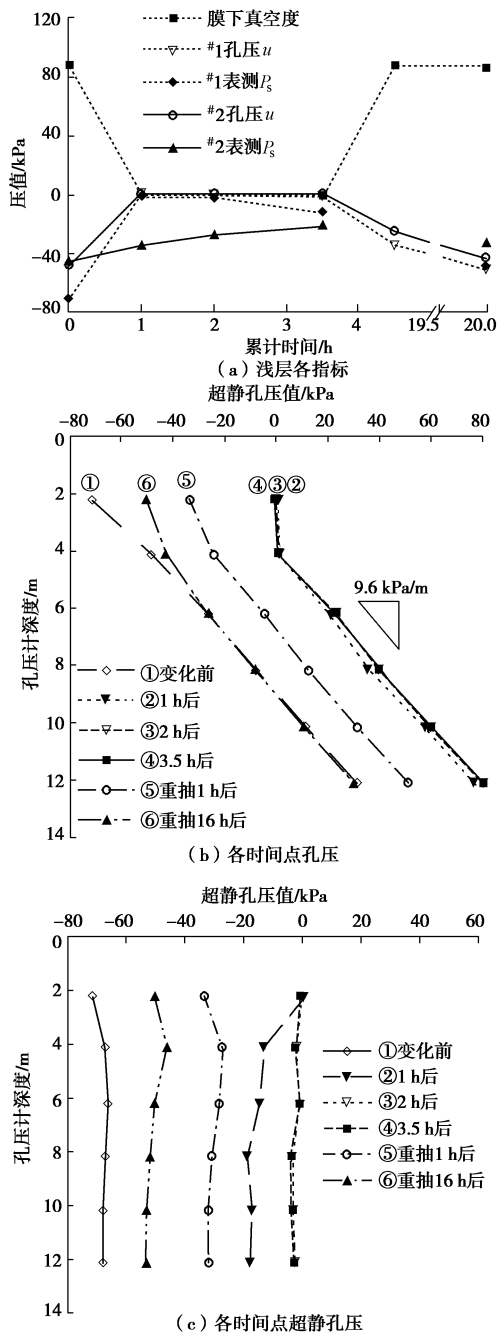


图 13 临时卸载负压相关指标分析

Fig. 13 Analysis of negative pressure-related indexes of temporary unloading

(1) 如图 13 (a) 及图 14 所示, 膜下真空度  $P_v$  变化时, 处于地下水位之上的#1 断面土中真空表测值反算孔压  $P_s$  和孔压计测值  $u$  一致, 处于水位之下的#2 断

面理论上亦应如此, 而实际上  $P_s$  较  $u$  曲线平缓, 且  $P_s$  的变化总是滞后于  $u$ , 即  $P_v$  下降(上升)时, 土中真空表测值反算孔压  $P_s$  回升(降低)总是慢于孔压计测值  $u$ 。真空度变化时地下水位之下的土中真空表测值反算孔压  $P_s$  滞后于土中孔压计测值  $u$  的现象正是 2.1 节所述饱和黏土土中真空度测量的滞后效应, 真空度变化 24 小时内滞后效应有明显体现。

(2) ①如图 13 (b), 真空卸载后 2 h 内土中孔压基本不再变化, 超静孔压趋近于零; 再次加载 16 h 后, 除浅层外 6 m 深度以下的土中孔压值  $P_s$  与卸载前相等。②4 m 深度以下的土中同一时刻的超静孔压呈一条竖直线, 不同时刻的孔压连线相互平行且平均线性系数 (9.6 kPa/m) 接近静水压力梯度 (10.0 kPa/m)。以上说明膜下真空度  $P_v$  变化后, 排水板会很快将压力变化近乎等值地传递到水位之下不同深度土中——即板中真空度及土中孔压均同步变化 (相对于测量频率), 且具有相同的压力增量 (超静孔压  $\Delta u$ )。本次试验模型中土样横截面与排水板截面之比偏小 (相比于现场排水板平面布置及其常见的板间距 0.7~1.3 m), 人工填筑的土样渗透系数大于自然土层, 且真空泵工作效率及模型密封性均比现场条件好, 所以尽管排水板埋深 14 m, 但负压依然能够由排水板快速地传递给周边土样, 负压在水位以下范围传递基本表现为无滞后、无衰减, 类似《水力学》中的巴斯加原理<sup>[13]</sup>。

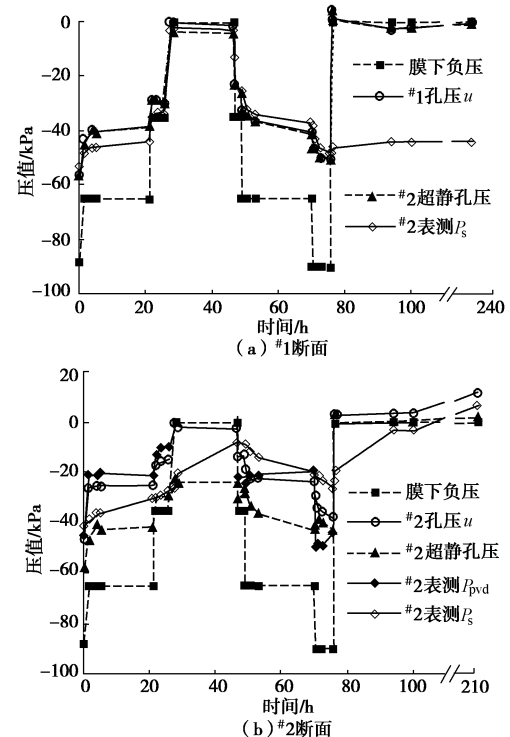


图 14 动态测试浅层负压相关指标分析

Fig. 14 Analysis of shallow negative pressure-related indexes of dynamic tests

(3) 图 14 所示, 膜下真空度  $P_v$  变化过程中, #1、

#2 断面孔压  $u$  随  $P_v$  的变化而变化, 但两断面超静孔压绝对值  $|\Delta u|$  始终小于  $P_v$ , 说明负压通过排水板传递到 #1、#2 断面的过程中有衰减。自然状态下, 水位之下的饱和土中孔隙水势能相等, 要将孔隙水通过排水板向上排出必须做功增大其重力势能和动能, 因此负压在非饱和区域内耗散, 使地下水位处的超静孔压绝对值  $|\Delta u|$  低于膜下真空度  $P_v$ 。

## 5 排水板负压边界

### 5.1 等效排水管流型分布

土中自上而下主动降低的孔隙压力是真空预压排水固结的动力, 排水板负压分布是砂井固结理论重要的孔压边界条件。将排水板按照等横截面原则等效为一根透水圆管 (图 15), 讨论膜下真空度  $P_v$  稳定期等效排水管中流体状态及负压分布。

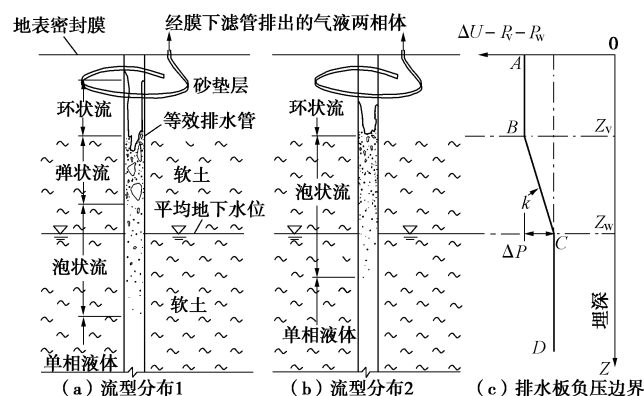


图 15 等效排水管两相流型分布及负压边界

Fig. 15 Distribution of two-phase flow pattern and negative pressure boundary of equivalent drainage tube

无论现场还是室内试验, 均可观察到连接膜下滤管与泵的透明管道中的水呈断续状脉动前进, 水平管段中气液两相体的运动形态多呈“弹状流”和“波状流”, 竖向管段中多呈“弹状流”和“环状流”。参考《气液两相流》流型理论<sup>[17]</sup>, 并考虑流型随流量、时间的动态变化, 合理推测竖向等效排水管中的流体形态如图 15 (a)、(b) 所示: ①加固初期两相流含气量较大, 流型如图 15 (a) 所示, 自下而上依次为: 单相液体、泡状流、弹状流、环状流; ②  $P_v$  稳定期两相流含气量减小, 流型如图 15 (b) 所示, 自下而上依次为: 单相液体、泡状流、环状流。假设土中平均地下水位处于泡状流区域, 且随真空加载时间增长而缓慢下降。

### 5.2 排水板负压边界

基于模型试验负压分布规律, 膜下真空度稳定期与图 15 流型相对应的排水板负压边界  $\Delta U$  (图 15(c)) 为式 (5)。

$$\Delta U = \begin{cases} -P_v & (0 \leq Z < Z_v) \\ \lambda \gamma_1 (Z - Z_v) - P_v & (Z_v \leq Z < Z_w) \\ \Delta P - P_v & (Z \geq Z_w) \end{cases}, \quad (5)$$

$$\Delta P = \lambda \gamma_1 (Z_w - Z_v) \quad (6)$$

式中,  $\Delta U$  为本文 1.2 节定义的广义负压,  $P_v$  为膜下真空度,  $\Delta P$  为图 15 (c) 中  $BC$  段负压的衰减值,  $Z_v$  为环状流下限埋深,  $Z_w$  为平均地下水位埋深,  $\gamma_1$  为图 15 中环状流下限埋深至平均地下水位段 ( $BC$  段) 的等效排水管中两相流的平均重度,  $\lambda$  为压差系数。

环状流有气相轴心, 认为环状流范围内负压无衰减, 图 15 (c) 中  $AB$  段的负压为  $-P_v$ ; 本次试验测得平均地下水位之下排水板中不同深度负压等值分布, 因此认为  $CD$  段负压为平均地下水位处的板中压力  $-P_w = \Delta P - P_v$ ; 上升两相流存在摩擦、加速、重力和局部压降, 即浅层  $BC$  段负压存在衰减, 假定为线性衰减, 并用大于 1 的压差系数  $\lambda$  考虑板中大于重力压降的两相流压降。本次试验真空度稳定期负压在浅层平均衰减值  $\Delta P$  为 21.4 kPa。

## 6 结论与建议

本文讨论了负压相关概念及测量方法, 通过开展竖向大比尺室内模型试验研究了真空预压负压分布规律。初步结论与建议如下:

(1) 详细讨论了真空预压负压空间分布特点, 认为负压描述一种相对压强状态, 与“超静孔压”等效, 广义地定义了负压。

(2) 详细分析了土中真空度测量的影响因素, 提出并通过试验验证了饱和黏土土中真空度测量的滞后效应, 本次试验真空度存在的极限深度为 8.9 m。

(3) 在相对压力坐标系中, 零压面之上范围内孔压及板中真空度竖向分布曲线对称, 零压面之上的土中孔压绝对值应与土中真空度相等。本次试验膜下真空度稳定后, 板中真空度随深度线性 (平均 10.1 kPa/m) 衰减, 土中孔压随深度线性 (平均 10.2 kPa/m) 增长, 二者线性梯度均近似为静水压力梯度。

(4) 本次试验负压为折线型分布, 且在地下水位之上的非饱和段衰减, 稳定期整体平均衰减值为 21.4 kPa, 负压在水位之下排水板埋深范围内基本均匀分布且无明显衰减, 稳定期整体平均值为 -67.0 kPa。合理假定等效排水管气液两相流的流型分布, 给出了符合试验规律的真空预压稳定期竖向排水板负压边界。

(5) 本次试验膜下真空度变化后, 压力变化会通过排水板近乎等值地快速传递到水位之下排水板分布范围, 且由板向土中径向传递时没有明显衰减。因所用模型内径偏小 (为 0.43 m), 建议缩小排水板截面积, 从能量等效的角度出发合理调整膜下负压, 使能量密度与现场相似, 保证土样的均匀性, 在竖向大比尺模型中进一步开展真空预压物理力学性质的研究。

(6) 本文基于吹填淤泥真空预压室内模型试验初

步得到了负压分布相关规律, 仍需在吹填现场以及天然沉积的软土地基真空预压实际工程中继续开展相关研究, 以指导生产实践。

### 参考文献:

- [1] 许胜, 王媛. 真空预压法加固软土地基理论现状 & 展望[J]. 岩土力学, 2006(增刊 2): 943 - 947. (XU Sheng, WANG Yuan. State-of-arts and prospect of consolidation theory for soft soil by vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 943 - 947. (in Chinese))
- [2] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. (CEN Yang-run. Vacuum preloading: experiment and theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese))
- [3] 郭彪. 竖井地基轴对称固结解析理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (GUO Biao. Analytical study on axisymmetric consolidation theory of ground with vertical drains[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [4] 蒋基安, 陈海英, 陈越, 等. 排水板真空度损耗的排水固结解析解[J]. 岩土工程学报, 2016(3): 404 - 418. (JIANG Ji-an, CHEN Hai-ying, CHEN Yue, et al. Analytical solutions to drainage consolidation considering vacuum loss in prefabricated vertical drain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(3): 404 - 418. (in Chinese))
- [5] QIU Q C, MO H H, DONG Z L. Vacuum pressure distribution and pore pressure variation in ground improved by vacuum preloading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(12): 1433 - 1445.
- [6] 邱青长, 莫海鸿, 董志良. 真空预压地基竖向排水体内流体的压降分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 132 - 136. (QIU Qing-chang, MO Hai-hong, DONG Zhi-liang. Analysis of pressure drop of fluid in prefabricated vertical drains in vacuum preloading ground[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(3): 132 - 136. (in Chinese))
- [7] 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 - 1432. (ZHU Qun-feng, GAO Chang-sheng, YANG Shou-hua, et al. Transfer properties of vacuum degree in treatment of super-soft muck foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1429 - 1432. (in Chinese))
- [8] 王星华, 雷鸣. 真空预压加固软基竖向排水体负压分布模式研究[J]. 工业建筑, 2010, 10(10): 86 - 90. (WANG Xing-hua, LEI Ming. Analysis of negative pressure distribution of vertical drainage channels for stabilization of roadbed by vacuum preloading[J]. Industrial Construction, 2010, 10(10): 86 - 90. (in Chinese))
- [9] 侯健飞. 利用真空预压实测孔隙水压力推算土体固结度的计算方法探讨[J]. 中国港湾建设, 2005(1): 13 - 15. (HOU Jian-fei. Calculation of consolidation degree of soil mass with pore water pressure measured in vacuum preloading works[J]. China Harbour Engineering, 2005(1): 13 - 15. (in Chinese))
- [10] 高志义, 张美燕, 刘立钰, 等. 真空预压加固的离心模型试验研究[J]. 港口工程, 1988(1): 18 - 24. (GAO Zhi-yi, ZHANG Mei-yan, LIU Li-yu, et al. Centrifuge model test on vacuum preloading[J]. China Harbour Engineering, 1988(1): 18 - 24. (in Chinese))
- [11] 高志义, 梁爱华, 刘天韵. 真空预压中真空度和孔隙水压力测试与分析[J]. 中国港湾建设, 2014(2): 1 - 6. (GAO Zhi-yi, LIANG Ai-hua, LIU Tian-yun, et al. Test and analysis on vacuum degree and pore water pressure[J]. China Harbour Engineering, 2014(2): 1 - 6. (in Chinese))
- [12] 仲彦, 赵岩, 尹长权. 真空荷载的几种表述及其应用[J]. 中国港湾建设, 2014(10): 23 - 26. (ZHONG Yan, ZHAO Yan, YI Chang-quan. Some expressions of vacuum load and their application[J]. China Harbour Engineering, 2014(10): 23 - 26. (in Chinese))
- [13] 吴持恭. 水力学上册[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 17 - 53. (WU Chi-gong. Hydraulics volume one[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 17 - 53. (in Chinese))
- [14] 卢宁, LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 97 - 104. (LU Ning, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 97 - 104. (in Chinese))
- [15] 林志强. 真空预压排水板有效真空压力变化规律[J]. 水运工程, 2015(7): 161 - 166. (LIN Zhi-qiang. Changing rules of pore water pressure in drain board under vacuum preloading[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(7): 161 - 166. (in Chinese))
- [16] 张功新, 莫海鸿, 董志良. 孔隙水压力测试和分析中存在的问题及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3535 - 3538. (ZHANG Gong-xin, MO Hai-hong, DONG Zhi-liang. Issues and countermeasures for measurement and analysis of pore water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3535 - 3538. (in Chinese))
- [17] 阎昌琪. 气液两相流[M]. 2版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 9 - 12. (YAN Chang-qi. Gas-liquid two-phase flow[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 9 - 12. (in Chinese))