**DOI**：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0499

# 考虑椭圆形淤堵区发展过程的 PHDs 处理疏浚淤泥非线性固结分析

杨 康[1]，卢萌盟[1, 2*]，李 阔[1]，丁国卿[2]，徐 伟[2]

（1. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室，江苏 徐州 221116；
2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院，江苏 徐州 221116）

**摘要：**使用水平排水板（prefabricated horizontal drains, PHDs）联合真空预压（vacuum preloading, VP）处理疏浚淤泥的过程中存在淤堵现象。已有研究表明淤堵区呈椭圆形，其范围随时间逐渐发展。以 PHDs-VP 处理疏浚淤泥为研究背景，建立考虑 PHD 周围椭圆形淤堵区动态发展过程的非线性固结模型，并获得其数值解答。通过模型退化验证及与试验数据对比，验证了所提模型的准确性与适用性。在此基础上，系统分析淤堵效应、PHDs 铺设率、淤泥层厚度以及土体非线性特性对固结的影响。结果表明：淤堵效应延缓了土体的固结进程，且淤堵越严重、淤堵区发展越快，其延缓效应越显著；提高 PHDs 铺设率或减小淤泥层厚度能够提升固结速率，但当铺设率超过临界值后，继续增加铺设率对固结速率的提升可以忽略，且最优铺设率随淤泥层厚度增大而减小，据此提出了相应建议；淤泥的固结速率随着压缩指数的增大而减小，随着渗透指数的增大而增大。

**关键词：**桩基工程；淤泥固结；水平排水板；真空预压；淤堵效应；非线性固结

**中图分类号：**TU 47 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2026)01－0308－13

**第 一 作 者 ：**杨 康（1998－），现为博士研究生，主要从事软黏土力学与淤泥处理等方面的研究工作。E-mail：yang_kang@cumt.edu.cn

***通信作者：**卢萌盟（1979－），现任教授，主要从事软黏土力学与地基处理等方面的研究工作。E-mail：lumm@cumt.edu.cn

# Nonlinear consolidation of dredged slurry treated by PHDs incorporating development process of elliptical clogged zone

YANG Kang[1], LU Mengmeng[1, 2*], LI Kuo[1], DING Guoqing[2], XU Wei[2]

(1. *State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering*, *China University of Mining and Technology*, *Xuzhou*, *Jiangsu* 221116, *China*; 2. *School of Mechanics and Civil Engineering*, *China University of Mining and Technology*, *Xuzhou*, *Jiangsu* 221116, *China*)

**Abstract:** Clogging phenomena have been observed during the consolidation of dredged slurry treated with prefabricated horizontal drains (PHDs) in conjunction with vacuum preloading (VP). Previous studies indicate that the clogged zone exhibits an elliptical shape, with its extent gradually expanding over time. This study proposes a nonlinear consolidation model for PHDs-VP-treated dredged slurry, incorporating the development of the elliptical clogged zone surrounding the PHDs. The governing equations are established, and numerical solutions are derived using the finite element method. The accuracy and applicability of the model are validated through degradation analysis and comparisons with experimental results. Subsequently, a parametric analysis is conducted to assess the

**收稿日期：**2025－07－14；**修回日期：**2025－08－29

**基金项目：**国家自然科学基金面上项目（52178373）；江苏省研究生科研与实践创新计划（KYCX25_2792）；中国矿业大学研究生创新计划（2025WLKXJ227）

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52178373), Postgraduate Research and Practice Innovation Program of Jiangsu Province (Grant No. KYCX25_2792) and Graduate Innovation Program of China University of Mining and Technology (Grant No. 2025WLKXJ227)

influence of key factors on consolidation, including the clogging effect, PHD layout ratio, slurry layer thickness, and soil nonlinear characteristics. The results demonstrate that the clogging effect significantly slows the consolidation rate, with the impact becoming more pronounced as the severity of clogging increases and the clogged zone develops more rapidly. Increasing the PHD layout ratio or reducing the slurry layer thickness effectively accelerates consolidation. However, once the layout ratio surpasses a critical threshold, further increases yield only marginal effects. Additionally, the optimal layout ratio decreases with increasing slurry layer thickness, and relevant engineering recommendations are provided. Furthermore, the consolidation rate decreases with a higher compression index but increases with a higher permeability index.

**Key words:** pile foundation; slurry consolidation; prefabricated horizontal drains; vacuum preloading; clogging effect; nonlinear consolidation.

**First author:** YANG Kang (1998－), doctoral candidate, is engaged in research on mechanics of soft clay and slurry treatment. E-mail：yang_kang@cumt.edu.cn

*__Corresponding author:__ LU Mengmeng (1979－), professor, is engaged in research on mechanics of soft clay and ground improvement. E-mail: lumm@cumt.edu.cn

## 1　引　言

为提升水道通航能力，同时维护水生生态系统健康，我国每年从江河湖库等水域疏浚大量淤泥[1]。将这些淤泥作为填料实现资源化利用，符合可持续发展的理念。然而，疏浚淤泥的工程性质极差，主要表现为含水率极高、压缩性大、渗透性低且缺乏承载力，通常需要先对其进行脱水处理。在以往实践中，绝大多数疏浚淤泥被置于堆置场任其自然脱水。由于淤泥自然沉积及排水固结速率缓慢，导致堆置场占地周期极长。同时，随着城市化进程的加速，土地资源日益短缺，因此，迫切需要一种高效且环保的淤泥处理方法。

在过去的数十年间，竖向排水板(prefabricated vertical drains，PVDs)联合真空预压(vacuum preloading，VP)法凭借其经济性和环保性，在软土加固领域得到了广泛应用[2-4]。然而，大量研究表明，该方法存在以下不足：(1) PVDs 的安装需要依赖大型专用设备，但待加固土体的承载力通常较低，因此必须投入时间和资金对土体表面进行预处理或搭建工作平台[5]；(2) 土体固结过程中产生的沉降较大，导致 PVDs 出现严重的弯折和扭转变形，这使得真空压力难以有效传递至深层土体，进而导致深层土体强度增长有限[6]。经处理后的地基往往仅在表层形成硬壳层，而下部土体未得到有效改良。

在此背景下，水平排水板(prefabricated horizontal drains，PHDs)联合真空预压法(PHDs-VP)作为一种更优的替代方案，近年来在疏浚淤泥处理领域逐渐受到关注。大量室内试验和现场实践均证实了该方法的显著优势[7-9]。实际施工过程中，淤泥分层吹填至堆置场，同时在相应位置预先铺设 PHDs 层。这种施工方式无需对淤泥表面进行预处理，且实现了淤泥吹填与固结的同步进行，从而显著提高了工程效率，并有效提升了堆置场的淤泥处置能力。水平铺设的排水板可随土体自由沉降而保持形态稳定，既避免了因排水板变形导致的真空压力传递衰减，也可忽略其刚度对土体变形的影响。此外，越是深层的土体，开始固结的时间越早，其受到的上覆土体自重产生的荷载也越大，从而使深层土体得到有效加固。

开展固结分析对于实际工程设计优化具有重要的理论指导意义。近年来，关于 PHDs 固结的理论研究受到了学术界的广泛关注。J. C. Chai 等[10]在已有竖井地基轴对称固结模型和平面应变固结模型解答的基础上，提出了一种等效固结系数法，通过引入由相邻 PHDs 的水平和垂直间距确定的校正系数来调整固结系数。尽管该方法在求解过程中进行了简化，但在探索如何分析 PHDs 固结问题上仍不失为一种有效的方法。陈　征等[11]建立了分布式排水边界下双层地基二维固结模型，并求得了相应的半解析解，该模型与 PHDs 固结模型类似，为后续相关研究提供了参考。H. L. Sun 等[12]建立了 PHDs-VP 处理淤泥的非线性大应变固结模型，并使用交替方向隐式差分法获得了数值解。D. B. Song 等[13]提出了用于分析 PHDs-VP 固结的分段线性平面应变模型，该模型可以考虑大应变、非线性压缩和渗透性等复杂情况。此外，P. L. Li 等[14]通过结合改进的弹性－黏塑性本构方程，建立了考虑非线性压缩和有限蠕变的 PHDs 处理软土的有限应变固结模型。Y.

Pan 和 C. X. Li[15]构建了考虑淤泥高度随时间变化的多层 PHDs-VP 处理淤泥的非线性大应变固结模型。刘长森和李传勋[16]在 Y. Pan 和 C. X. Li[15]的基础上，进一步探讨了井阻效应对淤泥固结性状的影响。然而值得注意的是，尽管 PHDs 固结理论研究已取得一定进展，上述研究均未涉及淤堵效应对固结的影响。

淤堵效应是真空预压法加固软土面临的主要问题之一。在固结初期，PVDs 周围会迅速形成一个低渗透性的致密环形土柱(即淤堵区)，其渗透性极低，显著延缓后续固结速率[17-18]。导致淤堵效应的主要原因包括[19]：(1) PVDs 周围土体的不均匀固结；(2) 真空压力作用下土颗粒向 PVDs 迁移并聚集。值得注意的是，尽管 PHDs-VP 法相较于 PVDs-VP 法优势显著，但在采用 PHDs-VP 法处理淤泥的试验中，同样也观察到了淤堵现象[20-21]。P. L. Li 等[22]基于数字图像技术对 PHDs-VP 固结开展了试验研究，结果表明淤堵区呈椭圆形，其范围随着固结的进行逐渐发展，最终趋于稳定。在理论分析方面，K. Yang 等[23]提出一种考虑淤堵区发展过程的 PHDs-VP 处理淤泥的固结模型，但该模型将淤堵区简化为矩形区域，与 P. L. Li 等[22]研究中观察到的淤堵区呈椭圆形态存在差异，同时该模型未考虑土体的非线性压缩和渗透特性。

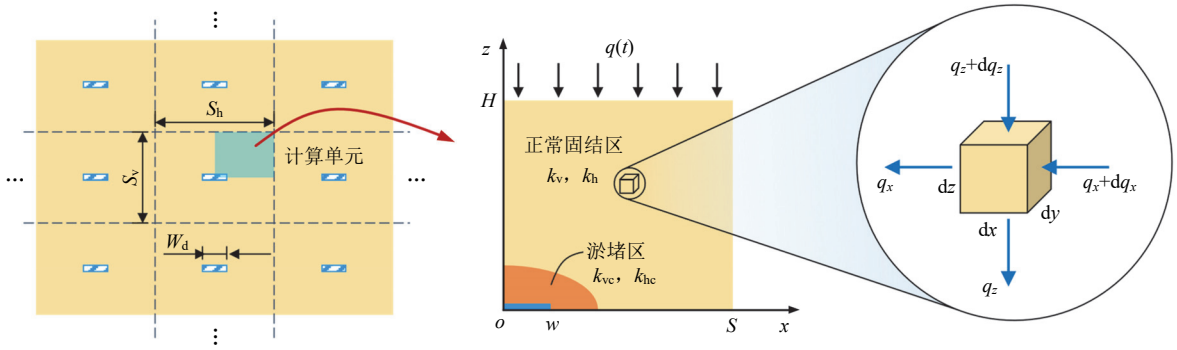
为了更准确地预测 PHDs-VP 处理疏浚淤泥的固结行为，本文考虑椭圆形淤堵区的动态发展过程，建立了 PHDs-VP 处理疏浚淤泥非线性固结模型，并获得了模型的数值解答。通过模型退化验证及与试验结果对比，验证了所建模型的准确性与适用性。本文还分析了淤堵效应、PHDs 铺设率及淤泥层厚度对固结影响，旨在为 PHDs-VP 法的实际应用提供理论指导。

## 2　模型的建立

### 2.1　模型描述

PHDs-VP 处理疏浚淤泥的剖面如图 1(a)所示，宽度为 $W_d$ 的 PHDs 分层铺设，其水平、竖直间距分别为 $S_h$，$S_v$。为建立固结模型，将疏浚淤泥在竖向截面上平均划分，使每根 PHD 对应一个矩形淤泥单元，同时选取矩形单元的 1/4 作为计算单元。如图 1(b)所示，计算单元宽为 $S(S=0.5S_h)$，高为 $H(H=0.5S_v)$，坐标原点设在计算单元左下角，水平向右为 $x$ 轴正方向，竖直向上为 $z$ 轴正方向。根据对称性可知，计算单元的顶部及两侧边界均不透水，底部仅铺设有 PHD 的区域部分透水，其余区域不透水。计算单元内的淤泥受到由上覆淤泥自重产生的上覆荷载 $q(t)$及 PHD 中的真空压力 $p_v(t)$的共同作用，发生二维渗流。本计算模型考虑了淤堵效应，将 PHDs 附近区域定义为淤堵区，其竖向渗透系数 $k_{cv}$ 和水平向渗透系数 $k_{ch}$ 显著低于正常固结区。计算单元的其余区域为正常固结区，竖向渗透系数为 $k_v$，水平向渗透系数为 $k_h$。

淤堵区的形成源于排水板周围土体的不均匀固结及土颗粒在真空压力驱动下向排水板迁移并聚集。H. L. Sun 等[24]研究表明，在 PVDs-VP 固结中，土柱半径在固结初期迅速增大，随后增长速率逐渐减缓，最终趋于稳定。P. L. Li 等[22]的研究证实了在 PHDs-VP 固结中淤堵区呈现类似的发展模式，并观测到其边界呈椭圆形，同时还提出了描述其动态发展过程的方程。本模型中淤堵区的动态发展过程如图 2 所示。参考 P. L. Li 等[22, 24]的研究，采用以下动态椭圆方程来描述淤堵区和正常区之间的动态边界：

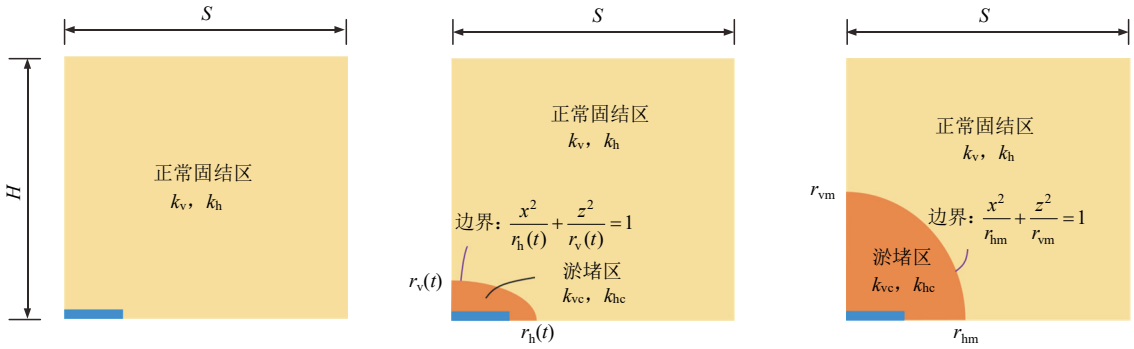



(a) PHDs-VP 处理疏浚淤泥竖向剖面　　(b) PHDs-VP 处理疏浚淤泥固结模型

(a) Vertical section of dredged slurry treated by PHDs-VP　　(b) Consolidation model of slurry induced by PHDs-VP

图 1　PHDs-VP 处理疏浚淤泥竖向剖面及固结模型示意图

Fig.1　Cross-section of dredged slurry treated by PHDs-VP and consolidation model




(a) 初始时刻　(b) 淤堵区发展　(c) 淤堵区范围达到最大

(a) Initial time　(b) Development　(c) Maximum extent

图 2　淤堵区动态发展示意图

Fig.2　Development process of clogged zone

$$\frac{x^2}{r_h(t)}+\frac{z^2}{r_v(t)}=1 \tag{1}$$

式中：$r_h(t)$和 $r_v(t)$分别为 $t$ 时刻淤堵区边界距 PHD 中心的最大水平距离和最大竖向距离，其表达式如下：

$$r_h(t)=w+(r_{hm}-w)(1-e^{-\delta_h t}) \tag{2}$$

$$r_v(t)=r_{vm}(1-e^{-\delta_v t}) \tag{3}$$

式中：$w$ 为计算单元底部铺设有 PHD 区域的宽度，$w=0.5W_d$；$r_{hm}$ 和 $r_{vm}$ 分别为 $r_h(t)$和 $r_v(t)$的最大值；$\delta_h$ 和 $\delta_v$ 分别为控制淤堵区范围在水平向和竖向增长速率的特征系数。

### 2.2　基本假定

为建立考虑淤堵区发展过程的 PHDs-VP 处理疏浚淤泥非线性固结控制方程，本文基于以下基本假设：

(1) 淤泥完全饱和且均质，土颗粒和孔隙水不可压缩，土体变形完全由孔隙水排出引起。

(2) 土体渗流服从达西定律。

(3) 受堆置场边界约束，土体仅产生竖向变形。

(4) 忽略 PHDs 的厚度，计算单元底部铺设有 PHD 的区域视为具有真空压力 $p_v(t)$的完全透水边界。

(5) 土体的压缩、渗透特性服从以下半对数模型：

正常固结区（$\frac{x^2}{r_h(t)}+\frac{z^2}{r_v(t)}>1$）：

$$e-e_0=C_c\lg(\sigma_0'/\sigma') \tag{4}$$

$$\left.\begin{aligned}e-e_0&=C_{kv}\lg(k_v/k_{v0})\\e-e_0&=C_{kh}\lg(k_h/k_{h0})\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

淤堵区（$\frac{x^2}{r_h(t)}+\frac{z^2}{r_v(t)}\leqslant 1$）：

$$e-e_0=C_{cc}\lg(\sigma_0'/\sigma_c') \tag{6}$$

$$\left.\begin{aligned}e-e_0&=C_{ckv}\lg(k_{cv}/k_{cv0})\\e-e_0&=C_{ckh}\lg(k_{ch}/k_{ch0})\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式(4)～(7)中：$e$ 为土体孔隙比；$e_0$ 为土体初始孔隙比；$\sigma'$和$\sigma_c'$为土体有效应力；$\sigma_0'$为土体初始有效应力；$C_c$ 和 $C_{cc}$ 为土体压缩指数；$C_{kh}$ 和 $C_{ckh}$ 为土体水平向渗透指数；$k_v$ 和 $k_{cv}$ 为土体竖向渗透系数；$k_{v0}$ 和 $k_{cv0}$ 为土体初始竖向渗透系数；$k_h$ 和 $k_{ch}$ 为土体水平向渗透系数；$k_{h0}$ 和 $k_{ch0}$ 为土体初始水平向渗透系数；$C_{kv}$ 和 $C_{ckv}$ 为土体竖向渗透指数。式(4)和(5)中的参数对应正常固结区，式(6)和(7)中的参数对应淤堵区。

## 3　控制方程的推导和解答

### 3.1　控制方程的推导

图 1(b)为考虑淤堵效应的 PHDs-VP 处理疏浚淤泥固结模型示意图。选取正常固结区内尺寸为 d$x$×d$y$×d$z$ 的单元体进行分析，$t$ 时刻单位时间内单元体渗流量差如下：

$$\frac{\partial Q}{\partial t}=q_z-\left(q_z+\frac{\partial q_z}{\partial z}\mathrm{d}z\right)+q_x-\left(q_x+\frac{\partial q_x}{\partial x}\mathrm{d}x\right) \tag{8}$$

式中：$q_z$ 和 $q_x$ 分别为单位时间内竖向和水平向流入单元体的渗流量。

引入达西定律，式(8)可写为

$$\frac{\partial Q}{\partial t}=-\frac{k_v}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\mathrm{d}z\mathrm{d}x\mathrm{d}y-\frac{k_h}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{9}$$

式中：$u$ 为正常固结区内土体的超静孔隙水压力，$\gamma_w$ 为水的重度。

$t$ 时刻单元体体积 $V$ 变化速率为

$$\frac{\partial V}{\partial t}=-\frac{1}{1+e_0}\frac{\partial e}{\partial t}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{10}$$

根据基本假设(1)，单元体在 $t$ 时刻的渗流量差等于同一时刻单元体体积的变化，即

$$\frac{\partial Q}{\partial t}=\frac{\partial V}{\partial t} \tag{11}$$

联立式(9)～(11)得

$$\frac{k_{\mathrm{v}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+\frac{k_{\mathrm{h}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}=\frac{1}{1+e_0}\frac{\partial e}{\partial t} \tag{12}$$

联立式(4)，(5)和(12)，并结合有效应力原理$\sigma'=\sigma_0'+q(t)-u$，得到正常固结区内土体固结控制方程：

$$\frac{k_{\mathrm{v0}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right)^{-\frac{C_{\mathrm{c}}}{C_{\mathrm{kv}}}}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+\frac{k_{\mathrm{h0}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right)^{-\frac{C_{\mathrm{c}}}{C_{\mathrm{kh}}}}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}=\frac{1}{1+e_0}\frac{C_{\mathrm{c}}}{\sigma'\ln 10}\left(\frac{\partial u}{\partial t}-\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}\right) \tag{13}$$

同理可以推导淤堵区内土体固结控制方程。最终建立考虑淤堵区动态发展过程的 PHDs-VP 处理疏浚淤泥非线性固结控制方程：

$$\left.\begin{aligned}&\frac{k_{\mathrm{v0}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right)^{-\frac{C_{\mathrm{c}}}{C_{\mathrm{kv}}}}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+\frac{k_{\mathrm{h0}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right)^{-\frac{C_{\mathrm{c}}}{C_{\mathrm{kh}}}}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}=\\&\quad\frac{1}{1+e}\frac{C_{\mathrm{c}}}{\sigma'\ln 10}\left(\frac{\partial u}{\partial t}-\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}\right)\quad\left(\frac{x^2}{r_{\mathrm{h}}(t)}+\frac{a^2}{r_{\mathrm{v}}(t)}>1\right)\\&\frac{k_{\mathrm{cv0}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\left(\frac{\sigma_{\mathrm{c}}'}{\sigma_0'}\right)^{-\frac{C_{\mathrm{cc}}}{C_{\mathrm{ckv}}}}\frac{\partial^2 u_{\mathrm{c}}}{\partial z^2}+\frac{k_{\mathrm{ch0}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\left(\frac{\sigma_{\mathrm{c}}'}{\sigma_0'}\right)^{-\frac{C_{\mathrm{cc}}}{C_{\mathrm{ckh}}}}\frac{\partial^2 u_{\mathrm{c}}}{\partial x^2}=\\&\quad\frac{1}{1+e}\frac{C_{\mathrm{cc}}}{\sigma_{\mathrm{c}}'\ln 10}\left(\frac{\partial u_{\mathrm{c}}}{\partial t}-\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}\right)\quad\left(\frac{x^2}{r_{\mathrm{h}}(t)}+\frac{a^2}{r_{\mathrm{v}}(t)}\leqslant 1\right)\end{aligned}\right\} \tag{14}$$

式中：$u_{\mathrm{c}}$ 淤堵区内土体的超静孔隙水压力。

### 3.2 求解条件

任意时刻，在淤堵区与正常固结区的边界上，2 个区域的超静孔隙水压力相等，同时，从正常固结区流出的孔隙水与流入淤堵区的孔隙水体积相等，因此在淤堵区边界上，具有如下孔压连续和渗流连续条件：

$$\frac{x^2}{r_{\mathrm{h}}(t)}+\frac{z^2}{r_{\mathrm{v}}(t)}=1,\quad u=u_{\mathrm{c}} \tag{15}$$

$$\frac{x^2}{r_{\mathrm{h}}(t)}+\frac{z^2}{r_{\mathrm{v}}(t)}=1,\quad k_{\mathrm{v}}\frac{\partial u}{\partial z}=k_{\mathrm{cv}}\frac{\partial u_{\mathrm{c}}}{\partial z} \tag{16}$$

$$\frac{x^2}{r_{\mathrm{h}}(t)}+\frac{z^2}{r_{\mathrm{v}}(t)}=1,\quad k_{\mathrm{h}}\frac{\partial u}{\partial x}=k_{\mathrm{ch}}\frac{\partial u_{\mathrm{c}}}{\partial x} \tag{17}$$

根据对称性可知，计算单元的顶部及两侧均不透水，因此顶部和两侧的边界条件如下：

$$z=H,\quad \frac{\partial u}{\partial z}=0 \tag{18}$$

$$x=0,\quad \frac{\partial u}{\partial x}=\frac{\partial u_{\mathrm{c}}}{\partial x}=0 \tag{19}$$

$$x=S,\quad \frac{\partial u}{\partial x}=\frac{\partial u_{\mathrm{c}}}{\partial x}=0 \tag{20}$$

根据假设(3)，忽略 PHD 的厚度，将铺设有 PHD 的区域视为具有真空压力 $p_{\mathrm{v}}(t)$的完全透水边界，而计算单元底部的其他区域则为不透水边界，因此计算单元底部的混合边界条件如下：

$$\left.\begin{aligned}&z=0,\quad 0\leqslant x\leqslant w,\quad u_{\mathrm{c}}=-p_{\mathrm{v}}(t)\\&z=0,\quad w<x\leqslant S,\quad \frac{\partial u_{\mathrm{c}}}{\partial a}=0\end{aligned}\right\} \tag{21}$$

需特别指出的是，上述求解条件可能不适用于最顶层淤泥的固结分析。在 PHDs-VP 法的实际应用中，最上层的 PHDs 被高含水率淤泥所覆盖，能够达到一定的“土封”效果，因此在完成最顶层淤泥的吹填后，可省略土工膜的铺设以简化施工流程。针对淤泥表层设置土工膜的工况，其顶层固结求解与前述分析一致。而当表层未布设土工膜时，淤泥表面形成自由排水边界，此时最顶层淤泥固结计算需作两项调整：计算单元高度 $H$ 应依据最顶层淤泥的实际厚度取值(区别于其他层采用的淤泥层厚度的一半)；同时在保持其余求解条件不变的前提下，对顶部边界条件(式(19))做如下修改：

$$z=H,\quad u=0 \tag{22}$$

在初始时刻，上覆荷载完全由孔隙水承担，因此初始条件如下：

$$t=0,\quad u=u_{\mathrm{c}}=q(t=0) \tag{23}$$

### 3.3 数值解答

本文控制方程具有显著非线性特征，且求解条件高度复杂，难以直接获得其严格解析解。为此，本文采用有限元法求解考虑淤堵区动态发展过程的 PHDs-VP 处理疏浚淤泥非线性固结控制方程。为保证计算过程的稳定性与收敛性，在求解过程中采用了自适应时间步长控制，并通过网格独立性验证确保空间离散结果的可靠性。基于求得的超静孔隙水压力分布，可进一步计算淤泥层的平均固结度。

固结度可从应力和变形 2 个角度进行定义：按应力定义的固结度指在 $t$ 时刻由附加应力引起的有效应力与最终有效应力之比；按变形定义的固结度指土体在外荷载作用下，经历时间 $t$ 产生的固结变形量与最终固结变形量的比值。

按应力定义的淤泥层平均固结度 $U_{\mathrm{p}}$ 表示为

$$U_{\mathrm{p}}(t)=\frac{\iint_{S_{\mathrm{c}}(t)}(\sigma_{\mathrm{c}}'-\sigma_0')\mathrm{d}x\mathrm{d}z+\iint_{S_{\mathrm{n}}(t)}(\sigma'-\sigma_0')\mathrm{d}x\mathrm{d}z}{\int_0^H\int_0^S(\sigma_{\mathrm{u}}'-\sigma_0')\mathrm{d}x\mathrm{d}z} \tag{24}$$

式中：$S_{\mathrm{c}}(t)$和 $S_{\mathrm{n}}(t)$分别为 $t$ 时刻的淤堵区和正常固结区范围，$\sigma_{\mathrm{u}}'$为土体最终有效应力。

按变形定义的淤泥层平均固结度 $U_{\mathrm{s}}$ 表示为

$$U_{\mathrm{s}}(t)=\frac{S_{\mathrm{x}}(t)}{S_\infty} \tag{25}$$

式中：$S_{\mathrm{x}}(t)$和 $S_\infty$分别为淤泥层在 $t$ 时刻的平均变形和最终平均变形，其表达式分别为

$$S_{\mathrm{x}}(t)=\frac{1}{S}\int_0^S\int_0^H\frac{e_0-e(x,\ a,\ t)}{1+e_0}\mathrm{d}z\mathrm{d}x \tag{26}$$

$$S_\infty=\frac{1}{S}\int_0^S\int_0^H\frac{e_0-e_{\mathrm{u}}}{1+e_0}\mathrm{d}z\mathrm{d}x \tag{27}$$

式中：$e_{\mathrm{u}}$ 为土体最终孔隙比。

# 4　解答的验证

本节通过退化分析和模型试验对比 2 个方面，验证本文模型的准确性与适用性。为便于与其他研究对比，在下文的退化分析及后续的固结性状分析中，采用量纲一的时间因子 $T_{\mathrm{v}}$，其表达式为

$$T_{\mathrm{v}}=c_{\mathrm{v0}}t/H^2 \tag{28}$$

其中，

$$c_{\mathrm{v0}}=(1+e_0)k_{\mathrm{v0}}\sigma_0'\ln 10/(C_{\mathrm{c}}\gamma_{\mathrm{w}})$$

## 4.1　退化分析

E. H. Davis 和 G. P. Raymond[25]在假定固结系数保持恒定的前提下，推导出瞬时荷载下一维非线性固结的解析解，但该解答仅适用于压缩指数与渗透指数比值为 1 的特殊情形。李传勋和王　素[26]引入经典的半对数压缩及渗透模型，建立了软土一维非线性固结分析模型，推导出压缩指数与渗透指数比值不等于 1 时的一维非线性固结近似解析解，并给出了相应的差分解答进行对比验证。基于李传勋和王素[26]的一维非线性固结模型，对本文模型进行相应简化：首先，忽略固结过程中的淤堵效应，即设定淤堵区参数与正常固结区一致；其次，设定 PHDs 满铺且真空压力 $p_{\mathrm{v}}(t)$为 0，此时计算单元底部边界转变为自由排水边界，该模型退化为一维非线性固结模型。设定上覆荷载 $q(t)$为恒定值 $q_{\mathrm{u}}$，其余计算参数参考李传勋和王　素[26]的研究进行取值，具体如下：$e_0$=1.571，$\sigma_0'$=50 kPa，$\gamma_{\mathrm{w}}$=10 kN/m$^3$，$H$=10 m，$C_{\mathrm{c}}$=$C_{\mathrm{cc}}$=0.6，$k_{\mathrm{v0}}$=$k_{\mathrm{cv0}}$=8×10$^{-9}$ m/s。

图 3 为本文模型退化后计算得到的平均固结度随时间变化曲线与 E. H. Davis 和 G. P. Raymond[25]的解析解答及李传勋和王　素[26]的差分解答的对比。结果表明，在压缩指数与渗透指数比值等于 1 的情况下，本文模型计算结果与 E. H. Davis 和 G. P. Raymond[25]的解析解答高度一致；在该比值不等于 1 时，计算结果与李传勋和王　素[26]的差分解答吻合较好。这一对比结果验证了本文所建模型的正确性。

## 4.2　与模型试验结果对比

J. C. Chai 等[27]开展了使用 PHD-VP 法处理疏浚淤泥的模型试验，其试验布置如图 4 所示。模型箱内部尺寸为 0.6 m×0.3 m×1.0 m，一个长度为 0.56 m、截面尺寸为 150 mm×5.5 mm 的 PHD 布置于淤泥层中央，其一端通过转接头连接至排水管，然后依次连接水汽分离装置和真空泵。完成淤泥吹填后，淤泥表面覆盖塑料膜进行密封，对 PHD 施加−60 kPa 的真空压力，并在 S1 处进行沉降监测。

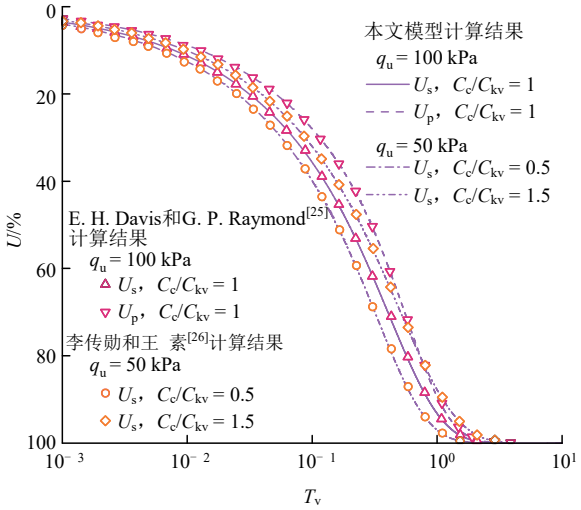



图 3　本文模型解答与一维非线性固结模型[25-26]的对比

Fig.3　Comparison between proposed model and one-dimensional nonlinear consolidation models[25-26]

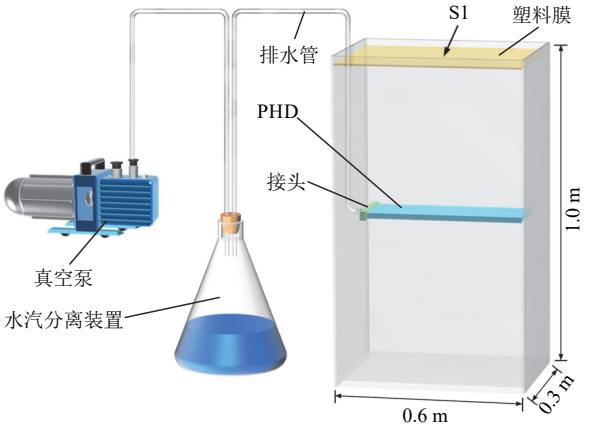



图 4　J. C. Chai 等[27]模型试验示意图

Fig.4　Schematic diagram of J. C. Chai et al.'s[27] model experiment

试验所用的淤泥含水率为 200%，假定其相对密度为 2.65，计算得到的初始孔隙比 $e_0=5.3$；同时，试验测得其压缩指数 $C_c=1.2$[27]。根据工程经验，取其渗透指数 $C_k=1.0$，$e_0=5.3$ 对应的初始渗透系数 $k_{v0}=3.2\times10^{-7}$ m/s。参考 P. L. Li 等[22]的试验结果，取 $r_{hm}=0.15$ m，$r_{vm}=0.25$ m，$\delta_h=2.0\times10^{-6}\ s^{-1}$，$\delta_v=1.4\times10^{-6}\ s^{-1}$，$k_{vc0}/k_{v0}=0.2$ 来表征淤堵效应。此外，计算单元的高度 $H=0.5$ m，底部排水区域宽度 $w=0.075$ m，假定淤泥初始有效应力 $\sigma_0=0.7$ kPa。

图 5 为本文模型计算结果与 J. C. Chai 等[27]试验实测沉降对比。结果表明，考虑淤堵效应计算得到的沉降曲线与实测值吻合较好，而忽略淤堵效应则显著高估了沉降速率。

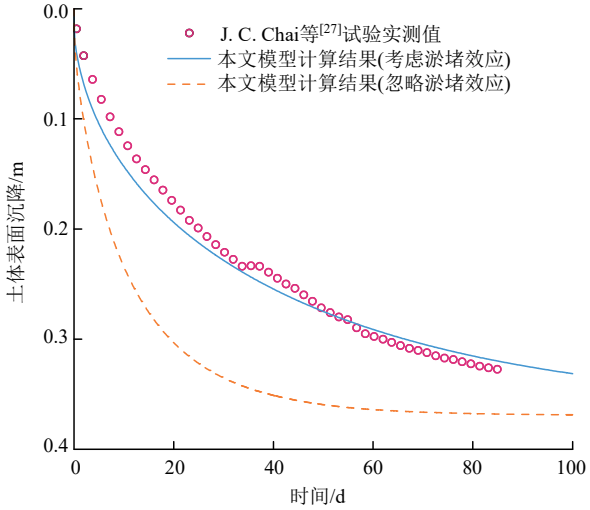



图 5　本文模型计算结果与模型试验实测值[27]的对比

Fig.5　Comparison between calculated results and experimental data from model experiment[27]

朱炯杰[28]开展了水平排水板真空预压联合堆载法处理疏浚淤泥的模型试验，共设置 3 组试验，以探究不同堆载时机对该法的影响。模型箱尺寸为 0.5 m×0.4 m×0.6 m(长×宽×高)，底部中心位置铺设有一个尺寸为 0.1 m×0.04 m×0.4 m(宽×厚×长)的排水板，通过排水通道连接水汽分离装置，最后连接至真空泵。淤泥吹填至 0.5 m 后，安装活塞用以施加堆载，最后安装盖板保证模型箱的气密性。试验开始后，对各组 PHD 施加−80 kPa 的真空压力。第二组试验从 429 h 开始逐级施加堆载压力，共分 4 级，每级增量 5 kPa，各级间隔 48 h。本研究针对该组试验条件开展模拟，并与试验结果进行对比。

试验淤泥取自温州市龙湾区瓯飞围垦工程，其基本物理性质如下：初始含水率约为 105.1%，相对密度为 2.74，初始孔隙比 $e_0=2.9$，初始渗透系数 $k_{v0}=2.937$ m/d，压缩指数 $C_c=0.65$，压缩系数 $C_{kv}=1.2$。淤堵效应参数设定为：$r_{hm}=0.15$ m，$r_{vm}=0.2$ m，$\delta_h=2.0\times10^{-6}\ s^{-1}$，$\delta_v=1.4\times10^{-6}\ s^{-1}$，$k_{vc0}/k_{v0}=0.3$。计算单元的高度 $H=0.5$ m，底部排水区域宽度 $w=0.05$ m，假定淤泥初始有效应力 $\sigma_0=1.0$ kPa。

图 6 给出了本文模型与朱炯杰[28]试验实测沉降的对比。结果显示，本文模型(考虑淤堵效应)能够较准确地再现实际沉降过程，进一步验证了其在不同试验条件和加载方式下的适用性。

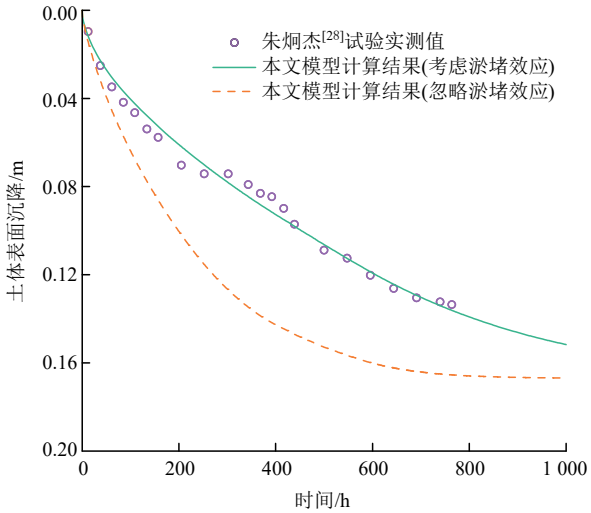



图 6　本文模型计算结果与模型试验实测值[28]的对比

Fig.6　Comparison between calculated results and experimental data from model experiment[28]

## 5　固结性状分析

为深入研究 PHDs-VP 法处理疏浚淤泥的固结特性，并为工程应用提供理论参考，本节重点分析了淤堵效应、PHDs 铺设率、淤泥层厚度以及土体非线性特性对固结的影响。本节所采用的计算模型中，单元顶部边界设为不透水，上覆荷载 $q(t)$及 PHD 中的真空压力 $p_v(t)$均以单级瞬时加载形式施加。本文计算参数的选取综合参考了工程经验及 P. L. Li 等[22]的研究，除特别说明外，均按表 1 取值。

### 5.1　淤堵效应

图 7 展示了土体中超静孔隙水压力的消散过程。从图中可以看出，在固结初期，由于真空压力的作用，PHD 周围的孔隙水迅速排出，导致超静孔隙水压力快速消散。随着固结的进行，超静孔隙水压力的消散速率显著降低，这归因于淤堵效应及土体非线性渗透特性的影响，二者导致土体渗透性持

表 1　固结特性计算参数取值

Table 1　Values of parameters utilized in consolidation characteristic calculation

| $S$/m | $w$/m | $e_0$ | $q$/kPa | $k_{v0}$/(m • s$^{-1}$) | $r_{vm}$/m | $C_c$ | $\delta_v$/s$^{-1}$ | $H$/m | $\gamma_w$/(kN • m$^{-3}$) | $\sigma_0'$/kPa | $p_v$/kPa | $k_{h0}$/(m • s$^{-1}$) | $r_{hm}$/m | $C_{kv}$ | $\delta_h$/s$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.25 | 0.05 | 2.6 | 40 | $5\times10^{-8}$ | 0.4 | 1 | $0.7\times10^{-6}$ | 0.8 | 9.8 | 5 | 80 | $5\times10^{-8}$ | 0.2 | 1.3 | $1.4\times10^{-6}$ |

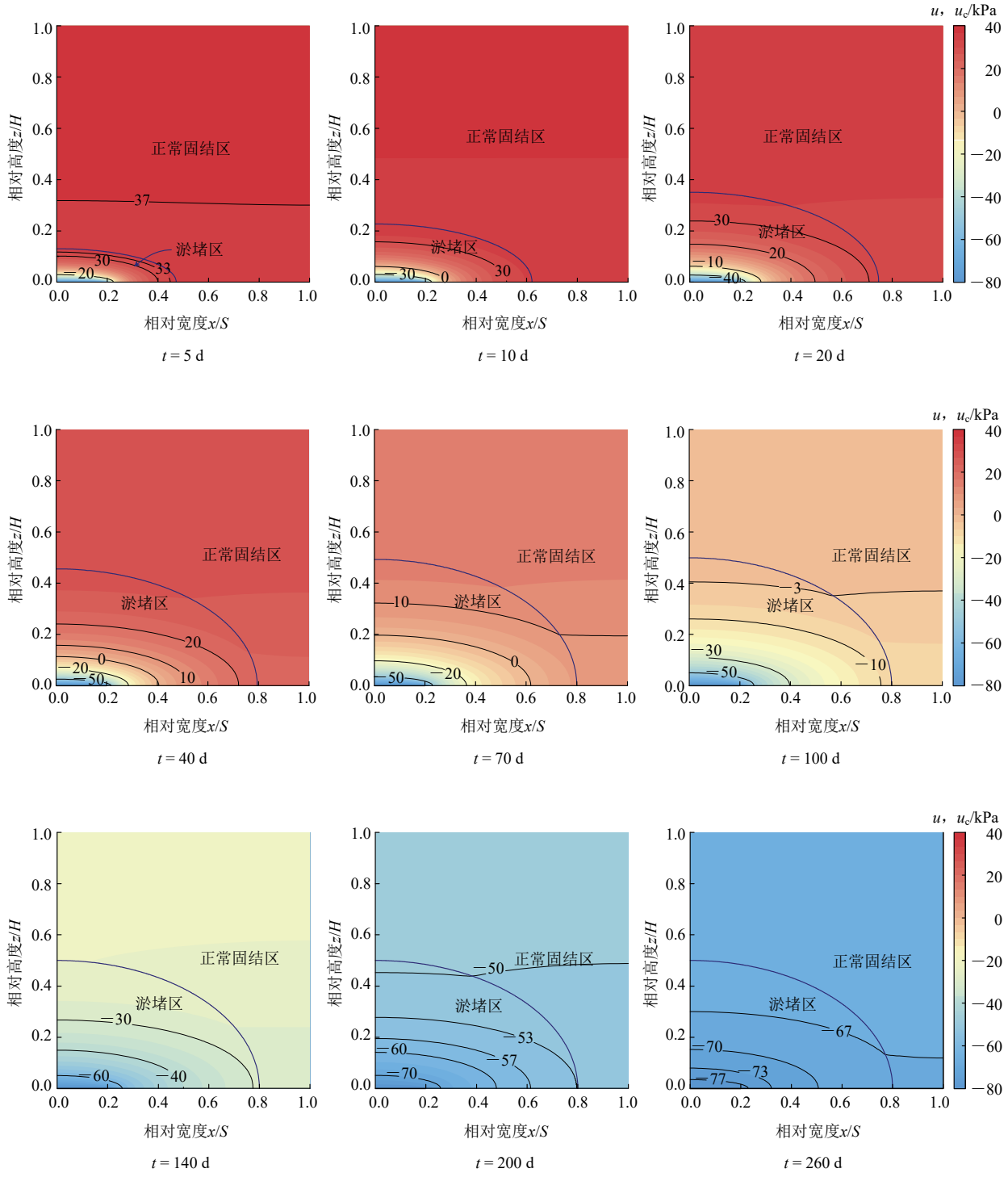



图 7　土体中超静孔隙水压力的消散过程

Fig.7　Dissipation process of excess pore water pressure

续下降，进而抑制了孔隙水的排出。此外，图中还显示，淤堵区的范围自固结开始后迅速发展，自第 20 d 起，其发展速率明显放缓，至第 40 d 时，其范围已基本趋于稳定，这一现象与 P. L. Li 等[22]在 PHDs-VP 试验中观察到的淤堵区发展过程相似。进一步分析表明，在淤堵区域内，超静孔隙水压力的空间分布具有显著差异，且其值随距 PHD 距离的增加而明显升高。相比之下，在正常固结区内，任意时刻超静孔隙水压力的空间差异均较小。这是由于正常固结区的渗透系数远大于淤堵区，孔隙水能够较为顺畅地流向与淤堵区的交界面；而淤堵区因渗透系数极低，使得孔隙水向 PHD 的进一步排出受到显著阻碍。

改变淤堵区土体的初始渗透系数，淤堵严重程度对固结的影响如图 8 所示。可以看出，淤堵越严重(淤堵区土体渗透系数越低)，土体的固结速率越慢。从工程实践的角度来看，土体达到目标平均固结度所需的时间是评价固结效果的重要指标。以 $k_{vc0}/k_{v0}$=0.1 时土体达到 90%平均固结度对应的时间($T_{v90}$=5.3)作为基准进行比较，当 $k_{vc0}/k_{v0}$ 分别降低至 0.02 和 0.01 时，$T_{v90}$ 显著增加至 10.4 和 26.0，增幅分别达到 96%和 390%，这表明更严重的淤堵(即淤堵区与正常固结区初始渗透系数的比值越小)会显著延缓固结。尽管在实际工程中淤堵效应难以完全避免，但可以通过添加絮凝剂、固化剂或采用增压式真空预压等方法加以缓解[29-30]。若通过改进措施将 $k_{vc0}/k_{v0}$ 增大至 0.2 和 0.4，$T_{v90}$ 可分别降低至 2.6(下降约 49%)和 2.9(下降约 72%)。此外，当未考虑淤堵效应，即 $k_{vc0}/k_{v0}$=1 时，$T_{v90}$ 仅为 0.8，这表明忽视淤堵效应会显著高估土体的固结速率。

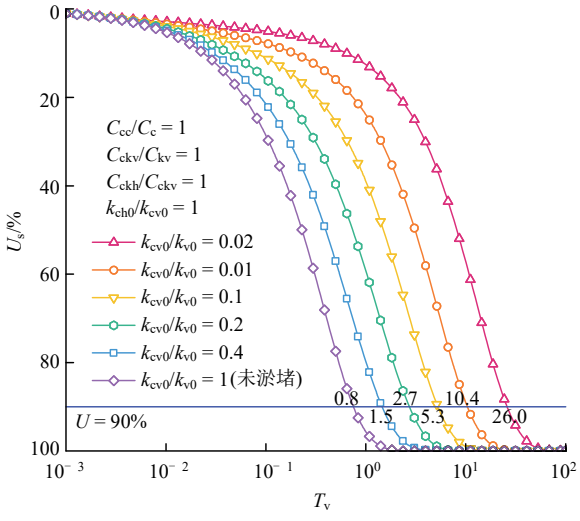



图 8　淤堵严重程度对固结的影响

Fig.8　Influence of clogging severity on consolidation

图 9 展示了淤堵区发展速率对固结的影响，其中，参数 $\delta_h$ 和 $\delta_v$ 分别控制淤堵区在水平和竖向方向上的发展速率，其数值越大，淤堵区在该方向上发展越快，其中 $t_{c90}$ 表示淤堵区达到最大范围 90%时所需的时间。可以看出，淤堵区发展越快，土体固结速率越慢，这种影响主要体现在固结的前期和中期。工程中可采用分级式真空预压等技术手段延缓淤堵区的形成[31]，从而提升固结速率。此外，若忽略淤堵区的动态发展过程，直接假设其瞬时形成，将导致对土体固结速率的低估，从而影响固结效果的准确评估。

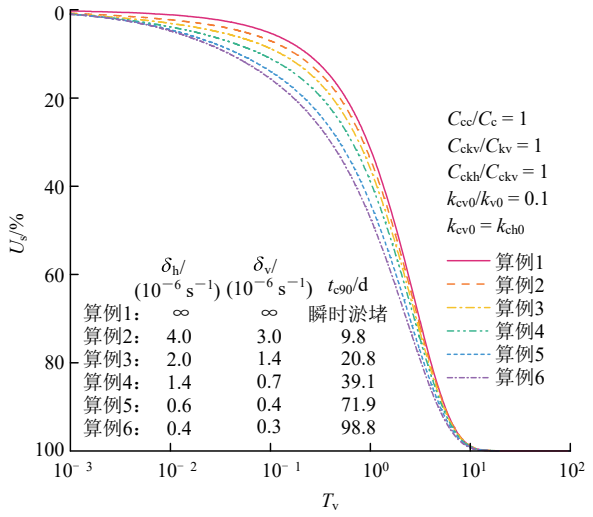



图 9　淤堵区发展速率对固结的影响

Fig.9　Influence of development rate of clogged zone on consolidation

## 5.2　PHDs 铺设率

为表征塑料排水板(PHDs)的铺设密度，引入 PHDs 铺设率 $\lambda = W_d/S_h = w/S$，图 10 为不同$\lambda$下土体的固结曲线。图中，$\Delta U$ 表示在相同时刻，不同$\lambda$下计算得到的平均固结度与$\lambda$ = 0.1 时的平均固结度之间的差值。在本节计算中，PHDs 的宽度设为固定值，通过调整计算单元的宽度 $S$ 来改变$\lambda$。结果表明，随着$\lambda$的提高，固结速率显著加快；同时，$\Delta U$ 随时间呈现先增大达到峰值后逐渐减小的变化规律。当$\lambda$从 0.1 增大到 0.2 和 0.3 时，$\Delta U$ 的最大值分别为 27%和 35%，而当$\lambda$从 0.3 进一步增大到 0.4，0.6 和

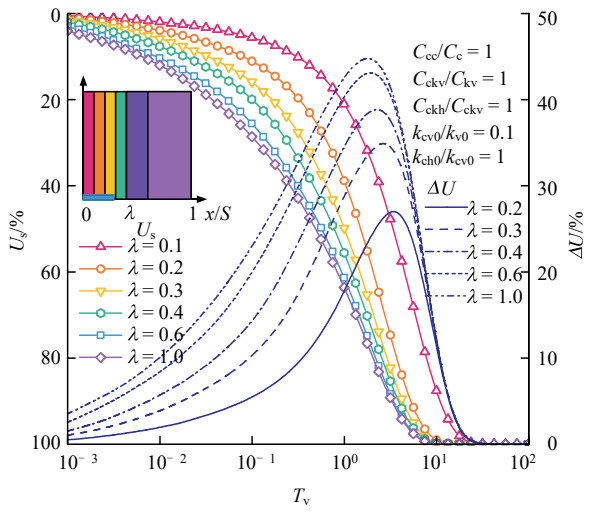



图 10　PHDs 铺设率对固结的影响

Fig.10　Influence of PHDs layout ratio on consolidation

1.0 时，$\Delta U$ 的最大值仅分别增加 4%，8%和 10%。这表明随着 PHDs 铺设率增大，固结速率的提升幅度逐渐减小，且当铺设率超过某一临界值后，继续提高铺设率对加速固结的促进作用已无显著效果。在实际工程中，需综合考量成本及工期要求，选取合适的铺设率。

### 5.3　淤泥层厚度

计算单元的高度 $H$ 取对应淤泥层厚度的 1/2。图 11 为不同 $H$ 和$\lambda$条件下，土体达到指定平均固结度所需的时间。为消除 $H$ 变化对时间因子 $T_v$ 的影响，本节采用新的时间因子计算公式：$T_v = c_{v0}t/H_R^2$，其中，参考厚度 $H_R$ 取 0.8 m。从图中可以看出，在相同铺设率下，淤泥层越薄，淤泥达到指定平均固结度所需时间越短，说明缩短排水路径能显著加快固结进程。当$\lambda$从 0.1 提升至 0.2 时，$T_{v90}$ 明显下降，而进一步增大$\lambda$时，$T_{v90}$ 的降低幅度明显减小，这与前文结论一致。

为优化工程方案，并提供设计参考，本研究提出了“最优铺设率”的概念，其定义为：在达到与满铺 PHDs 相同目标固结度的条件下，所需时间延长不超过可接受差值时的最小铺设率。在真空预压工程中，固结期通常主导整个堆置场的处理工期。若固结时间相较于满铺方案延长不超过 20%，在工程调度和后续施工衔接上通常仍在可接受范围。从成本效益角度分析，寻求尽可能低的铺设率能显著节约材料和施工费用。本文取“可接受差值”为 20%。在 $H$(淤泥层厚度一半)分别为 0.4，0.8，1.2 和

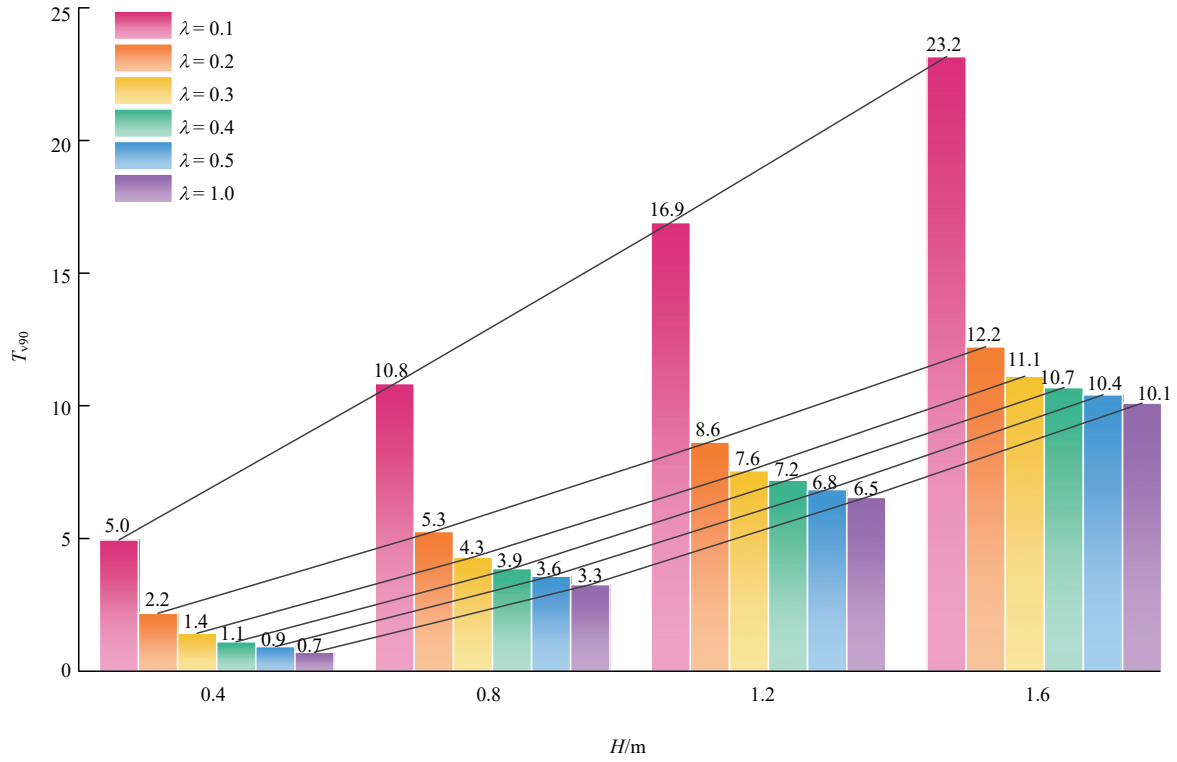



图 11　不同淤泥层厚度和 PHDs 铺设率下达到指定平均固结度所需的时间

Fig.11　Time required to achieve a specified $U_s$ under different thicknesses of slurry layer and PHDs layout ratio

1.6 m 时，$\lambda$=0.2 时，$T_{v90}$ 分别比满铺情况高出 206%，61%，32%和 21%；$\lambda$ = 0.3 时，分别高出 100%，32%，15%和 10%。据此可得：对于 $H$=1.2 和 1.6 m，最优铺设率在 0.2～0.3。进一步分析图 11 中数据可知：$H$ = 0.8 m 时，最优铺设率范围为 0.3～0.4；而 $H$=0.4 m 时，最优铺设率大于 0.5。由此可见，随着淤泥层厚度的增大，最优铺设率逐渐减小。需要指出的是，最优铺设率的选取还需结合工程现场的土体特性、场地条件、工期要求以及经济可行性等因素综合评估。本文方法与结论可为相关工程提供参考。

### 5.4　土体非线性特性

图 12 和 13 为改变淤堵区与正常固结区压缩指数和渗透指数的比值，渗透指数和压缩指数对固结的影响。结果表明，在渗透指数保持不变的条件下，压缩指数越大，土体固结速率越慢；而在压缩指数一定时，随着渗透指数的增大，固结速率加快。此外还可看出，在同一时刻，以变形计算得到的平均固结度始终高于以超静孔隙水压力消散计算得到的平均固结度，即沉降变形的发展快于超静孔隙水压力的消散。

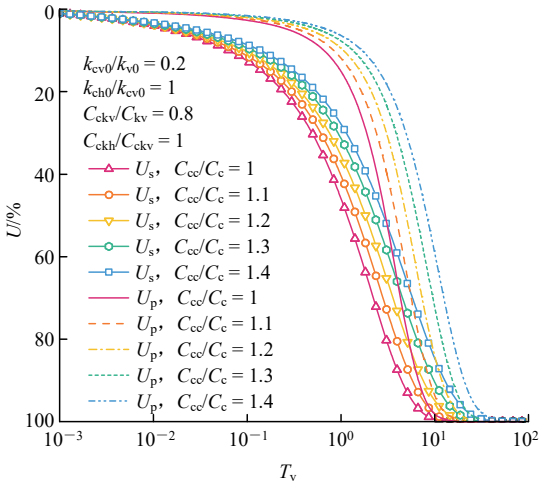



图 12　压缩指数对固结的影响

Fig.12　Influence of compression index on consolidation

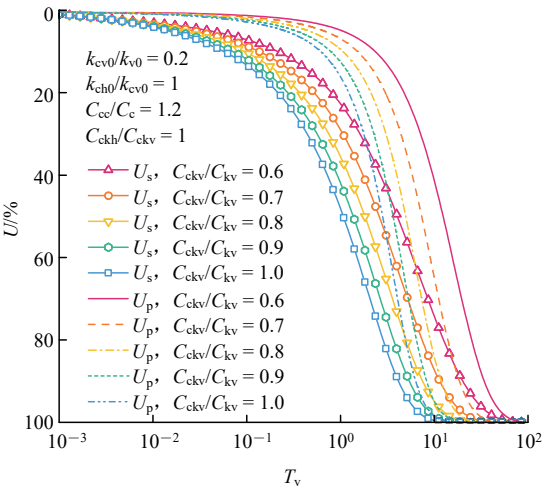



图 13　渗透指数对固结的影响

Fig.13　Influence of permeability index on consolidation

## 6　结　论

本文建立了考虑椭圆形淤堵区动态发展过程的 PHDs 处理疏浚淤泥非线性固结模型，并获得了相应的数值解答。在验证了模型的正确性和适用性的基础上，对淤泥的固结性状进行了系统分析，得出以下结论：

(1) 淤堵效应严重延缓了土体的固结进程。淤堵越严重(即淤堵区与正常固结区的初始渗透系数比值越小)、淤堵区发展越快，对固结越不利。

(2) 提高 PHDs 铺设率有助于提升固结速率，但当铺设率超过临界值后，继续增加铺设率对固结速率的提升可以忽略。

(3) 减小淤泥层厚度能够有效缩短达到目标平均固结度所需的时间。

(4) PHDs 的最优铺设率随淤泥层厚度增大而减小。

(5) 土体的固结速率随着压缩指数增大而减小，随着渗透指数的增大而增大。

本文模型能够较好地反映 PHDs-VP 处理疏浚淤泥的固结规律，但仍存在一定局限性，例如未考虑土体蠕变效应、非达西渗流特性及多层 PHDs 相互作用等因素。未来研究可在此基础上进一步完善，以提升模型在复杂工况下的适用性。

### 参考文献(References)：

[1] 朱　伟，闵凡路，吕一彦，等. “泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. 岩土力学，2013，34(11)：3 041－3 054.(ZHU Wei，MIN Fanlu，LV Yiyan，et al. Subject of “Mud science and application technology” and its research progress[J]. Rock and Soil Mechanics，2013，34(11)：3 041－3 054.(in Chinese))

[2] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机制与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报，2021，43(2)：201－225.(CAI Yuanqiang. 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.(in Chinese))

[3] 卢萌盟，孙锦鑫，李传勋，等. 考虑变井阻的增压式真空预压固结解析模型及解答[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(5)：1 259－1 272.(LU Mengmeng，SUN Jinxin，LI Chuanxun，et al. Analytical solutions for consolidation of soft soil improved by air-boosted vacuum preloading considering the varied well resistance of PVDs[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(5)：1 259－1 272.(in Chinese))

[4] 林玫玲. 基于全过程监测数据的软土真空预压处理分析[J]. 地基处理，2024，6(5)：512－519.(LIN Meiling. Analysis of vacuum preloading treatment for soft soil based on whole process monitoring data[J]. Journal of Ground Improvement，2024，6(5)：512－519.(in Chinese))

[5] WANG J，CAI Y Q，MA J J，et al. Improved vacuum preloading method for consolidation of dredged clay-slurry fill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2016，142(11)：06016012.

[6] 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.

[7] 周　洋，蒲诃夫，李展毅，等. 水平排水板－真空预压联合处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(增 1)：3 246－3 251.(ZHOU Yang，PU Hefu，LI Zhanyi，et al. Experimental investigations on treatment of dredged slurry by vacuum-assisted prefabricated horizontal drains[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，38(Supp.1)：3 246－3 251.(in Chinese))

[8] YANG K，LU M M，SUN J X，et al. Experimental study on dewatering and reinforcement of dredged slurry treated by PHDs-PVDs under step vacuum preloading[J]. Geotextiles and Geomembranes，2024，52(5)：887－899.

[9] YIN J H，CHEN W B，WU P C，et al. Field study of a sustainable land reclamation approach using dredged marine sediment improved by horizontal drains under vacuum preloading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2024，150(11)：04024114.

[10] CHAI J C，HORPIBULSUK S，SHEN S L，et al. Consolidation analysis of clayey deposits under vacuum pressure with horizontal drains[J]. Geotextiles and Geomembranes，2014，42(5)：437－444.

[11] 陈　征，张　峰，陈益峰，等. 排水通道分布式布设下双层地基平面应变固结分析[J]. 工程力学，2020，37(1)：135－144.(CHEN Zheng，ZHANG Feng，CHEN Yifeng，et al. Plane-strain consolidation analysis of double-layered ground with strip-shaped distributed drainage boundary[J]. Engineering Mechanics，2020，37(1)：135－144.(in Chinese))

[12] SUN H L，ZHANG H，GENG X Y，et al. Large-strain consolidation analysis for clayey sludge improved by horizontal drains[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2023，149(8)：04023057.

[13] SONG D B，PU H F，YIN Z Y，et al. Plane-strain model for large strain consolidation induced by vacuum-assisted prefabricated horizontal drains[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics，2023，47(10)：1 911－1 935.

[14] LI P L，SONG D B，YIN Z Y，et al. Large strain consolidation model for very soft soils with prefabricated horizontal drains considering nonlinear compression and creep[J]. Acta Geotechnica，2025，20(3)：1 431－1 453.

[15] PAN Y，LI C X. Installation of PHDs accelerates the self-weight consolidation of dredged sludge yards by considering the influence of the stacking process[J]. Computers and Geotechnics，2024，169：106218.

[16] 刘长森，李传勋. 考虑井阻效应的 PHDs 处理疏浚淤泥堆场大应变非线性固结[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(7)：1 885－1 896.(LIU Changsen，LI Chuanxun. Large-strain nonlinear consolidation of dredged sludge yards treated by PHDs considering well resistance effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(7)：1 885－1 896.(in Chinese))

[17] 孙宏磊，徐振恺，刘斯杰，等. 考虑土柱发展过程的淤泥真空预压大应变固结计算[J]. 岩土力学，2025，46(1)：133－146.(SUN Honglei，XU Zhenkai，LIU Sijie，et al. Large strain consolidation calculation for slurries under vacuum preloading considering the development process of soil column[J]. Rock and Soil Mechanics，2025，46(1)：133－146.(in Chinese))

[18] 李水江，黄永基，苏　键. 不同含水率疏浚淤泥真空预压下的淤堵行为[J]. 地基处理，2022，4(3)：201－205.(LI Shuijiang，HUANG Yongji，SU Jian. Clogging behavior of dredged slurry with different water content under vacuum pressure[J]. Journal of Ground Improvement，2022，4(3)：201－205.(in Chinese))

[19] ZHOU Y，YANG H，WANG P，et al. Vacuum-induced lateral deformation around a vertical drain in dredged slurry[J]. Geosynthetics

International，2022，29(5)：495－505.

[20] HU X Q，ZHANG W K，FU H T，et al. Clogging effect of prefabricated horizontal drains in dredged soil by air booster vacuum consolidation[J]. Geotextiles and Geomembranes，2021，49(6)：1 529－1 538.

[21] HE Z L，SUN H L，CHU J，et al. Image-based deformation characterization of dredged soil during consolidation under vacuum preloading with horizontal drains[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2025，151(7)：04025058.

[22] LI P L，YIN Z Y，SONG D B，et al. Experimental investigation and image-based analysis of clay slurry consolidation with prefabricated horizontal drain[J]. Acta Geotechnica，2025，20：3 905－3 927.

[23] YANG K，LU M M，LI K，et al. Consolidation of slurry treated by PHDs-VP incorporating development process of clogged zone[J]. Geotextiles and Geomembranes，2025，53(4)：897－908.

[24] SUN H L，HE Z L，GENG X Y，et al. Formation mechanism of clogging of dredge slurry under vacuum preloading visualized using digital image technology[J]. Canadian Geotechnical Journal，2022，59(7)：1 292－1 298.

[25] DAVIS E H，RAYMOND G P. A non-linear theory of consolidation[J]. Geotechnique，1965，15(2)：161－173.

[26] 李传勋，王　素. 软土一维非线性固结近似解析解[J]. 岩土力学，2018，39(10)：3 548－3 554.(LI Chuanxun，WANG Su. An analytical solution for one-dimensional nonlinear consolidation of soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(10)：3 548－3 554.(in Chinese))

[27] CHAI J C，WANG J，DING W Q，et al. Method for calculating horizontal drain induced non-linear and large strain degree of consolidation[J]. Geotextiles and Geomembranes，2022，50(2)：231－237.

[28] 朱炯杰. 水平排水板真空预压联合堆载法处理疏浚淤泥试验和固结理论研究[硕士学位论文][D]. 温州：温州大学，2023.(ZHU Jiongjie. Consolidation calculation method and experiment on dredging sludge of PHD vacuum preloading combined with surcharge[M. S. Thesis][D]. Wenzhou：Wenzhou University，2023.(in Chinese))

[29] 占　宏，李晗峰，翁振奇. 石灰对真空预压加固高含水率淤泥效果影响试验研究[J]. 地基处理，2020，2(3)：192－195.(ZHAN Hong，LI Hanfeng，WENG Zhenqi. Experimental study on the effect of lime treatment on vacuum preloading to strengthen high water content muck[J]. Journal of Ground Improvement，2020，2(3)：192－195.(in Chinese))

[30] WANG J，FU H T，ZHANG W K，et al. Effect of pressurization frequency and duration on the consolidation of a dredged soil using air booster vacuum preloading combined with prefabricated horizontal drains[J]. Geotextiles and Geomembranes，2023，51(1)：209－218.

[31] 高紫阳，李嘉明，王　军，等. 絮凝－分级式水平排水板真空预压法处理工程废泥浆试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(9)：2 329－2 340.(GAO Ziyang，LI Jiaming，WANG Jun，et al. Experimental study on the treatment of engineering waste slurry by flocculation graded prefabricated horizontal drain vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(9)：2 329－2 340.(in Chinese))