

透水管桩单桩排水特性有限元分析

吴亦强, 何 翔, 黄 浪, 明世雄, 赵开明

武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

透水管桩开孔数量通过改变排水通道的密度和渗流路径, 加速了土体超孔压消散速率, 影响土体内部的压力梯度分布: 单孔模型表现出强烈的局部高梯度集中, 而多孔结构通过构建均匀的水平渗流场, 有效降低了梯度峰值并提升了孔压消散的均匀性。其固结度随时间呈非线性增长, 开孔数量越多, 固结速率越快, 且初期效应尤为显著; 增加开孔数量可有效缩短达到目标固结度的时间。

关键词

有限元, 超孔压, 透水管桩, 排水特性

Finite Element Analysis of Drainage Characteristics of Single Perforated Pipe Pile

Yiqiang Wu, Xiang He, Lang Huang, Shixiong Ming, Kaiming Zhao

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan Hubei

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

The number of openings in perforated pipe piles alters the density of drainage channels and seepage paths, accelerating the dissipation rate of soil excess pore water pressure and influencing the distribution of internal pressure gradients. The single-hole model exhibits strong local high-gradient concentration, while the multi-hole structure effectively reduces gradient peaks and enhances the uniformity of pore water pressure dissipation by constructing a uniform horizontal seepage field. The degree of soil consolidation shows nonlinear growth over time: the greater the number of

openings, the faster the consolidation rate—especially significant in the initial stage—and increasing the number of openings can effectively shorten the time required to reach the target consolidation degree.

Keywords

Finite Element Method, Excess Pore Water Pressure, Perforated Pipe Pile, Drainage Characteristics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在土木水利工程、交通基础设施的地基处理中，饱和软土地基的超静孔隙水压力的释放及土体固结问题一直是工程界关注的核心难题。传统排水固结法[1] (如砂井、塑料排水板等)虽能有效加速土体排水，但存在施工效率低、材料耐久性差及环境适应性差等局限。透水管桩，或称可排水管桩，作为一种新型排水结构体(如图1所示)，通过在预制管桩表面预设孔洞或直接开孔，使超孔隙水压力沿孔洞消散，其兼具承载与排水双重功能，在提升地基处理效率方面展现出显著优势。

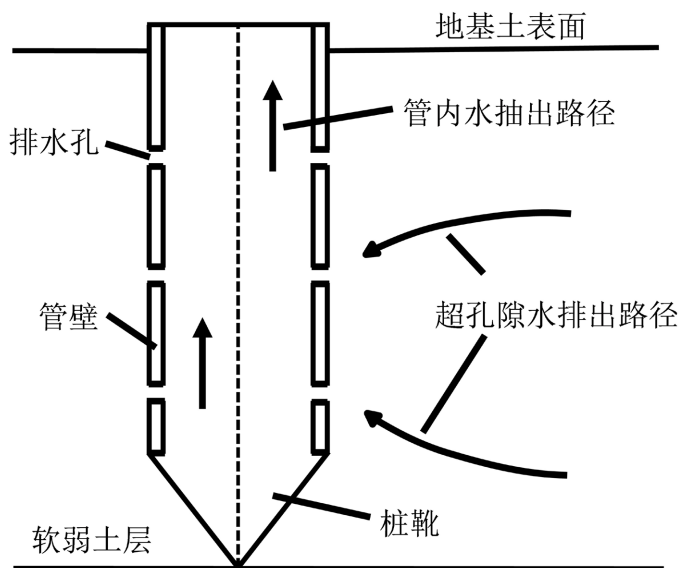


Figure 1. Schematic diagram of the drainage structure of the perforated pipe pile

图1. 透水管桩排水结构示意图

许多学者针对透水管桩的排水特性已开展了一系列的研究。陈杰[2]等运用理论分析对透水管桩桩周土的超孔压和固结度进行计算，发现透水管桩比普通管桩加快孔压消散的效果更明显。乐腾胜[3]等通过室内模型试验，分析对比了不同开孔方式的管桩桩周土超孔隙水压力随深度、径向距离等的变化规律。林维康[4]通过室内试验，探明了真空固结前后桩周土抗剪强度、含水量、密度与孔隙比变化与分布规律。黄勇[5]等对普通管桩与开孔桩进行了群桩室内模拟试验，试验结果表明群桩开孔时超孔压消散效率大于单桩之和。Cui [6] *et al.*通过室内试验揭示了透水混凝土管桩透水性能发展过程与机理，揭示了透水混凝土

土桩不可避免地存在材料孔隙与桩身强度矛盾的问题，孔隙过小时排水效果相对弱且孔隙处容易淤堵，孔隙过大则桩体强度相对不足。Ni [7] [8] *et al.* 先进行管桩沉桩过程的数值模拟，再与圆柱扩张理论的结果进行对比验证，探究了沉桩前后和沉桩过程中桩周土体超静孔隙水压力变化规律及固结特性。早期研究多聚焦于理论分析与室内模型试验[9]-[12]，通过监测孔隙水压力消散过程验证其排水效果，而基于有限元等数值模拟方法多角度分析透水管桩排水特性的研究较少。

本文通过有限元数值软件，结合透水管桩-软土系统物理性状，建立桩-土轴对称数值模型，揭示透水管桩在软土中的排水特性及其影响机制。研究重点包括以下内容：(1) 管桩不同开孔率对孔压消散效率的影响；(2) 管桩不同开孔率下排水流速；(3) 透水管桩桩周土固结特性。

2. 有限元模型

基于研究内容，建立数值模型时不考虑土的塑性破坏条件，仅考虑土的弹性本构，将桩-土三维模型简化为轴对称模型进行分析计算。土体数值模型计算时仅针对由外部载荷施压而使土体内部产生的超静孔隙水压力，且略去土体自重的影响。

2.1. 基本假定

现对模型作出如下基本假定：

- (1) 三维模型简化为平面轴对称模型；
- (2) 土体为均质连续的弹性体，不考虑塑性条件；
- (3) 不考虑桩身强度对计算结果的影响；
- (4) 计算时不考虑土体自重；
- (5) 土体渗透系数为常数。

2.2. 数值计算模型基本参数

将三维问题简化为轴对称模型，数值计算模型如图2所示。模拟分析开孔桩作为水平排水通道时土体的超孔压沿水平方向的消散情况，建立各尺寸如图2所示的数值模型，不设置土体自重参数，对桩靴作简化处理，且桩身长度与土体长度一致。桩身及土体参数见表1。

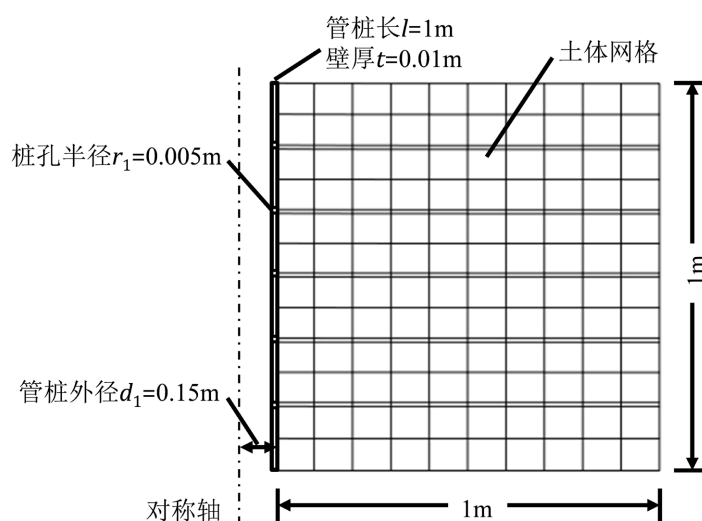


Figure 2. Numerical calculation model
图2. 数值计算模型

Table 1. Elastic parameters of the porous model
表 1. 多孔模型弹性参数

材料	弹性模量 $E/(\text{kPa})$	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	渗透系数 $\kappa/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	孔隙比 $\nu/(\%)$
饱和软土	25,000	0.35	1920	1×10^{-7}	1.02
桩体	3×10^6	0.2	2360	1×10^{-12}	0.001
砂	1.2×10^5	0.2	1600	0.0001	1.8

2.3. 边界条件

模型荷载与位移边界条件为：模型上边界作为荷载边界，荷载以压强形式施加，大小为 100 kPa；右边界固定水平位移(x 轴方向位移)，底边界同时固定水平和竖向位移(x 轴和 y 轴方向位移)；

针对排水边界条件，陈杰[2]、陈又麟[13]等部分学者认为与桩体接触的土体界面应为完全排水边界，还有部分学者则认为应将桩身开孔处与土体接触的界面视为排水边界，未开孔的桩壁与土体接触的界面则为不透水边界。综合前述，采纳前人的分析结果，此模型的排水边界条件规定为：将桩身透水孔与土体接触区域作为透水边界，而桩身不透水的桩壁与土体接触区域作为不透水边界，如图 3 所示。

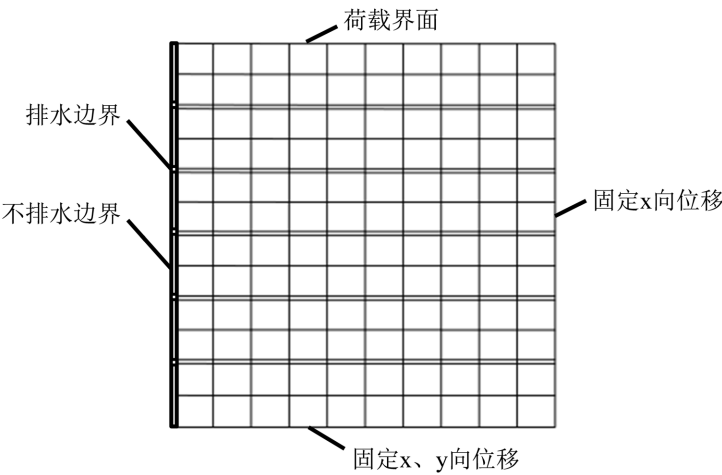


Figure 3. Model boundary conditions
图 3. 模型边界条件

3. 透水管桩排水特性分析

将此模型的透水管桩开孔率 N 定义为：

$$N = \frac{\sum L_k}{L_z} \times 100\% \tag{1}$$

式中： L_k 为长度单位，表示开孔的直径； L_z 表示桩壁的长度。

模型计算工况由开孔数量确定，开孔数量与开孔率的对应关系见表 2。

Table 2. Corresponding table of the number of openings and the opening rate
表 2. 开孔数量与开孔率对应表

开孔率	1.010/(%)	2.040/(%)	3.092/(%)	4.167/(%)	5.263/(%)	6.383/(%)	7.527/(%)	8.696/(%)
开孔数量	1	2	3	4	5	6	7	8

3.1. 排水固结后桩周土孔压分布规律

建立模型时, 开孔为等距离开孔, 对不同开孔数量的桩-土轴对称模型进行数值计算, 取各工况孔隙水压力的计算结果进行分析, 土体中孔压云图如图4所示。

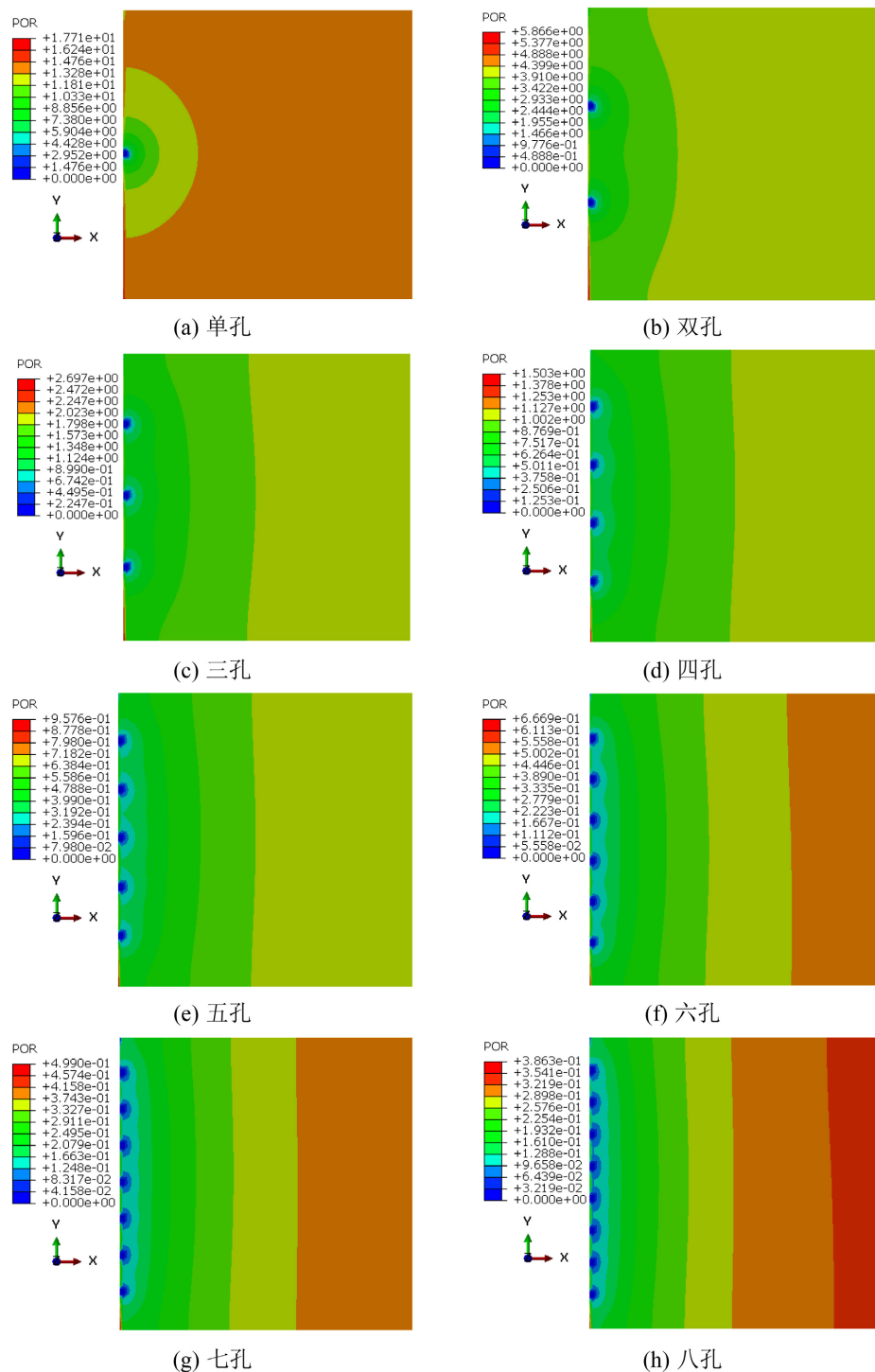


Figure 4. Cloud diagram of pore water pressure
图4. 孔隙水压力云图

分析孔隙水压力云图知：

单孔至双孔：单孔(图 4(a))孔隙水压力呈对称分布，高压区集中于桩壁附近(峰值 1.77×10^4 Pa)，向远处逐渐衰减。由于开孔数量少，排水通道有限，消散范围仅覆盖桩周 0.2~0.3 倍桩径区域。双孔(图 4(b))孔间区域压力显著降低(峰值 5.87×10^3 Pa)，表明两孔形成局部排水网络。但高压区仍存在于桩壁与土体界面，说明桩体开双孔时尚未达到最佳排水性能。

三孔至四孔：三孔(图 4(c))时孔间压力梯度进一步减小(峰值 2.70×10^3 Pa)，压力等值线呈现环状分布，显示排水效率提升。四孔(图 4(d))时高压区完全消失，桩周土体孔隙水压力均匀降至 1.50×10^3 Pa 以下，表明四孔形成了稳定的排水系统。

五孔至八孔：五孔(图 4(e))压力峰值降至 9.58×10^2 Pa，等值线密集区向桩体中心收缩，说明排水通道已覆盖桩体大部分区域。六孔至八孔(图 4(f)~(h))孔隙水压力进一步降低至 6.67×10^2 Pa 以下，且分布趋于均匀。八孔模型中，桩周 0.5 倍桩径范围内压力接近静水压力(3.86×10^2 Pa)，表明开孔数量的增加有效扩大了排水影响范围。

3.2. 排水固结后桩周土孔压消散规律

以模型右上及右下角节点孔隙水压力值为参考，分析各开孔数量下孔压随时间的消散规律，如图 5 所示；当固结时间达到 20,560 秒(5.71 小时)时，分析土体 0.5 米位置孔压沿水平方向(x 轴路径距离)的消散规律，如图 6 所示。

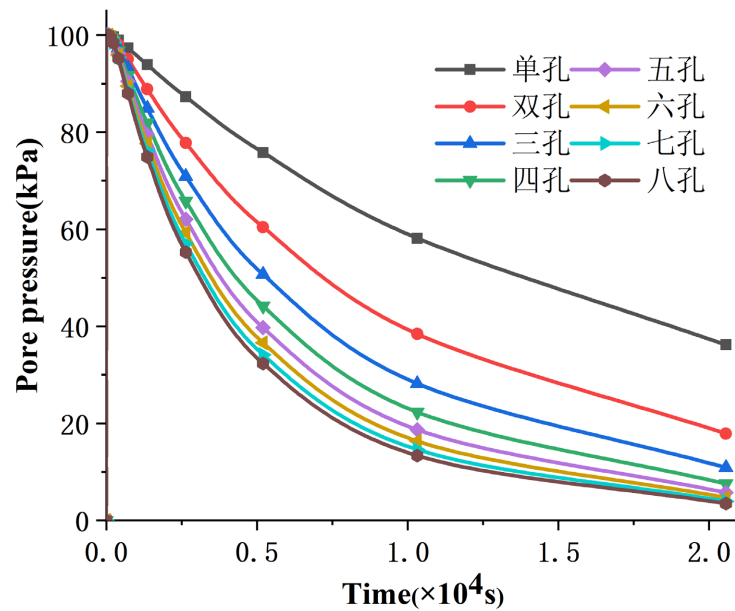


Figure 5. Curve of pore pressure changing with time
图 5. 孔压随时间变化曲线

分析图 5 知，当固结时间达到 1×10^4 秒(约 2.78 小时)时，单孔孔压衰减速率最慢，孔压仍保留约 60%，表明单一排水通道无法快速疏导超孔压；双孔初期消散速率提升，孔压降至 40%，但后期趋于平缓，存在效率瓶颈；三孔时孔压突破临界值，孔压约剩 30%，多通道协同排水效应开始显现；四孔曲线斜率最大，孔压约剩 15%；五孔初期消散速率略高于四孔，孔压约剩 12%，但后期与四孔曲线趋近，开孔数超过临界值后效率出现递减。六至八孔曲线接近重合，说明六孔以上开孔数对长期排水效率提升有限。

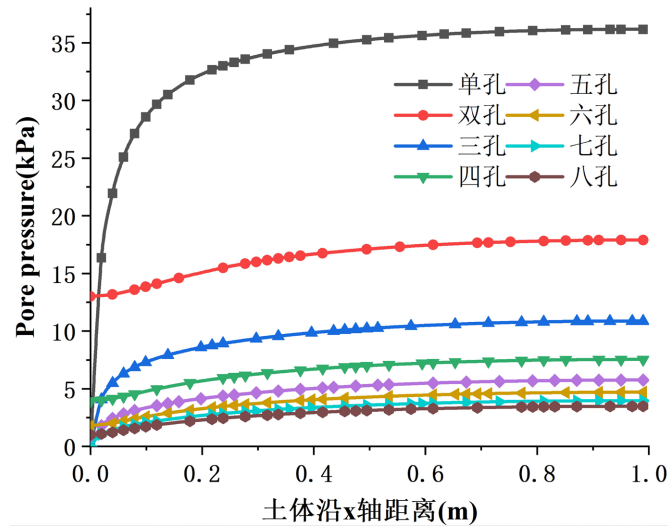


Figure 6. Curve of the pore pressure variation along the distance of the x-axis
图 6. 孔压沿 x 轴距离变化曲线

分析图 6 知, 单孔模型曲线形态陡峭下降后趋于平缓。排水影响半径约 0.3 m (2 倍桩径), 超出后孔压消散速率显著降低; 四孔模型曲线形态梯度均匀, 呈线性衰减趋势, 排水影响半径扩展至 0.5 m (3.3 倍桩径), 且孔压梯度稳定; 当开孔数 ≥ 4 时, 孔间干扰形成连续排水带, 使 0.5 m 处孔压降低速率提升明显。八孔模型曲线形态平缓下降后接近于零, 呈现全域低孔压特征。

3.3. 管桩不同开孔率下的排水流速

在二维平面中, 对于孔隙水压力 p , 水力梯度在 x 和 y 方向的分量及总水力梯度分别为:

$$\bar{i}_x = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\bar{i}_y = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\bar{i} = \sqrt{\bar{i}_x^2 + \bar{i}_y^2} \quad (4)$$

式中: $\bar{i}_x$ 、 $\bar{i}_y$ 为孔压水力梯度在 x 和 y 方向上的分量, $\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1}$; $\bar{i}$ 为总水力梯度; γ_w 为水的重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

土中孔隙水的流速为:

$$v_x = -k\bar{i}_x \quad (5)$$

$$v_y = -k\bar{i}_y \quad (6)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = k\bar{i} \quad (7)$$

式中: v_x 、 v_y 为水流流速沿 x 和 y 方向上的分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v 为总流速; k 为土体渗透系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

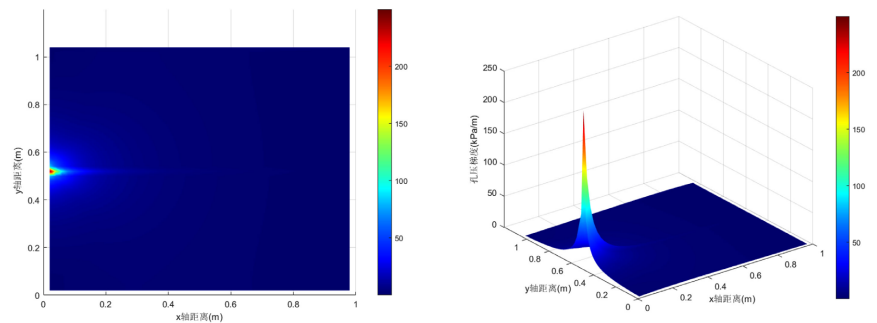
对于离散的孔隙水压力等值线数据, 可采用有限差分法近似计算偏导数。则式(2)、式(3)变为:

$$\bar{i}_x = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (8)$$

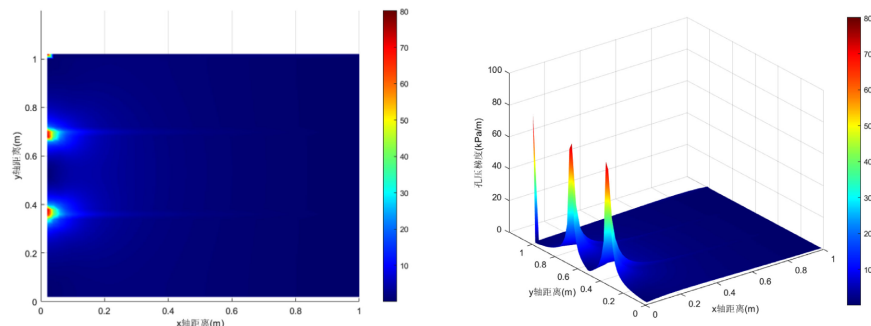
$$\bar{i}_y = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2\Delta y} \quad (9)$$

式中: Δx 、 Δy 为有限单元在 x 和 y 方向上的节点间距; $p_{i,j}$ 表示坐标为 (i, j) 的节点上的孔隙水压力。

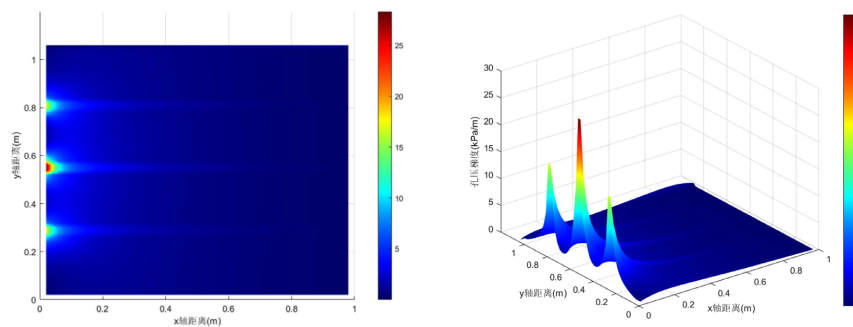
假定土体渗透系数为常数正值,且由式(7)可知流速 v 与梯度 $\bar{i}$ 成正比,则对比土体不同单元流速大小及影响时只需分析孔压总水力梯度即可。式(8)、式(9)通过编写C语言程序[14]进行计算,经过后处理后其结果云图如图7所示。



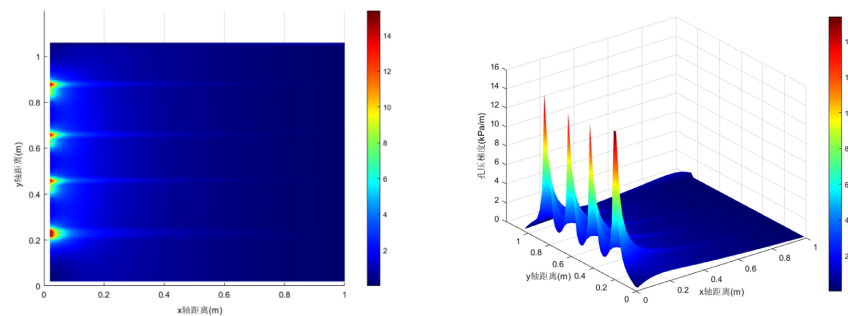
(a) 单孔



(b) 双孔



(c) 三孔



(d) 四孔

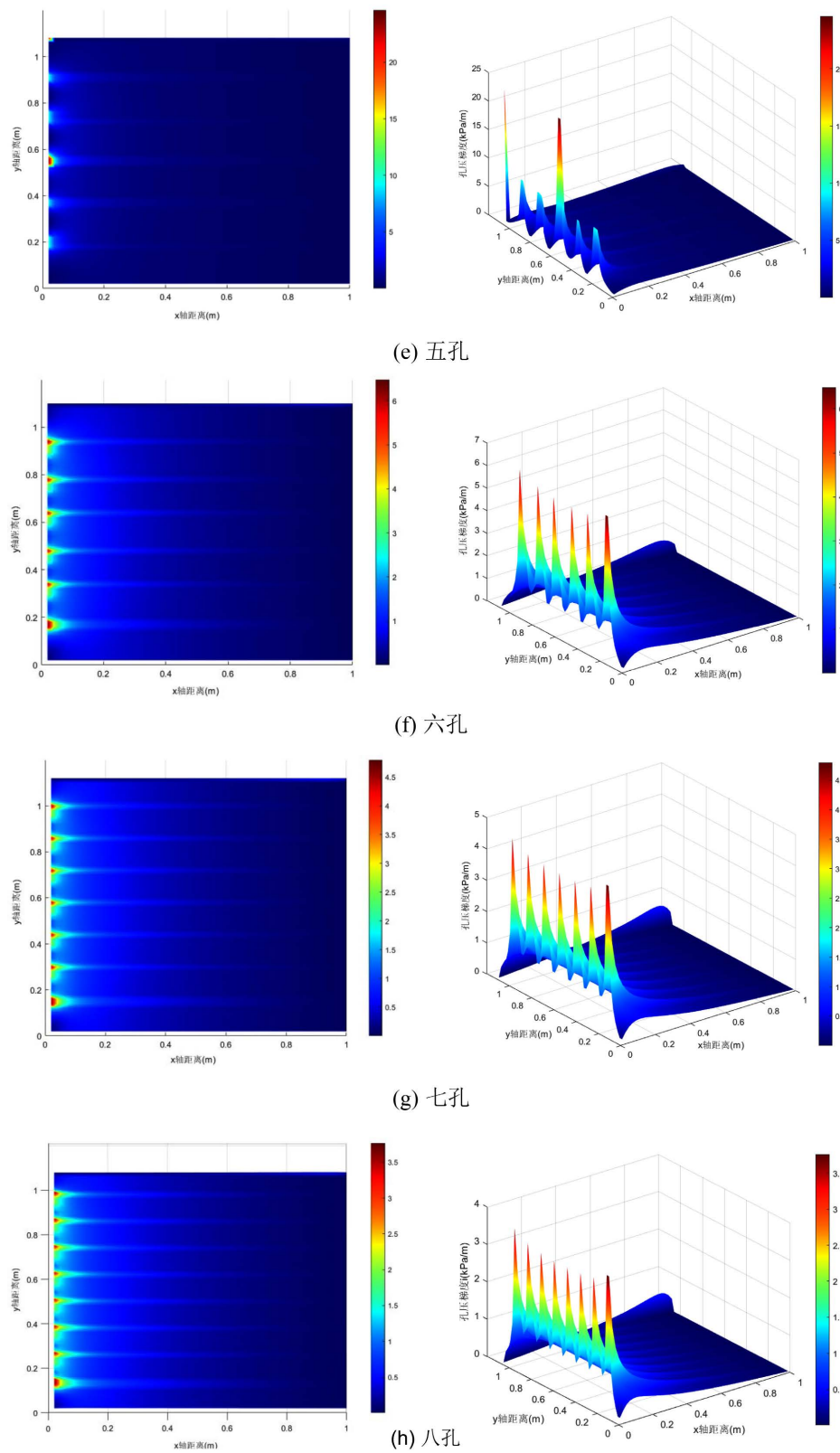


Figure 7. Cloud diagram of pore water pressure gradient
图 7. 孔隙水压力梯度云图

孔隙水压力梯度作为土体固结过程中渗流驱动力和水流速度的直观体现,其分布形态与开孔数量的相关性直接反映了排水通道对超孔压消散的影响。图 7 中,各子图(a)~(h)分别对应单孔至八孔模型,坐标轴 x 和 y 分别表示水平和垂直方向距离(单位: m),云图数值为孔隙水压力梯度(单位: $\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1}$)。整体来看,梯度场呈现以排水桩桩壁(左侧边界)为中心的放射状衰减特征,表明超孔压通过开孔向水平方向(x 轴方向)消散的主导趋势。随着开孔数量增加,高梯度区域($>50 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$)范围显著收缩,梯度等值线从单孔的密集集中逐渐演变为八孔的稀疏均匀。

单孔模型(图 7(a))中,孔隙水压力梯度峰值高达 $150 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 以上,且集中分布在桩壁附近 0.2 m 范围内,形成明显的局部高梯度区。这是由于单一开孔的排水通道过流面积有限,导致渗流集中引发剧烈的压力梯度变化。当开孔数增加至双孔(图 7(b))和三孔(图 7(c))时,梯度峰值分别降至 $80 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $25 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$,高梯度区沿水平方向扩展,垂直方向(y 轴)的梯度差异减小,表明多开孔形成的平行排水通道有效分散了渗流,降低了局部渗流阻力。四孔及以上模型(图 7(d)~(h))中,梯度峰值进一步降至 $15 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 以下,且梯度分布趋于平缓,八孔模型(图 7(h))的最大梯度仅为 $3.5 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$,显示出多孔结构通过增加排水通道提升了土体内部压力消散的均匀性。多孔结构可形成近似一维的水平渗流场,显著减少土体内部的渗流各向异性,有利于地基的均匀固结;当开孔数从 1 增至 4 时,梯度峰值的下降速率最快(单孔至四孔,峰值下降约 90%),表明 4 孔是排水效率提升的关键转折点。

结合图 5 (孔压 - 时间曲线)和图 6 (孔压 - 水平距离曲线)可知,孔隙水压力梯度的降低与超孔压消散速率呈正相关:单孔模型的高梯度区对应孔压快速下降阶段,但因局部渗流集中导致后期消散速率放缓;多孔模型的低梯度均匀场虽初始消散速率略低,但有稳定的渗流驱动力使孔隙水排除土体,孔压消散率反而更高。其内在机制在于:开孔数量增加扩大了排水通道的总过流面积(与开孔数呈线性正相关),降低了渗流阻力,形成均匀的压力梯度场,避免了单一通道的局限。

4. 透水管桩桩周土固结分析

透水管桩作为竖向排水体,在土中形成水平的排水路径,土体的平均固结度计算式为:

$$U(t) = 1 - \frac{\iint_D p(x, y, t) dD}{\iint_D u(x, y) dD} \quad (10)$$

式中: $U(t)$ 为 t 时刻土体的平均固结度; $p(x, t)$ 为 t 时刻土体 (x, y) 坐标处的孔隙水压力; $u(x, y)$ 为土体初始孔压分布;积分区域 D 为土体整个平面。

在有限元分析中,将土层划分为有限个单元,单元孔压和节点坐标已知,可利用数值计算的方法,将连续的土层离散化,通过加权求和得到平均孔隙水压力从而计算平均固结度。则式(10)的积分形式可变为求和的形式:

$$U(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n p_{t,i} \Delta D_i}{\sum_{i=1}^n u_i \Delta D_i} \quad (11)$$

式中: $p_{t,i}$ 为 t 时刻单元 i 中心的孔隙水压力; u_i 表示单元 i 中心的初始孔压; ΔD_i 为单元 i 的面积。

同样地,式(11)固结度的计算也通过 C 语言程序[14]计算的方式完成,各管桩固结度随时间的变化曲线如图 8 所示。

图 8 为不同开孔数量下土体固结度随时间的变化曲线,横轴为时间(单位: $\times 10^5 \text{ s}$),纵轴为固结度百分比,反映了开孔桩作为水平排水通道时,不同开孔率下土体固结的差异。图中 8 条曲线分别对应开孔数 1 至 8,整体呈现随时间增长固结度逐渐升高并趋近于 100% 的趋势,但不同开孔数量下的固结速率和时间效应存在显著差异。

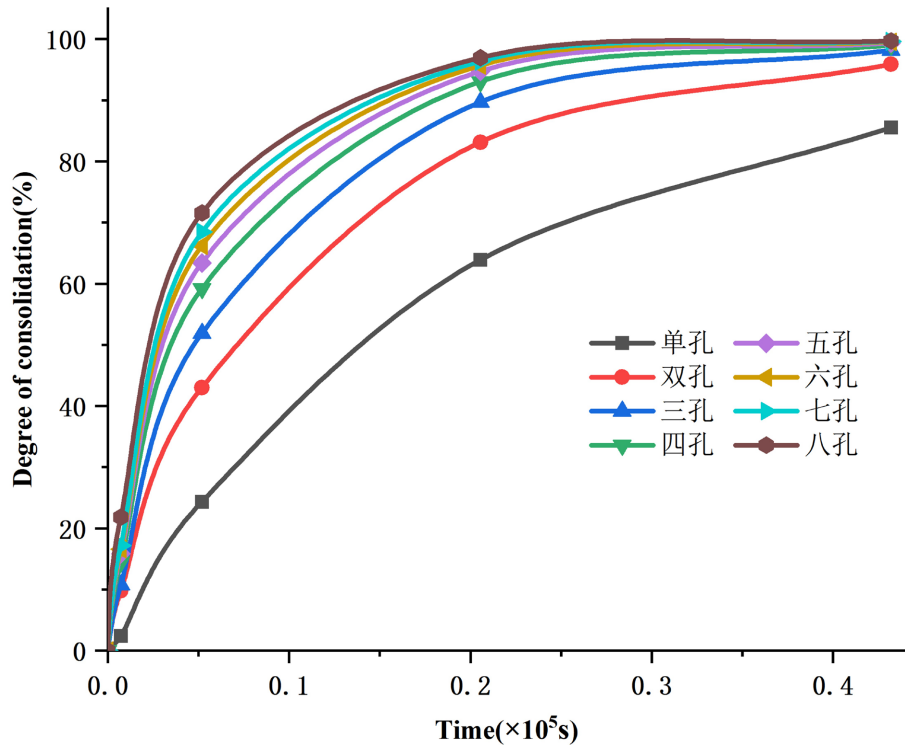


Figure 8. Consolidation-time curve
图 8. 固结 - 时间曲线

从初始阶段($t < 20,000$ s)来看, 开孔数量对固结速率的影响尤为明显: 单孔条件下固结度增长缓慢, 10,000 秒时固结度仅约 30%; 而八孔情况下, 同期固结度已超过 60%, 表明开孔数量越多, 初期固结速率越快。随着时间推移, 当 $t > 20,000$ s 时, 各曲线斜率逐渐减小, 表明固结速率趋于稳定, 但开孔数量的差异仍显著影响固结进程。当固结度达到 80% 时, 八孔比单孔时间缩短近 44%。这一现象与图 5 (孔压随时间变化曲线) 形成对应——开孔数量越多, 孔隙水压力消散越快, 进而加速固结。

进一步分析曲线的渐近性可知, 所有工况最终均趋向于完全固结(固结度 100%), 开孔数量通过改变排水边界条件, 优化了固结时间效率。其中四孔及以上工况的曲线在中后段(固结度 50%~80%)呈现较一致的斜率, 表明当开孔数量超过一定阈值后, 排水孔增加带来的效率逐渐减弱。

5. 结论

综合上述的分析结果, 开孔率的增加对于超孔压消散、排水流速、固结效率均有提升, 且效果显著, 但当开孔率增加到一定程度时提升效果不再显著。单孔、四孔、六孔、八孔在三个评价指标下的数据结果如表 3 所示, 当开孔数量达到四孔之后, 三个评价指标的数值变化不再明显。

Table 3. The evaluation result of the indicator
表 3. 指标评价结果

指标	单孔	四孔	六孔	八孔
孔压消散至 50% 时间(h)	2.78	1.9	1.86	1.81
水平孔压梯度($\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	1.2	0.8	0.6	0.4
固结度 90% 时间(h)	8.2	6.5	5.5	5

透水管桩开孔数量通过改变排水通道的密度和渗流路径,加速了土体超孔压消散速率,影响土体内部的压力梯度分布:单孔模型表现出强烈的局部高梯度集中,而多孔结构通过构建均匀的水平渗流场,有效降低了梯度峰值并提升了孔压消散的均匀性。其固结度随时间呈非线性增长,开孔数量越多,固结速率越快,且初期效应尤为显著;增加开孔数量可有效缩短达到目标固结度的时间。

排水通道的优化通过加速孔隙水压力消散,间接验证了“多开孔强化水平排水”的数值模拟假设。

参考文献

- [1] 胡飞英. 软土地基处理技术在土木工程中的应用[J]. 中文科技期刊数据库工程技术, 2025(1): 141-144.
- [2] 陈杰, 周峰. 排水管桩周土固结特性分析[J]. 建筑科学, 2015, 31(1): 29-32.
- [3] 乐腾胜, 柯宅邦, 雷金波, 等. 有孔管桩单桩承载性状有限元分析[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(6): 32-40.
- [4] 林维康. 真空排水管桩工程特性与机理研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [5] 黄勇, 王军, 梅国雄. 透水管桩加速超静孔压消散的单桩模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2893-2898+2908.
- [6] Cui, X., Zhang, J., Chen, D., Li, S., Jin, Q., Zheng, Y., et al. (2018) Clogging of Pervious Concrete Pile Caused by Soil Piping: An Approximate Experimental Study. *Canadian Geotechnical Journal*, 55, 999-1015. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0238>
- [7] Ni, P., Mangalathu, S., Mei, G. and Zhao, Y. (2017) Permeable Piles: An Alternative to Improve the Performance of Driven Piles. *Computers and Geotechnics*, 84, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.11.021>
- [8] Ni, P., Mangalathu, S., Mei, G. and Zhao, Y. (2018) Laboratory Investigation of Pore Pressure Dissipation in Clay around Permeable Piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 55, 1257-1267. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0180>
- [9] 黄勇, 梅国雄, 王钰轲. 透水管桩的群桩沉桩室内模型试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 18-23.
- [10] 周小鹏, 梅国雄. 主动式透水管桩技术及其效果有限元分析[C]//中国力学学会结构工程专业委员会. 第 22 届全国结构工程学术会议论文集第II册. 2013: 532-537.
- [11] 易飞. 基于圆孔扩张理论的静压有孔管桩挤土效应分析[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [12] 柳俊, 雷金波, 张振礼, 等. 静压有孔管桩的超孔隙水压力空间解析解[J]. 建筑施工, 2018, 40(2): 287-291.
- [13] 陈又麟, 齐云龙. 考虑透水性的管桩桩周土体固结特性计算[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(2): 74-77.
- [14] 马杰, 张秋菊, 杨磊. C 语言程序设计[M]. 南京: 南京大学出版社, 2023.