

· 施 工 ·



考虑桩靴影响的排水板施工涂抹 可视化试验研究*

豆异敏¹, 梁泽龙², 武江南¹, 林军志³, 吴宝聪¹, 李美好⁴

(1. 广州打捞局, 广东 广州 510290; 2. 同济大学水利工程系, 上海 200092;
3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 4. 重庆交通大学 土木学院, 重庆 400074)

摘要: 塑料排水板施工引发的涂抹效应直接影响软基处理效果, 而桩靴类型对涂抹范围的影响尚未明确。采用透明土与粒子图像测速(PIV)技术, 构建“上砂下黏”分层地基模型, 开展5类桩靴(圆形/异形/三角形截面棍状、铁板式及无鸭嘴式)在不同插设深度下的可视化试验。研究表明: 1) 涂抹区分为强涂抹区与弱涂抹区。强涂抹区内($0d\sim 4d$, d 为套筒直径)土体水平向位移衰减率达 $75\%/d$, 弱涂抹区仅为 $5\%/d$ 。2) 对吹填、疏浚、滩涂等淤泥质土而言, 强涂抹区范围约为 $4d$, 与桩靴类型无关; 弱涂抹区则因桩靴类型差异, 处于 $7d\sim 10d$ (异形桩靴达 $10d$, 圆形桩靴为 $7d$)。3) 插设深度由 $10d$ 增至 $14d$ 时, 弱涂抹区范围从 $6d$ 扩至 $9.5d$, 强涂抹区内的相对位移 u/d (u 为土体水平向位移)增加了 0.04 。研究成果为工程中排水板施工桩靴选型及涂抹范围评估提供了定量依据。

关键词: 涂抹范围; 桩靴类型; 透明土模型; 粒子图像测速(PIV)

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0248-09

Visualized experimental research on drainage board construction smear considering the influence of boot piles

DOU Yimin¹, LIANG Zelong², WU Jiangnan¹, LIN Junzhi³, WU Baocong¹, LI Meihao⁴

(1. Guangzhou Salvage Bureau, Guangzhou 510290, China;

2. Department of Water Resources Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

4. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The smear effect induced by plastic drainage board installation significantly impacts soft ground improvement, yet the influence of pile boot type on the smear zone remains unclear. In this study, transparent soil and particle image velocimetry (PIV) techniques are used to establish a “sand-over-clay” layered foundation model. Visualization tests are conducted with five pile boot types (circular/irregular/triangular cross-section stick, plate-type, and duckbill-less circular) under varying insertion depths. The research show that: 1) The smear zone comprises a strong smear zone and a weak smear zone. Within the strong smear zone ($0d\sim 4d$, d represents diameter of the sleeve), the lateral soil displacement attenuation rate reaches $75\%/d$. In contrast, the weak smear zone exhibits an attenuation rate of $<5\%/d$. 2) For dredged slurry and coastal silt, the strong smear zone consistently extends to $4d$ regardless of pile boot type. However, the weak smear zone ranges from $7d$ to $10d$ depending on boot geometry, with irregular stick boots reaching $10d$ and circular boots limited to $7d$. 3) When insertion depth increases from $10d$ to $14d$, the weak smear zone expands from $6d$ to $9.5d$, while the relative displacement u/d (u represents soil horizontal displacement) within the strong smear zone increase 0.04 . The research provides quantitative criteria for selecting pile boots and assessing smear effects in engineering practice.

Keywords: smear range; pile shoe type; transparent soil model; particle image velocimetry (PIV)

收稿日期: 2025-05-12 录用日期: 2025-06-12

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52109113); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金资助项目(LSDP202101); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2021A07); 重庆市水利科技项目(CQSLK-202306)

作者简介: 豆异敏(1987—), 男, 工程师, 从事港口与航道工程施工技术工作。

塑料排水板作为排水固结法处理软基的竖向排水体, 近年广泛应用于路基、港口堆场等软土地基处理领域^[1]。例如, 在高速铁路路基工程中, 通过真空-堆载联合预压与塑料排水板的协同作用, 成功将工后沉降量控制在规范允许的 15 mm 阈值内^[2]。而塑料排水板地基的设计与施工显著受涂抹效应与变井阻效应的影响^[3]。其中, 涂抹效应指因塑料排水板施工扰动导致其周围土体渗透系数降低。因此, 精确量化塑料排水板施工引起的涂抹范围, 对其地基的设计与施工至关重要。

塑料排水板地基的涂抹范围研究围绕试验与理论两个方面展开。试验研究方面, Bergado 等^[4]率先采用室内固结试验结合反分析法, 建立了涂抹直径 d_s 与排水板等效直径 d_w 的 2.5 倍关系 ($d_s = 2.5d_w$)。随后 Han 等^[5]基于现场实测数据, 建议采用更保守的取值 ($d_s = 2d_w$)。Hansbo^[6]及国内规范^[7]基于工程实测数据, 均推荐保守取值 ($d_s = 2d_w$)。Prabavathy 等^[8]则利用数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 技术的实验室模型试验, 量化了不同芯轴安装速率 (100~500 mm/min) 引起的涂抹区范围, 建立了涂抹直径 $d_s = (4\sim 6)d_w$ 的定量关系。通过经验值或室内测试获得了 d_s 与 d_w 之间的关系, 见表 1。理论分析方面, 张仪萍等^[9]基于圆柱形孔扩张理论, 结合 Mohr-Coulomb 屈服准则, 系统分析了考虑土体自重应力时的弹塑性变形特性, 建立了塑性区半径、土体位移等关键参数的理论模型, 揭示了涂抹区呈上大下小的漏斗形分布特征。秦爱芳等^[10]基于 Fredlund 固结理论, 采用分离变量法和待定系数法, 建立了考虑涂抹效应的固结解析解, 并通过典型案例计算验证了涂抹范围对固结过程的显著影响。Sathanathan 等^[11]则通过修正剑桥模型的软黏土空腔扩张理论, 分析了芯轴驱动垂直排水管引起的涂抹区范围。综上所述, 无论是基于试验、经验还是理论分析, 既有研究确定的涂抹范围均未考虑桩靴类型的影响。由于不同桩靴在施工过程中对土体的扰动模式存在显著差异, 忽略此关键因素可能导致上述

结果与实际工程情况存在偏差。因此, 需结合桩靴类型深入研究塑料排水板施工的涂抹范围, 以提升其在工程实践中的适用性。

表 1 涂抹范围参数取值
Tab. 1 Parameter values of coating range

参考文献	涂抹范围参数关系	获取方法
文献[4](1991)	$d_s = 2.5d_w$	反分析
文献[5](2002)	$d_s = (2\sim 3)d_w$	离心机模型试验和室内测试
文献[6](1994)	$d_s = 2d_w$	经验值
文献[7]	$d_s = 2d_w$	-
文献[8]	$d_s = (4\sim 6)d_w$	实验室模型试验

值得关注的是, 塑料排水板的施工扰动机制与桩基施工具有相似性。近年来, 透明土技术被广泛应用于桩施工效应的研究中: Baligh^[12]基于应变路径法构建透明土模型, 成功捕捉了桩周土体位移场的动态演变过程; Sadek 等^[13]运用 DIC 技术揭示了沉桩过程中塑性区的三维扩展规律。曹兆虎等^[14]利用透明土模拟开口管桩贯入过程, 揭示了土体径向位移的层状分布特性。

基于上述背景, 本文结合透明土技术和粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术, 通过开展带不同类型桩靴的塑料排水板在不同插设深度下的可视化模型试验, 以定量分析塑料排水板施工涂抹范围变化规律。

1 可视化试验概况

1.1 试验装置

模型试验装置主要包括塑料排水板插设模拟系统、图像采集与处理系统、照明系统和塑料排水板桩靴模型。

1) 塑料排水板插设模拟系统。塑料排水板插设模拟系统包括模型箱、嵌入装置、固定装置与排水板插设装置, 见图 1。模型箱由透明有机玻璃制成, 尺寸为 300 mm×180 mm×200 mm (长×宽×高), 壁厚 6 mm。排水板插设装置的插设速率恒定为 1 mm/s。



图 1 排水板插设装置
Fig. 1 Drainage panel insertion device

2) 图像采集和处理系统。图像采集系统由高速 CCD 相机 (MotionBLITZ EoSens Cube/mini) 与计算机组成, 配合 MotionBLITZDirector2 软件实现图像同步采集。基于 Matlab 平台的 PIVlab 对采集的图像进行后处理, 分析土体颗粒的位移场分布特征及其演化规律。

3) 照明系统。激光器为片光源一体式激光发射器, 波长 520 nm, 最大输出功率为 1 400 MW, 用于产生片状光源, 在透明土内部形成清晰的片状散斑场。

4) 塑料排水板桩靴模型。基于实际工程中常用的塑料排水板桩靴, 并综合考虑模型制作精度、试验操作便利性和观测需求, 按 1:20 的比例缩尺设计了 5 种不同类型的桩靴模型^[15], 见图 2。模型由套筒与桩靴两部分组成, 采用熔融沉积 3D 打

印技术和高精度棕料制成, 确保其强度及尺寸精度满足试验需求, 见图 3。模型设计参数见表 2。



图 2 工程中常用塑料排水板桩靴
Fig. 2 Plastic drainage sheet pile boots commonly used in engineering



图 3 塑料排水板桩靴模型
Fig. 3 Plastic drainage sheet pile boot model

表 2 塑料排水板桩靴参数

Tab. 2 Plastic drainage sheet pile boot parameters

桩靴类型	套筒长/mm	套筒直径/mm	桩靴长度/mm	桩靴宽度/mm	桩靴厚度/mm	鸭嘴长/mm	桩靴等效半径/mm
圆形截面棍状桩靴	100	6	10	-	-	10	1.5
异形棍状桩靴	100	6	10	-	-	10	2.0
无鸭嘴式圆形截面棍状桩靴	100	6	10	-	-	-	1.5
铁板式桩靴	100	6	10	3	0.15	10	-
三角形截面棍状桩靴	100	6	10	-	-	10	1.5

1.2 试验材料

试验采用“上砂下黏”成层透明土结构模拟实际工程中的砂垫层-淤泥土层复合地基。透明土制

备过程: 1)透明砂土层制备。首先对熔融石英砂进行预处理(淘洗、干燥、筛分);其次,在 25℃ 恒温条件下,按特定比例混合 3#与 15#白油,配制折

射率为 1.458 5 的孔隙液。最后, 采用砂雨法配置透明砂土。2) 透明黏土层制备。将浓度为 3.5% 的 Laponite RD 与去离子水混合液注入模型箱, 同步搅拌并加入 PSP 示踪粒子。静置后, 形成透明黏土层作为下伏软弱层。3) 成层结构构建。将制备好的透明砂土填筑在透明黏土之上, 形成“上砂下黏”的成层透明土, 见图 4。透明砂土与黏土的关键物理参数见表 3。其中, 透明黏土的渗透性能接近于吹填、疏浚、滩涂等淤泥。

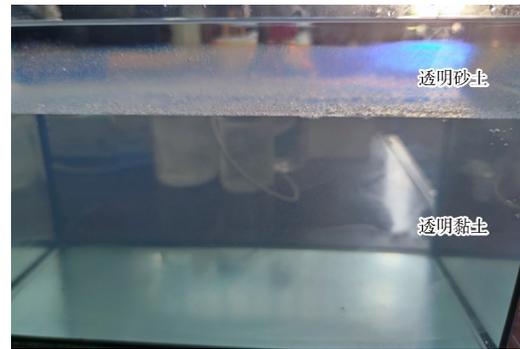


图 4 成层透明土

Fig. 4 Layered transparent soil

表 3 透明土材料参数

Tab. 3 Transparent soil material parameters

试样	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	黏聚力/kPa	孔隙比
砂土	1.52	40	0.3	30	-	0	0.65
黏土	1.03	0.08	0.4	11	8.1×10^{-7}	0.55	14.6

1.3 试验工况及过程

为研究不同桩靴类型及插设深度 h 对涂抹范围的影响(工况 1~5), 并验证模型可靠性(工况 6), 共设计 6 组试验工况试验, 见表 4。

表 4 塑料排水板桩靴插设研究工况

Tab. 4 Plastic drainage board pile boot insertion study conditions

工况	桩靴类型	h
1	圆形截面棍状桩靴	$14d$
2	无鸭嘴式圆形截面棍状桩靴	$10d, 12d, 14d$
3	异形棍状桩靴	$14d$
4	三角形截面棍状桩靴	$14d$
5	铁板式桩靴	$14d$
6	无桩靴仅套筒	$14d$

注: d 为套筒直径。

为确保规范性和结果可重复性, 试验严格按照以下步骤进行: 完成透明土配置后(砂土厚 24 mm, 黏土厚 150 mm), 将桩靴模型居中固定于模型箱正上方, 连接插设装置; 在模型箱正前方 1.2 m 处架设高速 CCD 相机(拍摄间隔 250 ms), 左侧布置激光片光源, 使其穿透模型箱中心形成切面, 并通过 MotionBLITZ Director2 软件实现实时拍摄。试验全程采用遮光布隔绝外部光源, 以 1 mm/s 匀

速插设并同步记录散斑场, 待桩靴达到目标深度后终止试验。因插设过程不可逆破坏土体结构, 因此每完成一种桩靴试验需重新制备透明土样, 重复上述试验过程。

2 试验结果及分析

2.1 试验验证

为验证模型精度, 利用无桩靴圆柱套筒(工况 6)试验获取的土体位移场数据, 进行归一化处理: 横坐标为土体与套筒中心距离 r 与套筒直径 d 的比值 r/d , 纵坐标为土体水平向位移 u 与 d 的比值 u/d 。将归一化结果与 Ni 等^[16]及孔纲强等^[17]的试验数据进行对比, 见图 5。本文模型试验数据与 Ni 等^[16]的试验数据吻合度超 95%, 主要归因于两者土体性质及试验工况相近; 在径向距离 $2d\sim 4d$ 范围内, 本文结果较孔纲强等^[17]的试验值低 5%~7%, 主要源于试验土体参数的差异。总体而言, 本文揭示的小尺度模型位移分布规律与既有研究具有良好的一致性, 验证了模型可靠性, 可用于定量研究带桩靴塑料排水板施工扰动引起的涂抹范围。

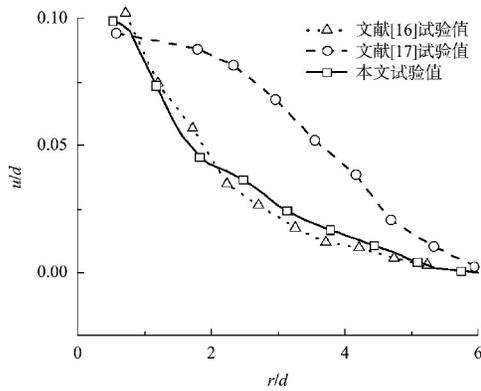


图5 土体水平向位移对比验证曲线
 Fig. 5 Comparative verification curve of soil horizontal displacement

2.2 不同插设深度对涂抹范围的影响分析

以无鸭嘴圆形截面棍状桩靴(工况2)为对象,分析插设深度 $h = 10d$ 、 $12d$ 、 $14d$ 对涂抹范围的影响。涂抹范围见图6,由图可知,归一化后土体水平向位移场分布规律为越靠近套筒区域的位移等值线越密集,远离区域趋于稀疏,表明带桩靴的塑料排水板套筒扰动下的涂抹区可分为强涂抹区(位移等值线密集)与弱涂抹区(位移等值线稀疏)。这一现象与 Sathananthan 等的试验结果一致。可以确定,强弱涂抹区的分界点约为 $4d$ 。

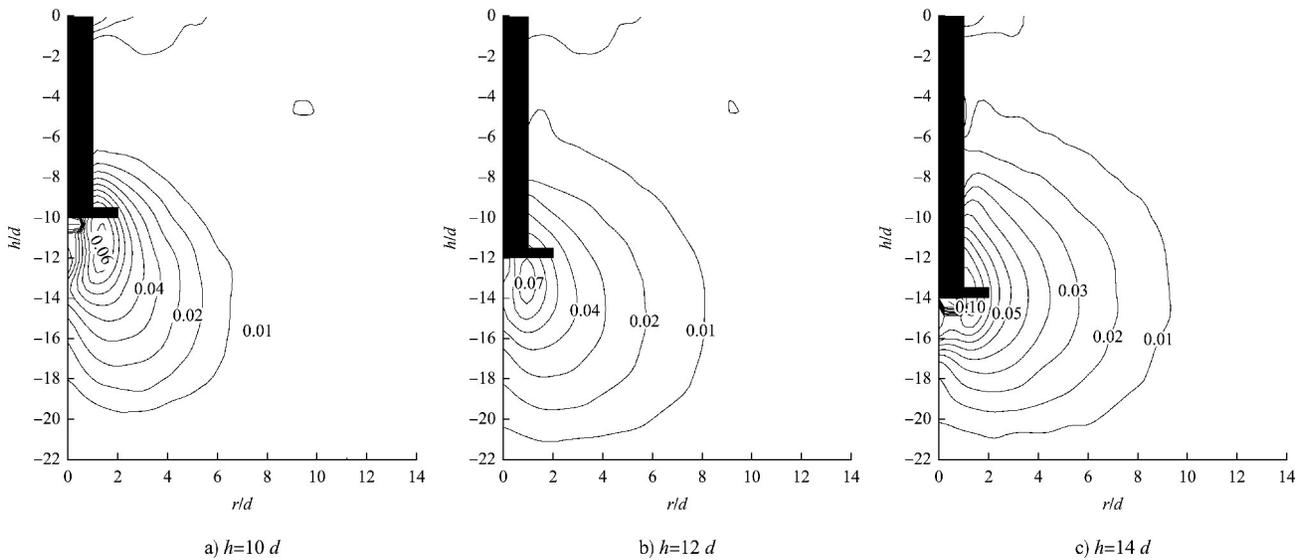


图6 不同插设深度的涂抹范围
 Fig. 6 Smear range for different insertion depths

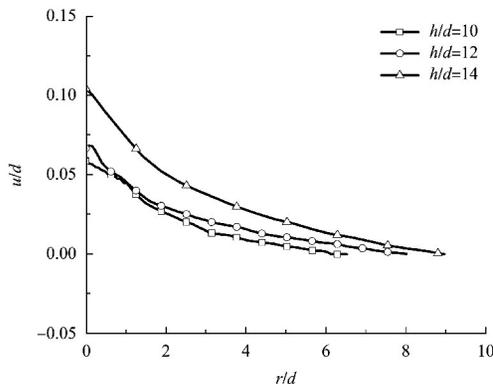
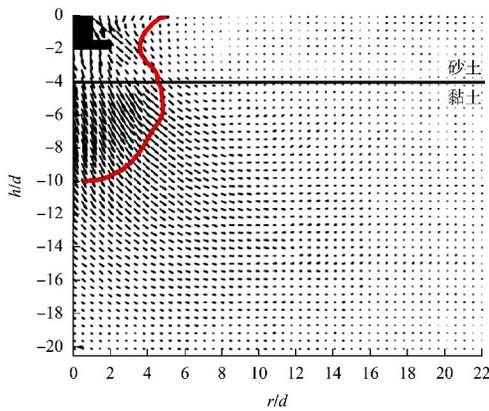


图7 不同插设深度的土体水平向位移随与套筒距离变化曲线
 Fig. 7 Variation curves of soil horizontal displacement with distance from the sleeve for different insertion depths

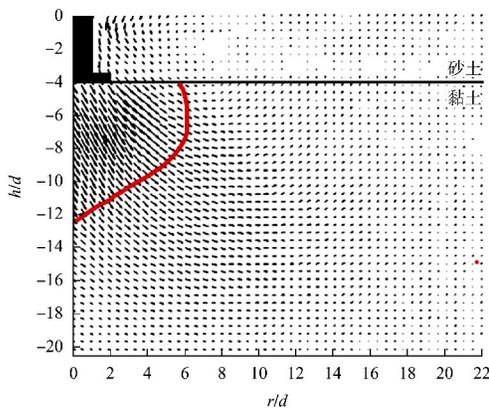
不同插设深度的土体水平向位移随与套筒距离变化曲线见图7。结合图6、7可知,不同插设深度下,距套筒中点 $2d \sim 4d$ 范围内均为强涂抹区。该范围与 Sathananthan 等提出的 $2.5d$ 基本一致(本文略大),表明强涂抹区范围主要与套筒直径 d 相关,与插设深度无关。在强涂抹区外 ($>4d$),土体水平向位移显著降低,弱涂抹区影响范围随插设深度的增加而增大, $h = 10d$ 、 $12d$ 、 $14d$ 对应的弱涂抹区范围分别为 $6d$ 、 $8d$ 与 $9.5d$,该值大于曹兆虎等的结果,推测是桩靴作用导致涂抹范围增大。在强涂抹区内, u/d 随插设深度增加而增

大。值得注意的是, h/d 从 12 增至 14 时的 u/d 增幅(0.03) 显著高于 h/d 从 10 增至 12 时的增幅(0.01), 这表明套筒插设深度越大, 其对周边局部土体的渗透系数与强度破坏越显著。

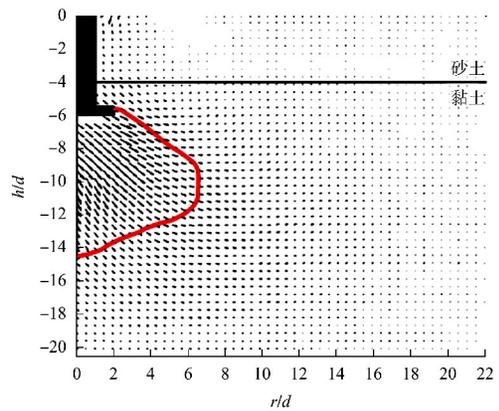
圆形截面棍状桩靴穿越砂-黏界面的位移矢量图见图 8, 插设深度分别为 $2d$ 、 $4d$ 、 $6d$ 。从图中不难看出, 在穿越砂-黏界面之前, 即插设深度 $<4d$ 时, 涂抹区呈“倒圆锥体”, 与张仪萍等基于圆柱孔扩张理论和 Mohr-Coulomb 准则预测的“漏斗形”分布特征相近。当插设深度达到 $6d$ 时, 涂抹区形态转变为“纺锤体”, 更接近刘吉福等^[18]在平面应力假设下应用圆柱孔扩张理论获得的“瓶状”分布。究其原因因为砂土与黏土的不排水强度、压缩模量等不同所致。



a) 插设深度 $2d$



b) 插设深度 $4d$



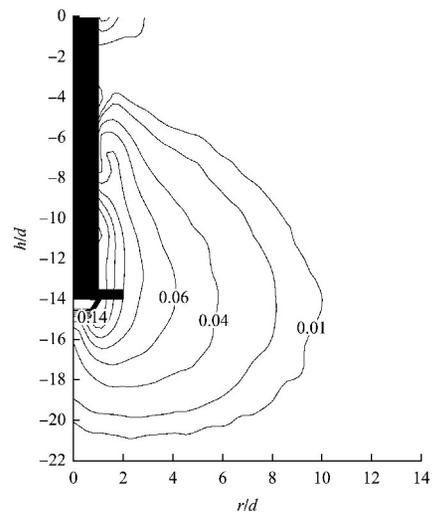
c) 插设深度 $6d$

图 8 圆形截面棍状桩靴穿越砂-黏界面位移矢量图

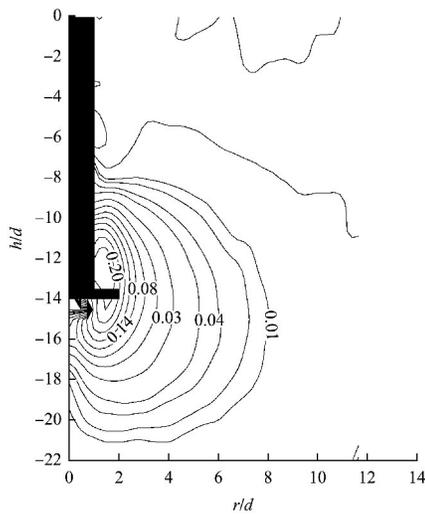
Fig. 8 Vector diagram of the displacement of a stick pile boot with circular cross-section across the sand-viscosity interface

2.3 不同桩靴类型对涂抹范围的影响分析

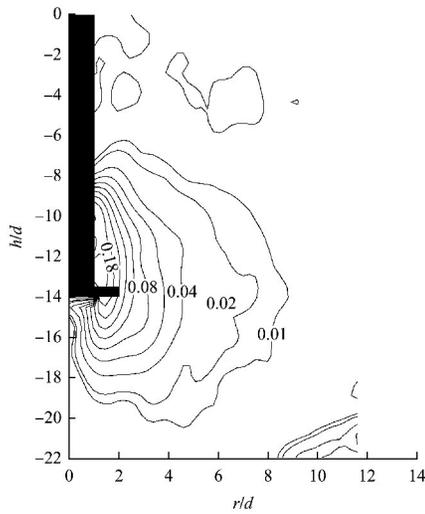
归一化后不同类型桩靴的涂抹范围见图 9。由其水平向位移等值线可知, 桩靴几何特征导致应力分布不同, 进而影响位移等值线形态。异形棍状桩靴与圆弧形截面棍状桩靴的截面形状为圆弧形, 形成较为连续的应力扩散面, 而使水平向位移等值线呈现近同心椭圆分布。相对地, 三角形截面棍状桩靴与铁板式桩靴则在桩靴底部附近 $2d \sim 4d$ 处呈现较为规则的同心椭圆, 但在该距离以外, 则显现不规则分布。



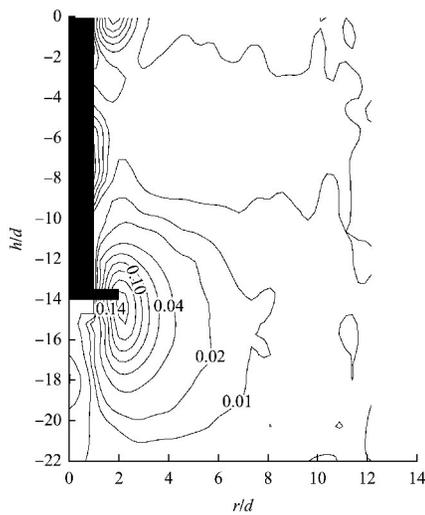
a) 异形棍状桩靴



b) 圆弧形截面棍状桩靴



c) 三角形截面棍状桩靴



d) 铁板式桩靴

图 9 不同桩靴类型的涂抹范围

Fig. 9 Smear range of different pile boot types

不同塑料排水板桩靴类型下土体水平向位移随距套筒距离呈非线性衰减的规律见图 10，可将土体水平向位移影响区域划分为显著塑性变形主导的近场区(0d~4d，即强涂抹区)与弹性变形控制的远场区(>7d)。

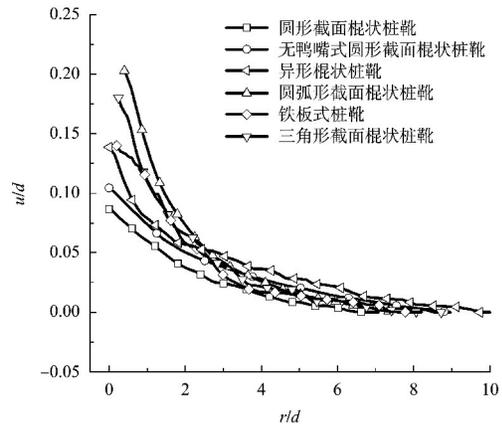


图 10 不同塑料排水桩靴水平向位移随与套筒距离变化
Fig. 10 Variation of horizontal displacement with distance from sleeve for different plastic drainage pile boots

近场区内，土体水平向位移以 75%*l**d* 的速率快速衰减，体现强烈的施工扰动(涂抹)效应。该强涂抹区范围在 4*d* 左右，不受排水板桩靴类型的显著影响，却也略高于文献[11]的 2*d*~3*d*。并且，在近场区内，不同类型桩靴所引起的套管周围土体位移量(与土体的渗透系数和强度存在负相关关系)有所不同，圆形截面棍状桩靴最小(*u*/*d* = 0.09)，圆弧形截面棍状桩靴最大(*u*/*d* = 0.2)。

当距离>4*d*(弱涂抹区)，尤其是>7*d*后(远场区)，位移衰减率降至 5%*l**d* 以下，该范围内土体以弹性变形为主。不同桩靴类型下的弱涂抹区范围有所区别，圆形截面桩靴弱涂抹区范围在 7*d*，而异形桩靴的弱涂抹范围扩展至 10*d*。

综上所述，当以强涂抹区作为涂抹范围时，则与塑料排水板的桩靴类型无关(约为 4*d*)，但桩靴类型却会影响涂抹范围内土体渗透系数和强度，影响程度依次为圆弧形截面棍状>三角形截面棍状>铁板式>异形棍状>无鸭嘴式圆形截面棍状>圆形截面棍状；当以弱涂抹区作为涂抹范围时，不同桩靴类型的涂抹范围不同且渗透系数与强度变化规律亦不同，依次为异形棍状>无鸭嘴式圆形截面棍状>铁板式>三角形截面棍状>圆弧形

形截面棍状>圆形截面棍状。

本文将基于强/弱涂抹区确定的涂抹范围与文献值进行了对比, 见表 5。既有文献因采用的桩靴类型、套管形状(菱形、圆柱等)或理论假设不同, 所得涂抹区范围值差异较大。然而, 这些文献值基本落在本文提出的 $4d$ (强涂抹区)至 $7d\sim 10d$ (弱涂抹区)范围内。尤为重要的是, 本文在考虑桩靴类型影响下确定的涂抹区范围均略高于文献建议值, 这进一步凸显了在塑料排水板施工涂抹效应评估中纳入桩靴类型因素的必要性。

表 5 涂抹范围对比
Tab. 5 Comparison of smear range

文献	涂抹范围	本文
文献[18]	$7d\sim 10d$	-
文献[19]	$9d$	以强涂抹区为涂抹范围
文献[20]	$2.5d$	约等于 $4d$
文献[21]	$3.1d$	-
文献[22]	$3.5d$	-
文献[23]	$3.7\sim 5.5d$	以弱涂抹区为涂抹范围
文献[24]	$6.3d$	$7\sim 10d$
文献[25]	$2.5d$	-

3 结论

1) 透明土与 PIV 技术结合可有效捕捉塑料排水板施工扰动(涂抹)动态过程, 从浅层($<4d$)涂抹区形态呈现“倒圆锥体”转变为深层($>6d$)的“纺锤体”, 这是由于砂土与黏土强度及模量等物理参数之间的差异所导致。并且, 随排水板插设深度增加, 土体的涂抹效应有所增加。

2) 针对吹填、疏浚、滩涂等淤泥质土, 桩靴类型显著影响涂抹区范围内的位移量及弱涂抹区范围, 但不改变强涂抹区范围。具体表现为: 强涂抹区范围约为套筒直径的 4 倍, 与桩靴类型及插设深度无关, 但弱涂抹区范围因桩靴类型差异而处于 7~10 倍套筒直径。

3) 以强涂抹区为涂抹范围时, 不同桩靴类型的涂抹影响程度依次为: 圆弧形截面棍状>三角形截面棍状>铁板式>异形棍状>无鸭嘴式圆形截面棍状>圆形截面棍状; 以弱涂抹区为涂抹范围时, 异形棍状>无鸭嘴式圆形截面棍状>铁板式>三角形截面棍状>圆弧形截面棍状>圆形截面棍状。

参考文献:

- [1] 李征. 塑料排水板与挤密砂桩联合堆载处理高填土深厚软土路基[J]. 水运工程, 2005(9): 122-124.
LI Z. Thick and soft roadbed with highly-filled soil improvement by preloading with plastic drainboards and sand piles [J]. Port & waterway engineering, 2005 (9): 122-124.
- [2] 王祥, 李小和, 周顺华. 真空联合堆载预压处理高速铁路软土地基效果检验 [J]. 铁道工程学报, 2008, 25 (12): 45-49.
WANG X, LI X H, ZHOU S H. Effect of treating soft soil foundation of high-speed railway with vacuum-mound preloading method [J]. Journal of railway engineering society, 2008, 25(12): 45-49.
- [3] 李志斌, 卢耀如, 周念青. 影响塑料排水板处理效果的因素 [J]. 施工技术, 2005, 34(6): 56-57, 75.
LI Z B, LU Y R, ZHOU N Q. Factors influencing treatment effect of plastic drainage boards [J]. Construction technology, 2005, 34(6): 56-57, 75.
- [4] BERGADO D T, ASAKAMI H, ALFARO M C, et al. Smear effects of vertical drains on soft bangkok clay [J]. Journal of geotechnical engineering, 1991, 117 (10): 1509-1530.
- [5] HAN J, YE S L. A theoretical solution for consolidation rates of stone column-reinforced foundations accounting for smear and well resistance effects [J]. International journal of geomechanics, 2002, 2(2): 135-151.
- [6] HANSBO S. Consolidation of clay by bandshaped prefabricated drains [J]. Ground engineering, 1979, 12(5): 16-18, 21.
- [7] 张永钧. 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—1991 简介 [J]. 建筑科学, 1993, 9(3): 69-73.
ZHANG Y J. Brief introduction of technical specification for building foundation treatment JGJ 79-1991 [J]. Building science, 1993, 9(3): 69-73.
- [8] PRABAVATHY S, RAJAGOPAL K, PITCHUMANI N K. Investigation of smear zone around PVD mandrel using image-based analysis [J]. International journal of geosynthetics and ground engineering, 2021, 7(4): 1-16.
- [9] 张仪萍, 王伟. 竖井施工对软土地基的扰动效应研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(7): 1239-1243.
ZHANG Y P, WANG W. Study on disturbance effect on soft soil ground during vertical drain construction [J].

- Journal of Zhejiang University (engineering science), 2006, 40(7): 1239-1243.
- [10] 秦爱芳, 许薇芳, 江良华. 考虑井阻与涂抹的非饱和土竖井地基固结分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2021, 27(6): 1074-1084.
- QIN A F, XU W F, JIANG L H. Analysis of radial consolidation of unsaturated soil with vertical drains considering drain resistance and the smear effect [J]. Journal of Shanghai University (natural science edition), 2021, 27(6): 1074-1084.
- [11] SATHANANTHAN I, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Evaluation of smear zone extent surrounding mandrel driven vertical drains using the cavity expansion theory [J]. International journal of geomechanics, 2008, 8(6): 355-365.
- [12] BALIGH M M. Strain path method [J]. Journal of geotechnical engineering, 1985, 111(9): 1108-1136.
- [13] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J. Geotechnical properties of transparent silica [J]. Canadian geotechnical journal, 2002, 39(1): 111-124.
- [14] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1564-1568.
- CAO Z H, KONG G Q, LIU H L, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(8): 1564-1568.
- [15] 叶恬, 易立达, 胡孟娴, 等. Laponite RD 透明土模拟软黏土的适用性分析[J]. 科技通报, 2019, 35(6): 154-159, 164.
- YE T, YI L D, HU M X, et al. Applicability analysis for laponite RD transparent clay in simulating natural soft clay [J]. Bulletin of science and technology, 2019, 35(6): 154-159, 164.
- [16] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry [J]. Géotechnique, 2010, 60(2): 121-132.
- [17] 孔纲强, 孙学谨, 肖扬, 等. 透明土与标准砂压缩变形特性对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1895-1903.
- KONG G Q, SUN X J, XIAO Y, et al. Comparative experiments on compressive deformation properties of transparent soil and standard sand [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2016, 38(10): 1895-1903.
- [18] 刘吉福, 杨春林. 珠江三角洲地区竖向排水体施工扰动初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 142-147.
- LIU J F, YANG C L. Preliminary study on construction disturbance of vertical drainage bodies in the Pearl River Delta [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2003, 22(1): 142-147.
- [19] SAYE S R. Assessment of soil disturbance by the installation of displacement sand drains and prefabricated vertical drains [C]//Soil Behavior and Soft Ground Construction. Boston: American Society of Civil Engineers, 2003: 325-362.
- [20] SATHANANTHAN I, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Evaluation of smear zone extent surrounding mandrel driven vertical drains using the cavity expansion theory [J]. International journal of geomechanics, 2008, 8(6): 355-365.
- [21] GHANDEHARIOON A, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Analysis of soil disturbance associated with mandrel-driven prefabricated vertical drains using an elliptical cavity expansion theory [J]. International journal of geomechanics, 2010, 10(2): 53-64.
- [22] GHANDEHARIOON A, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Laboratory and finite-element investigation of soil disturbance associated with the installation of mandrel-driven prefabricated vertical drains [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2012, 138(3): 295-308.
- [23] RUJIKIATKAMJORN C, ARDANA M D W, INDRARATNA B, et al. Conceptual model describing smear zone caused by mandrel action [J]. Geotechnique, 2013, 63(16): 1377-1388.
- [24] INDRARATNA B, PERERA D, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Soil disturbance analysis due to vertical drain installation [J]. Geotechnical engineering, 2015, 168(3): 236-246.
- [25] CHOUDHARY K, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Pore pressure based method to quantify smear around a vertical drain [J]. Géotechnique letters, 2016, 6(3): 211-215.