

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0912

静钻根植桩桩土界面抽排水模型试验及数值模拟研究

俞 杉^{1,2}, 邓岳保^{1,2*}, 郑文喜^{1,2}

(1. 宁波大学 滨海城市轨道交通协同创新中心, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波市能源地下结构重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了进一步优化静钻根植排水桩技术, 提出在桩侧水泥土与软土界面之间设置塑料排水带(竖井)的改进方法, 然后通过模型试验和 Plaxis 3D 数值模拟对改变竖井位置的桩基承载性能和抽水效果进行对比分析。结果表明: 桩土界面抽排水桩的抽水效果明显优于桩侧绑扎排水带的模型桩, 前者能够在抽排水后期持续抽取土体中的水分, 不受水泥土固化的影响; 桩土界面抽排水对桩周土层的加固范围为 2.0 倍桩径, 桩侧绑扎排水对桩周土层的加固范围为 1.5 倍桩径; 相较于传统静钻根植桩和排水桩, 新型排水桩抽水 72 h 后其极限承载力分别提升了 24.2% 和 8.9%; 数值模拟结果表明, 在理想抽水效率下桩土界面抽排水桩的极限承载力比普通桩提升 70%。

关键词: 静钻根植桩; 排水桩; 排水固结; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 04-0011-08

近年来, 我国研发了静钻根植桩技术^[1], 该技术是一种新型绿色环保的桩基技术, 目前我国东南沿海地区正规模化推广应用。有别于传统预制桩施工方法, 静钻根植桩通过先钻孔注浆后植入的方式, 将高强预制管桩静压到地基土体中, 挤土扰动小, 在较大程度上减少了泥浆排放以及施工过程中的噪声等问题^[2]。静钻根植桩能够利用桩周水泥土增大预制桩与临近土体的接触面, 在一定程度上增强了桩基的侧摩阻力。

静钻根植桩施工工艺特殊, 通过水泥土与预制管桩共同受力, 其材料与结构也较为复杂, 导致影响桩基承载力性能的因素较多^[3-4]。近年来, 越来越多的学者对静钻根植桩的承载性能以及荷载传递规律展开了研究。在理论研究及数值模拟方面, 周佳锦等^[5-7]用 ABAQUS 软件对静钻根植桩进行了 3D 建模计算, 详细分析了这种新型组合桩的荷载传递机制; Guo 等^[8]围绕静钻根植桩极限承载力

采用理论计算、有限元模拟与现场实测方法进行对比研究, 发现三者结果较为接近; Li 等^[9]考虑层状地基土层中静钻根植桩的桩身结构和桩土接触条件的复杂性, 对静钻根植桩的纵向动力响应展开了研究; 王忻等^[10]基于圆孔扩张理论, 推导了植桩施工挤土扰动的基本微分方程, 研究探讨了桩周水泥土对圆孔扩张和挤土扰动的影响; 王兴珍等^[11]通过 ABAQUS 软件建立了冻土区静钻根植桩的桩-土有限元模型, 并进行了数值拟合计算, 探究了冻土区静钻根植桩的荷载传递机理。在模型试验方面, 龚晓南等^[12]、周佳锦等^[13]揭示了静钻根植桩的承载性能及其荷载传递的机理; 李富远等^[14]、曹光形等^[15]对静钻根植桩的承载性能和换热性能进行了研究; 汪泉雄等^[16]通过对比 3 种不同桩型, 研究了静钻根植桩的侧摩阻力。在现场试验方面, 王卫东等^[17-20]结合工程实际, 测试分析了静钻根植桩扩底桩端的极限承载力, 在此基础上提出了一种实用的

收稿日期: 2024-09-20

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市自然科学基金重点项目(2023J004); 宁波市重大科技任务攻关项目(2022Z224)

第一作者: 俞 杉, 硕士研究生, 主要研究方向为软土地基与地下结构。E-mail: 1194638266@qq.com

*通信作者: 邓岳保, 博士/教授, 主要研究方向为软土地基与地下结构。E-mail: dengyuebao@nbu.edu.cn

静钻根植桩竖向承载力计算方法,并研究了软土地区不同水泥土性状对搅拌植桩承载特性的影响;周晓宇等^[21]通过现场试验完善了静钻根植桩的设计理论,优化了桩基构造;李仕军等^[22]研究了静钻根植桩在卵石地层中的应用。此外,钱铮等^[23]、周佳锦等^[24]、徐胜锋等^[25]也通过现场试验对静钻根植桩的水平和竖向承载力性能进行了研究。

在有机质土以及土层含水量高等特定条件下,静钻根植桩的水泥土硬化慢或硬化效果差,影响了桩基承载性能。对此,邓岳保等^[26-27]提出了静钻根植排水桩技术,该技术首先在桩周对称绑扎塑料排水带,通过植桩施工方法将预制管桩连同排水带一起压入水泥土桩孔中,再利用真空负压抽水技术加速桩周水泥土固结,快速消除临近土层中的超静孔隙水压力。静钻根植排水桩技术将排水桩的优势与静钻根植桩的特点相结合,提升了桩基承载力和抗变形能力^[28-31]。进一步研究发现,若将竖向排水体设置在桩侧水泥土中,水泥土会在抽水过程中快速硬化固结,影响临近土层的抽排水固结效果,进而影响排水桩承载力的提升。现有的相关研究只针对排水体放置在桩侧,对排水带放置在桩体界面位置的研究尚未见报道。

笔者提出了将塑料排水带放置在桩土界面处,以此改变竖井位置,建立优化的排水通道。塑料排水带位于水泥土与土体的交界位置,其一侧接触水泥土,另一侧接触桩周土,这可使竖井在抽排水早期快速抽取大量水泥土中的水,加速水泥土凝结;在抽排水后期,排水带另一侧能够持续不断抽取土体中的孔隙水,加速软土层排水固结,从而提升桩基的承载性能。为了探究新型排水桩技术的有效性,通过模型试验和数值模拟,对比研究了不同排水桩的承载力和抗变形能力,分析了竖井设置位置对桩土体系抽排水及承载性能的影响,以期为滨海地区植入式排水桩技术的研发提供参考。

1 模型试验

1.1 试验方案

为了研究静钻根植排水桩的抽水效果以及承载力性能,试验共设置4组模型桩,详见表1。

图1为模型试验示意图,模型地基高1.1 m,长2.0 m,宽1.2 m。模型桩为预制混凝土桩,桩长

0.8 m,直径85 mm。桩周水泥土直径110 mm。P1为普通静钻根植桩,桩中间为实心的预制混凝土,桩周为水泥土;P2为两侧绑扎有排水带的静钻根植桩,但是在试验过程中不进行抽排水,用于研究桩侧绑扎排水带是否会对桩基的承载力产生影响;P3为常规的静钻根植排水桩,即在下桩前,在混凝土模型桩周围绑扎竖向排水带,并连接好真空管路,在植桩完成后进行真空负压抽排水;P4为桩土界面抽排水的静钻根植桩,即将排水带插入水泥土与土体的交界处,以便同时抽取土体和水泥土中的水分。

表1 模型桩的设置

桩	排水通道	排水带位置	是否抽水
P1	无	无	否
P2	有	桩侧	否
P3	有	桩侧	是
P4	有	桩土界面	是

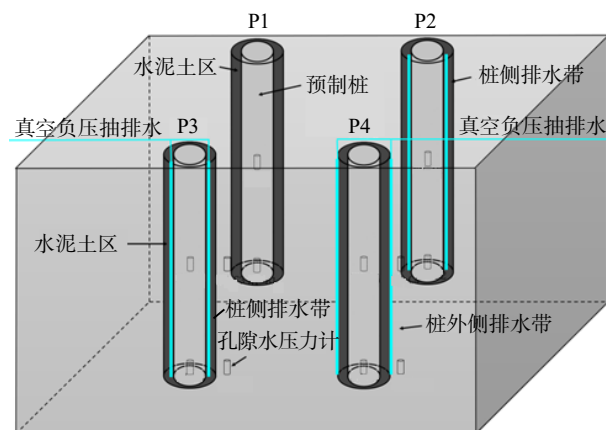


图1 模型试验示意图

在4组模型桩中,通过P2与P1的对比研究排水带设置对桩侧摩阻力的影响,P3与P1的对比研究真空抽水对排水桩承载力的影响,P4与P3的对比研究竖井设置位置对桩承载力的影响。考虑到P1和P2均为不抽排水模型桩,其四周的孔隙水压力变化趋势相同,因此只在模型桩的一侧埋设孔隙水压力计(JC-KY,长沙九测物联科技有限公司);而P3和P4均为抽排水模型桩,则分别在模型桩靠近排水带一侧与远离排水带一侧埋设孔隙水压力计,如图2所示。孔隙水压力计埋设位置与桩基中心距离为1.0倍桩径,1个孔洞埋设2台孔隙水压力计,埋设深度分别为40 cm和80 cm。

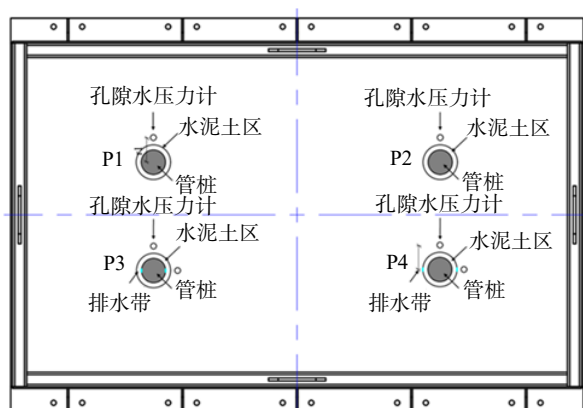


图2 模型桩及孔隙水压力计埋设位置示意图

1.2 模型桩的制备

参考实际工程桩基尺寸, 模型桩按照缩尺比1:6进行缩尺制作, 桩长0.8 m, 桩径85 mm。模型桩的制作过程: 使用内径为85 mm的PVC塑料管作为模型, 将配置好的混凝土缓慢倒入PVC管中, 同时不断震荡PVC管, 以减少气泡的产生。制作完成后在标准养护室放置7 d, 然后进行脱模处理, 脱模后继续在标准养护室静置28 d, 再进行模型试验, 确保模型桩具有足够的强度, 能够满足试验的要求。制备完成后的模型桩按照试验要求进行分组设计, 结果如图3所示。

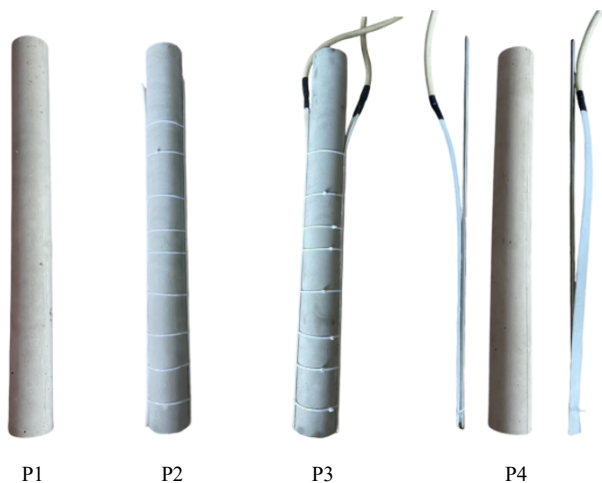


图3 模型桩

1.3 模型地基与桩基施工

模型箱长2.0 m, 宽1.2 m, 高1.2 m, 如图4所示。模型地基采用宁波某基坑工程中深3~4 m处的软黏土分层填筑而成。模型地基预压3周, 然后取土样测试其基本物理力学性质, 结果为天然含水率约35%, 液限34.8%, 塑限21.2%, 重度

16.84 kN/m³, 密度1730 kg/m³。



图4 模型桩施工

P1与P2施工过程: 采用直径110 mm的PVC管插入模型地基土中进行护壁, 用洛阳铲在PVC管中取土, 将取出土与水泥制备水泥土($m_{\text{干土}}:m_{\text{水}}:m_{\text{水泥}}=4:10:1$), 其中水的参量为正常参量2倍, 用以模拟实际工程中过量掺水。水泥采用普通硅酸盐水泥, 强度42.5 MPa。将搅拌后的水泥土注入桩孔, 同时上拔PVC护壁套管, 直至完全拔出。最后在土层表面架设对中器, 将P1和P2分别竖直对中植入各自桩孔中。

P3在进行植桩施工前, 首先将桩侧抽排水的排水带用塑料绑扎带提前按照试验方案在模型桩上绑扎固定, 同时连接相应的真空管路, 检查并确保试验过程中整个真空系统密封且不漏气; P3的植桩过程与P1和P2一致, 排水带随模型桩一起植入水泥土中。P4在进行植桩施工前, 首先准备2根直径1 cm的铁棒, 将排水带的底部用绑扎带固定, 同时在排水带顶部连接好真空管, 并用黑胶带密封; 然后在模型桩植入水泥土后(此时水泥土处于流动状态), 将排水带通过铁棒准确插入水泥土与土体交界处, 待排水带达到指定深度并固定位置后, 再将铁棒抽出, 铁棒可以重复利用。

1.4 静载试验

在桩顶架设反力架装置, 通过千斤顶、杠杆和砝码形成一套反力加载系统, 如图5所示。在桩顶放置压力传感器, 并架设百分表, 实时监测桩顶压力和沉降变化。试验按照《建筑基桩检测技术规范》^[32], 采用慢速维持荷载法进行分级加载, 每级荷载取250 N, 其中第1级荷载取分级荷载的2倍

(500 N)。每级荷载加载后分别在 5、15、30、45、60 min 时测量桩顶的沉降量,之后每隔 30 min 测量,直至桩顶沉降达到稳定。



图 5 静荷载试验

在静荷载试验中, $Q-s$ 曲线均无明显拐点,而且模型桩桩径为 85 mm,依据《建筑地基基础设计规范》^[33]: $Q-s$ 曲线无明显拐点时,桩顶位移达到桩基直径的 1/10,桩基达到其极限承载力。因此,选择桩径 1/10,即桩基沉降达到 8.5 mm 时的荷载为其极限承载力。

2 试验结果分析

2.1 真空负压抽水试验

试验抽水时长 72 h,真空负压约 0.09 MPa。在抽排水过程中,每隔 6 h 真空泵更换 1 次冷却水,以保证真空泵持续稳定运转。P3 总计抽出水量 515 g, P4 总计抽出水量 555 g。P3 和 P4 抽水量随时间的变化曲线如图 6 所示。

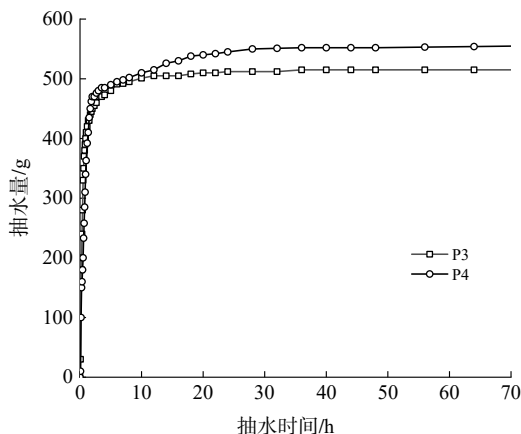
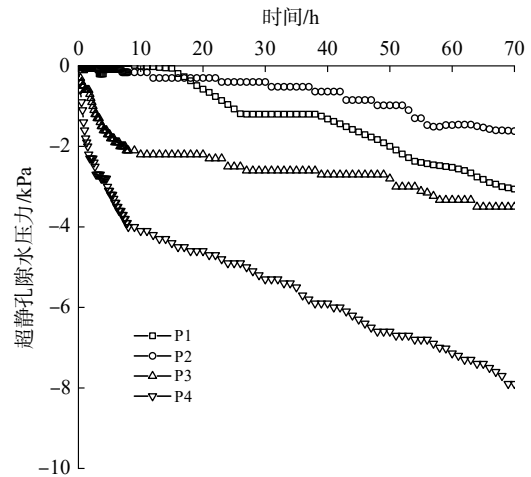


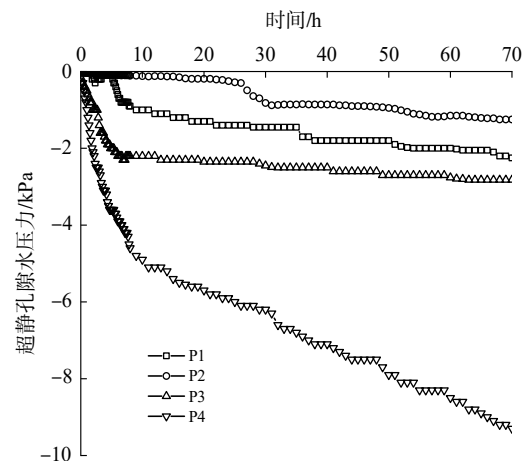
图 6 P3 和 P4 抽水量随时间的变化曲线

从图 6 可见,抽水前 10 h, 2 条曲线斜率都较大,抽水速率较快,10 h 后逐渐变得平缓。P3 抽水 10 h 抽水量达 501 g,此时水泥土处于流塑状态,含有大量的水;10 h 后随着水泥土逐渐凝固,排水带很难再抽出水分,抽水效率快速下降。P4 抽水前 10 h 抽水量随时间的变化与 P3 相似,但是 10 h 后孔隙水仍被不断抽出。表明 P4 因其排水带放置在水泥土与土体界面处,前期抽取大量水泥土中的水分,后期水泥土凝固,排水带的另一侧可以继续抽取土层中的水分,加速土体排水固结,进而提高土层的承载性能。

图 7 为距离模型桩基 1.0 倍桩径的孔隙水压力计测得的超净孔隙水压力随抽水时间的变化曲线。



(a) $z=40$ cm



(b) $z=80$ cm

图 7 1.0 倍桩径处孔隙水压力随时间的变化曲线

从图 7 可见, P1 和 P2 因未进行抽排水,其前 8 h 孔隙水压力下降未超过 1 kPa,随着时间推移,

P1 和 P2 桩周超静孔隙水压力逐渐消散,但其整体下降幅度不大,属超静孔隙水压力自然消散过程。

深度为 40 cm 处, P3 和 P4 抽排水前 8 h 孔隙水压力下降明显, P3 超静孔隙水压力消散 2.1 kPa, P4 超静孔隙水压力消散 4.0 kPa。随后 P3 桩周孔隙水压力基本不再消散,在 72 h 内超静孔隙水压力共计消散 3.2 kPa。P4 桩周孔隙水压力继续呈现下降趋势,虽然比前 8 h 下降缓慢,但是仍有 4.2 kPa 超静孔隙水压力消散,在 72 h 内超静孔隙水压力共计消散 8.2 kPa。

深度为 80 cm 处, P1、P2、P3 和 P4 的超静孔隙水压力的消散趋势基本与 40 cm 处相同,其中 P4 孔隙水压力变化较为明显,72 h 内孔隙水压力总计消散 9.3 kPa,且在抽排水后期仍有约 1.0 kPa 的超静孔隙水压力消散。

2.2 静荷载试验

图 8 为 P1、P2、P3 和 P4 植入 28 d 时的荷载—沉降曲线。从图 8 可见, P3 和 P4 的承载力明显优于 P1。P1 在 28 d 的极限承载力为 3 213 N, P2 为 3 240 N, P3 为 3 500 N, P4 为 3 989 N。P1 和 P2 的极限承载力几乎没有区别,说明在静钻根植桩桩周绑扎排水带对桩基承载力影响微小,可以忽略。P4 的极限承载力为 P1 的 124.2%, P3 的 114.0%,说明在桩土界面处进行真空负压抽排水相较于传统桩侧绑扎排水带对土体的加固能力更强,更能提升桩基承载性能。试验结果表明:普通静钻根植排水桩的承载力提升 8.9%,而桩土界面抽排水的静钻根植排水桩的承载力提升 24.2%,详见表 2。

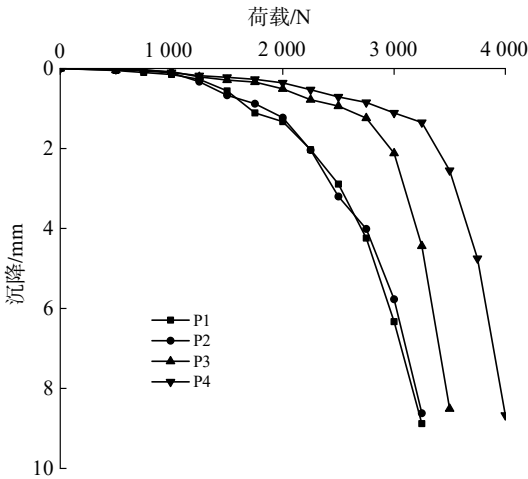


图 8 模型桩荷载—沉降曲线

表 2 单桩极限承载力及结论

桩	28 d 极限承载力/N	提升率/%	结论
P1	3 213	—	—
P2	3 240	1.0	桩侧绑扎排水带不影响桩基承载力
P3	3 500	8.9	桩侧抽排水能加速凝固水泥土,小幅提升桩基承载力
P4	3 989	24.2	桩土界面抽排水能加固桩周土体,大幅提升桩基承载力

3 数值模拟分析

采用 Plaxis 3D 软件对模型试验进行数值模拟,并与模型试验结果进行比较,以探明排水加固机理以及承载力性能。

3.1 数值模拟参数

根据室内模型试验,将模型地基设置为软黏土土层,采用软土模型模拟土体材料,参数见表 3。

表 3 模型地基土与水泥土参数

参数	土	水泥土
排水类型	不排水 A	不排水 A
重度/(kN·m ⁻³)	16.8	14.9
初始孔隙比	1.1	1.1
内摩擦角/(°)	8.6	45.0
渗透系数/(m·d ⁻¹)	0.864×10 ⁻³	2.830×10 ⁻³
强度折减系数	0.7	0.7
泊松比	0.15	0.25
黏聚力/kPa	6.4	150.0
压缩指数	0.6	—
回弹指数	0.06	—

将模型桩简化为圆柱形实体桩单元来模拟静钻根植桩,利用排水线模拟塑料排水带。模型桩采用线弹性本构关系,重度为 25 kN/m³,弹性模量为 42.5×10⁻⁶ kPa,桩周水泥土采用摩尔-库伦本构模型模拟(适用于水泥土的弹塑性模型)。其中桩-水泥土-土界面单元属性通过设置相应的强度折减系数控制。排水固结过程使用 Plaxis 3D 软件中的排水线进行模拟,该排水线功能是 Plaxis 3D 软件特有的功能,可以很好地模拟软基处理中真空负压抽排水过程。

材料参数及结构建模完成后,进行网格划分,采用平面三角形 10 节点单元,共划分单元 43 595

个，节点 65 261 个。施工分 3 个阶段：（1）初始应力阶段，对模型进行初始应力场计算；（2）真空负压抽排水阶段，在此阶段中激活排水线，抽真空总时长 72 h；（3）静载阶段，即激活桩顶荷载，加载方式模拟试验中的慢速维持加载法，逐级加载，直至桩基位移超过 1/10 桩径。试验采用的模型桩直径 85 mm，认为沉降超过 8.5 mm 时达到极限承载力。

3.2 数值模拟结果

根据室内模型试验，排水线真空度设置为 90 kPa，抽真空时间设置为 72 h，得到超静孔隙水压力云图，如图 9 所示。从图 9 可见，P3 的真空负压抽排水的影响范围为 1.5 倍桩径，而 P4 的真空负压抽排水的影响范围为 2.0 倍桩径，超过 2.0 倍桩径时，土中孔隙水压力变化不明显。P3 和 P4 在 1.0 倍桩径位置处的超静孔隙水压力消散值分别为 7.5 kPa 和 12.5 kPa，将其与室内模型试验进行对比，结果见表 4。其中 P1 和 P2 均为未进行抽排水的模型试验桩，其 72 h 内超静孔隙水压力数值模拟结果为下降 2.5 kPa，与模型试验结果接近。

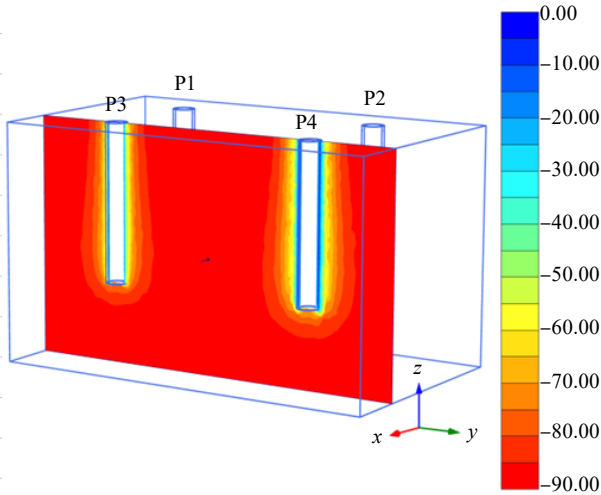


图 9 抽排水 3 d 后超静孔隙水压力云图（单位：kN/m³）

表 4 超静孔隙水压力消散与极限承载力对比

桩	超静孔隙水压力消散/kPa		极限承载力/N	
	模型试验	数值模拟	模型试验	数值模拟
P1	2.7	2.5	3 213	2 834
P2	1.5	2.5	3 240	2 834
P3	3.2	7.5	3 500	4 016
P4	8.8	12.5	3 989	4 816

图 10 为沉桩 28 d 后静载试验的数值模拟结果，模拟加载方式采用慢速维持加载法，即每级在桩顶施加 400 N 均布荷载，直至桩基最大沉降值达到 8.5 mm，此时在桩顶施加的荷载为桩基的极限承载力。从图 10 可见，P1 和 P2 在桩顶荷载增加至 2 834 N 时，桩身位移达到 8.5 mm，即其极限承载力的数值模拟结果为 2 834 N；P3 在桩顶荷载增至 4 016 N 时，沉降达到 8.5 mm，而此时 P4 沉降仅为 3.0 mm；P4 是在 4 816 N 时达到极限承载力。

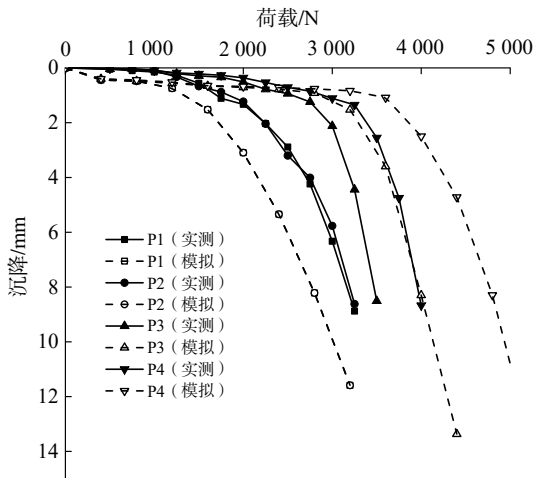


图 10 荷载—沉降曲线

从表 4 数值模拟与室内模型试验对比结果可见，数值模拟和测试结果的相对误差在 13%~21%。原因主要是在实际试验中，抽排水过程的真空负压无法完全利用，整体的抽水效率不高；而数值模拟是理想状态，激活排水线后，真空度被完全利用。数值模拟与室内模型试验表明：P4 比 P3 能够更好地利用排水带的排水固结功能，降低桩周土体孔隙水压力，加固桩周土层，提升桩基的承载力。同时，P4 在理论状态下能够提升桩基 70% 极限承载力，但是在实际工程中抽排水受到现场环境、土壤条件、土层分布以及地下水位等多种因素影响，导致抽排水效率折扣较大，表明实际抽排水效率有较大的提升空间。

4 结论

笔者提出了一种新型静钻根植排水桩技术，即在静钻根植桩桩土界面位置放置塑料排水带，结合真空负压排水技术，加速桩侧水泥土凝固和临近土层的排水固结，提升了桩土体系的承载性能。通过

模型试验和数值模拟,对该新型桩基的承载性能进行了分析,得到如下主要结论:

(1) 模型试验抽水 72 h, P3 和 P4 分别抽水 515 g 和 555 g,造成差异的主要原因是抽水 10 h 后, P3 因水泥土硬化,渗透系数下降,排水带抽水效率降低,而 P4 可继续抽取临近土体的孔隙水。

(2) P1 和 P2 在植桩 72 h 后,超静孔隙水压力分布自然消散 2.7、1.5 kPa。P3 和 P4 在抽排水前 8 h 内孔隙水压力下降明显,下降了 2.0~3.0 kPa,但后续 64 h 内 P3 孔隙水压力变化不大,而 P4 孔隙水压力持续下降,最大值达到 9.3 kPa。

(3) 对比 4 组模型桩的静荷载试验, P1、P2、P3、P4 在 28 d 时的极限承载力分别为 3 213、3 240、3 500、3 989 N。相较于静钻根植桩,桩侧绑扎排水带的承载力提升 8.9%,桩土界面抽排水的静钻根植排水桩承载力提升 24.2%。

(4) 数值模拟结果进一步验证抽排水能够有效提升桩基承载力性能, P1、P2、P3、P4 承载力模拟结果分别为 2 834、2 834、4 016、4 816 N; P3 抽水效果能影响 1.5 倍桩径, P4 抽水效果能影响 2.0 倍桩径。P4 极限承载力为 P1 的 1.7 倍,说明在理想抽水状态下,桩土界面抽排水能够提升桩基 70% 的极限承载力。

参考文献:

- [1] 张日红, 吴磊磊, 孔清华. 静钻根植桩基础研究与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2):1200-1203.
- [2] SHAO F Y, DENG Y B, CHEN S J, et al. Field test study on construction disturbances of driven pile and PGP pile[J]. Applied sciences, 2023, 13(21):11887.
- [3] HORIGUCHI T, KARKEE M B. Load tests on bored PHC nodular piles in different ground conditions and the bearing capacity based on simple soil parameters[J]. AIJ journal of technology and design, 1995, 1(1):89-94.
- [4] KARKEE M B, KANAI S, HORIGUCHI T. Quality assurance in bored PHC nodular piles through control of design capacity based on loading test data[EB/OL]. [2024-06-08]. <https://www.japanpile.co.jp/ir/treatise/article/36>.
- [5] 周佳锦, 王奎华, 龚晓南, 等. 静钻根植竹节桩承载力及荷载传递机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5):1367-1376.
- [6] ZHOU J J, WANG K H, GONG X N, et al. Bearing capacity and load transfer mechanism of a static drill rooted nodular pile in soft soil areas[J]. Journal of Zhejiang University: science A, 2013, 14(10):705-719.
- [7] ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Effect of cemented soil properties on the behavior of pre-bored grouted planted nodular piles under compression[J]. Journal of Zhejiang University: science A, 2018, 19(7): 534-543.
- [8] GUO J, DAI G L, WANG Y. Method for calculating vertical compression bearing capacity of the static drill rooted nodular pile[J]. Applied sciences, 2022, 12(10): 5101.
- [9] LI Z Y, WANG K H, WU W B, et al. Longitudinal dynamic impedance of a static drill rooted nodular pile embedded in layered soil[J]. Marine georesources & geotechnology, 2018, 36(3):253-263.
- [10] 王忻, 邓岳保, 胡书豪, 等. 静钻根植桩挤土扰动圆孔扩张理论研究[J]. 力学与实践, 2024, 46(6):1221-1232.
- [11] 王兴珍, 杨庚辰, 詹钦鹏. 冻土区静钻根植桩竖向承载特性数值模拟研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(4):63-68, 76.
- [12] 龚晓南, 邵佳函, 解才, 等. 桩端扩大头尺寸对承载性能影响模型试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11):102-109.
- [13] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩荷载传递机理模型试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3):531-537, 546.
- [14] 李富远, 王忠瑾, 谢新宇, 等. 静钻根植能源桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10):3307-3316.
- [15] 曹光彤, 邓岳保, 俞磊, 等. 考虑软土超固结的静钻根植能源桩模型试验[J]. 深圳大学学报(理工版), 2022, 39(1):93-100.
- [16] 汪泉雄, 邓岳保, 王忻, 等. 滨海地区静钻根植桩侧摩阻力研究[J]. 四川建材, 2024, 50(9):75-77, 100.
- [17] 王卫东, 凌造, 吴江斌, 等. 上海地区静钻根植桩承载特性现场试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 238-245.
- [18] 王卫东, 凌造, 吴江斌, 等. 上海地区静钻根植桩成桩效果与质量试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(12):115-119.
- [19] 王卫东, 王萌, 吴江斌. 静钻根植桩扩底桩端极限承载性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(11):3091-3098.
- [20] 王卫东, 杨昱, 吴江斌, 等. 软土地区预制桩搅拌植桩承载变形特性现场试验研究[J/OL]. [2024-10-22]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20241021.1137.002>.
- [21] 周晓宇, 周良, 闫兴非. 基于工业化建造的静钻根植桩应用研究[J]. 中国市政工程, 2023(5):16-21, 116.

- [22] 李仕军, 周铮, 陈劲, 等. 圆砾地层高承载力静钻根植桩设计与施工技术[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊 1): 2345-2351.
- [23] 钱铮, 王奎华. 静钻根植桩水平承载性能试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2):588-594.
- [24] 周佳锦, 马俊杰, 俞建霖, 等. 静钻根植桩竖向承载性能现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(3):640-647.
- [25] 徐胜锋, 陈洪雨, 张正龙, 等. 宁波轨道交通静钻根植桩的承载力自平衡测试[J]. 土工基础, 2018, 32(4):445-448.
- [26] 邓岳保, 张日红, 孙嘉烽, 等. 静钻根植排水桩技术及模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8):293-302.
- [27] 邓岳保, 张晨豪, 王忻, 等. 植入式排水桩固结理论[J]. 岩土力学, 2023, 44(9):2639-2647.
- [28] NI P P, MANGALATHU S, MEI G X, et al. Laboratory investigation of pore pressure dissipation in clay around permeable piles[J]. Canadian geotechnical journal, 2018, 55(9):1257-1267.
- [29] NI P P, MANGALATHU S, MEI G X, et al. Permeable piles: an alternative to improve the performance of driven piles[J]. Computers and geotechnics, 2017, 84:78-87.
- [30] 孙嘉烽, 邓岳保, 邵飞瑜, 等. 静钻根植排水桩承载特性数值分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2023, 36(2): 67-72.
- [31] 陈紫强, 邓岳保, 孙嘉烽, 等. 抽排水时间对静钻根植排水桩承载特性的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3):112-116.
- [32] 山东省住房和城乡建设厅, 山东省质量技术监督局. 建筑桩基检测技术规范: DB37/T 5044—2015[S]. <https://max.book118.com/html/2025/0107/6241213200011022.shtml>.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

Experimental and numerical simulation study on the pumping and drainage model of the soil interface of static drilling rooted piles

YU Shan^{1,2}, DENG Yuebao^{1,2}, ZHENG Wenxi^{1,2}

(1.Collaborative Innovation Center of Coastal Urban Rail Transit, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Key Laboratory of Energy Underground Structure, Ningbo 315211, China)

Abstract: To further enhance the static drilling rooted drainage pile technology, an improvement measure involving the installation of plastic drainage belts (vertical shafts) at the interface between cement soil and soft soil on the side of the pile is proposed. Subsequently, through model experiments and numerical simulations, the bearing performance and pumping effect of pile foundations with varying vertical shaft positions are compared and analyzed. The results indicate that the pumping effect of the drainage pile at the pile-soil interface is significantly superior to that of the model pile with a drainage belt attached to its side. The former can continuously extract water from the surrounding soil during later stages of pumping and drainage without being hindered by cement soil solidification. Furthermore, the reinforcement range around the pile due to pumping and drainage at the pile-soil interface extends up to twice the diameter of the pile, whereas binding a drain on its side only affects an area 1.5 times its diameter. In comparison to the traditional static drilling rooted piles and conventional drainage piles, after three days of pumping, this new type of drainage pile exhibits an increase in ultimate bearing capacity by 24.2% and 8.9%, respectively. Numerical simulation analysis reveals that, under optimal pumping efficiency conditions, the ultimate bearing capacity could be enhanced by as much as 70%.

Keywords: static drilling and rooted pile; drainage pile; drainage consolidation; model test; numerical simulation

(责任编辑 史小丽)