

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.039



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



XCC 桩群桩沉桩挤土效应透明土模型试验研究

胡文强, 周航, 刘汉龙

(重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:现浇 X 形混凝土桩(X-sectional cast-in-place concrete pile, 简称 XCC 桩)作为一种非圆截面异形桩,利用等截面异形周边扩大原理,将圆弧正拱变成反拱,达到扩大截面周长、提高承载力的目的。XCC 桩安装过程其实是一个挤土过程,群桩沉桩挤土效应与单桩相比较为复杂,关于 XCC 桩群桩挤土效应方面的研究较少,而 XCC 桩群桩沉桩挤土效应是研究 XCC 桩的重要课题。基于透明土试验,开展了 XCC 桩与圆形桩群桩沉桩贯入试验,通过粒子图像处理技术获取沉桩过程的位移场变化规律,研究不同桩型和不同沉桩顺序对群桩沉桩挤土效应的影响。试验结果表明:对于最后贯入桩背桩面土的位移,XCC 桩贯入引起的位移会比圆形桩率先达到峰值,XCC 桩和圆形桩在群桩沉桩贯入过程中都会产生明显的累积效应和遮拦效应,且 XCC 桩的遮拦效应要强于圆形桩。最后,给出了 XCC 桩和圆形桩在不同沉桩顺序条件下群桩遮拦效应的经验公式。

关键词:透明土;现浇 X 形混凝土桩;群桩贯入;挤土效应;累积效应;遮拦效应

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)06-0107-09

Experimental study of XCC pile group penetration effect based on transparent soil model testing technique

HU Wenqiang, ZHOU Hang, LIU Hanlong

(Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: X-section cast-in-place concrete pile (XCC pile), as a non-circular sectional special-shaped pile, turned the circular arch into reverse arch based on the principle of constant sectional special-shaped periphery enlargement, to turn the circular arc positive arch into an anti-arch, and finally forms a symmetrical X-shaped section, to expand the section perimeter and improve the bearing capacity. The installation process of XCC piles is actually a process of soil squeezing, and the effect of soil squeezing of pile group penetration is more complicated than that of single pile. However, there is limited research on the effect of soil squeezing of XCC piles group penetration at present, and the effect of soil squeezing of XCC pile group penetration is an important topic in the study of XCC piles. The effects of different pile types and different pile sequences on the squeezing

收稿日期:2023-01-27

基金项目:国家自然科学基金(51978105);重庆市研究生科研创新项目(CYS22056);重庆市杰出青年科学基金(cstc2021jcyj-jqX0017)

作者简介:胡文强(1994-),男,主要从事软土地基加固研究,E-mail:a15105208723@163.com。

周航(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zh4412517@163.com。

Received: 2023-01-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978105); Chongqing Graduate Student Research Innovation Project (No. CYS22056); Chongqing Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. cstc2021jcyj-jqX0017)

Author brief: HU Wenqiang (1994-), main research interest: soft soil foundation reinforcement, E-mail: a15105208723@163.com.

ZHOU Hang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zh4412517@163.com.

effect of pile group penetration are studied. Based on the transparent soil technique, the penetration test of XCC pile and circular pile group was carried out. The displacement field variation pattern of pile group penetration was obtained via particle image velocimetry, and the influence of different pile types and penetration sequences on squeezing effect of pile group was studied. Results show that obvious cumulative effect and shielding effect can be observed during the penetration of XCC and circular group piles. For the displacement of the soil of the last penetrated pile dorsal surface, the displacement caused by XCC piles penetration reaches the peak first than that of the circular piles, and both XCC piles and round piles penetration produce obvious cumulative effect and shielding effect. The shielding effect of XCC pile is stronger than that of circular pile. Finally, empirical formula for predicting the shielding effect for XCC and circular piles under different penetration sequences was provided.

Keywords: transparent soil; cast-in-place X pile (XCC pile); group pile penetration; penetration effect; cumulative effect; shielding effect

在相同横截面积情况下,异形截面桩拥有更大的周长,进而拥有更大的桩侧表面积,以此来提高桩身的竖向承载力。现浇X形混凝土桩(简称XCC桩)是利用等截面异形周边扩大原理,将圆弧正拱变成反拱,最终形成对称的X形截面。与传统的圆形现浇混凝土桩相比,具有相同横截面面积的XCC桩由于其横截面周长更大而具有更大的侧阻力。而等截面周长的圆形桩与XCC桩的理论侧摩阻力相同,但是XCC桩拥有更小的截面面积,因此,能够节省大量建筑材料。

学者们已经对XCC桩技术开展了大量研究,张敏霞^[1]基于双曲线模型和 Boltzmann 模型,预测了XCC桩的极限承载力,并基于荷载传递法总结出了XCC单桩沉桩贯入的沉降计算公式。吕亚茹等^[2-3]基于平衡分析法,采用三维有限元分析了XCC桩的应力传递和荷载分配机制,并与现场试验结果进行了对比验证。王智强^[4]、张敏霞等^[5-7]开展了竖向荷载作用下等截面面积XCC桩和圆形桩的足尺对比模型试验,试验结果表明,由于XCC桩拥有更大的桩侧摩阻力,其竖向承载力较等截面面积的圆形桩大。雍君等^[8-9]开展了等截面面积XCC桩和圆形桩抗拔性能对比试验研究。结果表明,圆形桩和XCC桩的侧摩阻力分布规律一致,但XCC桩较等截面面积圆形桩的抗拔力高了约16.7%。金辉^[10]、刘汉龙等^[11]依托现场试验,分析了XCC桩的单桩沉桩特性,开展了XCC桩的水平挤土试验,对比分析了不同截面方向、不同径向距离和不同深度的水平位移、侧向土压力及孔隙水压力的分布规律。

目前关于群桩沉桩挤土效应也开展了很多研究。张建新等^[12]开展了室内群桩贯入模型试验,研究群桩贯入后土体水平位移和地表隆起变形规律、超孔隙水压力及土体的微观结构特征的变化规律。万星等^[13]在上软下硬的成层地基土中开展了预制方

桩群桩锤击施工的现场试验研究,发现沉桩产生的土体深层水平位移呈现上大下小的分布规律。刘俊伟等^[14]在单桩挤土效应解析解基础上推导出静压群桩挤土效应的理论公式,并将该理论结果与现场试验成果对比验证。罗战友等^[15]推导出了静压群桩挤土位移场的解析解,并发现在考虑施工顺序及遮拦效应的情况下,迎桩面挤土位移较大,而背桩面的挤土位移较小,而且随着桩数的增多,迎桩面的挤土效应将会增强。但目前对于沉桩顺序对群桩挤土效应的影响以及XCC桩群桩沉桩挤土效应方面的研究仍然较少。

近年来,基于数字图像处理的透明土试验技术由于可以实现土体变形的非侵入式测量,而被广泛用于结构-土相互作用变形问题研究。刘汉龙等^[16]自主研发透明土平行隧道模型试验装置以及试验方法,研究了平行隧道在砂质场地上开挖引起的地表和地层沉降特性。邓泽之等^[17]研究了波动水力条件下的水流扰动对孔隙喉道处细颗粒桥接结构的破坏机制。卢凉等^[18]利用透明土试验对静力触探探头穿越土层界面时出现的“超前、滞后”现象作出了系统的解释。Zhou等^[19]基于透明土技术和PIV技术量化了XCC桩单桩沉桩后位移场变化规律,并将试验结果与圆孔扩张理论和浅层应变路径法的预测值作了对比。Xiao等^[20]通过透明土群桩试验对比了45°桩靴与平底桩的挤土效应,并且观测到了明显的遮拦效应,但是并未对该效应做出定量评价。宗梓煦等^[21]依托透明土可视化技术发现仿生牙根桩的承载能力超出普通锥形桩一倍左右。袁炳祥等^[22]开展了侧向受荷桩的室内模型试验,并结合PIV图像技术分析了桩周土体位移场的变化发展趋势,结果表明水平受荷桩的桩前和桩后砂土表面会产生纺锤形的位移影响区域,砂土相对密实度的增大会减小桩体水平位移。杨晓峰等^[23]基于PIV技术开展了

一系列单桩水平加载模型试验,讨论了柔性桩和刚性桩的水平桩土相互作用模式,以及局部冲刷对水平桩土相互作用的影响。

综上所述,沉桩挤土效应是一个比较复杂的问题,而如何将单桩的相关理论推广至群桩则是一个更为复杂的问题。目前基于透明土技术对 XCC 桩群桩的沉桩效应研究相对较少,笔者开展透明土 XCC 桩群桩沉桩模型试验,测得群桩沉桩后的位移场变化情况,同时进行等横截面面积的圆形桩群桩沉桩模型试验,研究对比圆形桩和 XCC 桩的群桩沉桩挤土效应的差异。通过分析试验结果,对群桩沉桩挤土效应的累积效应和遮拦效应进行定量评价,并给出了考虑不同桩型和不同沉桩顺序条件下遮拦效应的计算公式。

1 透明土群桩贯入模型试验

1.1 试验材料

试验采用熔融石英砂模拟土体颗粒,粒径范围为 0.5~1 mm,密度 1.464 g/cm³,摩擦角为 34°。孔隙液采用折射率为 1.462 5 的 15 号白油与折射率为 1.421 0 的正十二烷按照体积比 7.5:1.0 混合配置而成,最终的孔隙液折射率为 1.458 5,与熔融石英砂折射率保持一致。配置透明土及试验过程均在室温 25 °C 条件下进行,这可以有效减少环境温度变化对孔隙液折射率的影响。从图 1 可以发现,在激光照射下,透明土散斑场效果较好。模型桩的物理参数见表 1。

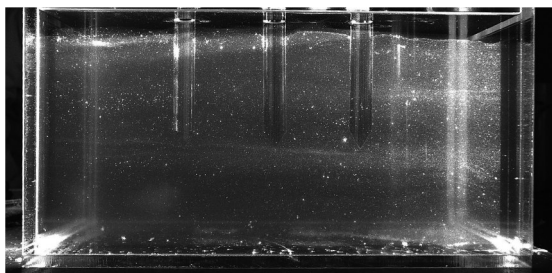


图 1 透明土散斑场

Fig. 1 Speckle field of transparent soil

表 1 模型桩参数

Table 1 Parameters of the model pile

桩型	桩长/ mm	横截面 积/mm ²	截面等效半 径/mm	模型桩 材料	桩靴角 度/(°)
圆形桩	240	314	10	熔融	60
XCC 桩	240	314	10	石英	60

1.2 模型桩与试验工况

试验所采用的模型桩材料均为熔融石英,与透明土材料相同,弹性模量为 40 MPa,泊松比为

0.32,摩擦角为 34°。为了解 XCC 桩与常规圆形桩在挤土效应上的异同,开展两种桩型的等截面面积对比试验,并且考虑了两种沉桩顺序试验工况,见表 2。模型箱尺寸为 480 mm×200 mm×240 mm,桩间距为 8R(R 为桩等效半径),透明土高度为 200 mm,群桩贯入深度为 100 mm。模型桩具体参数见表 1 和图 2,实物图见图 3,工况示意图见图 4,模型箱与沉桩位置示意图见图 5。

表 2 试验工况

Table 2 Conditions of tests

工况	桩型和沉桩顺序
工况 1	圆形桩沉桩顺序 1:C1、C2、C3
工况 2	圆形桩沉桩顺序 2:C2、C1、C3
工况 3	XCC 桩沉桩顺序 3:X1、X2、X3
工况 4	XCC 桩沉桩顺序 4:X2、X1、X3

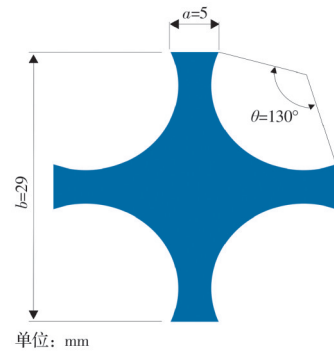


图 2 XCC 桩参数

Fig. 2 XCC pile parameters

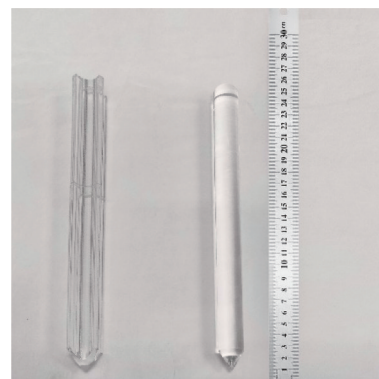


图 3 模型桩实物图

Fig. 3 Pictures of model pile

1.3 试验相关设备

试验设备包括:亚克力模型槽、光学平台、沉桩加载设备、CCD 相机、激光发射器。光学平台采用铁磁不锈钢面包板,台面上有 M6/25 mm 的螺纹孔。沉桩加载设备由电机驱动,加载速率范围为 0.1~10 mm/s,试验沉桩速率为恒定,为 1 mm/s,贯入时间为 100 s,贯入深度为 100 mm。CCD 工业相机分辨率为 1 920×1 080,拍摄频率为 1 Hz。最

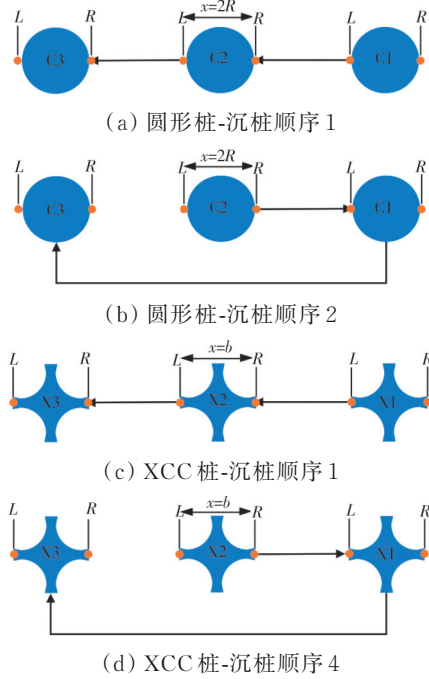


图 4 工况示意图

Fig. 4 Test condition diagram

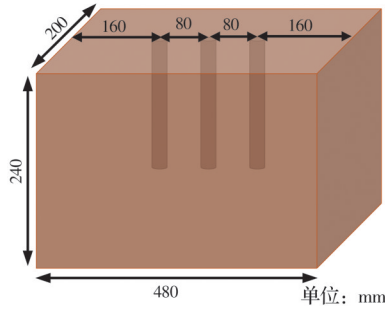


图 5 沉桩布置和模型箱尺寸

Fig. 5 Layout of piles penetration and size of model box

后通过 PIV View 2C 图像处理软件对试验结果进行分析。透明土试验系统见图 6。

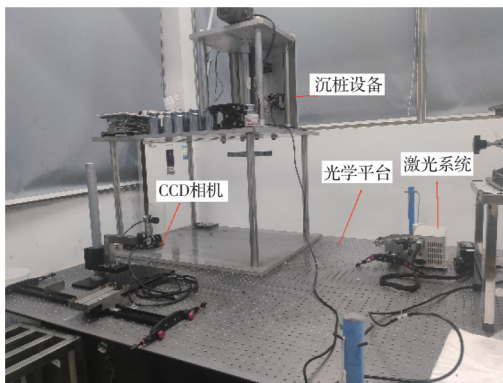


图 6 透明土试验系统

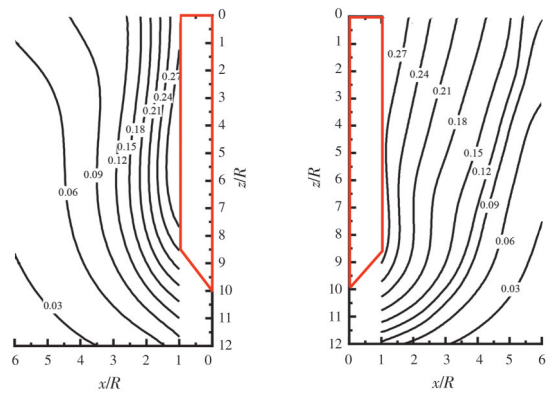
Fig. 6 Transparent soil test system

2 与单桩沉桩理论对比

2.1 与浅层应变路径法对比

群桩沉桩试验中的第 1 根桩的贯入可以看作单

桩沉桩试验,因此,可以与单桩沉桩理论对比验证。将圆形桩单桩的位移与浅层应变路径法^[24]进行对比验证。图 7 和图 8 分别给出了沉桩贯入深度 $z=10R$ 时,浅层应变路径法与透明土试验的归一化桩周土径向位移和竖向位移的等值线图。桩周土径向位移结果稍有差别,但趋势基本相同。竖向位移结果也基本相同,试验结果比理论结果略大。试验结果与理论预测值的差异可能是透明土散斑场质量不够高导致的。

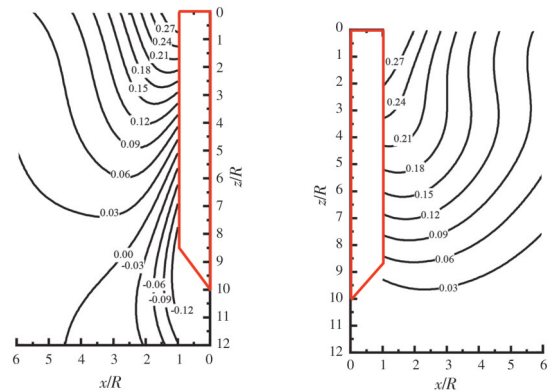


(a) 浅层应变路径法预测值

(b) 试验结果

图 7 径向位移等值线图

Fig. 7 Contour map of radial displacement



(a) 浅层应变路径法预测值

(b) 试验结果

图 8 竖向位移等值线图

Fig. 8 Contour map of vertical displacement

2.2 与圆孔扩张理论对比

由于沉桩贯入过程中,桩周围土体的变形模式一开始主要是竖向变形,随着土体深度的增加,土体的变形模式不仅有竖向变形,又有径向扩张,故选取代表性深度 $z=5R$ 处的试验径向位移与圆孔扩张理论解^[25]进行对比分析。圆孔扩张理论解采用式 (1) 计算。

$$\frac{S_{\text{mp}}}{R_{\text{eq}}} = \frac{x}{R_{\text{eq}}} - \sqrt{\left(\frac{x}{R_{\text{eq}}}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

式中: S_{tp} 为圆孔扩张理论预测径向位移值; R_{eq} 为桩的等效半径; x 为距桩中心距离。如图 9 所示, 纵坐标为土体径向位移 S_r 与桩半径 R 的归一化值, 横坐标为径向距离 x 与桩半径 R 的归一化值。可以看出在 $1.5R \sim 10R$ 范围内, 试验结果与圆孔扩张理论基本吻合, 在 $1.0R \sim 1.5R$ 范围内, 试验结果比圆孔扩张理论结果小, 这主要是由于激光在桩体附近产生反射, 使得图像处理出现误差。通过对比试验和两种理论结果可以发现试验具备较高的可靠性。

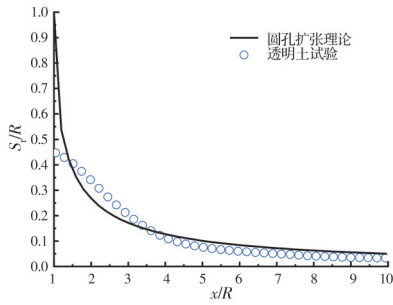


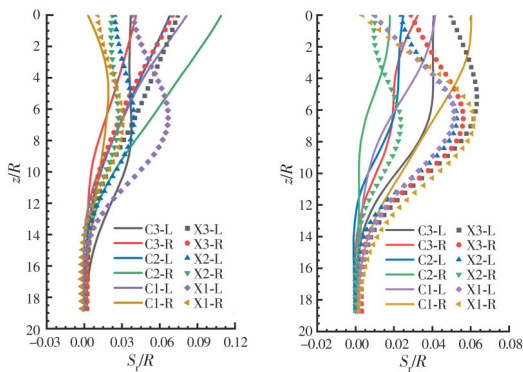
图 9 径向位移沿径向变化曲线

Fig. 9 Radial displacement variation curve along radial direction

3 试验结果分析

3.1 径向位移分析

使用 PIV View 2C 图像处理软件对试验中 CCD 相机拍摄的试验图片进行处理, 能够获取群桩贯入后桩周土体的位移场。图 10 描述了 3 根桩沉桩后桩周土位移随深度变化的情况, 横坐标为土体径向位移 S_r 与桩半径 R 的归一化值, 纵坐标为土体深度 z 与桩半径 R 的归一化值。



(a) 沉桩顺序 1

(b) 沉桩顺序 2

图 10 径向位移沿竖向变化曲线

Fig. 10 Radial displacement variation curve along vertical direction

如图 10(a) 所示, 沉桩顺序 1 为 $C1/X1 \rightarrow C2/X2 \rightarrow C3/X3$, 对于圆形桩, $C2-R$ 侧土产生的径向位移最大。对于 $C3$ 两侧土体位移, $C3-R$ 侧的径向位移随深度增加而减小, 而且由于已贯入的 $C2$ 、 $C1$ 的“遮

拦效应”, $C3-R$ 侧位移减小的幅度比 $C3-L$ 侧大。对于 XCC 桩, $X3-L$ 、 R 两侧土的径向位移也随深度增加而减小, 但 $X3-L$ 、 R 两侧土位移减小幅度相似。 $C1-L$ 侧的径向位移由于之后 $C2$ 和 $C3$ 沉桩贯入的“累积效应”比 $C1-R$ 侧的要大, 并且该效应随土体深度增加而减小。 $X3$ 两侧土的位移在土表处达到峰值, 随深度增加而减小。而 $X1$ 和 $X2$ 桩周土的位移则是随土的深度增加呈现先增大后减小的趋势, 在 $z=7R$ 处达到峰值。

如图 10(b) 所示, 沉桩顺序 2 为 $C2/X2 \rightarrow C1/X1 \rightarrow C3/X3$, 对于圆形桩, $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 三根桩两侧土的位移均随深度增加而减少。由于后两根桩 $C1$ 、 $C3$ 贯入的影响, $C2$ 两侧土的位移比 $C3$ 和 $C1$ 两侧小, 3 根桩的最大位移产生于 $C1-R$ 侧, 最小位移产生于 $C2-R$ 侧。对于 XCC 桩, $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 三根桩两侧土的位移随深度的增加呈现先增大后减小的趋势, 除 $X3-L$ 侧外均在 $z=7R$ 处达到峰值。最大位移产生于 $X3-L$ 侧, 最小位移产生于 $X1-R$ 侧。 $X3$ 两侧土位移受到已贯入的 $X2$ 、 $X1$ “遮拦效应”的作用, $X3-L$ 侧土的位移比 $X3-R$ 侧土的位移大, 且该效应随深度增加而减小; $X2$ 两侧土也有类似效应, 但是随土深度变化趋势不同, 该效应随土深度增加先增大后减小, 在 $z=7R$ 处达到峰值。

3.2 竖向位移分析

如图 11(a) 所示, 沉桩顺序 1 为 $C1/X1 \rightarrow C2/X2 \rightarrow C3/X3$, 对于圆形桩, 最大竖向位移产生于 $C3-L$ 侧, 最小位移产生于 $C2-R$ 侧。 $C3$ 两侧土位移在土体表面表达到峰值, 随土深度增加而减小, 而 $C2$ 两侧土位移则随深度增加先增大后减小, $z=6R$ 处达到峰值。 $C1-R$ 侧位移小于 $C1-L$ 侧位移, 说明 $C2$ 的贯入会增加从 $C1$ 靠近 $C2$ 桩周土的竖向位移; 对于 XCC 桩, $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 三根桩桩两侧土位移均随土深度增加先增大后减小, 在 $z=5.5R$ 处达到峰值。这可能是由于在开始的一定土体深度范围内, 桩周围土体的变形模式主要是竖向压缩变形, 随着土体深度的增加, 土体的变形模式既有竖向压缩, 又有径向扩张。

如图 11(b) 所示, 沉桩顺序 2 为 $C2/X2 \rightarrow C1/X1 \rightarrow C3/X3$, 圆形桩桩周竖向位移均大于对应 XCC 桩桩周土位移。对于圆形桩, $C2$ 、 $C3$ 桩周土竖向位移基本随土的深度增加而减少, 最大位移产生于 $C2$ 两侧, 由于 $C2$ 是第 1 根贯入的桩, 这也能证明后续桩的贯入能够增加已贯入桩周土的竖向位移。

3.3 不同沉桩顺序和不同桩型对径向位移的影响

如图 12 所示, 图例中 X、C、M1、M2 分别代表了

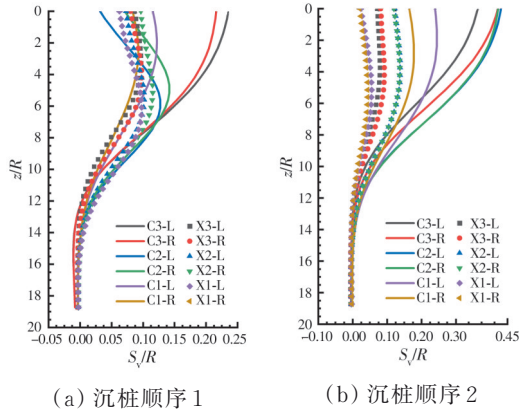


图 11 竖向位移沿竖向变化曲线

Fig. 11 Vertical displacement variation curve along vertical direction

XCC 桩、圆形桩、沉桩顺序 1、沉桩顺序 2 四种试验工况。横坐标为距离桩 2 中心径向距离与桩的等效直径 D 的归一化值, 纵坐标为土体径向位移 S_r 与桩半径 R 的归一化值, 3 根桩沉桩贯入后将土分割成了 4 个区域, 从右至左依次为区域 a、区域 b、区域 c、区域 d。由于径向位移和竖向位移会在桩中部附近达到峰值, 因此研究深度 $z=5R$ 处土的径向位移。在区域 a, 相比于沉桩顺序 1, 沉桩顺序 2 条件下的土体径向位移有所增加, 且圆形桩位移的增加比例远大于 XCC 桩。在区域 d, XCC 桩桩周土径向位移峰值点在 $x=-6D$ (D 代表等效桩直径, $D=20$ mm) 处, 圆形桩峰值点在与桩距离 $x=-7D$ 处。XCC 桩沉桩顺序 2 的径向位移依然大于沉桩顺序 1, 而圆形桩两种沉桩顺序的位移相近, 沉桩顺序 1 的径向位移大于沉桩顺序 2 的位移。在区域 b, XCC 桩桩周土的径向位移由桩 1 到桩 2 随距离逐渐减小, 到桩 2 附近略有回升, 沉桩顺序 1 的挤土位移大于沉桩顺序 2。圆形桩桩周土位移从桩 1 到桩 2 变化趋势呈波浪状, 沉桩顺序 1 的挤土位移略大于沉桩顺序 2。在区域 c, 对于 XCC 桩, 两种沉桩顺序引起的挤土位移趋势一致, 从桩 2 到桩 3 随距离先增大后减小, 沉

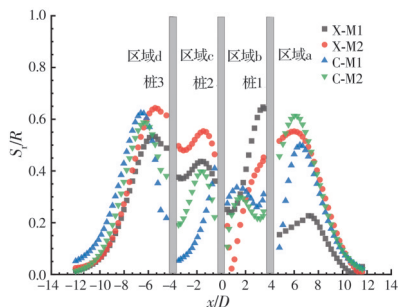


图 12 $z=5R$ 深度处, 径向位移沿径向距离变化曲线
Fig. 12 At the depth of $z=5R$, radial displacement variation curve along radial distance

桩顺序 2 的径向位移大于沉桩顺序 1 的位移。对于圆形桩, 两种沉桩顺序引起的挤土位移趋势不同, 沉桩顺序 1 从桩 2 到桩 3 随距离逐渐减小; 沉桩顺序 2 从桩 2 到桩 3 随距离先增大后减小, 在距桩距离 $x=-2D$ 处达到峰值。

4 累积效应与遮拦效应研究

4.1 累积效应

群桩累积效应是指在连续沉桩过程中, 后续桩的贯入对已贯入桩周土位移的影响。着重分析第 2 根桩贯入后和第 3 根桩贯入后对位移监测点土的位移影响, 选取桩 1 和桩 2 中间 S 点作为位移监测点, S 点位置详见图 13。

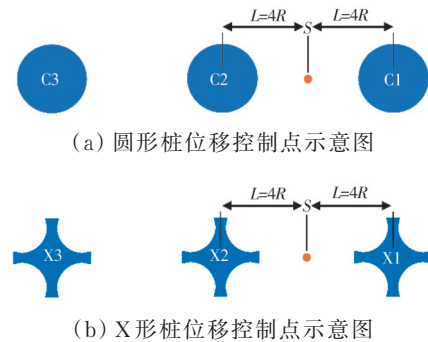


图 13 位移控制点示意图

Fig. 13 Illustration of displacement control points

4.1.1 累积效应对径向位移的影响

如图 14 所示, 横坐标为位移控制点 S 处桩 2、桩 3 贯入后的土的径向位移 S_r 与桩 1 贯入后土的径向位移 S_{r0} 的归一化值, 纵坐标为土体深度 z 与桩半径 R 的归一化值, 图例中 X2、X3、C2、C3 分别代表了 XCC 桩贯入第 2 根桩和贯入第 3 根桩以及圆形桩贯入第 2 根桩和贯入第 3 根桩, M1、M2 分别代表了沉桩顺序 1 和沉桩顺序 2。对于 XCC 桩, X2、X3 贯入后, S 点处位移基本都有一定程度的衰退, X2 贯入后, S 点处土表的径向位移减少为桩 1 贯入后的 0.6 倍左右, 然后随土体深度增加逐渐减小, 在 $z=15R$

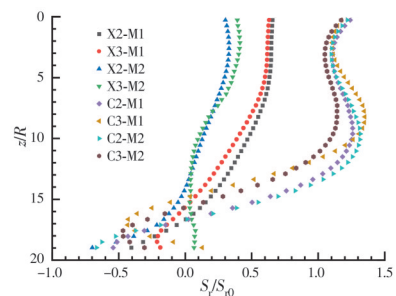


图 14 控制点 S 处归一化径向位移沿竖向变化曲线
Fig. 14 Normalized radial displacement variation curve along vertical direction at control point S

处减少至 0,然后在 15R~20R 区段,随深度增加径向位移开始反向增大,不过 15R~20R 区段的位移绝对值偏小,研究群桩贯入的累积效应主要集中于 z=0~15R 深度的径向位移变化。沉桩顺序 2 由于先贯入的中间桩,第 2 根桩贯入后 S 点处径向位移衰退程度明显大于沉桩顺序 1。对于圆形桩,C2、C3 贯入后 S 点处位移基本都有一定程度的增大,该增强作用随深度增加呈减小—增大—减小的趋势,在 z=3R 和 z=10R 处分别达到谷值和峰值。

4.1.2 累积效应对竖向位移的影响

如图 15 所示,横坐标为位移控制点 S 处桩 2、桩 3 贯入后的土的竖向位移 S_v 与桩 1 贯入后土的竖向位移 S_{v0} 的归一化值,纵坐标为土体深度 z 与桩半径 R 的归一化值。由于 15R~20R 的竖向位移偏小,因此主要研究 0~15R 间的竖向位移变化规律。对于 XCC 桩,随深度增加竖向位移增大比例有微小幅度增加,沉桩顺序 1 中土的竖向位移归一化值基本在 2~2.5 之间,X3 贯入后的竖向位移相比 X2 贯入后有所增加,但增加幅度没有 X2 贯入后明显。沉桩顺序 2 中土的竖向位移归一化值基本在 0~1.5 之间;对于圆形桩,竖向位移归一化值随深度增加呈先减小后增大的趋势,在 z=3R 处达到谷值。

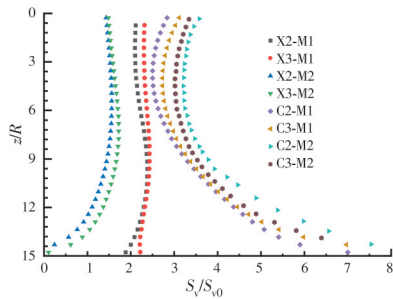


图 15 控制点 S 处归一化竖向位移沿竖向变化曲线

Fig. 15 Normalized vertical displacement variation curve along vertical direction at control point S

4.2 遮拦效应

4.2.1 群桩贯入情况下遮拦效应对径向位移的影响

如图 16 所示,横坐标为桩 1R 侧土与桩 1 的径

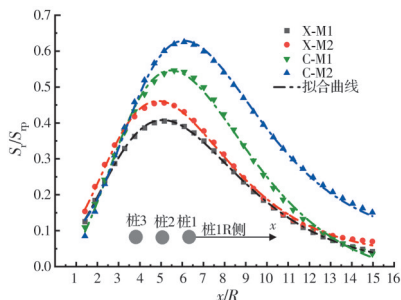


图 16 桩 1R 侧归一化径向位移沿径向变化曲线

Fig. 16 Normalized radial displacement variation curve of pile 1R along radial direction

向距离 x 和桩半径 R 的归一化值,纵坐标为群桩贯入后桩 1R 侧土的径向位移 S_r 与圆孔扩张理论计算值的径向位移 S_{rp} 的归一化值,图例中 X、C 分别代表 XCC 桩和圆形桩,M1 和 M2 分别代表沉桩顺序 1 和沉桩顺序 2。纵坐标的归一化值越小说明遮拦效应越强,圆形桩与 XCC 桩的遮拦效应随径向距离的变化趋势一致,都是先减弱后增强。XCC 桩遮拦效应“最弱点”在距 X1 中心 5R 处,而圆形桩“最弱点”后移至 6R 处,XCC 桩的遮拦效应要强于圆形桩。

4.2.2 考虑群桩贯入的遮拦效应理论预测公式

主要考虑了两种不同桩型(圆形桩和 XCC 桩)与两种不同沉桩顺序,共 4 种工况。从试验数据能够分析出群桩沉桩过程中确实有明显的遮拦效应存在。为了对遮拦效应做出定量评价,对群桩沉桩后 4 种工况的桩 1R 侧径向位移归一化值 $N=S_r/S_{rp}$ 采用 Gumbel 概率密度函数进行拟合。

$$N = a + d \times e^{-e^{-n-n+1}} \tag{2}$$

$$n = (x - b) / c$$

式中: a、b、c、d 为 N 的待定系数,即曲线拟合系数,具体的系数值见表 3。从图 16 可以看出,各拟合曲线与原数据吻合程度良好(相关系数 R^2 均 > 0.99)。从拟合结果能够看出,遮拦效应由强到弱依次为,试验工况 3、试验工况 4、试验工况 1、试验工况 2,即 XCC 桩沉桩顺序 1 > XCC 桩沉桩顺序 2 > 圆形桩沉桩顺序 1 > 圆形桩沉桩顺序 2。

表 3 描述 N 随归一化径向距离 x/R 变化的拟合公式系数
Table 3 Coefficients in the fitted formula describing N along the variation of the normalized radial distance x/R

参数	X-M1	X-M2	C-M1	C-M2
a	-0.021 2	0.284 51	-0.455 97	0.633 9
b	5.076 21	4.856 98	5.481 98	6.083 61
c	3.049 58	2.797 71	3.088 44	3.028 08
d	4.103 18	4.327 42	5.917	5.654 97

5 结论

1) 不同桩型与不同沉桩顺序对沉桩挤土效应影响有所不同。在代表性深度 z=5R 处,圆形桩和 XCC 桩第 3 根桩左侧土的径向位移呈先增大后减小的趋势,XCC 桩左侧土的径向位移会比圆形桩的先一定距离达到峰值,这个距离在 1D 左右;对于 XCC 桩,沉桩顺序 1 的土体径向位移小于沉桩顺序 2 的位移,而对于圆形桩沉桩顺序 1 的土体径向位移大于沉桩顺序 2 的位移。

2) 试验结果表明,在群桩沉桩贯入中,第 2 根桩的贯入对第 1 根桩桩周土的位移存在明显的累积效应,第 3 根桩的贯入会稍微加强该效应。XCC 桩群

桩贯入的累积效应表现为减小监测点S处的径向位移,增大监测点S处的竖向位移;圆形桩群桩贯入的累积效应表现为增大监测点S处的径向位移和竖向位移。

3)试验结果表明,群桩贯入存在明显的遮拦效应,圆形桩与XCC桩的遮拦效应随径向距离的变化趋势都是先减弱后增强,且XCC桩的遮拦效应要强于圆形桩。结合透明土试验数据,考虑了XCC桩、圆形桩两种沉桩顺序共4个工况,对第1根桩桩周土的径向位移的遮拦效应归一化值进行了经验公式的拟合,可供实际工程参考。

参考文献

- [1] 张敏霞. 现浇X形桩单桩竖向承载性状足尺模型试验与计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.
ZHANG M X. Full-scale model test and calculation method study on the bearing behavior of cast-in-situ X-section pile [D]. Nanjing: Hohai University, 2011. (in Chinese)
- [2] LV Y R, LIU H L, NG C W W, et al. Three-dimensional numerical analysis of the stress transfer mechanism of XCC piled raft foundation [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 365-377.
- [3] 吕亚茹, 刘汉龙, 王新泉, 等. 现浇X形桩产生地基附加应力的修正 Geddes 应力解[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 349-362.
LV Y R, LIU H L, WANG X Q, et al. A modified geddes's solution for foundation additional stress induced by x-section pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 349-362. (in Chinese)
- [4] 王智强. 现浇X形桩竖向承载力学特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
WANG Z Q. Study on the vertical bearing characteristics of cast-in-place X-section concrete pile [D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese)
- [5] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇X形混凝土桩与圆形桩承载性状对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1469-1476.
ZHANG M X, LIU H L, DING X M, et al. Comparative experimental study on bearing behavior of cast-in-place X-shaped concrete pile and circular pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1469-1476. (in Chinese)
- [6] 张敏霞, 丁选明, 陈育民. 现浇X形混凝土桩竖向承载特性试验及其极限承载力预测[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 267-271.
ZHANG M X, DING X M, CHEN Y M. Vertical bearing characteristics test and ultimate bearing capacity prediction of cast-in-place X-shaped concrete pile [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 267-271. (in Chinese)
- [7] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明. 加固软土路基的现浇X形混凝土桩力学特性[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 11-17.
ZHANG M X, LIU H L, DING X M. Mechanical characteristics of cast-in-place X-shaped concrete pile for strengthening soft soil subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 11-17. (in Chinese)
- [8] 雍君. 现浇X形混凝土桩抗拔性能研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.
YONG J. Study on anti-pulling property of X-section concrete pile [D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese)
- [9] 雍君, 陆晓敏, 刘汉龙. X形混凝土桩抗拔特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3430-3434.
YONG J, LU X M, LIU H L. Model test study of anti-pulling property of X-shaped concrete pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3430-3434. (in Chinese)
- [10] 金辉. 路堤荷载下现浇X形桩负摩阻力特性试验与数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2012.
JIN H. Field test and numerical analysis on negative skin friction of X-section cast-in-place pile under highway embankment [D]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese)
- [11] 刘汉龙, 金辉, 丁选明, 等. 现浇X形混凝土桩沉桩挤土效应现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(Sup2): 219-223, 228.
LIU H L, JIN H, DING X M, et al. Field test research on squeezing effects of X-section cast-in-place concrete pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup2): 219-223, 228. (in Chinese)
- [12] 张建新, 赵建军, 鹿群, 等. 静压群桩沉桩挤土效应模型试验[J]. 天津城市建设学院学报, 2010, 16(2): 85-90
ZHANG J X, ZHAO J J, LU Q, et al. Model test on squeezing effect in static pressed pile group [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2010, 16(2): 85-90 (in Chinese)
- [13] 万星, 丁建文, 黄聪, 等. 成层地基土中群桩挤土效应现场试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 1090-1096
WAN X, DING J W, HUANG C, et al. Field test research on compaction effects during installation of group piles in layered soils [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(6): 1090-1096 (in Chinese)
- [14] 刘俊伟, 尚文昌. 群桩压入挤土效应的解析计算及试验对比[J]. 中国科技论文, 2014, 9(11): 1316-1319.
LIU J W, SHANG W C. Analytical calculation and comparative test on compacting effects of jacked pile groups [J]. China Sciencepaper, 2014, 9(11): 1316-1319. (in Chinese)
- [15] 罗战友, 龚晓南, 朱向荣. 考虑施工顺序及遮拦效应的静压群桩挤土位移场研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30

- (6): 824-829
- LUO Z Y, GONG X N, ZHU X R. Soil displacements around jacked group piles based on construction sequence and compacting effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 824-829 (in Chinese)
- [16] 刘汉龙, 钟海怡, 顾鑫, 等. 平行隧道开挖引起场地沉降的透明土模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(1): 1-10
- LIU H L, ZHONG H Y, GU X, et al. Transparent soil model testing on ground settlement induced by parallel tunnels excavation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(1): 1-10 (in Chinese)
- [17] 邓泽之, 吉恩跃, 王刚. 波动水力条件下土体内侵蚀特性的透明土试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2726-2734.
- DENG Z Z, JI E Y, WANG G. Experimental study on internal erosion behaviors under fluctuating hydraulic condition using transparent soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2726-2734. (in Chinese)
- [18] 卢谅, 何兵, 肖亮, 等. 基于透明土的成层土中CPT贯入试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2215-2224.
- LU L, HE B, XIAO L, et al. Experimental study of CPT penetration in layered soil based on transparent soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2215-2224.(in Chinese)
- [19] ZHOU H, LIU H L, RANDOLPH M F, et al. Experimental and analytical study of X-section cast-in-place concrete pile installation effect [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2017, 17(2): 103-121.
- [20] XIAO Y, YIN F, LIU H L, et al. Model tests on soil movement during the installation of piles in transparent granular soil [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(4): 06016027.
- [21] 宗梓煦, 郑鹏, 邓泽田, 等. 仿生牙根桩承载性能透明土模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2023, 45(4): 19-28.
- ZONG Z X, ZHENG P, DENG Z T, et al. Bearing capacity characteristics of bionic teeth root pile based on transparent soil model testing technique [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(4): 19-28. (in Chinese)
- [22] 袁炳祥, 李志杰, 陈伟杰, 等. 基于PIV技术与分形理论的桩-土系统水平循环受荷模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 466-482.
- YUAN B X, LI Z J, CHEN W J, et al. Experimental study on lateral cyclic loading model of pile-soil system based on PIV technique and fractal theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 466-482.(in Chinese)
- [23] 杨晓峰, 李伟, 姚兆明. 基于PIV技术的冲刷条件下桩-土水平变形机制[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 102-108.
- YANG X F, LI W, YAO Z M. PIV-based research on horizontal deformation mechanism of pile-soil under scour condition [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 102-108. (in Chinese)
- [24] SAGASETA C, WHITTLE A J, SANTAGATA M. Deformation analysis of shallow penetration in clay [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(10): 687-719.
- [25] ZHOU H, SHEIL B, LIU H L. Noncircular cavity expansion in undrained soil: Semi-analytical solution [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2022, 148(7): 04022032.

(编辑 胡玲)