

DOI: 10.11779/CJGE201805021

XCC 群桩限制液化侧向扩展的振动台试验研究

李文闻^{1, 2}, 陈育民^{*1, 2}, 刘汉龙^{1, 2, 3}, 杨耀辉^{1, 2}, 张鑫磊^{1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

3. 重庆大学土木工程学院, 重庆, 400045)

摘要: 地震作用下, 缓倾砂土地基会发生液化引发侧向扩展, 对构筑物造成严重破坏, 而可液化场地中的群桩可控制液化侧向变形的发展。现浇 X 形混凝土桩 (XCC 桩) 较传统混凝土桩可以节省材料用量, 其异形截面对液化土体的流动变形的控制作用较圆形截面更具优势。开展了倾斜可液化地基中 XCC 群桩的振动台试验研究, 对比了 XCC 群桩和圆桩群桩对液化侧向扩展变形的影响, 同时考虑了群桩布置形式、XCC 桩的截面朝向和截面异形效应对处理效果的影响。结果表明: XCC 桩可以较好的限制液化侧向扩展, 与未处理场地相比, XCC 桩处理场地的侧向位移减少约 38%, 流动面积减小约 50%; 在同等材料用量下, XCC 桩处理效果优于传统圆桩, 其流动面积较圆桩处理场地减少 20%; 梅花形群桩布置形式限制液化侧向扩展的效果明显好于正方形群桩布置形式; 不同 XCC 桩的截面朝向的处理效果取决于其垂直于液化砂土流动方向的截面宽度, 有效截面宽度越大则处理效果越好; XCC 桩的截面异形效应能够提高限制液化侧向扩展效果约 5%~18% 左右。

关键词: 振动台试验; XCC 桩; 液化; 侧向变形; 流动面积; 场地加固

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)05-0945-08

作者简介: 李文闻 (1991-), 男, 博士研究生, 主要从事地震液化方面的研究。E-mail: lwwgeo@hotmail.com。

Shaking table tests on efficiency of improvement of X-section piles against lateral spreading

LI Wen-wen^{1, 2}, CHEN Yu-min^{*1, 2}, LIU Han-long^{1, 2, 3}, YANG Yao-hui^{1, 2}, ZHANG Xin-lei^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Lateral spreading often occurs in liquefiable sloping ground during earthquake, which causes severe damage to the nearby constructions. Installing piles into sloping ground has been proven to be effective in reducing the lateral displacement. The X-section cast-in-place concrete pile (XCC pile) can save material usage compared with the conventional circular pile. Besides, its special section shape has better effect in restraining the lateral flow of liquefied sand than circular section. A series of 1g shaking table tests are conducted to verify the efficiency of improvement of XCC piles against liquefaction-induced lateral flow. The mitigation efficiencies of XCC piles and circular pile are compared. Besides, the effects of pile arrangement pattern, orientation of X-section and special section are taken into consideration. The results suggest that the XCC pile can restrict the lateral displacement of liquefied sand, compared with the unimproved case, and the lateral displacement and flow area in XCC pile-improved case are reduced by 38% and 50%, respectively. With the same material usage, the mitigation efficiency of XCC piles is obviously higher than that of circular pile and the flow area is reduced by 20%. The triangular pile arrangement pattern is more effective in restricting the lateral spreading than square pile arrangement pattern. The mitigation efficiency of different orientations of XCC piles depends on the effective section length perpendicular to the direction of lateral flows. The special section effect of XCC piles can increase the mitigation effect by 5%~18%.

Key words: shaking table test; XCC pile; liquefaction; lateral displacement; flow area; ground improvement

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51379067, 51679072, 51420105013); 教育部创新团队发展计划 (IRT_15R17); 高等学校学科创新引智计划 (B13024); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2015B17314)

收稿日期: 2017-02-23

***通讯作者** (E-mail: ymchenhhu@163.com)

0 引言

液化侧向扩展现象可以定义为地震过程中可液化

土体受到地震等动荷载作用, 孔压积累后发生液化, 继而引发场地产生有限的侧向位移。液化侧向扩展常发生于缓倾场地和码头岸壁后侧的回填区域。大量震害调查表明, 饱和砂土液化引发的地面侧向扩展是造成强震区各种基础设施和生命线工程等震害的主要原因^[1-3]。

处理液化场地的工程加固措施主要包括压实、注浆、排水、振动挤密、爆炸挤密、挤密砂桩和深层搅拌等。这些传统的场地加固方法的主要目的是为了防止超孔压的积累, 即阻止液化现象的发生。采用上述传统措施处理液化侧向扩展现象可以取得较为理想的处理效果, 但其耗费的金钱和时间都甚巨。随着岩土抗震工程中基于性态抗震设计理念的发展, 允许液化现象的产生, 但减小液化现象引发的震害被认为是一种更加经济的处理方法^[4-5]。

国内外学者针对限制液化侧向扩展问题开展了一些试验研究。Yasuda 等^[6]通过振动台试验研究了几种抗液化侧向扩展的工程措施, 包括砂桩挤密, 钢筋排桩, 连续带加密, 地下连续墙。其中钢筋排桩处理措施可以一定程度的减小土体的侧向位移, 且由于其较低的土体置换率, 所需费用较低, 是一种较为经济的处理措施。Iai^[7]总结了港口结构的抗液化侧向扩展的工程措施, 并给出了这些工程措施的实际应用案例和在大地震中的抗震表现。Motamed 等^[4]通过振动台试验研究了布置新桩对于既有群桩和码头挡墙受到液化侧向扩展时的防护作用。Takahashi 等^[5]通过离心机振动台模型试验研究了群桩及其布置形式对于限制液化侧向扩展的作用, 结果表明群桩可以一定程度减小液化侧向位移。此外, 在场地中布置桩体限制液化侧向变形的工况与构筑物地基中的群桩受到液化侧向扩展作用的工况十分相似。国内外学者已经针对液化地基中的桩土相互作用问题开展了众多研究, 包括离心机试验^[8-13]、振动台试验^[14-17]和大型原位试验^[18-20], 也提出了液化场地中桩土相互作用计算与设计方法^[21-23]。但是, 既有研究重点考虑的是液化地基中桩的响应和性质, 且主要针对的是圆形截面桩, 而对于液化土体的流动性质和异形截面桩的相关研究还是十分有限, 并且群桩限制液化侧向扩展的机理还有待进一步揭示。

现浇 X 形混凝土桩 (以下简称 XCC 桩) 为刘汉龙等开发的新型异形截面桩^[24], 其特殊的“X”型截面使得 XCC 桩比等混凝土用量的侧表面积大, 从而提高桩基承载力^[25-28]。本文开展了一系列倾斜场地液化侧向扩展的振动台试验, 分别采用 XCC 群桩和圆形群桩对液化场地进行处理, 研究了 XCC 桩对于限制液化侧向扩展的作用, 并考虑了了群桩布置形式、

桩间距、X 形截面朝向等因素对于其限制液化侧向扩展效果的影响。

1 试验原理和设备

试验利用重庆大学 ANCO 土工振动台完成。振动台的台面尺寸为 1.2 m×1.2 m, 可以在水平和垂直方向同时激振。振动台的最大加速度为 2g, 最大振动频率为 50 Hz, 最大载重量为 1000 kg。试验所使用的模型箱为刚性模型箱, 其尺寸为 0.95 m×0.85 m×0.6 m。

对于 1g 振动台缩尺模型试验, 试验的结果和响应很大程度上取决于试验所用材料性质和尺寸。本文采用了由 Iai 等^[29]提出的 1g 振动台相似律, 其主要参数如表 1 所示。本文选取的相似比尺为 1:20 ($n=20$)。

表 1 1g 振动台试验相似律

Table 1 Similitude laws for 1g shaking table tests		
参数	模型	原型
长度	1/n	1
密度	1	1
位移	1/n	1
频率	1/n ^{0.5}	1
加速度	1	1
抗弯刚度	1/n ⁵	1

2 振动台模型试验

2.1 试验方案

振动台试验模型布置如图 1 所示。缓倾砂土地由底部 50 mm 厚的非液化土层和上部 250~370 mm 的液化砂土层组成。考虑到模型箱水平尺寸相对较小, 为了减小边界效应的影响并使液化侧向扩展现象更加明显, 缓倾砂土地下坡处靠近模型箱边界的部分坡度为 1/3, 其余部分的坡度均为 1/8。模型场地底部非液化层通过人工空中砂雨法制备, 并压实至 75% 相对密实度, 然后慢速加水进行饱和。上部的缓倾液化砂土层通过水中砂雨法制备, 并控制落距使其相对密实度大致为 40%。

考虑到模型箱宽度, 在模型场地中左右两侧分别布置了圆形截面桩和 XCC 桩以限制液化侧向扩展, 可以在同一次振动中完成两个实验工况, 且便于比较两种桩型的处理效果。所有模型桩的底部都插入 10 mm 厚度的开孔板中进行固定, 而桩顶可以自由运动。

2.2 试验工况

试验工况汇总见表 2。本次试验进行了 6 次振动, 共 12 组试验工况, 可分为无桩场地工况、圆桩加固场地工况和 XCC 桩加固场地工况 3 类。为了全面比较两种桩型之间的差异, 试验中使用了 2 种不同直径的

表 2 试验工况表

Table 2 Summary of test cases

工况	桩型	群桩布置形式	桩径 D/mm	桩间距/ mm	X 截面朝向
UN	—	—	—	—	—
CS3D	C 桩	正方形	24	90	—
CT3D	C 桩	梅花形	24	90	—
#CS2D	#C 桩	正方形	30	60	—
#CS3D	#C 桩	正方形	30	90	—
#CT2D	#C 桩	梅花形	30	60	—
#CT3D	#C 桩	梅花形	30	90	—
XS2D	X 桩	正方形	30	60	X
XS3D	X 桩	正方形	30	90	X
XT3D	X 桩	梅花形	30	90	X
X*S2D	X 桩	正方形	30	60	X*
X*S3D	X 桩	正方形	30	90	X*
X*T2D	X 桩	梅花形	30	60	X*

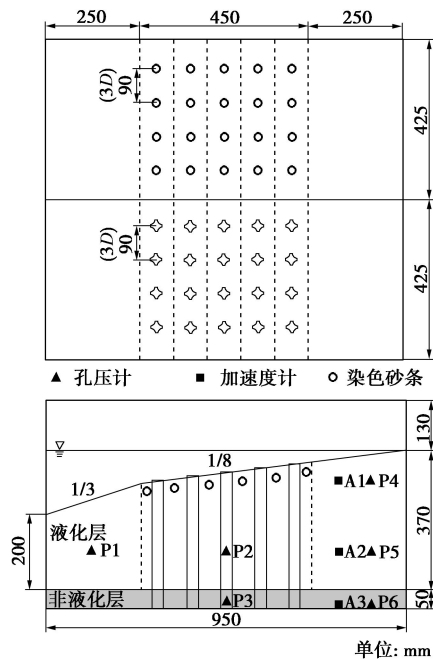


图 1 试验模型布置图

Fig. 1 Schematic view of physical model

圆桩，第一种横截面积与 XCC 桩相等，第二种的直径与 XCC 桩的外包直径 a 相等。为叙述方便，下文将第一种圆桩成为 C 桩，将第二种圆桩成为 #C 桩。本文考虑的影响因素包括群桩布置形式、桩间距以及 X 形截面布置形式。如图 2 所示，试验中采用了两种群桩布置形式：正方形布置和梅花形布置。试验中考虑了两种桩间距：两倍桩径 ($2D$) 和三倍桩径 ($3D$)。试验中考虑的两种 X 形截面朝向如图 3 所示，为叙述方便，第一种称为 X* 布置，第二种称为 X 布置。

本次试验采用的输入波为峰值加速度为 $0.2g$ ，频率为 5 Hz 持续时间为 10 s 的正弦波。振动台激振方向平行于缓倾砂土地坡度方向，即模型箱长轴方向。

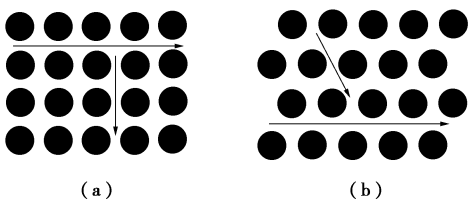


图 2 群桩布置形式

Fig. 2 Pile group arrangement patterns

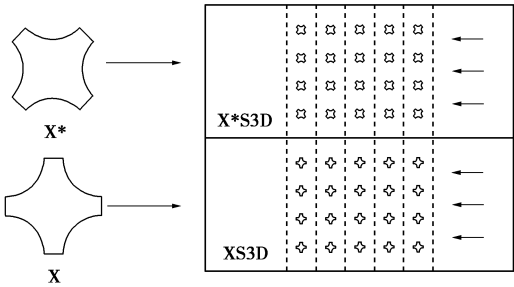


图 3 X 截面朝向示意图

Fig. 3 Different orientations of X-section piles

2.3 试验材料

试验砂土选用 #7 硅砂，平均粒径 d_{50} 为 0.017 mm ，不均匀系数为 2.11 ，土粒比重为 2.64 ，最大干密度为 1.65 g/cm^3 ，最小干密度为 1.34 g/cm^3 。其级配曲线如图 4 所示，与国际上常用的易液化砂土丰浦砂相似。

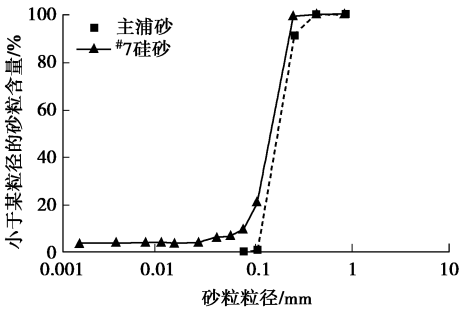


图 4 #7 硅砂级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution of silica sand No. 7

试验所用模型桩均由 PVC 材料经 3D 打印制成, 其弹性模量为 2.5 GPa。XCC 桩实体与截面示意图如图 5 所示, 其截面参数 a 取值为 30 mm, b 取值为 6 mm, 开弧角度 θ 为 90° , 与其相对的原型桩尺寸 a 为 600 mm, b 为 120 mm。C 桩的内径为 22 mm, 外径为 24 mm, #C 桩的内径为 28 mm, 外径为 30 mm。模型桩的高度范围为 338~383 mm。

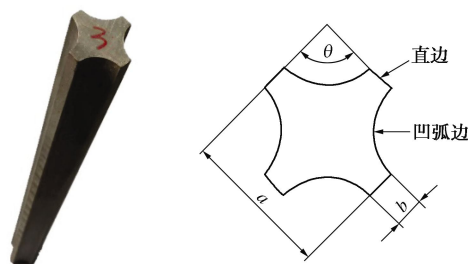


图 5 XCC 桩实体与截面示意图

Fig. 5 Cross section of X-section pile

2.4 传感器布置

模型场地中加速度传感器和孔压传感器的埋设位置如图 1 所示。在模型场地底部、中部和上部区域分别布置了加速度传感器以监测土体水平加速度响应。在模型场地中桩加固区域及其两侧都设置了孔压传感器以监测土体孔压变化。在模型桩桩身表面布置了 5 对应变片以获得桩身弯矩。

除了传感器之外, 在群桩加固区域的液化砂土层表面间隔布置了染色砂土条, 如图 6 所示。通过高清摄影仪记录染色砂土条在振动前后位置, 经过图像处理后可以很方便地获得液化砂土的侧向位移量。



图 6 染色砂条位置图

Fig. 6 Colored sand bars embedded in the slope

3 试验结果

本节详细讨论未处理场地工况 (UN)、圆桩处理场地工况 (CS3D) 和 XCC 桩处理场地 (XS3D) 的

试验结果, 以验证 XCC 桩限制液化侧向扩展的有效性和经济性。CS3D 和 XS3D 工况下, 圆桩与 XCC 桩的横截面积相等, 且布置形式均为正方形布置, 桩间距均为三倍桩间距。

3.1 孔压与加速度响应

首先, 为了确保场地达到液化状态, 图 7 给出了 XCC 桩处理场地的孔压响应时程曲线。未处理场地和圆桩处理场地的结果均与 XCC 桩处理场地结果相似, 因此文中不再列出。由图可见, 在液化土层中, 土体孔压在振动前期迅速积累上升, 超孔比在 1.8 s 左右达到 1.0 并一直持续到振动结束。这说明液化土体已经达到完全液化状态。底部非液化层中超孔压比只达到了 0.5 左右, 没有进入液化状态。

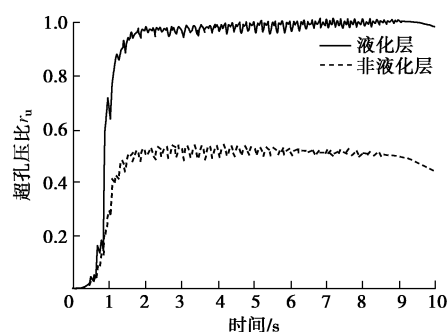


图 7 XCC 桩处理加固场地孔压响应

Fig. 7 Time histories of excess pore pressure ratios

XCC 桩处理场地的加速度时程曲线如图 8 所示。加速度响应可分为两个阶段: 阶段 1 (0~1.8 s) 中土体还未达到液化状态, 此时土体加速度峰值逐渐增大; 阶段 2 (1.8~10 s) 液化层土体完全液化, 因此不同深度土体的加速度峰值都发生了急剧衰减, 并且越靠近地表, 土体加速度峰值衰减幅度越大, 此现象符合地震液化的一般规律。

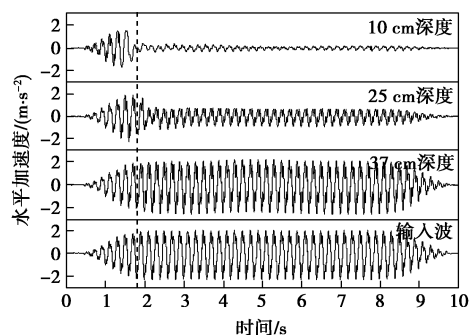


图 8 XCC 桩处理加固场地水平加速度响应

Fig. 8 Time histories of horizontal accelerations

3.2 侧向位移

如前文所述, 试验准备阶段在群桩加固段的场地表层间隔埋设了染色砂土条以监测土体侧向位移。图

像处理获得的场地侧向位移场如图 9 所示, 图中虚线表示染色砂土条振动前的位置, 图中实线表示染色砂土条振动后的位置。由图易见, 未处理场地工况 (UN) 的土体侧向位移最大, 圆桩处理场地工况 (CS3D) 次之, XCC 桩处理场地工况最小。总体来看, 群桩处理场地的侧向位移相对于未处理场地发生了明显的减小, 此结果验证了群桩对于限制液化侧向扩展现象的有效性。

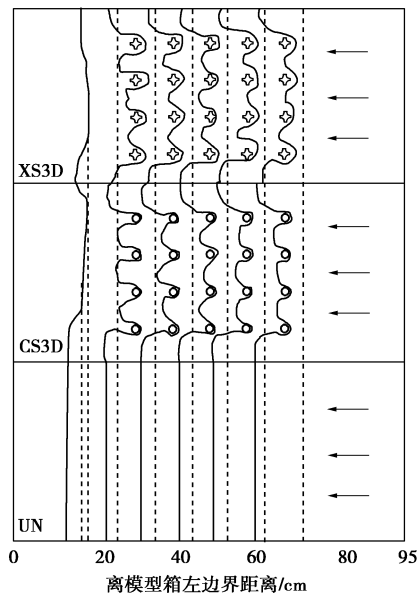


图 9 场地侧向位移图

Fig. 9 Lateral displacements of slope

场地中间断面的土体侧向位移如图 10 所示, 与未处理场地工况相比, 圆桩和 XCC 桩处理场地工况的侧向位移都大幅减少。与圆桩处理场地工况相比, XCC 桩处理场地工况的平均侧向位移减小了约 20%。试验结果证明在同等材料用量的条件下, XCC 桩的处理效果好于传统的圆桩。

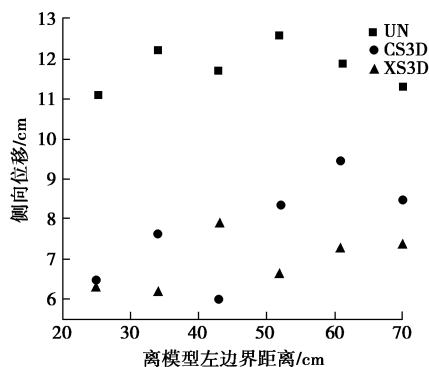


图 10 场地中间断面侧向位移

Fig. 10 Lateral displacements measured at middle cross section

3.3 流动面积

由图 7 可见, 圆桩处理场地中土体的变形线紧邻

圆桩, 而 XCC 桩的桩周的变形线与其保持一定距离。此现象说明 XCC 桩对于桩周土体流动的限制效果明显好于传统圆桩。为了考虑这种效应并进一步对比 XCC 桩和圆桩的处理效果, 统计了液化砂土的流动面积。流动面积的概念示意图见图 11。图中虚线代表染色砂土条边界在振动前的位置, 实线代表染色砂土条边界在振动后的位置, 因此图中相邻虚线和实线之间的阴影区域面积即为液化砂土在振动过程中流经的面积投影。每块染色砂土条的流动面积由其两条边界的流动面积取平均值得到。

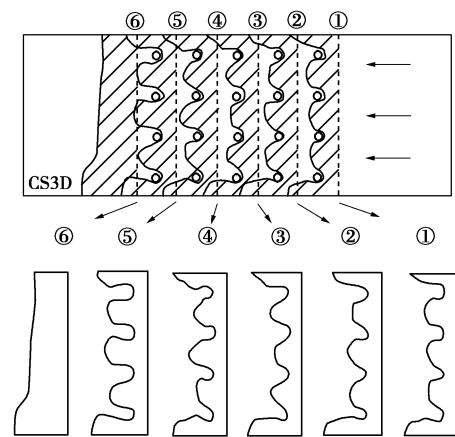


图 11 流动面积示意图

Fig. 11 Concept of flow area

未处理场地、圆桩和 XCC 桩处理场地工况的流动面积统计如图 12。由图可知, 未处理场地工况的平均流动面积约为 426 cm^2 , 且每条染色砂土条的流动面积均大致相等。圆桩处理场地工况的平均流动面积为 255 cm^2 , 与未处理场地工况相比减少 40.1%; XCC 桩场地工况的平均流动面积为 210 cm^2 , 与未处理场地工况相比减少 50%, 与圆桩处理场地工况相比减少约 17.8%。由此可见, 在同等材料用量的情况下, XCC 桩限制液化侧向扩展的效果明显好于传统圆桩。此现象可以从两方面进行解释: ①对于等截面积的 XCC 桩和圆桩来说, XCC 桩的外包直径 a 大于圆桩的直径, 因此在垂直液化流动方向 XCC 桩的有效控制宽度大于圆桩; ②XCC 桩的异形截面对于液化砂土流动的扰动作用较圆桩更为显著, 能多消耗液化砂土流动的能量并降低其流速。

4 影响因素分析

为了进一步研究 XCC 桩限制液化侧向扩展的效果, 考虑了不同群桩布置形式、X 形截面朝向和 X 形截面异性效应对处理效果的影响。为简便考虑, 取液化砂土的流动面积作为衡量处理效果的关键参数。

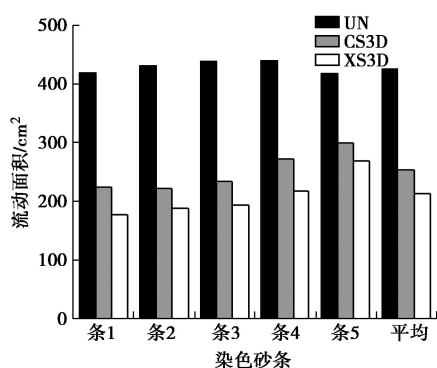


图 12 流动面积统计

Fig. 12 Summary of flow area

4.1 群桩布置形式影响

本节通过讨论工况 X*S2D 和 X*T2D 的试验结果来研究群桩布置形式对于处理效果的影响。X*S2D 工况采用的是正方形布置, X*T2D 工况采用的是梅花形布置。两个工况的侧向位移如图 13 所示。由图易见, 采用梅花形布置的工况的侧向位移明显小于采用正方形布置的工况, 此现象对于前 3 组染色砂条来说尤为明显。以第 1 条染色砂土为例, 正方形布置场地的侧向位移为 6.5 cm, 而梅花形布置场地的侧向位移仅为 1.8 cm。两个工况的流动面积对比如图 14 所示。对于前 3 条染色砂条来说, 梅花形布置工况的流动面积相对于正方形布置工况的流动面积减少了 50% 以上; 从平均流动面积来看, 梅花形布置工况较正方形布置工况减少了约 20% 左右。振动台试验结果证明群桩布置形式对于 XCC 桩限制液化侧向变形的效果有重要影响, 且梅花形布置方案显著优于正方形布置方案。梅花形布置相对正方形布置的优势在于其错列布置使得下游桩可以填补上游桩之间的空隙, 使得上游桩桩间土在高速流动下撞击下游桩, 增大液化土流动的能量损耗, 降低液化土流动速度, 最终减小液化土的侧向位移。

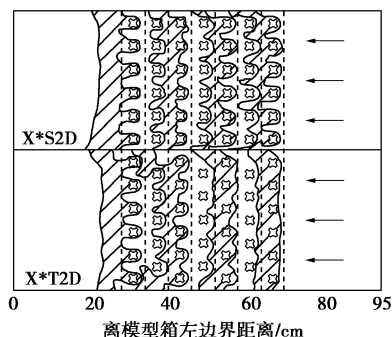


图 13 X*S3D 和 X*T2D 工况场地侧向位移

Fig. 13 Lateral displacements of cases X*S3D and X*T2D

4.2 X 形截面朝向影响

本节通过讨论工况 XS2D 和 X*S2D 的试验结果来研究 X 形截面朝向对于处理效果的影响。除 X 形截面

朝向不同外, 两个工况其他布置完全相同。两个工况的流动面积对比如图 15 所示。由图可见, X*S2D 工况染色砂土条的流动面积均小于对应的 XS2D 工况, 且其平均值较 XS2D 工况减少了约 23%。由此可见不同的 X 形截面朝向对于 XCC 桩限制液化侧向变形的效果有重要影响。

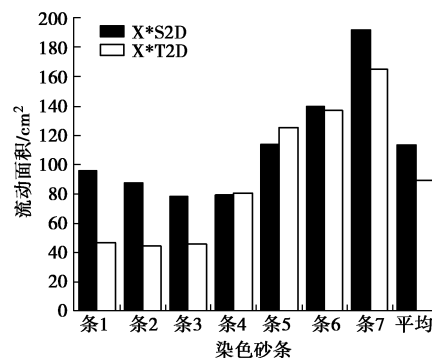


图 14 X*S3D 和 X*T2D 工况流动面积

Fig. 14 Flow areas of cases X*S3D and X*T2D

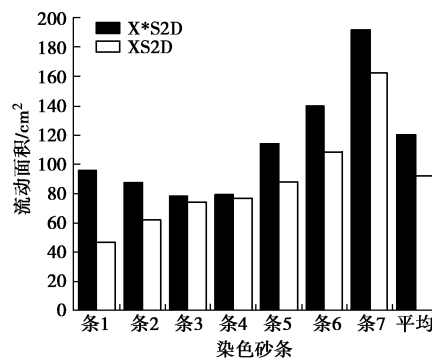


图 15 X*S2D 和 XS2D 工况流动面积

Fig. 15 Flow areas of cases X*S3D and XS2D

此现象可以由有效截面宽度的概念来解释。有效宽度可以定义为桩横截面上垂直液化砂土流动方向的最大宽度, 如图 16 所示。X 截面朝向垂直于液化砂土流动方向的最大宽度为 30 mm, 而 X*截面朝向垂直于液化砂土流动方向的最大宽度仅为 25.46 mm, 由此可知 X 截面朝向能够限制液化侧向扩展的有效截面宽度大于 X*截面朝向。此外, 由于两者的桩心距离一样, 因此 X 截面朝向工况的两桩之间的距离也小于 X*截面朝向工况。因此 XS2D 工况的流动面积明显小于 X*S2D 工况。

4.3 X 形截面异形效应影响

如前文所述, 在同等横截面积条件下, XCC 桩可以较传统圆桩取得更好的限制液化侧向扩展效果, 但两者的区别中包含有效截面宽度的影响, 无法单独阐释 XCC 桩异形截面效应的对于液化流动的限制作用。因此本节对比了工况 CS3D 和 XS3D 的试验结果以研究 X 形截面异形效应对于处理效果的影响。在工况 CS3D 和 XS3D 中, 两者垂直于液化砂土流动方向的最大截面宽度相等, 均为 30 mm, 因此可以排除有效

截面宽度的影响, 两者限制液化侧向扩展的效果主要取决于截面形状。两个工况的流动面积对比如图 17 所示。除条 5 外, XCC 桩处理场地的流动面积均小于圆桩处理场地, 且其平均流动面积较圆桩处理场地减小约 5%。由此可见, 当桩间距较大时, X 形桩截面异形效应对限制液化砂土流动有一定作用, 但影响不明显。但当桩间距减小至两倍桩径时, XCC 桩处理场地流动面积较圆桩处理场地减小约 18%, 此时 XCC 桩异形截面效应的影响表现地较为明显。

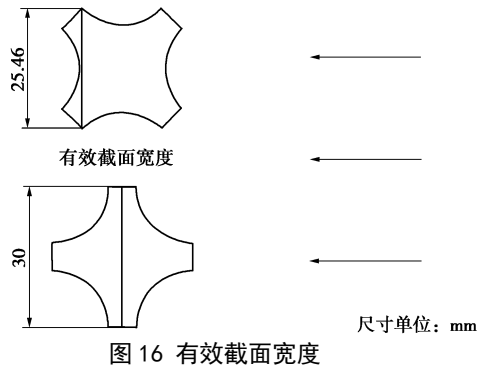


图 16 有效截面宽度

Fig. 16 Concept of effective cross-section length

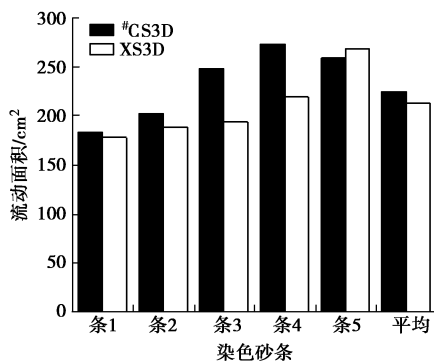


图 17 #CS3D 和 XS3D 工况流动面积

Fig. 17 Flow areas of cases #CS3D and XS3D

5 结 论

本文开展振动台模型试验研究了 XCC 桩限制液化侧向流动变形的作用, 通过间隔埋设的染色砂土条获得了不同处理方案场地的液化侧向位移, 验证了 XCC 桩限制液化侧向变形的有效性和经济性, 并考虑了群桩布置形式、X 形截面朝向等因素对其处理效果的影响。本文主要结论如下:

(1) 振动台试验结果表明 XCC 桩可以显著地减小液化砂土的侧向位移和流动面积, 其减小的百分比分别为 38% 和 50%。通过减小桩间距可以获得更好的限制效果。

(2) 在同等材料用量情况下, XCC 桩限制液化侧向扩展的效果好于传统圆桩, 其提升的处理效果可以达到 18% 左右。

(3) 在同等条件下, 梅花形群桩布置限制液化

侧向扩展的效果显著好于正方形布置, 其在减小流动面积上的提升效果约为 20%。

(4) X 形截面朝向对于限制液化侧向扩展效果有重要影响, 试验结果表明有效宽度大的截面朝向限制液化侧向扩展效果更好。

(5) X 形截面异形效应对液化砂土侧向流动有一定扰动作用, 当桩间距较小时, 此效应表现尤为明显。

参考文献:

- [1] HAMADA M, TOWHATA I, YASUDA S, et al. Study on permanent ground displacement induced by seismic liquefaction[J]. Computers and Geotechnics, 1987, 4(4): 197 - 220.
- [2] 刘 颖. 砂土震动液化[M]. 北京: 地震出版社, 1984. (LIU Ying. Liquefaction of sands induced by earthquake shaking[M]. Beijing: Seismology Press, 1984. (in Chinese))
- [3] 中国赴日地震考察团. 日本阪神大地震考察[M]. 北京: 地震出版社, 1995. (Chinese Inspection Delegation for Kobe. Earthquake. Kobe earthquake damage inspection of Japan[M]. Beijing: Seismological Press, 1995. (in Chinese))
- [4] MOTAMED R, TOWHATA I. Mitigation measures for pile groups behind quay walls subjected to lateral flow of liquefied soil: Shake table model tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 2010, 30(10): 1043 - 1060.
- [5] TAKAHASHI H Ñ, TAKAHASHI N, MORIKAWA Y Ñ, et al. Efficacy of pile-type improvement against lateral flow of liquefied ground[J]. Géotechnique, 2016, 66(8): 617 - 626.
- [6] YASUDA S, NAGASE H, KIKU H. Appropriate countermeasures against permanent ground displacement due to liquefaction[C]// 10th World Conference on Earthquake Engineering Madrid, 1992: 1471 - 1476.
- [7] IAI S. Remediation of liquefiable soils for port structures in japan—analysis, design and performance[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(S1): 77 - 103.
- [8] ARMSTRONG R J, BOULANGER R W, BEATY M H. Equivalent static analysis of piled bridge abutments affected by earthquake-induced liquefaction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(8): 4014046.
- [9] GONZÁLEZ L, ABDOUN T, DOBRY R. Effect of soil permeability on centrifuge modeling of pile response to lateral spreading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(1): 62 - 73.
- [10] BOULANGER B R W, CURRAS C J, MEMBER S, et al.

- Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, **125**(9): 750 - 759.
- [11] ABDOUN T, DOBRY R, O'ROURKE T D, et al. Pile response to lateral spreads: centrifuge modeling[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(10): 869 - 878.
- [12] BRANDENBERG S J, BOULANGER R W, KUTTER B L, et al. Behavior of pile foundations in laterally spreading ground during centrifuge tests[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(11): 1378 - 1391.
- [13] 黄雨, 八嶋厚, 张锋. 液化场地桩-土-结构动力相互作用的有限元分析[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(6): 646 - 651. (HUANG Yu, YASHIMA A, ZHANG Feng. Finite element analysis of pile-soil-structure dynamic interaction in liquefiable site[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(6): 646 - 651. (in Chinese))
- [14] 凌贤长, 王东升, 王志强, 等. 液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2004, **37**(11): 67 - 72. (LING Xian-zhang, WANG Dong-shen, WANG Zhi-qiang, et al. Large-scale shaking table model test of dynamic soil-pile-bridge structure interaction in ground of liquefaction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, **37**(11): 67 - 72. (in Chinese))
- [15] HAMADA M. Performances of foundations against liquefaction-induced permanent ground displacements[C]// *Proceedings of the 12th World Conference on earthquake engineering*. Auckland, 2000: 1 - 8.
- [16] YASUDA S, ISHIHARA K, MORIMOTO I, et al. Large-scale shaking table tests on pile foundations in liquefied ground[C]// *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland. 2000: 1 - 8.
- [17] MOTAMED R, TOWHATA I, HONDA T, et al. Pile group response to liquefaction-induced lateral spreading: E-Defense large shake table test[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, **51**: 35 - 46.
- [18] ASHFORD S, JUIRNARONGRIT T, SUGANO T, et al. Soil-pile response to blast-induced lateral spreading I: field test[J]. *Journal of Geotechnical*, 2006, **132**(2): 152 - 162.
- [19] WEAVER T J, ASHFORD S A, ROLLINS K M. Response of 0.6 m cast-in-steel-shell pile in liquefied soil under lateral loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(1): 94 - 102.
- [20] ROLLINS K M, GERBER T M, LANE J D, et al. Lateral resistance of a full-scale pile group in liquefied sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(1): 115 - 125.
- [21] MADABHUSHI G, KNAPPETT J, HAIGH S. Design of pile foundations in liquefiable soils[M]. London: UK: Imperial College Press, 2009.
- [22] BOULANGER R, KUTTER B, BRANDENBERG S. Pile foundations in liquefied and laterally spreading ground during earthquakes: centrifuge experiments & analyses[R]. Davis: University of California Davis, 2003.
- [23] BRANDENBERG S J, BOULANGER R W, KUTTER B, et al. Static pushover analyses of pile groups in liquefied and laterally spreading ground in centrifuge tests[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(9): 1055 - 1066.
- [24] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 型混凝土桩截面几何特性研究[J]. *中国铁道科学*, 2009, **30**(1): 17 - 23. (LIU Han-long, LIU Zhi-ping, WANG Xin-quan. Analysis on section geometry character of X style vibro-pile[J]. *China Railway Science*, 2009, **30**(1): 17 - 23. (in Chinese))
- [25] 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**(2): 219 - 223, 228. (LIU Han-long, JIN Hui, DING Xuan-ming, et al. Field test research on squeezing effects of X-section cast-in-place concrete pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(S2): 219 - 223, 228. (in Chinese))
- [26] 刘汉龙, 吕亚茹, 丁选明, 等. 现浇 X 形桩复合地基桩侧摩阻力分布特性[J]. *中国公路学报*, 2012, **25**(6): 17 - 23. (LIU Han-long, LU Ya-ru, DING Xuan-ming et al. Behavior of side friction of X-section cast-in-place concrete pile composite foundation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, **25**(6): 17 - 23. (in Chinese))
- [27] 刘汉龙, 孙广超, 孔纲强, 等. 无砟轨道 X 形桩-筏复合地基土压力分布规律试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(11): 1933 - 1940. (LIU Han-long, SUN Guang-chao, KONG Gang-qiang, et al. Model tests on distribution law of dynamical soil pressure of ballastless track XCC pile-raft composite foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(11): 1933 - 1940. (in Chinese))
- [28] 王智强, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 现浇 X 形桩竖向承载特性足尺模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(6): 903 - 907. (WANG Zhi-qiang, LIU Han-long, ZHANG Min-xia, et al. Full scale model tests on vertical bearing characteristics of cast-in-place X-section piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(6): 903 - 907. (in Chinese))
- [29] IAI S. Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field[J]. *Soils and Foundations*, 1989, **29**(1): 105 - 118.