

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.002

排水刚性桩处置可液化倾斜场地的 振动台试验研究*

陈志雄^{1,2,3}, 潘小东^{1,2,3}, 陈育民^{4,5}, 杨鹏^{1,2,3}, 陈强^{1,2,3},
吴琪^{1,2,3}, 黄浩^{1,2,3}

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 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; 5. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要: 排水刚性桩将竖向排水体和刚性桩相结合, 是一种有效的地基抗液化处理措施。但目前对排水刚性桩在可液化倾斜场地中抗液化侧向变形的性能研究还比较缺乏, 制约了其推广与应用。通过振动台试验, 开展了可液化倾斜场地中排水刚性桩和普通刚性桩的对比研究, 从土体内部动孔压响应、液化土体的流动性质、桩顶水平位移等角度研究了排水刚性桩对可液化倾斜场地的处理效果, 并考虑了群桩布置形式的影响。结果表明, 排水刚性桩是一种有效的加固可液化倾斜场地的处理措施, 可以较好的限制液化土体侧向变形; 相同群桩布置形式下, 排水刚性桩限制土体流动变形效果优于普通刚性桩, 且这种限制效果在坡顶位置更为明显; 对于普通刚性桩, 群桩梅花形布置形式相对于正方形布置形式能更好的阻止液化土体的流动变形, 而对于排水刚性桩, 群桩布置形式影响较小。

关键词: 排水刚性桩; 振动台试验; 液化; 可液化倾斜场地; 侧向变形

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0012-09

Research on Efficacy of Rigid-drainage Pile Improvement on Liquefiable Sloping Ground by Shaking Table Tests

CHEN Zhixiong^{1,2,3}, PAN Xiaodong^{1,2,3}, CHEN Yumin^{4,5}, YANG Peng^{1,2,3},
CHEN Qiang^{1,2,3}, WU Qi^{1,2,3}, HUANG Hao^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 2. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Rigid-drainage pile is an effective anti-liquefaction treatment measure for foundations,

* 收稿日期:2018-11-18;修回日期:2018-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51778092,51879090)、重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室开放课题“排水刚性桩处治可液化地基的模型试验研究”(2017)资助

作者简介:陈志雄(1980—),男,副教授,博导。主要从事土动力学与工程减灾研究。E-mail:chenzhixiong@cqu.edu.cn

通讯作者:潘小东(1991—),女,硕士研究生。主要从事岩土工程方面研究。E-mail:20161602026@cqu.edu.cn

which combines the bearing capacity of rigid pile and the drain-ability of gravel pile. At present, however, there is still a lack of research on the performance of rigid-drainage pile reducing lateral displacement of liquefied sand, which limits its popularization and application. To investigate the efficacy of rigid-drainage pile improvement on liquefiable sloping ground, the response of excess pore water pressure, flow properties of liquefied sand, and lateral permanent displacement of the pile head were measured based on shaking table tests. The results were compared with those of ordinary pile tests, and the effect of pile arrangement patterns was considered. The results indicate that: the rigid-drainage pile is an effective treatment measure to reinforce liquefiable sloping ground, which can better restrict liquefaction-induced lateral flow. With the same pile arrangement pattern, the rigid-drainage pile has better effect in restraining the flow and deformation of liquefied sand than the ordinary pile, and this effect is more obvious at the slope crest. For ordinary piles, the triangular pile arrangement pattern is more effective in restricting lateral flow than the square pile arrangement pattern, but the difference is not obvious for rigid-drainage piles.

Keywords: rigid-drainage pile; shaking table test; liquefaction; liquefiable sloping ground; lateral displacement

引言

近年来频发的地震不仅严重威胁着人们的生命财产安全,还造成了基础设施和生命线工程的严重破坏^[1]。大量震害表明,地震灾害大部分是由饱和砂土液化引起的,其中,饱和砂土液化诱发的地面侧向位移是最为普遍且具有强大破坏性的液化破坏形式^[2]。这种破坏形式在有一定坡度的砂土地基中最常见。因此,如何治理饱和砂土地震液化问题一直是岩土地震工程领域的重要研究方向^[3]。

排水刚性桩是由刘汉龙等^[4-5]提出的将竖向排水体和刚性桩相结合的一种新桩型(图1)。它克服了碎石桩^[6-7]和挤密砂桩^[8-9]这两种抗液化性能已得到充分肯定的柔性桩承载力不足的问题。陈育民等^[10]通过小型振动台试验和数值模拟对排水刚性桩的抗液化性能进行了研究,结果表明排水刚性桩能够有效的防止砂土液化,降低砂土液化的可能。王翔鹰等^[11]开展了排水刚性桩和普通桩的沉桩对比现场试验,分析了沉桩过程中桩周土体孔压增长

和消散的规律。杨耀辉等^[12]通过振动台试验对排水刚性桩单桩的抗液化效果进行研究,结果表明排水刚性桩是一种有效的抗液化措施。但是,现有研究都只能说明排水刚性桩处置水平可液化场地的有效性,而对于更具有普遍性的倾斜可液化场地,这种地震后会发生液化侧向变形的情况,排水刚性桩的效用还有待深入研究。

对于倾斜场地的液化侧向变形问题,国内外学者通过振动台试验^[13-15]、离心机试验^[16-18]等开展了许多研究,提出了钢筋排桩、地下连续墙、XCC群桩等多种抗液化侧向变形的措施。在前人研究的基础上,基于振动台模型试验,将排水刚性桩和普通刚性桩进行对比,从土体内部动孔压响应、液化土体的流动性质、桩顶水平位移等角度,对排水刚性桩处理可液化倾斜场地的效用进行研究,并考虑了群桩布置形式的影响。

1 试验介绍

1.1 试验设备与相似关系

本次试验为振动台试验,台面尺寸为1.2 m×1.2 m,最大载重为1 000 kg,可在水平与竖直两个方向同时振动,加速度最大可达0.2g,频率最大可达50 Hz。其上模型箱为叠梁式模型箱,尺寸为0.95 m×0.85 m×0.6 m。根据宋二祥等^[19]的研究表明,这种叠梁式模型箱,可以减小边界效应的影响,对自由场地的变形能够进行较好的模拟。

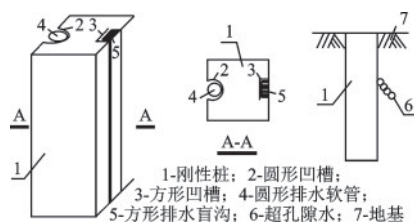


图1 排水刚性桩技术示意

Fig.1 Sketch of liquefaction resistance rigid-drainage pile

试验模型的尺寸及材料性质对试验的结果和响应有很大影响,考虑到模型箱的尺寸,本次试验采用1:20的几何相似比尺,质量密度相似比为1:1,桩的弹性模量相似比为1:1,其余主要参数的相似比可基于 Buckingham π 定理采用量纲分析方法^[20]计算得到,见表1。

表1 振动台模型试验相似比
Table 1 Similitude of shaking table tests

物理量	相似比
几何尺寸	1:20
质量密度	1:1
弹性模量	1:1
位移	1:20
振动频率	1:0.224
重力加速度	1:1

1.2 试验材料与模型制备

本次试验所用砂土为7[#]硅砂,其基本物理参数详见表2,其颗粒级配与广泛应用于液化问题研究的丰浦砂接近,两者级配曲线如图2所示。

表2 7[#]硅砂物理参数
Table 2 Properties of 7[#] silica sand

颗粒比重	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最小干密度/ (g·cm ⁻³)	不均匀系数	平均粒径/ mm
2.64	1.65	1.34	2.11	0.13

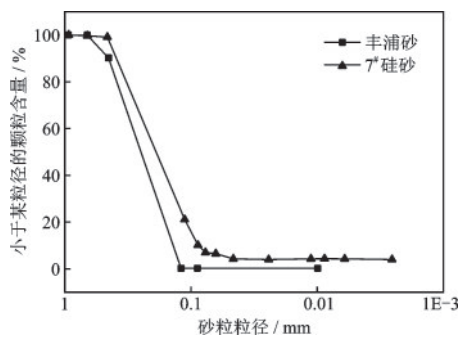


图2 7[#]硅砂与丰浦砂级配曲线

Fig.2 Grain size distributions of 7[#] silica sand and Toyoura sand

试验所用模型桩是由1:2的水泥砂浆浇筑而成,截面尺寸为4 cm×4 cm,桩长40 cm,分为普通刚性桩和排水刚性桩,排水刚性桩相较于普通刚性桩在桩侧增加了一条方形的排水槽,并在排水槽内

放置了用土工布包裹的排水板,形成竖向排水体,如图3所示。

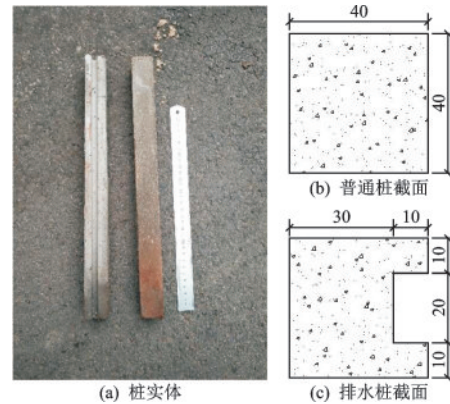


图3 桩实体与截面示意

Fig.3 Cross section of the pile

本次振动台试验模型具体布置如图4所示。模型箱底部放入10 cm厚的开孔板,并将模型桩的底端插入开孔板中进行固定,桩顶可以自由移动。然后通过空中砂雨法制备模型场地底部厚度为50 mm的非液化土层,压实使其相对密实度达到75%左右,随后加水将干砂层慢慢浸润至饱和。模型场地上部可液化砂土层厚度为200~376 mm,采用水中砂雨法进行制备,注意控制砂土的下落高度及模型箱内液面与砂土表面的距离,保证试样均匀制备,使其相对密实度达到45%左右。倾斜砂土地坡度为1/8,考虑模型箱尺寸的局限性,为降低边界效应影响,同时能够更加明显的观测到砂土液化变形现象,在距离坡顶675 mm的位置将坡度变大为1/3。

孔压传感器及土压力盒分别布置在模型场地中不同埋深处,以监测土体在振动过程中的孔压变化,具体布置位置如图4所示。同时,利用特制钢架,并将其底部固定于振动台面,在其横梁上固定位移传感器以监测桩顶端水平位移。在液化砂土层的表面,群桩加固区域,间隔嵌入5 cm厚的染色砂条,以获取振动后液化砂土的侧向位移和流动面积,染色砂条位置如图5所示。

1.3 试验工况

本次试验进行了两次振动,共有四组试验工况,见表3。在模型场地中左右对称布置了排水刚性桩和普通刚性桩,通过一次振动完成两种试验工况,便于对两种桩型处理效果进行比较。在一次振

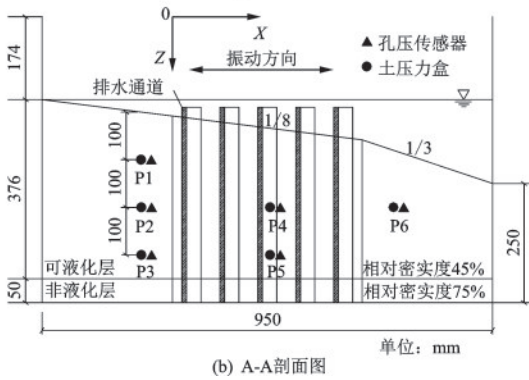
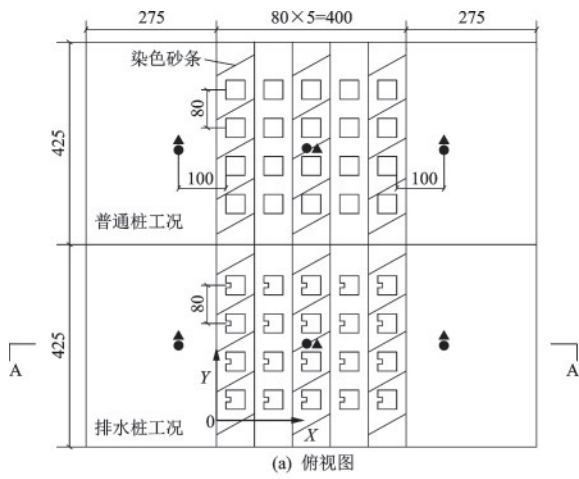


图4 模型布置示意

Fig.4 General view of the model test

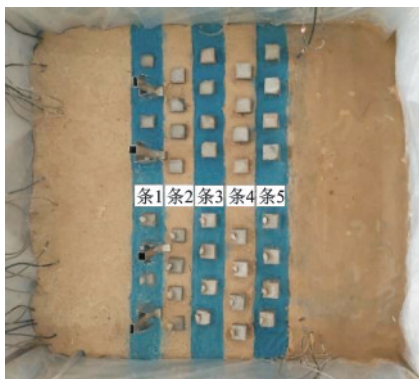


图5 染色砂条位置

Fig.5 Colored sand bars embedded in the slope

动中群桩布置形式保持相同,都为正方形布置,或者都为梅花形布置,群桩布置形式如图6所示,水平

和垂直向桩间距均为8 cm。本次试验的动力输入情况详见表3,振动台水平振动方向与模型箱长轴方向(砂土地倾斜方向)一致。

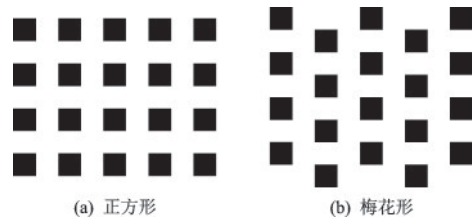


图6 群桩布置形式

Fig.6 Pile group arrangement patterns

2 试验结果与分析

2.1 超孔压比

群桩正方形布置场地超孔压比时程曲线如图7所示(监测点位置如图4所示),梅花形布置形式的结果与正方形布置结果相似。从图7中可以看出可液化层已基本达液化状态,各测点排水刚性桩和普通刚性桩的超孔压比时程曲线发展规律基本一致。在垂直方向,随着埋深的增加,超孔压比的峰值在减小,验证了砂土埋深越深越难液化。同一位置处排水刚性桩的超孔压比峰值总是略低于普通刚性桩,且孔压消散较普通刚性桩快,最终的超孔压比也是稍低于普通刚性桩。可见在整个振动过程中,由于排水刚性桩的排水作用,加快了土中超孔压的消散,导致同一位置超孔压比低于普通刚性桩,从而抑制土体液化,更好的限制了场地的侧向变形。超孔压比的对比证明了在群桩布置形式相同的条件下,排水刚性桩对于可液化倾斜场地的处理效果好于普通刚性桩。

2.2 侧向位移

试验制备过程中为了监测振动后液化土体的侧向位移设置了染色砂条。经图像处理得到图8

表3 试验工况布置

Table 3 List of the test conditions

工况类别	桩型	群桩布置形式	加载波形	加速度幅值/g	振动持时/s	振动频率/Hz
1	普通桩	正方形	正弦波	0.2	10	5
2	排水桩	正方形	正弦波	0.2	10	5
3	普通桩	梅花形	正弦波	0.2	10	5
4	排水桩	梅花形	正弦波	0.2	10	5

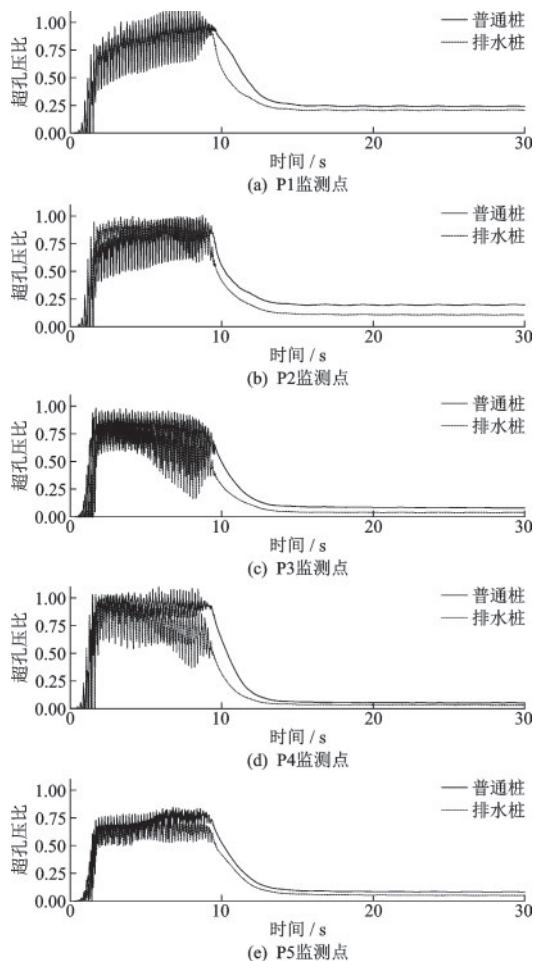


图7 超孔压比时程曲线

Fig.7 Time histories of excess pore pressure ratio

所示的场地侧向位移,图中直线表示振动前染色砂条的边界位置,图中曲线表示振动后染色砂条的边界位置。由图8可得,群桩布置形式相同时,排水桩工况土体的侧向位移明显小于普通桩工况;而对于同一种桩型,梅花形布置的场地土体侧向位移小于正方形布置的场地。

用每一砂土条左侧边界侧移的平均值定义场地在该处的侧向平均位移,则各工况下砂土条边界侧向平均位移如图9所示。由图9中(a)、(b)可以得出,群桩布置形式相同时,排水桩工况的侧向平均位移相对于普通桩工况有明显减小,减小比例约为30%;排水桩对坡顶的水平侧向位移有更好的抑制作用,而对于坡脚位置,变形与普通桩基本接近。由图9中(c)、(d)可以得出,对于同一种桩型,梅花形布置的场地侧向位移相对于正方形布置减小约40%,即梅花形布置形式更有利于控制液化侧向变形。

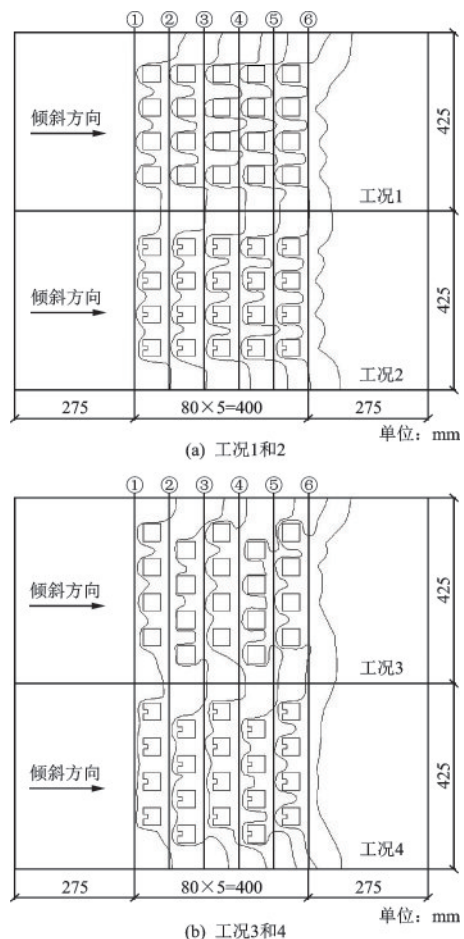


图8 场地侧向位移

Fig.8 Lateral displacements of the slope

2.3 流动面积

用每块染色砂条两侧边界的流经面积平均值定义该砂条的流动面积。振动过程中砂土条每条边界流经的面积投影示意如图10所示。

各工况砂土条流动面积如图11所示(砂土条编号如图5所示)。在群桩正方形布置的条件下,由图11中(a)易见排水桩工况的流动面积明显少于普通桩工况,此现象在前两条砂土条较为突出,减少30%以上;从平均流动面积看,排水桩工况比普通桩工况减少约20%。在群桩梅花形布置条件下,由图11中(b)可见排水桩工况的流动面积也少于普通桩工况,对于平均流动面积,排水桩工况比普通桩工况减少约15%。结合上文中群桩相同布置形式下排水桩工况和普通桩工况的侧向位移对比,可以证明群桩相同布置形式下排水刚性桩限制液化侧向变形的效果优于普通刚性桩。这主要是由于振

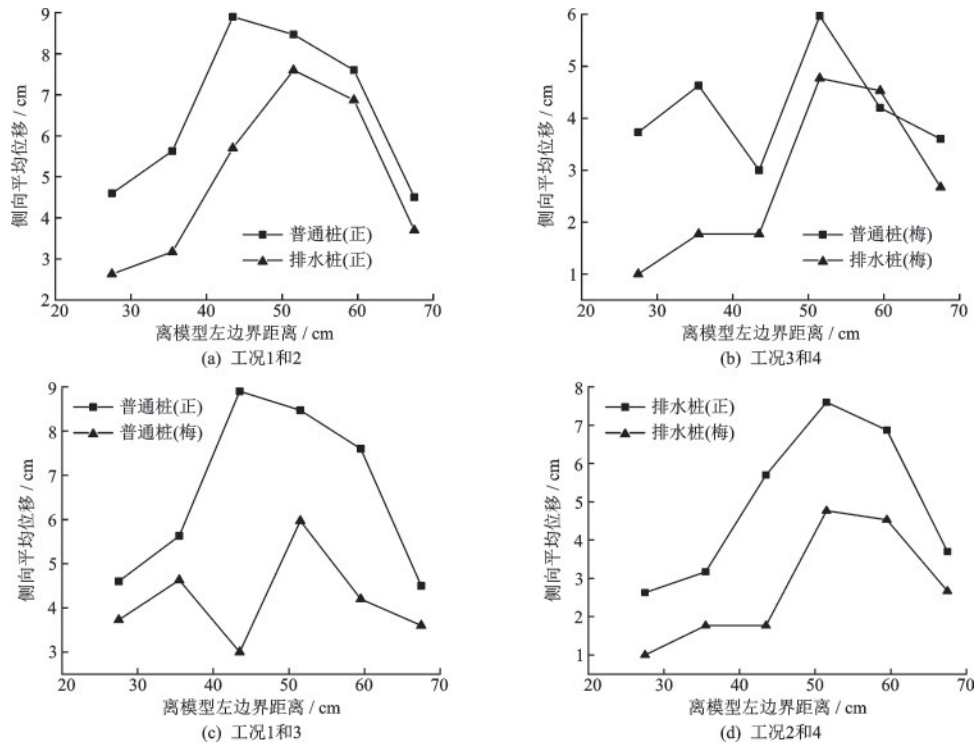


图9 场地平均侧向位移

Fig.9 Mean lateral displacements of the slope

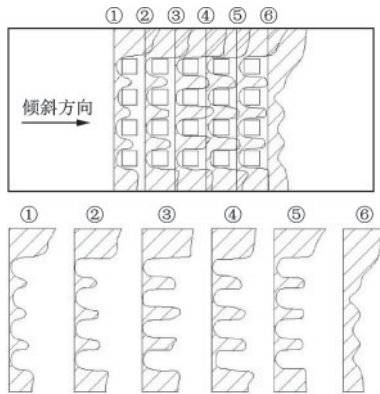


图10 流动面积示意

Fig.10 Illustration of the flow area

动过程中排水体的排水效果,加快了超孔压的消散,对砂土的液化起到一定的抑制作用,使得砂土侧向流动受到限制。

对于同一种桩型,群桩布置形式不同时,由图11中(c)、(d)都可以看出梅花形布置工况的流动面积要小于正方形布置工况,这也与前文中侧向位移的对比结果一致,证明了相同桩型,群桩梅花形布置工况的处理效果好于正方形布置工况。这主要是由于梅花形布置时,群桩错列排布,相互补位,液化砂土从桩间流过时会撞击下一排的桩,损耗能量,降低流速,最终相对于正方形布置形式更加减

小了液化砂土的流动。从平均流动面积看,对于普通刚性桩,梅花形布置工况比正方形布置工况减少约14%;而对于排水刚性桩则只减少约7%,可见在排水桩工况中群桩布置形式对流动面积的影响并没有在普通桩工况中明显。

2.4 坡面高度

试验振动之后,除了可以观察到染色砂条的流动,还可以观察到砂土沉降,坡面变缓,群桩布置区域坡面相对隆起的现象,特别是排水桩布置区域坡面高于普通桩布置区域。为了更好的描述这一现象,在每组试验振动结束之后,采集坡面相对模型箱顶的高度数据,绘制群桩布置区域的坡面三维图(坐标轴位置见图4)。从图12~13可以看出,在群桩布置形式相同的条件下,排水桩侧的坡面要高于普通桩侧,这也验证了前文所述排水刚性桩相对于普通刚性桩能够更好的限制液化土体的流动变形。对比图12~13可以看出,图12中坡面的整体坡度要缓于图13,即相对于振动前的1/8坡度,振动后图13所示的坡面为变形相对较小的坡面。换言之,无论何种桩型,群桩的梅花形布置形式对于限制坡的变形优于正方形布置形式。

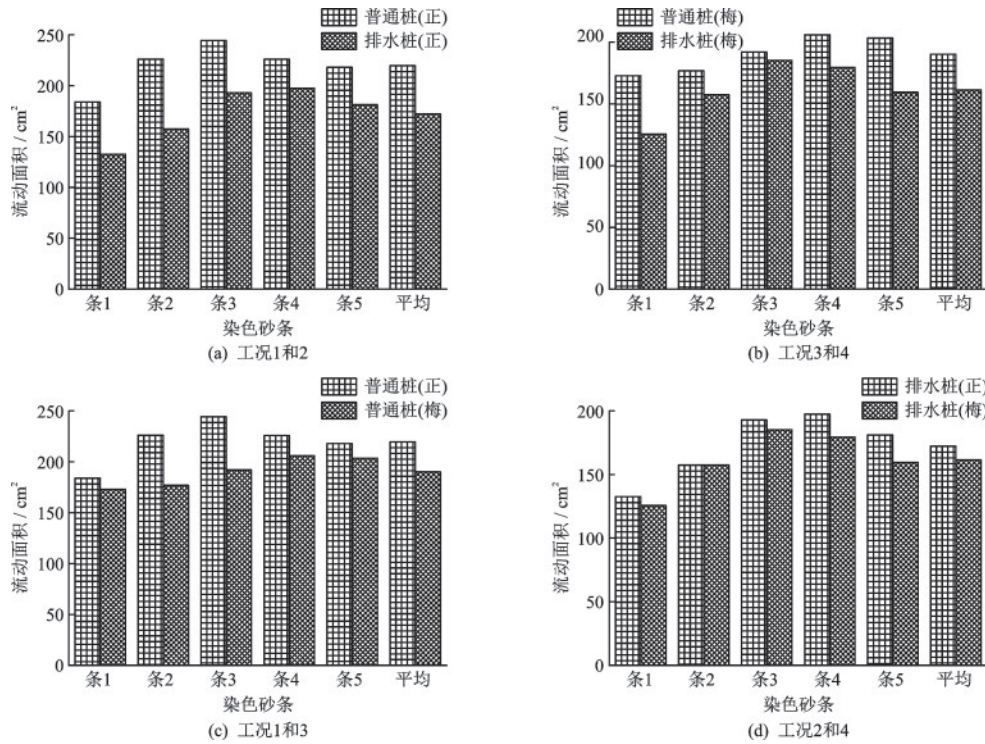


图11 流动面积对比

Fig.11 Comparisons of flow areas

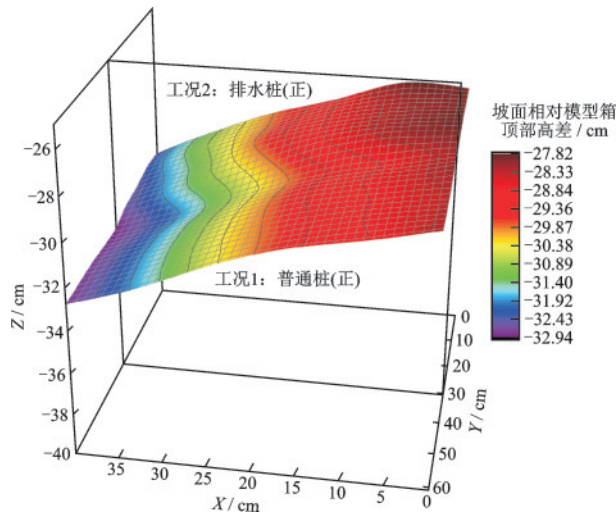


图12 工况1和2坡面对比

Fig.12 Slope comparisons between Case 1 and Case 2

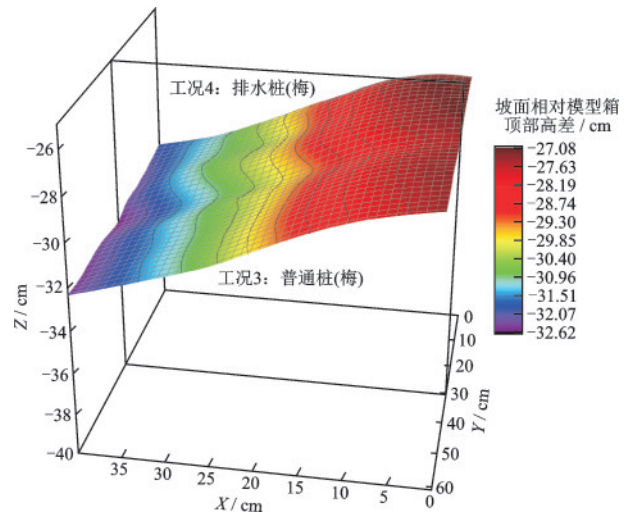


图13 工况3和4坡面对比

Fig.13 Slope comparisons between Case 3 and Case 4

为了更好的验证上述分析,对采集的坡面高度数据进行平均化处理,并选取了振动前坡度为1/8的范围(即距模型左边界距离0~67.5 cm)内数据绘制了各工况振动后相对模型箱底的平均坡面高度曲线图,如图14所示。从图中可以看出振动后各工况坡面高度均有下降,坡度明显变缓;对比各工况坡面曲线的走势和相对位置也可得出和上述图12~13三维坡面图中一致的结论。同时,可以得到

群桩正方形布置情况下,排水桩坡面平均坡度为0.070,相对振动前的坡度1/8变缓了44.0%,而普通桩坡面平均坡度为0.065,相对振动前的坡度1/8变缓了48.0%;群桩梅花形布置情况下,排水桩坡面平均坡度为0.086,相对振动前的坡度1/8变缓了31.2%,而普通桩坡面平均坡度为0.083,相对振动前的坡度1/8变缓了33.6%。这些数据进一步说明相同群桩布置形式下排水桩对限制坡的变形效果

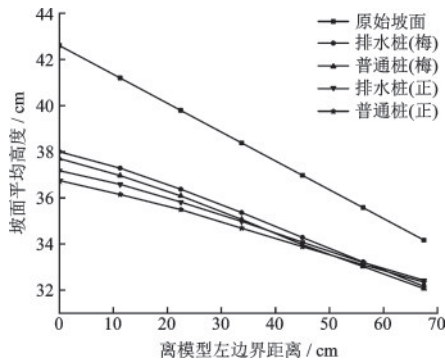


图 14 坡面平均高度曲线

Fig.14 Average height curves of the slope

更好,这种效果在群桩正方形布置形式中更为明显;同时,对于同一种桩型,群桩梅花形布置相对于正方形布置对坡面变形的阻碍效果更好。

2.5 桩端位移

群桩正方形布置形式下桩顶水平位移时程曲线如图 15 所示,梅花形布置形式的结果与正方形布置结果相似。图中可以看出普通刚性桩桩顶水平永久位移约为 1.2 cm,排水刚性桩桩顶水平永久位移只有普通刚性桩的一半,约为 0.6 cm。振动过程中,桩体也在有规律的来回振荡,排水刚性桩的振荡幅度约为 0.4 cm,普通刚性桩约为 0.6 cm,排水刚性桩的振荡幅度明显小于普通刚性桩。这是由于开始加载后,土体内超孔压迅速累积,砂土发生液化,导致桩周土体对桩的约束变弱,桩身开始震荡摆动,而排水刚性桩因为排水通道的作用相对于普通桩能加快超孔隙水的排出,有利于超孔压的消散,使得桩周土体能够维持一定的强度,从而减小桩-土之间的相对位移。这也证明了排水刚性桩的排水作用对液化侧向变形有一定的限制能力,对可液化倾斜场地的加固有一定的效果。

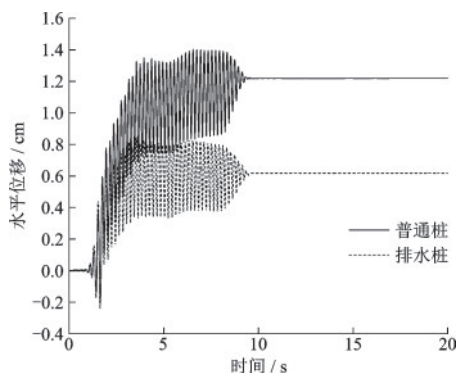


图 15 桩顶水平位移时程曲线

Fig.15 Time histories of lateral displacements

3 结 论

通过振动台模型试验,研究了排水刚性桩对可液化倾斜场地的处理效果,通过与普通刚性桩的对比试验,验证了排水刚性桩限制液化侧向变形的有效性,并分析了群桩布置形式对处理效果的影响。主要结论如下:

(1)排水刚性桩是一种有效的加固可液化倾斜场地的处理措施。相对于普通刚性桩,排水刚性桩的排水通道可以加快液化砂土中水的排出,使超孔压较快消散,从而更好的限制土体流动变形。

(2)相对于普通刚性桩,排水刚性桩可以显著地减小液化砂土的侧向位移和流动面积,分别减小了 30% 和 20%,且对倾斜场地坡顶位置的水平侧向扩展有更好的抑制作用。

(3)在同一种桩型条件下,群桩梅花形布置形式限制液化侧向变形的效果比正方形布置形式要好,对于侧向位移减少了 40%,对于流动面积的减小在排水桩工况中作用并不明显。

参考文献:

- [1] Yamamuro J A, Lade P V. Steady-state concepts and static liquefaction of silty sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 1998, 124(9): 868-877.
- [2] 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.
- [3] 郑刚,龚晓楠,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2):127-146.
Zheng G, Gong X N, Xie Y L, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146. (in Chinese)
- [4] 刘汉龙.一种抗液化排水刚性桩:中国,ZL 200520076660.4[P]. 2007-02-28.
Liu H L. A kind of rigid drainage pile of mitigation of liquefaction; China, ZL200520076660.4[P].2007-02-28. (in Chinese)
- [5] Liu H L, Chen Y M, Zhao N. Development technology of rigidity-drain pile and numerical analysis of its anti-liquefaction characteristics[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(Sup 2): 101-107.

- [6] Adalier K, Elgamal A. Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns[J]. *Engineering Geology*, 2004, 72(3/4): 275-291.
- [7] Sadrekarimi A, Ghalandarzadeh A. Evaluation of gravel drains and compacted sand piles in mitigating liquefaction[J]. *Ground Improvement*, 2005, 9(3): 91-104.
- [8] Krishna A M, Madhav M R, Latha G M. Liquefaction mitigation of ground treated with granular piles: densification effect[J]. *ISE Journal of Earthquake*, 2006, 43(473): 105-120.
- [9] Tsukamoto Y, Ishihara K, Yamamoto M, et al. Soil densification due to static sand pile installation for liquefaction remediation[J]. *Soils and Foundations*, 2000, 40(2): 9-20.
- [10] 陈育民,刘汉龙,赵楠. 抗液化刚性排水桩振动台试验的数值模拟研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(12): 114-119.
Chen Y M, Liu H L, Zhao N. Laboratory test on anti-liquefaction characteristics of rigidity-drain pile[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(12): 114-119. (in Chinese)
- [11] 王翔鹰,刘汉龙,江强,等. 抗液化排水刚性桩沉桩过程中的孔压响应[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(4): 645-651.
Wang X Y, Liu H L, Jiang Q, et al. Field tests on the response of excess pore water pressures of the liquefaction resistance rigid-drainage pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(4): 645-651. (in Chinese)
- [12] 杨耀辉,陈育民,刘汉龙,等. 排水刚性桩单桩抗液化性能的振动台试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(2): 287-295.
Yang Y H, Chen Y M, Liu H L, et al. Shaking table tests on liquefaction resistance performance of single rigid-drainage pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(2): 287-295. (in Chinese)
- [13] Yasuda S, Nagase H, Kiku H. Appropriate countermeasures against permanent ground displacement due to liquefaction [C]//Tenth World Conference on Earthquake Engineering. Madrid: Eos Transactions American Geophysical Union, 1992: 1471-1476.
- [14] 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.
- [15] Li W W, Chen Y M, Armin W. Stuedlein, et al. Performance of X-shaped and circular pile-improved ground subject to liquefaction-induced lateral spreading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 109: 273-281.
- [16] 阿塔卡哈希 H, 塔卡哈希 N, 阿莫里卡瓦 Y, et al. Efficacy of pile-type improvement against lateral flow of liquefied ground [J]. *Geotechnique*, 2016, 66(8): 617-626.
- [17] 刘靖雯. 倾斜砂土地浅埋管道隆起(上浮)离心模型试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
Liu J W. Centrifuge modeling on uplift behavior of shallow buried pipe in inclined sand[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [18] 汪明武, Tobita T, Iai S. 倾斜液化场地桩基地震响应离心机试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10): 2012-2017.
Wang M W, Tobita T, Iai S. Dynamic centrifuge tests of seismic responses of pile foundations in inclined liquefiable soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2012-2017. (in Chinese)
- [19] 宋二祥, 武思宇, 王宗纲. 地基-结构系统振动台模型试验中相似比的实现问题探讨[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(10): 87-92.
Song E X, Wu S Y, Wang Z G. A tentative solution for similitude realization in shaking table test of SSI systems [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(10): 87-92. (in Chinese)
- [20] 詹永祥, 蒋关鲁, 牛国辉, 等. 桩板结构路基动力模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(8): 2097-2102.
Zhan Y X, Jiang G L, Niu G H, et al. Model experimental research on dynamic performance of pile-plank embankment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2097-2102. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)