

不同厚度液化土层大直径变截面六桩基础振动台模型试验研究

冯忠居¹, 李元鹏¹, 王伟¹, 张聪¹, 李宗海², 赵瑞欣¹, 王思琦¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 厦门路桥工程投资发展有限公司, 福建 厦门 361026)

摘要: 为研究不同厚度液化土层大直径变截面六桩基础动力响应特性, 依托厦门第二东通道翔安大桥实体工程, 通过室内振动台模型试验, 选取地震动强度分别为 0.15g、0.25g、0.35g、0.45g 的 5010 波, 开展液化土层厚度分别为 30、40、50 cm 时饱和砂土孔压比、大直径变截面六桩基础的桩身加速度、桩身弯矩、桩顶水平位移的动力特性研究。结果表明: 不同饱和砂土层厚度下, 大直径变截面六桩基础的桩身加速度及弯矩在变截面和土层分界面处发生突变; 同一土层厚度下, 随着地震动强度从 0.15g 增大到 0.45g, 饱和砂土孔压比、六桩基础的桩身加速度、桩顶水平位移、桩身弯矩均增大; 0.15g 地震动强度下, 随着饱和砂土层厚度增大, 饱和砂土孔压比稳定值减小, 但六桩基础的桩顶水平位移、桩身加速度及弯矩峰值均逐渐增大且增幅变大。建议在液化场地大直径变截面桩基础设计时, 应特别考虑大直径变截面六桩基础在不同液化土层厚度下的动力响应差异, 并注重变截面和土层分界面的抗弯性能, 以保证六桩基础的抗震性能。

关键词: 桩基; 大直径变截面六桩; 振动台试验; 动力响应; 饱和砂土

中图分类号: TU473.1; TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)03-0595-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.03.016

Experimental study on shaking table model of six piles with large diameter and variable section in different thickened soil layers

FENG Zhongju¹, LI Yuanpeng¹, WANG Wei¹, ZHANG Cong¹, LI Zonghai²,
ZHAO Ruixin¹, WANG Siqi¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xiamen Road and Bridge Engineering Investment and Development Co., Ltd., Xiamen 361026, China)

Abstract: In order to study the dynamic response characteristics of six-pile foundation with large diameter and variable section in different layers of liquefied soil, 5010 waves with ground motion intensity of 0.15g, 0.25g, 0.35g and 0.45g are selected through indoor shaking table model test based on the solid project of Xiangan Bridge in Xiamen Second East Passage. The dynamic characteristics of saturated sand pore pressure ratio, pile acceleration, pile bending moment and pile top horizontal displacement of six pile foundations with large diameter and variable section are studied when the thicknesses of the liquefied soil layer are 30, 40 and 50 cm. The results show that the acceleration and bending moment of six-pile foundation with large diameter and variable section change abruptly at the interface between variable section and soil layer under different thicknesses of saturated sand layer. Under the same soil thickness, with an increase of ground motion intensity from 0.15g to 0.45g, the pore pressure ratio of saturated sand, pile acceleration, horizontal displacement of pile top and pile bending moment all increase. Under the ground motion intensity of 0.15g, the stable value of pore pressure ratio of the six-pile foundation decreases with an increase of saturated sand layer thickness, but the horizontal displacement of pile top, pile acceleration and peak bending moment of the six-pile foundation gradually increase and increase. It is suggested that in the design of large diameter variable section pile foundation in liquefaction site, special consideration should be given to the dynamic response difference of six large diameter variable section pile foundation under different thickness of liquefied soil layer, and pay attention to the flexural performance of the interface between the variable section and soil layer, so as to ensure the seismic performance of the six pile foundation.

Keywords: pile foundation; six piles with large diameter and variable section; shaking table test; dynamic response; saturated sandy soil

收稿日期: 2023-05-24; 修订日期: 2023-09-19

基金项目: 福建省交通运输科技项目(202105)

近年来,液化场地桩基震害时有发生,如日本的 Tamaga wa 桥和昭和公路大桥、中国唐山市的胜利桥、新西兰的科伦坡街桥等均处于液化场地,地震时砂土液化导致土体强度降低,对桩基的约束作用减弱,桩基受到破坏引发上部结构甚至全桥发生损伤,严重影响桥梁安全^[1-3],大直径变截面桩基因其优良的抗震性能和良好的经济效益被广泛应用于深水桥梁桩基建设^[4]。由于跨海大桥桩基础大多穿越淤泥等液化土层,在强震作用下液化土层强度降低威胁着桥梁安全,同时不同桩基桥位不同,海床面厚度有所区别,对大直径变截面桥梁桩基的抗震设计造成困扰^[5-7]。因此,研究不同厚度液化土层大直径变截面六桩基础动力响应特性问题尤为必要。

目前,国内外学者对于液化场地桩基的动力响应有着深入研究。冯忠居等^[8-11]通过振动台试验,探明了强震作用下砂土液化对桥梁桩基力学特性的影响,研究了强震作用下液化场地中桩-土之间的作用特性,同时分析了该地下变截面桩、群桩的动力响应规律。李雨润等^[12]应用 ABAQUS 软件讨论了可液化土层桩体抗震侧向承载力的计算方法。唐亮等^[13]基于数值模拟和振动台实验,对液化场地桥梁桩基改进 m 值法进行了研究。蔡可键^[14]基于动力学模型,通过将土体简化为独立的弹簧和阻尼器的方法,建立水平振动方程,研究了桩基横向非线性动力响应特性。然而,桩基在抗震过程中并非孤立存在,而是和上部结构紧密连接,为进一步探明砂土液化对桩基和上部结构的影响。刘星等^[15]使用 OpenSees 软件,将地基、群桩基础和上部结构作为一个系统,重点分析了可液化地基在地震作用下桩身弯矩受桩与土相互作用影响的规律。许成顺等^[16]通过土-群桩-上部结构体系大型振动台试验,重点探究了地震动条件下可液化自由场中场地加速度、孔压比等动力响应规律。张健等^[17]利用土工离心机进行模型试验,采取频谱分析的方法,研究了砂土液化和承台共同作用下桩身弯矩的变化规律。孔德森等^[18]通过设计群桩柱墩-模型振动台试验,分析了地震作用下液化场地群桩-土-结构之间的作用规律。以上研究主要集中于探索液化场地下传统桩基动力响应特性,为系统地揭示地震作用下液化场中不同结构形式桩基的动力响应特性的响应规律,部分学者基于数值模拟的方法展开了研究工作。高盟等^[19]利用 FLAC3D 软件,分析了液化场地下大直径扩底桩的动力响应特性;沈婷等^[20]通过数值模拟,采取有效应力动力分析的方法,着重研究了地震动作用下深长桩基础的孔隙水压力特性。近些年来,大直径

变截面桩基因其抗震性能好而被广泛应用。冯忠居等^[21]依托实体工程,使用 FLAC 3D 软件,研究了不同地震波作用下软土地大直径变截面群桩动力响应特性。ZHANG 等^[22]通过振动台试验,对比研究了单桩和群桩的抗液化性能,结果表明群桩的抗液化性能较好。刘忠平等^[23]基于实际工程,采用推导分析和增量动力分析的方法研究了变截面桩在地震作用下的抗剪、抗弯强度,并给出了变截面位置的合理设计范围。

综上所述,现有的研究多集中于液化场地单桩的动力响应和桩-土之间的受力特性分析,而对大直径变截面的桩研究较少,文献[24]研究了针对液化场地等截面桩和变截面桩的动力响应差异问题。因此,本文通过振动台模型试验,研究不同厚度液化土层及不同地震动强度下饱和砂土孔压比、大直径变截面六桩桩顶水平位移、桩身加速度及弯矩等变化规律,以期液化场地的桥梁桩基设计优化提供参考。

1 依托工况

厦门第二东通道翔安大桥 H15 采用大直径变截面六桩基础,桩长 45 m、桩径 2.5/2.15 m、桩间距 5.4 m,其土层分布如图 1 所示。根据勘察报告,该区地震烈度为 VII 度且桩基穿越不同厚度的饱和砂土层,在地震作用下极易发生液化^[25]。因此,亟需开展不同厚度液化土层大直径变截面六桩基础的动力特性研究。

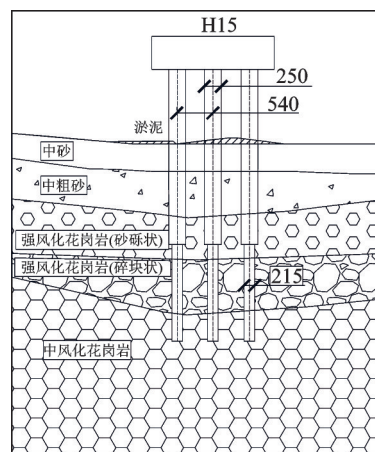


图1 土层分布(单位:cm)

Fig. 1 Soil layer distribution (Unit:cm)

2 振动台模型试验

2.1 试验设备

使用振动台模拟地震,具体的技术参数如表 1 所示。

表1 振动台技术参数

Tab. 1 Technical parameters of the shaking table

性能	参数
台面尺寸	5000 mm×5000 mm
振动模式	正弦、随机(地震动)
频率范围	0.5~50 Hz
最大模型载重	30 t
最大加速度幅值	满载:X、Y向1.0g,Z向0.7g
最大速度幅值	X、Y向:50 cm/s,Z向:40 cm/s
最大位移幅值	X、Y向:±80 mm,Z向:±50 mm

综合考虑相似比以及“模型箱效应”带来的误差,选取3.05 m(长)×1.7 m(宽)×1.8 m(高)的刚性模型箱,通过在模型箱四周充填20 mm厚的泡沫,降低试验过程中地震波反射等影响。为达到每个功能区相互不影响的目的,在满足试验要求的前提下,通过焊接钢板将模型箱分割为三个功能区。图2为模型箱示意图。



图2 模型箱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model box

2.2 相似比设计

该地震动模型试验采用人工质量模型,几何相似比 $C_l=1/50$,重力加速度关系 $C_g=1$,按照土工相似原理,通过量纲分析法计算得到弹性模量相似比 $C_E=1/3.5$ 。各物理量相似常数如表2所示。

表2 试验物理量相似常数

Tab. 2 Similarity constants of experimental physical quantities

物理量	量纲	相似常数
加速度	LT^{-2}	1
重力加速度	LT^{-2}	1
速度	LT^{-1}	0.14
线尺寸	L	1/50
线位移	L	1/50

由于模型总质量为模型本身质量 m_m 与人工质量 m_a 之和,因此在不影响结构刚度的同时,综合考虑振动台的实际承载能力及人工质量的相似条件,

在变截面六桩桩顶设置600 kg的人工质量^[26-27]。其中,人工质量计算公式为:

$$m_a = C_E C_l^2 m_p - m_m \quad (1)$$

式中, m_p 为原型质量。

2.3 模型桩、土设计

2.3.1 模型桩设计

模型桩长90 cm,桩径5.0/4.3 cm,变截面位置在桩顶以下46 cm处。模型桩采用微粒混凝土材料配置,其水泥品种为中材牌普通硅酸盐水泥,骨料采用最大粒径为4.75的河砂,配合比为水泥:石:砂:水=1.0:4.19:1.48:0.60,抗压强度为19.0 MPa,弹性模量为25.2 GPa^[28]。箍筋型号为Q235的镀锌铁丝,其屈服强度235 MPa,弹性模量为200 GPa,桩身配筋率为2.4%,主筋材料选取4根直径4 mm的镀锌铁丝,箍筋选取一根直径2.8 mm的镀锌铁丝,桩基模型如图3如示。



图3 模型桩

Fig. 3 Model pile

2.3.2 模型土设计

基于厦门第二东通道翔安大桥地质勘查资料,中风化花岗岩抗压强度为68 MPa,本次模型试验中风化花岗岩采用微粒混凝土配置,通过万能试验机测得其抗压强度为19 MPa,混凝土抗压强度测试曲线如图4所示,符合相似比关系。基岩混凝土浇筑时在桩基础相应位置设置深5 cm、直径8 cm的预留孔,以便模型桩准确就位。通过烘干法、环刀法、直剪试验测得模型土的物理力学指标,近似配制出原状土样^[29-30],模型土的物理力学指标如表3所示。填筑地基土采用分层填筑、人工夯实的方法,即按照经验标准控制土的相对密实度和含水量,分层装填碾压并夯实到预定效果,分层装填厚度为10 cm。填筑完成后对模型箱内地基土取样并测其物理力学指标参数,试验砂土的颗粒级配曲线如图5所示。

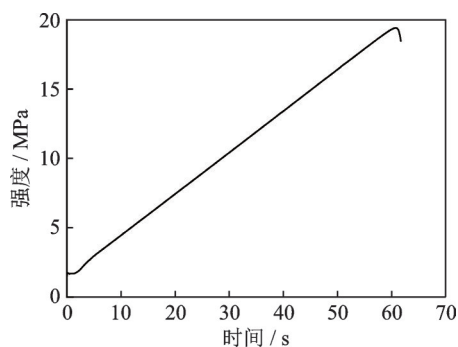


图4 混凝土抗压强度测试值

Fig. 4 Test values of concrete compressive strength

表3 模型土的物理力学指标

Tab. 3 Physical and mechanical indexes of model soil

土类	天然含水量 w / %	密度 ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)
砂土	25.5	1.86	0	35
强风化花岗岩	11.2	2.56	22.5	43

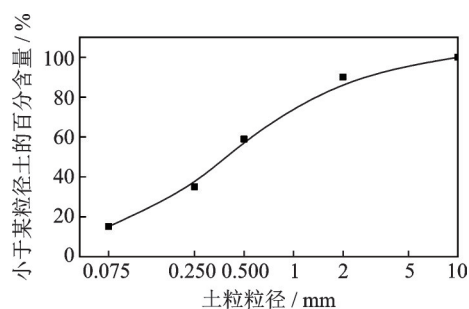


图5 颗粒级配曲线

Fig. 5 Particle grading curve

2.3.3 地震波选取

根据该工程的勘察报告,拟建场区的地震烈度为Ⅶ度,设计地震加速度峰值为 $0.15g$ 。试验选取《厦门第二东通道桥梁段工程场地地震安全性评价报告》中针对厦门翔安大桥人工合成的5010波,即50年超越概率10%。在地震波波形不变的前提下,对其进行比例缩放,控制其峰值加速度分别为 $0.25g$ 、 $0.35g$ 、 $0.45g$,其波形如图6所示。

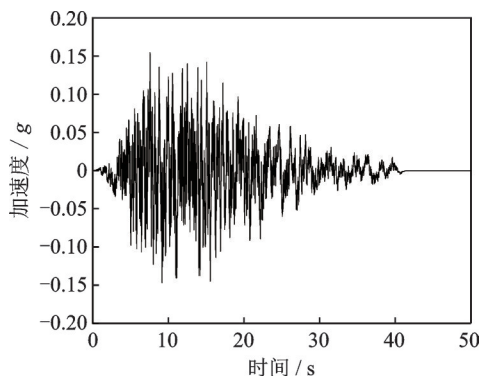


图6 0.15g地震波

Fig. 6 0.15g seismic wave

2.4 试验工况及测试元件布设

模型试验主要研究不同地震动强度下,大直径变截面六桩基础分别位于30、40、50 cm液化土层下六桩基础的动力响应规律。试验采用位移传感器测量桩顶水平位移,加速度传感器测量桩身加速度,应变片测量桩身应变,其方向均沿X向,计算得出弯矩,并布设孔隙水压力计,以测量不同强度的地震波作用下土体孔隙水压力。在上部荷载作用下,群桩中边桩和中心桩的承担荷载大小不同^[31-32],但由于本文的研究重点在于液化土层厚度变化下桩基的动力响应特性,故按如图7所示方式布置测试元件。

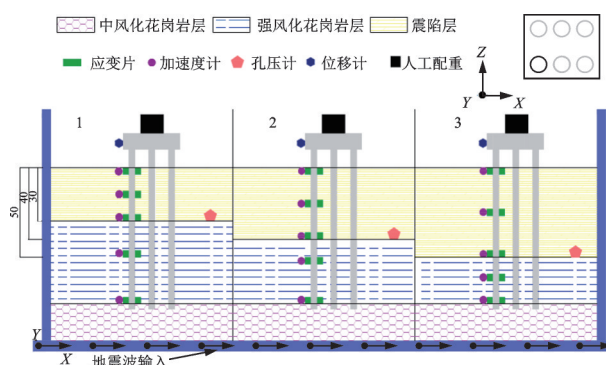


图7 模型桩与测试原件布设(单位: cm)

Fig. 7 Layout of model piles and test elements (Unit: cm)

3 动力响应规律分析

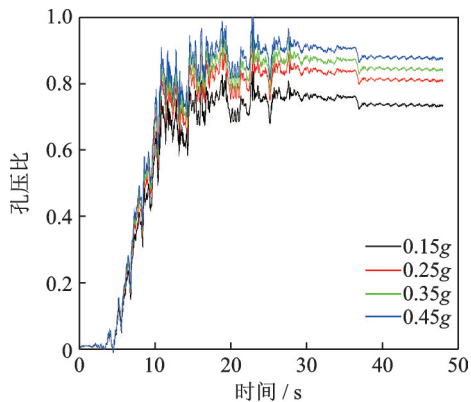
3.1 孔压比

不同液化土层厚度下、不同强度地震作用时,3种不同工况下孔压比变化规律如图8和9所示。

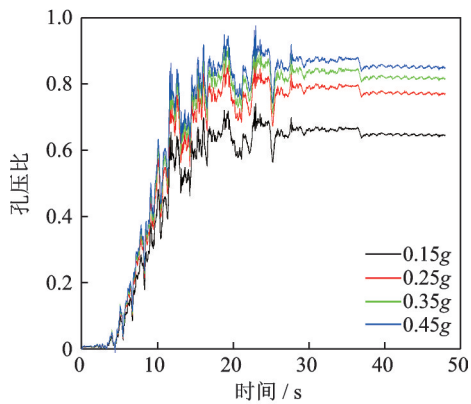
由图8可知,同一液化土层厚度、不同地震动强度作用下,孔压比变化规律基本相同。地震波刚开始加载时孔压比的值在零点附近,随着地震强度的增大,孔压比先逐渐增大然后趋于稳定,当孔压比达到0.8时,土体完全液化^[24, 33]。同一液化土层厚度、不同强度地震作用下,孔压比稳定值随着地震动强度的增大而增大。以液化土层厚度30 cm时为例,地震动强度分别为 $0.15g$ 、 $0.25g$ 、 $0.35g$ 、 $0.45g$ 时,孔压比的稳定值分别为0.73、0.81、0.84、0.87。这是因为随着地震动强度的增大,土中的孔隙水压力在短时间内来不及排出,导致饱和砂土层孔压比的稳定值增大。

由图9可知,同一地震强度下,随着液化土层厚度的增加,孔压比表现出滞后性。以 $0.15g$ 地震动强度为例,液化土层厚度分别为30、40、50 cm时,孔压比分别在10.3、10.6、11.3 s开始迅速增加,可见随

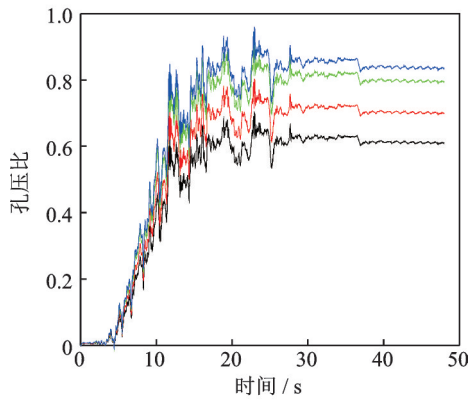
着土层深度的增加孔压比表现出滞后性。同一地震强度下,随着液化土层厚度的增加,孔压比的稳定值减小。以 0.15g 地震动强度为例,液化土层厚度分别为 30、40、50 cm 时,孔压比的稳定值分别为 0.73、0.64、0.61。当饱和砂土液化时,随着饱和砂土层厚度的增加,孔隙水的排泄受到限制,导致孔隙水压力增大,土层的抗剪强度减小,液化土层承载能力下降,同时孔压比的稳定值变小。饱和砂土层厚度增加会导致液化土层承载能力下降,为确保桩基础的稳定性,建议着重考虑饱和砂土层厚度增加对孔压比的影响。



(a) 液化土层厚 30 cm
(a) The liquefaction layer was 30 cm thick



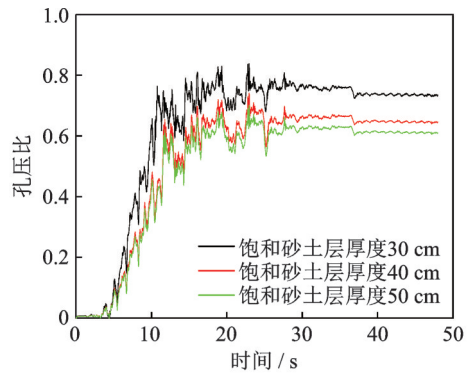
(b) 液化土层厚 40 cm
(b) The liquefaction layer was 40 cm thick



(c) 液化土层厚 50 cm
(c) The liquefaction layer was 50 cm thick

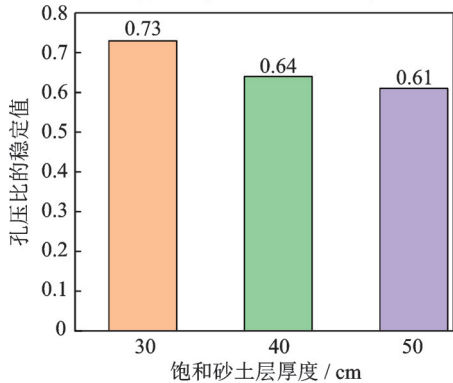
图 8 不同液化土层厚下的孔压比

Fig. 8 Pore pressure ratio under different thickness of liquefied soil layer



(a) 孔压比变化规律

(a) Pore pressure ratio changes



(b) 孔压比稳定值变化规律

(b) Changes of stable value of pore pressure ratio

图 9 0.15g 地震动强度下的孔压比

Fig. 9 Pore pressure ratio under ground motion intensity of 0.15g

3.2 桩身加速度响应

不同液化土层厚度、不同强度地震作用时 3 种不同工况下桩身加速度变化规律如图 10 所示。

由图 10 可知,各土层厚度下,大直径变截面六桩基础桩身加速度均由桩端至桩顶逐渐增大,同一位置桩身加速度随着地震动强度的增加逐渐增大。桩身加速度在强风化花岗岩层增速较慢,在液化土层增速较快,且在土层交界面和变截面处发生突变,峰值位于桩顶。桩身加速度在变截面处发生突变是因为变截面桩桩径由大变小,桩-土整体刚度减弱,加速度放大效果明显。此外,桩身加速度在不同土层中增速不同且在分界面处发生突变,是因为液化土层土体较为软弱,对桩基的约束作用较弱,且在地震作用下发生液化,强度降低,液化土层对地震波的放大作用增强。

由图 10 可知,随着液化土层厚度的增加,大直径变截面六桩基础桩顶加速度均逐渐增大。以 0.15g 地震动强度为例,液化土层厚度分别为 30、40、50 cm 时,桩身加速峰值在桩顶处且分别为 3.74、3.85、4.00 m/s^2 。这是由于随着液化土层厚度的增加,强风化花岗岩层厚度减小,桩侧土层对桩的约束作用减弱。同时,在地震动荷载作用下,液化土层厚度的增加导致液化量增大,桩基自由长度变长,桩基自由段对输入地震波的振动特性敏感。

液化土层40 cm大直径变截面六桩基础桩顶加速度较液化土层30 cm时大0.11 m/s²,液化土层50 cm大直径变截面六桩基础桩顶加速度较40 cm时大0.15 m/s²。可见,随着液化土层厚度增加,大直径变截面六桩基础桩身加速度增幅变大。

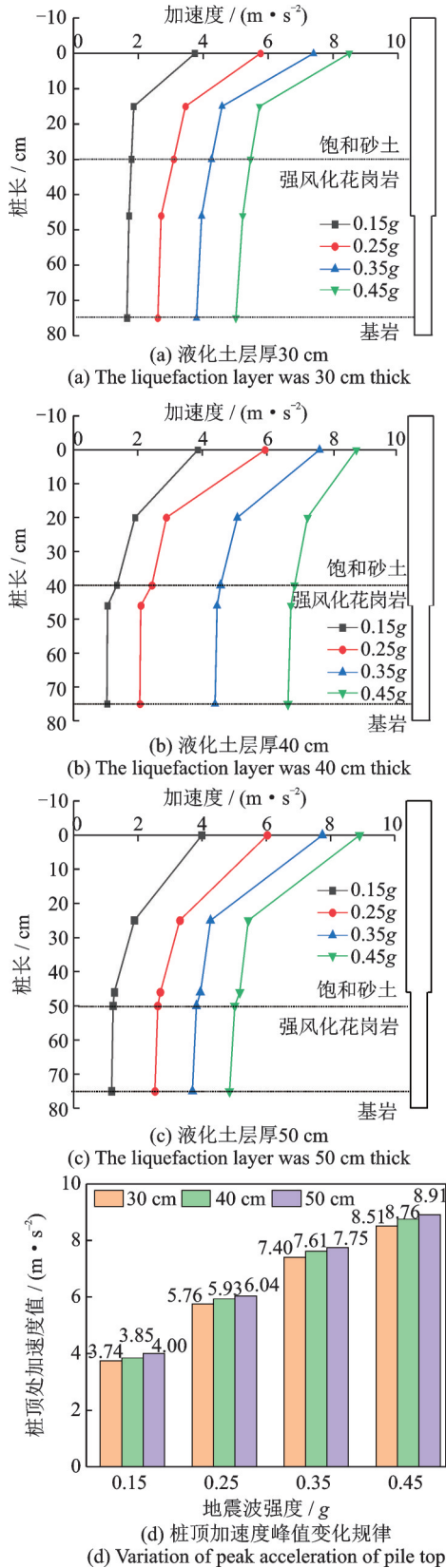


图10 六桩基础桩身加速度变化规律

3.3 桩身弯矩

不同液化土层厚度下,不同地震动强度作用时3种不同工况下桩身弯矩变化规律如图11所示。

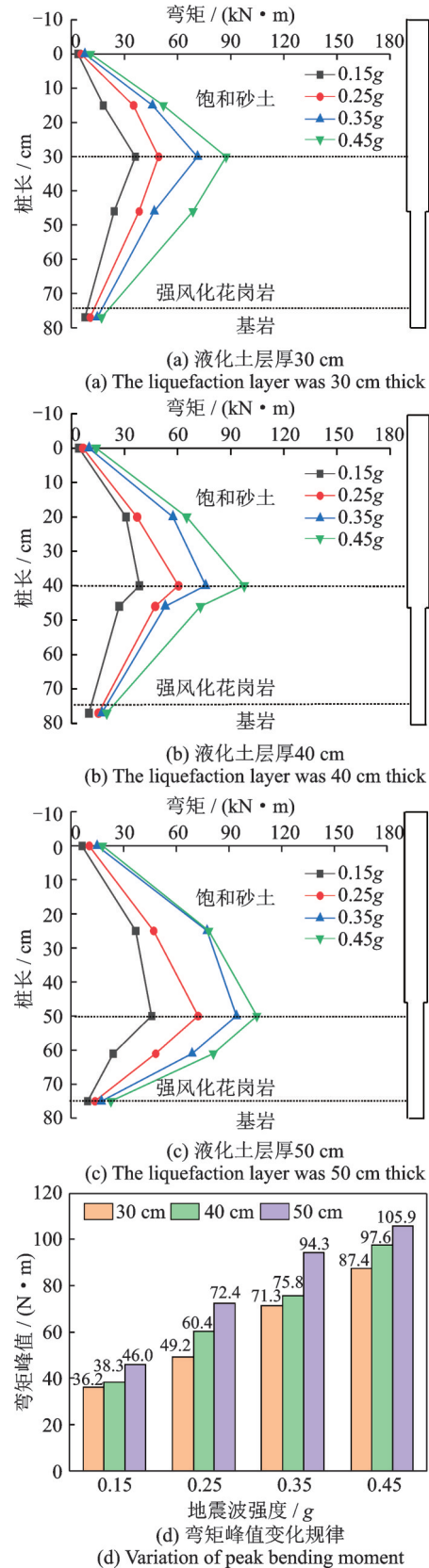


图11 5010波作用下六桩基础桩身弯矩变化规律

Fig. 11 Variation law of bending moment of six-pile foundation under 5010 wave action

由图 11 可知,各土层厚度、大直径变截面六桩基础桩身弯矩均是由桩顶到桩端先增大后减小,且桩身弯矩峰值均产生于饱和砂土层和强风化岩土层分界面处。因为在地震动作用下,饱和砂土产生液化,土体变软强度降低,桩侧土抗力减小,桩-土发生相对运动,其结构发生破坏,导致桩身弯矩变大。同一位置桩身弯矩随着地震动强度的增加逐渐增大,且在变截面处产生突变。因为变截面处桩径变化,桩基的抗弯刚度差异较大,桩身弯矩在该处发生突变。

由图 11 可知,0.15g 地震动强度下,液化土层厚度分别为 30、40、50 cm 时,大直径变截面六桩基础桩身弯矩峰值分别为 36.2、38.3、46.0 kN·m,可以看出,同一地震动强度下,随着液化土层厚度的增大,大直径变截面六桩基础桩身弯矩峰值均逐渐增大。液化土层 40 cm 大直径变截面六桩基础弯矩峰值较液化土层 30 cm 大直径变截面六桩基础弯矩峰值大 2.1 kN·m,液化土层 50 cm 大直径变截面六桩基础弯矩峰值较液化土层 40 cm 大直径变截面六桩基础弯矩峰值大 7.7 kN·m。可见,随着液化土层厚度增加,大直径变截面六桩基础弯矩峰值增幅变大。同时可以看出,随着饱和砂土层厚度的增加,桩身弯矩最大值逐渐增大。这是因为饱和砂土在振动荷载往复作用下发生液化,且在一定时间内无法恢复,随着液化土层厚度增大,土体破坏程度增大,导致桩身产生了较大的弯矩。

3.4 桩顶水平位移

不同强度地震作用下,不同液化土层厚度在 3 种不同工况下桩顶水平位移最大值及变化规律如图 12 所示。

由图 12 可知,各土层厚度下,随着地震动强度的增大,大直径变截面六桩基础的桩顶水平位移最大值均逐渐变大。以液化土层厚度 30 cm 为例,在地震波强度分别为 0.15g、0.25g、0.35g、0.45g 作用时,桩基础产生的位移最大值分别为 0.8、1.2、1.6、1.8 mm。液化土层厚度分别为 30、40、50 cm 时,以地震波强度 0.15g 为例,在其作用下,大直径变截面六桩基础桩顶水平位移峰值分别为 0.8、1.5、2.8 mm。可以看出,同一地震波强度作用下,随着液化土层厚度的增大,大直径变截面六桩基础桩顶水平位移峰值均逐渐增大。液化土层 40 cm 大直径变截面六桩基础桩顶水平位移峰值较液化土层 30 cm 大直径变截面六桩基础桩顶水平位移峰值大 0.7 mm,液化土层 50 cm 大直径变截面六桩基础桩顶水平位移峰值较液化土层 40 cm 大直径变截面六桩基础桩顶水平位移峰值大 1.3 mm。可见,随着液化土层厚度增加,大直径变截面六桩基础弯矩峰值增幅变大。

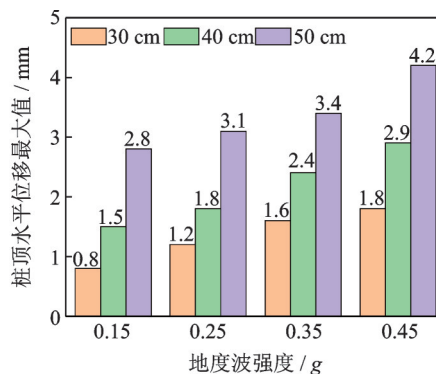


图 12 六桩基础桩顶水平位移最大值变化规律

Fig. 12 Variation law of the maximum horizontal displacement of the top of six piles

4 结论及工程建议

基于大型振动台试验,对地震波作用下不同厚度液化土层大直径变截面六桩基础动力响应特性分析,得出以下结论:

(1)地震动作用下,随着饱和砂土层厚度的增加,土层深处的孔压比在开始增长时刻滞后于浅处。随着饱和砂土层厚度的增加,孔压比稳定值变小,土层的抗剪强度减小,液化土层承载能力下降。因此,建议着重考虑饱和砂土层厚度增加对孔压比的影响。

(2)不同饱和砂土层厚度下,大直径变截面六桩基础的桩身加速度及弯矩在变截面和土层分界面处发生突变。同时,在 0.15g 地震动强度下,随着饱和砂土层厚度的增加,六桩基础的桩顶水平位移、桩身加速度及弯矩峰值均逐渐增大且增幅变大

(3)同一土层厚度下,随着地震动强度的增大,饱和砂土孔压比、大直径变截面六桩基础的桩身加速度、桩顶水平位移、桩身弯矩均增大。强震作用下,加剧了大直径变截面六桩基础周围饱和砂土层的液化,导致饱和砂土层的土体强度和桩侧土体的约束作用减弱。

(4)随着液化土层厚度增大,大直径变截面六桩基础动力特性发生的变化需要引起重视。建议在液化土层较厚的区域关注其孔压比和桩身加速度的变化,当厦门第二东通道翔安大桥桩基选取桩身抗弯强度为结构控制因素时,应重点考虑变截面和土层分界面处的桩基抗弯能力,保证大直径变截面六桩基础的抗震性能。

参考文献:

- [1] DONG Y X, FENG Z J, HU H B, et al. The horizontal bearing capacity of composite concrete-filled steel

- tube piles[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(1): 3241602.
- [2] 唐伟健,王东升,张鹏颺,等.桥梁震害的历史回顾(上)[J].*地震工程与工程振动*,2021,41(4):70-80.
TANG Weijian, WANG Dongsheng, ZHANG Pengyang, et al. A review of the seismic damage history of bridges (I)[J].*Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*,2021,41(4):70-80
- [3] 张艳美,潘振华,张鸿儒,等.多桩型复合地基作用机理与动力特性研究[J].*地震工程学报*,2015,37(1):82-87
ZHANG Yanmei, PAN Zhenhua, ZHANG Hongru, et al. Research on mechanism and dynamic characteristics of composite foundation with multi-type piles[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(1): 82-87.
- [4] 谭婕,王奎华,涂园,等.大直径变截面桩速度波衰减特性研究与应用[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(2):419-431.
TAN Jie, WANG Kuihua, TU Yuan, et al. Velocity wave attenuation characteristics of large-diameter variable section piles and the application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(2): 419-431.
- [5] 冯忠居,王伟,张聪,等.震陷土层变化下变截面单、群桩动力响应差异[J].*上海交通大学学报*,2024,58(7):1086-1096.
FENG Zhongju, WANG Wei, ZHANG Cong, et al. Variable section single pile and group pile under variation of seismic subsidence soil layer dynamic response difference [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2024, 58(7): 1086-1096.
- [6] 王奎华,高柳,吴君涛,等.三维波动土中考虑桩身变截面与桩周土相互作用的大直径桩的动力特性[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(2):496-503.
WANG Kuihua, GAO Liu, WU Juntao, et al. Dynamic response of a large diameter pile considering the interaction of variable pile section with surrounding layered three-dimensional soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2017,36(2):496-503.
- [7] 高新文.地震作用下可液化土层水平受荷桩基力学响应分析[J].*地震工程与工程振动*,2016,36(3):102-110.
GAO Xinwen. Mechanical response of horizontal loaded pile in liquefiable soil under earthquake load [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*,2016,36(3):102-110.
- [8] 冯忠居,孟莹莹,董芸秀,等.强震作用下液化场地桩-土非线性动力相互作用特性[J].*科学技术与工程*,2021,21(17):7299-7307.
FENG Zhongju, MENG Yingying, DONG Yunxiu, et al. Nonlinear dynamic interaction characteristics of pile-soil in liquefaction site under strong earthquake[J]. *Science Technology and Engineering*,2021,21(17):7299-7307.
- [9] FENG Z J, HU H B, DONG Y X, et al. Effect of steel casing on vertical bearing characteristics of steel tube-reinforced concrete piles in loess area[J]. *Applied Sciences*, 2019,9(14):2874.
- [10] 冯忠居,李玉婷,蔡杰,等.地震作用软土震陷特性及变截面群桩动力响应[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2023,50(9):109-118.
FENG Zhongju, LI Yuting, CAI Jie, et al. Earthquake subsidence characteristics of soft soil under earthquake action and dynamic response of pile group with variable section[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2023, 50(9): 109-118
- [11] 冯忠居,张聪,何静斌,等.强震作用下群桩基础液化性能的振动台试验[J].*交通运输工程学报*,2021,21(4):72-83.
FENG Zhongju, ZHANG Cong, HE Jingbin, et al. Shaking table test of liquefaction resistance of group piles under strong earthquake[J].*Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(4): 72-83.
- [12] 李雨润,闫志晓,张健.液化场地群桩基础地震反应离心机试验及损伤数值模型研究[J].*岩石力学与工程学报*,2023,42(1):212-223.
LI Yurun, YAN Zhixiao, ZHANG Jian. Seismic response of pile group foundations in liquefied sites based on centrifuge test and numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(1): 212-223.
- [13] 唐亮,凌贤长,苏雷,等.可液化场地桥梁桩基改进m值法研究[J].*西北地震学报*,2011,33(增刊1):81-84.
TANG Liang, LING Xianzhang, SU Lei, et al. A modified m-value method of bridge pile foundation in liquefiable ground[J]. *Northwestern Seismological Journal*,2011,33(Sup1):81-84.
- [14] 蔡可键.水平谐振荷载作用下桥梁基桩的动力反应[J].*岩土力学*,2009,30(5):1504-1508.
CAI Kejian. Dynamic response of pile foundation under horizontal resonant vibratory loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1504-1508.
- [15] 刘星,王睿,张建民.液化地基中群桩基础地震响应分析[J].*岩土工程学报*,2015,37(12):2326-2331.
LIU Xing, WANG Rui, ZHANG Jianmin. Seismic response analysis of pile groups in liquefiable foundations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(12): 2326-2331.
- [16] 许成顺,豆鹏飞,杜修力,等.液化自由场地震响应大型振动台模型试验分析[J].*岩土力学*,2019,40(10):3767-3777.
XU Chengshun, DOU Pengfei, DU Xiuli, et al. Large-scale shaking table model test of liquefiable free field[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 3767-3777.
- [17] 张健,李雨润,闫志晓,等.基于频谱分析的饱和砂土地直斜群桩承台-土体耦合作用下桩身弯矩分布规律研究[J].*岩石力学与工程学报*,2020,39(4):829-844.
ZHANG Jian, LI Yurun, YAN Zhixiao, et al. Study on the distribution law of the bending moment of verti-

- cal and batter piles in saturated sand under cap and soil coupling based on frequency analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 829-844.
- [18] 孔德森,李纯洁,凌贤长,等.液化场地群桩-土-结构地震相互作用振动台试验研究[J].岩土工程学报, 2011,33(增刊2): 143-149.
KONG Desen, LI Chunjie, LING Xianzhang, et al. Shaking table tests on pile group-soil-structure interaction to seismic loading on liquefied ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup2): 143-149.
- [19] 高盟,尹诗,徐晓,等.可液化场地大直径扩底桩的动力p-y曲线特征研究[J].地震工程学报, 2019, 41(4): 916-924.
GAO Meng, YIN Shi, XU Xiao, et al. Characteristics of dynamic p-y curves for large-diameter belled piles in liquefiable sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 916-924.
- [20] 沈婷,李国英,章为民.超深桩基础的有效应力地震反应有限元分析[J].岩土力学, 2004, 25(7): 1045-1049.
SHEN Ting, LI Guoying, ZHANG Weimin. Effective stress finite element analysis for seismic response of deep pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1045-1049.
- [21] 冯忠居,王志浩,张晓光,等.软土场地大直径变截面群桩动力响应特性的研究[J].公路, 2023, 68(6): 233-241.
FENG Zhongju, WANG Zhihao, ZHANG Xiaoguang, et al. Study on dynamic response characteristics of large diameter variable section pile group in soft soil field[J]. Highway, 2023, 68(6): 233-241
- [22] ZHANG C, FENG Z J, GUAN Y H, et al. Study on liquefaction resistance of pile group by shaking table test [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022(12): 1-12.
- [23] 刘忠平.大直径变截面桩地震作用下变截面设置研究[J].施工技术, 2017, 46(增刊1): 48-51.
LIU Zhongping. Study on the setting of variable cross section of large diameter pile with variable cross-section [J]. Construction Technology, 2017, 46(Sup1): 48-51.
- [24] 冯忠居,王逸然,张俊波,等.地震作用下液化场地变截面桩与等截面桩的动力响应对比分析[J].世界地震工程, 2022, 38(3): 59-69.
FENG Zhongju, WANG Yiran, ZHANG Junbo, et al. Comparative analysis of dynamic response of pile with variable section and pile with constant section in liquefaction site under earthquake action[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 38(3): 59-69.
- [25] 陈正汉,李刚,王权民,等.厦门典型地基土的地震反应分析与评价[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 66-77.
CHEN Zhenghan, LI Gang, WANG Quanmin, et al. Analysis and evaluation of seismic reaction of typical foundation soils in Xiamen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 66-77.
- [26] 黄维平,邬瑞锋,张前国.配重不足时的动力试验模型与原型相似关系问题的探讨[J].地震工程与工程振动, 1994, 14(4): 64-71.
HUANG Weiping, WU Ruifeng, ZHANG Qianguo. Study on the analogy between scale models with less ballast and their prototypes under shaking table test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(4): 64-71.
- [27] DONG Y X, FENG Z J, HE J B, et al. Seismic response of a bridge pile foundation during a shaking table test[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(12): 1-16.
- [28] 李绿宇,国巍.微粒混凝土基本力学特性及其影响参数的试验研究[J].世界地震工程, 2016, 32(4): 277-283.
LI Luyu, GUO Wei. Experimental research on basic mechanical properties of microconcrete and its influence parameters[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(4): 277-283.
- [29] 燕晓,袁聚云,袁勇,等.大型振动台试验模型场地的配制方法[J].结构工程师, 2015, 31(5): 116-120.
YAN Xiao, YUAN Juyun, YUAN Yong, et al. Study on model soil of large-scale shaking table test[J]. Structural Engineers, 2015, 31(5): 116-120.
- [30] 王志佳,张建经,闫孔明,等.考虑动本构关系相似的模型土设计及相似判定体系研究[J].岩土力学, 2015, 36(5): 1328-1332.
WANG Zhijia, ZHANG Jianjing, YAN Kongming, et al. Model soil design considering similitude of dynamic constitutive model and evaluation of similarity level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1328-1332.
- [31] 闵兆兴,贾艳敏,李金龙.施工荷载作用下群桩竖向受力的试验研究[J].铁道建筑, 2013, 53(8): 9-11.
MIN Zhaoxing, JIA Yanmin, LI Jinlong. Experimental study on vertical force of pile group under construction load[J]. Railway Construction, 2013, 53(8): 9-11.
- [32] 徐亚利,刘增荣.群桩基础受力特性的模型试验研究[J].工程勘察, 2011, 39(3): 6-10.
XU Yali, LIU Zengrong. Model experimental research on mechanical characteristics of large diameter over-length pile-group foundation in loess[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(3): 6-10.
- [33] 冯忠居,董芸秀,何静斌,等.强震作用下饱和粉细砂液化振动台试验[J].哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(9): 186-192.
FENG Zhongju, DONG Yunxiu, HE Jingbin, et al. Shaking table test of saturated fine sand liquefaction under strong earthquake[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 186-192.

第一作者:冯忠居(1965—),男,博士,教授。

E-mail: ysf@gl.chd.edu.cn

通信作者:张 聪(1994—),男,博士,讲师。

E-mail: zhangcong@chd.edu.cn