

文章编号:1673-9469(2026)03-0018-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.003

## 竖向荷载对液化群桩基础的动力响应影响

刘历波,刘增培\*,姜雨辰,叶孟辉,杜家豪  
(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:** 为研究竖向荷载对液化群桩基础的动力响应影响,以高承台群桩为研究对象,分别取桩基竖向极限承载力的5%、10%、15%、20%作为竖向荷载,在地震强度为0.20g、0.34g、0.50g的工况下进行振动台试验。从超静孔压比时程、加速度时程、桩承台位移时程和桩身弯矩时程4个方面来分析不同竖向荷载对砂土液化和动力响应的影响。研究表明:随着竖向荷载增加,超静孔压比峰值减小,砂土液化程度降低;而桩顶加速度、桩承台位移和桩身弯矩随着竖向荷载增加,峰值先减小后增大,竖向荷载为15%时峰值最小。竖向荷载的增加能够抑制砂土液化,同时也会增加结构惯性力。在砂土液化和结构惯性力的共同作用下,竖向荷载为15%时液化群桩的动力响应效果最优。

**关键词:** 群桩基础;竖向荷载;地震液化;振动台试验;动力响应

中图分类号:TU473.1

文献标识码:A

## Dynamic Response Law of Pile Group Foundation in Liquefiable Ground Under Different Vertical Loads

LIU Libo, LIU Zengpei\*, JIANG Yuchen, YE Menghui, DU Jiahao  
(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** In order to study the influence of vertical loads on the dynamic response of pile group foundation in liquefiable ground, the high cap pile group is taken as the research object. The shaking table test is used to take 5%, 10%, 15% and 20% of the ultimate vertical bearing capacity of the pile foundation as the vertical load, and the test is carried out under the seismic intensity of 0.20g, 0.34g and 0.50g. The effects of different vertical loads on sand liquefaction and dynamic response are analyzed from aspects of pore pressure ratio time history, acceleration time history, pile cap displacement time history and pile bending moment response time history. The results showed that with the increase of vertical load, the peak pore pressure ratio and the liquefaction degree of sand decreased. The peak values of pile top acceleration, pile cap displacement and pile bending moment decreased first and then increased with the increase of vertical load, and the values were the smallest when the vertical load was 15%. The increase of vertical load can inhibit the liquefaction of sand and increase the inertial force of the structure. With the combined influence, the dynamic response effect of pile group in liquefiable ground is optimal under the vertical load of 15%.

**Key words:** pile group foundation; vertical load; earthquake-induced liquefaction; shaking table test; dynamic response

收稿日期:2025-02-27 修回日期:2025-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U21A20164;51825904)

第一作者:刘历波(1979—),男,河北邯郸人,硕士,副教授,主要从事岩土方面的研究。

\*通信作者:刘增培(2000—),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事岩土方面的研究。

当前,我国在海洋资源开发、沿海地区建设等方面发展迅速,包括高桩码头、通信塔、电力输送塔以及深海开发平台等基础设施的建设,这些项目普遍采用桩基作为主要支撑结构。高承台群桩基础广泛应用于跨江跨海桥梁<sup>[1]</sup>,主要建于饱和砂土地基上,而砂土在震作用下很容易发生液化<sup>[2-5]</sup>。液化会导致土体有效应力降低、土层流动性增强,进而使桩基承载力下降,易发生侧向位移。因此,研究不同竖向荷载条件对地震液化群桩基础动力响应的影响并详细分析其中规律,对于群桩基础抗震具有重要的指导意义。

国内外学者对液化群桩动力响应进行了广泛的研究,许成顺等<sup>[6-10]</sup>分别进行了液化场地-结构体系的大型振动台试验与数值模拟,详细分析了桩基和土体的动力响应,并进行了大量参数分析,探讨了不同因素对群桩横向动态阻抗的作用。针对不同荷载作用下的群桩动力响应,李雨润等<sup>[11-12]</sup>研究了斜群桩分别在不同荷载和变频规则波下的动力响应。罗凯等<sup>[13]</sup>研究了竖向荷载作用下承台桩的水平承载特性。张恒源等<sup>[14]</sup>研究了水平与竖直方向耦合的地震作用下液化场地群桩基础的动力响应。针对不同桩型的动力响应,冯忠居等<sup>[15-17]</sup>利用FLAC3D数值模拟软件和振动台试验,研究了可液化变截面单桩、群桩的动力响应,结果显示在液化土层和非液化土层的交界处往往会产生较大弯矩。Zhang等<sup>[18]</sup>通过构建液化场地中水平与倾斜桩群及上部结构相互作用的有限元模型,探讨了水平和倾斜地震响应的差异。针对不同场地的群桩动力响应,李雨润等<sup>[19-20]</sup>运用振动台试验,研究了不同饱和砂土层厚度下群桩结构的动力响应,结果表明饱和砂土层越厚动力响应越明显。周恩全等<sup>[21]</sup>在可液化倾斜场地进行了桥桩-土相互作用振动台模型试验,成功模拟了现场喷砂、冒水、地裂、流滑等现象。Martinelli等<sup>[22]</sup>通过一系列三维动态有限元分析结合先进的塑性土壤模型,研究了桩基在层状土中的动力响应,并在土壤骨架和孔隙流体之间实现了完全耦合的相互作用。沈吉荣等<sup>[23]</sup>通过振动台试验,研究了液化土体侧向扩展对群桩基础动力响应的影响。李雨润等<sup>[24]</sup>通过离心机振动台试验和ABAQUS有限元软件,分析了饱和砂土中群桩的动力响应。Chatterjee等<sup>[25]</sup>研究了可液化土层深度对群桩基础的动力响应影响,结果表明当可液化土层深度与总桩长之比为0.625时,前后桩的弯矩和桩群挠度最大。

目前,针对不同桩型和各种土体因素的液化群桩基础动力响应规律都已进行了较为深入的研究。然而,竖向荷载会引起土体密实化,进而影响群桩基础的动力响应,但目前针对不同竖向荷载作用下液化群桩基础动力响应规律的研究较少。本文基于大型振动台试验,以桩基竖向极限承载力乘以相应折减系数作为桩基竖向荷载,研究不同竖向荷载作用下群桩基础的动力响应规律,为易发生地震液化的地区的群桩基础抗震设计提供了参考。

## 1 振动台试验设计

### 1.1 试验设备

本次试验在河北工程大学土木工程学院的结构实验室完成,主要使用单向振动台和剪切模型箱作为试验设备。振动台的技术参数如表1所示。

表1 单向振动台的主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of one-way shaking table

主要技术参数	参数值
台面尺寸/m	3.0×3.0
最大有效载重质量/t	10
最大倾覆力矩/(kN·m)	300
最大偏心力矩/(kN·m)	1 000
最大位移/mm	±100
最大速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1.0
频率范围/Hz	0.2~50.0
峰值加速度	1.2g

为了更准确地模拟实际情况,使用剪切模型箱来模拟自由场地的边界条件,有效减少了边界处地震波的反射或散射影响<sup>[26]</sup>。剪切模型箱的尺寸为1.4 m×1.4 m×0.9 m,如图1所示。



图1 剪切模型箱

Fig. 1 Shearing model box

### 1.2 模型相似比设计

本次试验选取的模型基础尺寸和形式如下:

承台尺寸为  $12\text{ m} \times 12\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ , 承台由 4 根桩径为  $2.5\text{ m}$ , 长为  $30\text{ m}$  的桩组成, 桩间距为  $7.5\text{ m}$ , 承台底部距地表高度超过  $6\text{ m}$ 。在考虑竖向荷载的情况下, 模型桩的设计通常需考虑桩的几何相似性, 并确保桩的抗压刚度接近<sup>[27]</sup>。基于振动台试验的模型相似比  $1:50$ , 模型桩应选择直径为  $50\text{ mm}$  的混凝土桩。然而, 考虑到混凝土桩的制作和养护较为复杂, 研究者们通常使用铝、铜、塑料等材料来代替混凝土。本次试验选用铝制模型桩, 并运用 Buckingham  $\pi$  定理的量纲分析法确定不同物理量的相似比。各物理量的相似常数如表 2 所示。

表 2 各物理量相似常数

Tab. 2 Similarity constants of physical quantities				
序号	物理量	量纲	相似常数关系式	相似常数
1	加速度 $a$	$\text{LT}^{-2}$	1	1
2	重力加速度 $g$	$\text{LT}^{-2}$	1	1
3	速度 $v$	$\text{LT}^{-1}$	$C_1^{1/2}$	0.14
4	时间 $t$	T	$C_1^{1/2}$	0.14
5	长度 $l$	L	$C_1$	1/50
6	线位移 $\delta$	L	$C_1$	1/50
7	频率 $\omega$	$\text{T}^{-1}$	$C_1^{-1/2}$	7.07
8	弹性模量 $E$	$\text{FL}^{-2}$	1	1
9	应力 $\sigma$	$\text{FL}^{-2}$	1	1

### 1.3 试验土制备

为探究一般土性地基中高承台群桩的地震响应特性, 试验选用单一均质砂土地基(福建标准砂)来制备模型地基土, 其物理力学指标见表 3, 颗粒级配曲线见图 2。试验过程中分层进行填筑, 为使砂土充分饱和, 注水时在剪切箱底部提前放入“Z”型注水管自下而上完成饱和。

表 3 福建标准砂物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of Fujian standard sand	
物理力学参数	参数值
内摩擦角/ $^\circ$	30
相对密实度/%	51
最大孔隙比	0.943
最小孔隙比	0.603
孔隙比	0.78
干密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 479

### 1.4 传感器布置

为了监测桩基受影响最显著的近桩区域, 沿桩周  $130\text{ mm}$  处环形布设 4 个孔隙水压力计, 群桩中间布设 1 个孔隙水压力计作为对比, 埋设高度均

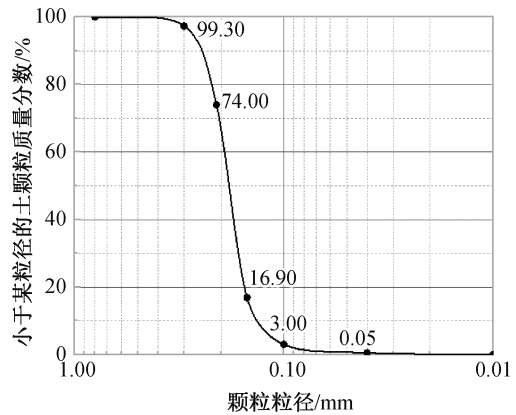


图 2 福建标准砂颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle gradation curve of Fujian standard sand

为距地表  $200\text{ mm}$ , 用于监测桩周孔隙水压力变化。另外, 沿桩身垂直方向安装了 4 个孔隙水压力计, 埋深分别为  $100$ 、 $200$ 、 $400$ 、 $500\text{ mm}$ , 用于监测不同深度下孔隙水压力的变化。同时, 使用 4 个单轴加速度传感器分别监测桩承台和周围地基在 3 个预设深度(即埋深  $150$ 、 $300$ 、 $450\text{ mm}$ )处的地震动加速度响应。此外, 在桩身每隔  $80\text{ mm}$  处布置 1 片应变片, 用于记录应变相关参数的变化。在龙门架上固定 1 个拉线位移传感器, 用于监测桩体水平方向的位移变化。试验埋置两个竖向荷载不同但尺寸相同的群桩, 传感器布置方式一致。徐光明等<sup>[28]</sup>研究了缩尺模型中的粒径效应和边界效应, 认为当桩体距边界距离大于 3 倍桩径时, 模型在试验中所受的边界效应影响明显减少。为尽可能减小两个群桩基础之间的相互作用影响, 将两个群桩桩间距设置为  $600\text{ mm}$ 。传感器布置如图 3 所示。

### 1.5 试验加载方案

根据群桩基础的地理位置和抗震设防烈度(7 度), 本试验选择 El Centro 波作为地震波。试验设计包括 4 种不同的竖向荷载工况, 使用单向水平激振方式, 对每种工况均输入 3 种强度( $0.20g$ 、 $0.34g$ 、 $0.50g$ )的 El Centro 波, 旨在模拟不同强度的地震场景。试验采用逐级加载的方式, 每次振动持续  $30\text{ s}$ 。为确保孔隙水压力能够在两次激励之间完全消散, 每次激励结束后暂停  $2\text{ h}$  再进行下一次激励。试验所用的地震动加速度时程曲线如图 4 所示。

将群桩竖向极限承载力除以安全系数作为群桩竖向承载力特征值, 其中桩基承载力安全系数一般取值范围为  $1.5 \sim 2.5$ , 在特殊情况(如土壤液

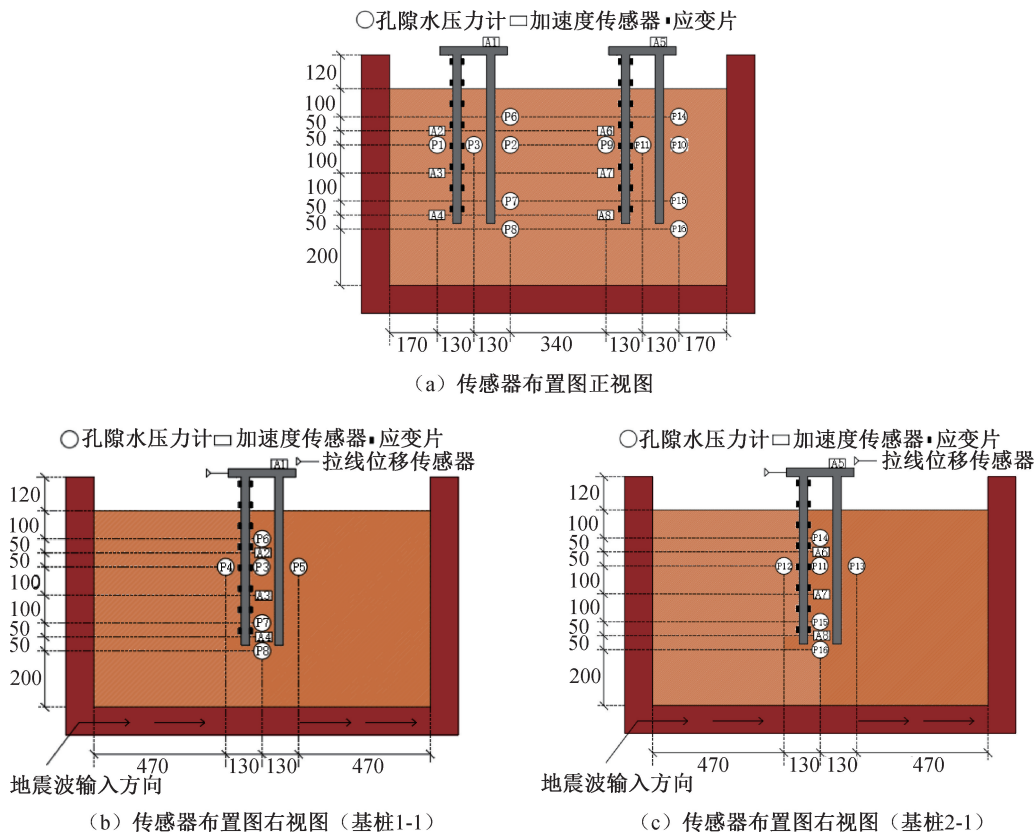


图 3 传感器位置布置图(单位: mm)

Fig. 3 Sensor position layout (unit: mm)

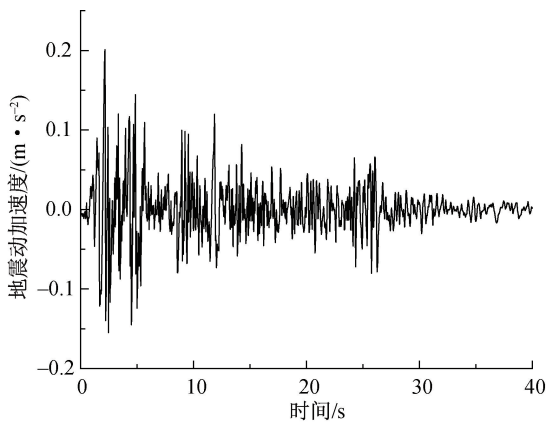


图 4 地震动加速度时程图(El Centro 波)

Fig. 4 Ground acceleration time history diagram (El Centro wave)

化程度较高)下,应取保守安全系数(接近或超过 3.0)。由于本次试验用土为单一均质土,故采用竖向承载力特征值。单一均质土桩基的承载力弱,故将安全系数取值为 3.0,即桩基极限承载力应为桩基容许承载力的 40%。本试验采用胡海波<sup>[27]</sup>群桩竖向荷载下桩基承载力的计算方法,如式(1)所示。

$$p_{ug} = \eta_g n p_g = 0.759 4L^{-0.153 5} D^{-0.073 6} S^{0.414 5} n \left( u \sum_{i=1}^n q_{ik} l_i + A_p q_r \right) \quad (1)$$

式中: $p_{ug}$  为高承台群桩基础竖向极限承载力, kN;  $p_g$  为单桩基础竖向极限承载力, kN;  $\eta_g$  为群桩效应系数;  $n$  为桩数;  $L$  为桩长, m;  $D$  为桩径, m;  $S$  为桩间距, m;  $u$  为单桩周长, m;  $l_i$  为第  $i$  层土的厚度, m;  $q_{ik}$  为第  $i$  层土的桩侧摩阻力标准值(与  $l_i$  对应), kPa;  $A_p$  为桩端截面积,  $m^2$ ;  $q_r$  为桩端处土的容许承载力, kPa。

通过式(1)计算得出试验高承台群桩基础竖向极限承载力为 7.116 kN,相应折减系数取 0.05、0.10、0.15、0.20,故竖向荷载设计值为 0.36、0.71、1.07、1.42 kN。试验荷载采用钢板反锚方式设置,对桩基承台打孔以便螺栓锚固。具体试验加载工况见表 4。

## 2 动力响应分析

### 2.1 超静孔压比时程分析

#### 2.1.1 各深度下超静孔压比峰值

超静孔压比为孔隙水压力与初始有效应力的比值,它是评估土体液化潜势的核心参数。当超静孔压比超过 1.0 时,砂土进入完全液化状态,此时孔隙水压力达到或超过初始有效应力,导致土

表4 试验加载工况

Tab. 4 Test loading conditions

试验编号	输入波形	荷载/kN	地震强度	振动持续时间/s
Test1	El Centro 波	0.36	0.20g、0.34g、0.50g	30
Test2	El Centro 波	0.71	0.20g、0.34g、0.50g	30
Test3	El Centro 波	1.07	0.20g、0.34g、0.50g	30
Test4	El Centro 波	1.42	0.20g、0.34g、0.50g	30

体抗剪强度完全丧失,呈现出类似流体的特性。当超静孔压比介于0.8与1.0之间时,砂土处于接近液化的临界状态,孔隙水压力接近初始有效应力,土体抗剪强度显著下降,可能引发部分液化现象。对桩身各测点处孔隙水压力计(P2、P6、P7、P8、P10、P14、P15、P16)测得的数据进行分析,得出如表5所示不同工况下的超静孔压比峰值。结果表明,在不同地震强度下超静孔压比响应规律一致,即呈现出深层土体液化程度最低、浅层土体液化程度最高、表层土体液化程度介于两者之间的现象。在地震液化过程中,土体的液化程度与土体深度密切相关。随着深度增加土体的上覆压力显著增大,使得土颗粒之间的接触更加紧密、抗液化能力增强,因此深层土体在地震作用下不易发生液化;浅层土体的上覆压力较小、有效应力较低,土颗粒之间的接触相对松散、抗液化能力较弱,因此浅层土体在地震作用下更易发生液化;表层土体的上覆压力最小,但由于其接近地表,土体中的水分更易排出,孔隙水压力积累较少,因此液化程度介于深层土体和浅层土体之间。

### 2.1.2 浅层土体超静孔压比时程分析

通过数据分析发现,浅层(测点埋深200 mm)土体的液化程度高,且在不同地震强度下竖向荷载对桩身超静孔压比的影响规律一致,故选取中等地震强度(0.34g)下浅层P2、P10测点处不同竖

向荷载作用下的超静孔压比数据进行对比分析(图5)。振动开始时,超静孔压比在0上下浮动,随着振动持续,超静孔压比上升达到峰值,此时砂土发生液化,之后超静孔压比随振动时间延长开始缓慢下降。在振动开始时超静孔压比会产生负值,这是因为饱和砂土发生剪切膨胀,导致超静孔压比出现负增长<sup>[12]</sup>。

通过对比从超静孔压比初期增长时刻到超静孔压比峰值时刻所需的时间发现,5%、10%、15%与20%竖向荷载作用下的超静孔压比初期增长时刻分别为6.64、6.63、2.01、2.11 s,超静孔压比峰值时刻分别为12.41、16.06、12.23、13.77 s,超静孔压比增长阶段持续耗时分别为5.77、9.43、10.22、11.66 s。随着竖向荷载增加,从超静孔压比初期增长时刻到超静孔压比峰值时刻所需的时间加长,原因是竖向荷载对浅层区域的砂土起到加固作用。4种工况下的超静孔压比峰值分别为1.04、0.97、0.91、0.87,而竖向荷载与超静孔压比峰值成反比,这说明竖向荷载的增加会降低砂土的液化程度。这是因为施加竖向荷载会增加土体的有效应力,提高土体密实度,减缓孔隙水压的上升速度,从而降低土体的液化程度;另一方面,随着竖向荷载的增加土体抗剪强度也会提高,从而减少土体在动态荷载作用下的剪切变形,降低土体的液化程度。

表5 各工况不同地震强度下的超静孔压比峰值

Tab. 5 Peak pore pressure ratios under different seismic intensities of various working conditions

测点	Test1			Test2			Test3			Test4		
	0.20g	0.34g	0.50g	0.20g	0.34g	0.50g	0.20g	0.34g	0.50g	0.20g	0.34g	0.50g
P6	0.70	0.82	0.89				0.65	0.71	0.81			
P2	0.88	1.04	1.12				0.79	0.91	0.98			
P7	0.67	0.72	0.80				0.62	0.67	0.72			
P8	0.59	0.65	0.72				0.55	0.59	0.66			
P14				0.68	0.74	0.87				0.61	0.69	0.77
P10				0.83	0.97	1.06				0.76	0.87	0.94
P15				0.65	0.68	0.73				0.55	0.59	0.67
P16				0.56	0.63	0.69				0.54	0.58	0.63

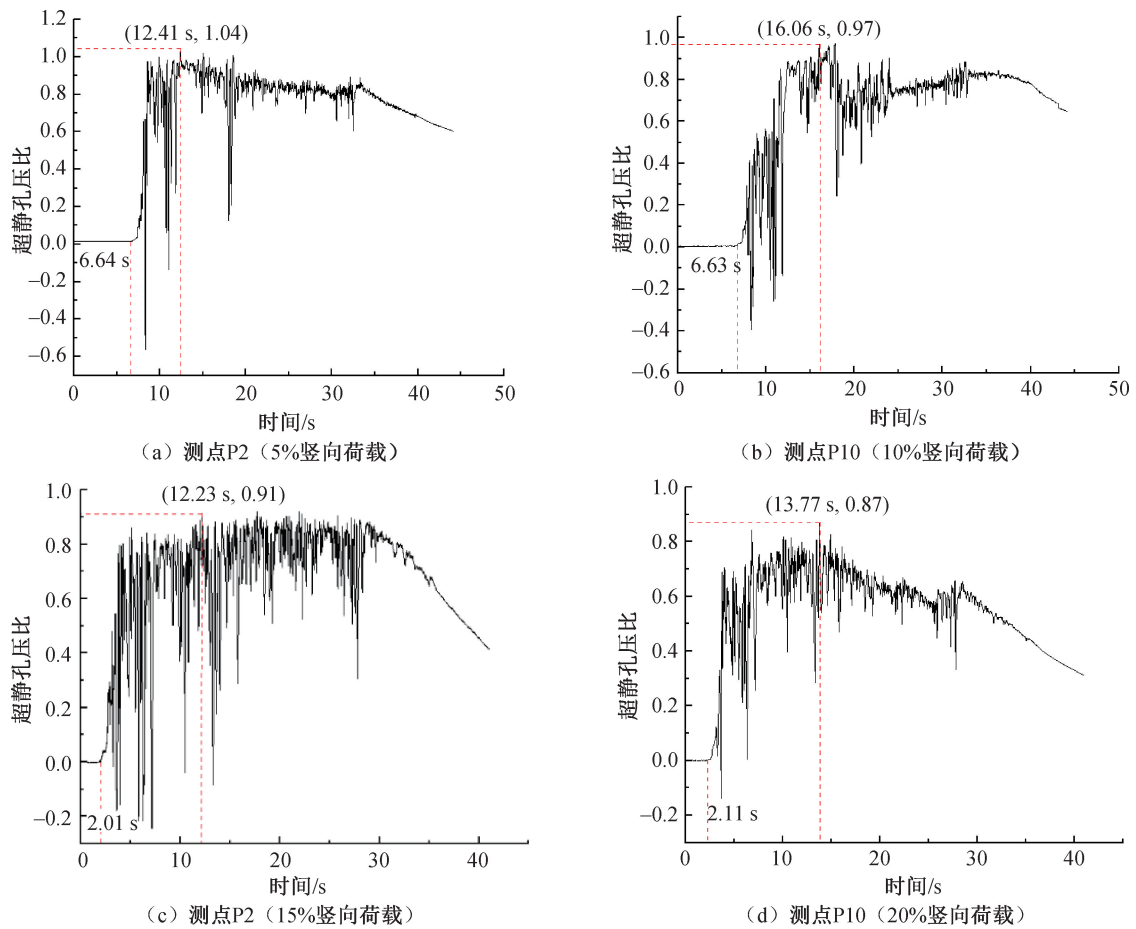


图5 超静孔压比时程曲线

Fig. 5 Pore pressure ratio time history curves

## 2.2 加速度时程分析

### 2.2.1 群桩桩顶加速度响应

通过对 A1 与 A5 测点的加速度分析发现,在不同地震强度下竖向荷载对桩顶加速度的影响规律一致,故选取中等地震强度(0.34g)来观察群桩桩顶在不同竖向荷载作用下的加速度响应规律(图6)。5%、10%、15%、20%竖向荷载作用下的峰值加速度分别为0.338g、0.320g、0.318g、0.364g,15%竖向荷载作用下的峰值加速度最小。当竖向荷载小于15%时,随着竖向荷载增加,桩顶的峰值加速度减小;当竖向荷载大于15%时,随着竖向荷载增加,桩顶的峰值加速度增加。这说明桩顶的峰值加速度受以下两个方面的影响:一方面,竖向荷载的增加会抑制地基土的液化,使得桩-土结构的相互作用力加强;另一方面,竖向荷载的增加会使桩基的惯性力增大。当竖向荷载小于15%时,前者对桩顶加速度的影响效果大于后者;当竖向荷载大于15%时,后者对桩顶加速度的影响效果大于前者。通过比较达到峰值后的加速度时程发现,15%竖向荷载作用下的高频振动幅度最小,这

说明在15%竖向荷载作用下桩-土结构的桩顶加速度响应效果最优。

### 2.2.2 地基土加速度响应

通过对不同竖向荷载作用下地基土中各测点的加速度分析发现,在不同地震强度下竖向荷载对地基土加速度的影响规律一致,故选取中等地震强度(0.34g)来观察各工况下的地基土峰值加速度及出现时间,如表6所示。由表可知,地基土峰值加速度的出现时间随土层深度增加而延迟。地震波从振动台底部向上传播时,浅层土体首先受到激励,因此峰值加速度较早出现。由于地震波的传播路径较长,深层土体的峰值加速度出现时间相对滞后。随着土层深度的增加峰值加速度呈减小趋势,这说明表层、浅层土体的液化程度较高,而深层土体由于上覆压力较大液化程度最低。对比浅层土体在竖向荷载作用下的加速度响应发现,随着竖向荷载增加,地基土加速度与桩顶加速度的响应规律相同,说明竖向荷载对桩-土结构的土体起到了加固作用。15%竖向荷载作用下的加固效果最好,为地基土提供了更多的抗力,桩周土

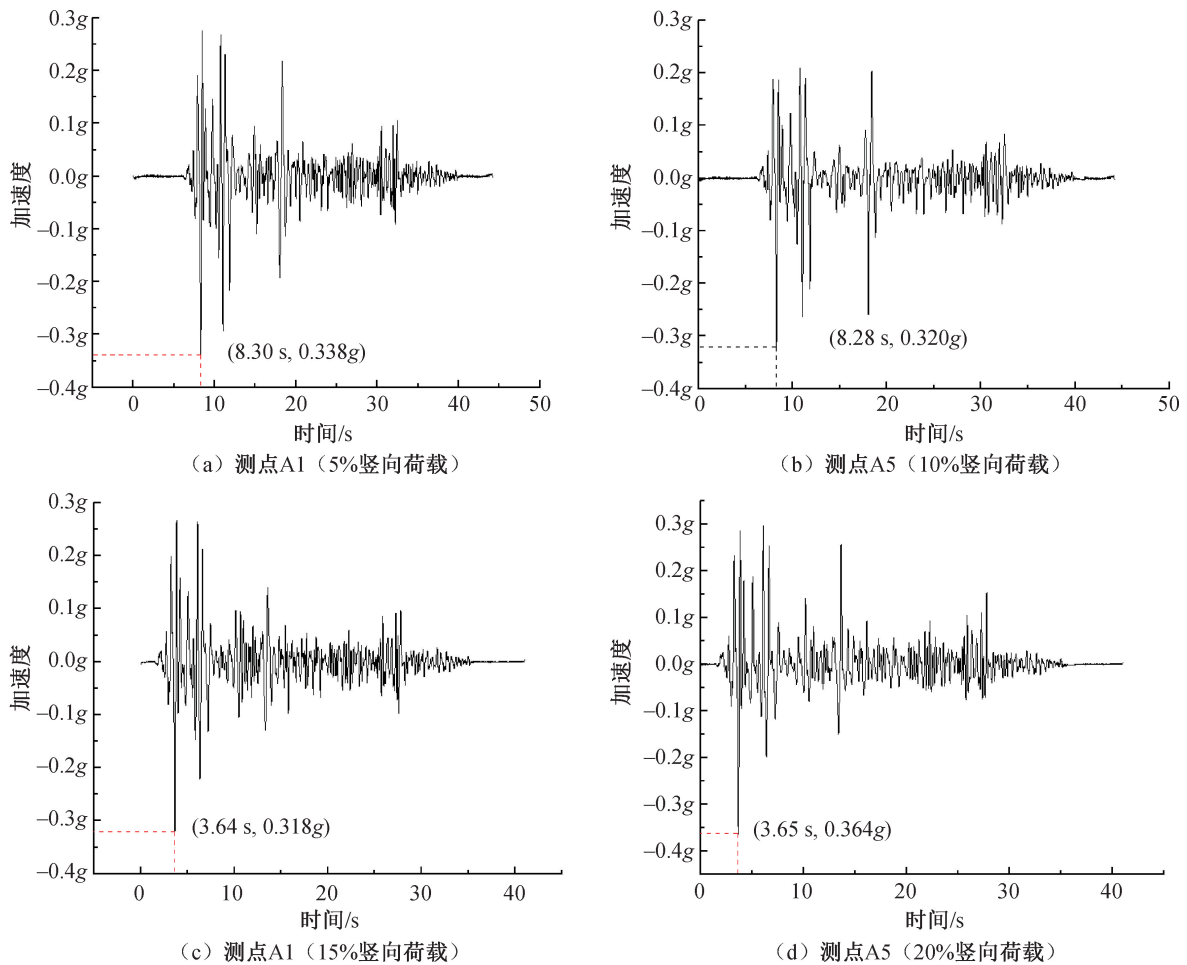


图6 桩顶加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration time history curves of pile top

表6 各工况下不同测点的峰值加速度及峰值出现时间

Tab. 6 Peak acceleration and occurrence time of soil at different measuring points under various working conditions

测点	Test1	Test2	Test3	Test4
A2/A6	0.248g-8.12 s	0.240g-8.19 s	0.210g-8.23 s	0.230g-8.29 s
A3/A7	0.238g-8.45 s	0.232g-8.55 s	0.220g-8.57 s	0.210g-8.63 s
A4/A8	0.210g-8.68 s	0.209g-8.81 s	0.200g-8.89 s	0.170g-8.92 s

体约束明显增强,在一定范围内抑制了砂土的液化。而对比深层土体在竖向荷载作用下的加速度响应发现,20%竖向荷载作用下的峰值加速度最小,原因是越往下桩的上覆压力越大,竖向荷载对深层土体的影响效果大于惯性力,因此20%竖向荷载作用下深层土体的地基土加速度最小。

### 2.3 桩承台位移时程分析

通过拉线位移传感器监测得出桩承台的位移时程,发现在不同地震强度下竖向荷载对桩承台位移的影响规律一致,故选取中等地震强度(0.34g)绘制出桩承台在不同竖向荷载作用下的位移时程曲线(图7)。由于各桩与土体的相互作用不同,尤

其是在液化条件下土体刚度下降,桩的响应更加复杂,可能会导致各桩的位移方向不一致;而且群桩中各桩之间也存在相互影响,某些桩可能会受到相邻桩的挤压或拉力,这也可能导致位移方向相反。因此,侧向位移的正负无真实意义,由图7可知,5%与10%竖向荷载作用下桩承台沿振动方向发生的侧向位移分别为12.37、11.62 mm,15%竖向荷载作用下的侧向位移为3.09 mm。由此可知,当竖向荷载 $\leq 15\%$ 时,随着竖向荷载增加侧向位移减小,这是因为当竖向荷载较小时,砂土液化比较明显,而竖向荷载的增加能够抑制砂土液化,使桩周土体得到加固,提高地基土的抗倾覆力,大大减小侧向位移。当竖向荷载增加到20%时,侧向位移为35.20 mm,

这说明当竖向荷载增加到一定值的时候,对桩周土体的加固作用进一步提升,同时竖向荷载的增加会使结构整体的惯性力增大,地基土的抗倾覆力直线下降,因而发生倾覆的可能性会更大。

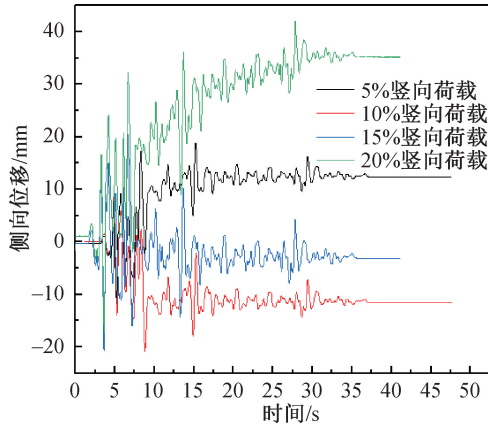


图 7 承台的位移时程曲线

Fig. 7 Displacement time history curves of pile cap

### 2.4 群桩桩身弯矩时程分析

在地震荷载的作用下,桩身弯矩的变化是桩基破坏的关键因素之一。本试验采用应变片来测量桩身应变,并依据梁单元的基本理论计算桩身弯矩  $M$  (单位:  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ),如式(2)所示。

$$M = \frac{EI(\varepsilon_t - \varepsilon_c)}{2r} \quad (2)$$

式中:  $E$  为材料弹性模量,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $I$  为截面惯性矩,  $\text{m}^4$ ;  $\varepsilon_t, \varepsilon_c$  分别为桩身拉应变、压应变;  $r$  为试验桩的半径,  $\text{m}$ 。

将测得的应变片数据代入式(2)中计算得出桩身弯矩,发现在不同地震强度下竖向荷载对桩身弯矩的影响规律一致,故选取中等地震强度 ( $0.34g$ ) 对各测点处的弯矩峰值及出现时间进行分析(表 7)。通过观察发现,桩身弯矩峰值的出现

时间随土层深度的增加而延迟,与地基土峰值加速度出现时间的规律一致。浅层区域由于地震波传播路径短、土体液化发展较快以及桩-土相互作用显著,弯矩峰值较早出现;而深层区域由于地震波传播路径长、土体液化发展较慢以及土体约束作用较强,弯矩峰值出现时间相对滞后。根据表 7 绘制桩身弯矩图像,如图 8 所示。通过观察发现,桩身弯矩峰值自下而上先增大后减小,其最大值出现在接近表层土体的位置,这是因为地表处发生液化时,土体流动性较大、有效土抗力最小,桩身弯矩在上部结构惯性与砂土侧向流动的共同作用下,在表层土体处产生弯矩峰值。此外,随着荷载增加,弯矩先减小后增大,这说明荷载的增加能够抑制砂土液化,使土体得到加固。然而弯矩不仅受到砂土液化的影响,当竖向荷载超过一定阈值(如 15%)时,桩基周围土体的变形和液化程度可能会发生显著变化,导致地基土丧失部分承载力。在这种情况下,桩周土体约束作用减弱,使得桩在地震荷载作用下更易产生较大的弯矩,从而使弯矩峰值再次增大,因此 20% 竖向荷载作用下

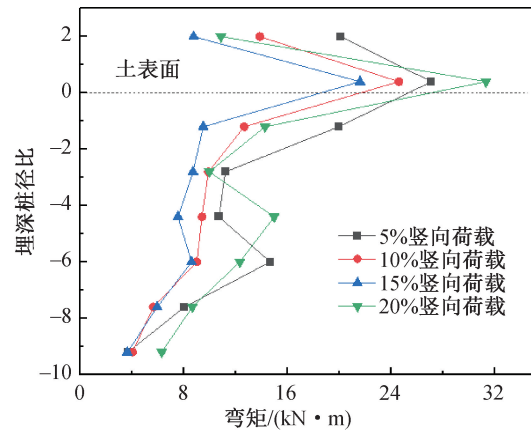


图 8 桩身弯矩变化规律

Fig. 8 Variation law of pile bending moment

表 7 各工况下的桩身弯矩峰值与峰值出现时间

Tab. 7 Peak value and occurrence time of pile bending moment under various working conditions

埋深桩径比	Test1	Test2	Test3	Test4
2.0	20.09 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.37 s	13.86 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.41 s	8.74 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.46 s	10.85 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.52 s
0.4	27.12 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.39 s	24.61 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.42 s	21.60 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.54 s	31.34 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.54 s
-1.2	19.96 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.44 s	12.66 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.49 s	9.49 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.53 s	14.26 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.57 s
-2.8	11.20 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.56 s	9.89 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.52 s	8.70 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.60 s	9.95 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.62 s
-4.4	10.70 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.59 s	9.39 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.62 s	7.53 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.64 s	14.97 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.82 s
-6.0	14.67 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.67 s	8.99 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.70 s	8.59 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.66 s	12.31 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.81 s
-7.6	8.04 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.66 s	5.63 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.72 s	5.93 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.77 s	8.64 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.90 s
-9.2	3.67 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.70 s	4.02 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.79 s	3.63 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.86 s	6.28 $\text{kN} \cdot \text{m}$ -9.93 s

的弯矩峰值大于 15% 竖向荷载作用下的弯矩峰值。对于浅层土体而言,在砂土液化和上部惯性力的共同作用下,15% 竖向荷载作用下的弯矩峰值最小。观察桩底可发现,在不同竖向荷载的作用下,桩底的弯矩峰值没有太大的区别,这说明砂土的液化和桩基周围土体的变形对深层土体影响不大。砂土液化本身就易发生在浅层土体,而深层土体的上覆压力较大,故液化程度较低。

### 3 结论

1) 液化群桩基础的超静孔压比在浅层土体处最大,且超静孔压比峰值随竖向荷载的增加而减小,原因是土体的有效应力随竖向荷载的增加而增加,从而降低了砂土的液化程度。

2) 随着竖向荷载增加,桩顶加速度和地基土加速度的峰值均呈现先减小后增大的趋势,而竖向荷载为 15% 时两者峰值最小,原因是竖向荷载的增加能够抑制砂土液化,同时也会增加结构惯性力。

3) 桩承台位移的峰值随竖向荷载的增加先减小后增大,当竖向荷载  $\geq 15\%$  时,随着荷载增加桩周土体的加固作用进一步提升,同时竖向荷载的增加会使结构整体的惯性力增大,地基土的抗倾覆力直线下降,因而发生倾覆的可能性会更大。

4) 桩身弯矩峰值自下而上先增大后减小,其最大值出现在接近表层土体的位置。说明地基土发生液化时,土体流动性较大、有效土抗力最小,桩身弯矩在上部结构惯性与砂土侧向流动的共同作用下,在表层土体处产生弯矩峰值。随着竖向荷载增加,弯矩峰值也呈现先减小后增大的趋势,在砂土液化和上部惯性力的共同作用下,竖向荷载为 15% 时弯矩峰值最小。

#### 参考文献:

- [1] 王晓伟,赫中营,叶爱君. 桥梁高桩承台基础地震破坏机理试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014,42(9):1313-1320.  
WANG X W, HE Z Y, YE A J. Experimental study on seismic failure mechanism of elevated pile-cap foundation for bridge structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014,42(9):1313-1320.
- [2] 王蕾,董林,夏坤,等. 1976 年唐山大地震 CPT 液化数据库检验[J]. 震灾防御技术,2021,16(4):737-749.  
WANG L, DONG L, XIA K, et al. Inspection on CPT-based liquefaction database from 1976 Tangshan earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021,16(4):737-749.
- [3] 董林,桑志心,王蕾,等. 1976 年唐山大地震 CPT 液化数据库重构[J]. 震灾防御技术,2022,17(4):741-750.  
DONG L, SANG Z X, WANG L, et al. Reconstruction of the CPT-based liquefaction database from 1976 Tangshan earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2022,17(4):741-750.
- [4] 李兆焱,张升,袁晓铭,等. 2023 年甘肃积石山 6.2 级地震灾害特征[J]. 防灾科技学院学报,2024,26(2):43-52.  
LI Z Y, ZHANG S, YUAN X M, et al. Characteristics of disasters caused by the Jishishan  $M_s 6.2$  earthquake in Gansu Province in 2023 [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2024,26(2):43-52.
- [5] 汪云龙,马佳钧,王维铭,等. 2023 年 2 月 6 日土耳其 7.8 级地震液化震害宏观特征初探[J]. 世界地震工程,2023,39(3):39-44.  
WANG Y L, MA J J, WANG W M, et al. Preliminary study on the macroscopic characteristics of liquefaction damage following Türkiye  $M_w 7.8$  earthquake on February 6, 2023 [J]. World Earthquake Engineering, 2023,39(3):39-44.
- [6] 许成顺,豆鹏飞,杜修力,等. 场地土-群桩基础-结构体系动力响应研究——大型振动台系列试验方案设计[J]. 防灾减灾工程学报,2019,39(3):365-374+411.  
XU C S, DOU P F, DU X L, et al. Experimental study on seismic response of superstructure-piles-soil system—design of test plan for large-scale shaking table model experiments [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019,39(3):365-374+411.
- [7] 许成顺,豆鹏飞,杜修力,等. 液化场地-群桩基础-结构体系动力响应分析——大型振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(12):2173-2181.  
XU C S, DOU P F, DU X L, et al. Dynamic response analysis of liquefied site-pile group foundation-structure system—large-scale shaking table model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019,41(12):2173-2181.
- [8] WU T, GALINDO R, SUN H L, et al. Lateral dynamic responses of coastal group piles considering pile-water-soil interactions[J]. Ocean Engineering, 2023,288:115997.
- [9] 吕西林,任红梅,李培振,等. 液化场地自由场体系的数值分析及振动台试验验证[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S2):4046-4053.  
LYU X L, REN H M, LI P Z, et al. Numerical analysis of free field system in liquefiable site and validation of shaking table tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(S2):4046-4053.

- [10] 苏雷,赵卓,毕建巍,等. 基于FLAC<sup>3D</sup>液化场地桩基动力反应振动台试验数值分析方法[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(3):454-463.  
SU L,ZHAO Z,BI J W, et al. Numerical simulation of shake table test on dynamic response of pile foundation in liquefiable ground using FLAC<sup>3D</sup> [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2022,42(3):454-463.
- [11] 李雨润,王佳玮,邹泽,等. 变频规则波输入下直斜群桩动力响应对比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2019,39(2):191-200.  
LI Y R,WANG J W,ZOU Z, et al. Comparative experimental study on dynamic response of straight inclined piles under variable frequency regular wave input[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2019,39(2):191-200.
- [12] 张健,李雨润,戎贤,等. 液化土中斜群桩承台动力响应特性及桩身弯矩分布规律研究[J]. 地震工程与工程振动,2021,41(3):235-244.  
ZHANG J,LI Y R,RONG X, et al. Dynamic response of pile cap and distribution law of pile bending moment for batter pile group in liquefied soil [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2021,41(3):235-244.
- [13] 罗凯,张小勇,陈家勋,等. 既有竖向荷载对承台桩水平承载特性影响的PIV试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(2):1-8.  
LUO K,ZHANG X Y,CHEN J X, et al. PIV experimental study of existing vertical load on horizontal bearing capacity of pile with cap[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2023,40(2):1-8.
- [14] 张恒源,钱德玲,沈超,等. 水平和竖向地震作用下液化场地群桩基础动力响应试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(3):905-914.  
ZHANG H Y,QIAN D L,SHEN C, et al. Experimental investigation on dynamic response of pile group foundation on liquefiable ground subjected to horizontal and vertical earthquake excitations[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(3):905-914.
- [15] 冯忠居,段久琴,张聪,等. 液化场地大直径变截面单桩动力响应研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(5):56-67.  
FENG Z J,DUAN J Q,ZHANG C, et al. Study on dynamic response of large diameter variable cross-section single pile in liquefaction site [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2024,51(5):56-67.
- [16] 冯忠居,李玉婷,赵瑞欣,等. 可液化场地变截面群桩基础动力响应研究[J]. 科学技术与工程,2023,23(18):7886-7894.  
FENG Z J,LI Y T,ZHAO R X, et al. Dynamic response of variable cross-section pile group foundation in liquefiable ground [J]. Science Technology and Engineering,2023,23(18):7886-7894.
- [17] 冯忠居,孟莹莹,张聪,等. 强震作用下液化场地群桩动力响应及p-y曲线[J]. 岩土力学,2022,43(5):1289-1298.  
FENG Z J,MENG Y Y,ZHANG C, et al. Dynamic response and p-y curve of pile groups in liquefaction site under strong earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(5):1289-1298.
- [18] ZHANG X L,FANG L J,HAN Y. Study on seismic response difference of horizontal and inclined liquefied site-pile-structure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2023,175:108244.
- [19] 李雨润,陈华斌,强东峰,等. 地震作用下不同厚度饱和砂土中直群桩结构动力响应试验研究[J]. 地震工程学报,2019,41(4):834-839+852.  
LI Y R,CHEN H B,QIANG D F, et al. Experimental study on the dynamic response of vertical pile-group structure in saturated sand with different thicknesses under earthquake action [J]. China Earthquake Engineering Journal,2019,41(4):834-839+852.
- [20] 李雨润,强东峰,邹泽,等. 不同厚度饱和砂土中群桩结构动力响应试验研究[J]. 地震工程学报,2018,40(4):625-630.  
LI Y R,QIANG D F,ZOU Z, et al. Experimental study on the dynamic response of pile-group structure in saturated sand with different thicknesses [J]. China Earthquake Engineering Journal,2018,40(4):625-630.
- [21] 周恩全,伊思航,文艳,等. 可液化倾斜场地中桩基动力响应振动台试验研究[J]. 地震工程学报,2020,42(3):732-741.  
ZHOU E Q,YI S H,WEN Y, et al. Shaking table test on the dynamic response of a pile foundation in an inclined liquefiable site [J]. China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):732-741.
- [22] MARTINELLI M,BURGHIGNOLI A,CALLISTO L. Dynamic response of a pile embedded into a layered soil [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2016,87:16-28.
- [23] 沈吉荣,王志华,林文品,等. 液化土体侧向扩展条件下群桩动力响应振动台模型试验[J]. 自然灾害学报,2018,27(6):27-33.  
SHEN J R,WANG Z H,LIN W P, et al. Shaking table test on the dynamic response of pile group under lateral spreading in liquefied ground [J]. Journal of Natural Disasters,2018,27(6):27-33.

- [24] 李雨润,闫志晓,张健,等. 饱和砂土中直群桩动力响应离心机振动台试验与简化数值模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(6):1252-1264.  
LI Y R, YAN Z X, ZHANG J, et al. Centrifugal shaking table test and numerical simulation of dynamic responses of straight pile group in saturated sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39 (6): 1252-1264.
- [25] CHATTERJEE K, CHOUDHURY D, KUMAR M. Influence of depth of liquefiable soil layer on dynamic response of pile group subjected to vertical load [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022, 20(1): 113-142.
- [26] 陈国兴,王志华,左熹,等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报,2010,32(1):89-97.  
CHEN G X, WANG Z H, ZUO X, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (1): 89-97.
- [27] 胡海波. 公路桥梁群桩基础竖向承载特性研究[D]. 西安:长安大学,2020.  
HU H B. Study on vertical bearing characteristics of pile group foundation of highway bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [28] 徐光明,章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报,1996,18(3):80-86.  
XU G M, ZHANG W M. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18 (3): 80-86.
- (责任编辑 唐彦彦)
- 
- (上接第 17 页)
- [18] FORTAN M, DEJANS A, KARABULUT B, et al. On the strength of stainless steel fillet welds [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106081.
- [19] 任建,苗吉军,李健,等. 连续焊接不锈钢金属屋面系统温度循环作用下工作性能试验研究与理论分析[J]. 建筑结构,2021,51(18):62-68+61.  
REN J, MIAO J J, LI J, et al. Experimental research and theoretical analysis on working performance for continuous welded stainless steel metal roofing system subject to temperature cycling [J]. Building Structure, 2021, 51 (18): 62-68+61.
- [20] 李浩,区彤,辛志勇,等. 连续焊接不锈钢屋面系统抗风揭性能研究[J]. 钢结构(中英文),2019,34(8):21-26+36.  
LI H, OU T, XIN Z Y, et al. Research on wind resistance of continuous welded stainless steel roofing system [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2019, 34(8): 21-26+36.
- [21] WANG D Y, XIN Z Y, OU T, et al. Experimental study on mechanical properties of the key connection joint for the continuous welded stainless steel roof system [J]. Structures, 2023, 48: 53-63.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205—2020[S]. 北京:中国计划出版社,2020.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for acceptance of construction quality of steel structures: GB 50205—2020 [S]. Beijing, China Planning Press, 2020.
- [23] WANG F L, YANG J, PAN Z F. Progressive collapse behaviour of steel framed substructures with various beam-column connections [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104399.
- (责任编辑 唐彦彦)