



岩土力学
Rock and Soil Mechanics
ISSN 1000-7598, CN 42-1199/O3

《岩土力学》网络首发论文

题目: 强震作用下液化场地群桩动力响应及 p - y 曲线
作者: 冯忠居, 孟莹莹, 张聪, 赖德金, 朱继新, 林路宇
DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1447
收稿日期: 2021-08-27
网络首发日期: 2022-04-13
引用格式: 冯忠居, 孟莹莹, 张聪, 赖德金, 朱继新, 林路宇. 强震作用下液化场地群桩动力响应及 p - y 曲线[J/OL]. 岩土力学. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2021.1447>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

强震作用下液化场地群桩动力响应及 p - y 曲线

冯忠居¹, 孟莹莹¹, 张 聪¹, 赖德金², 朱继新², 林路宇²

(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: 为研究液化场地中群桩在强震作用下的动力响应特征及桩侧土抗力-桩土相对位移 (p - y) 曲线规律, 依托海文大桥实体工程, 基于振动台模型试验, 开展了 0.15g~0.35g 地震动作用饱和粉细砂土层不同埋置深度下的砂土孔压比、桩身弯矩及 p - y 曲线动力响应研究。结果表明: 地震动强度达到 0.25g 时, 不同埋置深度下的饱和粉细砂土层孔压比均大于 0.8, 产生液化现象, 且随埋置深度增加, 孔压比增长时刻明显滞后; 不同埋置深度下, 桩身弯矩最大值均位于液化土层和非液化土层分界面处; 同一埋置深度时, 随地震动强度的增大, p - y 曲线所包围的面积逐渐增大, 其整体斜率逐渐变小, 说明桩-土相互作用动力耗能逐渐增大, 桩周土体刚度逐渐减小; 随埋置深度增加, p - y 曲线所包围的面积逐渐减小, 其整体斜率逐渐增大, 说明桩-土相互作用动力耗能逐渐减小, 桩周土体刚度逐渐增大。因此, 液化场地桥梁群桩抗震设计时, 综合考虑液化土层与桩基础的相互位置关系, 确保桩基础在液化土层与非液化土层分界处的抗弯承载能力。

关 键 词: 桥梁桩基; 强震作用; 振动台试验; 液化场地; 动力响应; p - y 曲线

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 05-0000-10

Dynamic response and p - y curve of pile group in liquefaction site under strong earthquake

FENG Zhong-ju¹, MENG Ying-ying¹, ZHANG Cong¹, LAI De-jin², ZHU Ji-xin², LIN Lu-yu²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;

2. Xiamen Road and Bridge Engineering Investment Development Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361026, China)

Abstract: In order to study the dynamic response characteristics and pile side soil resistance-the relative displacement of pile and soil (p - y) curve law of pile group in liquefaction site under strong earthquake. Based on the project of Haiwen Bridge and shaking table model test, the dynamic response of sand pore pressure ratio, bending moment of pile and p - y curve under different embedded depth of saturated silty sand under 0.15g-0.35g seismic action were studied. The results show that when the seismic intensity reaches 0.25g, the pore pressure ratio of saturated silty sand under different embedded depth is more than 0.8, resulting in liquefaction phenomenon. With the increase of embedded depth, the increase time of pore pressure ratio is obviously delayed. At different embedded depths, the maximum bending moment of pile appears at the interface between liquefied soil layer and non-liquefied soil layer. At the same embedded depth, with the increase of seismic intensity, the area surrounded by p - y curve increases gradually, and its overall slope decreases gradually, indicating that the dynamic energy dissipation of pile-soil interaction increases gradually, and the stiffness of soil around pile decreases gradually. With the increase of embedded depth, the area surrounded by p - y curve gradually decreases, and its overall slope gradually increases, indicating that the dynamic energy dissipation of pile-soil interaction decreases and the stiffness of soil around the pile gradually increases. Therefore, in the seismic design of bridge pile group in liquefied sites, the position relationship between liquefied soil layer and pile foundation is comprehensively considered to ensure the bending bearing capacity of pile foundation at the boundary between liquefied soil layer and non-liquefied soil layer.

Keywords: bridge pile foundation; strong earthquake action; shaking table test; liquefaction site; dynamic response; p - y curve

收稿日期: 2021-08-27

修回日期: 2022-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51708040); 海南省交通科技项目 (No. HNZXY2015-045R)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51708040) and the Hainan Provincial Transportation Science and Technology Project (HNZXY2015-045R)

第一作者简介: 冯忠居, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事桩基础工程、岩土工程方面的研究。E-mail: ysf@gl.chd.edu.cn

通讯作者: 孟莹莹, 女, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事基础工程、岩土工程方面的研究。E-mail: 369927231@qq.com

1 引言

桩基础在地质条件复杂、抗震要求较高的桥梁基础工程中应用十分广泛^[1-4]。近年来,液化场地桥梁桩基震害频发,对桥梁结构的整体安全造成威胁^[5-6],因此亟需开展砂土液化过程中桩-土动力相互作用研究^[7-8],探明其相互作用机制。

目前,有关液化场地桥梁桩基的损害及桩-土相互作用问题,许多学者开展了相关研究工作:针对液化场地桩基动力响应方面,冯忠居等^[9-12]利用振动台试验,研究了在不同地震动强度、不同波形作用下处于可液化土层中的桩基桩身加速度、桩顶位移、桩身弯矩、孔压比等动力响应特征,为液化场地桥梁桩基设计提供了科学依据;凌贤长^[13-14]、唐亮等^[15]基于桩-土-结构体系相互作用振动台试验,再现了地震引发砂土液化的各种宏观现象,研究了土层液化时桥梁桩基的震害响应问题;汪明武等^[16]基于离心机试验,分析并研究了液化场地群桩基础的动力响应特征,并再现了桩基的破坏状态、程度及机制;李雨润等^[17-18]基于大型振动台试验,对处于不同厚度的可液化土层时桩-土作用动力响应特性进行了分析,并建立了桩-土相互作用的动力 p - y 滞回曲线;冯士伦^[19]、王建华^[20]等基于可液化土层振动台试验,探讨了土层液化后桩基的横向承载特性,并提出砂土液化后桩的 p - y 曲线及极限抗力的变化规律;吕西林^[21]、李培振^[22-23]等采用 FLAC^{3D} 有限元软件对液化场地桩基动力响应进行了非线性分析,并通过振动台试验验证了方法的有效性;许成顺等^[24]基于桩-土作用的振动台试验,研究了桩和土的动力响应及变形规律及液化土层的孔压变化特性;Daniel 等^[25]基于离心模型试验结果,采用反分析法反算得出 p 与 y 的时程,继而得到 p - y 曲线,随后分析了不同因素下液化砂土中桩-土相互作用的机制;王成雷等^[26]基于振动台模型试验,阐述了计算砂土层-桩动力 p - y 曲线的方法,并对对比分析了动力作用 p - y 曲线和拟静力 p - y 滞回曲线;惠舒清^[27]、伍小平^[28]等建立了可液化土层中桩土动力耦合体系数值模型,分析了液化土层内摩擦角、渗透系数、相对密度及上覆土层厚度对 p - y 曲线的影响,并探讨了 p 乘因子法中 p - y 曲线在液化场地群桩-土动力相互作用分析中的可靠性。

以上研究多是针对单一可液化土层埋置深度及单一地震动强度进行的。因此,本文针对液化场地群桩-土体系大型振动台试验,研究了可液化土层埋置深度不同时桩在不同地震动强度作用下的动力响

应特性,并分析了桩-土动力相互作用的 p - y 曲线。

2 工程概况

海文大桥(原铺前大桥)位于强震且地质环境复杂的海洋环境中,桥址区抗震设防烈度为Ⅷ度,50 年超越概率 10% 的地震动强度为 $0.35g$ 、50 年超越概率 2% 的地震动强度为 $0.59g$,其远超过《公路工程抗震设计规范》(JTGB02—2013)^[29]第 3.1.4 条中设防烈度的设计值 ($0.20g$),且地震动强度在国内外罕见。根据海文大桥地质勘察报告,桩基础周围的粉细砂土层存在明显的振动液化特性。液化场地每个承台由 4 根桩径为 2 m,桩长为 32 m 的摩擦桩组成,桩间距为 4 m,承台尺寸为 $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 3\text{ m}$,桩基自上而下依次穿过黏土层、饱和粉细砂层、卵石层。

3 振动台试验

本次振动台模型试验在中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动实验室开展,主要技术指标如表 1 所示。

表 1 振动台技术指标

Table 1 Technical specifications of shaking table

台面尺寸 长/m 宽/m	最大 载重/t	最大位移幅值/mm			最大加速度幅值/ g			工作 频率/Hz
		X、Y 向	Z 向	X、Y 向	Z 向	X、Y 向	Z 向	
5 5	30	± 80	± 50	1.0	0.7	0.5~40		

为了最大程度上模拟原型实际情况,本次振动台模型试验选择精度高、效果好的叠层型剪切式模型箱^[30-31],尺寸为 $3.7\text{ m} \times 2.1\text{ m} \times 1.7\text{ m}$,如图 1 所示。

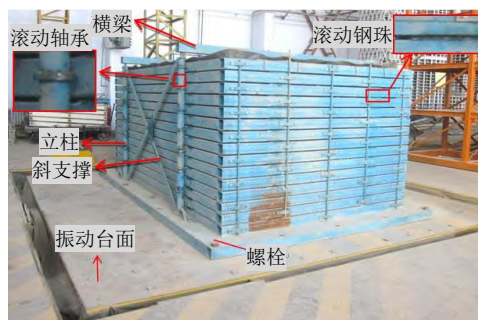


图 1 叠层剪切式模型箱

Fig.1 Laminated shear model box

3.1 相似关系设计

本次模型振动台试验基于 Buckingham π 定理建立的人工质量相似律,几何相似比为 1:25,材料选择实际工程的原型材料,各物理量的相似常数由量纲分析法可得,如表 2 所示。

表2 振动台模型试验相似常数

Table 2 Shaking table model test similarity constant

序号	物理量	量纲	相似常数关系式	相似常数
1	加速度 a	LT^{-2}	$C_a=1$	1
2	时间 t	T	$C_t=C_l^{1/2}$	0.2
3	线尺寸 l	L	C_l	1/25
4	弹性模量 E	MLT^{-2}	$C_E=1$	1
5	应力 σ	MLT^{-2}	$C_\sigma=1$	1
6	应变 ε	—	1	1
7	黏聚力 c	MLT^{-2}	$C_c=1$	1
8	内摩擦角 φ	—	$C_\varphi=1$	1
9	人工质量	M	—	—

在不影响结构刚度的同时,通过设置人工质量弥补惯性力效应和重力效应的不足,根据人工质量的相似条件^[32-35],在桩顶配置 100 kg 的人工质量。

3.2 土体边界模拟

一方面试验中通过控制地基平面最小尺寸 D 与结构平面尺寸 d 之比为 5,降低模型箱边界效应^[32];另一方面,为了降低地震波反射对试验结果的影响,在模型箱侧壁放置了一层橡胶垫,以达到消波处理的作用^[14]。

3.3 模型桩

模型桩及承台采用 C35 混凝土材料制备,线尺寸相似常数为 1/25,则模型桩的桩长为 128 cm,桩径为 8 cm,配筋率为 2.4%,钢筋材料选取 Q235 直径为 4 mm 的钢筋。模型桩如图 2 所示。通过万能机试验机得到模型桩的抗压强度为 36.8 MPa,曲线如图 3 所示。



图2 模型桩
Fig.2 Model pile

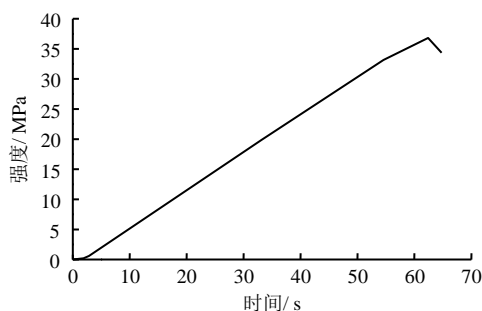


图3 模型桩抗压强度测试曲线
Fig.3 Compressive strength test curve of model pile

3.4 模型土的制备

地基土层共分 3 层,自上而下分别为黏土层、饱和粉细砂层和卵石层。黏土层干密度为 1.68 g/cm^3 ,塑限为 16.5%,液限为 26.2%;卵石层最大颗粒粒径为 12 mm;砂土层所用砂为粉细砂,相对密实度 D_r 为 45%,颗粒级配如图 4 所示。试验过程中土层采用分层法进行均匀填筑,注水静置 24 h 使粉细砂层充分饱和后再进行试验。

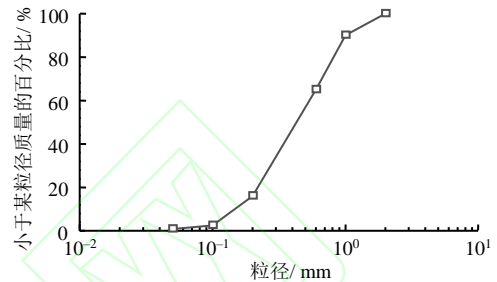
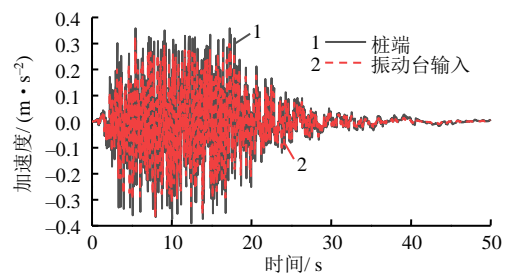


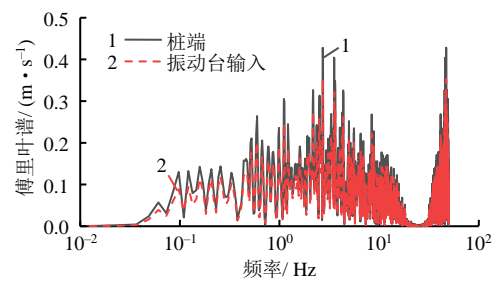
图4 粉细砂颗粒级配曲线
Fig.4 Silty sand grain grading curve

3.5 地震波选取及试验工况

选取针对海文大桥人工合成的 50 年超越概率 10% (5010 波) 的地震动峰值作为地震动输入,对其进行滤波和基线校正,并按比例缩放,使地震动峰值在 $(0.15 \sim 0.35)g$ 范围内。由于试验过程中台面处加速度传感器损坏,考虑桩端距模型箱底部较近,对比桩端与输入地震波的加速度时程响应和傅里叶谱,桩端处有微小放大趋势,整体一致性较好。图 5 为输入地震波、桩端输出的时程响应及相对应的傅里叶谱对比,试验工况如表 3 所示。



(a) 地震波时程图



(b) 傅里叶谱图

图5 地震波时程与傅里叶谱
Fig.5 Seismic wave time history and Fourier spectrum

表 3 试验工况
Table 3 Decoration of tests

地震动强度	砂土埋置深度/m	震动持时/s
0.15g、0.20g、0.25g、0.30g、0.35g	24, 74, 90	50

试验时把同一个模型箱分为 3 个功能区, 同时进行 3 组试验。这样可以保证 3 组试验除了砂土埋置深度不同外, 其余条件都相同, 从而保证了不同工况下试验的一致性。为减小边界条件的影响, 各功能区之间的隔档采用柔性材料泡沫板。

沿桩身对称布置电阻式应变片, 桩周土中布设加速度传感器, 并在可液化土层布设量程为 100 kPa、电阻为 350 Ω 的电阻式孔隙水压力计。为防止土体颗粒对孔隙水压力计的影响, 用棉花对孔隙水压力计进行包裹。土层中所有埋设的传感器均做防水处理。测试元件布置如图 6 所示。

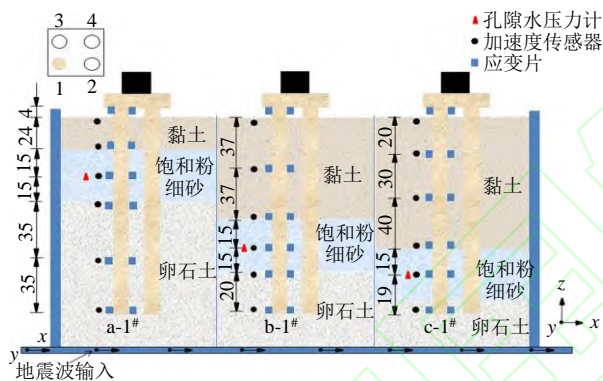


图 6 测试元件布置位置图 (单位: cm)

Fig.6 Layout diagram of test components (unit:cm)

4 动力响应结果分析

4.1 孔压比时程分析

孔压比为孔隙水压力与有效应力的比值, 可液化土振动过程中孔压比越大, 表明液化程度越大, 因此, 孔压比可用于判断土层液化程度。

不同地震动强度作用下不同埋置深度处粉细砂土层孔压比的变化规律如图 7 所示。

由图 7 可看出, 不同地震动强度作用下粉细砂位于相同埋置深度时孔压比发展规律相似: 初震时, 孔压比先在 0 附近循环, 随后迅速上升到最大值, 此时饱和粉细砂达到初始液化状态。随着地震动激励的持续施加, 饱和粉细砂层的孔压一直保持在液化状态。加载过程中孔压比出现负值, 这是由于在振动过程中, 饱和粉细砂出现剪胀状态, 导致超静孔隙水压力出现负增长。

不同地震动强度作用下, 饱和粉细砂埋置深度分别为 39、89、105 cm 时, 孔压比分别在 9.7、14.7、

18.7 s 时开始迅速增加, 随深度表现出明显滞后性, 说明液化现象由浅入深发展, 砂土越靠近地表越易发生液化。

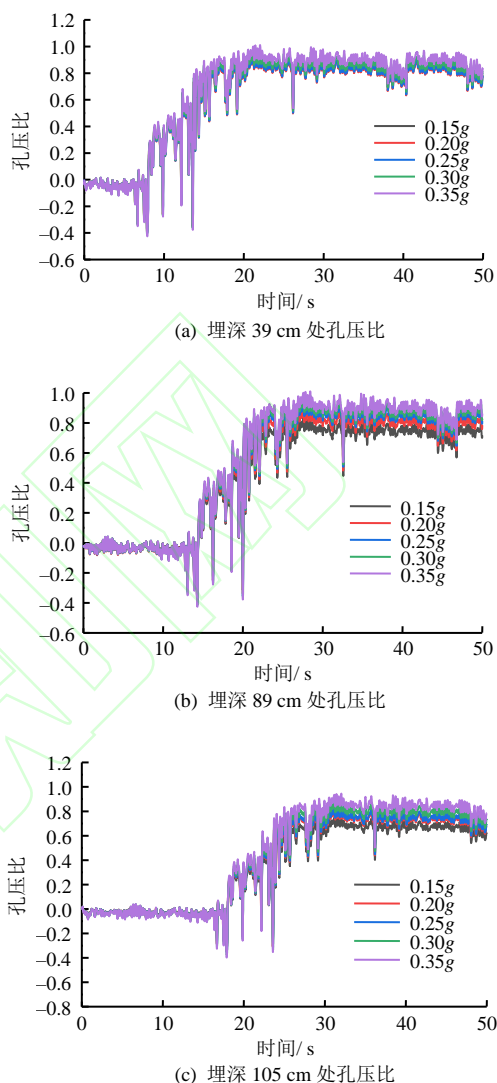


图 7 不同埋置深度处孔压比

Fig.7 Pore pressure ratio at different embedded depths

饱和粉细砂位于同一埋置深度时, 随着地震动强度的增大, 孔压比稳定值逐渐增大, 以饱和粉细砂埋置深度为 105 cm 为例, 地震动强度为 0.20g 时, 孔压比稳定值为 0.75, 接近完全液化状态; 地震动强度为 0.25g 时, 孔压比达到 0.81, 可视为发生完全液化, 这是因为地震动强度越大, 孔隙水压力逐渐增大, 土中孔隙水在短时间内来不及排出, 导致孔压比稳定值较大, 此时土颗粒呈悬浮状态, 饱和粉细砂土层完全液化; 同时, 输入的地震动强度为 0.20g 时, 观测到模型箱内黏土表面有大量水溢出, 输入的地震动强度为 0.25g 时, 黏土层出现了喷砂冒水现象, 这些现象均表明随着输入地震动强度的增大, 饱和粉细砂的液化程度变大。

地震动强度为 $0.15g$, 饱和粉细砂埋置深度分别为 24、74、90 cm 时, 孔压比稳定值分别为 0.81、0.78、0.68, 表明同一地震动强度作用下, 随着饱和粉细砂土层埋置深度的增加, 饱和粉细砂的液化程度逐渐减小。当地震强度为 $0.15g$, 粉细砂土层埋置深度为 24 cm; 地震强度为 $0.20g$, 埋置深度为 74 cm; 地震强度为 $0.25g$, 埋置深度为 90 cm 时, 孔压比最终稳定值均大于 0.8, 且试验结束后土体表面出现喷砂冒水现象, 如图 8 所示。



图 8 砂土完全液化
Fig.8 Complete liquefaction of sandy soil

4.2 弯矩响应分析

4.2.1 桩身弯矩响应

桩身弯矩变化是时程响应, 且各截面的弯矩时程曲线不尽相同。为获得弯矩沿桩身的分布情况, 选取各截面弯矩时程曲线最大幅值作为该截面处的桩身弯矩, 近似反映桩身弯矩随桩长的分布关系。因此, 将各截面的弯矩最大幅值选出, 得出不同地震动强度作用下, a-1[#]、b-1[#]、c-1[#]桩基础桩身弯矩如图 9 所示。

由图 9 可知, 不同地震动强度作用下, 饱和粉细砂位于同一埋置深度时, 自下而上桩身弯矩呈先增大后减小的变化规律, 在饱和粉细砂层中自下而上桩身弯矩逐渐增大, 从土层分界处自下而上桩身弯矩逐渐减小, 原因在于桩身下部的动力响应主要由土层决定, 而桩的上部由于受到惯性力与桩-土运动作用所致; 3 种埋置深度下桩身弯矩峰值分别位于桩顶以下 28、78、94 cm 位置处, 即液化土层和非液化土层交界处, 说明上覆黏土层对桩有嵌固作用, 且饱和粉细砂层发生液化, 液化土层呈现流动状态, 液化层中桩侧土体强度降低, 使得液化土层和非液化土层性质差异逐渐增大, 从而在二者界面产生了较大弯矩, 且随着饱和粉细砂埋置深度的增大, 桩身弯矩最大值逐渐减小, 说明饱和粉细砂土埋置深度越大, 有效覆盖压力越大, 液化的可能性越小。此外, 在饱和粉细砂层的桩身弯矩较黏土层中桩身弯矩增幅更大, 这是液化土层中桩更容易

发生破坏的原因之一。因此, 在进行液化场地桥梁桩基础抗震设计时, 应综合考虑液化土层与桩基础的相互位置关系, 以提高桩基础在液化土与非液化土分界处的抗弯承载能力, 保证桩基础的抗弯强度足以抵抗强震作用。

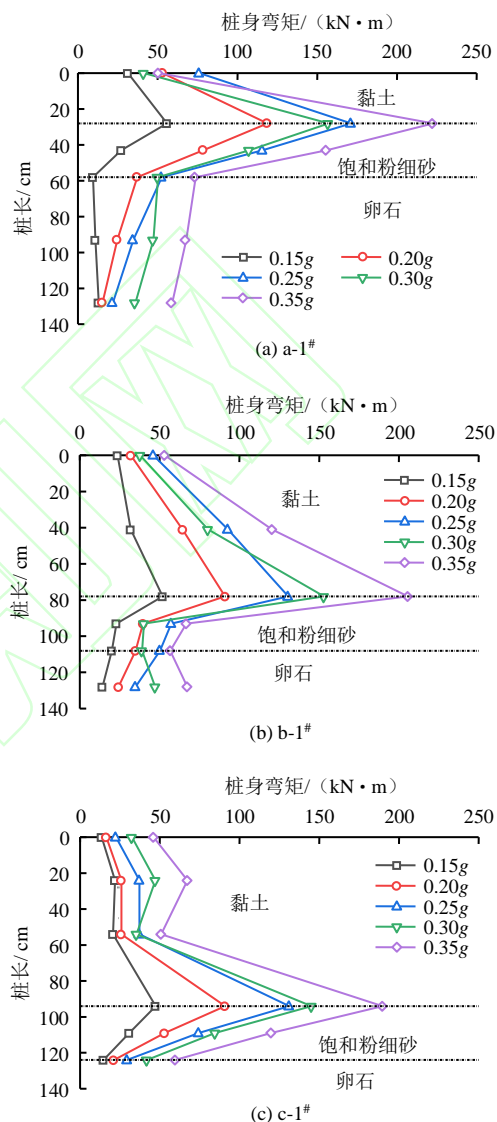


图 9 桩身弯矩变化规律

Fig.9 Variation law of bending moment of pile body

4.2.2 弯矩时程响应分析

不同地震动强度作用下, a-1[#]、b-1[#]、c-1[#]桩基础桩身弯矩最大值界面处的弯矩时程响应如图 10 所示。

由图 10 可知, 不同地震动强度作用下, 饱和粉细砂土层埋置深度为 24、74、90 cm 时, 桩身弯矩最大值出现时刻分别为 8.36、11.16、17.40 s。由前述分析可知, 饱和粉细砂层埋置深度越浅, 孔压比增长时刻越早, 最先产生液化现象, 桩侧土体强度逐渐趋于弱化, 桩侧有效水平抗力降低, 桩身承受

较大的荷载。因此,随着饱和粉细砂土层埋置深度的增大,桩身弯矩最大值出现时刻较为滞后。

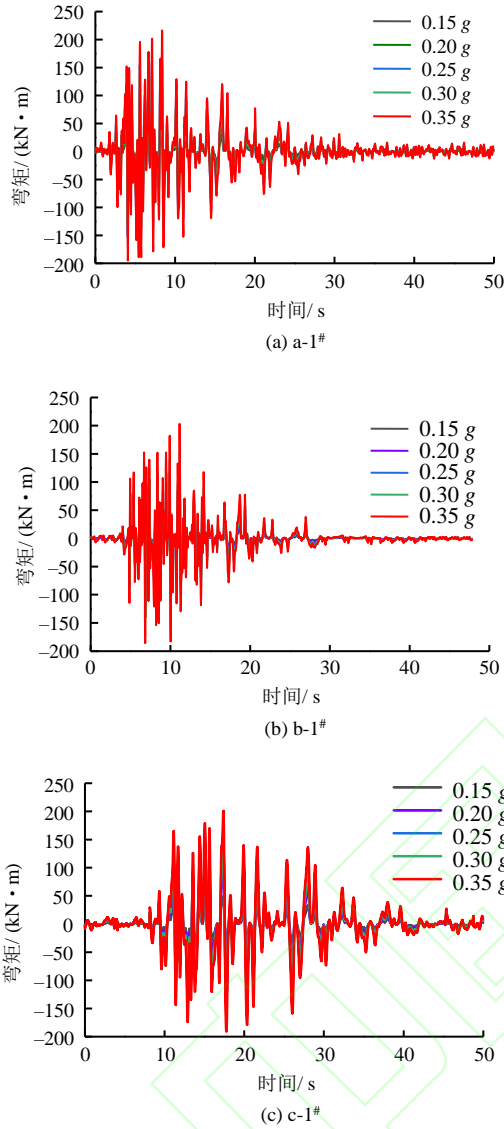


图 10 弯矩最大值时程变化规律

Fig.10 Time history variation rule of maximum bending moment

5 动力 p - y 曲线确定方法及分析

动力 p - y 曲线被广泛应用于动力作用下桩-土相互作用问题的分析。在振动台模型试验中,桩身弯矩可以直接测得。桩侧土抗力、桩身位移、桩身弯矩之间的关系可以用下式表示:

$$p(z) = \frac{d^2[M(z)]}{dz^2} \quad (1)$$

$$M(z) = \frac{d^2 y_p}{dz^2} EI \quad (2)$$

式中: $M(z)$ 为桩身弯矩; y_p 为桩的横向位移; $p(z)$ 为桩侧土抗力; z 为桩上某点的竖向深度; EI 为桩

的抗弯刚度; E 为弹性模量; I 为截面惯性矩。

在动力荷载作用下,动力 p - y 曲线中 y 指桩土相对位移,即桩的位移减去土的位移。

5.1 确定桩侧土抗力 p

根据桩动弯矩数据进行双重微分来确定桩侧土抗力,但双重微分过程存在潜在的数值误差,因此在本研究中,由加权余量法^[23-24],求解沿桩身分布的桩侧土抗力 $p(z)$ 。参考文献[5],计算过程如下:

计算时首先将桩身应变测点处作为分隔点,设 $f(z)$ 为沿桩身的弯矩函数,其值可由在测点处的应变片测得。设 $g(z) \approx f'(z)$, $f'(z)$ 为弯矩的一阶导数,则 $g(z)$ 为沿桩身剪力函数。根据加权余量法,得到如下方程:

$$\int [g(z) - f'(z)] \cdot \varphi(z) dz = 0 \quad (3)$$

式中: $\varphi(z)$ 为基函数,有

$$\varphi_0(z) = \begin{cases} \frac{z - z_1}{z_0 - z_1}, & z_0 \leq z \leq z_1 \\ 0, & z_1 \leq z \leq z_n \end{cases} \quad (4)$$

$$\varphi_i(z) = \begin{cases} \frac{z - z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}, & z_{i-1} \leq z \leq z_i \\ \frac{z - z_{i+1}}{z_i - z_{i+1}}, & z_i \leq z \leq z_{i+1} \\ 0, & z_0 \leq z \leq z_{i-1} \text{ 且 } z_{i+1} < z \leq z_n \end{cases} \quad (5)$$

$$\varphi_i(z) = \begin{cases} \frac{z - z_{n-1}}{z_0 - z_1}, & z_{n-1} \leq z \leq z_n \\ 0, & z_0 \leq z \leq z_{n-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: n 为总测点数; i 为测点号, $(i=1, 2, \dots, n-1)$ 。

因此, $f(z)$ 和 $g(z)$ 可以表示为

$$f(z) = \sum_{i=0}^n f_i \cdot \varphi_i(z) \quad (7)$$

$$g(z) = \sum_{i=0}^n g_i \cdot \varphi_i(z) \quad (8)$$

式中: f_i 为测点 i 处的实测弯矩; g_i 为测点 i 处的剪力。

对于不同的测点,利用式(3)可以得到下列方程,即第 0 个测点:

$$(z_1 - z_0)(g_1 + 2g_0) = 3(f_1 - f_0) \quad (9)$$

第 i 个测点:

$$(z_1 - z_{i-1})g_{i-1} + 2(z_{i+1} - z_{i-1})g_i + (z_{i+1} - z_i)g_{i+1} = 3(f_{i+1} - f_{i-1}) \quad (10)$$

第 n 个测点:

$$(z_n - z_{n-1})(2g_n + g_{n-1}) = 3(f_n - f_{n-1}) \quad (11)$$

联合方程 (9)、(10) 和 (11)，求此方程组，得到各测点处的剪力分段函数，由加权余量法，求得抗力函数 $p(z)$ 。再通过内插法，即可得到桩身任一深度处的土抗力 $p(z)$ 。

5.2 桩土相对位移 y

桩身位移由方程 (2) 对弯矩分布函数 $M(z)$ 进行积分确定，此时需要两个边界条件，由于桩基础固定，故边界条件假定为桩端处的转角和位移为 0，计算出桩身位移 y_p ；由 3.5 节图 5 可获得不同深度处土层的加速度时程响应，通过数值积分求得土体不同深度处的位移响应。桩-土相对位移 y 通过桩的位移与土层位移之差得到。

5.3 动力 p - y 曲线及分析

饱和粉细砂土处于不同埋置深度时，砂土液化主要发生在 9.7~22.8 s、14.7~28.4 s、18.7~31.9 s。因此，本文选取 T1 (10.0~10.5 s)、T2 (15.5~16.0 s)、T3 (19.0~19.5 s) 的输入加速度周期进行分析。饱和粉细砂土处于不同埋置深度时，饱和粉细砂土以下 15 cm 位置处桩的动力 p - y 曲线如图 11 所示。

由图 11 可知，不同埋置深度下 p - y 曲线变化规律并不规则，没有形成完整的滞回圈，这是由于地震波的频谱特性和加速度变化规律不规则导致。液化过程中，土抗力和位移都逐渐增大，这是因为饱和粉细砂发生液化，砂土呈现流动状态，土体强度逐渐变弱，从而使得土抗力和位移增大。此外，土体运动产生的惯性力作用在对桩上，使得土抗力增大。

饱和粉细砂位于同一埋置深度时，随地震动强度增大，位移均有一定程度的增大，且 p - y 曲线所包围的面积也逐渐增大，说明饱和粉细砂发生液化时，土体强度降低，导致土体传递地震动能逐渐下降，桩土相互作用耗能逐渐增大；随地震动强度增大，位移的增加幅度明显大于土抗力的增加幅度， p - y 曲线的整体斜率逐渐变小，说明桩周土体弱化逐渐发展，土体强度逐渐减小；随着液化土层埋深增大，桩-土相对位移与土抗力有所减小，但曲线的整体斜率却逐渐增大，说明液化土层埋深越大，土体的抗液化能力越强，液化土层模量越大，桩-土相对位移越小，使得土抗力有所减小。

当饱和粉细砂土埋置深度为 24 cm 时，土抗力最大值 p_{\max} 和桩-土相对位移最大值 y_{\max} 分别为 112 kN/m 和 4.67 mm；埋置深度为 74 cm 时， p_{\max} 和 y_{\max} 分别减小为 107.9 kN/m 和 3.54 mm；当埋置

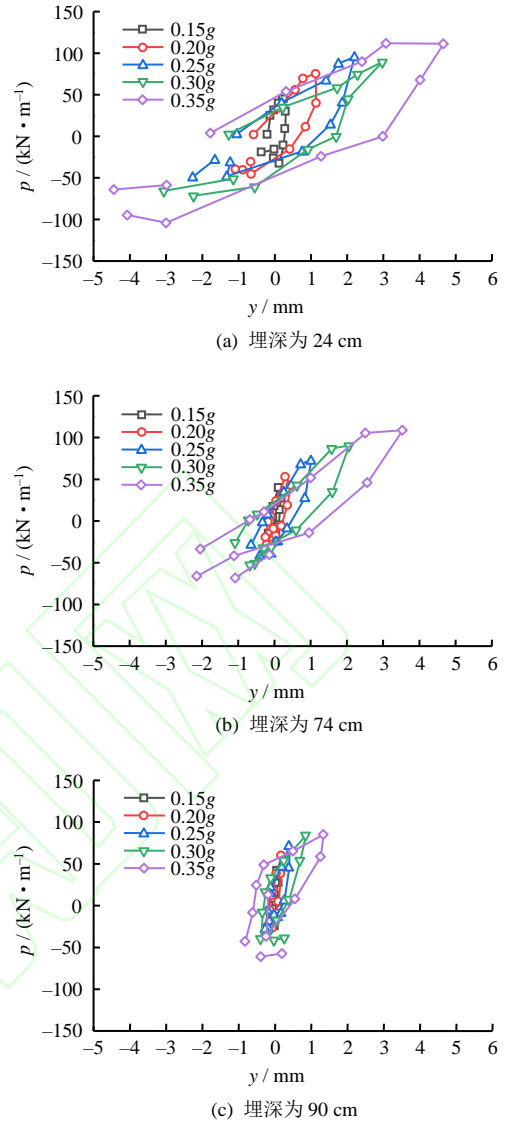


图 11 砂土不同埋置深度对动力 p - y 曲线的影响
Fig.11 Influence of different sand embedded depths on dynamic p - y curve

深度为 90 cm 时， p_{\max} 和 y_{\max} 减小到 85.1 kN/m 和 1.34 mm。此外，随着饱和粉细砂土埋置深度的增大，动力 p - y 曲线所包围的面积逐渐减小，位移的增加幅度明显小于侧向抗力的增加幅度， p - y 曲线的整体斜率逐渐增大，说明随着饱和粉细砂土埋置深度的增大，饱和粉细砂受到的围压增大，桩-土相互作用的动力耗能逐渐减小，桩周土体刚度逐渐增大。因此，在地震作用下，饱和粉细砂土埋置深度越小，液化土层中桩侧土抗力越大，桩越容易因土体液化而发生破坏。在 p - y 曲线中，桩-土相对位移有正有负，这是地震动造成的桩-土运动响应及惯性响应的结果。首先，地震以波的方式传到桩和土体界面上，波的散射作用使桩某一位置的运动与土中相应位置的运动不同，此外，土层运动产生的惯性力会反作用在土体上，在土体中引起附加运动及应

力,从而出现了桩推土和土推桩的现象。

6 结 论

(1) 饱和粉细砂随埋置深度增加,孔压比增长呈明显滞后性,且地震强度达到 $0.25g$ 时,3 种埋置深度的饱和粉细砂孔压比稳定值均大于 0.8,且地基土表面出现喷砂冒水,土体完全液化。

(2) 饱和粉细砂不同埋置深度下,桩身弯矩最大值均位于液化土层和非液化土层交界处,且桩身弯矩最大值出现的时刻随深度增加存在明显的滞后现象。

(3) 饱和粉细砂位于同一埋置深度时,随着地震动强度的增大,位移均有一定程度的增大,且动力 $p-y$ 曲线所包围面积也逐渐增大,其整体斜率逐渐减小,说明桩-土动力相互作用的耗能逐渐增大,桩周土体的刚度逐渐减小。

(4) 饱和粉细砂随埋置深度增加, $p-y$ 曲线所包围的面积逐渐减小,其整体斜率逐渐增大,说明桩-土相互作用动力耗能逐渐减小,桩周土体刚度逐渐增大。由此得出饱和粉细砂土埋置深度越小,液化土层中桩侧土抗力越大,桩越容易因土体液化而发生破坏。

(5) 液化场地桥梁桩基础抗震设计时,综合考虑液化土层与桩基础的相互位置关系,提高桩基础在液化土与非液化土分界处的抗弯承载能力,保证桩基础的抗弯强度足以抵抗强震作用。

参 考 文 献

- [1] FENG Z J, HUO J W, HU H B, et al. Research on corrosion damage and bearing characteristics of bridge pile foundation concrete under a dry-wet-freeze-thaw cycle[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021: Doi:10.1155/2021/8884396.
- [2] FENG Z J, HU H B, ZHAO R X, et al. Experiments on reducing negative skin friction of piles[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019(15): 1-10.
- [3] 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: Doi:10.1155/2020/3241602.
- [4] 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): Doi:10.3390/app9142874.
- [5] DONG Y X, et al. Seismic response of a bridge pile foundation during a shaking table test[J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019(12): 1-16.
- [6] GOUTAM M, DURGES C R. Performance of harbour structures in Andaman islands during 2004 Sumatra earthquake[J]. *Engineering Structures*, 2007, 30(1): 174-182.
- [7] 江开渡, 钱德玲, 戴启权. 基于 FLAC^{3D} 液化场地桩-土动力相互作用研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(10): 1372-1375.
JIANG Kai-du, QIAN De-ling, DAI Qi-quan. Analysis of dynamic interaction of piles and soil on liquefiable site by FLAC^{3D}[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2016, 39(10): 1372-1375.
- [8] 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 De-sen, LI Chun-jie, LING Xian-chang, 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(Suppl.2): 143-149.
- [9] 冯忠居, 王溪清, 李孝雄, 等. 强震作用下的砂土液化对桩基力学特性影响[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 71-84.
FENG Zhong-ju, WANG Xi-qing, LI Xiao-xiong, et al. Effect of sand liquefaction on mechanical properties of pile foundation under strong earthquake[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(1): 71-84.
- [10] 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 Zhong-ju, DONG Yun-xiu, HE Jing-bin, 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.
- [11] 冯忠居, 张聪, 何静斌, 等. 强震作用下嵌岩单桩时程响应振动台试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3227-3237.
FENG Zhong-ju, ZHANG Cong, HE Jing-bin, et al. Shaking table test on time-history response of single rock-socketed pile under earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3227-3237.
- [12] 冯忠居, 张聪, 何静斌, 等. 强震作用下群桩基础抗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 Zhong-ju, ZHANG Cong, HE Jing-bin, 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.
- [13] 凌贤长, 郭明珠, 王东升, 等. 液化场地桩基桥梁震害响应大型振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 7-10.
- LING Xian-chang, GUO Ming-zhu, WANG Dong-sheng, et al. Large-scale shaking table model test of seismic response of bridge of pile foundation in ground of liquefaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 7-10.
- [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-chang, WANG Dong-sheng, 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.
- [15] 唐亮, 凌贤长, 徐鹏举, 等. 可液化场地桥梁群桩基础地震响应振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 672-680.
- TANG Liang, LING Xian-chang, XU Peng-ju, et al. Shaking table test on seismic response of pile groups of bridges in liquefiable ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(5): 672-680.
- [16] 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 Ming-wu, 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.
- [17] 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.
- LI Yu-run, CHEN Hua-bin, QIANG Dong-feng, et al. Experimental study on the dynamic response of vertical pile-group structure in saturated sand with different thickness under earthquake action[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2019, 41(4): 834-839.
- [18] 李雨润, 张雨雷, 陈张升, 等. 液化土中对称双斜桩动力反应特征及 p - y 曲线规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 239-250.
- LI Yu-run, ZHANG Yu-lei, CHEN Zhang-sheng, et al. Dynamic response and p - y curve of symmetric inclined piles in liquefied soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(1): 239-250.
- [19] 冯士伦, 王建华, 郭金童. 液化土层中桩基抗震性能振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 92-95.
- FENG Shi-lun, WANG Jian-hua, GUO Jin-tong. A shake table test on the seismic resistance of pile foundation in liquefied soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(7): 92-95.
- [20] 王建华, 戚春香, 余正春, 等. 弱化饱和砂土中桩的 p - y 曲线与极限抗力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 309-315.
- WANG Jian-hua, QI Chun-xiang, YU Zheng-chun, et al. p - y curves and lateral resistances of piles in saturated degradation sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(3): 309-315.
- [21] 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(增刊 2): 4046-4053.
- LÜ Xi-lin, REN Hong-mei, LI Pei-zhen, 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(Suppl.2): 4046-4053.
- [22] 李培振, 程磊, 吕西林, 等. 可液化土-高层结构地震相互作用振动台试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 467-474.
- LI Pei-zhen, CHENG Lei, LÜ Xi-lin, et al. Shaking table testing on high-rise buildings considering liquefiable soil-structure interaction[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2010, 38(4): 467-474.
- [23] LI P Z, LIU S T, LU Z. Studies on pounding response considering structure-soil-structure interaction under seismic loads[J]. **Sustainability**, 2017, 9(12): 2219.
- [24] 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 Cheng-shun, DOU Peng-fei, DU Xiu-li, 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.
- [25] DANIEL W W, ROSS W B, BRUCE L K. Observed seismic lateral resistance of liquefying sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(10): 898-906.

- [26] 王成雷, 王建华, 冯士伦. 土层液化条件下桩土相互作用 p - y 关系分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1500-1505.
- WANG Cheng-lei, WANG Jian-hua, FENG Shi-lun. Analysis on p - y curves of soil-pile interaction in liquefied soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(10): 1500-1505.
- [27] 惠舒清, 张效禹, 唐亮, 等. 考虑群桩效应的液化场地桩-土动力 p - y 曲线研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(6): 793-799.
- HUI Shu-qing, ZHANG Xiao-yu, TANG Liang, et al. p - y curve of the pile-soil interaction in soil liquefaction considering the pile group effect[J]. **Journal of Harbin Engineering University**, 2021, 42(6): 793-799.
- [28] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7): 781-785.
- WU Xiao-ping, SUN Li-min, HU Shi-de, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2002, 30(7): 781-785.
- [29] 中华人民共和国交通运输部. JTG B02—2013 公路工程抗震规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG B02—2013 Specification of seismic design for highway engineering[S]. Beijing: China Communication Press, 2014.
- [30] 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): 89-9.
- CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, ZUO Xi, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 89-9.
- [31] 孙海峰, 景立平, 王宁伟, 等. 振动台多功能叠层剪切箱研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2498-2506.
- SUN Hai-feng, JING Li-ping, WNAG Ning-wei, et al. A three-dimensional laminar shear soil container for shaking table test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2498-2506.
- [32] 吕西林, 陈跃庆, 陈波, 等. 结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 20-29.
- LÜ Xi-lin, CHEN Yue-qing, CHEN Bo, et al. Shaking table testing of dynamic soil -structure interaction system[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000(4): 20-29.
- [33] 张效禹, 唐亮, 凌贤长, 等. 液化场地桥梁桩-土动力相互作用 p - y 曲线特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 619-625.
- ZHANG Xiao-yu, TANG Liang, LING Xian-chang, et al. Analysis on characteristics of dynamic p - y curves for soil-pile interaction in liquefiable ground[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2014, 34(5): 619-625.
- [34] 凌贤长, 王臣, 王成. 液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用振动台试验模型相似设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 450-456.
- LING Xian-chang, WANG Chen, WANG Cheng. Scale modeling method of shaking table test of dynamic interaction of pile-soil-bridge structure in ground of soil liquefaction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 450-456.
- [35] IAI S, TOBITA T, NAKAHARA T. Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests[J]. **Géotechnique**, 2005, 55(5): 355-362.