

• 土木工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202300832



本刊网刊

地震作用下液化场地大直径变截面单桩基础动力响应特性

冯忠居¹, 李 德¹, 张 聪^{1*}, 徐博熙¹, 赵瑞欣¹, 赖德金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 361000)

摘 要:为研究不同类型地震波作用下液化场地大直径变截面单桩的动力响应, 依托厦门第二东通道翔安大桥, 通过振动台试验, 选取强度为 0.15g 的 5010 波、1004 波、Kobe 波和 El-Centro 波, 分析饱和砂土层的孔压比响应及大直径变截面单桩的桩身加速度、桩顶水平位移、桩身弯矩等动力响应特性。结果表明: 饱和砂土层液化后对地震波具有放大效应, 且桩顶加速度响应相对于变截面处和桩底出现明显的滞后现象; 在 4 种类型地震波作用下, 桩顶均产生永久侧向位移; 桩身弯矩由桩底至桩顶呈先增后减的趋势, 在变截面位置处弯矩出现陡增现象; 1004 波作用下的桩身加速度、桩身弯矩峰值达到最大, Kobe 波作用下的桩顶水平位移峰值最大, 表明大直径变截面桩基动力响应特性对不同类型地震波的敏感程度存在较大差异。因此, 在进行大直径变截面桩基的抗震设计时, 可选取不同类型地震波对桩基动力响应特性进行验算。

关键词:液化场地; 大直径变截面桩; 饱和砂土; 动力响应; 抗震设计

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)05-0237-11

大直径变截面桩抗震能力强、沉降变形小、经济效益好, 多应用于地震活跃区的深水桥梁建设^[1-3]。在地震作用下, 海床浅层砂土的孔隙水压力显著增大, 极易产生液化现象, 从而影响桩基的力学特性^[4]。

目前, 不少学者针对地震作用下桩基动力响应特性进行了深入研究, 主要研究手段有理论分析、数值仿真及振动台试验。

在理论分析方面, 刘林超等^[5]基于连续介质力学理论和 Winkler 弹簧模型研究了地震作用下桩基-饱和土的动力响应问题; 邹新军等^[6]在 Euler 梁模型的基础上建立竖向荷载下桩-非饱和土的水平方向耦合模型, 阐明了桩身长径比对桩基抗震性能的影响; 苏卓林等^[7]基于 Biot 多孔介质理论, 假定饱和砂土为完全耦合的固液介质, 探明了地震作用下液化场地桩-土体系的响应规律。上述理论研究均假设土体为理想介质, 在实际工程的应用中存在局限性且主要集中于等截面桩在地震作用下的动力响应规律, 但针对大直径变截面桩的动力响应特性尚未开展相关研究。

采用数值模拟研究地震作用下桩基的动力响应特性是一种高效的研究方法。冯忠居等^[8]建立桥梁桩基-液化土层数值模型, 探明了土体液化对桩基力学特性的影响, 但缺乏对土层液化情况的研究; 李洪江等^[9]基于土的抗力-桩身挠度曲线法, 研究了不同振动强度下单桩的水平承载特性, 对比了液化地基处理前后的桩身响应规律; Javdani 等^[10]建立了地震动作用下液化场地桩基础的数值仿真模型, 探明了桩基础的水平位移和弯矩动力响应规律。然而, 数值模拟与实际工程的相似性不能得到保证, 数值仿真计算结果的准确性也需要进一步探讨。

在振动台试验方面, 冯忠居等^[11]基于振动台模型试验探明了不同强度、地震波类型作用下液化场地桩基础的动力响应及砂土液化对桩基力学特性的影响, 但研究对象未涉及大直径变截面桩; 李雨润等^[12]基于振动台试验研究了液化场地中直、斜群桩基础在地震条件下的动力响应特性, 为液化场地桩基抗震设计提供了参考; 张恒源等^[13]设计了桩-土-结构相互作用振

收稿日期: 2023-10-22 修回日期: 2024-01-28 网络出版日期: 2024-05-28

基金项目: 福建省交通运输科技项目(202105); 海南省交通科技项目(HNZXY2015-045R); 国家自然科学基金青年科学基金项目(4190070568); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102218115)

作者简介: 冯忠居(1965—), 男, 教授. 研究方向: 岩土工程; 地震工程. E-mail: ysf@gl.chd.edu.cn

* 通信作者: 张 聪, 讲师, E-mail: zhangcong@chd.edu.cn

动台试验,分析了水平向地震作用和水平-竖向耦合地震作用下液化地基和群桩基础的动力响应规律,结果表明双向地震会加剧群桩结构的倾斜程度。

综上,在现有关于地震作用下桩基动力响应特性的研究中,对象多为等截面桩且选取振动台试验激励的地震波类型单一;此外,已有研究对地震作用下液化场地等截面桩与变截面桩动力响应差异进行了对比^[14],但针对不同类型地震波作用下液化场地大直径变截面桩基动力响应特性的研究鲜有涉及。为了充分探明不同类型地震波作用下液化场地大直径变截面桩基的动力响应规律,以厦门第二东通道翔安大桥实体工程为背景,采用振动台模型试验方法,进行4种不同类型地震波作用下液化场地大直径变截面单桩基础动力响应特性研究,分析饱和砂土液化特性和大直径变截面桩基动力响应特性,以期为液化场地桥梁桩基抗震设计提供参考。

1 工程概况

厦门第二东通道翔安大桥处于7度设防区,设计基本地震动加速度峰值为0.15g。本文选取H15号桩基础进行研究,桩长45.00 m,桩径(上/下)2.50 m/2.15 m,变截面位置位于承台以下28.00 m,桩基及地层分布如图1所示。根据翔安大桥地质勘察资料,场地内的饱和砂土层发生液化的可能性较大,亟须探明大直径变截面桩基的动力响应特性。

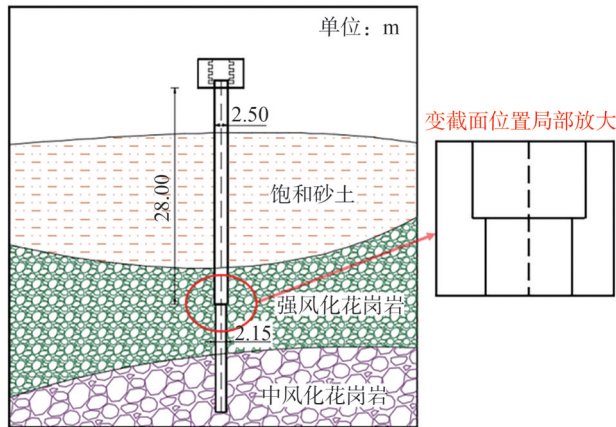


图1 桩基及地层分布

Fig. 1 Pile foundation and stratum distribution

2 振动台试验设计

2.1 试验设备

试验基于中国地震局工程力学研究所3向6自由度的振动台,其相关参数见表1。

根据文献^[15],当模型箱宽度 ≥ 1.5 m、长度 ≥ 2.0 m时,振动台试验的自振频率误差在5%以内。试验选取3.05 m(长) \times 1.70 m(宽) \times 1.80 m(高)的刚性模型箱,

如图2所示。在垂直于刚性模型箱振动方向的箱体内侧充填20 mm厚的泡沫,以减少模型箱边界效应带来的误差^[16-17]。

表1 振动台参数

Tab. 1 Vibration table parameters

参数	取值
台面尺寸/(mm \times mm)	5 000 \times 5 000
振动模式	正弦、随机(地震动)
频率/Hz	0.5~50.0
最大加速度幅值	XY向:1.0g;Z向:0.7g
最大速度幅值/(cm \cdot s ⁻¹)	XY向:50;Z向:40
最大位移幅值/mm	XY向: \pm 80;Z向: \pm 50



图2 模型箱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model box diagram

2.2 试验相似比

综合考虑模型箱尺寸、原型尺寸及实际工程等多方面因素,将本次振动台模型试验的尺寸相似比确定为1:50^[18-20]。通过量纲分析法,以线尺寸 l 、弹性模量 E 及材料平均密度 ρ 为基本物理量,推导出模型其他物理量的相似关系,见表2。

表2 各物理量相似常数

Tab. 2 Similar constants of physical quantities

物理量	相似常数
加速度 a	1
重力加速度 g	1
线尺寸 l	1/50
频率 ω	50 ^{1/2}
弹性模量 E	1/3.5
应力 σ	1/3.5
应变 ε	1
泊松比 μ	1
密度 ρ	1

结合振动台承载能力与人工质量的相似条件^[21-23],在桩顶施加100 kg的人工质量,人工质量可按下式计算^[24]:

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

式中, m_a 为人工质量, C_E 为弹性模量相似常数, C_l 为尺寸相似常数, m_p 为原型质量, m_m 为模型质量。

2.3 试验模型

2.3.1 模型桩设计

厦门第二东通道翔安大桥大直径变截面桩选用 C35 水下海工耐久混凝土, 其抗压强度为 48 MPa。试验中, 模型桩采用微粒混凝土配制; 结合相关研究成果^[25-26], 开展试验不断调整微粒混凝土的质量配合

比, 确定模型桩的微粒混凝土质量配合比为水泥: 石: 砂: 水=1.00: 3.22: 1.40: 0.50。以抗压强度作为主要控制指标, 测得其抗压强度(28 d)为 13 MPa, 符合相似比关系。钢筋采用镀锌铁丝模拟, 桩身配筋率为 2.4%, 主筋材料选取 4 根直径为 4 mm 的镀锌铁丝, 箍筋选取直径为 2.8 mm 的镀锌铁丝; 按相似比缩尺桩径和桩长, 模型桩桩径(上/下)为 5.0 cm/4.3 cm, 桩长 90.0 cm。模型桩制作流程如图 3 所示。



图3 模型桩制作流程
Fig. 3 Model pile fabrication process

2.3.2 模型土设计

根据翔安大桥的地质勘察报告, 中风化花岗岩的抗压强度为 68 MPa, 采用微粒混凝土模拟中风化花岗岩, 并结合相关研究结果^[27]不断调整微粒混凝土的质量配合比, 最终确定中风化花岗岩的质量配合比为水泥: 石: 砂: 水=1.00: 4.19: 1.47: 0.60。以抗压强度作为主要控制指标, 测得其抗压强度(28 d)为 19 MPa, 符合相似比关系。

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。模型土的物理力学指标见表 3。以原状土与模型土的剪切波速(表 4)控制二者的密实度和相似性。

采用筛分法得到原状土、模型土的颗粒级配曲线, 结果如图 4 所示。

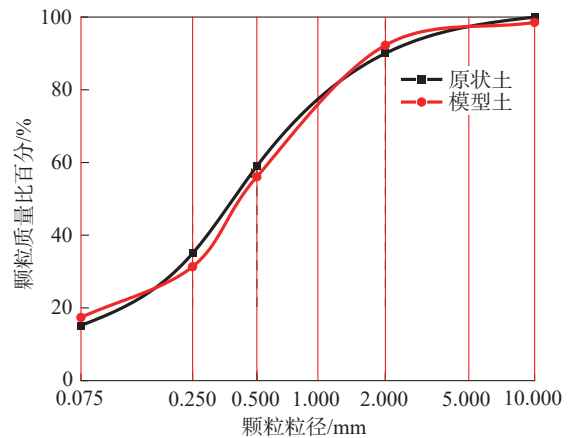


图4 颗粒级配曲线
Fig. 4 Particle gradation curves

表3 模型土的物理力学指标

土类	含水率 $W/\%$	相对密实度 $D_r/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
砂土	25.5	47	1.86	25.0	24
强风化花岗岩	11.2		2.56	22.5	43

表4 土体剪切波速

Tab. 4 Shear wave velocity of soil

土体类型	原型	模型
砂土	167	171
强风化花岗岩	779	782

2.4 地震波选取

试验选用的 4 种地震波如图 5 所示。图 5 中, 5010 波为中国地震局针对翔安大桥工程场地人工合成的 50 a 超越概率 10% 的地震波, 1004 波为 100 a 超越概率 4% 的地震波, Kobe 波为日本阪神地震(M7.2)震中附近记录的加速度时程, El-Centro 波为第 1 条具有全过程数据的地震波。5010 波、1004 波、Kobe 波和 El-Centro 波的反应谱如图 6 所示。试验地震波加载方向为水平 X、Y 向双向加载, 加速度幅值按照水平 X 向: 水平 Y 向=1.00: 0.85 进行调整。

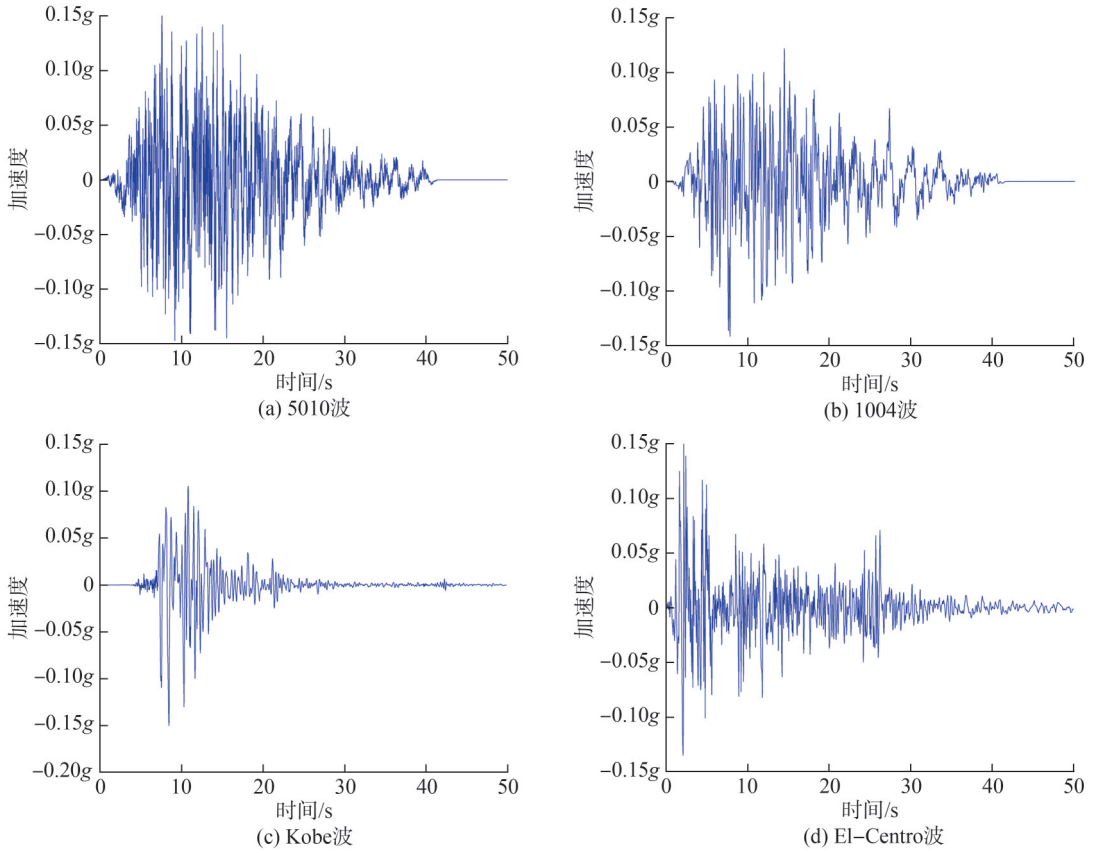


图5 试验选用的4种地震波

Fig.5 Four seismic waves used in the experiment

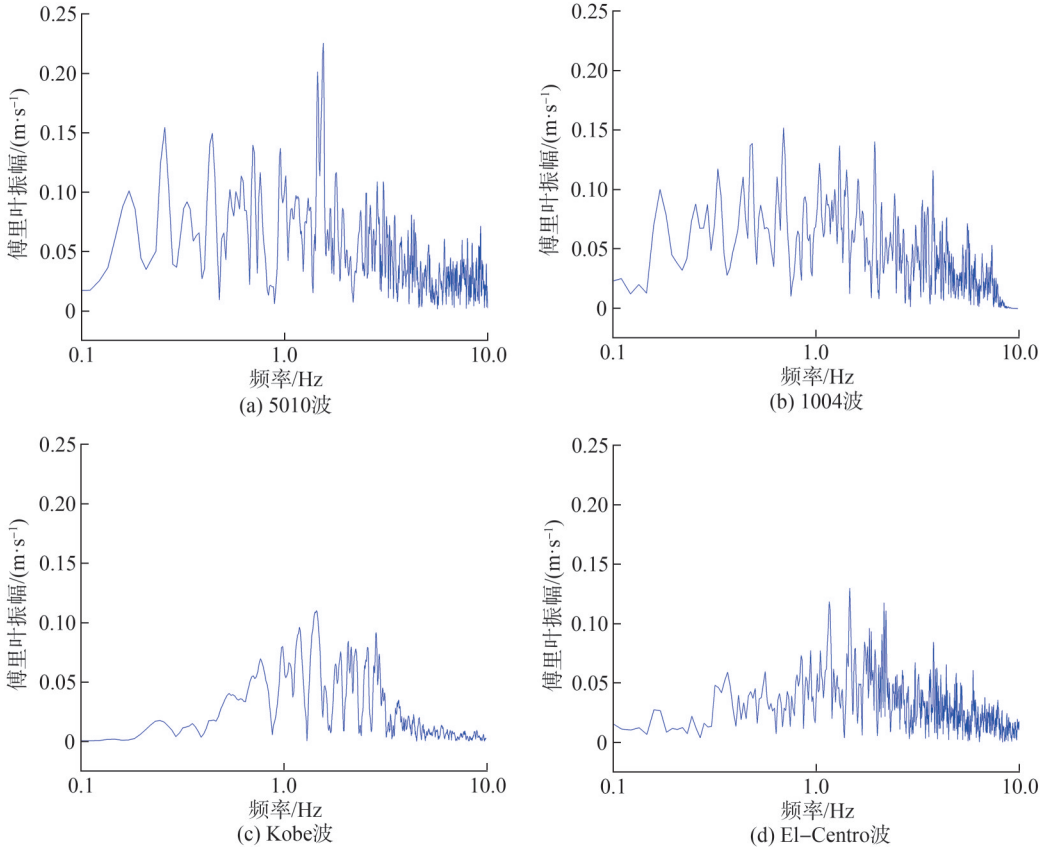


图6 4种地震波反应谱

Fig.6 Response spectrum of four seismic waves

2.5 试验工况及测试元件

试验选取强度为 0.15g 的 5010 波、1004 波、Kobe 波和 El-Centro 波,在饱和砂土层厚 40 cm 的条件下,研究不同类型地震波作用下液化场地大直径变截面单桩的动力响应。

采用 BFH120-3AA-D150 应变片测定桩身应变,应变片周围使用环氧树脂做防水处理,力平衡加速度

传感器型号为 FBA-12,桩顶水平位移使用 SW-10 型号拉线相对式位移传感器测量,土体孔隙水压力采用 PPTS-9 型号的孔隙水压力计测量。测试元件如图 7 所示。其中:位移计布置在承台侧面,编号为 J1;应变计和加速度计成组布置在桩身两侧,编号为 SP1~SP10;孔隙水压力计布置在饱和砂土层的 5、20、40 cm 深度处,编号为 IK1~IK3。测试元件布置位置如图 8 所示。

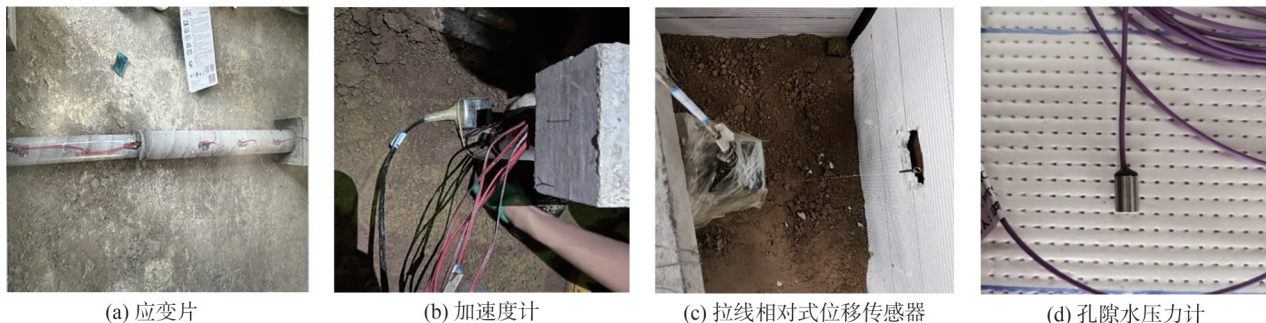


图 7 测试元件示意图

Fig. 7 Test elements diagram

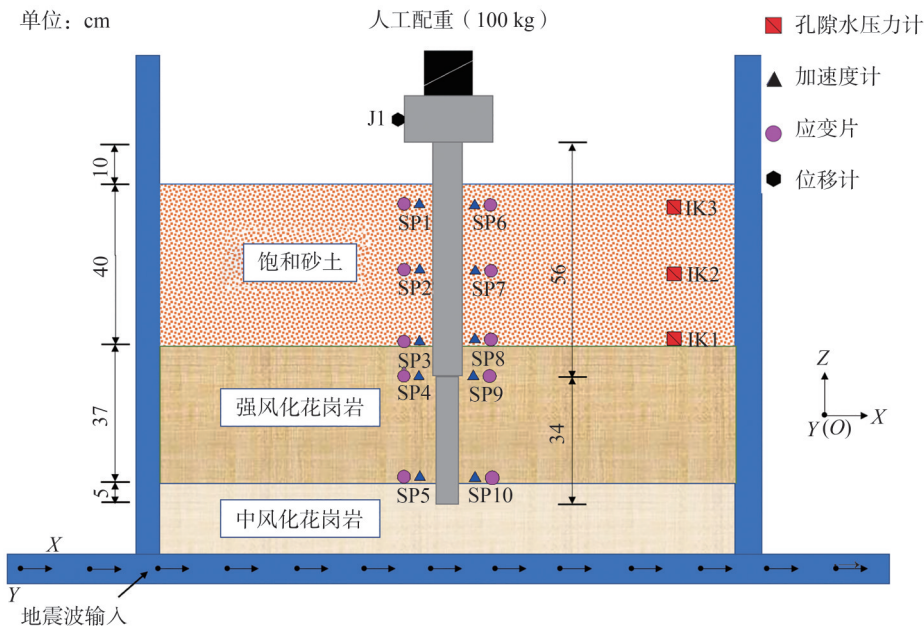


图 8 测试元件布置位置

Fig. 8 Test elements layout position

3 试验结果分析

3.1 孔压比响应

为研究不同类型地震波作用下砂土层的液化情况,绘制 5、20、40 cm 深度的饱和砂土层孔压比时程曲线,如图 9 所示。

由图 9 可知,当输入不同类型地震波时,饱和砂土层中的孔压比变化规律基本一致。在地震波加载初期,孔压比位于 0 附近,之后迅速增大至趋于稳定。在地震波作用下,孔压比随着埋深减小而增大,5、20 cm 处的饱和砂土孔压比最后均稳定在 0.8 附近,处于完全

液化状态;40 cm 处的饱和砂土在 5010 波、1004 波、Kobe 波、El-Centro 波作用下的孔压比在达到稳定状态时分别为 0.65、0.70、0.64、0.67,均未达到完全液化的状态。

由图 9 还可以看出:浅层饱和砂土液化程度更高,深层砂土受地震的影响相对较小,这是因为饱和砂土层底部首先受到地震波的影响产生孔隙水压力,但深层砂土中的孔隙水无法侧向排出而向上渗流,导致浅层砂土中的孔隙水压力增大;此外,浅层砂土相较于深层砂土的上覆土体压力小,土体自重应力较小,相应的孔压比更大。

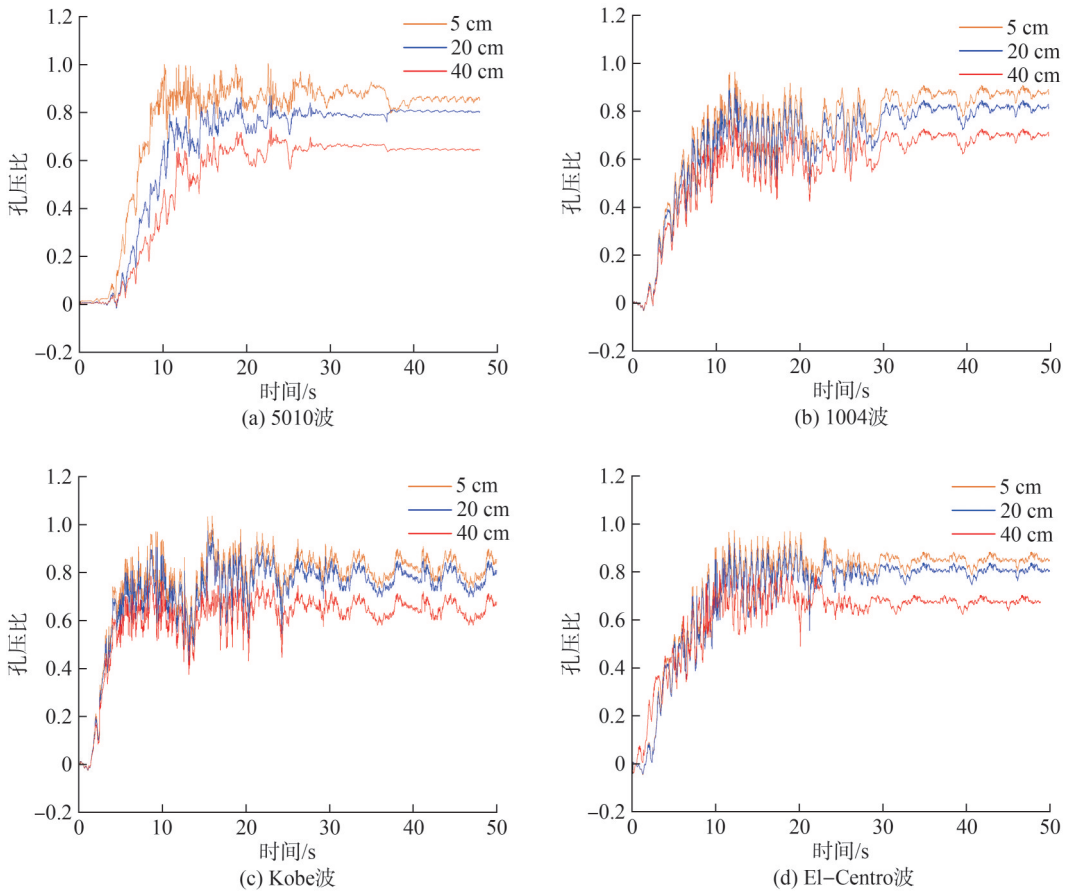


图 9 不同类型地震波作用下孔压比时程响应

Fig. 9 Time history response of pore pressure ratios under different seismic waves

3.2 桩身加速度动力响应

3.2.1 桩身加速度规律

在不同类型地震波作用下,大直径变截面桩的桩身加速度及桩顶加速度放大系数变化规律分别如图 10、11 所示。加速度放大系数 α 的定义如下:

$$\alpha = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha'_{\max}} \quad (2)$$

式中, α_{\max} 为桩顶加速度峰值, α'_{\max} 为输入地震动峰值加速度。

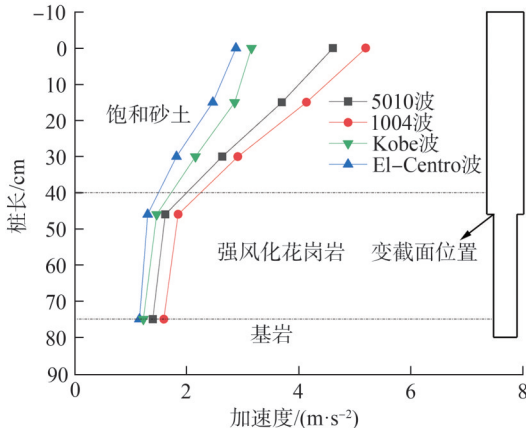


图 10 桩身加速度变化规律

Fig. 10 Variation laws of pile acceleration

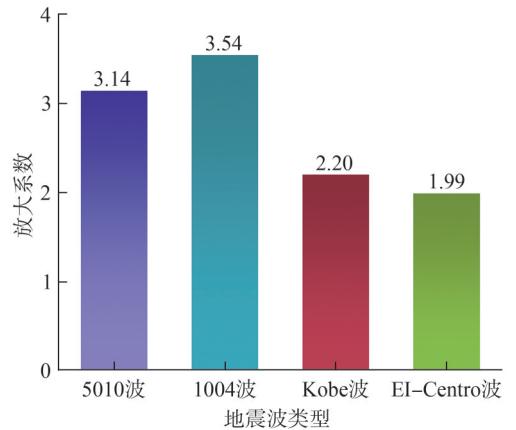


图 11 桩顶加速度放大系数变化规律

Fig. 11 Variation laws of acceleration amplification coefficient of pile top

由图 10 可知,在不同类型的地震波作用下,大直径变截面桩的桩身加速度沿桩长方向的变化规律基本一致:从桩底到桩顶逐渐增大,在变截面位置处发生突变,随后显著增大,并且均大于对应地震波的加速度。与已有文献[8,11]对比可知:大直径变截面桩与传统等截面桩的桩身加速度从桩底至桩顶均逐渐增加,但大直径变截面桩的桩身加速度在变截面位置附近发生陡增,而等截面桩的桩身加速度变化较为平缓。

这是因为大直径变截面桩下部尺寸缩减,桩身加速度规律也随之改变。此外,上部饱和砂土层发生液化,导致桩周土覆盖范围减小,桩身整体受到的岩土体的约束作用减小,桩-土整体稳定性变差。因此,变截面位置处的加速度显著增大。

在地震作用下,饱和砂土层发生液化而处于流动状态,液化土体会发生横向移动,桩身受到的约束减弱,当地震波从饱和砂土层(波密介质)传播至桩身(波疏介质)时,入射波相比透射波振幅小,受惯性的影响产生一定的放大效应,出现桩身加速度峰值大于地震波加速度峰值的现象。1004波作用下的桩

身加速度峰值最大,其次为 5010 波、Kobe 波、El-Centro 波。

由图 11 可知,在 4 种地震波作用下,同一土层对不同地震波的放大效应存在差异,试验模型的桩-土体系对 1004 波输入的反应更强烈。分析结果表明:不同地震波的峰值、持时、频率等固有特性对桩身加速度的放大效应有显著影响;岩土体对不同地震波的敏感程度并不相同,对桩身的约束作用也有所差异。

3.2.2 桩身加速度动力时程响应

在不同类型地震波作用下,大直径变截面桩桩身不同位置的加速度动力时程响应如图 12 所示。

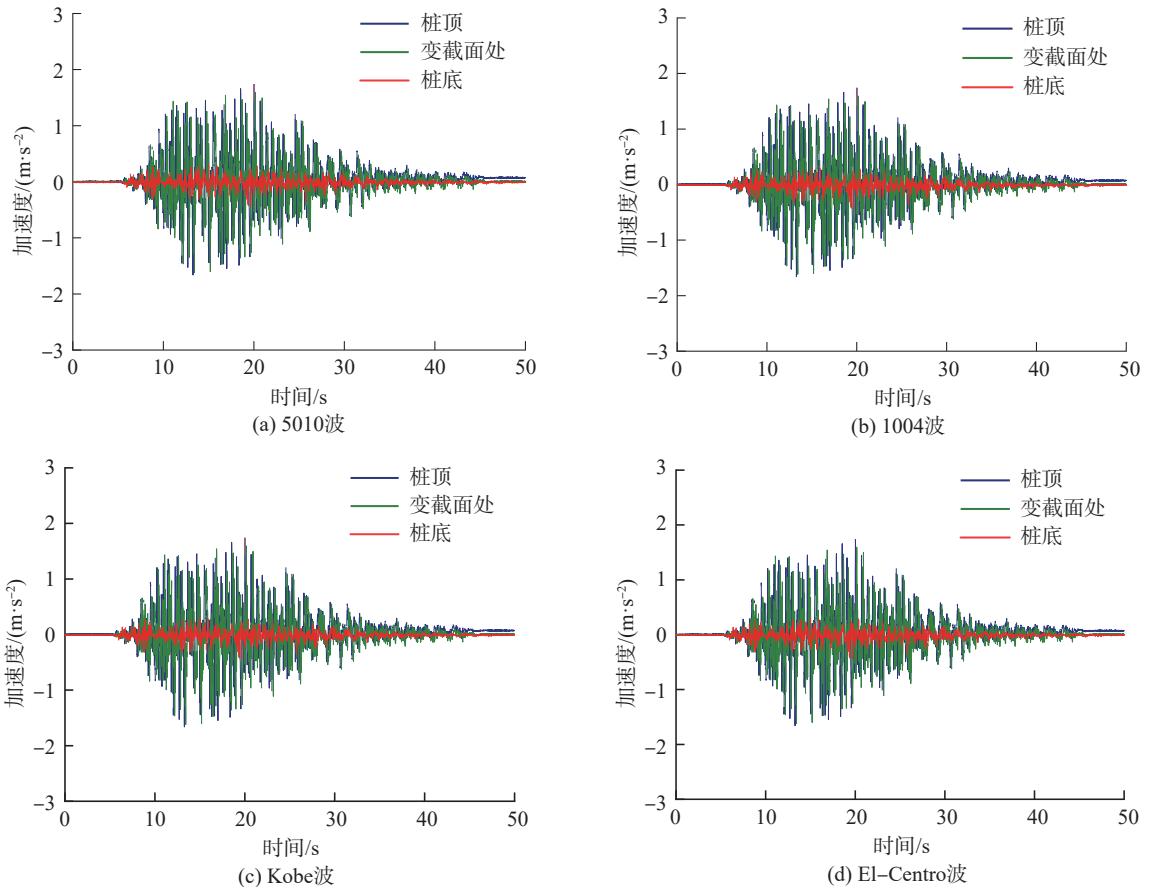


图 12 不同类型地震波作用下桩身加速度时程响应

Fig. 12 Time history response of pile acceleration under different seismic waves

由图 12 可知,在不同类型地震波作用下,大直径变截面桩的桩顶、变截面处、桩底的加速度时程响应规律大致相同:开始输入地震波时,桩身加速度近似为 0,随后振幅逐渐变大,与输入地震波的时程曲线变化规律基本相符。随着土层深度的减小,加速度时程响应的振幅呈现逐渐增大的趋势,并且相同地震波下的桩底加速度时程响应曲线的频率更高。这是因为饱和砂土层在液化后强度降低,对地震波具有一定程度的滤波作用;此外,由于桩身变截面位置处于强风化花岗岩岩层中,地震波传播时受到的干扰较小,其频率比桩底低。

在不同类型地震波作用下,桩身各位置加速度峰值出现时刻如图 13 所示。

由图 13 可知,桩顶加速度峰值出现时刻相对于变截面处和桩底均出现滞后现象,这是因为地震波从桩底开始自下而上传播,桩底最早受到地震波的影响。在 5010 波、1004 波、Kobe 波、El-Centro 波作用下,桩顶加速度峰值出现时刻分别为 20.12、18.14、10.67、4.67 s,相对于桩底分别滞后 5.12、1.53、1.23、0.33 s,反映出桩身加速度动力响应的时滞受输入地震波频谱特性的影响。

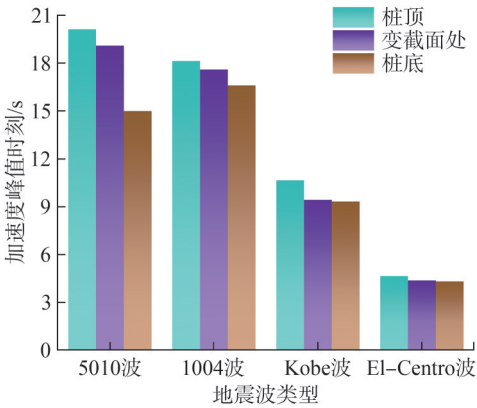


图 13 桩身加速度峰值出现时刻

Fig. 13 Peak acceleration time of pile body

3.3 桩顶水平位移响应

在不同类型地震波作用下,大直径变截面桩的桩顶水平位移时程响应如图 14 所示。

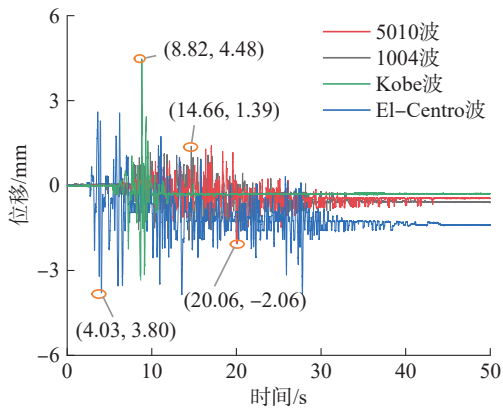


图 14 不同类型地震波下桩顶水平位移时程响应

Fig. 14 Time history response of horizontal displacement of pile top under different seismic waves

由图 14 可知,在不同类型地震波作用下,大直径变截面桩的桩顶水平位移变化规律差异显著。在 5010 波、1004 波、Kobe 波、El-Centro 波作用下的桩顶最大水平位移分别为 2.06、1.39、4.48、3.80 mm, Kobe 波作用下的桩顶水平位移最大,这是因为 Kobe 波与桩基固有频率最为相似,产生较为明显的共振现象^[28]。40 s 后,4 种不同类型地震波作用下的桩顶水平位移均趋于稳定,位移时程响应曲线近似为直线,但基线出现偏移,表明地震停止后桩顶产生了永久侧向位移,其原因是在地震过程中饱和砂土层产生不同程度的液化现象,土体呈现流动状态并横向移动,桩侧约束减弱,桩顶产生永久侧向位移。

3.4 桩身弯矩动力响应

3.4.1 桩身弯矩规律

在不同类型地震波作用下,大直径变截面桩的桩身弯矩变化规律如图 15 所示。

由图 15 可知:在不同地震波作用下,大直径变截面桩的桩身弯矩从桩底至桩顶先增大后减小,整体呈

现“单峰值”的变化规律;最大值均出现在饱和砂土层与强风化花岗岩的交界面处,且在变截面位置处弯矩陡增,传统等截面桩则只在土层交界面处出现弯矩突变现象^[8,11]。在地震动作用下,饱和砂土层发生液化,液化层产生侧向位移,桩-液化土发生相对位移,上部液化土层对桩身的水平抗力小,受到挤压后,水平抗力随着变形的增大而增大,弯矩也随之到达峰值,但下部的强风化花岗岩岩层的地基反力较大,弯矩随之减小;此外,由于变截面桩下部桩径减小,几何特性发生改变,桩身上、下部的抗弯刚度产生较大差异,桩身弯矩在变截面处发生突变。

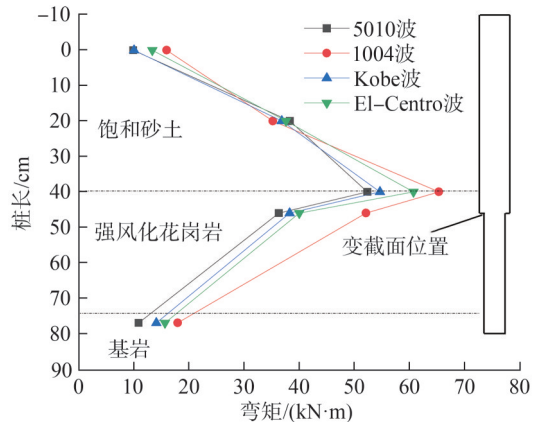


图 15 单桩基础桩身弯矩变化规律

Fig. 15 Variation laws of bending moment of single pile foundation

在 5010 波、1004 波、Kobe 波、El-Centro 波作用下,桩身弯矩峰值分别为 52.39、65.40、54.70、60.79 kN·m,这说明地震波的频谱特性差异对桩基础弯矩的响应有显著影响,试验模型的桩-土体系对 1004 波输入的反应较为敏感。

3.4.2 桩身弯矩动力时程响应

在不同类型地震波作用下,大直径变截面桩桩身最大弯矩位置处的动力时程响应如图 16 所示。

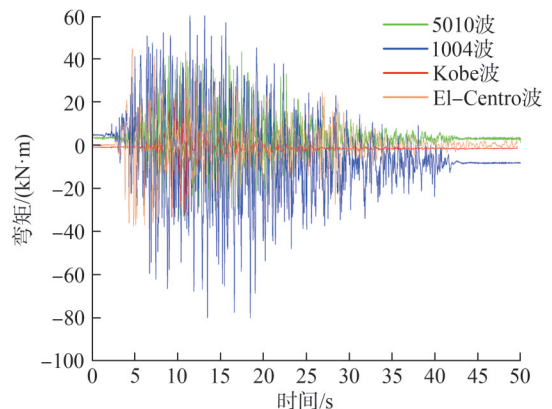


图 16 桩身最大弯矩处动力时程响应

Fig. 16 Dynamic time history response at the maximum bending moment of pile body

由图16可知:在5010波、1004波、El-Centro波作用下,0~40 s内的桩身弯矩振幅较大;在Kobe波作用下,0~20 s内的桩身弯矩振幅较大;整个地震过程中,桩身产生大弯矩的持续时间较短。在不同类型地震波作用下,桩身弯矩峰值的出现时刻亦有所差异,在5010波、1004波、Kobe波、El-Centro波作用下,桩身弯矩峰值出现的时刻分别为第17.46、13.13、10.22、4.43 s,均提前于桩顶加速度峰值出现的时刻。这表明地震波种类对该时间段内桩基础的影响显著。

4 结论及建议

结合厦门第二东通道翔安大桥工程实际及振动台试验结果,得出以下结论:

1)浅层饱和砂土相较于深层饱和砂土的液化程度更高。5、20 cm深度的饱和砂土孔压比均稳定在0.8附近,处于完全液化状态;40 cm深度的饱和砂土孔压比稳定值小于0.8,未达到完全液化状态。

2)在不同类型地震波作用下,桩底加速度时程响应曲线的频率更高;桩顶加速度峰值出现时刻相对于变截面处和桩底出现明显的滞后现象,在5010波作用下的滞后时间最长,达到5.12 s。

3)在不同类型地震波作用下,桩顶处的加速度最大,变截面处次之,桩底处最小,均大于输入地震波的峰值;上覆饱和砂土层液化后对1004波的放大效应最为明显,桩顶加速度放大系数达到3.54。

4)桩身弯矩从桩底至桩顶先增大后减小,整体呈现“单峰值”的变化规律;由于变截面桩身几何特性的改变及饱和砂土液化,变截面位置处的弯矩出现陡增现象。

5)1004波作用下的桩身加速度、桩身弯矩峰值最大,Kobe波作用下的桩顶水平位移峰值最大,表明大直径变截面桩的动力响应特性对不同类型地震波的敏感程度存在较大差异。

针对振动台试验研究结果,提出如下工程建议:

1)液化场地条件下,饱和砂土层与强风化花岗岩层的交界处、变截面位置处的弯矩较大,进行大直径变截面桥梁桩基抗震设计时应该着重考虑土层分界、变截面附近的抗弯能力。

2)针对厦门第二东通道翔安大桥所处的液化场地,在进行大直径变截面桥梁桩基的抗震设计时,可采用不同类型的地震波进行桩基特性的验算。具体而言,对于加速度时程响应和桩身弯矩时程响应,可以使用1004波进行验算;对于桩顶水平位移时程响应,可以选择Kobe波进行验算。

参考文献:

- [1] Zhang Cong, Feng Zhongju, Guan Yunhui, et al. Study on liquefaction resistance of pile group by shaking table test [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(1): 5074513.
- [2] Chen Huiyun, Feng Zhongju, Li Tie, et al. Study on the vertical bearing performance of pile across cave and sensitivity of three parameters [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 17342.
- [3] Feng Zhongju, Huo Jianwei, Hu Haibo, 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, 2021(1): 8884396.
- [4] Feng Zhongju, Meng Yingying, Zhang Cong, 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. [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.]
- [5] Liu Linchao, Yang Xiao. Dynamic interaction of saturated soil-pile-structure system under seismic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(1): 120-128. [刘林超, 杨骁. 地震作用下饱和土-桩-上部结构动力相互作用研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(1): 120-128.]
- [6] Zou Xinjun, Yang Zijian, Wu Wenbing. Horizontal seismic response of end-bearing piles in unsaturated soil foundation under SH waves [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(1): 72-80. [邹新军, 杨紫健, 吴文兵. 非饱和土地基中端承桩对SH波的水平地震响应 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(1): 72-80.]
- [7] Su Zhuolin, Jia Kemin, Xu Chengshun, et al. Influence of bi-directional seismic action on seismic response of pile-foundation-structure in liquefiable inclined soil [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(7): 15-26. [苏卓林, 贾科敏, 许成顺, 等. 双向地震作用对可液化倾斜场地-桩基-结构地震响应的影响研究 [J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(7): 15-26.]
- [8] 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. [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.]
- [9] Li Hongjiang, Yang Haokun, Liu Songyu, et al. Lateral dynamic bearing response properties of single pile before and after liquefaction ground treatment [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(5):

- 1098–1102.[李洪江,杨昊坤,刘松玉,等.可液化地基处理前后单桩水平承载动力响应特征[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(5):1098–1102.]
- [10] Javdani Naeini A, Choobbasti A J, Saadati M. Seismic behaviour of pile in three-layered soil(case study: Babol City Center Project)[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(11):4487–4497.
- [11] Feng Zhongju, Wang Xiqing, Li Xiaoxiong, 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.[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.]
- [12] 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.[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.]
- [13] Zhang Hengyuan, Qian Deling, Shen Chao, 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.[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.]
- [14] Feng Zhongju, Wang Yiran, Zhang Junbo, et al. Comparative analysis of dynamic response between variable section pile and constant section pile in liquefaction site under earthquake action[J]. *World Earthquake Engineering*, 2022, 38(3):59–69.[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.]
- [15] Yuan Linjuan, Liu Xiaosheng, Wang Xiaogang, et al. Analytic solution of dynamic characteristics and responses of soil–box model for shaking table tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(6):1038–1042.[袁林娟,刘小生,汪小刚,等.振动台土–箱结构模型动力特性及反应的解析分析[J].*岩土工程学报*, 2012, 34(6):1038–1042.]
- [16] Zhang Tao, Gao Bo, Fan Kaixiang, et al. Study on flexible material in the sidewall of rigid model box in shaking table test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10):2415–2424.[张涛,高波,范凯祥,等.地震作用下振动台试验刚性模型箱侧壁柔性材料研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10):2415–2424.]
- [17] Li Peizhen, Chen Yueqing, Lu Xilin, et al. Shaking table test- ing of hard layered soil–pile structure interaction system [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2006, 34(3):307–313.[李培振,陈跃庆,吕西林,等.较硬分层土–桩基–结构相互作用体系振动台试验[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(3):307–313.]
- [18] Feng Zhongju, Wang Yiran, Cai Jie, et al. Dynamic response characteristics of large diameter variable section single pile under the coupling action of pile–splinter soil layer[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2025, 38(1):162–171.[冯忠居,王逸然,蔡杰,等.桩–震陷土层耦合作用下变截面单桩动力响应[J].*振动工程学报*, 2025, 38(1):162–171.]
- [19] Feng Zhongju, Wang Wei, Zhang Cong, et al. Dynamic response difference of single pile and pile group with variable section in variation of seismic subsidence soil layer [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2024, 58(7):1086–1096.[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.]
- [20] Feng Zhongju, Li Yuanpeng, Wang Wei, et al. Experimental study on shaking table model of six piles with large diameter and variable section in different thickened soil layers [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2025, 38(3):595–603.[冯忠居,李元鹏,王伟,等.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[J].*振动工程学报*, 2025, 38(3):595–603.]
- [21] Zhang Minzheng. Study on similitude laws for shaking table tests[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 1997, 17(2):52–58.[张敏政.地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J].*地震工程与工程振动*, 1997, 17(2):52–58.]
- [22] 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.[黄维平,邬瑞锋,张前国.配重不足时的动力试验模型与原形相似关系问题的探讨[J].*地震工程与工程振动*, 1994, 14(4):64–71.]
- [23] Korre E, Abdoun T, Zeghal M, et al. Verification of generalized scaling laws: Two centrifuge tests of a liquefiable sloping deposit[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 141:106480.
- [24] 李德寅,王邦楣,林亚超.结构模型实验[M].北京:科学出版社,1996.
- [25] Li Guang, Ma Fengshan, Guo Jie, et al. Experimental study on similar materials ratio used in large scale engineering model test[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2020, 41(11):1653–1660.[李光,马凤山,郭捷,等.大尺寸工程模型试验中的相似材料配比试验研究[J].东

- 北大学学报(自然科学版),2020,41(11):1653–1660.]
- [26] 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. [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.]
- [27] Liu Haiqiao, Liang Long, Deng Jianliang. Development of reinforced concrete pile group model for shaking table test [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(2): 26–30. [刘海侨, 梁龙, 邓检良. 用于振动台试验的钢筋混凝土群桩模型研制及测试[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(2): 26–30.]
- [28] He Jingbin, Feng Zhongju, Dong Yunxiu, et al. Dynamic response of pile foundation under pile–soil–fault coupling effect in meizoseismic area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2389–2400. [何静斌, 冯忠居, 董芸秀, 等. 强震区桩–土–断层耦合作用下桩基动力响应[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2389–2400.]

Dynamic Response Characteristics of Single Pile Foundation with Large Diameter and Variable Section in Liquefaction Site Under Earthquake

FENG Zhongju¹, LI De¹, ZHANG Cong^{1*}, XU Boxi¹, ZHAO Ruixin¹, LAI Dejin²

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

2. Xiamen Road and Bridge Engineering Investment Development Company Limited, Xiamen 361000, China)

Abstract: This study relies on the Xiamen Second East Corridor Xiang'an Bridge to explore the dynamic response of a large-diameter variable-section monopile in a liquefied site under the action of different types of seismic waves. The pore-pressure ratio response of the saturated sand layer, the acceleration of the pile body, and the horizontal displacement of the pile top in the large-diameter variable-section monopile are analyzed through shaking table tests with a strength of 0.15g in the 5010 wave, the 1004 wave, the Kobe wave, and the El-Centro wave. The bending moment of the pile body and other dynamic response characteristics are also examined. The results show that the liquefaction of the saturated sand soil layer has an amplification effect on seismic waves, and the acceleration response of the pile top demonstrates an evident hysteresis phenomenon relative to the variable section and pile bottom. The pile top exhibits permanent lateral displacement under the action of the four types of seismic waves. The bending moment of the pile body shows a tendency to increase and then decrease from the pile bottom to the pile top, with a steep increase at the position of the variable section. The acceleration of the pile body and the peak bending moment under the action of the 1004 wave reach the maximum, while the peak horizontal displacement of the pile top under the Kobe wave reaches the maximum. These results indicate that there are significant differences in the sensitivity of the dynamic response characteristics of large-diameter variable-section pile foundations to different types of seismic waves. Therefore, for the seismic design of large-diameter variable-section pile foundations, different types of seismic waves should be selected to evaluate the dynamic response characteristics of the pile foundation.

Key words: liquefaction sites; large diameter pile with variable cross-section; saturated sand; dynamic response; earthquake design

(编辑 李轶楠)

引用格式: Feng Zhongju, Li De, Zhang Cong, et al. Dynamic response characteristics of single pile foundation with large diameter and variable section in liquefaction site under earthquake [J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(5): 237–247. [冯忠居, 李德, 张聪, 等. 地震作用下液化场地大直径变截面单桩基础动力响应特性[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(5): 237–247.]