文章编号:1674-2974(2024)05-0056-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024047

液化场地大直径变截面单桩动力响应研究

冯忠居[1],段久琴[1],张聪[1†],林立华[2],赵瑞欣[1],王逸然[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 361000)

摘 要:为研究不同地震动强度下液化场地大直径变截面单桩的动力响应规律,基于振动台试验,选取5010波,在地震动强度0.10*g*~0.45*g*作用下,研究液化场地砂土孔压比和大直径变截面单桩桩顶水平位移、桩身弯矩、桩身加速度时程响应及桩基损伤等变化规律.试验结果表明:饱和砂土孔压比随着地震动强度的增大上升明显,地震动强度≥0.30*g*时,饱和砂土孔压比稳定值在0.9附近,此时砂土完全液化;在0.45*g*地震动强度作用下,桩身加速度、桩顶水平位移及桩身弯矩均达到最大;桩身不同位置处加速度峰值出现时刻均滞后于输入地震波加速度峰值出现时刻,且桩顶及变截面的加速度响应比桩端的响应更弱;不同地震动强度作用下,桩身弯矩最大值均出现在液化土层和非液化土层分界处,且变截面处弯矩小于土层分界面处;地震动强度达到0.30*g*时,大直径变截面单桩桩身发生损伤.因此,液化场地下大直径变截面桥梁单桩基础抗震设计时,应该重点考虑饱和砂土层分界处、变截面处的抗弯能力,以确保单桩桩身强度满足抗震要求.

关键词:岩土工程;变截面单桩;液化场地;动力响应;振动台试验;抗震设计
中图分类号:TU443.15 **文献标志码**:A

Study on Dynamic Response of Large Diameter Variable Cross-section Single Pile in Liquefaction Site

FENG Zhongju[1], DUAN Jiuqin[1], ZHANG Cong[1†], LIN Lihua[2], ZHAO Ruixin[1], WANG Yiran[1]
(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Xiamen Road and Bridge Engineering Investment and Development Co. Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: To study the dynamic response law of large diameter variable cross-section single pile in liquefaction sites under different ground motion intensities, shaking table tests were conducted. Employing the 5010 wave and subjecting the system to ground motion strengths ranging from 0.10*g* to 0.45*g*, this study examined the evolution of sand pore pressure ratio, horizontal displacement at the top of the piles, bending moment along the pile body, as

* **收稿日期**:2023-05-18
基金项目:福建省交通运输科技项目(202105),Fujian Transportation Science and Technology Project(202105);海南省交通科技项目(HNZXY2015-045R),Hainan Provincial Transportation Science and Technology Project (HNZXY2015-045R);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(4190070568),National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation (4190070568);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102218115),Fundamental Research Funds for the Central Universities of Chang'an University (300102218115)
作者简介:冯忠居(1965—),男,山西运城人,长安大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail:zhangcong@chd.edu.cn

well as the time history response of pile acceleration and foundation damage. The test results show that the pore pressure ratio of saturated sand increases obviously with the increase of ground motion strength. The pore pressure ratio of saturated sand increases obviously with the increase of ground motion intensity. When the ground motion intensity is ≥0.30*g*, the stable value of the pore pressure ratio of saturated sand is near 0.9, and the sand is completely liquefied. Under the action of 0.45*g* ground motion, the acceleration of pile body, the horizontal displacement of pile top and the bending moment of pile body all reach the maximum. The peak acceleration at different positions along the pile body lags behind that of the input seismic wave, and the acceleration response of the pile top and variable cross-section is weaker than that of the pile tip. The maximum bending moment of the pile appears at the boundary between the liquefied soil layer and the non-liquefied soil layer, and the bending moment at variable cross-section is smaller than that at the soil layer interface. When the ground motion strength reaches 0.30*g*, the damage of a large diameter variable cross-section single pile occurs. Therefore, in the seismic design of the single pile foundation of a large diameter variable cross-section bridge under a liquefaction site, the bending capacity at the boundary of the saturated sand layer and variable section should be considered to ensure that the strength of the single pile meets the anti-seismic requirements.

Key words: geotechnical engineering; variable cross-section single pile; liquefaction site; dynamic response; shaking table test; seismic design

公路桥梁等工程领域中,多采用稳定性、承载能力及适应能力等性能良好的桩基础.但地震是一种极具破坏性的自然灾害,液化场地的地震灾害更是会对桥梁结构的整体安全产生影响[1-7].

当前,国内外学者对桩基的动力响应展开了广泛的研究.在理论研究方面,Ding[8]采用动力有限元分析方法,探讨了群桩的地震反应规律;Li等[9]采用FBG法研究了液化土中桩基的横向动力响应规律;Rovithis等[10]通过分析地震波作用下不均匀土层中单桩动力响应规律,对桩端固定条件、桩土刚度比等参数的作用进行了阐述,并使用理论解和有限元软件进行分析验证.开展振动台试验研究桩基础的动力响应问题是一种有效方法,冯忠居等[11-13]、何静斌等[14]、张海平等[15]进行桩-土相互作用振动台试验,得到基本动力响应和动力相互作用规律;张聪等[16]借助大型振动台试验,对比分析了单桩和群桩基础在强震作用下的动力时程响应差异;陈文龙等[17]进行了饱和砂土中桩基础的振动台试验,研究发现:饱和砂土中,斜桩基础的抗震性能比直桩基础更好;张恒源等[18]通过可液化地基-群桩基础-结构动力相互作用下的体系振动台试验,研究了可液化地基及群桩基础在双向耦合地震作用动力响应;Veski等[19]借助振动台试验,研究了液化地基中桩-土相互作用在不同振动频率和振幅下的动力相互作用特性;李雨润等[20]基于离心机振动台试验,探究了液化场地中直、斜群桩基础地震反应;孔德森等[21]开展群桩-柱墩模型振动台试验,对地基加速度动力响应规律、孔隙水压力变化及桩-柱墩加速度反应进行了分析;Shen等[22]基于振动台模型试验,研究了液化土侧向膨胀对群桩基础动力响应的影响;唐亮等[23]开展振动台试验,对土层发生液化时桥梁群桩的震害响应问题展开研究;冯忠居等[24-25]借助振动台试验,研究分析了不同类型地震波下变截面桩基础桩身加速度、桩顶水平位移等动力响应特性;冯忠居等[26]依托振动台模型试验,对比分析了大直径变截面单桩、群桩基础在地震波作用下,不同厚度震陷土层时的动力响应差异问题.在数值仿真分析方面,邹佑学等[27]利用FLAC3D有限差分软件,对地震作用下可液化场地桩与土的应变及变形进行分析;冯忠居等[28]应用有限元软件建立数值模型,对比分析了液化场地变截面桩和等截面桩在地震作用下的动力响应特征;Naeini等[29]通过有限元软件进行数值模拟,对地震作用下桩弯矩及水平位移展开研究;孔锦秀[30]基于离心机试验及数值模拟,对地震作用下可液化场地桩基础和上部结构的动力响应展开研究;苏雷等[31]基于已完成的桩-土动力相互作用振动台试验,

采用FLAC3D软件建立相应的数值模型,根据振动台试验结果验证数值模型是否可靠并且分析了误差来源.

目前,国内外学者研究多集中于液化场地等截面桩基础的动力响应分析,缺乏对不同地震动强度下液化场地大直径变截面单桩动力响应的研究.因此,本文依托厦门第二东通道翔安大桥实际工程,借助振动台试验,对不同地震动强度作用下液化场地砂土孔压比和大直径变截面单桩桩顶水平位移、桩身弯矩、桩身加速度时程响应以及桩基损伤进行分析,为液化场地大直径变截面单桩的抗震设计研究提供借鉴.

1 工程背景

厦门第二东通道翔安大桥H15墩采用大直径变截面钢管混凝土复合桩,桩基础选用C35水下海工耐久混凝土,其抗压强度为48 MPa.土层分布如图1所示.根据地质勘察报告,拟建区设计地震动加速度峰值为0.15g,地震设防烈度为Ⅶ度.桩基础周围饱和砂土层在地震作用下极易发生液化,因此将通过振动台模型试验开展液化场地下大直径变截面单桩的动力特性研究.

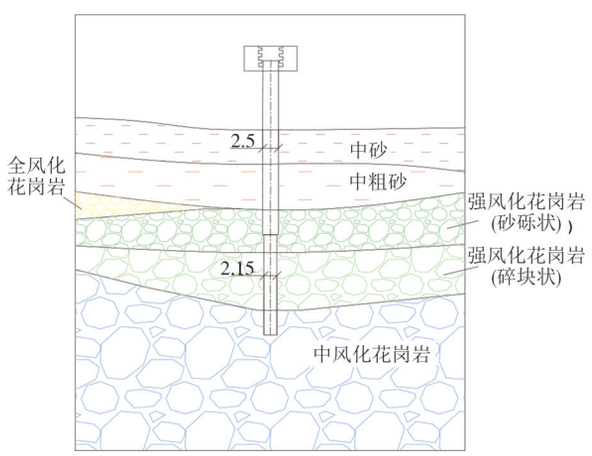


图1 土层分布(单位:m)

Fig.1 Soil layer distribution(unit:m)

2 振动台模型试验

2.1 试验设备

本试验借助三向六自由度5 m×5 m地震模拟振动台完成,其有关技术参数见表1.为尽可能减少误差,按照相似比原则并考虑到“模型箱效应”的影响,选择3.05 m×1.7 m×1.8 m(长×宽×高)模型箱,如图2所示.试验过程中为降低地震波反射对试验结果的影响,在模型箱四周填充厚度为20 mm的泡沫.

表1 振动台技术参数

Tab.1 Technical parameters of shaker

台面尺寸/(m×m)	频率/Hz	抗倾覆力矩/(kN·m)	最大加速度幅值/g	最大位移幅值/mm
5×5	0.5~50	≥300	1	80



图2 模型箱

Fig.2 Model box

2.2 相似比设计

本试验选取人工质量模型,考虑到模型箱尺寸、原型尺寸以及工程实际情况等多个影响因素,本试验选用尺寸相似比C_l=1∶50,并在单桩桩顶配置100 kg人工质量,各物理量相似常数见表2.

表2 各物理量相似常数

Tab.2 Similar constants of physical quantity

物理量	量纲	相似常数
加速度a	LT^{-2}	1
重力加速度g	LT^{-2}	1
弹性模量E	FL^{-2}	1/3.5
线尺寸l	L	1/50
密度ρ	$FL^{-4}T^2$	1
应力σ	FL^{-2}	1/3.5
应变ε	—	1

2.3 模型桩、土设计及测试元件布设

2.3.1 模型桩设计

根据几何相似条件,模型桩的桩长取90 cm,桩径5.0/4.3 cm.模型桩采用微粒混凝土配置,测得其抗压强度为16.91 MPa.桩身配筋率2.4%,其中主筋材料采用4根直径4 mm的镀锌铁丝,配置抵抗剪切作用的螺旋箍筋,箍筋采用1根直径2.8 mm的镀锌铁丝.模型桩如图3所示.



图 3　模型桩

Fig.3　Model pile

2.3.2　模型土设计

试验根据厦门第二东通道翔安大桥地质勘察资料设置模型土,土层由上到下分别为饱和砂土(30 cm)、强风化花岗岩(47 cm)、中风化花岗岩(5 cm).中风化花岗岩抗压强度为68 MPa,本试验选用微粒混凝土模拟中风化花岗岩,测得其抗压强度为19.40 MPa,如图4所示,符合相似比关系,满足试验要求.

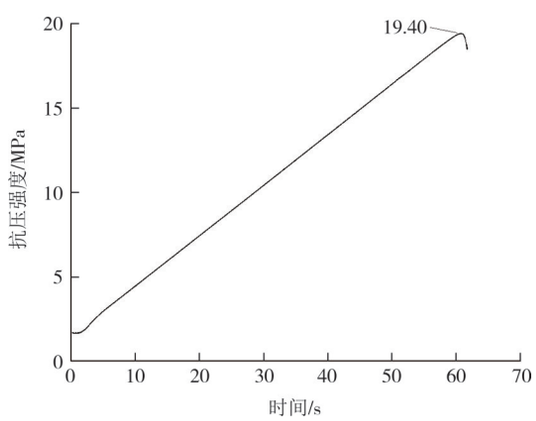


图 4　抗压强度测试值

Fig.4　Compressive strength test value

基岩混凝土浇筑时在桩基础相应位置设置5 cm深、直径8 cm的预留孔,以便模型桩准确就位,预留孔如图5所示.

试验选用与原状土级配相同的土体模拟饱和砂土层,并通过筛分法控制模型土的颗粒级配与原状土的颗粒级配基本一致.填筑地基土采用分层填筑、人工夯实的方法,按照经验标准控制土的相对密实



图 5　预留孔

Fig.5　Reserved holes

度和含水量,分层装填碾压并夯实到预期效果.模型土的物理力学指标如表3所示.

表 3　模型土参数

Tab.3　Model soil parameters

土类	天然含水率 ω/%	密度 ρ/(g·cm^{-3})	C/kPa	φ/(°)
砂土	25.5	1.86	25	24
强风化花岗岩	11.2	2.56	22.5	43

2.3.3　测试传感器布设

测试传感器布设示意图如图6所示.具体布设情况如下:

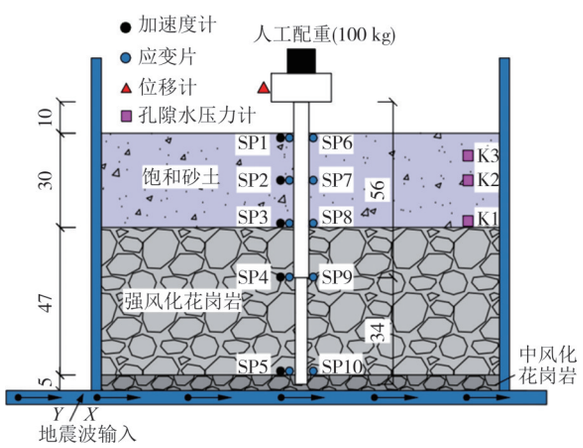


图 6　模型桩与测试元件布设(单位:cm)

Fig.6　Layout of model piles and test elements(unit:cm)

在模型桩的桩顶、饱和砂土层中部、土层分界面、变截面及基岩面布设加速度传感器,以测量在不同地震动强度作用下桩身加速度变化情况.在装箱过程中,采用橡皮筋将加速度传感器粘贴在桩身,并用胶带加固,如图7(a)所示.

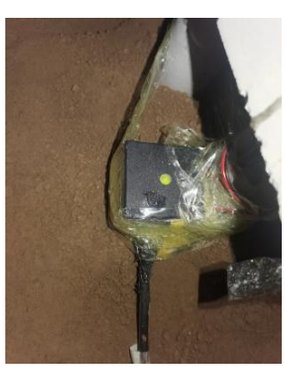
采用专用橡皮泥将拉线相对式位移传感器固定在桩顶处,以测量不同强度地震动作用下桩顶水平位移响应,从而评估地震对桩基础的影响程度,如图7(b)所示.

采用电阻式应变片,其布设位置与加速度传感器布设位置相同,并对应变片涂抹环氧树脂进行防水处理,以测量在不同地震动强度作用下桩身应变值,进而计算得出桩身弯矩,如图7(c)所示.根据材料力学理论可得桩身表面应变和弯矩的计算公式如下:

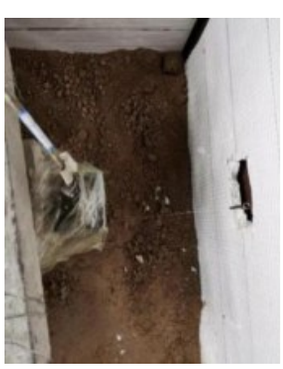
$$M = \frac{EI_{\mathrm{P}}(\varepsilon_{\mathrm{l}} - \varepsilon_{\mathrm{r}})}{r_{\mathrm{s}}} \tag{1}$$

式中:M为桩身截面弯矩;ε_{l}、ε_{r}为桩身两侧的应变值;E为单桩弹性模量;I_{P}为圆形截面惯性矩;r_{s}为应变片到单桩中心距离.

在饱和砂土层5 cm、15 cm、30 cm深度处布设孔隙水压力计,以测量在不同强度地震动作用下土体孔隙水压力,判断所在位置饱和砂土层的液化情况,如图7(d)所示.



(a)加速度传感器



(b)位移传感器



(c)应变片



(d)孔隙水压力计

图7 测试元件

Fig.7 Test components

2.4 试验工况

试验工况为0.10g~0.45g 5010波作用,此工况下进行液化场地大直径变截面单桩的动力响应分析.50年超越概率为10%的风险水平,是目前国际上一般建筑物普遍采用的抗震设防标准.故本试验选取5010波,如图8所示.具体试验工况见表4.

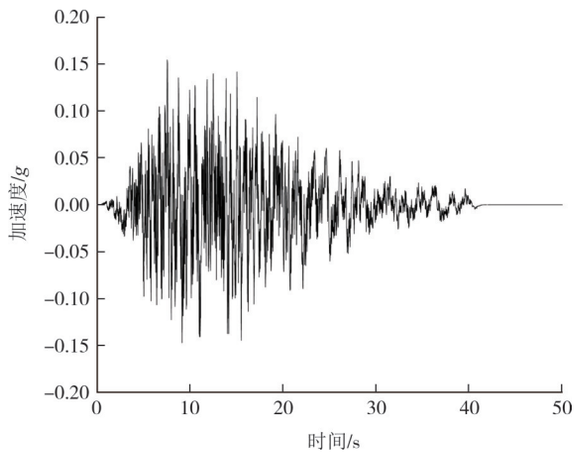


图8 5010波

Fig.8 5010 wave

表4 试验工况

Tab.4 Test scheme

桩长/cm	桩径/cm	桩数	液化层厚度/cm	地震波	地震动强度/g
90	5.0/4.3	1	30	5010	0.10,0.15,0.20,0.25 0.30,0.35,0.40,0.45

3 试验结果分析

3.1 孔压比响应

不同地震动强度作用下,饱和砂土层30 cm处的孔压比时程曲线如图9所示.

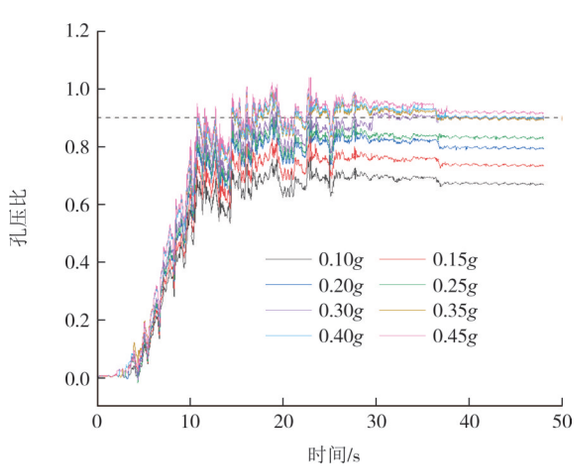


图9 30 cm处孔压比

Fig.9 Pore pressure ratio at 30 cm

由图9可看出,不同地震动强度下孔压比变化规律相似:振动初期,孔压比保持在0附近,持续一段时间后迅速增加,曲线上下波动,总体上孔压比逐渐增长,最终趋于稳定.

可以看出地震动强度越大,孔压比开始增长的

时刻越早,最终达到稳定孔压比的时刻也越早,这是因为地震动强度越大,饱和砂土层中孔隙水压力积聚越快,孔隙水压力增长越明显,砂土层越容易发生液化.另外,随着地震动强度的增加,孔压比最终达到的稳定值逐渐增加,这是因为随着地震动强度增加,孔隙水压力上升值变大,更接近土体的有效应力.这说明地震动强度是影响砂土液化一个关键的外在因素,在桩基础的抗震设计中,应根据当地地震设防烈度对饱和砂土层进行合理化处置.

地震动强度为0.10g~0.25g时,未观测到明显的喷砂冒水现象,但地震动强度≥0.30g时,观测到饱和砂土层出现喷砂冒水现象,如图10所示,说明饱和砂土发生完全液化,此时孔压比稳定值均在0.9附近波动.地震动强度为0.30g时,孔隙水压力为2.35 kPa,孔压比为0.91,并且出现了明显的喷砂冒水现象.对于该类砂土,可将孔压比0.9作为判断饱和砂土是否完全液化的临界孔压比.



图10　喷砂冒水

Fig.10　Sand blasting and water emitting

加载过程中孔压比出现小于0的情况,其原因是饱和砂土在振动过程中可能会发生剪胀现象,导致土体体积的扩大,从而降低孔隙水压力,引起孔压比出现负值.

3.2　桩身加速度响应

不同地震动强度作用下,大直径变截面单桩桩身加速度变化规律如图11所示,桩顶加速度放大系数如图12所示.

由图11可知,不同地震动强度作用下,大直径变截面单桩桩身加速度均由桩端至桩顶逐渐增大,同一深度处桩身加速度均随着地震动强度的增大而增大.桩身加速度在强风化花岗岩中增长不明显,而在饱和砂土层中桩身加速度增长很快,这说明饱和砂土层对地震波具有一定的放大效应.单桩桩身变截面位于强风化花岗岩层中,由变截面位置至土层分界面处,加速度显著增大,其原因是地震动由桩端

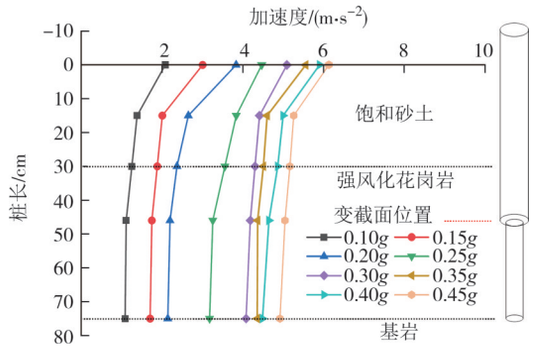


图11　桩身加速度变化规律

Fig.11　Variation law of pile acceleration

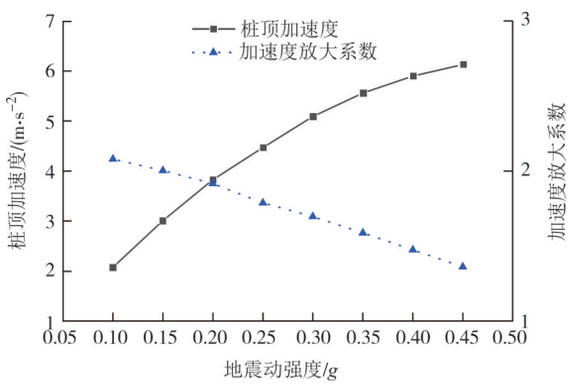


图12　桩顶加速度放大系数

Fig.12　Acceleration amplification factor of pile top

传至桩顶,而变截面以上桩径较大,桩−土整体刚度增强,传递地震动的能力增加,导致桩身加速度放大效应明显.

由图12可知,地震动强度为0.10g~0.45g时,桩顶加速放大系数分别为2.08、2.00、1.92、1.79、1.70、1.59、1.48、1.36,均大于1.0,说明桩顶加速度均存在放大效应,且桩顶加速度放大系数随着地震动强度增加而减小,这是因为随着地震动强度的持续增加,在振动过程能量损失变大,桩周土传递地震动的能力降低,而且随着地震动强度的增加,饱和砂土层发生液化以及桩体发生损伤,传递震动的能力减弱,进而导致桩顶加速度放大系数逐渐变小.

不同地震动强度作用下,桩顶、变截面处、桩端加速度时程响应如图13所示.

由图13可知,大直径变截面单桩桩顶、变截面处、桩端加速度响应随着地震动强度变化而变化.桩顶及变截面的加速度时程曲线“细而疏”,桩端的加速度时程曲线“粗而密”,即地震动强度相同时,桩顶及变截面的加速度响应比桩端的响应更弱.其原因主要是饱和砂土层对地震波的滤波效应较明显,消除了地震波中的高频成分,上部岩土体及桩基础相互作用下桩顶、变截面对输入地震波的高频成分敏

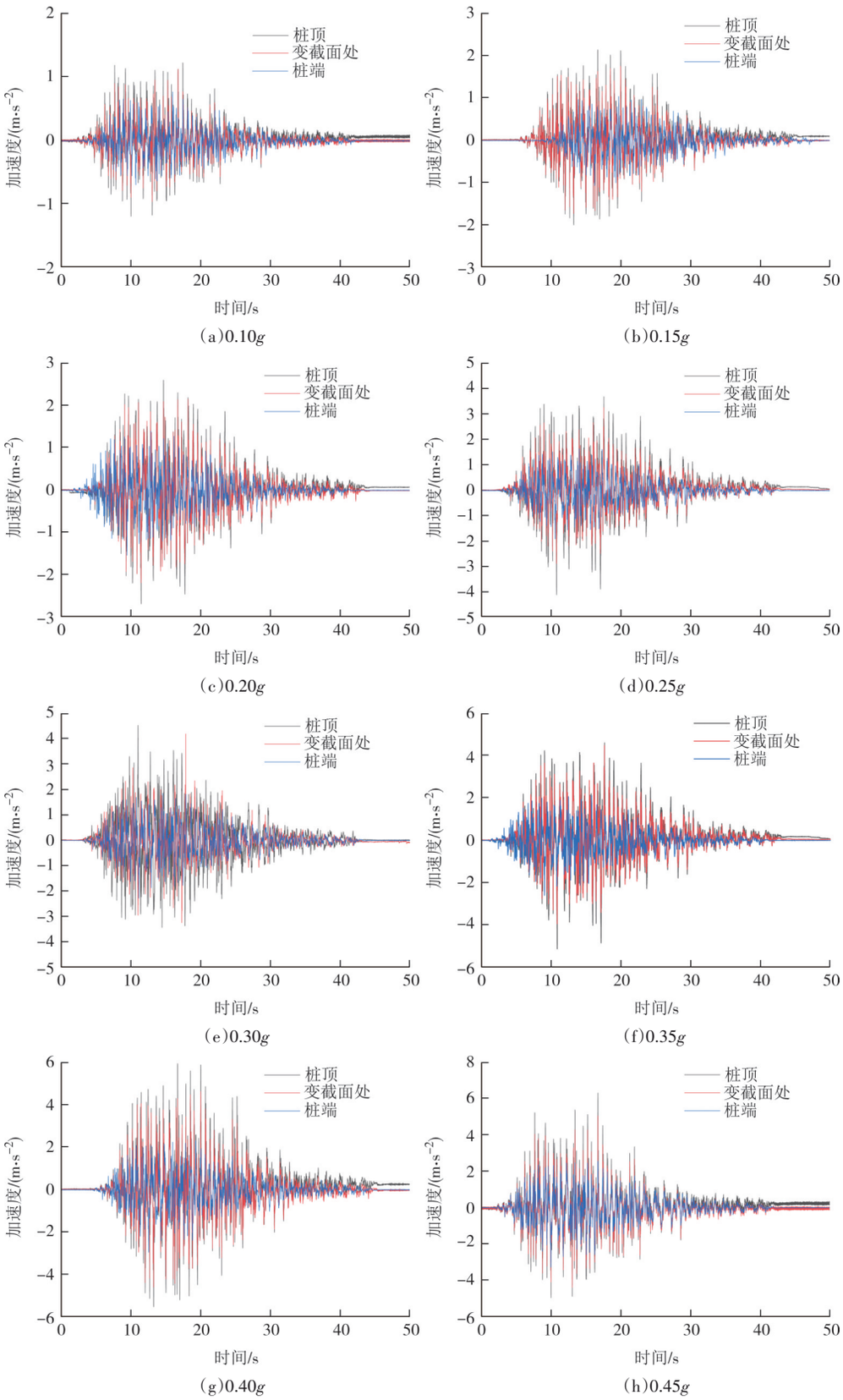


图 13 加速度时程响应

Fig.13 Acceleration time history response

感度较低且响应不明显.基岩对地震波的高频成分较敏感,且对地震波的频率影响较小.不同地震动强度作用下,输入地震波加速度峰值出现时刻均早于桩身不同位置处,且桩底加速度达到峰值的时刻均

早于桩顶、变截面处.以地震动强度0.15g为例,桩顶、变截面、桩底处加速度峰值分别出现在17.44、16.76、15.97 s,与地震波峰值出现时刻相比分别滞后了9.94、9.26、8.39 s,这说明桩基础由桩端到桩顶地震动荷载响应存在滞后性,而饱和砂土层的液化会加剧这种滞后性.

3.3　桩顶水平位移响应

不同地震动强度作用下,大直径变截面单桩桩顶水平位移响应如图14所示,最大值变化规律如图15所示.

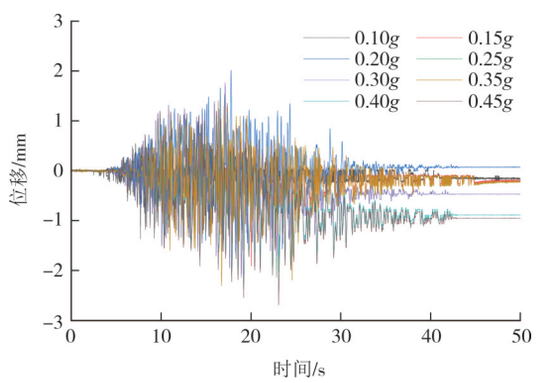


图14　桩顶水平位移时程响应

Fig.14　Time history response of horizontal displacement of pile top

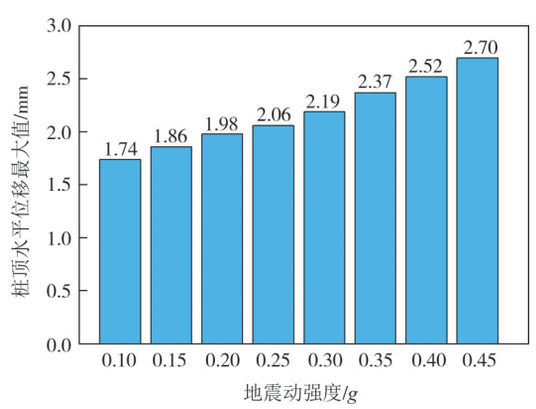


图15　桩顶水平位移最大值

Fig.15　Maximum horizontal displacement of pile top

由图14、图15可知,不同地震动强度作用下,大直径变截面单桩桩顶水平位移变化规律基本相似,即随着地震动强度的增加,桩顶水平位移逐渐增大.在地震动强度为0.10g~0.45g时,桩顶水平位移分别在16.77、20.04、17.78、22.86、18.92、16.73、19.19、23.08 s达到最大值,且最大值分别为1.74、1.86、1.98、2.06、2.19、2.37、2.52、2.70 mm,说明桩顶水平位移最大值随着地震动强度的增大而增大,其原因在于地震作用下饱和砂土层逐渐发生液化,失去一部分刚度和强度而呈现出类似液体的特征,对桩侧约束力减小,桩土产生相对位移,进一步导致桩顶水平位移量增大;另外随着地震动强度的增大,桩体本身的水平位移量增大,桩顶的水平位移量增大更为明显.且随着地震动强度的增大,桩身自身的刚度和强度都会有所下降,抵抗水平位移的能力减弱.由图14可以看出,地震动强度≥0.30g时,在地震荷载加载结束之后,桩顶产生了不可恢复的水平位移.地震动强度为0.45g时,桩顶永久水平位移达到了1.0 mm.这主要是因为在地震荷载下,随着地震动强度的增加和持续作用,桩侧饱和砂土层发生液化,其水平抗力逐渐变弱,桩土相互作用减小,导致桩体发生了塑性变形.

3.4　桩身弯矩响应

不同地震动强度作用下,大直径变截面单桩桩身弯矩变化规律如图16所示,最大值变化如图17所示.

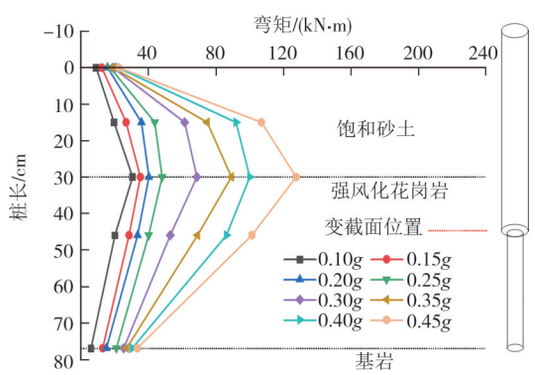


图16　桩身弯矩变化规律

Fig.16　Variation law of pile bending moment

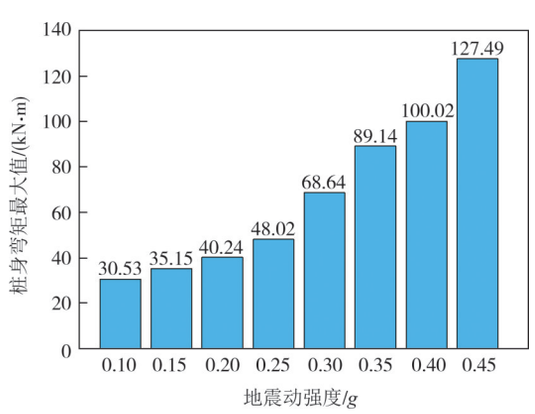


图17　桩身弯矩最大值

Fig.17　Maximum bending moment of pile

由图16、图17可以看出,不同地震动强度作用下,大直径变截面单桩桩身弯矩均从桩顶到桩端先增大后减小,且弯矩最大值位于桩身30 cm处,即液

化土层与非液化土层分界处,其原因在于地震作用下饱和砂土层发生液化现象,引起土体的侧向扩展,桩身与土体之间产生相对位移,导致桩身弯矩较大.地震动强度为0.10g~0.45g时,桩身弯矩最大值近似呈线性增大,其最大值分别为30.53、35.15、40.24、48.02、68.64、89.14、100.02、127.49 kN·m.同时,桩身弯矩值在变截面处小于饱和砂土层30 cm处,且在变截面发生小幅度突变,这是因为桩身抗弯刚度在变截面处发生突变,桩身弯矩发生变化.故在桩基础设计时应考虑土层分界面及变截面处桩基础的抗弯能力.

不同地震动强度作用下,大直径变截面单桩桩身弯矩最大值处的弯矩时程响应如图18所示.

由图18可以看出,不同地震动强度作用下,大直径变截面单桩桩身弯矩在0~30 s范围内振幅较大,整个地震历程中桩身产生大弯矩的持时较长,30 s以后弯矩逐渐减小并趋于0,这说明桩体在变截面处并没有发生明显的结构破坏,未产生永久弯矩.

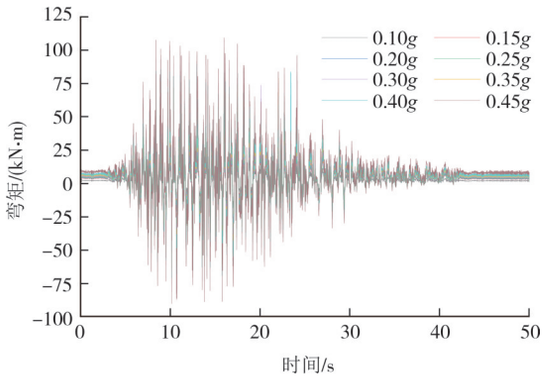


图18 桩身最大弯矩处时程响应

Fig.18 Time history response at the maximum bending moment of pile

3.5 桩基损伤

借助地震波处理软件SeismoSignal得出单桩的傅里叶谱图、桩基基频变化规律分别如图19、图20所示.

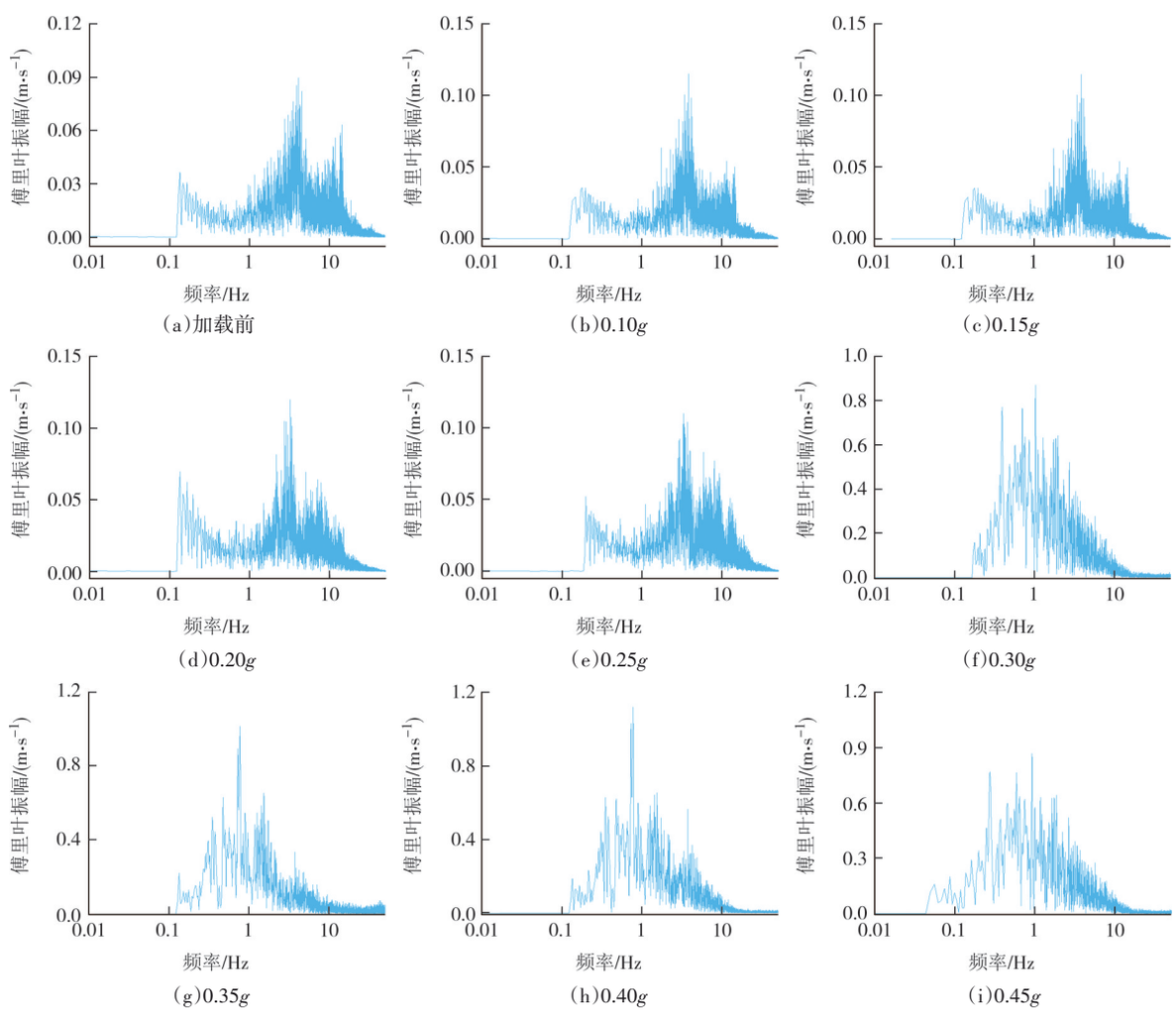


图19 傅里叶谱图

Fig.19 Fourier spectrum

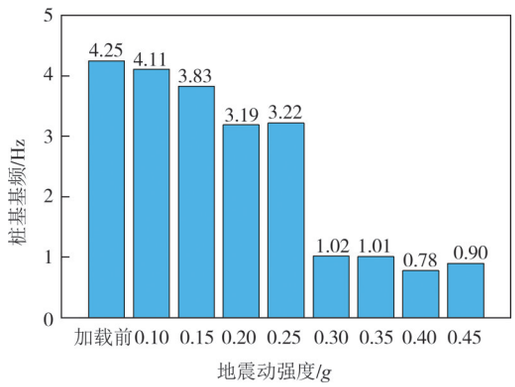


图 20　桩基基频变化规律

Fig.20　Variation law of foundation frequency of pile foundation

由图 19、图 20 可知,加载前桩基基频为 4.25 Hz,在地震动强度为 0.10~0.45g 时,基频分别为 4.11、3.83、3.19、3.22、1.02、1.01、0.78、0.90 Hz.其中地震动强度为 0.10g~0.25g 时,桩基基频与加载前相比,均出现小幅度的降低,但总体未出现明显变化.说明桩基在 0.10g~0.25g 地震动强度作用下,其刚度及完整性好,桩基没有产生明显损伤破坏.与 0.25g 地震动强度相比,地震动强度为 0.30g 时,桩基基频出现明显的下降,降幅达 68.32%,这表明桩基在此地震动强度下已经出现明显损伤,主要是因为随着地震动强度的持续增加,饱和砂土层发生液化后失去抗剪强度并处于流动状态,变截面单桩在地震荷载作用下失去了砂土层侧向抗力的保护作用,桩身发生显著的动力学响应,在地震荷载作用下很容易发生损伤.桩基损伤情况如图 21 所示.



图 21　桩基损伤

Fig.21　Damage of pile foundation

4　结论与建议

通过振动台试验,对不同地震动强度下液化场地大直径变截面单桩动力响应展开研究,得出以下结论:

1)地震动强度≥0.30g 时,出现喷砂冒水现象,此时饱和砂土孔压比稳定在 0.9,将孔压比 0.9 作为该工况下判断砂土液化的标准.

2)桩顶加速度放大系数随着地震动强度的增加而减小,且桩身加速度在饱和砂土层位置显著增大.输入地震波加速度峰值出现时刻早于桩身不同位置处,桩底加速度出现最大值的时刻均早于桩顶、变截面处.

3)随着地震动强度增大,桩顶水平位移幅值增大明显.地震动强度≥0.30g 时,在地震荷载加载结束之后,桩顶产生了不可恢复的水平位移.地震动强度为 0.45g 时,桩顶永久水平位移达到了 1.0 mm.

4)不同地震动强度下,桩身弯矩从桩顶到桩端先增大后减小.桩身弯矩最大值均出现在液化土层和非液化土层分界处,且桩身抗弯刚度在变截面处突变,在桩基础设计时应考虑土层分界面及变截面处桩基础的抗弯强度设计.

5)饱和砂土层厚度为 30 cm,地震动强度达到 0.30g 时,大直径变截面单桩桩身产生损伤,使桩基础刚度降低,从而影响桩基础的抗震性能,在地震等级较高区域进行大直径变截面单桩设计时,应合理提高混凝土等级.

参考文献

[1]　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 dynamic response of straight group pile structure in saturated sand with different thickness under earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 834-839, 852.(in Chinese)

[2]　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, 2021(6): 1-13.

[3]　DONG Y X, FENG Z J, HE J B, et al. Bearing characteristics of large-diameter hollow composite pile [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1168(2): 022069.

[4]　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(2): 1-16.

[5]　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 Z J, WANG X Q, LI X X, et al. Influence of sand

liquefaction on mechanical properties of pile foundation under strong earthquake [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019,19(1): 71-84.(in Chinese)

[6] 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 Z J, MENG Y Y, DONG Y X, et al. Characteristics of nonlinear dynamic interaction between pile and soil in liquefied site under strong earthquake [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 7299-7307.(in Chinese)

[7] 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 X, WANG R, ZHANG J M. Seismic response analysis of pile group foundation in liquefied foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (12): 2326-2331. (in Chinese)

[8] DING H R. Seismic responses study of pile-groups foundation [C]// Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation. IEEE, 2013.

[9] LI Y R, LIANG Y, WEI X, et al. Study on lateral dynamic response of pile foundation in liquefiable soil by using FBG method[J]. Applied Mechanics and Materials,2012,2080(238): 337-340.

[10] ROVITHIS E, MYLONAKIS G, PITILAKIS K. Dynamic stiffness and kine matic response of single piles in inhomogeneous soil[J]. Bulletin of Earthquake Engineering,2013,11(6): 1949-1972.

[11] 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 Z J, DONG Y X, HE J B, et al. Shaking table test of liquefaction of saturated silty sand under strong earthquake [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 186-192.(in Chinese)

[12] 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 Z J, ZHANG C, HE J B, et al. Shaking table test on time history response of single rock-socketed pile under strong earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42 (12): 3227-3237.(in Chinese)

[13] 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 group in liquefaction site under strong earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43 (5): 1289-1298.(in Chinese)

[14] 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.
HE J B, FENG Z J, DONG Y X, et al. Dynamic response of pile foundation under coupling action of pile-soil-fault in strong earthquake area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2389-2400.(in Chinese)

[15] 张海平,杨志文.地震作用下顶部预留孔桩桩基动力响应分析[J].工业建筑,2018,48(8):111-117.
ZHANG H P, YANG Z W. Dynamic response analysis of pile foundation with reserved holes at the top under earthquake [J]. Industrial Construction, 2018, 48(8): 111-117.(in Chinese)

[16] 张聪,冯忠居,孟莹莹,等.单桩与群桩基础动力时程响应差异振动台试验[J].岩土力学,2022,43(5):1326-1334.
ZHANG C, FENG Z J, MENG Y Y, et al. Shaking table test on the difference of dynamic time-history response between single pile and pile group foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5): 1326-1334.(in Chinese)

[17] 陈文龙, 马建林, 王吉, 等.地震作用下饱和砂土中斜桩基础动力特性振动台试验研究[J].铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1131-1142.
CHEN W L, MA J L, WANG J, et al. Shaking table experimental study on dynamic characteristics of inclined pile foundation in saturated sand under carthquake[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1131-1142.(in Chinese)

[18] 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.(in Chinese)

[19] VESKI R, PALU V, KRUUSEMENT K. Co-liquefaction of kukersite oil shale and pine wood in supercritical water [J]. Oil Shale, 2006: 23(3): 236-248.

[20] 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 Y R, YAN Z X, ZHANG J. Study on centrifuge test and damage numerical model of seismic response of pile group foundation in liquefied site [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42 (1): 212-223. (in Chinese)

[21] 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 D S, LI C J, LING X C, et al. Shaking table experimental study on pile-soil-structure interaction in liquefied site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup.2): 143-149.(in Chinese)

[22] SHEN J, WANG Z, LIN W, 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.

[23] 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 L, LING X C, XU P J, et al. Shaking table experimental study on seismic response of bridge pile group foundation in liquefied site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 672-680.(in Chinese)

[24] 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, 2023(3): 1-11.
FENG Z J, WANG Y R, CAI J, et al. Dynamic response of single pile with variable cross-section under coupling action of pile-seismic subsidence soil layer [J]. Journal of Vibration Engineering, 2023(3): 1-11.(in Chinese)

[25] 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 Z J, LI Y T, CAI J, et al. Seismic subsidence characteristics of soft soil and dynamic response of pile group with variable cross section [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(9):109-118.(in Chinese)

[26] 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/OL]. 上海交通大学学报:1-21.(2023-02-28)[2023-05-18]. heeps://kns. cnki. net/kcms/detail//31.1466. U. 20230227.020.html.
FENG Z J, WANG W, ZHANG C, etc. Difference of dynamic r-esponse between single pile group and pile group with variablecross-section under earthquake subsidence soil layer change [J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-21.(2023-02-28)[2023-05-18]. heeps://kns. cnki. net/kcms/detail//31.1466.U.20230227.020.html.(in Chinese)

[27] 邹佑学,王睿,张建民.可液化场地碎石桩复合地基地震动力响应分析[J].岩土力学,2019,40(6):2443-2455.
ZOU Y X, WANG R, ZHANG J M. Seismic dynamic response analysis of gravel pile composite foundation in liquefied site [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2443-2455.(in Chinese)

[28] 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 Z J, WANG Y R, ZHANG J B, et al. Comparative analysis of dynamic response of variable section pile and equal section pile in liquefaction site under earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2022,38(3): 59-69.(in Chinese)

[29] NAEINI A J, 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.

[30] 孔锦秀. 地震动特性对液化场地桥梁桩基础动力反应的影响[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2016.
KONG J X. Influence of ground motion characteristics on dynamic response of bridge pile foundation in liquefaction site [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.(in Chinese)

[31] 苏雷,赵卓,毕建巍,等. 基于FLAC~(3D)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 analysis method of shaking table test for dynamic response of pile foundation based on FLAC~(3D) liquefaction site [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 454-463.(in Chinese)