

基于 OpenSees 的不同频率正弦波下群桩动力 响应数值模拟与试验对比分析*

李雨润¹, 杨皓天¹, 梁 艳², 赵青山³

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 校园建设与管理处, 天津 300401;
3. 河北拓为工程设计有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 地震作用下桩土的相互作用一直都是抗震研究中的热点问题。基于 2×2 直、斜群桩振动台试验, 利用 OpenSees 有限元软件进行不同频率正弦波输入下直、斜群桩的动力响应对比分析。结果表明: 在正弦波作用下、直、斜群桩承台位移与加速度均被放大; 随着输入正弦波频率的增大, 承台位移与加速度放大倍数均表现出增长趋势, 并且直群桩承台的放大倍数大于斜群桩; 对于正弦波输入下的非液化砂土和饱和砂土的直、斜群桩工况, 振动过程中土样的液化速度与输入正弦波频率成正相关。通过 OpenSees 软件进行数值模拟的计算结果与振动台试验结果吻合较好, 验证了液化土中直、斜群桩动力响应数值模型的正确性。

关键词: OpenSees 有限元软件; 直、斜群桩; 动力响应; 孔隙水压力; 数值模拟

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)03-0546-08

0 引言

桩基具有稳定性好、承载力大、差异沉降小等特点, 可以更好地适应复杂的地质条件, 将荷载传至地下深处承载性能好的土层。这些桩基往往会受到水平地震的影响而导致上部结构发生变形甚至破坏, 探究桩基与土体之间的动力相互作用是目前亟待研究的问题 (魏春莉, 2008; 袁晓铭等, 2009)。试验和模拟是目前进行桩-土作用研究的主要方式 (李伟鑫等, 2016; 曹卫平等, 2018)。试验的方法虽然更加贴合实际, 但是对设备要求较高, 且由于场地、费用的影响很多无法进行足尺试验, 导致与实际不符。数值模拟的优点在于重复性好、条件易控制, 可以考虑土和桩的线性和非线性特性, 并能很好地模拟土壤液化等问题, 因此数值模拟成为桩-土相互作用研究的重要手段 (唐亮等, 2012)。

目前许多学者利用数值模拟来探究桩-土相互作用, Yang 和 Elgamal (2002) 以及 Elgamal 等 (2003) 建立了液化砂土的应力应变混合空间的弹塑性本构模型; 庄海洋和陈国兴 (2011) 将

其模型应用到三维液化大变形的数值分析中, 验证了该模型在 ABAQUS 开发子程序中的可靠性; 王睿等 (2013) 基于三维应力空间中砂土液化大变形本构模型, 对饱和砂土不排水循环扭剪试验采用 OpenSees 模拟, 进行真三维倾斜地基的动力反应分析; 崔春义等 (2016) 基于大型通用数值计算平台 ADINA 建立三维数值模型, 分别结合相互作用三维接触模型和 $p-y$ 曲线简化分析模型模拟桩土系统在水平荷载作用下的桩顶位移变化规律。除此之外, 许多学者采用试验与数值模拟相对比的方法, 来验证试验的真实性。凌贤长等 (2004, 2008) 进行液化场地桩-土-桥梁结构地震相互作用振动台试验, 并建立了液化场地桩-土-桥梁结构地震相互作用数值模拟的二维分析模型和计算方法, 通过与试验结果对比验证了数值模拟方法的可靠性; Motamed 等 (2013) 通过 E-Defense 大型振动台设备研究了群桩对液化侧向扩展的地震响应; Boulanger 等 (2014) 基于临界状态下砂土本构模型, 运用 FLAC 有限差分程序对上述试验模型进一步模拟, 结果表明, 数值模型可以很好地再现液化导致的侧向扩展以及孔隙重分布现象; 王桂萱等

* 收稿日期: 2020-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金 (51778207) 及河北省自然科学基金 (E2018202107) 联合资助.

(2013)建立了桩-土-结构动力相互作用模型,并通过有限元分析计算得到静力、地震作用下桩体内力分布,给出满足抗震承载力要求的配筋方案,研究结果可为类似条件下的核岛厂房软土地基处理方案的抗震设计提供借鉴与参考。

目前对于直群桩动力响应等的研究较为深入,而对于斜群桩的动力特性和桩土作用机理的研究还处于初级阶段。同时,对直、斜群桩性能的对比研究也很有必要,有利于在实际工程中选用最优的桩型来抵御或者削弱不良地质作用。因此,本文基于电磁式振动台试验(李雨润等,2019),通过 OpenSees 有限元软件建立数值计算模型,重点研究在不同频率下正弦波输入下直、斜群桩动力响应特性。

1 振动台试验

1.1 试验用砂

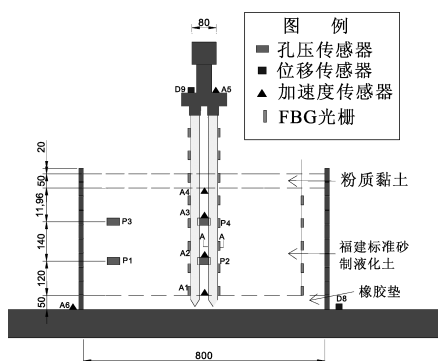
试验砂土为福建标准砂制备土样,详细参数为:最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.72 \text{ g/cm}^3$,最小干密度 $\rho_{dmin} = 1.44 \text{ g/cm}^3$, ρ_b 比重 = 2.644,孔隙率 $n = 10.59\%$,

孔隙比 $e = 0.1184$,饱和重度 $\gamma_{sat} = 24.21 \text{ kN/m}^3$,上覆黏土层重度 $\gamma_{sat} = 16 \text{ kN/m}^3$ 。

1.2 试验模型

本次试验剪切箱的尺寸为 $800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,载重 0.48 t 。模型桩采用有机玻璃管桩,通过灌注铁砂到管桩内模拟桩身配重。桩基模型布置为 2×2 全倾斜群桩和 2×2 全直群桩,直桩净长 637 mm ,斜桩长度为 736.1 mm ,控制连接直桩与斜桩的套筒与承台的角度分别为 0° , 12° 。桩端处采用橡胶垫来模拟持力层,保证试验过程桩的稳定性。

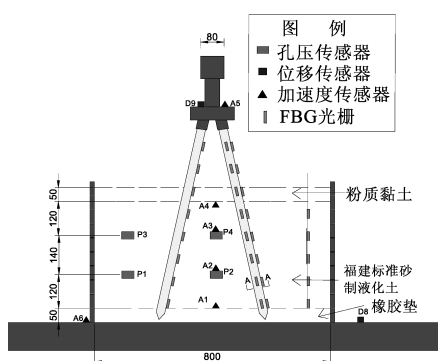
在试验中布置了加速度传感器、孔隙水压力传感器、位移传感器、光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,简称 FBG)传感系统等。由于群桩体系的对称性,试验采用 FBG 传感系统对群桩中的左前桩和右前桩的桩身同时进行动应变的测量,保证了试验数据的准确性和同步性,光栅点分别设置在2根桩距桩底 $45, 125, 205, 285, 365, 445$ 和 525 mm 的位置,在砂土中设置柔性梁,在其上布置间距同样为 80 mm 的5个光栅点,用于监测土位移,具体布置情况及试验现场如图1所示。



(a) 直群桩传感器布置图



(b) 直群桩试验现场图



(c) 斜群桩传感器布置图



(d) 斜群桩试验现场图

图1 直、斜群桩试验传感器布置图及试验现场图

Fig. 1 Layout diagram of tests sensors for straight and inclined piles and photos of test sites

1.3 试验工况

本次试验包括正弦波输入下非液化砂土与饱和砂土中 2×2 直群桩和 2×2 斜群桩共计 4 种工况, 输入正弦波峰值加速度为 0.15 g , 输入频率分别为 1.5 , 3 和 6 Hz , 工况的变量为模型土形式、模型桩形式、输入频率形式。

2 数值模拟

2.1 模型建立

图 2 为使用 OpenSees 软件所建立的三维有限元数值分析模型。本次数值模拟使用 Solidworks 进行初始模型设计, 之后导入到 Hypermesh 中进行土单元的网格划分, 并输出节点、单元信息, 在 OpenSees 软件中进行后续运算。桩头承台模拟为集中质量, 分别加在双桩桩头。将土体模拟为实体单元; 基于 Gauss - Legendre 积分准则将桩体

部分模拟为梁单元 (Smith, 1994), 根据位移梁柱理论将桩模拟为线弹性梁柱单元, 并使得物理属性保持相同。模型采用杆单元连接的方式, 通过刚性连接杆将桩和土进行连接, 使得在弯矩作用时可以保持为平面。同时为了模拟桩土的摩擦滑移, 使桩横截面上内力可以传递给土体, 在刚性杆与土体间增加零长单元, 并假定刚性杆的刚度为桩刚度的 $10\,000$ 倍。为了模拟孔压变化, 在 OpenSees 软件中使用的土体单元采用 8 节点 BrickUP 六面体单元进行模拟, 该方式能够较好模拟三维土 - 水完全耦合过程 (Parra, 1996; Yang *et al.*, 2003)。

模拟主要采用固定边界条件, 在进行初始应力分析的过程中, 将其设置为固定底部全部自由度; 在进行动力加载的过程中, 将其设置为在基底增加基岩节点并连接底部除振动方向以外的自由度。

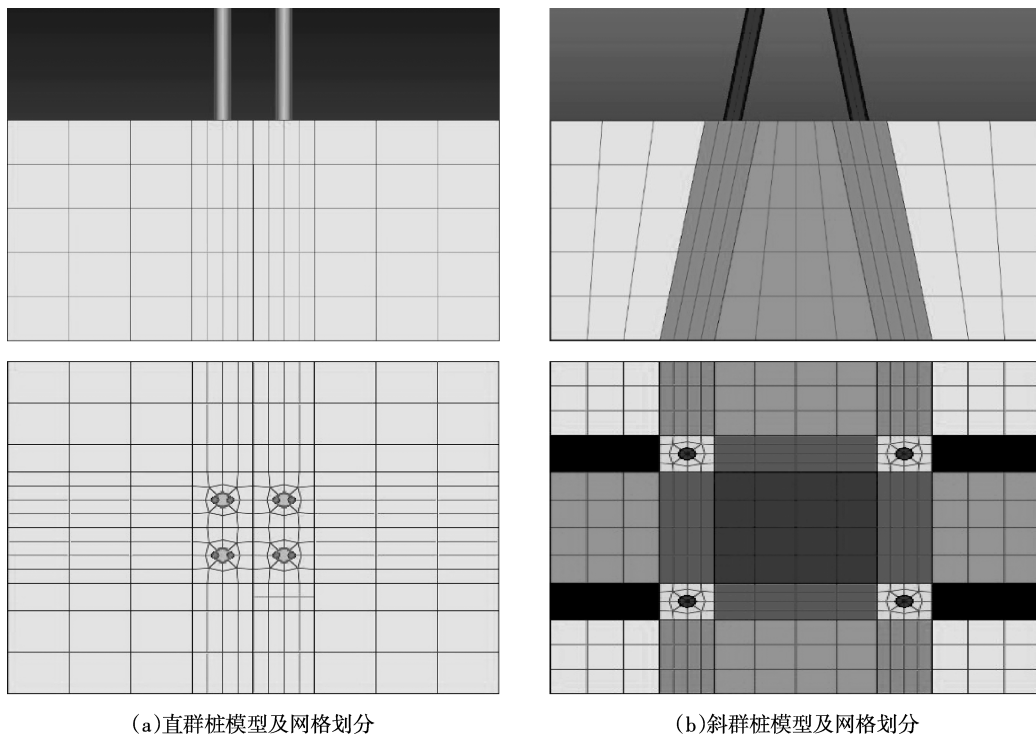


图 2 三维有限元数值分析模型

Fig. 2 Schematic diagram of 3D finite element numerical analysis model

2.2 本构模型

在振动台试验模拟中, 对于砂土采用的本构模型为理想弹塑性模型, 选用桩材料是弹性材料, 选取梁柱单元下基于位移的梁单元, 砂土及桩的参数设置见表 1, 2。砂土采用 Pressure Depend

Multi Yield 02 (PDMY02) 材料模拟, 该材料是一种弹塑性、可模拟对压力敏感的材料, 如砂土在各种荷载下的力学行为 (Yang, 2000)。对于这种材料, 通常需要分自重荷载 (包括各种静载) 和动力荷载进行分析。在自重荷载分析阶段, PD-

MY02 材料表现为线弹性；之后，材料属性发生变化，表现为弹塑性。在此后的动力荷载分析阶段，就应用弹塑性材料的性质，PDMY02 材料的塑性是基于多屈服面（嵌套表面）概念制定的，应用非关联流动法则以重现剪胀效应。

表 1 砂土本构模型计算参数
Tab. 1 Calculation parameters of sand constitutive model

参量	数值
饱和密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 900
参考低应变时的剪切模量/kPa	90 000
参考体积模量/ kPa	220 000
内摩擦角/ ($^{\circ}$)	29
峰值剪应变	0. 1
参考平均有效围压 P_r/kPa	101
压力相关参数 n_p	0. 5
相位转换角/ ($^{\circ}$)	26
非负常量定义由剪切应力引起体积收缩率 c_1	0. 028
非负常量定义由剪切应力引起体积收缩率 c_3	0. 05
非负常量定义由剪切应力引起体积膨胀率 d_1	0. 1
非负常量定义由剪切应力引起体积膨胀率 d_2	3
非负常量定义由剪切应力引起体积膨胀率 d_3	0. 05
液化引起理想塑性剪应变累积的控制参数 γ_1	1
液化引起理想塑性剪应变累积的控制参数 γ_2	0
孔隙率	0. 65

表 2 桩模型参数
Tab. 2 Pile model parameters

参量	数值
弹性模量/GPa	22
泊松比	0. 3
桩径 D/mm	20
内摩擦角/ ($^{\circ}$)	30
密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 400

2.3 三维桩 – 土界面模拟

在 OpenSees 软件中考虑接触问题一般采用建立零长度来实现，但对于桩 – 土接触面采用零长度单元主要为零长度杆件，而对于零长度弹簧、零长截面的研究相对较少。鉴于 OpenSees 内置的大量零长度单元，在借鉴 Elgamal 桩 – 土刚性连接的基础上，土、刚性连接单元间增加相应零长度截面单元，通过赋予零长度截面单元桩 – 土接触面属性，近似模拟桩 – 土摩擦滑动机理。这种连

接方式仍保留刚性连接单元主要有 2 方面的考虑，一是桩径效应；二是避免由于桩 – 土界面滑动导致阻尼力过大。

三维桩 – 土界面连接示意如图 3 所示，在桩节点①、土节点④间增加另外 2 个节点②③，其中节点②③④具有相同的全局坐标，节点①②通过刚性杆件连接来考虑桩径效应，节点②③通过零长度单元来近似模拟桩 – 土摩擦滑动机理（即零长单元和零长截面单元采用并联的连接方式，零长单元提供沿刚性连接方向的轴力，零长截面单元提供沿桩轴向和桩切向耦合剪切力），最后节点③④等效自由度完成桩土的连接。

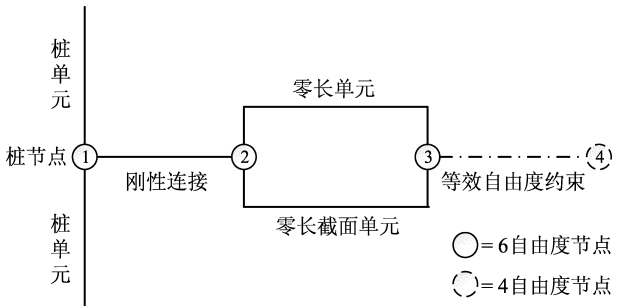


图 3 三维桩 – 土界面连接示意
Fig. 3 Schematic diagram of 3D pile – soil interface connection

3 振动台试验与数值模拟动力响应对比分析

本文针对直群桩和斜群桩在非液化砂土和饱和砂土中的动力响应问题，将试验与模拟所得出的加速度、位移时程曲线以及土层孔隙水压力变化的时程曲线进行对比研究。

3.1 非液化砂土试验与模拟动力响应对比分析

非液化砂土的试验与模拟动力响应对比分析包括正弦波频率分别为 1.5、3 和 6 Hz 时，直、斜群桩的加速度与位移的对比分析，其峰值数据结果见表 3。由表 3 可以看出：随着输入频率的增大，模拟和试验中桩头承台较于台面的放大倍数逐渐增大。在输入频率为 1.5 和 3 Hz 正弦波工况下，模拟与试验所得出的加速度与位移时程拟合较好，承台的模拟加速度和位移峰值与试验结果几乎一致。在输入频率为 6 Hz 工况下，数值模拟结果相较于振动台试验结果略大，这是因为在使用 OpenSees 模拟过程中

将很多假设条件理想化，而试验过程中所受到的影响因素很多，有很多复杂多变的情形，不能完全模拟出复杂的试验条件，这也属于合理范围。由于篇

幅有限，仅展示在加速度幅值为 0.15 g，频率为 1.5 Hz 的正弦波下，对非液化砂土的试验与数值模拟结果，如图 4 所示。

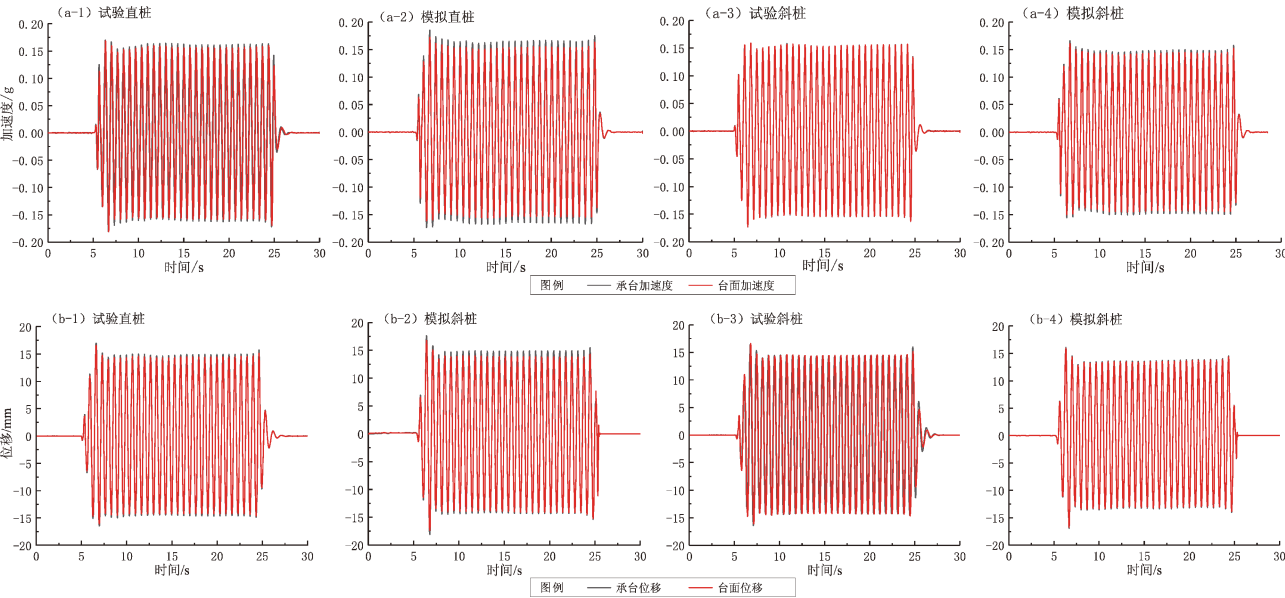


图 4 1.5 Hz 正弦波非液化砂土的试验与模拟加速度 (a) 及位移 (b) 时程曲线

Fig. 4 Comparison of time history curves of the acceleration (a) and displacement (b) of non – liquefied sand under 1.5 Hz sine wave in test and simulation

表 3 不同频率正弦波下非液化砂土中直、斜群桩动力响应对比

Tab. 3 Comparison of dynamic response of straight and inclined piles in non – liquefied sand under different frequency sine wave

工况	频率/ Hz	加速度/g		位移/mm		放大倍数	
		承台	台面	承台	台面	加速度	位移
模拟直群桩	1.5	0.185	0.172	17.634	16.766	1.074	1.052
	3	0.192	0.171	5.125	5.275	1.124	1.120
	6	0.295	0.169	4.562	1.546	1.744	2.304
试验直群桩	1.5	0.170	0.168	17.005	16.586	1.011	1.025
	3	0.186	0.167	5.940	5.448	1.114	1.111
	6	0.210	0.122	1.372	0.883	1.721	1.554
模拟斜群桩	1.5	0.166	0.160	16.110	15.909	1.035	1.013
	3	0.196	0.183	5.718	5.182	1.068	1.128
	6	0.179	0.157	2.117	1.810	1.140	1.170
试验斜群桩	1.5	0.159	0.159	16.429	16.080	1.000	1.022
	3	0.166	0.162	5.496	5.343	1.025	1.035
	6	0.142	0.123	0.926	0.837	1.154	1.106

3.2 饱和砂土试验与模拟动力响应对比分析

饱和砂土的试验与模拟动力响应对比分析包括在频率分别为 1.5、3、6 Hz 的正弦波下，直、斜群桩的加速度与位移对比分析，其峰值数据结果见表 4。由表 4 可知：不论是模拟还是试验，随着输入频率增大，桩头承台较于台面的放大倍数逐渐增大。总体来看，相较于非液化砂土，饱和

砂土的直群桩的放大倍数明显增大，斜群桩的放大倍数略有增大，这说明在土体发生液化时，直群桩的侧向动力响应更加明显，在易于液化的场地中，斜群桩能更好地抵抗地震作用。由于篇幅有限，仅给出加速度幅值为 0.15 g、频率为 1.5 Hz 的正弦波下，饱和砂土试验与数值模拟结果，如图 5 所示。

表 4 不同频率正弦波下饱和砂土中直、斜群桩动力响应对比

Tab. 4 Comparison of dynamic response of straight and inclined piles in saturated sand under different frequency sine wave

工况	频率/ Hz	加速度/g		位移/mm		放大倍数	
		承台	台面	承台	台面	加速度	位移
模拟直群桩	1.5	0.213	0.175	19.377	17.310	1.219	1.119
	3	0.217	0.147	5.484	4.878	1.472	1.414
	6	0.232	0.143	4.351	1.546	1.622	2.167
试验直群桩	1.5	0.172	0.151	18.738	17.157	1.140	1.092
	3	0.293	0.147	7.603	5.287	1.993	1.774
	6	0.563	0.143	5.169	0.990	4.937	5.211
模拟斜群桩	1.5	0.180	0.173	11.539	11.229	1.033	1.028
	3	0.192	0.182	4.660	4.329	1.051	1.100
	6	0.193	0.157	1.700	1.426	1.235	1.170
试验斜群桩	1.5	0.158	0.149	18.186	17.974	1.060	1.012
	3	0.159	0.149	4.984	4.696	1.067	1.078
	6	0.187	0.136	1.217	0.915	1.375	1.330

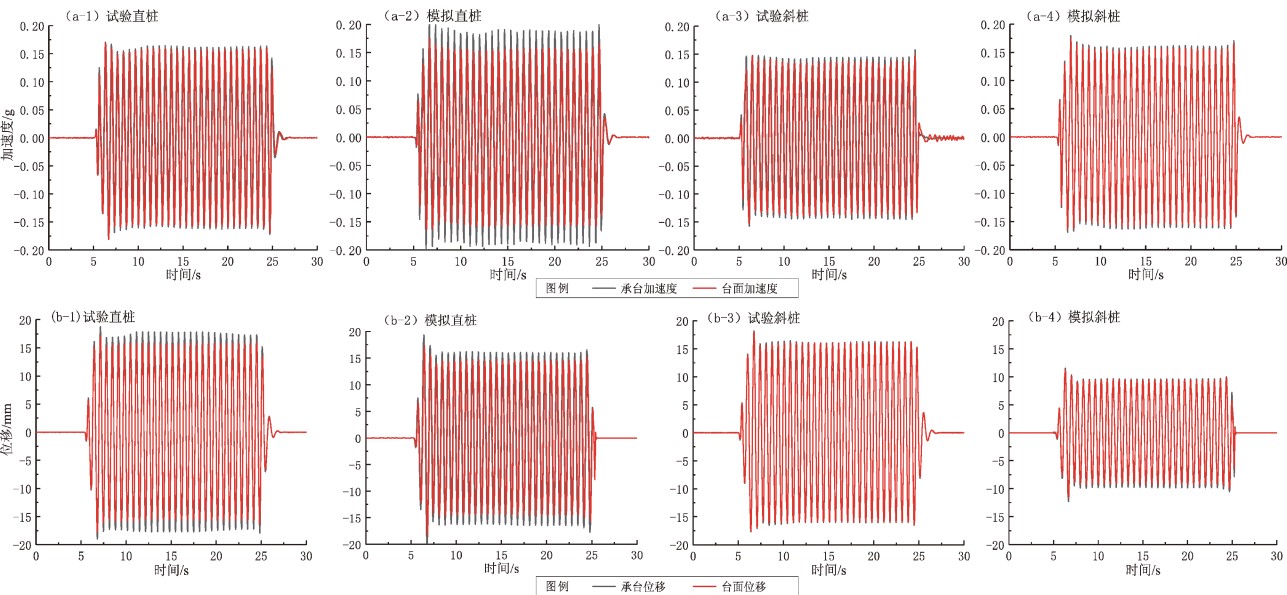


图 5 1.5 Hz 正弦波饱和砂土的试验与模拟加速度 (a) 及位移 (b) 时程曲线
Fig. 5 Comparison of time history curves of the acceleration (a) and displacement (b)
of saturated sand under 1.5 Hz sine wave in test and simulation

3.3 饱和砂土试验与模拟孔隙水压力对比分析

饱和砂土中，直、斜群桩孔隙水压力变化的形状及变化趋势基本一致，因此本文基于“孔压比判别法”，选取直群桩进行振动台试验，并进行数值模拟孔隙水压力变化的时程分析。为了便于对比，本次数值模拟的选取位置与试验取点相同，分别为砂土中距箱底 170 mm 的桩外侧处，记为 P1；砂土中距箱底 310 mm 的桩外侧处，记为 P2。在 5 s 时输入频率分别为 1.5，3 Hz 的正弦波，在 3 s 时输入频率为 6 Hz 的正弦波。

图 6 给出了输入频率分别为 1.5，3 和 6 Hz 正弦波 3 种工况下，试验与模拟中孔压时程对比曲线。由图可见，当孔压达到 1.0 时即出现液化现象，对于试验结果，下层孔压要先于上层孔压液化；对于模拟结果，上层孔压要先于下层孔压液化。理论上，由于上层有效自重较小，超静孔隙水压力应首先大于上层饱和砂土导致其液化，即与模拟情况较为接近，但实际试验过程中由于桩在下部晃动幅度较大，导致下部先出现液化现象。随着频率的增加，试验和模拟中到达液化的

时间缩短, 液化速度加快。在上升阶段, 试验与模拟结果大致相同; 而在液化以后, 试验与模拟结果呈现不同的现象。试验中, 在饱和砂土液化后, 经过一定时间的震荡, 孔压比呈现下降趋势; 而模拟中, 在饱和砂土液化后, 经过一定时间的震荡, 孔压比会保持在 1.0。这是因为在试

验中, 饱和砂土液化后, 经过一定时间累积, 液化土中的孔隙水压力已经足够大, 可冲破其上覆黏土层的自重, 由于孔压积累区域的贯通, 水携带着砂砾迅速涌出, 表现为喷砂冒水现象, 但模拟无法模拟到这一过程, 因此孔压比稳定在 1.0 而没有下降。

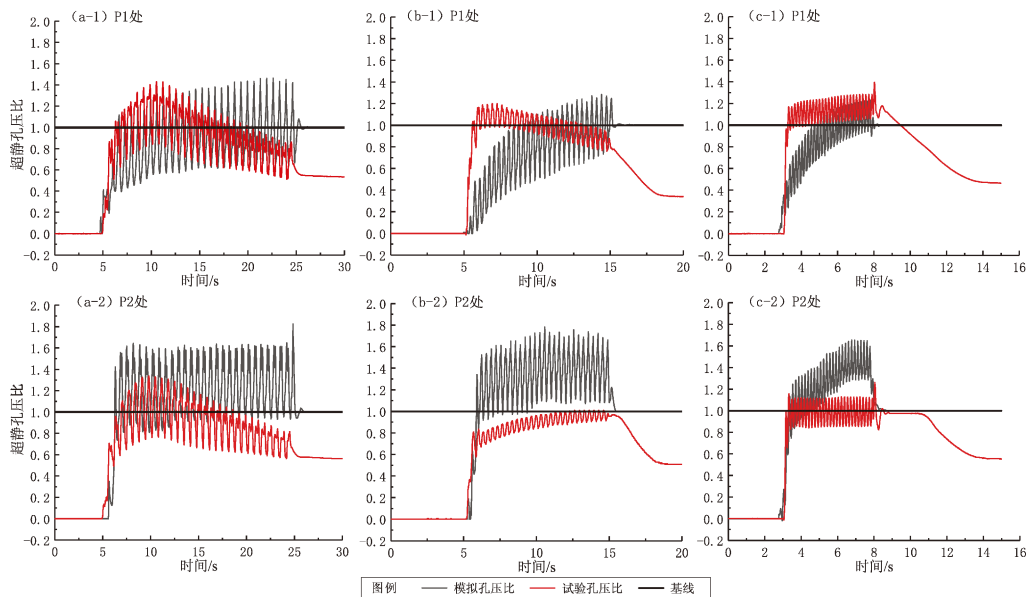


图 6 1.5 Hz (a), 3 Hz (b), 6 Hz (c) 正弦波输入下直群桩试验与模拟的孔压时程对比

Fig. 6 The time history of hole pressure is compared with that of simulated pile group test with 1.5 Hz (a), 3 Hz (b), 6 Hz (c) sinusoidal wave input

4 结论

本文将振动台试验与有限元软件 OpenSees 模拟的直群桩和斜群桩在不同工况下的动力响应进行对比分析, 通过对承台加速度、位移放大倍数及土中孔压的数据分析, 证明使用 OpenSees 有限元软件所得结果与振动台试验规律相符, 可得到很好的效果, 主要结论如下:

(1) 非液化砂土和饱和砂土中, 在正弦波输入下, 直、斜群桩的承台加速度和位移都表现出放大的趋势, 且直群桩放大倍数高于斜群桩。随着输入正弦波频率的增大, 直群桩和斜群桩承台的放大倍数均表现出增长的趋势, 同样直群桩工况承台的放大倍数大于斜群桩放大倍数, 因此斜群桩的抗震效果要优于直群桩。

(2) 对于饱和砂土, 直、斜群桩试验和模拟中土样的液化速度与输入正弦波频率呈正相关。

在相同频率的正弦波作用下, 对于下层土样, 试验时土样的液化速度要比模拟的快; 对于上层土样, 试验与模拟时土样的液化速度基本持平。

(3) 通过将振动台试验与数值模拟所得数据进行对比分析, 得出规律性结论, 即数值模拟和试验结果总体规律上相差不大, 模拟结果的准确性较高。

参考文献:

- 曹卫平, 夏冰, 赵敏, 等. 2018. 砂土中水平受荷斜桩的 $p-y$ 曲线及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 37(3): 743-753.
- 崔春义, 孟坤, 程学磊, 等. 2016. 基于 ADINA 的桩土相互作用分析[J]. 地震研究, 39(1): 96-100.
- 李伟鑫, 伊训强, 王桂萱. 2016. 考虑桩-土-结构动力相互作用的土质地基条件下核岛厂房地震响应[J]. 地震研究, 39(1): 40-45.
- 李雨润, 王佳玮, 邹泽, 等. 2019. 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, 39(2): 191-200.
- 凌贤长, 王东升, 王志强, 等. 2004. 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, 37(11): 67-72.

- 凌贤长,徐鹏举,于恩庆,等. 2008. 液化场地桩-土-桥梁结构地震相互作用振动台模型试验数值模拟方法研究[J]. 地震工程与工程振动,28(3):172-177.
- 唐亮,凌贤长,徐鹏举,等. 2012. 液化场地桩-土地震相互作用振动台试验数值模拟[J]. 土木工程学报,45(S1):302-306,311.
- 王桂萱,张睿,赵杰. 2013. 某沿海软土地区核电厂核岛天然地基及桩基抗震承载力分析[J]. 地震研究,39(1):15-21.
- 王睿,张建民,王刚. 2013. 砂土液化大变形本构模型的三维化及其数值实现[J]. 地震工程学报,35(1):91-97.
- 魏春莉. 2008. 桩-土-桥梁结构地震动力相互作用振动台模拟试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学.
- 袁晓铭,曹振中,孙锐,等. 2009. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,28(6):1288-1296.
- 庄海洋,陈国兴. 2011. 砂土液化大变形本构模型及在 ABAQUS 软件上的实现[J]. 世界地震工程,27(2):45-50.
- Boulanger R W, Kamai R, Ziotopoulou K. 2014. Liquefaction induced strength loss and deformation; simulation and design[J]. Bulletin of Earthquake Engineering,12(3):1107-1128.
- Motamed R, Towhata L, Honda T, et al. 2013. Pile group response to liquefaction - induced lateral spreading; E - Defense large shake Tab. test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 51: 35-46.
- Yang Z, Elgamal A, Parra E. 2003. A computational model for cyclic mobility and associated shear deformation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,129(12):1119-1127.
- Yang Z, Elgamal A. 2002. Influence of permeability on liquefaction - induced shear deformation[J]. Journal of Engineering Mechanics,128(7):720-729.
- Yang Z. 2000. Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction[D]. New York: Columbia University.

Comparative Analysis of Pile - soil Dynamic Response Test and Numerical Simulation Based on OpenSees

LI Yurun¹, YANG Haotian¹, LIANG Yan², ZHAO Qingshan³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(2. Campus Construction and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(3. Hebei Tuowei Engineering Design Company Limited, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract

The interaction between pile and soil under seismic action has always been a hot topics in the seismic research of geotechnical engineering. Based on vibration Tab. test of 2×2 straight and inclined group piles, the OpenSees finite element software is used to compare and analyze the dynamic response of straight and inclined group piles under different frequency sine wave input in this paper. The results show that under the action of sine wave, the displacement and acceleration of the pile caps are amplified in both the straight and the inclined group piles. With the increase of the frequency of input sine wave, magnification times of the displacement and acceleration show an increasing trend, and the magnification times of the pile cap under the condition of straight group piles is greater than that of the inclined group piles. With the input of sine wave, the liquefaction velocity of soil samples is positively correlated with the frequency of input sinusoidal wave during the vibration process of straight and inclined group piles in nonliquefied sand and saturated sand. The result of numerical simulation by OpenSees is in good agreement with the result of shaking Tab. test, which verifies the correctness of the numerical model of dynamic response of straight and inclined group piles in liquefied soil.

Keywords: the OpenSees finite element software; straight and inclined group piles; dynamic response; pore water pressure; numerical simulation