

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1968

倾斜液化场地-桩基-结构体系在近场脉冲与非脉冲地震动下地震响应差异分析

张正哲, 贾科敏, 许成顺, 潘汝江

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 对比研究了倾斜液化场地-桩基-结构体系在近场脉冲和非脉冲地震动作用下的响应。首先基于 OpenSees 有限元平台建立了倾斜液化场地-桩基-结构体系的有限元模型, 与大型振动台试验结果进行对比, 验证了数值模型的可靠性。在此基础上, 建立典型倾斜液化场地-桩基-结构体系的有限元模型, 对比分析近场脉冲与非脉冲地震作用下体系的地震响应规律, 并开展地震动强度指标与地震响应之间的相关性分析。结果表明: 与非脉冲地震动相比, 近场脉冲地震动作用下, 场地残余位移明显增加, 在松砂层顶部最为明显, 约增大 40%; 桩身弯矩和桩身残余位移显著增加, 尤其是桩顶位置处; 非脉冲地震动下地震动强度指标与各响应之间的相关性高于脉冲地震动作用, 选取 3 个相关性较好的强度参数: 峰值速度/峰值加速度 (PGV/PGA)、阿里亚斯强度 AI、平均周期 T_m , 可在一定程度上表征地震动对液化场地-桩基-结构体系破坏反应的影响。

关 键 词: 脉冲地震动; 倾斜液化场地; 桩基础; 数值模拟; 地震响应; 地震动参数; 相关性分析

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 12-3629-10

Difference analysis of seismic responses of inclined liquefaction site-pile-structure system under near-field pulsed and non-pulsed ground motions

ZHANG Zheng-zhe, JIA Ke-min, XU Cheng-shun, PAN Ru-jiang

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this paper, the seismic responses of inclined liquefaction site-pile-structure system under near-field pulsed and non-pulsed ground motion were studied. Firstly, a finite element model of inclined liquefaction site-pile-structure system was established based on the finite element platform OpenSees, and the reliability of the numerical model was verified by comparing with the results of large-scale shaking table test. On this basis, the finite element model of typical inclined liquefaction site-pile-structure system was established, the seismic response laws of the system under near-field pulsed and non-pulsed ground motion were compared and analyzed, and the correlation analysis between ground motion intensity index and seismic response was carried out. The results show that compared with the non-pulsed ground motion, the residual displacement of the site increases obviously under the near-field pulsed ground motion, especially at the top of the loose sand layer, which increases by about 40%. Pile bending moment and pile residual displacement increase significantly, especially at the pile top. The correlation between the ground motion intensity index and the response under non-pulsed ground motion is higher than that under pulsed ground motion. Three strength parameters with good correlation, i.e. PGV/PGA (peak ground velocity/ peak ground acceleration), AI (Arias intensity) and T_m (mean period), can indicate the influence of ground motion on the failure response of liquefaction site-pile-structure system to a certain extent.

Keywords: pulse ground motion; inclined liquefaction site; pile foundation; numerical simulation; seismic response; ground motion parameters; correlation analysis

1 引 言

桩基础作为一种重要的深基础型式, 将结构的

荷载穿越软弱土层传递至密实的持力层中, 其抗震性能良好、沉降量小、承载力高, 在近海与跨河桥梁、港口码头、海上风电、采油平台等工程中得到

收稿日期: 2022-12-17

录用日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金 (No.52225807)。

This work was support by the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (No.52225807)。

第一作者简介: 张正哲, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事液化场地桩基础抗震领域的研究。E-mail: Zhangzhengzhe@bjut.edu.cn

通讯作者: 许成顺, 女, 1977 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与岩土地震工程领域的研究。E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn

广泛应用。然而,近年来的地震灾害调查显示,场地液化导致的桩基础地震破坏实例屡见不鲜^[1],比如:2010 年智利大地震^[2-3]、2014 年希腊塞法罗尼亚地震^[4]、2021 年青海玛多地震^[5]中均出现土体液化导致桩基破坏的实例,尤其是以液化侧扩且上覆非液化硬土层场地中的桩基破坏最为严重。

针对这一现象,国内外学者进行了大量研究。Takahashi^[6]、Haeri^[7]等通过进行离心机试验讨论了液化侧扩场地中单桩、群桩的动力特性及其影响因素,发现桩身荷载与土体变形之间的相关性。苏栋等^[8]通过进行离心机试验分析了饱和砂土层中场地-桩-结构的地震相互作用规律。Cubrinovski 等^[9]通过振动台试验研究了场地液化侧扩流作用下单桩、群桩的动力特性,发现液化土层侧向位移和桩头约束条件显著影响桩的响应,而非液化层施加于桩上的侧向荷载随液化土层刚度降低而明显衰减。许成顺等^[10-11]利用振动台试验结果讨论了水平可液化和不可液化场地-桩基-结构体系的响应规律。近期,贾科敏等^[12]设计并开展了倾斜场地-桩基-结构体系的振动台试验,并进一步揭示体系的地震破坏机制。另一方面,水平竖向双向地震对体系地震反应的影响也被关注和研究^[13]。Nasr 等^[14]借助 OpenSees 有限元平台对倾斜液化场地-桩基结构进行动力分析,发现场地液化引起的侧向位移明显增加了桩头位移。此外,黄雨^[15]、唐亮^[16]等建立液化场地-桩基-结构地震反应分析的有限元模型,研究了体系的地震反应规律;Cui^[17]、Meng^[18]等通过解析方法研究了饱和土中桩的振动响应规律。以上研究中关注了可液化场地-桩基础-结构体系地震响应的不同方面,为实际工程的抗震设计提供了有意义的见解。

地震动的不确定性和复杂性是抗震研究的难点,针对地震动特性对结构地震反应的影响,学者们通过数值模拟方法进行了深入的研究。Bertero 等^[19]通过分析圣费尔南多地震中工程结构震害现象,发现近断层震害主要是由速度脉冲引起的。李爽等^[20]分析了速度脉冲对钢混及桥梁结构地震反应的影响。李帅等^[21]讨论了合成的近场脉冲地震动对超大跨斜拉桥的影响,发现脉冲循环数为奇数的地震动对结构的影响更为显著。Ghayoomi 等^[22]揭示了不同地震动参数与各响应之间的关系。液化场地-桩基-结构体系是非常复杂的系统,地震动的不确定性必然会产生显著的影响。目前地震动特性对液化场地-桩基-结构动力响应的影响受到国内外学者越来越多的关注,但针对近场脉冲型地震动对倾斜

液化场地-桩基-结构体系动力响应的影响及地震动强度参数与体系各响应之间的相关性仍需深入研究。

本文针对课题组开展的倾斜液化场地-桩基-结构体系的振动台试验,基于 OpenSees 平台建立了倾斜液化场地-桩基-结构有限元模型,并验证了有限元模型的可靠性。在此基础上,建立了典型倾斜可液化场地-桩基-结构体系的数值模型,讨论了近场脉冲型和非脉冲型地震动作用对体系地震响应的影响并进一步揭示了不同地震动强度参数与各响应之间的关系。

2 基于振动台试验的数值模拟

2.1 振动台试验介绍

课题组已开展了倾斜可液化场地-群桩基础-上部结构体系的大型振动台试验。试验采用尺寸为 3.2 m×2.4 m×2.2 m 的层状剪切模型箱,场地倾斜角度设为 2°,模型及传感器布局图如图 1 所示。

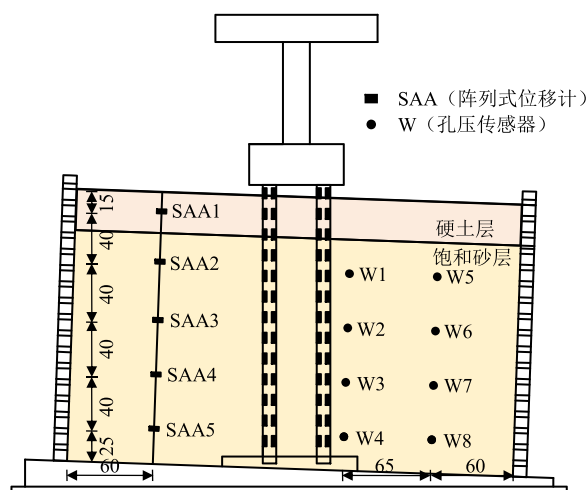


图 1 振动台试验传感器布置图(单位: cm)

Fig.1 Sensor layout in shaking table test(unit: cm)

模型场地土层自下而上设置 1.7 m 均匀分布的饱和砂土和 0.3 m 的硬土层,模型水位线在上游土层埋深 0.3 m 处。

模型的桥墩高为 1.0 m,桥墩直径为 0.2 m,上部结构质量为 1.6 t,设置 2×2 群桩基础,桩基础直径为 0.1 m,高度为 1.9 m,桩中心间距设为 0.4 m,钢筋混凝土承台尺寸为 0.7 m×0.7 m×0.3 m,桩头与承台、桥墩与承台均为刚性连接,为了模拟坚硬的土层,使桩端固定在模型箱底部。关于振动台试验设计的其他细节及数据分析见文献[13-14]。

试验选用 Tabas 地震记录作为主要输入地震

动，加速度时程如图 2 所示。

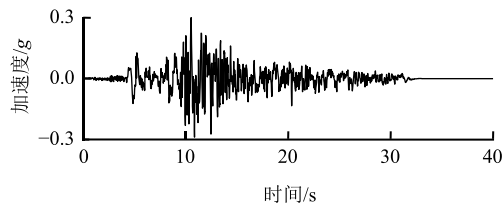


图 2 Tabas 加速度时程图
Fig.2 Tabas acceleration time history

2.2 有限元模型

针对上述振动台试验,基于 OpenSees 计算平台建立倾斜液化场地-桩基-结构体系有限元数值模型,如图 3 所示。

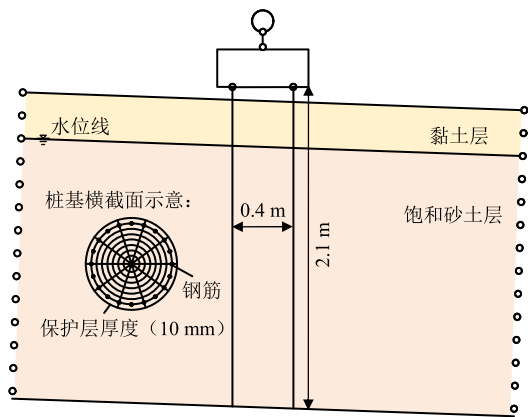


图 3 振动台试验有限元模型图
Fig.3 Finite element model of shaking table test

模型底部及两个侧面边界设置为不透水边界,地表为自由透水边界。底部固定水平和竖向位移,两侧相同深度节点使用 equalDOF 命令进行捆绑设

置,使其在水平和竖直方向协同运动,以获得剪切边界条件。

场地土层采用流固耦合的 $u-p$ (u 为固体位移, p 为流体压力) 数值离散形式平面应变单元 quadUP^[22] (quadrilateral $u-p$) 模拟,每个单元包含 4 个节点,每个节点均有 3 个自由度,分别为水平位移、竖向位移和孔隙水压力,土体单元参数见表 1。

表 1 土体单元参数 Table 1 Parameters of soil elements					
土体	水平向重力加速度 $/(m \cdot s^{-2})$	竖向向重力加速度 $/(m \cdot s^{-2})$	液相不排水体积模量 $/kPa$	水平向渗透系数 $/(m \cdot s^{-1})$	竖向向渗透系数 $/(m \cdot s^{-1})$
黏土层	0.0	-9.81	8.0×10^6	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
饱和砂土层	0.0	-9.81	4.4×10^6	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

饱和砂土采用多屈服面塑性本构模型 PDMY02^[23-25],该本构模型可以更好地反映砂土在动力荷载下的剪缩、剪胀以及循环流动特性。上覆硬土层选用多屈服面弹塑性本构模型 PIMY (采用压力独立的屈服材料 (pressure independ multiyield material)),该模型可以更好地模拟黏土在快速 (不排水) 负载条件下的单调或循环响应,土体本构参数取值见表 2。

结构本构的选取,试验中 2×2 群桩在二维数值模型被模拟为 1×2 群桩,将桩基强度和刚度提高为试验值的 2 倍,即可实现等效模拟。桩基和桥墩均采用 dispBeamColumn- n 单元,承台选用四边形平面应变单元 quad 模拟,单元的每个节点均有两个自由度,分别对应水平、竖向位移。采用 Concrete 01 和 Steel 02 本构模型模拟混凝土和钢筋的力学行为,结构本构参数取值见表 3。

表 2 土体本构参数表 Table 2 Soil constitutive parameters													
参数	密度 $\rho/(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	参考剪切模量 G_r/MPa	参考体积模量 B_r/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	参考围压 $/\text{kPa}$	压力系数 n	剪胀角 $\Phi_{PT}/(^\circ)$	剪缩系数 c_1	剪缩系数 c_2	剪胀系数 d_1	剪胀系数 d_2	
黏土层	1.80	150	750	0.0	75	100	0.0	—	—	—	—	—	
松砂层	1.87	97	229	33.5	—	101	0.5	31	0.093	0.18	0	0.17	

表 3 结构本构参数表 Table 3 Structure constitutive parameters													
抗压强度/kPa		峰值应变		屈服强度/kPa		屈服应变		弹性模量/kPa		屈服强度/kPa		各向同性强化参数	
保护层	核心区	保护层	核心区	保护层	核心区	保护层	核心区	桥墩钢筋	桩身钢筋	桥墩钢筋	桩身钢筋	桥墩钢筋	桩身钢筋
混凝土	混凝土	混凝土	混凝土	混凝土	混凝土	混凝土	混凝土						
-27 588	-34 485	-0.002	-0.004	0	-20 691	-0.008	-0.014	4.2×10^8	2.5×10^8	4.9×10^5	3.3×10^5	0.02	0.02

2.3 可靠性验证

图 4、5 对比了远桩土体测点 (W5~W8) 和近

桩土体测点 (W1~W4) 超孔压比时程的试验结果和数值模拟结果。从图中看出,试验结果与数值结

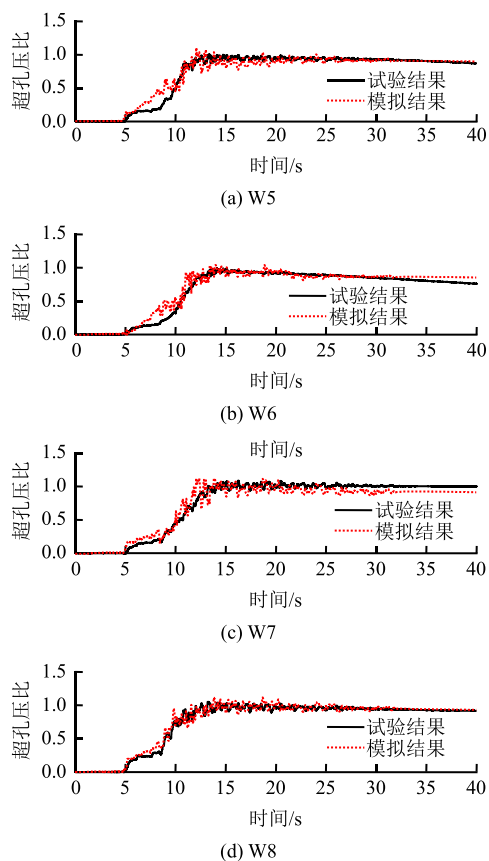


图4 远桩土体超孔压比时程

Fig.4 Time histories of excess pore water pressure ratio of far-pile

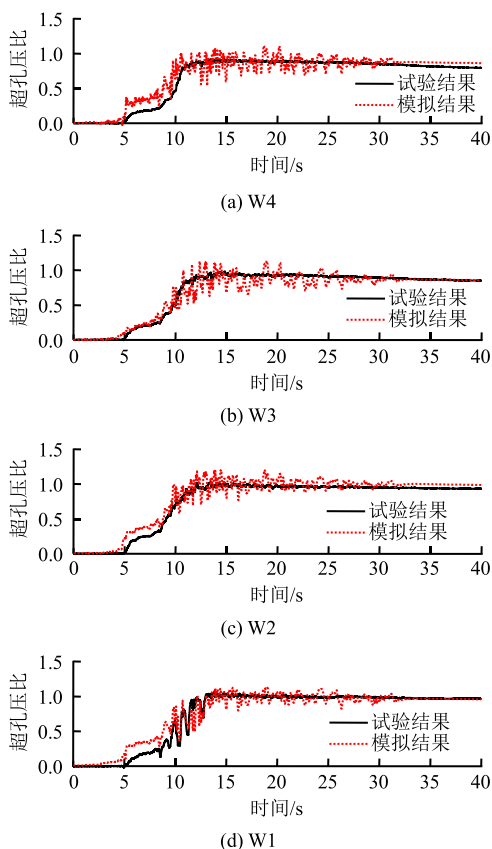


图5 近桩土体超孔压比时程

Fig.5 Time histories of excess pore water pressure ratio of near-pile

果的超孔压比的峰值及变化趋势吻合较好。这意味着建立的数值模型能较好地模拟可液化场地孔压的积累与消散。

图6为距离边界0.6 m处场地土体沿深度的加速度时程变化的试验结果与数值模拟计算结果对比情况,虽然数值模拟结果的加速度幅值略大于试验结果,但变化规律基本一致,吻合较好。

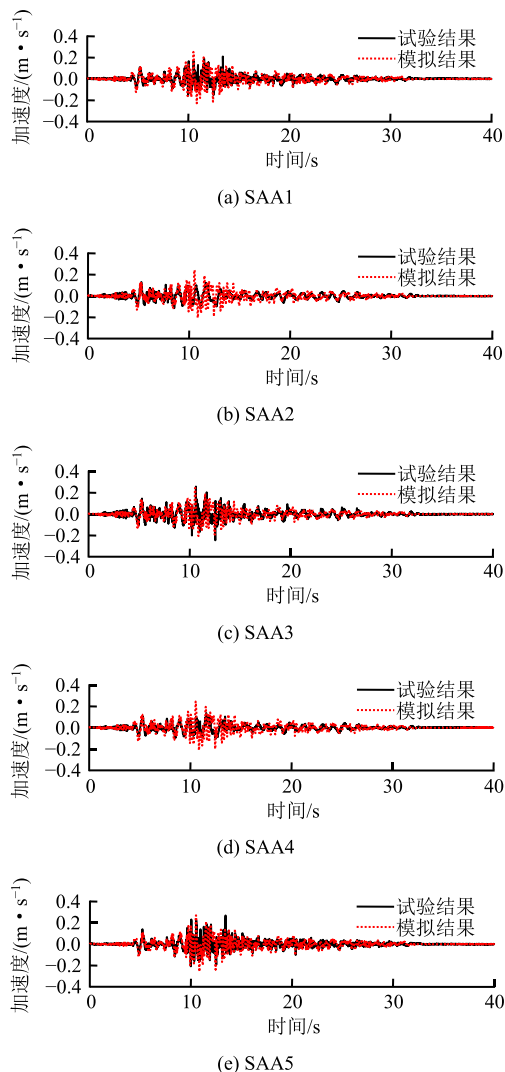


图6 场地加速度变化图

Fig.6 Changes in acceleration

图7为桩身曲率沿深度变化的试验结果与数值模拟结果对比情况。由图可知,黏土层中数值模拟结果与振动台试验结果存在一定差异,可能是由于数值模拟中黏土层采用的本构模型 PIMY 的惯性作用较试验中的硬土层小,对模拟过程中桩身曲率存在小范围的限制;也可能是由于大量传感器的存在会影响体系的响应以及制备土样过程中的饱和和误差等。但密砂层与松砂层中桩身曲率的试验值和数值模拟的整体变化趋势吻合较好。

综上所述,各响应的试验值与数值模拟结果相

差不多，在数值模拟中两者的误差处于合理范围内的，变化趋势也基本相同。因此，在 OpenSees 中所建立的二维模型可以较为有效地模拟倾斜液化场地中地震响应。

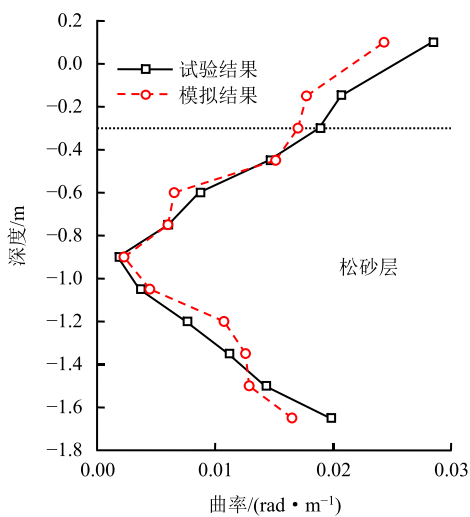


图 7 桩身曲率沿深度变化
Fig.7 Variations of pile curvature with depth

3 典型场地数值模拟

3.1 典型可液化倾斜场地-桩-结构模型

根据某城市近河岸高架桥的相关资料^[15]，建立了 3 层土的可液化倾斜场地-桩基-结构的数值模型，土层由下至上分别为密砂层（5.0 m），可液化的饱和砂土层（21.5 m）及黏土层（8.0 m），地下水位埋深 1.0 m。地表设为自由透水边界，场地两侧分别设置 50.0 m 自由场边界，厚度设为 1 000.0 m。设置 2×2 的桩基础，桩基础直径 2.0 m，高度 35.5 m，

桩间距设为 4.0 m，桥墩直径 4.0 m，高度 10.0 m，承台厚度 3.0 m，模型尺寸及测点位置如图 8 所示。数值模型中采用的本构模型及桩-土接触均与上述振动台数值模型一致，土体单元参数见表 4，土体本构参数见表 5。桩基础的钢筋采用 HRB500，配筋率为 2.5%，选用 C50 强度混凝土，桥墩配筋率为 0.5%。

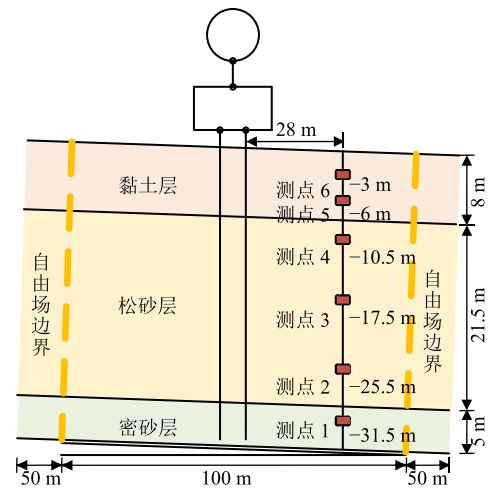


图 8 原型场地有限元模型图
Fig.8 Finite model of actual site

表 4 土体单元参数
Table 4 Parameters of soil elements

土体	水平向重力加速度 (/m·s ⁻²)	竖向向重力加速度 (/m·s ⁻²)	液相不排水体积模量 (/kPa)	水平向渗透系数 (/m·s ⁻¹)	竖向向渗透系数 (/m·s ⁻¹)
黏土层	0.0	-9.81	6.0×10 ⁶	1.0×10 ⁻⁷	1.0×10 ⁻⁷
松砂层 ^[15]	0.0	-9.81	5.2×10 ⁶	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴
密砂层 ^[15]	0.0	-9.81	6.7×10 ⁶	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵

表 5 土体本构参数表
Table 5 Soil constitutive parameters

参数	密度 $\rho/(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	参考剪切模量 G_r/kPa	参考体积模量 B_r/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	参考围压 p_a/kPa	压力系数 n	屈服面数	剪胀角 $\varphi_{PT}/(^\circ)$	剪缩系数 c_1	剪缩系数 c_2	剪胀系数 d_1	剪胀系数 d_2
黏土层	1.8	1 500 000	7 500 000	0.0	75	101	0.0	20	—	—	—	—	—
松砂层 ^[15]	1.7	60 000	160 000	31.0	—	110	0.5	20	31.0	0.087	0.18	0	0
密砂层 ^[15]	1.9	100 000	234 000	33.5	—	115	0.5	20	25.5	0.045	0.15	0	0

3.2 地震动选取

本文从太平洋地震工程研究中心（Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER）的数据库获取了 50 条速度脉冲地震动记录与 50 条非速度脉冲地震动记录，地震动峰值加速度（peak ground acceleration, PGA）选取范围为 0.27g~0.33g，所选脉冲地震动与非脉冲地震动的加速度反应谱如图 9、10 所示。近断层脉冲地震动记录选取

依据为 Shahi 等^[26-28]基于多分量的速度脉冲识别方法，从 NGA-West2 数据库发布的强震地震动记录中识别出含有速度脉冲的地震动记录。非速度脉冲地震动记录是基于对 PEER 中有关地震数据的分析，包括强度、持时以及断层距等因素选取出具有代表性的地震动记录。为方便后续进行各地震动参数与场地及桩基响应的影响分析，本文将所选取的地震动记录进行适当调整，确定时长为 40 s。

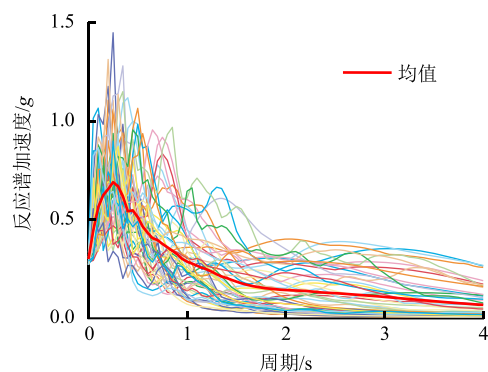


图9 脉冲地震动的加速度反应谱

Fig.9 Acceleration response spectra of pulsed ground motion

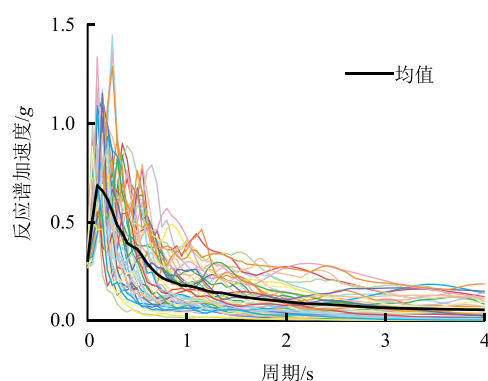


图10 非脉冲地震动的加速度反应谱

Fig.10 Acceleration response spectra of non-pulsed ground motion

4 近场脉冲与非脉冲地震动作用下的反应

4.1 土体孔压比

选取一条脉冲地震动（北岭地震）与一条非脉冲地震动（圣费尔南多），加速度时程如图 11 所示。

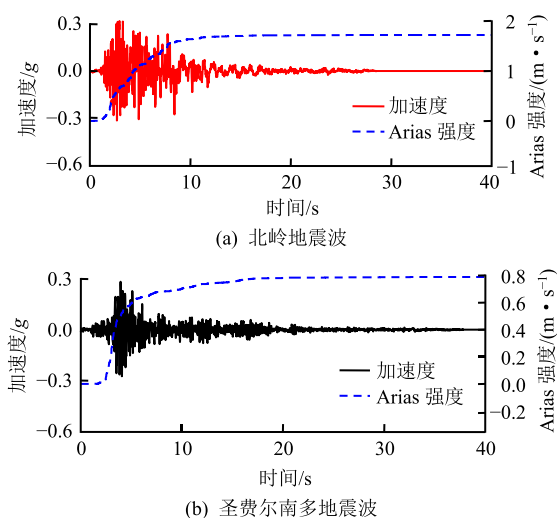


图11 地震动加速度与 Arias 强度时程图

Fig.11 Ground motion accelerations and Arias intensity time histories

根据图 12 超孔压比随输入地震动加速度时程曲线的发展情况,可将超孔压比曲线分为 3 个阶段:初始阶段,地震动加速度幅值较小,超孔压比发展缓慢;快速发展阶段,地震动加速度幅值波动增大,超孔压比急剧增加;稳定阶段,随地震动加速度幅值变化逐渐平稳,超孔压比达到稳定值。由图 12 中各测点超孔压比变化可以发现,随埋深减小,土体软化程度逐渐增加,相较于非脉冲地震动,脉冲地震动作用下,松砂层中孔隙水压力振荡显著,这可能归因于饱和砂土的剪胀效应,与脉冲地震作用下更大的土体侧向位移相关。脉冲地震动作用下孔压比累计速率稍高于非脉冲地震动作用,这可能与脉冲地震动所携带的 Arias 强度较高有关。

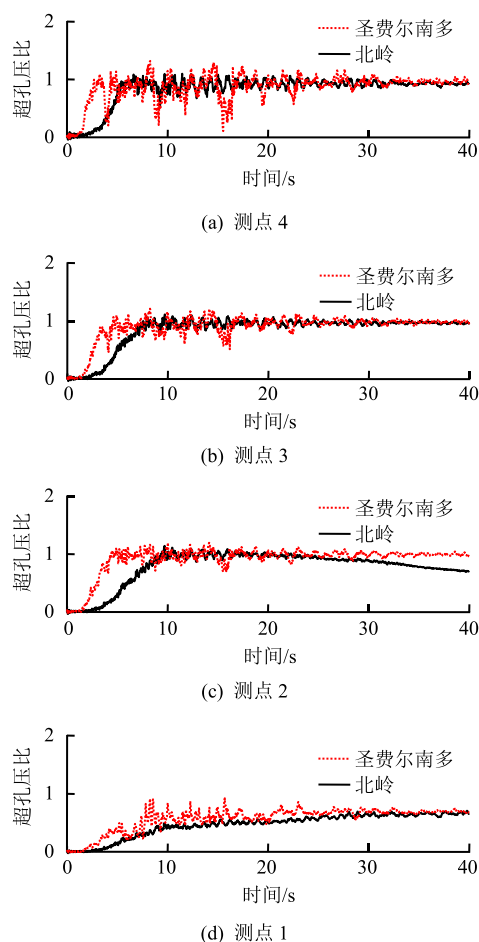


图12 土体超孔压比时程图

Fig.12 Time histories of excess pore water pressure ratio of soil

4.2 土体侧向位移

图 13 为场地测点 1~7 的侧向残余位移包络图。由图可知,侧向位移在底部密砂层中较小,随埋深减小,侧向位移逐渐增加,在松砂层上部达到最值后在上覆黏土层中略有减小,这可能与上覆黏土层的惯性力相关。需要注意的是,相比非脉冲地

震动作用，脉冲地震动作用显著增大了场地土体的侧向位移响应，特别是在松砂层顶部。脉冲地震动作用下的土体残余位移平均值几乎是非脉冲作用下的 1.4 倍。

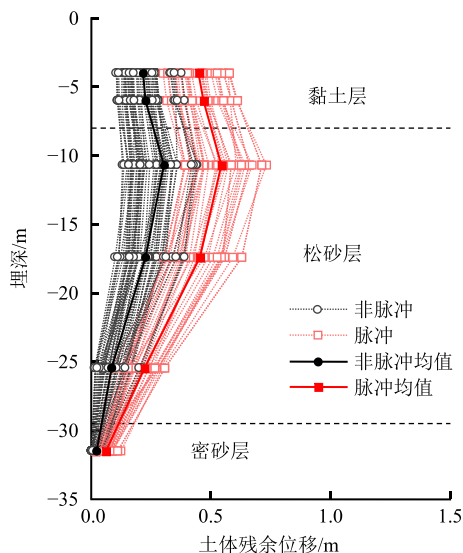


图 13 土体残余位移沿深度变化图

Fig.13 Variations of soil residual displacement with depth

4.3 桩基础弯矩

图 14 为桩身弯矩包络图，由图可知，近场脉冲与非脉冲地震动作用下桩身弯矩变化规律基本一致，且桩身弯矩峰值出现在底部密砂层与松砂层的分界处，这是因为密砂层与松砂层的液化程度不同，松砂层液化后，丧失承载能力，从而桩身在土层分界产生较大弯矩值。由于桩顶与承台为刚性连接，

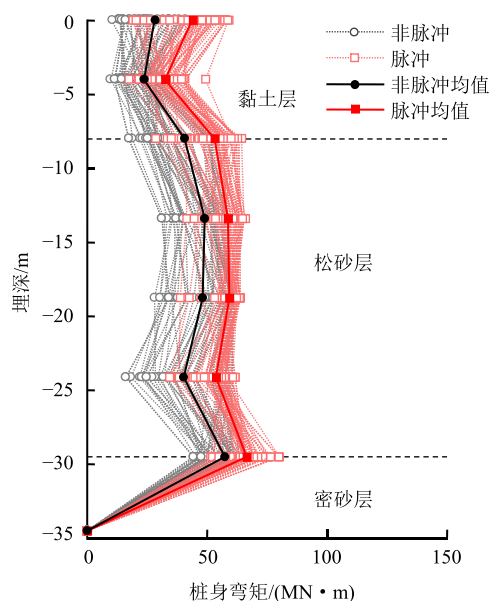


图 14 桩身弯矩沿深度变化图

Fig.14 Variations of pile bending moment with depth

桩顶可能产生较大弯矩。根据脉冲地震动与非脉冲地震动作用下的桩身弯矩发现：近场脉冲地震动会使桩基础产生更大的内力，在桩顶处更显著，桩顶处平均弯矩是非脉冲地震动作用下的 1.2 倍。因此桩基础需要更高标准的抗弯强度才能保证在近场脉冲地震动作用下的正常使用功能。

4.4 桩基础位移

由图 15 桩身侧向残余位移包络图可知，在近场脉冲与非脉冲地震动作用下桩身位移发展规律基本一致。桩身位移最大值出现在桩头或松砂层与密砂层分界处，这是由于密砂层土体尚未完全液化，土体仍存在部分抗剪强度，而松砂层液化后，丧失抗剪能力，地震动产生的剪切作用完全由桩基承受，因此，该位置的桩基位移增长迅速。上部黏土层的抗剪能力并未受到太大影响。对比脉冲与非脉冲地震动作用下桩身残余位移的变化，可以明显看出脉冲地震动作用下桩身位移响应明显大于非脉冲地震动作用。脉冲地震动作用下产生的桩顶残余位移在 0.29 m 左右，非脉冲地震动作用下产生的桩顶残余位移在 0.19 m 左右，两种地震动作用下的位移值相差接近 1.5 倍。

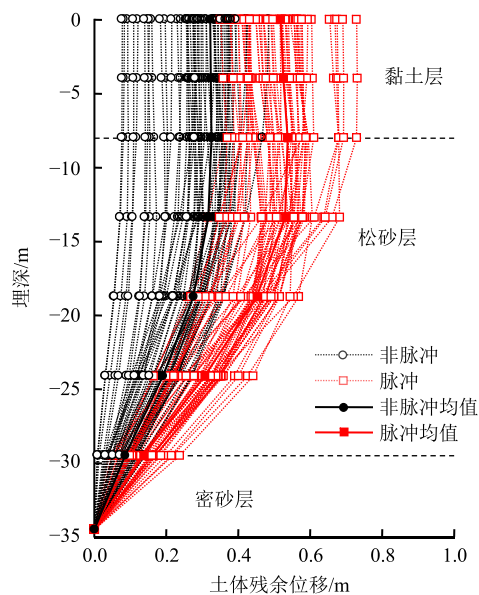


图 15 桩身残余位移沿深度变化图

Fig.15 Variations of pile residual displacement with depth

5 地震动参数对场地与桩基变形的影响

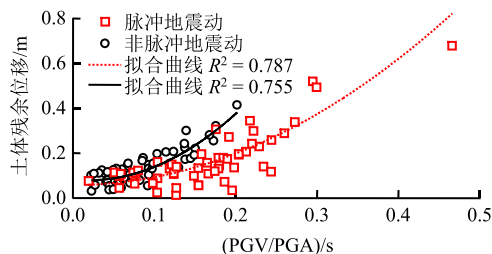
选取了脉冲与非脉冲地震动作用下 5 个地震动强度参数（见表 6）与场地及桩基位移之间的相关性进行比较分析。

图 16、17 分别给出了地震动强度参数与场地、

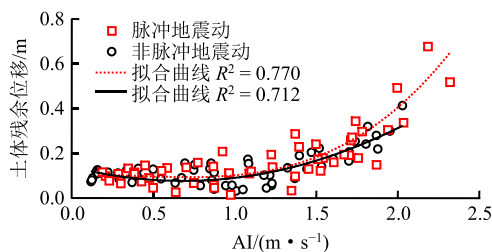
表 6 地震动强度参数表

Table 6 Ground motion intensity parameters

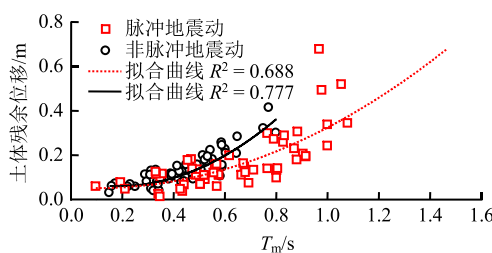
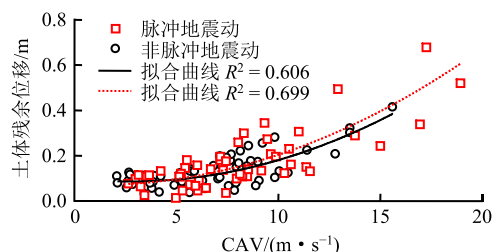
符号	名称	单位
PGV	峰值速度	m/s
PGA	峰值加速度	m/s ²
AI	Arias 强度	m/s
T_m	平均周期	s
CAV	累积绝对速度	m/s
SMV	持续最大速度	m/s



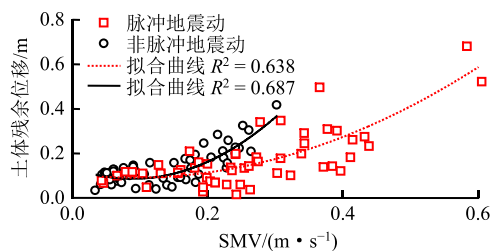
(a) PGV/PGA 与土体残余位移的相关关系



(b) AI 与土体残余位移的相关关系

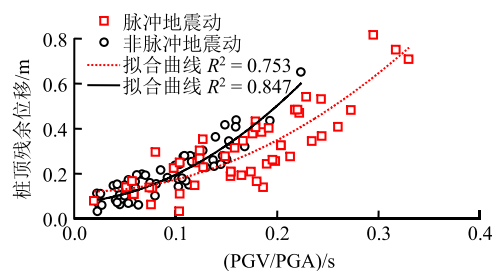
(c) T_m 与土体残余位移的相关关系

(d) CAV 与土体残余位移的相关关系

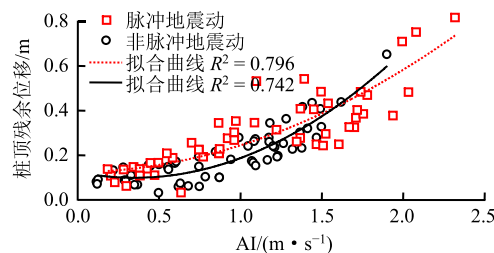


(e) SMV 与土体残余位移的相关关系

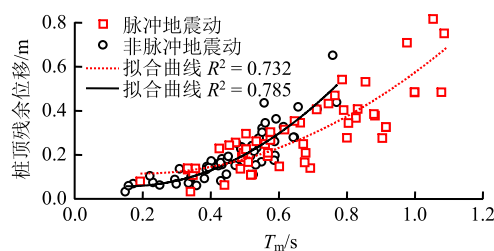
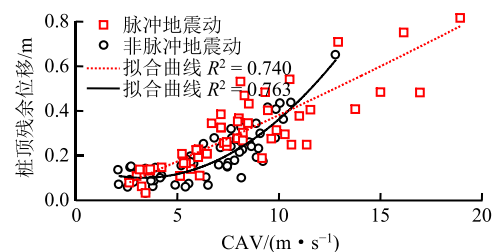
图 16 地震动强度参数与土体位移响应的相关关系
Fig.16 Correlations between ground motion intensity parameters and soil displacement response



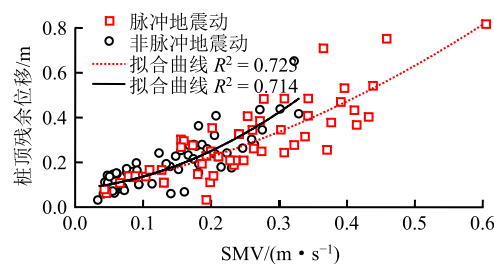
(a) PGV/PGA 与桩顶残余位移的相关关系



(b) AI 与桩顶残余位移的相关关系

(c) T_m 与桩顶残余位移的相关关系

(d) CAV 与桩顶残余位移的相关关系



(e) SMV 与桩顶残余位移的相关关系

图 17 地震动强度参数与桩身位移响应的相关关系
Fig.17 Correlations between ground motion intensity parameters and pile displacement response

桩基残余位移的关系。从图 16、17 发现,脉冲与非脉冲地震动作用下 PGV/PGA、AI、 T_m 、CAV、SMV 与土体及桩顶残余位移之间的相关性均较好。其中 PGV/PGA 脉冲地震动与非脉冲地震动作用下的土体残余位移,都与 PGV/PGA 表现出来的相关性最

好, 相关系数分别为 0.787、0.755。对于脉冲与非脉冲地震动作用下的桩顶残余位移, 同样以 PGV/PGA 表现出来的相关性最好, 相关系数分别为 0.847、0.753; 因此可以将 PGV/PGA 作为考察地震动对场地及桩基破坏的参数。

AI、 T_m 、CAV 及 SMV 与桩顶残余位移响应明显好于土体残余位移, 并且 AI、 T_m 与土体残余位移相关系数较高, CAV 与 SMV 与土体残余位移的相关系数较其他参数低, 因此 AI 与 T_m 可在一定程度上评估场地的地震响应。AI、 T_m 、CAV 及 SMV 与桩顶残余位移响应均较好, 因此 AI、 T_m 、CAV 及 SMV 均可在一定程度上评估桩基的地震响应。对比分析脉冲与非脉冲地震动作用下地震动强度参数与体系地震响应之间的相关性可以看出, 非脉冲地震动作用下地震动强度参数与体系响应之间的相关性明显更高, 说明脉冲地震动中存在的脉冲波形对场地及桩基的地震响应产生了较大影响。

6 结 论

通过在 OpenSees 平台中建立倾斜液化场地-桩基-结构体系的振动台试验的有限元模型, 验证了数值模拟方法的可靠性, 并以此为基础建立典型倾斜液化场地-桩基-结构的有限元模型。对比分析了近场脉冲型地震动与非脉冲型地震动下场地与桩基的地震响应差异, 进一步揭示了地震动强度参数与各响应之间的相关性, 主要结论如下:

(1) 与非脉冲地震动相比, 脉冲地震动作用对场地侧向残余位移、桩身弯矩及桩身位移有显著放大作用, 尤其是在松砂层顶部场地侧向残余位移、桩顶弯矩和桩顶侧向残余位移增大最为明显。

(2) 通过考察地震动强度参数与场地土体及桩基位移响应之间的相关性, PGV/PGA、AI 及 T_m 可在一定程度上描述地震动对液化场地中土体及桩基地震响应的破坏势。

(3) 相较于场地位移响应, 地震动强度参数与桩基位移响应的相关性更好; 非脉冲地震动作用下的相关系数高于脉冲地震动, 这可能是受速度脉冲的影响。

参 考 文 献

- [1] 许成顺, 贾科敏, 杜修力, 等. 液化侧向扩展场地-桩基础抗震研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 768-791
XU Cheng-shun, JIA Ke-min, DU Xiu-li, et al. Review on seismic behavior of pile foundation subjected to
- liquefaction induced lateral spreading[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2021, 41(4): 768-791.
- [2] BRUNET SANTIAGO, DE LA LLERA JUAN CARLOS, JACOBSEN ANDRÉS, et al. Performance of port facilities in Southern Chile during the 27 February 2010 Maule Earthquake[J]. **Earthquake Spectra**, 2012, 28(1): 553-579.
- [3] VERDUGO RAMÓN, GONZÁLEZ JAVIERA. Liquefaction-induced ground damages during the 2010 Chile earthquake[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2015, 79(B): 280-295.
- [4] ATHANASOPOULOS G A, KECHAGIAS G C, ZEKOS D, et al. Lateral spreading of ports in the 2014 Cephalonia, Greece, earthquakes[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2020, 128(C): 105874.
- [5] YUAN J Y, WANG Y L, ZHAN B L, et al. Comprehensive investigation and analysis of liquefaction damage caused by the Ms7.4 Maduo earthquake in 2021 on the Tibetan Plateau, China[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2022, 155(C): 107191.
- [6] TAKAHASHI AKIHIRO, SUGITA HIDEKI, TANIMOTO SHUNSUKE. Forces acting on bridge abutments over liquefied ground[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, 30(3): 146-156.
- [7] HAERI MOHSEN, KAVAND ALI, RAHMANI IRAJ, et al. Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2012, 38(7): 25-45.
- [8] 苏栋, 李相菴. 可液化土中单桩地震响应的离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 423-427.
SU Dong, LI Xiang-song. Centrifuge test study on seismic response of single pile in liquefiable soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(4): 423-427.
- [9] CUBRINOVSKI M, UZUOKA R, SUGITA H, et al. Prediction of pile response to lateral spreading by 3-D soil-water coupled dynamic analysis: shaking in the direction of ground flow[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2008, 28(6): 421-435.
- [10] 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.
XU Cheng-shun, DOU Peng-fei, DU Xiu-li, et al. Experiment study on seismic response of superstructure-piles-soils 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.
- [11] 许成顺, 豆鹏飞, 杜修力, 等. 液化自由场地地震响应大

- 型振动台模型试验分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3767-3777.
- XU Cheng-shun, DOU Peng-fei, DU Xiu-li, et al. Large-scale shaking table model test of liquefiable free field[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 3767-3777.
- [12] 贾科敏, 许成顺, 杜修力, 等. 液化侧向扩展场地-群桩基础-结构体系地震破坏反应大型振动台试验方案设计[J]. 工程力学, 2022, 40(7): 121-136.
- JIA Ke-min, XU Cheng-shun, DU Xiu-li, et al. Experimental design of shaking table tests for seismic failure response of pile-group-superstructure subjected to liquefaction-induced lateral spreading[J]. **Engineering Mechanics**, 2022, 40(7): 121-136.
- [13] 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.
- SU Zhuo-lin, JIA Ke-min, XU Cheng-shun, et al. Study on the influence of bidirectional seismic action on the seismic response of liquefiable inclined site-pile-structure[J]. **Journal of Building Structures**, 2023, 44(7): 15-26.
- [14] NASR J, KHOSRAVIFAR A. The effects of long-duration subduction earthquakes on inelastic behavior of bridge pile foundations subjected to liquefaction-induced lateral spreading[C]//Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. [S. l.]: [s. n.], 2018.
- [15] 黄雨, 八嶋厚, 张锋. 液化场地桩-土-结构动力相互作用的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 646-651.
- HUANG Yu, YASHIMA Atsushi, ZHANG Feng. Finite element analysis of pile-soil-structure dynamic interaction in liquefiable site[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(6): 646-651.
- [16] 唐亮, 凌贤长, 艾哈迈德·艾格玛. 液化侧向流动场地桩基动力反应振动台试验三维有限元数值模拟方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊 1): 180-184.
- TANG Liang, LING Xiang-zhang, AHMED Elgamel. Three-dimensional finite element analysis of shake-table test for dynamic pile behavior in liquefaction-induced lateral spreading ground[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2013, 46(Suppl.1): 180-184.
- [17] CUI C Y, LIANG Z M, XU C S, et al. Analytical solution for horizontal vibration of end-bearing single pile in radially heterogeneous saturated soil[J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2023, 116: 65-83.
- [18] MENG K, CUI C Y, LIANG Z M, et al. A new approach for longitudinal vibration of a large-diameter floating pipe pile in visco-elastic soil considering the three-dimensional wave effects[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 128: 103840.
- [19] BERTERO V V, MAHIN S A, HERRERA R A. A seismic design implications of nearfault San Fernando earthquake records[J]. **Earthquake Engineering Structural Dynamics**, 1978, 6(1): 31-42.
- [20] 李爽, 谢礼立. 近场脉冲型地震动对钢筋混凝土框架结构影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(3): 406-410.
- LI Shuang, XIE Li-li. Effect of near-field pulse ground motion on reinforced concrete frame structure[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)**, 2006, 22(3): 406-410.
- [21] 李帅, 张凡, 颜晓伟, 等. 近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 86-97.
- LI Shuai, ZHANG Fan, YAN Xiao-wei, et al. Near-fault ground motion synthesis method and its influence on seismic response of super-long cable-stayed bridges[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2017, 30(2): 86-97.
- [22] GHAYOOMI MAJID, DASHTI SHIDEH. Effect of ground motion characteristics on seismic soil-foundation-structure interaction[J]. **Earthquake Spectra**, 2015, 31(3): 1789-1812.
- [23] ELGAMAL A, YANG Z, PARRA E. Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(4): 259-271.
- [24] ELGAMAL AHMED, YANG ZHAOHUI, PARRA ENDER. Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2022, 22(4): 259-271.
- [25] YANG ZHAOHUI, ELGAMAL AHMED, PARRA ENDER. Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(12): 1119-1127.
- [26] SHAHI S K, BAKER J W. An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2011, 101(2): 742-755.
- [27] SHAHI S K, BAKER J W. A probabilistic framework to include the effects of near-fault directivity in seismic hazard assessment[R]. Berkeley: University of California, 2013: 1-77.
- [28] SHAHI S K, BAKER J W. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2014, 104(5): 2456-2466.