

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230405001

基于易损性分析的可液化场地单桩基础抗震性能研究*

许晓帅, 贾科敏, 许成顺, 杜修力

(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: 桩基础是可液化场地中常用的深基础形式, 广泛应用于近海港口、大型建筑等, 资料表明可液化场地中地震引起的桩基础损伤破坏案例屡见不鲜。为了评估单桩基础的抗震性能, 针对可液化场地单桩基础离心机试验, 借助OpenSees计算平台建立了动力相互作用有限元数值模型, 并将结果与已有的试验进行比较, 验证了模型的有效性。基于此, 重点分析了场地液化、上覆硬土层、上部结构对体系地震响应及桩基础抗震性能的影响。以桩头位移及曲率作为抗震性能指标并采用推覆分析获取桩在不同损伤状态下地震易损性抗震性能指标的界限值, 以PGA作为地震动强度指标, 基于云图法建立了概率地震需求模型, 进而绘制了桩基础的地震易损性曲线, 评估了不同性能状态的损伤概率。结果表明: 土体液化、上覆硬土层及上部结构均增加了桩的曲率、位移需求和桩基础的损伤破坏概率。

关键词: 桩基础; 液化场地; 抗震性能; 响应规律; 易损性分析

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1094-12

Study on Seismic Performance of Single Pile Foundations in Liquefiable Sites Based on Vulnerability Analysis

XU Xiaoshuai, JIA Kemin, XU Chengshun, DU Xiuli

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

Abstract: Pile foundations are a common form of deep foundations in liquefiable sites, with widespread applications in coastal ports and large buildings. Evidence suggests that cases of pile foundation damage caused by earthquakes in liquefiable sites are common. To evaluate the seismic performance of single pile foundations in liquefiable sites, a dynamic interaction finite element numerical model was established using the Opensees computational platform, based on centrifuge tests. The results were compared with existing experimental data to verify the model's validity. Based on this, the effects of soil liquefaction, overlying hard soil layers, and superstructure on the seismic response of the system and the seismic performance of pile foundations were analyzed. Pile head displacement and curvature were used as seismic performance indicators, and pushover analysis was employed to obtain the

* 收稿日期: 2023-04-05; 修回日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078016)、国家自然科学基金杰出青年基金(52225807)资助

作者简介: 许晓帅(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事桩基础抗震领域的研究。E-mail: xuxiaoshuai3@163.com

通信作者: 许成顺(1977—), 女, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土力学基础理论与试验研究。

E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn

threshold values of seismic vulnerability under different damage states. Peak Ground Acceleration (PGA) was utilized as the intensity measure for seismic motion. A probabilistic seismic demand model was developed using cloud analysis, which led to the creation of vulnerability curves of pile foundations, assessing the damage probability for different performance states. The results showed that soil liquefaction, overlying hard soil layers and superstructure all increased the curvature and displacement demands on the pile, and the damage probability of pile foundations.

Keywords: pile foundation; liquefaction site; seismic performance; response pattern; vulnerability analysis

0 引言

饱和砂土在地震动作用下易产生液化现象,表现为土体的有效应力降低,剪切强度丧失,进而引起地基失效。桩基础因具有抗震性能好、承载力高等众多优点,是可液化场地中常用的深基础形式。然而历次震害调查表明:在可液化场地中,桩基础的损伤或破坏引起上部结构不同程度破坏的现象仍屡见不鲜,如2010年海地地震^[1]、2008年汶川地震^[2]、2011年新西兰基督城地震^[3]等案例所述。近年来,围绕饱和砂土液化与桩基础抗震性能等问题的研究受到岩土地震工程界专家学者的关注^[4-5]。

围绕可液化场地桩基础地震反应规律及抗震性能,国内外学者一般采用模型试验与数值模拟的手段展开研究。其中,离心机因具有能够模拟原型场地土体应力水平的优势被应用于液化场地桩土地震反应研究中。D. W. Wilson^[6]在UC Davis离心机设备上开展了系列液化场地桩基础的离心机振动台试验,报道了桩基础的地震反应规律,重点关注饱和砂土相对密实度对桩基地震反应的影响。通过反算试验数据,获得了桩的动力 $p-y$ 曲线。X. Liu等^[7]进行了一系列液化场地 4×4 群桩基础的离心机振动台试验,并首次在桩基础离心机振动台试验中实现水平-竖向双向地震动输入,通过互相关分析,并研究了运动与惯性相互作用对群桩地震响应的作用。1-g振动台可以再现场地液化等宏观现象,是可液化场地地震反应研究的有效手段。唐亮等^[8]完成了上覆黏土层、下部饱和砂土的群桩基础-独柱墩结构振动台试验,报道了土-桩体系的地震响应规律,为可液化场地桥梁群桩基础的抗震研究提供了必要的铺垫。许成顺等^[9-11]相继完成了可液化自由场、群桩基础上部结构体系及可液化倾斜场地的系列大型振动台试验,并初步探讨了体系在小震和大震作用下的反应规律,为不同场地桩基础抗震性能的评估提供

重要的基础。然而模型试验具有费用高、可重复性差的特点,随着计算机技术的快速发展,数值模拟逐渐成为学者青睐的研究手段。

针对可液化场地桩-土地震反应的数值模拟方法依稀可见。唐亮等^[12]在OpenSees有限元计算平台中建立了液化侧向扩展场地桩基础三维数值模型,并基于大型振动台试验评估了模型的准确性。R. Wang等^[13]提出了一种可液化场地桩-土有限元建模方法,通过引入砂土液化大变形统一塑性本构模型模拟饱和砂土液化后剪切变形的产生和累积过程,建立桩-土界面以考虑液化土-桩在地震动下的实际响应,并利用离心机试验结果对提出数值模型的有效性进行验证。可靠的数值模拟方法对液化场地桩基础抗震性能评估具有重要的现实意义。然而,三维模型需要花费较大的时间成本,在进行大量工况计算时具有一定的挑战性。在这方面,二维有限元模型具有显著的优势^[14]。另一方面,A. Khosravifar等^[15]采用2D非线性动力分析方法研究了桩轴在液化侧向扩展场地的非弹性响应,通过单独分析土体液化、上部结构惯性作用的影响,对桩轴的地震需求进行探讨。Y. Wang等^[16]对可液化场地斜桩的抗震性能进行研究,基于已验证的数值模型,通过参数分析对影响斜桩抗震性能的因素进行总结。值得注意的是:场地液化、上覆硬土层、惯性与运动相互作用是影响桩基础抗震性能的重要因素,然而,针对这些因素对场地-桩基础抗震性能影响的讨论还不深入。

以上研究更多关注桩基础的地震反应特征,较少涉及从概率角度对可液化场地桩基础抗震性能进行评估。地震易损性分析作为评估结构抗震性能的一种方法,能够预测结构在不同水平地震作用下发生不同破坏程度的概率,可以宏观地描述地震动强度与结构破坏程度之间的关系,定量评估结构的抗震性能^[17]。目前易损性分析方法更多用于桥梁结构、地上建筑的抗震性能评估^[18-19],尚缺乏对可

液化场地桩基础抗震性能的分析。

本文建立了考虑桩—土界面非线性反应的液化场地—单桩基础—上部结构离心机试验有限元数值模型,并与已有的试验结果和数值模拟结果进行对比,对数值模型的有效性进行验证。基于此,考虑场地土体液化、上覆硬土层、上部结构惯性作用对桩基抗震性能的影响,建立可液化场地混凝土桩数值模型,对比不同工况下桩土体系典型的地震反应。接着通过 pushover 分析确定桩的损伤指标限值,作为不同失效模式下桩达到不同损伤阶段的定量判别标准。基于云图法建立概率地震需求模型,整合数值计算结果,进行地震易损性分析,重点讨论土体液化、上覆硬土层、上部结构对桩抗震性能的影响。

1 地震易损性分析方法

地震易损性分析可以有效评估结构在多个损伤状态下的抗震性能。通过构建结构工程需求参数(Engineering Demand Parameter, EDP)与地震动强度指标(Intensity Measures, IM)的统计关系,进而建立概率地震需求模型(Probabilistic Seismic Demand Analysis, PSDA)。C. A. Cornell等^[20]给出了地震动强度指标与工程需求参数的幂律关系,见式(1):

$$EDP = a(IM)^b \quad (1)$$

为了估计结构云响应的统计特征,假设结构响应与地震动强度的自然对数之间服从线性函数见式(2):

$$\ln EDP = \ln a + b \ln IM \quad (2)$$

式中, a 、 b 为统计回归参数。可通过对桩曲率及位移分别进行地震易损性曲线的一元线性回归分析数学拟合获得。

易损性曲线表示结构在不同强度地震动作用下结构地震需求达到或超越某一损伤极限状态的条件概率。通常,假设易损性曲线近似服从双参数对数正态分布,采用如下对数正态概率分布函数描述,可表示为^[21]:

$$P_f(D \geq C|IM) = \Phi \left(\frac{\ln(S_D) - \ln(S_C)}{\sqrt{\beta_{EDP|IM}^2 + \beta_C^2}} \right) \quad (3)$$

$$\beta_{EDP|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln EDP_i - (\ln a + b \ln IM_i)]^2}{n-2}} \quad (4)$$

式中, P_f 为失效概率; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; S_D 和 S_C 分别为结构需求与指定损伤状态的均值; $\beta_{EDP|IM}$ 为地震动强度指标与工程需求参数对数线性回归得到的标准差; β_C 为指定损伤状态的对数标准差,其值应根据实验数据决定,但由于缺乏相关的试验数据,本文研究假定其值为15%^[21-22]; n 为非线性地震反应的次数。

1.1 地震波选取

选取地震动的合理性和随机性是保证地震易损性曲线可靠性的重要因素。据J. Huh等^[23]的研究,地震动大于等于20条是地震易损性分析的合理数值,在可接受的计算量下可以充分考虑地震动频率特性的影响。

因此,本文参考FEMAP-695报告^[24],从中国国家强震动台网中心^[25]和美国太平洋地震研究中心^[26]收集到国内外不同场地条件下的地震动记录,并参照我国规范规定的场地类别进行了分类。从中选取40条原始记录作为输入地震动。地震动记录的加速度响应谱如图1所示。所选取的记录覆盖范围较广,具有代表性。

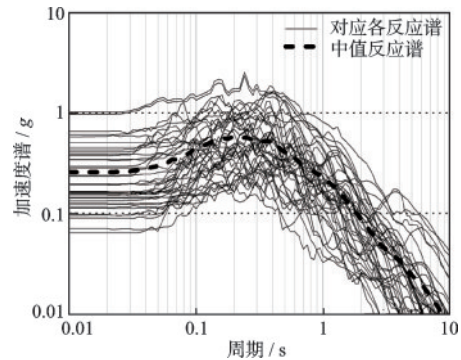


图1 原始地震记录的加速度反应谱

Fig.1 Acceleration response spectrum of original seismic records

1.2 地震易损性分析指标及限值

地震动强度指标作为表征地面运动强度水平的量化值基本可分为三类,它们分别与地震动峰值、频谱及时相关。目前,研究者们已经提出了数十种不同的形式^[27-30],其中地震动峰值加速度PGA具有效率高、实用性强、熟练度好、便于规范工程使用的特点,考虑桩基础所具有的响应特点,本文选取PGA作为地震动强度指标。

合适的工程需求参数利于结构破坏的水准界

定,是实现基于性能抗震设计的另一个基本问题。普遍来讲,现阶段基于性能的抗震设计研究仍处于以位移控制为主,相对于强度、应变、能量等性能参数,位移和曲率可以更好地体现构件的损伤程度及性能水准,而且桩破坏后的位移容易测量,便于损伤程度和抗震性能的评估以及数据的可靠度检验。

根据前人的研究经验,以混凝土应变作为混凝土桩的损伤指标^[31],本文采用推覆分析方法获取桩在不同损伤状态下地震易损性分析指标的界限值^[32],见表1。具体而言,通过逐渐增加上部结构的横向位移使桩的混凝土应变增大,进而得到桩在轻微、中度、严重损伤状态下的性能指标界限值。定义保护层混凝土应变达到屈服后的应变作为轻微损伤状态指标;核心区混凝土应变达到屈服后的应变作为严重损伤状态指标,核心区混凝土应变接近轻微损伤状态混凝土应变和严重损伤状态混凝土应变的均值作为中度损伤状态指标。通过对桩进行推覆分析得到需求参数与混凝土应变的关系,进而推求不同损伤状态下需求参数的界限值,图2给出了工程需求参数与混凝土应变的关系曲线。

表1 桩基础限值统计

Table 1 Statistical limits of pile foundations			
损伤等级	轻微损伤	中度损伤	严重损伤
核心混凝土应变	0.004	0.01	0.014 6
曲率/ m^{-1}	0.01	0.028	0.056
位移/m	0.24	0.39	0.63

2 数值模型与验证

2.1 离心机试验

离心机试验能够模拟原型场地的土体应力水平,因此常被用于可液化场地土-结构动力相互作用的研究。D. W. Wilson等^[6]开展了一系列可液化场地桩基础上部结构体系的离心机振动台试验。数值模型针对该系列试验Csp2组,地震动输入为F工况的单桩基础为对象建立。试验布置如图3所示,地基剖面为两层饱和内华达砂土。单桩基础为直径670 mm,壁厚19 mm的钢管桩,埋深为16.8 m,桩头高出地面3.81 m,上部结构质量49 t,桩身弹性模型为 7×10^7 kPa。试验所有参数均基于原型尺度给出。

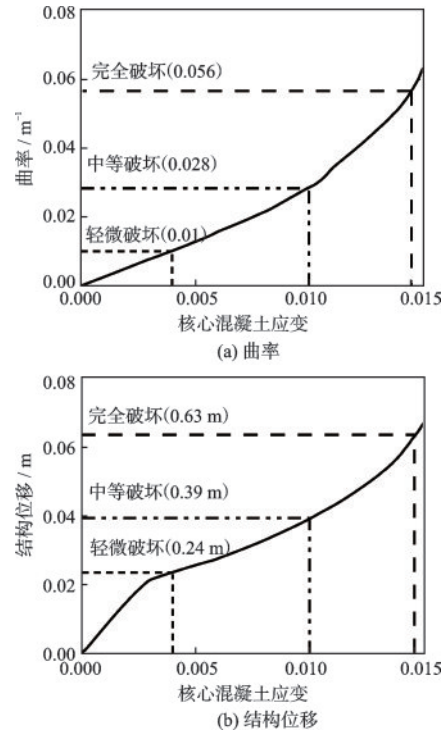


图2 工程需求参数与混凝土应变的关系曲线

Fig.2 Relationship curve between engineering demand parameters and concrete strain

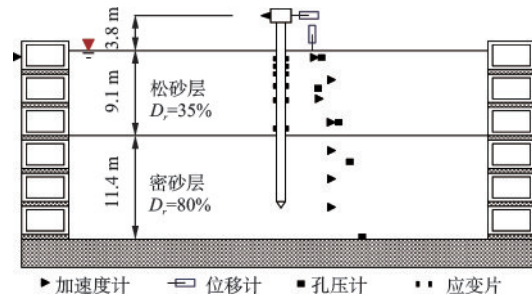


图3 Csp2离心机试验布置示意^[6]

Fig.3 Schematic diagram of Csp2 centrifuge test layout^[6]

2.2 数值模型

通过建立上述可液化场地单桩基础离心机试验数值模型,模拟地震作用下地基土和桩基础的地震反应。模拟基于开源有限元OpenSees计算平台,其由加州大学伯克利分校主导研发,具有很强的非线性分析能力,广泛用于岩土工程方面分析的有限元模拟^[33]。

数值模型中,土体选用quad UP四结点单元进行模拟,将土体模拟为两相介质。为了近似模拟桩身对土体变形的阻碍效应,土体单元平面外尺寸设为20.55 m,与离心机试验保持一致^[6]。数值上,动力方程为基于Biot土-水完全耦合的 $u-p$ 公式^[34],

其中 u 代表土颗粒位移, p 代表孔隙水压力。采用 Newmark 隐式方法对时间域内积分求解, 通过在 Newmark 积分中增加阻尼, 抑制可能发生网格锁定引起的高频振荡^[35]。

采用对孔隙水压力敏感的多屈服面塑性本构模型 (Pressure Depend Muti Yield 02, PDMY02) 模拟饱和砂土的动力响应^[36-37], 该模型能够描述饱和砂土在动力荷载下的剪胀、剪缩和剪切变形累积等特性。离心机试验模型土体参数见表 2, 土体参数选取时, 综合考虑了离心机试验中测定的部分土体参数值和本构模型的推荐参数值^[6, 38]。桩单元采用非线性 disp Beam Column 单元模拟^[39], 选取具有运动硬化的双线性本构模型 Steel01 描述单桩基础的动力响应, 桩基础材料参数见表 3, 上部结构简化为集中质量点。

表 2 离心机试验模型土体参数
Table 2 Soil parameters of centrifuge test model

参数	松砂层	密砂层
密度 $\rho/(\text{ton}\cdot\text{m}^{-3})$	1.75	2.0
参考剪切模量 G_r/kPa	6×10^4	12×10^4
参考体积模量 B_r/kPa	15×10^4	26×10^4
摩擦角 ϕ	31	38
八面体峰值剪应变 γ_{\max}	0.1	0.1
参考围压/ kPa	101	101
压力系数 n	0.5	0.5
剪胀角 ϕ_{PT}	22	31
剪缩参数 c_1	0.087	0.013
剪缩参数 c_3	0.18	0
剪胀参数 d_1	0.0	0.3
剪胀参数 d_3	0	0.0
屈服面数	20	20
剪缩参数 c_2	5	5
剪胀参数 d_2	3	3
液化参数 l_1/kPa	1	1
液化参数 l_2	0.0	0.0
初始孔隙比 e	0.6	0.6
参数 1	0.9	0.9
参数 2	0.02	0.02
参数 3	0.7	0.7
标准气压	101	101

桩基和土体通过 Zero Length 单元连接, 桩身—土横向、竖向相互作用分别采用非线性 $p-y$ 、 $t-z$ 弹簧模拟, 桩尖—土相互作用采用非线性 $q-z$ 弹簧模拟, $p-y$ 、 $t-z$ 弹簧分别通过 OpenSees 中能考虑

表 3 桩基础材料参数

Table 3 Material parameters of pile foundations

参数	单桩基础
弹性模量/ MPa	7.0×10^4
屈服应力/ MPa	290
惯性矩/ m^4	6.1×10^{-3}
屈服弯矩/ $(\text{kN}\cdot\text{m})$	5.3×10^3

饱和砂土液化效应的 PyLiq1、TzLiq1 本构模型模拟^[40], $q-z$ 弹簧通过 QzSimple1 本构模型模拟^[40]。桩土相互作用弹簧的模拟方法参考 K. Jia 等^[41]。

模型土体底部设为不透水的刚性地基, 水平和竖向自由度固定, 以施加基底一致激励。土体上表面设为自由透水边界条件, 左右两侧相同深度处土体结点, 使用 equalDOF 命令绑定其水平和竖向自由度, 模拟周期性边界条件, 且两侧边界不排水。分析步骤如下:

(1) 模型首先施加土体自重, 设置边界条件, 将饱和砂土渗透系数设为 1, 以实现土体的快速固结, 分别进行弹性和塑性重力分析, 生成初始可液化自由场应力, 更新材料至塑性。

(2) 建立考虑桩土界面非线性反应的桩—土界面模型, 进行考虑桩基础的重力分析, 获得初始应力场。

(3) 把重力分析阶段获得的土体变形设置为零, 土体渗透系数更新为设定值, 通过基底一致激励的方式加载地震波, 对整体模型进行动力分析。

2.3 数值模型验证

通过对比试验和数值计算中饱和砂土和桩基础的动力响应, 验证模型的有效性。Csp2 试验 F 工况输入地震动加速度峰值为 $0.22g$ 的实际记录地震波, 加速度时程如图 4 所示。图 5 给出了离心机试验与数值计算超孔隙水压力时程对比, 可以看出, 上层饱和松砂孔压比达到 1 后, 孔压基本未消散, 说明地震激励过程始终处于液化状态, 而下层密砂在激振过程中未液化。数值计算结果与试验结果变化趋势基本相同, 峰值出现的时间也基本吻合。

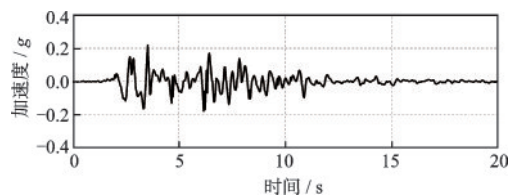


图 4 Csp2 试验 F 工况加载地震波时程^[6]

Fig.4 Time history of seismic wave loading under Csp2 test condition F^[6]

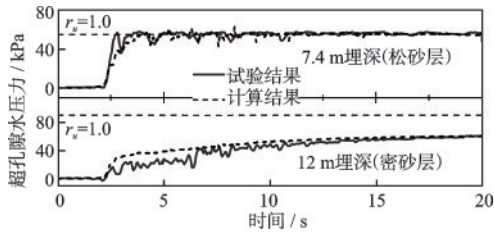


图5 试验与数值计算土体超孔隙水压力对比^[6]

Fig.5 Comparison of pore water pressure between experimental and numerical calculations^[6]

图6和图7分别给出了数值计算土体、桩基础的地震反应与离心机试验结果的对比情况,发现数值计算结果与试验结果总体变化趋势较为一致。以上说明,本文数值模型可有效模拟液化场地桩基础地震反应,验证了数值模型的可靠性。土体超孔隙水压力、远场土体、桩头加速度时程及单桩基础弯矩时程与试验几乎保持一致,整体吻合较好。

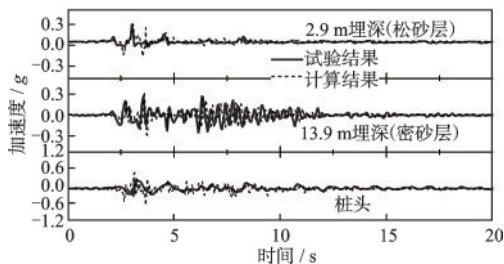


图6 试验与数值计算远场土体、桩头加速度时程对比^[6]

Fig.6 Comparison of acceleration time histories between experimental and numerical calculations for far-field soil and pile head^[6]

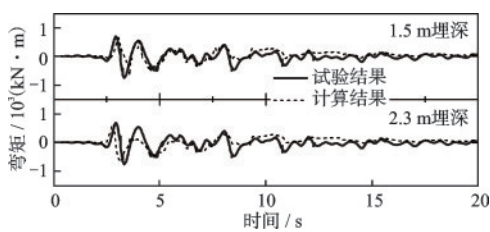


图7 试验与数值计算单桩基础弯矩时程对比^[6]

Fig.7 Comparison of bending moment time histories between experimental and numerical calculations for a single pile foundation^[6]

作用对桩基础抗震性能的影响,本文研究设置4种桩—土体系场景,如图8所示。场景A为基本场景,土层设置包含密砂层、可液化松砂层、上覆硬土层,桩上设置上部结构质量;场景B为非液化场景,通过抑制饱和砂土累积超孔隙水压力的方法,从而抑制场地土体发生液化,此场景下土体运动效应较小;场景C为无上覆硬土层场景,将场景A中的上覆硬黏土层设置为饱和松砂层;场景D为无上部结构场景,将上部结构质量设置为0,但桩身质量保持与工况A、B、C一致,以产生相同的弯矩—曲率关系。

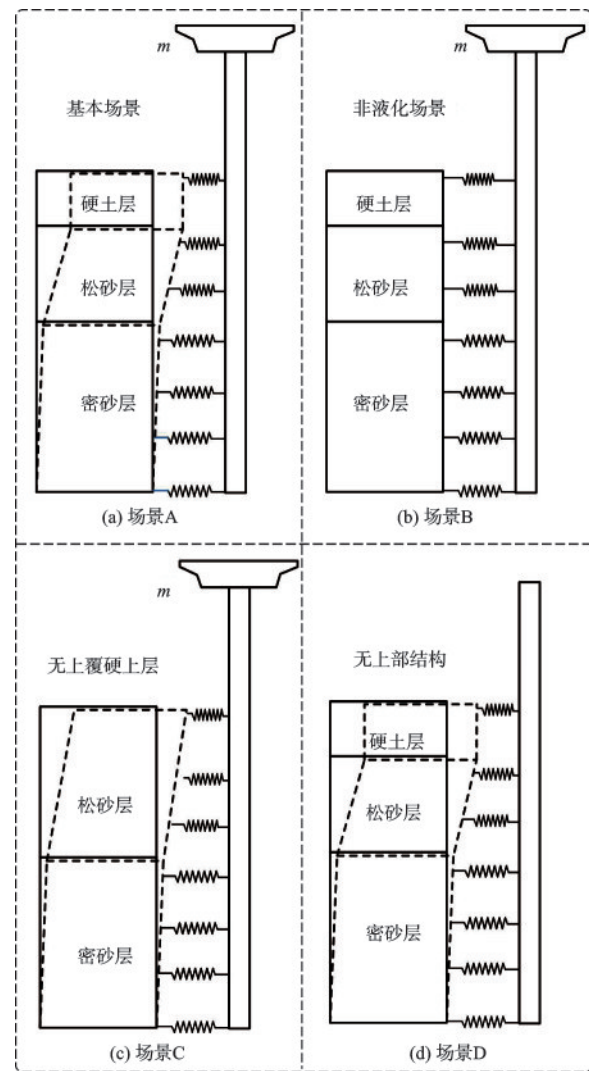


图8 桩—土体系不同场景设置示意

Fig.8 Schematic diagram of pile-soil system under different scenarios

3 桩—土体系模型

3.1 分析场景设置

为了解土体液化、上覆硬土层、上部结构惯性

3.2 有限元模型简介

图9给出了本文研究场景A的土—桩体系数值模型示意图。土层设置从下至上依次为12 m密砂

层、5 m 松砂层上覆 3 m 硬黏土层,松砂和密砂的相对密实度分别设置为 40% 和 75%,饱和砂土的模拟方法与第 2 节介绍相同,此外,上覆硬黏土采用 PIMY 模型模拟,土体本构模型参数选取依据参考文献[42]和用户手册^[43]。

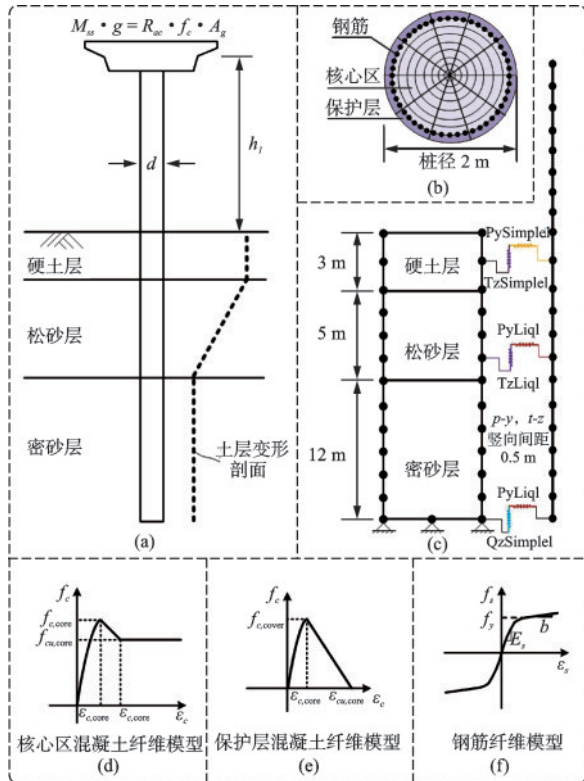


图9 桩-土体系有限元模型示意

Fig.9 Schematic diagram of finite element model of pile soil system

表 4 给出了模型参数选取的具体值。桩采用基于位移的梁柱单元模拟 (disp Beam Column), 允许在任何深度产生塑性铰。钢筋和混凝土纤维模型分别采用 Steel02 和 Concrete01 材料模拟, 纤维截面属性见表 5, 应力应变反应如图 10 所示。相邻节点的桩长设为 0.5 m, 地面以下桩长 20 m, 地面上为 8 m, 桩径 2 m。上部结构质量被设置为:

$$M_{ss} = \frac{R_{ac} \cdot f_c \cdot A_g}{g} \quad (5)$$

式中, R_{ac} 为轴压比; f_c 为保护层混凝土抗压强度; A_g 为桩界面面积; g 为重力常数。为了简化模型, 桩与上部结构采用刚性连接, 这种简化的方式在之前的研究中被使用及证实^[42]。

表 4 土体本构模型参数

Table 4 Parameters of soil constitutive model

参数	松砂层	密砂层	参数	黏土层
	$D_r=40\%$	$D_r=75\%$		
质量密度 $\rho / (\text{ton} \cdot \text{m}^{-3})$	1.95	2.05	质量密度 $\rho / (\text{ton} \cdot \text{m}^{-3})$	1.6
参考剪切模量 G_r / kPa	58.2	93.3	参考剪切模量 G_r / kPa	50
参考体积模量 B_r / kPa	160.2	255	参考体积模量 B_r / kPa	250
内摩擦角 ϕ	27.1	36	内摩擦角 ϕ	40
峰值剪应变 γ_{\max}	0.1	0.1	峰值剪应变 γ_{\max}	0.1
参考围压 / kPa	100	100	参考围压 / kPa	100
压力系数 n	0.5	0.5	压力系数 n	0
相位转换角 ϕ_{PT}	22	31	屈服面数	20
剪缩参数 c_1	0.04	0.005		
剪缩参数 c_3	0.2	0.2		
剪胀参数 d_1	0.15	0.25		
剪胀参数 d_3	0	0		
屈服面数	20	20		
剪缩参数 c_2	5	5		
剪胀参数 d_2	3	3		
液化参数 l_1 / kPa	1	1		
液化参数 l_2	0	0		
初始孔隙率 e	0.72	0.55		
参数 1	0.9	0.9		
参数 2	0.02	0.02		
参数 3	0.7	0.7		
标准气压 / kPa	101	101		

表 5 混凝土和钢筋的材料参数

Table 5 Material parameters of concrete and steel bars

材料	抗压强度 / MPa	峰值应变	屈服强度 / MPa	屈服时应变	密度 / $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$
保护层混凝土	-34	-0.002	0	-0.004	2
核心区混凝土	-44.8	-0.004	-37	-0.014	2
材料	弹性模量 / MPa	屈服强度 / MPa			
钢筋	2×10^5	400			

4 桩—土体系的典型地震响应

4.1 地基土超静孔压比响应分析对比

图 10 对比了地基土超静孔压比的包络图。从图中发现,随深度增加,孔压比幅值逐渐减小,松砂层表现出较高的软化程度,而密砂层的软化程度较低。上覆硬土层的存在增大了饱和砂土的软化程度,在松砂浅层及密砂深层体现更为突出,这是由于上覆硬土层的渗透系数较小,阻碍孔隙水向上渗透。

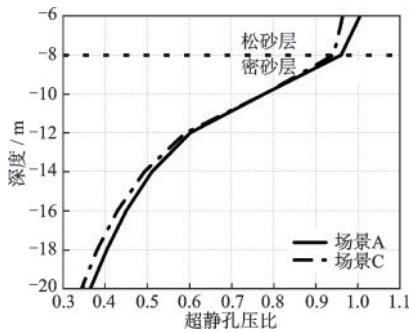


图 10 Kocaeli地震波作用下地基土超静孔压比包络图对比
Fig.10 Comparison of envelope curves of excess pore water pressure ratio of foundation soil under Kocaeli earthquake

4.2 桩基础曲率反应分析对比

Kocaeli和Loma Prieta地震波频谱和时程如图 11和图 12。

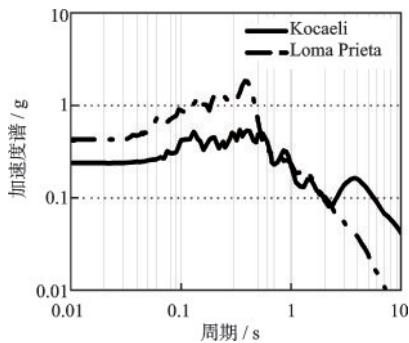


图 11 Kocaeli和Loma Prieta地震波频谱
Fig.11 Kocaeli and Loma Prieta seismic acceleration spectra

图 13对比了桩在Kocaeli和Loma Prieta地震波作用下的桩身曲率幅值。从图 13中观察到,不同地震动下的桩身弯矩响应规律基本一致,但数值大小

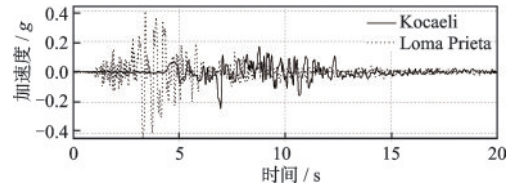


图 12 Kocaeli和Loma Prieta地震波时程
Fig.12 Time histories of Kocaeli and Loma Prieta earthquakes

有差异。具体而言,靠近地表附近的桩曲率幅值更显著,其次是松砂与密砂层界面附近。相比可液化场地,不可液化场地中的桩曲率需求更小,这是由于土体的运动效应减弱。另一方面,无上覆硬土层场地中的桩曲率相比带有上覆硬土层中的桩曲率需求显著减小,原因是上覆硬土层对桩施加更大的侧向压力。此外还观察到,由于惯性效应减小,无上部结构的桩基础展现出更小的曲率需求,并且具有转换桩的易破坏位置从靠近地表位置向可液化层中部的趋势。整体来看,场地液化、上覆硬土层、上部结构均对桩曲率产生显著的影响。

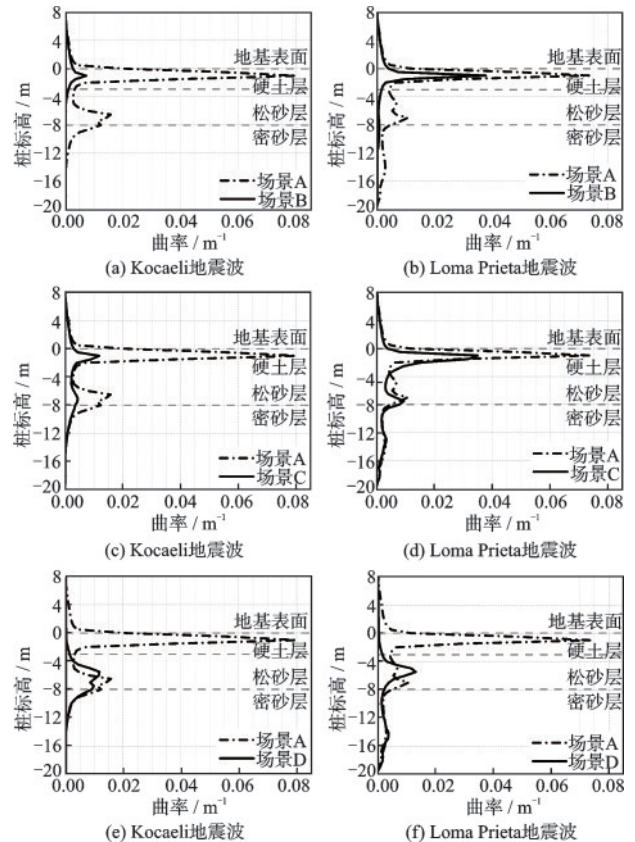


图 13 Kocaeli和Loma Prieta地震波作用下,各场景桩身曲率幅值对比
Fig.13 Comparison of curvature amplitudes of piles under Kocaeli and Loma Prieta earthquakes across scenarios

4.3 桩基础位移反应分析对比

图 14 对比了 Kocaeli 和 Loma Prieta 地震波作用下不同场景中桩的位移幅值分布。从图 14 中可以看出,相比不可液化场地,可液化场地中的桩基础展现出更大的位移幅值,原因是液化导致土体产生更大的侧向变形。由于上覆硬土层增大了饱和砂土的孔压比幅值及结构的 P- Δ 效应,上覆硬土层及上部结构的存在均能够增加桩的位移需求。因此,场地液化、上覆硬土层及上部结构的存在均对桩的位移需求产生显著的影响。

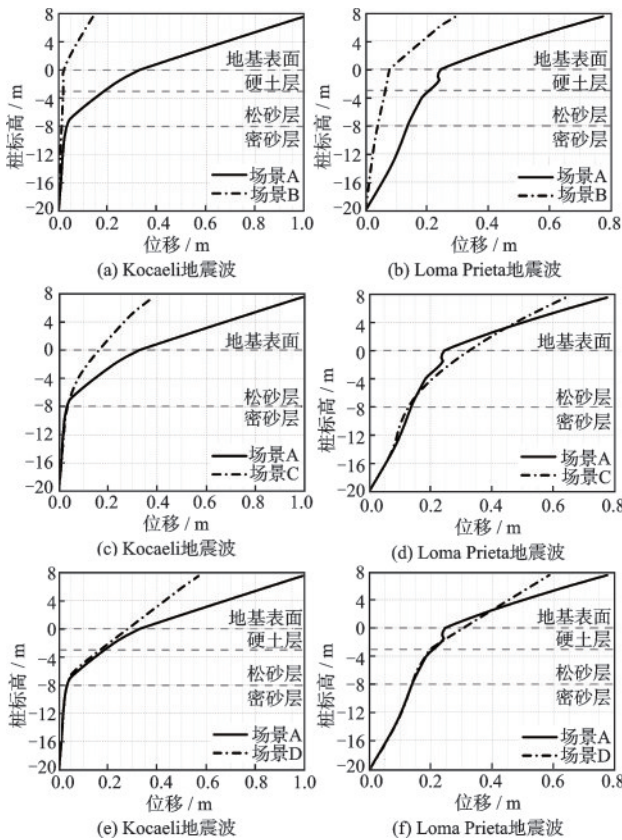


图 14 Kocaeli 和 Loma Prieta 地震波作用下,各场景桩身位移幅值对比

Fig.14 Comparison of pile displacement amplitudes under Kocaeli and Loma Prieta earthquakes across scenarios

5 桩基础地震易损性分析

桩在不同情景下的地震易损性曲线如图 15、图 16 所示。

从图 15 中发现,以曲率为工程需求参数时,土体液化、上覆硬土层以及上部结构显著增加了桩基

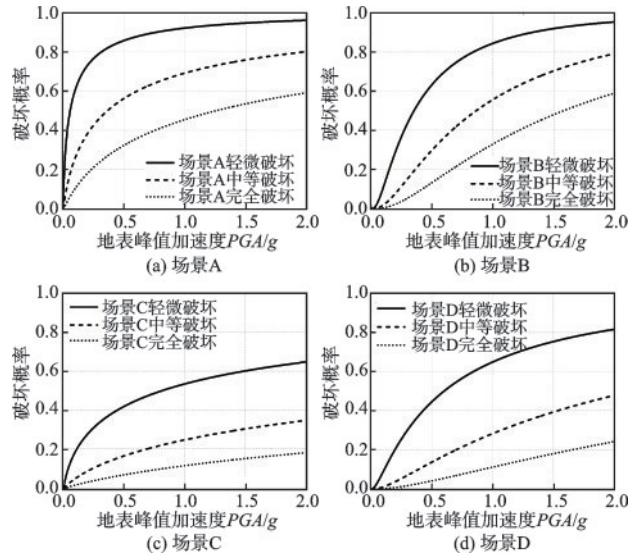


图 15 以桩身曲率为抗震性能指标的地震易损性曲线
Fig.15 Seismic vulnerability curve based on pile curvature as seismic performance index

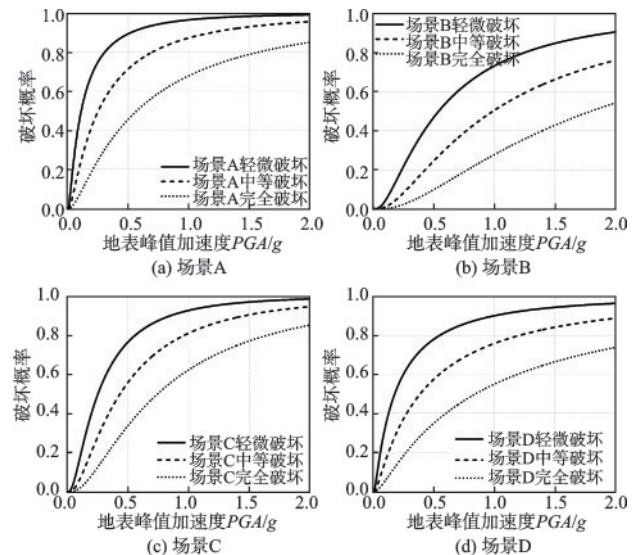


图 16 以桩头位移为抗震性能指标的地震易损性曲线
Fig.16 Seismic vulnerability curve based on pile head displacement as seismic performance indicator

础的损伤破坏概率,土体液化下尤其在 PGA 从 0.2g 到 1g 地震动峰值加速度较小的情况中更为明显;硬土层使得桩基础破坏概率的增速随着 PGA 增加而增大;上部结构对完全破坏概率的影响尤为明显。

从图 16 中发现,以结构位移为工程需求参数时,三个因素同样发挥着重要的影响作用,土体液化使得桩基础损伤概率增加;上覆硬土层在地震动峰值加速度较小时显著增加了桩的破坏概率。随着 PGA 的增加,硬土层对破坏概率的影响减弱。

6 结 论

(1) 随深度增加,超静孔压比幅值逐渐减小,上覆硬土层的存在增大了饱和砂土的软化程度,在松砂浅层及密砂深层体现更为突出。

(2) 土体液化、上覆硬土层及上部结构惯性作用增加了桩的曲率和位移需求。靠近地面的桩曲率需求更显著,并且无上部结构具有转换桩的易破坏位置从硬土层向可液化层中部的趋势。

(3) 土体液化、上覆硬土层及上部结构均显著增加了桩基础的损伤破坏概率。其中,场地液化这一因素在PGA从0.2g到1g作用区间的影响显著,上部结构惯性作用对完全破坏概率的影响尤为明显。

参考文献:

- [1] Werner S, McCullough N, Bruin W, et al. Seismic performance of port de port-au-prince during the haiti earthquake and post-earthquake restoration of cargo throughput[J]. Earthquake Spectra, 2011,27(Sup1): 387-410.
- [2] Zhou Y, Xia P, Ling D, et al. A liquefaction case study of gently sloping gravelly soil deposits in the near-fault region of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020,18(14): 6181-6201.
- [3] Haskell J J M, Madabhushi S P G, Cubrinovski M, et al. Lateral spreading-induced abutment rotation in the 2011 Christchurch earthquake: observations and analysis[J]. Géotechnique, 2013, 63(15):1310-1327.
- [4] 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 C S, Jia K M, Du X L, 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. (in Chinese)
- [5] 李雨润,王佳玮,邹泽,等.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,2019,39(2):191-200.
Li Y R, Wang J W, Zou Z, et al. Comparative experimental study on dynamic response of straight inclined piles under variable frequency regular wave input [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 191-200. (in Chinese)
- [6] Wilson D W. Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay [M]. Davis: University of California, Davis America, 1998.
- [7] Liu X, Wang R, Zhang J M. Centrifuge shaking table tests on 4 × 4 pile groups in liquefiable ground[J]. Acta Geotechnica, 2018,13(6):1405-1418.
- [8] 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 L, Xu P J, 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. (in Chinese)
- [9] 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 C S, Dou P F, Du X L, et al. Large-scale shaking table model test of liquefiable free field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(10):3767-3777. (in Chinese)
- [10] 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 C S, Dou P F, Du X L, 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. (in Chinese)
- [11] 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,2023,40(7):121-136.
Jia K M, Xu C S, Du X L, 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, 2023, 40(7): 121-136. (in Chinese)
- [12] 唐亮,凌贤长,艾哈迈德·艾格玛,等.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1):180-184.
Tang L, Ling X L, Ahmed E, et al. 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(Sup1):180-184. (in Chinese)
- [13] Wang R, Fu P, Zhang J. Finite element model for piles in liquefiable ground [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 72:1-4.
- [14] Jia K M, Xu C S, Du X L, et al. Seismic response

- comparison and sensitivity analysis of pile foundation in liquefiable and non-liquefiable soils[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2023, 22:87-104.
- [15] Khosravifar A, Boulanger R W, Kunnath S K. Effects of liquefaction on inelastic demands on extended pile shafts [J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30 (4) : 1749-1773.
- [16] Wang Y, Orense R P. Numerical analysis of seismic performance of inclined piles in liquefiable sands [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 139:106274.
- [17] 郝朝伟,陈彦江,何浩祥,等.耐震时程法在高墩刚构桥抗震分析中的应用[J].*防灾减灾工程学报*,2017,37(2):215-221.
Hao C W, Chen Y J, He H X, et al. The endurance time method in the seismic analysis of the continual rigid-bridge with high piers[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(2) : 215-221. (in Chinese)
- [18] Seyedi D M, Gehl P, Douglas J, et al. Development of seismic fragility surfaces for reinforced concrete buildings by means of nonlinear time-history analysis [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(1):91-108.
- [19] Zhong J, Jeon J, Yuan W, et al. Impact of spatial variability parameters on seismic fragilities of a cable-stayed bridge subjected to differential support motions[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(6) : 04017013.
- [20] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(4):526-533.
- [21] Li C, Li H, Hao H, et al. Seismic fragility analyses of sea-crossing cable-stayed bridges subjected to multi-support ground motions on offshore sites [J]. *Engineering Structures*, 2018, 165:441-456.
- [22] Zhong J, Jeon J, Yuan W, et al. Impact of spatial variability parameters on seismic fragilities of a cable-stayed bridge subjected to differential support motions[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(6) :4017013.
- [23] Huh J, Tran Q H, Haldar A, et al. Seismic vulnerability assessment of a shallow two-story underground RC box structure[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(7) :735.
- [24] Council A T. Quantification of building seismic performance factors[M]. Washington, D. C: US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.
- [25] 于海英. 国家强震动台网中心[EB/OL]. <http://www.csmnc.net>.
- [26] D A T. Pacific earthquake engineering research center [EB/OL]. <http://ngawest2.berkeley.edu/site>.
- [27] Padgett J E, Nielson B G, DesRoches R. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008, 37(5):711-725.
- [28] 韩建平,周伟,李慧.基于汶川地震数据的地震动强度指标与中长周期SDOF体系最大响应相关性[J].*工程力学*,2011,28(10):185-196.
Han J P, Zhou W, Li H. Correlation between ground motion intensity and sdoof system responses with medium-to-long period based on the wenchuan earthquake data [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(10) : 185-196. (in Chinese)
- [29] 何利,叶献国.基于复合强度指标的弹塑性输入能量谱研究[J].*工程力学*,2013,30(4):7-14.
He L, Ye X G. Research on the elastic-plastic input energy spectra based on compound intensity indicator[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4) : 7-14. (in Chinese)
- [30] 叶列平,马千里,缪志伟.结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J].*地震工程与工程振动*,2009,29(4):9-22.
Ye L P, Ma Q L, Miu Z W. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2009, 29(4) : 9-22. (in Chinese)
- [31] Shafieezadeh A, DesRoches R, Rix G J, et al. A probabilistic framework for correlated seismic downtime and repair cost estimation of geo-structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(5) : 739-757.
- [32] Su L, Wan H, Bi K, et al. Seismic fragility analysis of pile-supported wharves with the influence of soil permeability [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 122:211-227.
- [33] 王景玄,王文达,魏国强.基于OpenSees平台的钢管混凝土结构力学性能数值模拟[J].*防灾减灾工程学报*,2014,34(5):613-618.
Wang J X, Wang W D, Wei G Q. Numerical simulation on mechanical performance of concrete filled steel tubular structures based on openses platform [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2014, 34(5) :613-618 (in Chinese)
- [34] Biot M A. Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Anisotropic Solid [J]. *Journal of Applied Physics*, 1955, 26(2) : 182-185.

- [35] Chang D, Boulanger R, Brandenberg S, et al. FEM analysis of dynamic soil-pile-structure interaction in liquefied and laterally spreading ground[J]. *Earthquake Spectra*, 2013, 29(3):733-755.
- [36] 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.
- [37] Yang Z, Elgamal A, Parra E. Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12):1119-1127.
- [38] Yang Z, Lu J, Elgamal A. OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements, user's manual 2008 version 1.0[M]. San Diego: Department of Structural Engineering, University of California, 2008.
- [39] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. Open system for earthquake engineering simulation user manual, version 2.0[M]. Berkeley, CA: University of California, Pacific Earthquake Engineering Center, USA, 2009.
- [40] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G L. Open system for earthquake engineering simulation user manual. Pacific Earthquake Engineering Research Center [M]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2006.
- [41] Jia K, Xu C S, Du X L, et al. Seismic response comparison and sensitivity analysis of pile foundation in liquefiable and non-liquefiable soils[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2023, 22(1):87-104.
- [42] Khosravifar A, Boulanger R W, Kunnath S K. Effects of liquefaction on inelastic demands on extended pile shafts [J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(4):1749-1773.
- [43] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. Open system for earthquake engineering simulation user command-language manual [M]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, OpenSees version, 2006.

(本文编辑:张艺)



(上接第 1093 页)

- [14] 徐礼华,徐方舟,周鹏华,等.钢管自应力自密实高强混凝土中长柱受压性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(11):26-34, 44.
Xu L H, Xu F Z, Zhou P H, et al. Experimental research on axial compression performance of medium-and-long steel tubular columns filled with high-strength self-stressing self-compacting concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(11):26-34, 44. (in Chinese)
- [15] 李宁波,钱稼茹,纪晓东,等.应用 OpenSees 计算双钢管高强砼柱的水平力—位移滞回曲线[J]. *防灾减灾工程学报*, 2014, 34(5):606-612.
Li N B, Qian J R, Ji X D, et al. Application of OpenSees on calculating lateral force-displacement hysteretic curves of high strength concrete filled double-tube (CFDT) columns [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2014, 34(5):606-612. (in Chinese)
- [16] An L H, Ekkehard F, Binglin L, et al. Experimental study on structural performance of UHPC and UHP-FRC columns confined with steel tube [J]. *Engineering Structures*, 2019, 187:457-477.
- [17] Blakely R W G, Park R. Prestressed concrete sections with cyclic flexure [J]. *Journal of the Structural Division*, 1973, 99(8):1717-1742.
- [18] Osgood W R, Ramberg W. Description of stress-strain curves by three parameters [J]. *Technical Note*, 1943(902).
- [19] 建筑抗震试验方法规程:JG J101—96[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [20] Park R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1989, 22(3):155-166.
- [21] 王全凤,郑济坤,周博,等.基于滞回耗能 HRBF500 RC 柱抗震性能研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(11):22-28.
Wang Q F, Zheng J K, Zh B, et al. Study on seismic behavior of HRBF500 RC column based on hysteretic energy [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(11):22-28. (in Chinese)