

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202006015

液化侧向扩展场地-桩基础抗震研究综述*

许成顺¹, 贾科敏¹, 杜修力¹, 王志华², 宋佳³, 张小玲¹

(1.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; 2.南京工业大学城市地下空间研究中心,江苏南京 210009; 3.北方工业大学土木工程学院,北京 100144)

摘要: 桩基础作为一种重要的深基础形式,广泛应用于近海桥梁、海上风电、港口码头等工程中,然而近年来发生的地震中,出现了大量伴随液化侧向扩展的桩基础破坏实例,引起岩土地震工程界的广泛关注。国内外学者采用模型试验、数值模拟、简化分析方法等手段展开研究,成果丰硕,通过对桩基础地震反应深入系统的分析,深化了对桩基础抗震性能的理解,但由于模型试验方法与测试技术的不同、数值模型与分析方法的差异性、桩-土-结构地震反应的复杂性等原因,围绕液化侧向扩展场地-桩基础的抗震研究仍需大量具有实际意义的工作。通过查阅震害调查资料,阐述了液化侧向扩展及桩基础震害现象,然后围绕振动台试验中实现液化侧向扩展的方式、关键试验测试技术等方面进行总结,针对已开展的倾斜液化自由场及桩基础1-g振动台试验和离心机试验做简要介绍。回顾了液化侧向扩展大位移分析方法、桩-土精细化数值模拟方法、简化分析方法的研究现状与进展,着重对有限元方法中的桩-土界面模拟、饱和两相介质 $u-p$ 格式高效数值计算方法进行探讨。对比了国内外规范对液化侧向扩展场地桩基础抗震设计的要求。指出现有研究中的不足,并对今后研究中需要重点关注的问题进行阐述。

关键词: 液化侧向扩展; 桩-土相互作用; 模型试验; 数值模拟; 简化分析方法

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0768-24

Review on Seismic Behavior of Pile Foundation Subjected to Liquefaction Induced Lateral Spreading

XU Chengshun¹, JIA Kemin¹, DU Xiuli¹, WANG Zhihua², SONG Jia³, ZHANG Xiaoling¹

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Research Center of Urban Underground Space, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 3. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Pile foundation is widely used in bridge, offshore wind power, port and wharf engineering. However, in recent years, a large number of pile foundation failure cases accompanied with liquefaction lateral spreading have appeared, which has aroused widespread concern in the geotechnical seismic engineering scholars. Domestic and foreign scholars have carried out researches through model test, numerical simulations simplified analysis method and other means, getting rich conclusions. Through the in-depth systematic analysis on the seismic response of pile foundations, comprehensive understanding of the seismic performance of pile foundations was achieved. However, due to the dif-

* 收稿日期:2020-06-10;修回日期:2020-10-09

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金项目(51722801)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005)资助

作者简介:许成顺(1977—),女,教授,博导,博士。主要从事岩土力学基础理论与实验技术、土动力学与岩土地震工程研究。E-mail:xuchengshun@bjut.edu.cn

ference between model test methods and testing techniques, the distinction between numerical models and analysis methods, and the complexity of seismic response of the pile-soil-structure, a lot of practical work is still needed for the seismic research of pile foundations subjected to liquefaction induced lateral spreading. This paper introduces the phenomenon of seismic damage of pile foundations subjected to liquefaction induced lateral spreading, and then summarizes the aspects in the method for lateral spreading of liquefaction during shaking table tests, key testing techniques, etc. 1-g shaking table tests and centrifuge tests are briefly introduced. The research status and progress of liquefaction lateral spreading large displacement analysis method, soil-pile accurate numerical simulation method and simplified analysis method are reviewed. Discusses on the pile-soil interface simulation in the finite element method and the high-efficiency numerical calculation method of the saturated two-phase medium $u-p$ format are made. The requirements of domestic and foreign codes for seismic design of pile foundations subjected to liquefaction induced lateral spreading are then compared. The deficiencies in the existing research are pointed out, and the issues that need to be focused on in future research are elaborated.

Keywords: liquefaction induced lateral spreading; pile-soil interaction; model test; numerical simulation; simplified analysis method

引言

饱和砂土振动液化触发的侧向扩展是常见的震害现象之一。液化侧向扩展引起高速公路、铁路、桥梁、海上风电、地下管道等生命线工程的大面积滑移。D. J. Varnes^[1]将液化侧向扩展定义为底部土体发生液化和塑性流动,引起上部土体发生拉裂破坏,进一步使破坏的土体发生沉降、移动、分解的过程,导致微倾斜场地或近岸水平场地发生非循环永久侧向位移。20世纪80年代开始,M. Hamada等^[2]对1964年新潟地震中引起的地面永久变形进行现场调查研究,首次发现地震液化导致地面永久变形的震害实例。此后,液化侧向扩展引起了岩土工程专家学者的重视,进而展开广泛研究。

历次震害调查表明,液化侧向扩展场地的桥梁桩基础破坏是造成桥梁桩结构破坏的主要原因^[3-6]。例如1964年新潟和美国阿拉斯加地震、1976年中国唐山、1985年墨西哥城、1989年美国洛马普雷塔、1991年哥斯达黎加、1995年日本神户、1999年和2011年新西兰等地震中,均出现液化场地侧向扩展导致桩基础破坏的案例^[7-13]。最近几十年,我国桥梁建设发展日新月异并且使用桩基础较多,桥梁多建于易发生液化侧向扩展的具有初始静剪切应力的微倾斜场地。为了保障人民的生命和财产安全,研究液化侧向扩展作用对桩基础地震反应的影响具

有非常重要的现实意义。

国内外学者围绕倾斜液化场地侧向扩展机制和动力响应规律及场地中桩基础破坏模式和振动响应规律等重要科学问题开展了深入且广泛的研究工作。本文通过查阅震害调查资料阐述了液化侧向扩展及桩基础震害现象,对液化侧向扩展自由场和土-桩基-结构模型试验进行回顾,对基于理论研究的精细化数值模拟方法、简化分析方法进行综述,为今后的研究工作提供参考和借鉴。

1 液化侧向扩展与桩基础震害实例

原型观测和震后调查是地震工程研究中常用的分析方法,可以在一定程度上获取现场的地震反应、灾变模式、震害特点等关键资料。近年来,各国学者通过震后调查发现大量的液化侧向扩展及场地中桩基础震害事例。

1.1 液化侧向扩展震害实例

M. Hamada等^[14]对1983年日本Noshiro市7.7级地震中液化侧向扩展的调查发现,在地基表面倾斜地区,海拔较高处的侧向变形较大,海拔较低处或地基表面水平地区,侧向位移值可以忽略,地面破坏严重的地区出现裂缝、沉降、隆起和砂沸等液化现象;土体位移的方向沿斜坡向下,且方向与地表裂缝垂直,指出地基表面倾斜是造成液化侧向大

位移的原因。M. Hamada等^[14]对 Niigata地震震后地面永久位移的调查发现,在 Shinano河附近地基表面几乎水平的地方,产生了长达8 m的位移,最终认为地基地部液化层的倾斜是造成这种现象的原因。R. Verdugo等^[15]报道了2010年智利大地震中发生的液化和侧向扩展现象,指出沿河岸的纵向裂缝与液化侧向扩展密切相关,观测到的倾斜液化场地典型的震害现象为表层干土发生破裂,在液化层上部“漂浮”并且向下游移动。

M. Cubrinovski等^[16]对2010~2011年基督城地震中 Avon河沿岸液化侧向扩展现象进行了详细调查,总结震害特点,发现液化侧向扩展大位移易发生在具有高液化潜力(粉土、细砂、粉细砂)的连续层,发生侧向扩展大位移的位置均发现细砂-粉砂土层,并被确定为临界层。该临界层厚度约为2 m,位于河岸土体剖面下部和河道底部位置,临界层(细砂-粉砂层)上部的粉土层、下部的细砂层通过增加液化持续时间和液化层厚度,进一步增加侧向扩展位移。发生侧向扩展中等位移时,临界层厚度约为1.0~1.5 m。侧向扩展为小位移或无位移的地点,临界层不存在或较薄(厚度小于0.5 m),沿河道不连续且远离河岸。

2018年印度尼西亚发生7.5级地震,并引发海啸,相关学者展开调查,认为地震导致了大规模滑坡,且伴随大范围的侧向位移。值得关注的是,大规模液化滑坡发生在低角度斜坡地区,而更陡的斜坡在地震中却未失稳,为液化侧向扩展的研究提供具有实际意义的宝贵资料^[17]。

以上震害实例的调查表明:液化侧向扩展场地的破坏模式受多种因素的影响,如斜坡坡度、上覆非液化土层与可液化层厚度、地震动强度和特性、土参数的不确定性等。因此,有必要针对液化侧向扩展机理进行深入探讨。

1.2 液化侧向扩展场地桩基震害实例

M. Hamada等^[14]报道了1964年新潟地震中由于液化侧向扩展造成大量混凝土桩位移过大而失效的实例,最为著名的是昭和大桥的倒塌。T. D. O'Rourke等^[18]基于震后调查发现:昭和大桥12跨中的5跨在主震70 s后倒塌,并且P4桩在地表以下10 m位置发生向河心方向的弯曲破坏,桩顶产生了较大的水平位移,认为桩基的破坏是由于震后土体液化侧向扩展造成的。此外,1976年唐山地震中胜利

大桥的倒塌^[19],1995年阪神地震中大量桩基础的破坏均是液化侧向扩展导致的^[9]。

Y. G. Zhou等^[20]针对2008年我国汶川地震中发生的液化案例展开研究,报道了映秀镇缓倾斜场地出现的液化侧向扩展与桩基础震害实例。破坏的百花桥侧梁发现较多裂缝,横梁与结点处的柱分离。通过对百花桥梁震害的分析,认为土体的液化侧向扩展对桥梁造成较大的水平运动荷载,加剧了桥梁的破坏,并指出应进一步通过模型试验和数值模拟揭示液化和侧向扩展场地桥梁的失效模式,发展切实可行的抗震设计方法。

J. J. M. Haskell等^[13]对2011年新西兰基督城地震中桩基础破坏的调查发现,可液化土体的侧向扩展与强烈的地震动共同作用引起桩基础破坏。S. Werner等^[21]报道了2010年海地地震中太子港港口结构发生的地震破坏实例,并指出港口附近发生大范围土体液化和侧向扩展引起桥梁桩基和桥台产生不同程度的侧向移动。

S. Brunet等^[22]对2010年Maule(智利)大地震后的14个港口进行实地调查发现:土体液化侧向扩展是造成桩基和码头破坏的主要原因之一。根据对北科罗内尔码头的现场调查指出:岸边土体侧向扩展引起的土压力超出了桩基的承载能力,导致桩发生明显的倾斜现象。此外,桩帽焊接处易发生剪切破坏,造成桩产生较大的位移。

历次震害调查获得大量真实可靠的液化侧向扩展震害资料及液化侧向扩展导致桩基础破坏的震害资料,对地震动力下液化侧向扩展机理和场地失效的研究具有重要作用,推动了液化侧向扩展场地桩-土-结构动力相互作用及灾变模式的研究。目前,国内外学者围绕液化侧向扩展场地、桩基础破坏等科学问题的研究手段包括:物理模型试验(1-g振动台试验、离心机振动台试验)、精细化数值模拟方法、简化分析方法等。

2 振动台模型试验研究

振动台试验是研究液化侧向扩展场地桩基结构地震反应有效且最常用的试验方法。近几十年来,国内外学者围绕液化侧向扩展和桩基结构抗震等关键科学问题开展了大量的振动台试验研究,加深了对液化侧向扩展场地地震反应规律的认识。

2.1 液化侧向扩展实现方式

一般认为,液化侧向扩展的动力来源主要为地形因素导致的侧向扩展土体自身重力分量。因此,振动台或离心机试验常将土体设定为具有一定的坡度或者抬高箱体形成斜坡。Y. Sasaki等^[23-24]采用刚性模型箱内土体设置斜坡方式实现液化侧向扩展,开展了一系列可液化自由场振动台试验,分析了地面坡度、斜坡长度和液化层厚度对液化侧向扩展的影响,发现地表坡度对地基侧向流动影响较大,液化层下边界的坡度本身影响不大,但地表具有坡度时对地基侧向流动影响较大,认为地基侧向流动的直接原因不是激震,而是液化,地基侧向扩展位移可以用地表斜率,几乎完全液化层的厚度和液化后的持续时间来表示。值得说明的是,刚性模型箱具有明显的模型箱效应,不能模拟土体真实的边界条件,设置斜坡的方式虽然能够实现液化侧向扩展,但是由于侧向扩展过程中上游土体高度的下降和下游土体高度的上升,阻碍了侧向扩展的发展,不能模拟实际场地中液化侧向扩展持续发展的过程。因此,采用在震动输入方向设置较长的斜坡来缓解阻碍作用,但受限于振动台的台面尺寸,采用刚性模型箱和增加斜坡长度等试验手段受到限制。

陈继华等^[25]采用在剪切模型箱内土体设置斜坡的方式,开展了表面倾斜角度为 3° 、 6° 、 9° 的可液化地基的振动台试验,分析了该类型场地地表竖向变形和侧向大变形的规律及地基孔压分布。剪切模型箱较好地避免了模型箱效应,但在倾斜液化场地中由于剪切模型箱的振动使上层上游侧土体受到向下游地推动作用,无法真实模拟液化侧向扩展土体的受力机制。

R. Dobry等^[26]通过将剪切模型箱抬高实现液化侧向扩展的方式,进行了足尺倾斜液化场地振动台试验,也是国外学者常用实现液化侧向扩展的一种有效方法。剪切箱的各层框架倾斜放置,模拟半无限空间土体的边界条件。相比刚性箱,较好避免了模型箱效应和沿振动方向下游边界土体的累积效应,可以较好地模拟液化侧向扩展在无限斜坡地基中的受力机制。值得注意的是,振动台台面上输入的地震动由于受到模型箱下倾斜垫块的影响,实际输入至场地土体中的地震动被分解为沿平行模型箱运动方向和垂直模型箱运动方向,倾斜角度较小

时,垂直于模型箱运动方向的地震动分量极小,但对场地土动力响应的影响尚无学者进行讨论。

M. Cubrinovski等^[27]采用两阶段输入振动的方式在液化水平场地中实现侧向扩展,研究桩的侧向扩展响应。第一阶段基底输入加速度 $0.217g$ 的正弦波,主要目的是触发饱和砂土振动液化,第二阶段通过在模型箱外侧安装加载架使剪切模型箱侧向移动,进而实现液化侧向扩展。土体侧向位移的产生依靠外部施加荷载,侧向扩展速率和位移受到外部荷载的制约。但为了研究土体液化侧向大位移中桩基础的响应,通过外部施加荷载以期实现桩基础在液化侧向扩展场地中相同的受力条件是合适的。

Y. M. Chen等^[28]通过小比重砂替代石英砂在透明玻璃刚性箱中构造斜坡地基,缓慢加入盐水使小比重砂悬浮在特定密度的盐水中,实现静态零有效应力状态下土体的侧向扩展,透明玻璃箱可以直接观测到侧向扩展的发展过程,便于研究饱和砂土侧向扩展规律。然而静态下实现零有效应力状态的方法不能获取地震荷载作用下侧向扩展土体的动力响应。

张鑫磊等^[29]将小型剪切模型箱固定在振动台台面,输入振动使饱和砂土液化,且侧向拖拽埋入砂土中铝管的方式,使液化土体与铝管相对运动,研究液化土体流动的力学效应。

众多学者在模型试验中模拟液化侧向扩展方式方面做了很多工作。根据不同的试验目的,以不同方式或手段再现可液化场地中土体侧向大位移宏观现象。围绕液化侧向扩展土-结构动力相互作用展开研究,地震模拟液化侧向扩展振动台试验关键在于设计诱导侧向扩展的条件。目前国内尚无针对模型箱倾斜诱导液化侧向扩展振动台试验的报道,针对液化侧向扩展场地中桩基-上部结构体系大型振动台试验的设计,仍缺乏相应的研究。

2.2 关键试验测试技术

液化侧向扩展振动台试验中,动土压力、土-结构相互作用力以及土体侧向位移是学者关心的重要数据,也是试验中测试的难点。获得真实可靠的数据对分析液化侧向扩展场地桩基结构具有重要的现实意义。在土体位移和土-结构相互作用力测试方面,各国学者做出了积极的努力。

可液化土体在地震激励下产生的侧向位移是

分析液化侧向扩展机理和场地中桩基结构受力的关键数据。目前常用加速度双重积分获取土体位移,积分方法有频域和时域积分,时域积分是对加速度信号直接进行二次积分获取位移信号,频域积分首先对加速度信号进行傅里叶变换再进行积分,但积分结果受加速度信号精确度和积分时截断频率的影响,往往产生较大误差。研究者在液化侧向扩展场地中采用较多土体位移测试方法。如 Y. Sasaki 等^[23]在刚性模型箱中安装透明玻璃窗完成系列倾斜液化自由场振动台试验,通过在透明玻璃窗后设置间距 20 cm 的垂直标记线,跟踪和记录沿深度方向土体的侧向位移,采用在地基表面设置基准标记点的方式,使用相机记录地面侧向位移的变化,获得了较好的效果。这种测试土体位移的方式目前仅限于在刚性模型箱中使用,在层状剪切箱内并未得到实现。R. Dobry 等^[26]在液化侧向扩展自由场大型振动台试验中使用阵列式位移计(SAA)直接测量土体内部加速度和侧向位移分布,通过高清摄像机跟踪记录剪切箱的运动,还原其侧向位移分布,间接代表土体位移分布。R. Motamed 等^[30]在研究液化侧向扩展场地码头桩的振动台试验中,沿土体深度方向设置数列倾角罗盘(Inclinometer)经过换算得到土体侧向位移。汪云龙等^[31]设计一种基于光栅测试技术的土体位移新型测试方法,其测试机理和 SAA 类似。L. Su 等^[32]在液化侧向扩展场地桩-土相互作用振动台试验中使用此方法获取液化土体的侧向位移。李文闻等^[33]在 XCC 群桩限制液化侧向扩展的振动台试验中,将染色砂土条布置在液化砂土层表面,通过高清摄影机记录染色砂条振动前后的位置,随后处理图像获得液化砂土的侧向位移分布。沈吉荣等^[34]通过在土体中布置抗弯刚度极低的钢条传感带,借助钢条表面分布的传感器得到钢条的实时变形情况,进而获取液化土体的侧向位移。

上述获取土体位移的方法推动了土动力学和试验技术的发展,由于导线量大、间接测量等原因,也在一定程度上影响了测量的准确性,当前液化侧向扩展土体位移的测试仍然是振动台试验测试的难题。

针对液化场地桩-土地震动力响应的研究,获取可靠的桩-土相互作用力十分重要。目前,使用较多的方法是通过桩的应变得得到弯矩,然后对弯矩求二阶导得到土抗力,但此方法的精确度取决于获取的

应变信号误差及求导误差,R. Motamed 等^[35]、S. M. Haeri 等^[36]、A. Kavand 等^[37]在液化侧向扩展场地桩基础振动台试验中使用此方法获得桩土相互作用力,并通过拟合离散的弯矩测量值减少误差。R. Motamed 等^[38]为了直接测量液化土作用在桩身的侧向土压力,通过在液化土侧向扩展方向的桩身不同埋深处附着土压力盒的方式获取侧向土压力信号。然而,具有一定体积的土压力盒和桩的相互作用改变了土体的应力场,易出现应力集中和土拱效应,导致测量值产生较大误差,另外桩身的弯曲表面和土压力盒在形状和受力方式的不匹配也会导致测量值产生一定的误差。S. M. Olson^[39]等首次在液化侧向扩展场地沉箱-土动力相互作用离心机振动台试验中使用触觉压力传感器测量出沉箱上坡侧、下坡侧和侧面的土-结构相互作用力分布,触觉压力传感器的厚度仅有 1 mm 左右且具有柔性,在测量弯曲表面的土压力时,能够与结构的受力面紧密贴合共同受力和变形,与刚性土压力盒相比,具有明显的优势,为液化侧向扩展场地土-结构压力的测试提供了新的思路。

2.3 液化侧向扩展自由场振动台试验

1-g 振动台试验是研究液化侧向扩展及其对桩基影响的有效方法,根据不同的试验目的,国内外学者针对液化侧向扩展自由场、土-桩基-结构开展了大量的振动台试验研究。

陈继华等^[25]针对砂土液化诱发的地表震陷和地面侧向移动等现象,开展了地基表面倾斜 3° 、 6° 、 9° 的可液化地基小型振动台试验,测试分析了该类型场地地表竖向变形和侧向大变形规律及地基孔压分布,结果表明,液化地基表面倾斜 3° 和 6° 时,地基表层发生了明显的顺坡滑动现象,加剧了液化地基表面的不均匀震陷,但表面倾斜为 9° 时,底部可液化土层发生局部液化现象,未出现液化土表层的流动和瞬间滑动现象。R. Dobry 等^[26]等基于足尺振动台试验讨论了倾斜饱和和细砂中观察到的侧向扩展机理,重点关注侧向扩展的起始和累积过程以及土壤剪切强度响应。

围绕液化侧向扩展自由场动力响应规律和液化侧向扩展机理等目的,国内外学者开展了液化自由场振动台试验,对液化倾斜场地在地震作用中的失效模式获得一定的认识。然而,由于饱和砂土受地震荷载后受力机制的复杂性,以及不同学者在振

动台试验中条件控制的差异性,对液化侧向扩展过程中的受力机制仍不清晰,需要进一步试验进行探讨。

2.4 液化侧向扩展场地桩-土相互作用振动台试验

液化场地,尤其是液化侧向扩展场地中的桩基础震害往往较严重,针对这种现象,各位学者以液化侧向扩展场地中的桩基础为对象,开展了大量1-g振动台试验。力求了解液化侧向扩展场地桩基础地震响应规律,探讨不同类型桩基础的失效模式及成灾机制。

群桩效应、输入运动、桩基刚度等因素往往对液化侧向扩展场地桩基础的动力反应影响较大。R. Motamed等^[40]通过一系列振动台试验,研究了埋置于斜坡地基中的群桩(3×3,6×6,11×11)在地基大变形中包括幅值、频率、输入运动方向、地面密度和坡度以及地表非液化层厚度对群桩响应的影响,结果表明:在倾斜地基上,由于模型土运动(位移和速度)的分布,前桩(上游桩)和后排桩(下游桩)的侧向力均大于中间排桩。S. M. Haeri等^[36]和A. Kavand等^[37]采用刚性模型箱进行了液化侧向扩展单桩和群桩基础的振动台试验,研究了液化侧向扩展下群桩效应,重点讨论了桩侧土压力和桩位移响应规律,考察了群桩中的阴影和邻近效应,发现远离自由面的微倾斜场地中群桩动力特性与岸壁后或近自由面的群桩动力特性明显不同。M. Cubrinovski等^[27]使用大型层状剪切箱,基于液化侧向扩展大型振动台试验,研究侧向扩展作用下的桩基主要特性及液化土层极限侧向位移,利用足尺桩的试验结果,研究了桩的侧向扩展响应,反算刚性桩和柔性桩在非液化土中桩的侧向荷载,并且分析了液化扩展土的刚度特征。

桩侧土压力与桩基塑性铰是学者重点关注的响应指标。A. Elgamal等^[41]利用层状剪切模型土箱在日本国家防灾科学技术研究所完成了一系列液化侧向扩展振动台试验,重点关注液化侧向扩展过程中作用在桩上的侧向土压力,基于试验结果,对OpenSees中的本构模型进行标定。B. J. Chang等^[42]为了研究桩身产生的局部塑性应变,对埋入三层土体中的混凝土单桩进行了1-g振动台试验,采用曲率剖面和塑性铰反算与物理观测相结合的方法,对桩基的塑性应变进行表征。H. Suzuki等^[43]通过振动台试验讨论了桩基在液化侧向扩展场地中

的发展机制,认为侧向扩展场地中桩土相互作用力相比水平场地中增加是由于桩两侧的孔压不同。

另一方面,具有上覆硬土层的液化侧向扩展场地桩基础发生破坏更严重的现象,引起各国学者的关注。Z. J. Yang等^[44]通过液化倾斜场地振动台试验,研究了上部冻土和桩基础相互作用机理。刚性模型箱尺寸为2.4 m×2.4 m×1.3 m,设置倾斜地基表面坡度为5°,为使液化侧向扩展时上部冻土层能够自由移动,在下坡侧和模型箱边界之间留有25 cm的开口。试验揭示的倾斜地基模拟冻土的单桩破坏机理与历次地震观测到的桩承台连接失效相吻合。A. Ebeido等^[45]对比了4个不同倾斜土层剖面 and 桩基配置的大型振动台试验,通过降低水位线模拟场地中具有的上覆硬土层,试验观察到桩侧向载荷最大值发生在侧向变形的初始阶段,此时,超孔隙水压力接近液化水平。此后,随着剪切强度的进一步降低和液化层的持续变形,侧向载荷降低。最终认为不断累积的侧向地面变形并不总是导致桩基荷载增加。X. W. Wang等^[46]考虑上覆非液化硬土层的影响,基于振动台试验对比分析了水平场地中完全上覆非液化硬土层、部分上覆非液化硬土层、无上覆硬黏土层群桩基础—桥墩—上部结构体系的动力响应,并讨论了冲刷对桩基础破坏的影响。

上部结构质量、桩底嵌固条件、桩截面形状及布置形式等因素对液化侧向扩展场地桩基础地震反应具有重要影响。王志华等^[47]开展了液化水平和倾斜地基单桩小型振动台模型试验,考虑附加质量块、底部嵌固条件以及长径比3个因素,研究了液化土体侧向扩展效应对单桩动力反应的影响。结果表明:单桩在土体侧向扩展作用下发生不对称运动,这种运动加大桩顶附近应变反应且造成桩身倾斜。张鑫磊等^[48]开展了可液化倾斜地基中以唐山地震中遭到破坏的胜利桥墩柱结构基础为原型的群桩基础大型振动台试验,再现了倾斜场地土体液化、大位移以及桩基倾斜等宏观现象,分析了场地土体和桩基结构的地震反应特征,认为桩基结构的倾斜在一定程度上弱化了其内力反应。随后,沈吉荣等^[34]设计了可液化场地大变形对桩基础地震反应影响的小型振动台试验,研究了地基土侧向运动速率与桩基结构内力的相关性,对比分析了上部结构惯性力及场地类型对桩身内力反应的影响,认为地基土的液化削弱了土体对群桩基础的侧向约束,

导致地基土液化后群桩的往返位移幅值有所减小。李文闻等^[33]开展了一系列液化倾斜场地侧向扩展振动台试验,为了减小边界效应的影响并使液化侧向扩展现象更加明显,缓倾砂土地下坡靠近模型箱边界处的坡度为1/3,其余部分的坡度均为1/8,分别采用XCC群桩和圆形群桩对液化场地进行处理,研究了XCC桩对于限制液化侧向扩展的作用,并考虑了群桩布置形式、桩间距、X形截面朝向等因素对限制液化侧向扩展效果的影响。结果表明:XCC桩可以较好地限制液化侧向扩展,梅花形群桩布置形式限制液化侧向扩展的效果明显好于正方形群桩布置形式。

此外,Ch. H. Liu等^[49]以挡墙后的群桩基础为研究对象,进行了液化侧向扩展场地群桩基础的振动台试验,探讨了码头墙后桩基础的动力反应,并通过简化分析方法,评价群桩中各桩前的土压力。许成顺等^[50-54]针对场地土-结构动力体系在地震荷载下的动力响应问题,开展一系列场地土-桩基-上部结构地震反应大型振动台试验,对三组振动台试验所得的试验结果进行系统梳理,对各组振动台试验中动力体系的加速度反应、场地沉降、饱和砂土的孔压发展、桩身弯矩以及上部结构等地震响应进行探讨。继而在对可液化自由场试验组、可液化非自由场试验组以及非液化非自由场地试验基本试验结果的基础上,针对地震荷载下液化砂土的动力特性以及固-液相变特征问题,液化/非液化场地中土-结构动力相互作用与桩基地震反应的差异以及不同场地条件下上部结构在土-结构相互作用影响下的失稳问题等进行分析。通过对比各组试验结果可知,液化后的土体表现出非牛顿流体中假塑性流体典型的“剪切稀化”特征,在可液化场地中,发生液化的土体对桩基-上部结构的侧向承载力很小是导致结构发生倾斜、破坏的最主要原因,且结构倾斜后的 $P-\Delta$ 效应会增大桩的弯矩并加剧结构的倾覆破坏;而非液化场地中桩基-结构体系因为场地对地震荷载的放大作用从而导致结构体系加速度、动位移、结构地震能量等地震响应较大,这是导致结构发生破坏的主要原因。这一系列场地土-结构动力体系振动台试验为液化侧向扩展场地群桩基础地震反应的对比分析提供了基础。

针对液化侧向扩展场地桩基础,国内外学者开展了较多的振动台模型试验,围绕单桩和群桩基础地震响应规律,桩基破坏模式和失效机理、液化侧

向扩展场地桩-土相互作用力等关键科学问题获得了大量的认识。值得注意的是,针对多层土地基的液化侧向扩展场地大型振动台试验仍不多见,特别是对具有上覆硬土层群桩基础的受力机制和破坏机理仍不明确。

3 离心机振动台模型试验研究

1-g振动台试验无法模拟处于较高应力场土体的反应,即模型场地土体应力状态小于实际场地土体的应力,尽管现有大型振动台完成的足尺模型试验,仍小于实际场地中桩基应力状态。将模型土体置于高速旋转的离心机中,可以模拟大尺寸原型场地土体的应力状态,能够较好地再现原型土-桩地震动力反应的过程,因此,动力离心机试验被广泛用于液化侧向扩展场地桩基础的抗震研究。

3.1 液化侧向扩展自由场离心机试验

G. L. Fiegel等^[55]首次进行了液化侧向扩展自由场离心机试验,对比了地基中具有上覆黏土层和无黏土层时,场地土的动力响应。V. M. Taboada-Urtuzuástegui等^[56]对系列液化侧向扩展自由场离心机试验结果进行比较和讨论,总结了斜坡倾角、输入峰值加速度、正弦波频率等对场地土动力响应的影响,结果表明,土体侧向位移依赖于场地倾角和液化层厚度,不受最大输入峰值加速度和频率的影响。M. K. Sharp等^[57]利用倾斜剪切模型箱进行了一系列液化和侧向扩展自由场离心机振动台试验,重点关注饱和砂土渗透性、相对密度、输入峰值加速度等对土体液化厚度、永久侧向位移及沉降的影响。研究表明:相对密度增大时,土体液化厚度、侧向位移及沉降减小,但随输入峰值加速度的增加而增加,渗透系数变大时,土体液化厚度和侧向位移减小,沉降增加。最近,美国、日本、英国、中国的大学为评估液化问题本构模型的能力而开展一项国际合作项目(LEAP),旨在生成一套高质量的试验数据,然后将其用于现有计算模型和土壤液化分析模拟程序的验证^[58]。基于LEAP项目,Y. G. Zhou等^[59]、P. Kokkali等^[60]在刚性模型箱中进行了液化斜坡地基自由场离心机振动台试验,对自由场土体的动力响应进行了讨论,发现在接近地基表面时,出现典型的饱和砂土剪胀现象。

3.2 液化侧向扩展场地桩-土相互作用离心机试验

M. McVay 等^[61-62]完成了液化侧向扩展场地群桩基础离心机振动台试验,重点关注了群桩(3×3),(7×7)在侧向扩展过程中的侧向土压力,结果表明:群桩基础中的后排桩受到侧向土压力最大,而前排桩的侧向土压力最小,并且群桩基础中各桩的侧向土压力与位置相关,中间桩的侧向土压力小于边桩。S. Imamura 等^[63]基于离心机振动台研究了液化侧向扩展场地群桩间距和数量对桩基总侧向力的影响,并给出了侧向扩展场地中群桩总侧向力的公式。S. K. Haigh 等^[64]基于一系列离心机试验,研究了液化侧向扩展场地柔性单桩的侧向荷载,重点关注桩附近孔压和弯矩变化,得出桩的荷载不仅由上覆非液化土层提供,侧向扩展土也提供了较多的荷载。T. Abdoun 等^[65]讨论了一系列液化侧向扩展场地单桩和群桩离心机试验的结果,发现最大弯矩均发生在液化与非液化土层分界处,并对计算弯矩的两种极限平衡方法进行标定。

S. J. Brandenberg 等^[66-67]基于液化侧向扩展场地群桩基础离心机试验结果,分析了群桩基础和液化侧向扩展土体的荷载传递机制,详细描述了试验中观察到的变形模式,讨论了估算嵌入式桩承台总水平荷载的方法。进一步分析了液化和侧向扩展地基中单桩和群桩的响应,对动力桩-土相互作用力及土-承台相互作用力进行反算,指出不同土层侧向荷载的方向取决于土层剖面的变形形状、桩基础刚度、上覆非液化层施加的荷载大小。D. Chang 等^[68]基于 S. J. Brandenberg 在加州大学戴维斯分校的离心机试验结果,研究了液化和侧向扩展场地群桩侧向荷载和上部结构惯性力的组合,总结了桩在地震加载过程中侧向荷载和上部结构惯性力所做的贡献。

J. A. Knappett 等^[69]为研究液化侧向扩展场地桩基的沉降,进行了一系列液化水平和侧向扩展场地群桩基础离心机振动台试验,发现端承桩周围和下部土体孔压升高时,会造成地基过度沉降,超孔压消散过程中,土体重新固结,桩的轴向荷载减小,而承台通过补偿桩的承载力损失,对减少桩群沉降起着重要作用。L. González 等^[70]在 RPI 离心机试验设备上完成了单桩和群桩基础的离心模型试验,重点研究了土体渗透性对端承单桩和群桩侧向扩展响应的影响。发现土体渗透性对桩基的侧向扩

展响应影响较大,低渗透性的流体使桩基的桩头位移和弯矩增加显著。

汪明武等^[71]基于日本京都大学防灾研究所的动态土工离心机,设计完成了两个不同地震强度下倾斜液化场地土-群桩离心机试验,探讨了群桩地震响应规律,再现倾斜液化场地桩基础在强震作用下的破坏程度和状态。王睿等^[72]在清华大学土工离心机上开展了可液化地基中刚性单桩基础试验研究,分析了地基的加速度、位移、孔压和桩基础的弯矩等动力响应,结果表明,液化前后大变形和地震永久位移三个不同阶段桩的受力不相同。

离心机振动台试验虽然能模拟原型场地的应力水平,但也存在明显的不足:离心机试验存在科里奥利效应、地震加速度和科式加速度相耦合的问题;针对液化侧向扩展场地中桩基动力响应研究,模型土体孔隙尺寸和渗透性的缩尺等很难满足相似条件。

通过上述模型试验研究发现,目前针对液化侧向扩展自由场和桩基地震反应,主要围绕液化层厚度、倾斜地基长度及坡度、饱和土体渗透性、相对密度、桩-土相互作用、桩基刚度、桩间距和数量等方面对液化侧向扩展场地桩基动力响应展开研究。重点关注土体侧向扩展位移和速率,场地土超孔压反应,桩基附近孔压、侧向土压力、弯矩等动力响应,但相关影响因素分析并不深入,对群桩基础,尤其是对低承台群桩基础的侧向土压力研究较少,液化侧向扩展土体对桩基的影响定量评价存在较大不确定性,有必要进一步试验分析和讨论。针对可液化侧向扩展场地桩基破坏模式,尚未形成共识,如对昭和大桥破坏的报道中,J. Berrill 等^[73]认为由于土体液化侧向扩展导致桩基侧向力过大,N. Yoshida 等^[74]认为地震导致地基水平抗力降低,桩头处位移过大进而导致桩基失效,S. Bhattacharya 等^[75]认为场地土液化后,桩基在轴向荷载下发生屈曲失稳破坏。说明进一步开展液化和侧向扩展场地桩基础地震动力相互作用研究,对比不同场地条件下桩基础的破坏模式和灾变机理十分必要。

4 精细化数值模拟方法

由于1-g振动台试验和离心机振动台模型试验周期长、费用大、试验过程中条件难以控制等原因,进行大量试验研究并不现实。因此,研究学者采用

数值模拟方法对液化和侧向扩展场地桩基础地震反应规律进行广泛研究。一方面,数值模拟方法能够在较短时间内进行参数分析,对模型试验进行有力补充;另一方面,可以较好地进行分析,刻画饱和土体的剪缩、剪胀等液化特性,相比模型试验方法,数值模拟能够更方便获取土和结构的动力响应。

可液化土体在地震动下,表现出强非线性,桩-土往往会发生滑移和脱离等现象,因此,针对液化侧向扩展场地桩-土-结构动力相互作用有限元分析,如何准确刻画土体和桩基的材料非线性、接触非线性、几何非线性特征至关重要。下面对液化侧向扩展场地分析方法及桩-土相互作用的精细化数值模拟方法进行回顾,重点对模型中桩-土接触面模拟、数值波动高效算法等方面进行阐述。

4.1 液化侧向扩展土体大位移分析方法

液化侧向扩展场地桩基础的破坏和液化土体的大变形息息相关,如何准确预测液化侧向扩展自由场土体位移,了解其动力响应规律是分析场地内桩基结构地震反应的基础,也是地震岩土工程界近年来备受关注的问题。目前,液化侧向扩展分析方法,主要有经验法、数值分析法和流体力学法。经验法提出的经验公式中的参数大多缺少明确的物理含义,缺少深度的验证且可考虑的因素较少;流体力学法主要集中于自由斜坡场地侧向扩展的分析,且假设场地土体完全液化,忽略土体在流动中的地震荷载,因此针对液化大变形的分析,使用最为广泛的是数值方法。

以极限平衡理论为基础的Newmark滑块法是早期对液化侧向位移分析的计算方法,如景立平等^[76]采用该方法计算斜坡场地的永久位移,考虑场地条件和地震动特性两个因素,通过引入饱和砂土累积的孔隙水压力经验公式,在每个应力循环对抗剪强度进行修正,以Newmark刚性滑块模型为基本原理,建立了斜坡场地饱和砂土液化诱导的地面侧移计算模型,但计算中滑动面需要假定,且沿滑动面剪应力的确定较困难,主要从强度的角度考虑对场地土体的影响。因此,Newmark滑块法在使用过程中受到一定的限制。

软化模量法也经常被用于分析土体在地震动下产生的侧向位移,该方法使用有限元计算平台,利用震前土体模量计算场地土应力和位移,接

着使用震后的场地土体模量,保持应力不变,计算土体位移,土体永久侧向位移为地震前后的位移差^[77]。但此方法不能反映饱和砂土孔压累积、消散过程,也不能模拟可液化土体剪胀、剪缩等液化特性。

离散元法、流体力学法等也被学者用于分析液化侧向扩展变形。S. U. El等^[78]基于离散元法(DEM)将砂土颗粒模拟为离散球的集合,采用Navier-Stokes方程的平均形式,在中等尺度下将水相理想化。使用建立的关系解释相间动量传递,再现了倾斜液化侧向扩展振动台试验的响应模式。周恩全等^[79]采用计算流体力学中的流体体积法,研究了饱和砂土液化的侧向扩展变形形态,结果表明该方法能够较好再现模型试验中侧向扩展等变形形态,但流体性质对饱和砂土的流动速度影响较大。

物质点法(MPM)和光滑质点流体力学(SPH)等无网格法是一种能够有效处理大变形问题的方法。物质点法适合处理与历史相关材料的动力大变形问题。采用Biot's方程与 $u-U$ 公式近似,物质点法已经被应用在饱和土体的模拟中。针对固相和液相,仅采用一组物质点,因此无法捕捉到地下水流动与土体的流动行为^[80]。张洪武等^[81]在传统物质点法的基础上发展了用于饱和多孔介质动力学分析的两相物质点法,通过引入两套物质点,分别表征固体骨架变形与流体流动,通过有限元参考解与两相物质点法结果对比验证了该方法的有效性。物质点法多用于滑坡等引起的土体大变形模拟,针对土体液化诱导侧向扩展的模拟有待进一步研究。光滑质点流体力学法(SPH)是一种拉格朗日、无网格计算方法^[82]。该方法将连续介质使用相互作用的质点组描述,因此可有效避免大变形时网格畸变带来的精度破坏问题。黄雨等^[83-84]基于等效牛顿黏度系数的概念,采用Bingham流体模型描述土体流动大变形,针对土体流动模型试验进行基于SPH的数值模拟,并验证了SPH方法的有效性。

非线性有限元计算是近年来受到学者青睐的一种分析液化引起地震永久变形的的方法。基于固-液两相饱和介质的Biot动力理论应用最为广泛,可以考虑孔压的累积和消散过程。A. W. Elgamal等^[85]建立的多屈服面塑性本构模型,能够较好描述饱和砂土的液化特性,与此同时,将本构模型嵌入

到固-液耦合有限元程序中,并利用室内试验和离心机试验进行校准。O. Ghasemi-Fare等^[86]采用PI-SA有限元软件,将Biot理论离散为 $u-p$ 形式,利用两屈服面塑性模型模拟饱和砂土,得到可液化倾斜地基的地震动力反应,并分析了地表坡度、可液化层厚度、砂土相对密实度、地震动强度、荷载频率等因素对液化侧向扩展位移的影响。C. Phillips等^[87]采用OpenSees开源有限元框架,根据Biot理论,动力方程采用水土完全耦合 $u-p$ 公式,模拟了液化侧向扩展场地的地震响应,与离心机试验结果吻合较好。王豪等^[88]采用OpenSees有限元平台,通过合适的土体液化变形界面塑性本构模型,将三维自由场简化为一维剪切梁计算模型,基于此,分析了坡度、砂土相对密实度、地震波特性等因素对液化侧向变形的影响。除此之外,A. I. Valsamis等^[89-90]采用FLAC有限差分程序,通过建立界面塑性模型,模拟了液化倾斜地基的离心机试验,并提出一种预测最大侧向位移的公式。基于LEAP项目,R. J. Armstrong^[91]利用FLAC有限差分平台,依据临界状态理论,通过应力控制的砂土屈服面塑型模型(PM4Sand)模拟饱和砂土,针对液化斜坡离心机自由场建模分析,标定了本构模型的参数。陈育民等^[92]通过将液化流动的砂土模拟为剪切希化非牛顿流体,用幂函数表示其剪应力-剪应变关系,建立砂土液化流动本构方程。基于此,在FLAC^{3D}中建立了液化流动变形的简化分析方法。

围绕液化侧向扩展位移地震响应规律,众多学者提出了大量的分析方法,但液化大变形机制复杂,非线性有限元分析中,需要提出能够真实反映饱和土体液化特性的本构模型。

4.2 液化侧向扩展场地桩-土相互作用数值模拟

有限元法能够较好地模拟饱和砂土在地震动力作用下的液化特性,在分析非线性、处理复杂结构等问题时具有明显优势,因此国内外学者以液化侧向扩展场地的桩基础为研究对象,针对场地土-桩体系进行建模分析。然而,液化侧向扩展场地桩基础的数值建模涉及到以下几个关键问题:(1)如何描述可液化土体的强非线性和剪胀等特性问题;(2)合理描述桩-土接触非线性问题;(3)计算精度和计算效率问题。

T. D. O'Rourke等^[93]基于有限元程序B-

STRUCT,较早研究了液化诱导土体大位移下单桩和群桩基础分析方法,对液化侧向扩展场地中的桩基础地震反应规律进行了分析,并和离心机试验结果进行对比,基于计算结果,讨论了桩基础的破坏模式。Y. K. Chaloulos等^[94]采用能模拟土体液化软化的本构模型,在有限差分程序FLAC^{3D}中建立了考虑桩-土界面滑移和分离的界面模型,通过修改侧向边界条件的“常规束缚结点”公式,以考虑淹没斜坡自由场下坡边界处产生的静水压力,对液化侧向扩展场地单桩基础离心机试验进行模拟,数值计算结果和试验结果吻合较好。

D. Chang等^[95]借助OpenSees有限元平台,以液化侧向扩展场地土-群桩基础-上部结构为研究对象,进行了二维非线性有限元计算,模型中饱和土体单元采用基于Biot多孔介质理论水土完全耦合开发的四边形平面应变单元模拟,饱和砂土和黏土分别采用与有效应力和总应力有关的塑性本构模型,通过能够考虑饱和砂土液化特性的弹簧模拟桩-土接触非线性,将计算结果和试验结果进行对比,验证了模型的可靠性。G. Li等^[96]基于此方法开展了在E-Defense上完成的液化侧向扩展场地群桩基础大型振动台试验的数值模拟研究,其中饱和砂土采用能够再现动力过程中剪切变形累积和液化特性的多屈服面塑性本构模型,通过对比试验结果验证了模型的有效性,并分析了本构模型参数对土体侧向扩展的影响。在此基础上,X. W. Wang等^[97]为了考虑上覆黏土层与可液化砂层界面位移不连续及剪切局部化,通过建立一种厚度较低、参考剪切模量较低的层间单元来表示剪切局部化现象,将模型计算结果和试验结果进行对比,结果表明:所提出的界面单元能合理描述试验中剪切局部化引起的位移不连续现象。J. Nasr等^[98]为了研究地震时惯性力和侧向扩展效应组合的影响,在OpenSees有限元平台上,对多层可液化倾斜地面大直径钢筋混凝土桩进行了二维有效应力非线性动力分析,结果表明,相比非液化场地,液化引起的侧向位移使桩头位移增加明显。王晓伟等^[99]基于OpenSees有限元模型,建立了典型河谷场地三跨简支梁模型,分析了各部件在液化侧向扩展场地中的地震动力响应。A. Khosravifar等^[100]对液化侧向扩展场地单桩基础进行了非线性动力反应分析,围绕侧向扩展、场地类型、上部结构惯性效应对桩基础地震需求的影响等问题展开研究,结果表明,侧向扩展与上部

结构惯性共同作用时桩基产生更大的地震需求,并指出无法通过单独分析两个负载工况获取总地震需求。

J. Ch. Lu等^[101]在OpenSees有限元计算平台上建立了液化侧向扩展场地桩基础三维数值模型,并基于离心机和大型振动台试验评估了模型的准确性。唐亮等^[102]将饱和砂土模拟为两相介质,砂土采用多屈服面塑性本构模型,针对土箱整体倾斜的桩-土大型振动台试验,建立液化侧向流动地基三维有限元模型,并对数值模型进行了校正。刘春辉等^[103]基于此方法研究了液化侧向扩展场地桥梁群桩效应。R. Wang等^[104]提出了一种可液化场地桩-土三维有限元建模方法,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。L. Su等^[105]以可液化场地桩-土-码头墙体系为研究对象,在OpenSees有限元平台建立了桩-土-码头墙体系的三维非线性有限元分析模型,模型考虑可液化场地桩-土地震反应滑移的非线性特征,基于验证后的模型完成了敏感性因素分析。L. Su等^[106]基于此方法,研究了可液化场地桩支码头的抗震性能,并评估了三种提高桩支码头抗震性能的方法。X. R. Zhang等^[107]为了研究具有上覆冻土层的液化侧向扩展场地桩基础动力响应规律,在OpenSees有限元平台上建立三维有限元模型,为了模拟桩空间几何的影响,使用垂直桩轴向的刚性连接单元,其长度与桩半径相同,桩-土界面被模拟为无粘性材料,以模拟桩土地震反应的裂隙行为,并采用已完成的1-g振动台试验结果验证了模型的可靠性。Zh. J. Qiu等^[108]为了研究液化诱导侧向扩展场地桩-土-桥梁整体结构体系的地震反应特征,建立了多层土(液化层和非液化层)-桩基-桥梁结构整体三维非线性有限元模型,探讨了液化引起的侧向扩展对地基-桥梁结构体系的影响。

此外,汪明武等^[109]应用多重剪切塑性模型有效应力分析方法,针对邻近土坡群桩在液化侧向扩展作用下的地震动力响应进行了分析。邵琪等^[110]采用三维动力FE-FD耦合方法,饱和砂土采用弹塑性本构模型,建立了群桩基础非线性数值模型,研究了液化土体不同侧向流速对桩基地震反应的影响。文艳等^[111]基于已完成的振动台试验,将液化土层视

为非牛顿流体,建立了可液化倾斜场地桩-土-结构相互作用的三维数值模型,对影响桩动力响应的主要因素进行分析。

目前,针对液化侧向扩展场地桩-土-结构地震反应的有限元方法从线性发展为非线性、从总应力法发展至有效应力法。整体数值分析方法可以考虑流固完全耦合和饱和砂土液化特性,同时,在桩-土接触非线性计算中具有明显的优势。但精确的网格划分使计算时间成本增加,计算效率问题是制约数值模拟发展的因素之一。能够准确描述饱和砂土液化特性的本构模型仍较少,三维分析模型中,针对液化土-桩地震动力作用下粘结-滑移和分离的接触面的模拟还处于发展阶段。现有的数值分析方法在模拟液化侧向扩展场地桩-土-上部结构动力响应和真实动力响应之间仍有出入。

4.3 桩-土界面模拟方法

液化侧向扩展场地桩-土地震反应过程中往往出现粘结、滑移和分离等现象。数值分析中,能否模拟桩土界面非线性地震反应特征至关重要,国内外学者围绕桩-土界面模拟做了大量的工作。

C. R. McGann等^[112]基于OpenSees开发的梁-结点接触面单元,模拟桩土之间的分离并通过增加摩擦界面,模拟桩土之间的摩擦滑移和粘结现象,基于此建立了桩-土相互作用有限元分析模型,但对饱和砂土而言,由于自由度不匹配,需要增加结用于不同自由度结点的过渡。A. Elgamal等^[113]基于OpenSees有限元计算平台,使用垂直于桩轴向的刚性连接单元模拟桩的几何尺寸,土体单元和刚性连接单元的外侧结点采用刚性连接,建立了液化场地桩-土地震反应有限元分析模型,但此方法不能真实模拟液化侧向扩展场地桩-土界面粘结、摩擦和滑动非线性反应。L. Su等^[105]在此基础上,通过增加两种零长度单元并赋予零长度单元桩-土接触面属性,模拟液化侧向扩展场地桩-土摩擦滑动非线性反应,但无法考虑刚性连接力的变化对界面剪切屈服力的影响,也不能考虑桩材料特性对界面剪切屈服力的影响。R. W. Boulanger等^[114]在开源OpenSees有限元平台中开发了非线性 $p-y$ 弹簧、 $t-z$ 弹簧、 $q-z$ 弹簧模拟桩土界面非线性反应,这类单元大多用于简化分析模型中,但最近一些学者通过耦合桩-土单元,将其用于液化侧向扩展场地桩-土整体限元分析中,取得了较好的效果^[95-97],目前,此方法仅适

用于二维平面应变模型。R. Wang等^[104]将双曲线模型用于液化场地桩-土界面的模拟,以捕捉液化土-桩剪切面的地震反应。

4.4 饱和两相介质 $u-p$ 格式高效数值计算方法

液化侧向扩展场地以及液化场地-结构体系非线性动力反应是典型的能量开放系统非线性波动问题,波在介质中的传播问题常采用数值方法进行求解。合理、高效的数值模拟方法是计算液化侧向扩展场地地震反应的关键问题之一,结合可反映砂土液化后弹塑性本构模型,有效模拟分析土壤液化后可能存在的场地失效或侧向大变形。目前的研究成果主要体现在合理的饱和两相介质无限域能量辐射人工边界条件,以及高效的显式数值算法两方面展开研究。

其一,人工边界条件模拟波在无限域内波的传播对近场的作用,保证波在人工边界处的传播特性与原来的连续介质一致,使波通过人工边界时发生完全的透射或被人工边界完全吸收^[115]。对于饱和两相多孔介质,依据不同格式的饱和土动力方程($u-w$, $u-U$ 和 $u-p$ 方程),其人工边界可以分为适用于 $u-w$ 和 $u-U$ 方程的应力型边界条件和适用于 $u-p$ 方程的应力-流速型边界条件。现有多数饱和土人工边界通过假设渗透系数取极端情况来简化推导过程,即 $k=0$ 或 $k=\infty$ 。当假设渗透系数取零时,H. Modaressi等^[116-117]将旁轴边界应用于建立 $u-p$ 方程边界条件,获得了饱和土的零阶和一阶旁轴边界条件,其中零阶的旁轴边界条件等价于黏性边界;T. Akiyoshi等^[118-120]针对 $u-w$, $u-U$ 和 $u-p$ 模型建立线性和各向同性饱和土的旁轴边界,并将工作拓展至横向各向同性和各向异性饱和土情况。以上研究工作均是基于平面波展开,刘光磊等^[121]基于柱面波,提出了一种 $u-p$ 方程的黏弹性人工边界;杜修力等^[122]与王子辉等^[123-124]建立了两种 $u-U$ 模型的黏弹性人工边界。考虑到边界的精度,P. Li等^[125-126]在文献[121]工作的基础上,提出一种新的高精度人工边界。当假设渗透系数为无穷大时,G. Degrande等^[127-128]提出了一种频率内的全局型人工边界,但计算成本较高;之后A. Gajo等^[129]、Z. Zerfa等^[130]分别在零和无穷大渗透系数假设条件下,建立了两种时域内的粘性边界条件,具有较高的计算效率。值得一提的是,Ch. Sh. Xu等^[131]利用矩阵对角化方法,将 $u-p$ 方程中质量和流体压缩矩

阵均进行对角化,在空间上实现了结点间惯性及流体常变形压缩量的解耦,并构建了三种适用于 $u-p$ 格式饱和两相介质有限元方程的双显式时域积分法,实现了时域内的解耦,重点解决了大规模、强非线性饱和土动力问题计算效率极低的难题。

其二,求解饱和土自由度数目巨大和强非线性动力学问题,显式算法可有效减少计算占用的内存和耗时,计算效率高,适于并行计算。目前,很多学者提出了多种两相介质动力方程的交替解法。对于 $u-U$ 格式和 $u-w$ 格式的动力方程,常采用显-显式^[132-133]、显-隐式^[134-135]和隐-隐式^[132]交替法求解;而对于 $u-p$ 格式饱和两相介质动力方程,O. C. Zienkiewicz等^[136]建立了结合中心差和单边差的显-隐式交替格式算法,用于处理一些地震作用下的土坝和成层基础的液化和永久变形等问题。B. R. Simon等^[137]针对饱和土的一维问题,采用线性内插的方法处理两节点单元,并对比了不同时间积分方法的误差和耗时,包括结合了不同的显式、隐式的全方程积分法,隐-隐式和显-隐式交替时域积分法等。K. C. Park^[138]指出采用全方程积分法限制了计算效率,他采用扩大系数矩阵,建立了一种隐-隐格式的逐步积分方法,但由于增加了计算工作量,计算效率相对较低。O. C. Zienkiewicz等^[139]针对系数矩阵的维数较大这一问题,提出了一种无条件稳定的隐-隐格式算法,通过简化实现了方程的解耦,显著降低了计算量,同时具有较好的精度和稳定性。M. S. Huang等^[140]在此基础上进行改进,提出了孔压修正法,方法中位移和孔压均采用预估值-校正值计算。由于 $u-p$ 方程属于混合形式的动力方程,位移和孔压采用同阶形函数,当孔隙水和固体土骨架均为不可压缩或近似不可压缩时,或孔隙流体渗透系数为零情况下,土体的动态响应会产生严重的振荡现象,造成结果失稳^[141-142]。O. C. Zienkiewicz等^[143]在空间有限元离散前,先进行时域计算,并将单位步长的加速度值分成两部分,进而提出了一种零渗透系数情况下显-隐式算法,有效避免了混合格式计算结果的失稳现象。M. S. Huang等^[144]基于此,通过引入参数 δ ,给出了 $u-p$ 格式方程在这种特殊情况下的一种无条件稳定的隐-隐式算法。同时,M. S. Huang等^[145]采用孔压修正法,提出了另一种无条件稳定的隐-隐式算法,该算法中位移和孔压均采用预估值-校正值计算。O. C. Zienkiewicz等^[146]通过采用一个网格尺寸的常数 α 控制算法的稳定性。T.

Park等^[147]基于有限单元法,提出了一种结合多时间步长法、网格重划分和子迭代法的稳定算法。朱媛媛等^[148]利用微分求积单元法对整体系统在空间上进行离散,形成的二阶微分方程,通过二阶向后差分格式,实现了整体系统的隐式时域积分过程。B. Markert等^[149]对比了饱和两相介质动力方程的全方程法和显-隐式分离解法,并针对不同饱和土动力问题,给出了两种时域解法的适用条件。C. S. Xu等^[150]基于 $u-p$ 方程,结合合理的外形波假定,建立了一种不需进行边界透水性假定的黏弹性人工边界条件,其物理意义明确,容易实现,同时弥补了现有人工边界假定零渗透系数引起的准确性低,及忽略第二类压缩波等不足。

围绕饱和两相多孔介质,现有基于 $u-p$ 方程建立的边界条件,未能较好考虑土、水之间的耦合作用,降低了计算的准确性。有必要开展 $u-p$ 格式饱和两相介质无线域能量辐射高精度人工边界条件,提高边界条件的计算精度。针对饱和土体有限元计算存在计算过程复杂,耗时严重等问题,现有的算法基本上采用隐式法求解,降低其计算效率。因此,发展高效显式时域数值算法具有重要的意义。

5 简化分析方法

精细化数值模拟方法能够较好模拟土体液化效应、桩-土非线性等特性,但由于建模极其复杂,时间成本较高等因素制约了其在工程设计中应用。以Winkler地基梁为基础的简化分析方法受到国内外学者的关注,以下针对液化侧向扩展场地桩基础发展的简化分析方法做简要回顾。

Winkler地基梁法将桩基础看作梁单元,桩土相互作用采用一系列连续分布且相互独立的弹簧和阻尼器模拟,具有建模简单,耗时较少的特点。M. Cubrinovski等^[151]关注地基表面非液化上覆黏土层及液化层与非液化层界面处的运动学影响,首先在线性范围内推导了液化侧向扩展场地桩基础的解析解,使用等效线性方法将其推广到非线性,用来描述桩和土的非线性响应,并对简化分析模型进行验证,基于此,采用两步法研究了液化侧向扩展场地群桩基础的响应,J. J. M. Haskell等^[152]基于此方法讨论了重要参数对液化侧向扩展场地桩动力响应的影 响。T. Juirnarongrit等^[153]通过将自由场运动剖面施加在Winkler弹簧模型上,获取侧向扩展单

桩响应,非液化土弹簧采用标准 $p-y$ 弹簧,液化土弹簧设置为零刚度,采用在桩头处施加旋转弹簧,模拟桩头的约束影响,将群桩等效为单桩,为了考虑群桩效应,使用 p 乘因子法以降低土壤弹簧刚度,讨论了液化侧向扩展场地桩的动力响应,并对该方法的可行性进行了评估。S. J. Brandenberg等^[154]根据完成的液化侧向扩展场地桩基础离心机试验,评估了基于位移的非线性Winkler地基梁方法的分析和设计准则。Y. Xie等^[155]采用R. W. Boulanger在OpenSees有限元平台开发的 $p-y$ 弹簧、 $t-z$ 弹簧、 $q-z$ 弹簧,建立了三维液化侧向扩展场地桩-土-桥梁结构的简化分析模型,并进行了高速公路桥的全局地震动力反应分析。S. R. Dash等^[156]针对昭和大桥倒塌的典型案 例,通过建立非线性Winkler地基梁简化分析模型,讨论了弯曲-屈曲相互作用在液化侧向扩展场地桩基设计中的重要性,简化分析模型中,通过适当减小土弹簧的刚度和强度模拟土体液化,作用于桩的侧向荷载通过两种方法模拟:(1)施加侧向扩展土的极限压力(力法);(2)侧向弹簧自由场末端施加土体位移(位移法)。

张建民等^[157]采用Penzien集中质量模型,建立了能考虑液化侧向大变形的桩-土相互作用简化分析方法,对阪神地震中侧向大变形诱导桩基础破坏的实例进行分析,并验证了简化分析方法。该方法首先进行自由场动力分析,接着将自由场获取的侧向位移作为弹簧的输入,模拟土对桩的作用。郭璇等^[158]针对液化地基侧向扩展作用、软硬土体交界面刚度突变等作用进行应力简化,基于Winkler地基梁模型及日本抗震规范推荐的位移法,对典型桩基案例进行分析,验证简化方法的有效性。王睿等^[6]采用不同的液化地基 $p-y$ 模型,针对新潟地震中昭和大桥破坏的典型案 例进行计算分析,研究地基侧向扩展引起的桩基础破坏的影响因素,结果表明,选取不同的 $p-y$ 模型,产生完全不同的结果,并指出通过试验揭示液化侧向扩展场地桩-土相互作用规律,发展合理的 $p-y$ 模型是当前研究的重点。

此外,其它简化的分析方法被用于液化侧向扩展场地桩基的分析。如基于力的方法,包括JRA规范法,极限平衡法等。JRA规范法将在6.2节简要叙述。R. Dobry等^[159]基于土层在侧向扩展方向对桩施加静侧向压力的假设,提出一种极限平衡法。土层对桩施加的静态荷载值与 $p-y$ 曲线中 p 的最大值相当,计算得到的桩弯矩与位移为反应的上界

值,该方法为工程的评估与设计提供了便利。进一步,基于力一位移的混合方法相继被学者提出并验证。P. Tasiopoulou等^[160]提出一种简化分析方法用来评估由于液化侧向扩展引起的桩反应,并基于离心机试验结果对方法的有效性进行验证,该方法结合自由场分析结果与桩的拟静力分析结果,考虑桩-上部结构体系与可液化土相对刚度,可有效避免刚度退化因子的经验选取与 $p-y$ 曲线的使用。

液化侧向扩展场地桩基简化分析方法,应主要考虑以下几个问题:(1)上覆非液化土层对桩基或承台的作用;(2)液化土层侧向扩展对桩基的作用;(3)群桩基础的简化问题;(4)不同类型土层刚度突变对桩基的影响;(5)惯性效应与液化侧向扩展土体运动效应的组合问题。当前,对上述关键科学问题的研究仍不深入,采用不同的分析方法计算的结果仍产生较大差异。需要建立能合理反映液化侧向扩展场地群桩基础地震反应特性的简化分析方法。

6 国内外规范对液化和侧向扩展场地桩基础抗震设计要求

6.1 国内规范要求

我国2016年修订后的《建筑抗震设计规范》^[161]规定:在故河道以及临近河岸、海岸和边坡等有液化侧向扩展或流滑可能的地段内不宜修建永久性建筑,否则应进行抗滑动验算、采取防止土体滑动措施或结构抗裂措施。针对低承台桩,场地中存在液化土层,承台埋深较浅时,不宜计入承台周围土的抗力或刚性地秤对水平地震作用的分担作用。桩承台底面上、下分别有厚度不小于1.5 m、1 m的非液化土层或非软弱土层时,液化土的桩周摩阻力及桩水平抗力乘以表1的折减系数;地震作用按水平地震影响系数最大值的10%采用,桩承载力按照非液化土的规定取用,但应扣除液化土层的全部摩阻力及桩承台下2 m深度范围内非液化土的桩周摩阻力。在有液化侧向扩展地段,桩基除了满足其它规定外,尚应考虑土流动时的侧向作用力,且承受侧向推力的面积应按边桩外缘间的宽度计算。但并未给出桩基受液化土体侧向推力的计算方法。

《公路工程抗震设计规范》^[162]指出液化地基中,液化等级为中等和严重的古河道、现代河滨、海滨,当存在液化侧向扩展或流滑可能时,在距常水位线

表1 土层液化影响折减系数

Table 1 Reduction coefficient of soil layer liquefaction

实际标贯锤击数/临界标贯锤击数	深度 d_s/m	折减系数
≤ 0.6	$d_s \leq 10$	0
	$10 < d_s \leq 20$	1/3
$> 0.6 \sim 0.8$	$d_s \leq 10$	1/3
	$10 < d_s \leq 20$	2/3
$> 0.8 \sim 1.0$	$d_s \leq 10$	2/3
	$10 < d_s \leq 20$	1

100 m以内修建的抗震重点工程构筑物,应进行抗滑动验算,必要时应采取防止土体滑动措施。地基内有液化土层,桩基抗震设计时,液化土层的承载力(包括桩侧摩阻力)、土抗力(地基系数)、内摩擦角和粘聚力等应按表1进行折减。未专门对液化侧向扩展场地桩基础抗震设计进行说明,《城市桥梁抗震设计规范》^[163]、《构筑物抗震设计规范》^[164]对液化场地桩基抗震设计要求均与此类似。

目前,国内各抗震设计规范对液化场地桩基础抗震设计中,均采用桩周摩阻力、水平土抗力等参数进行折减考虑液化土体的影响,且折减系数基本一致。建筑抗震设计规范和公路抗震设计规范提到,在可能产生液化侧向扩展场地中修建永久性建筑或构筑物时,需要进行抗滑动验算,并采取抗滑动措施,但未给出计算方法,也未给出必要的抗滑动措施。只有建筑抗震设计规范考虑液化侧向扩展场地桩基础流动土压力,但没有明确提出抗震设计的具体步骤与理论方法。说明针对液化侧向扩展场地桩基础的抗震设计与理论方法还不成熟,需要进一步研究和完善。提出液化侧向扩展流动土压力计算方法,建立适用于工程实际的液化侧向扩展场地桩基础抗震设计方法是需要关注的科学问题。

6.2 日美等国外规范要求

日本《公路工程抗震设计规范》^[165](简称JRA规范)规定,液化水平场地的桩基承受水平荷载时,采用地震系数法,土体液化的影响用地基反力折减系数表示,但无法考虑桩-土运动相互作用带来的影响。地基反力系数被定义为抗液化强度系数 F_L 、液化动剪切强度比、地震强度、土层厚度的函数。针对液化侧向扩展场地的桩基础,考虑了作用于桩身土压力的影响,并给出了计算方法:

$$q_{NL} = c_s c_{NL} K_P V_{NL} Z \quad (0 \leq Z \leq H_{NL}) \quad (1)$$

$$q_L = c_s c_L [V_{NL} H_{NL} + V_L (Z - H_{NL})] \quad (H_{NL} \leq Z \leq H_{NL} + H_L) \quad (2)$$

式中, q_{NL} 、 q_L 分别为 Z 深度处非液化土层和液化土层中桩单位面积侧向推力; c_s 、 c_L 、 c_{NL} 分别为海岸线到桩的距离修正系数、液化侧向扩展土层流动力修正系数、非液化土层侧向推力修正系数; K_P 为被动土压力系数; V_{NL} 为非液化土的重度; V_L 为液化土的重度; H_L 为液化土的厚度。

公式表明: 海岸线距离桩小于 50 m 最不利情况时, 液化侧向扩展场地作用于桩的流动土压力取值为液化土层竖向土压力和上覆非液化层被动土压力总和的 0.3 倍。

日本《铁路设施设计标准》^[166] (简称《RTRI 标准》) 规定: 在液化场地桩基设计中, 桩的侧向力主要考虑结构上部结构惯性力。虽然未考虑土体的侧向变形, 但因液化程度不同附加的惯性力代替了土体侧向变形对桩的作用。液化侧向扩展场地桩基设计采用地震变形法, 根据可液化层厚度和估算的侧向扩展位移, 通过地基土反力作用于桩上。规范规定了液化侧向扩展场地的地基土反力取为初始地基土反力值的 1/1 000。

日本《建筑基础设计规范》(AIJ2001)^[167] 规定液化场地桩基设计采用地震变形方法, 且考虑到上部结构和土体变形, 通过沿土体深度的累积剪切变形积分计算土体侧向变形, 地基反力根据 N_a 值和液化土层的厚度折减, 上部结构惯性作用通过地基反力的形式附加。针对液化侧向扩展场地, 根据液化层厚度和距离岸坡估算土体位移, 以地基反力的形式作用于桩身, 地基反力折减与液化场地规定相同。

美国 MCEER/ATC 指南^[168] 将液化场地分为有覆盖层场地和无覆盖层场地, 相同的是, 液化土体都会在桩身周围流动。然而相比液化无覆盖层场地, 液化有覆盖层土体将携带桩身一起运动, 判断结构是否能承受估计的最大位移, 若不能承受, 需采取补救措施。无覆盖层液化土体中, 通过被动土压力设计桩基。该指南建议用 Newmark 钢体滑块法估算侧向扩展位移。

相比国外桩基抗震设计规范, 我国规范在液化侧向扩展位移、作用在桩基的流动土压力、综合考虑运动相互作用和上部结构惯性力等计算方法、抵抗液化侧向扩展的工程措施等方面未有明确规定,

需要加以改进, 这也是我国当前液化侧向扩展场地桩基设计面临的重大问题。

7 展望与讨论

本文从液化侧向扩展和桩基础震害现象出发, 对实现液化侧向扩展方式、振动台试验关键测试技术进行总结。针对国内外学者发展的精细化数值模拟方法和简化分析方法进行整理, 围绕液化侧向扩展场地及桩基础地震动力响应研究的一些成果进行阐述。国内外学者在模型试验和理论研究方面开展了广泛的研究, 并取得了丰硕的成果, 然而, 研究仍有不足之处, 尚需进一步探讨。

(1) 由于试验条件的限制, 1-g 振动台模型试验较难模拟实际场地中的应力状态。由于液化触发条件具有特殊性, 针对可液化场地的 1-g 振动台试验很难满足相似比要求, 因此, 今后的研究有必要开展大比尺模型试验或基于现场的爆炸液化试验。针对振动台试验测试技术, 准确测试地震作用下液化侧向扩展土体位移和土-结构相互作用力是当前需要解决的关键问题, 急需发展新型测试技术, 为研究提供可靠的数据。

(2) 关于数值模拟方法, 能否准确模拟饱和土体的液化特性、桩-土地震反应的强非线性, 有效解决饱和场地土无限模型有限化处理带来的能量辐射等问题是数值模型是否可靠的关键。以下方面仍需讨论: ①建立能模拟饱和砂土液化大变形特性的本构模型; ②开展饱和土-结构动力接触面模型的研究, 模拟动力荷载作用下结构与土体间存在相对滑移及摩擦的强非线性反应; ③考虑计算量较少, 精度、稳定性更高的积分方法, 发展三维饱和土高效数值分析方法, 提高、改善饱和土动力问题的计算效率、精度和稳定性。通过建立可靠的能反映实际场地和结构动力特性的数值模型, 深入研究液化侧向扩展场地-桩基地震响应规律。

(3) 几十年来, 液化侧向扩展机理研究不断取得进展, 但目前为止, 关于液化侧向扩展机制仍未形成统一且广泛的认可, 目前大致形成以下三种观点: ①液化后的循环活动性使土体在剪缩与剪胀交替作用下导致液化侧向扩展; ②液化侧向扩展是饱和土体振动液化后, 超孔隙水压力上升, 剪切强度衰减, 导致流动变形; ③液化侧向扩展为液化后土体在孔压梯度驱动下的流动变形, 各观点都能在一

一定程度上解释液化侧向扩展现象。然而,液化后侧向扩展的力学机制目前仍处于探索阶段。笔者认为更好地理解液化侧向扩展机理,以下几个方面仍需讨论:液化侧向扩展启动时孔压场分布特征、滑动带演化规律、可液化土对上覆非液化硬土层荷载传递的规律、不同类型土体界面非连续变形机制等。

(4)桩基础在地震荷载下受到的惯性相互作用和运动相互作用是抗震设计中需要考虑的关键问题,也是研究桩基破坏机理重点关注的问题,二者在地震荷载下相互耦合。然而,目前液化侧向扩展场地桩基础的研究,仍较难区分惯性相互作用和运动相互作用。因此,以下两方面仍是当前研究的重点:①建立合适的桩土运动相互作用与惯性相互作用对桩基内力分布影响的评价方法;②了解两者的相位关系和组合方式,并在抗震设计方法中合理考虑运动相互作用与惯性相互作用的耦合效应。

(5)桩-土之间的荷载传递对桩的地震动力反应具有显著的影响,荷载传递与桩土相对位移、桩土荷载特性联系密切。倾斜液化侧向扩展场地的桩基础在整个地震动力过程中表现为“桩推土”或“土推桩”是阶段性问题,即地震动力反应过程中,桩与土的相对位移往往不一致,导致每个阶段桩与土的荷载传递规律不同。今后的研究有必要深入了解液化过程中桩土荷载传递规律,以期获得不同阶段的桩土相互作用机理,提出更可靠的液化侧向扩展场地桩-土-结构相互作用荷载模型。

(6)桥梁工程中的桩基主要为群桩基础,现有的研究主要针对单桩基础进行研究,而群桩效应显著影响桩基础的地震反应,并且沿土体侧向扩展方向,前排桩和后排桩的受力机制具有明显差异,与桩基间距、桩基刚度、土体液化、侧向扩展速率等因素联系密切。目前的研究虽考虑了群桩效应的影响,但因多种因素影响的复杂性,针对这一问题的研究仍不够深入,其研究还不能应用到实际工程设计中。

(7)震害调查表明,具有上覆硬土层的液化侧向扩展场地桩基础破坏更严重,近几年,这一问题备受关注。与无上覆硬土层相比,一方面,可液化层和上覆硬土层界面具有明显的位移不连续现象,针对此现象虽有一定的解释,但未能在理论上加以证明,作用机理仍不明确;另一方面,上覆硬土层作用在桩基的侧向荷载更大,且可液化土-上覆硬土-

桩基-结构动力相互作用机理复杂。因此,针对具有上覆硬土层的液化侧向扩展场地桩基础地震动力反应的研究应格外关注。

(8)我国抗震设计规范对液化侧向扩展场地桩基础的要求相比国外规范有较多不足之处,因此,应改进抗震设计规范,以满足液化侧向扩展场地桩基础抗震的要求。

(9)最近,针对液化侧向扩展场地-桩基-结构地震反应的研究出现了区别以往传统的方法,如基于性能的抗震设计,概率方法、易损性分析等,未来的研究中应考虑引入更多新方法和理论。

综上所述,通过模型试验和理论研究相结合的手段,探讨液化侧向扩展机理,了解不同场地类型条件下桩基础破坏模式及灾变机理,深入研究液化侧向扩展场地与桩基础地震响应规律,提出工程中实际应用的简化分析方法是当前工作的关键。

参考文献:

- [1] Varnes D J. Slope movement types and processes [R]. Washington D. C.: Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, 1978.
- [2] Hamada M, Yasuda S, Isoyama R, et al. Study on liquefaction induced permanent ground displacements [R]. Tokyo: Association for the Development of Earthquake Prediction, 1986: 1-87.
- [3] Finn W D L, Fujita N. Piles in liquefiable soils: seismic analysis and design issues [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002(22): 731-742.
- [4] Ashour M, Ardalan H. Piles in fully liquefied soils with lateral spread [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(6): 821-833.
- [5] 刘惠珊. 桩基震害及原因分析—日本阪神大地震的启示 [J]. 工程抗震, 1999(1): 37-43.
Liu H Sh. Earthquake damage and cause analysis of pile foundation—inspiration from Hanshin earthquake in Japan [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1999(1): 37-43. (in Chinese)
- [6] 王睿,张建民,张嘎. 液化地基侧向流动引起的桩基础破坏分析 [J]. 岩土力学, 2011, 32(增1): 501-506.
Wang R, Zhang J M, Zhang G. Analysis of failure of piled foundation due to lateral spreading in liquefied soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 1): 501-506. (in Chinese)
- [7] Hamada M, O'Rourke T D. Large ground deformations and their effects on lifelines: 1964 Niigata earthquake. Case Studies of liquefaction and lifelines performance

- during past earthquake[R]. Buffalo, NY: National Centre for Earthquake Engineering Research, 1992.
- [8] 丁剑霆,姜淑珍,包峰.唐山地震桥梁震害回顾[J].世界地震工程, 2006,22(1): 69-71.
Ding J T, Jiang Sh Zh, Bao F. Review of seismic damage to bridges in Tangshan earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2006,22(1): 69-71. (in Chinese)
- [9] 刘惠珊.1995年阪神大地震的液化特点[J].工程抗震, 2001,3(1): 22-26.
Liu H Sh. Liquefaction characteristics of the 1995 Hanshin Earthquake[J]. Earthquake Resistant Engineering, 2001,3(1): 22-26. (in Chinese)
- [10] 蒋蕊秋.世界地震工程100年(1891~1991)编年简史[J].世界地震工程, 1992,3(1): 14-21.
Jiang Ch Q. A brief history of 100 years of world earthquake engineering[J]. World Earthquake Engineering, 1992,3(1): 14-21.
- [11] Yoshida N, Watanabe H, Yasuda S. Liquefaction-induced ground failure and related damage to structures during 1991 Telire-Limon, Costa Rica, earthquake [C]//Hawaii: NCEER, 1992.
- [12] Palermo A, Wotherspoon L, Wood J, et al. Lessons learnt from 2011 Christchurch earthquakes: Analysis and assessment of bridges[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2011,44(4): 319-333.
- [13] 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.
- [14] Hamada M, Towhata I, Yasuda S, et al. Study on permanent ground displacement induced by seismic liquefaction[J]. Computers and Geotechnics, 1987, 4(4): 197-220.
- [15] Verdugo R, González J. Liquefaction-induced ground damages during the 2010 Chile earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79: 280-295.
- [16] Cubrinovski M, Robinson K. Lateral spreading: Evidence and interpretation from the 2010—2011 Christchurch earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016,91: 187-201.
- [17] 王兰民.黄土层大规模地震液化滑移的机理与风险评估[J].岩土工程学报, 2020, 42(1):1-19.
Wang L M. Mechanism and risk evaluation of sliding flow triggered by liquefaction of loess deposit during earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 1-19. (in Chinese)
- [18] O'Rourke T D, Hamada M. Case studies of liquefaction and lifeline performance during past earthquakes [J]. United States Case Studies, 1992, 2(2): 155-167.
- [19] 刘恢先.唐山大地震震害[M].北京:地震出版社, 1986.
Liu H X. Tangshan earthquake damage [M]. Beijing: Earthquake Press, 1986. (in Chinese)
- [20] Zhou Y G, Xia P, Ling D S, et al. A liquefaction case study of gently sloping gravelly soil deposits in the near-fault region of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(14): 6181-6201.
- [21] 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(Sup 1): S387-S410.
- [22] Brunet S, de la Llera J C, Jacobsen A, et al. Performance of port facilities in Southern Chile during the 27 February 2010 Maule earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2012,28(Sup 1): S553-S579.
- [23] Sasaki Y, Matsumoto H, Tokida K, et al. Experimental study on lateral flow of ground due to soil liquefaction [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St Louis, Missouri: [s.n.], 1991.
- [24] Sasaki Y, Tokida K I, Matsumoto H, et al. Shake table tests on lateral ground flow induced by soil liquefaction [C]//Proceedings of 3rd Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction. San Francisco, CA: [s.n.], 1991.
- [25] 陈继华,庄海洋,王伟.表面倾斜可液化地基变形特性振动台试验研究[J].工程勘察, 2013,41(8): 6-10,29.
Cheng J H, Zhuang H Y, Wang W. Shaking table tests on deformation properties of the cone-shaped liquefaction foundation[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2013,41(8): 6-10,29. (in Chinese)
- [26] Dobry R, Thevanayagam S, Medina C, et al. Mechanics of lateral spreading observed in a full-scale shake test [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010,137(2): 115-129.
- [27] Cubrinovski M, Kokusho T, Ishihara K. Interpretation from large-scale shake table tests on piles undergoing lateral spreading in liquefied soils [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006,26(2): 275-286.
- [28] Chen Y M, Xu C X, Liu H L, et al. Physical modeling of lateral spreading induced by inclined sandy foundation in the state of zero effective stress [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015,76: 80-85.
- [29] 张鑫磊,王志华,许振巍,等.液化砂土流动效应的振动

- 台试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2347-2352.
- Zhang X L, Wang Zh H, Xu Zh W, et al. Shaking table tests on flow effects of liquefied sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2347-2352. (in Chinese)
- [30] Motamed R, Towhata I. Shaking table model tests on pile groups behind quay walls subjected to lateral spreading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(3): 477-489.
- [31] 汪云龙, 王维铭, 袁晓铭. 基于光纤光栅技术测量模型土体内侧向位移的植入梁法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增1): 181-185.
- Wang Y L, Wang W M, Yuan X M. Embedded-beam approach for measuring interior lateral displacement of soils using FBG technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 1): 181-185. (in Chinese)
- [32] Su L, Tang L, Ling X, et al. Pile response to liquefaction-induced lateral spreading: a shake-table investigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 82: 196-204.
- [33] 李文闻, 陈育民, 刘汉龙, 等. XCC群桩限制液化侧向扩展的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 945-952.
- Li W W, Chen Y M, Liu H L, et al. Shaking table tests on efficiency of improvement of X-section piles against lateral spreading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 945-952. (in Chinese)
- [34] 沈吉荣, 王志华, 林文品, 等. 液化土体侧向扩展条件下群桩动力响应振动台模型试验[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(6): 27-33.
- Shen J R, Wang Zh H, Lin W P, 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. (in Chinese)
- [35] Motamed R, Towhata I. Mitigation measures for pile groups behind quay walls subjected to lateral flow of liquefied soil: Shake table model tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(10): 1043-1060.
- [36] Haeri S M, Kavand A, Rahmani I, 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: 25-45.
- [37] Kavand A, Haeri S M, Asefzadeh A, et al. Study of the behavior of pile groups during lateral spreading in medium dense sands by large scale shake table test[J]. International Journal of Civil Engineering, 2014, 12(3): 186-203.
- [38] Motamed R, Towhata I, Honda T, et al. Pile group response to liquefaction-induced lateral spreading: E-Defense large shake table test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 51: 35-46.
- [39] Olson S M, Hashash Y M A, Muszynski M R, et al. Passive wedge formation and limiting lateral pressures on large foundations during lateral spreading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(7): 04017027.
- [40] Motamed R, Sesov V, Towhata I, et al. Experimental modeling of large pile groups in sloping ground subjected to liquefaction-induced lateral flow: 1-G shaking table tests[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(2): 261-279.
- [41] Elgamal A, He L, Lu J, et al. Liquefaction-induced lateral load on piles[C]//Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Engineering. Taipei: [s.n.], 2006.
- [42] Chang B J, Hutchinson T C. Experimental investigation of plastic demands in piles embedded in multi-layered liquefiable soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49: 146-156.
- [43] Suzuki H, Tokimatsu K, Sato M, et al. Factor affecting horizontal subgrade reaction of piles during soil liquefaction and lateral spreading [C]//Workshop of Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations in Liquefied and Laterally Spreading Ground. California: [s.n.], 2005.
- [44] Yang Z J, Zhang X R, Yang R, et al. Shake table modeling of pile foundation performance in laterally spreading frozen ground crust overlying liquefiable soils[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2018, 32(4): 04018012.
- [45] Ebeido A, Elgamal A, Tokimatsu K, et al. Pile and pile-group response to liquefaction-induced lateral spreading in four large-scale shake-table experiments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(10): 04019080.
- [46] Wang X W, Ji B H, Ye A J. Seismic behavior of pile-group-supported bridges in liquefiable soils with crusts subjected to potential scour: Insights from shake-table tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(5): 04020030.
- [47] 王志华, 徐超, 周恩全, 等. 液化土体流滑推桩效应的振动台模型试验[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2): 33-39.
- Wang Zh H, Xu Ch, Zhou E Q, et al. Shaking table test on effects of sand flow on pile in liquefied ground[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(2): 33-39. (in Chinese)
- [48] 张鑫磊, 王志华, 许振巍, 等. 土体液化大位移条件下群

- 桩动力反应振动台模型试验[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 150-156.
- Zhang X L, Wang Zh H, Xu Zh W, et al. Shaking table model tests on dynamic response of pile groups under liquefaction induced large ground displacement[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 150-156. (in Chinese)
- [49] Liu Ch H, Tang L, Ling X Zh, et al. Investigation of liquefaction-induced lateral load on pile group behind quay wall[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 102: 56-64.
- [50] 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, 411.
- Xu Ch Sh, Dou P F, Du X L, et al. Experimental study on seismic response of superstructure-piles-soil system-design of test plan for large-scale shaking model experimental [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 365-374, 411. (in Chinese)
- [51] 许成顺, 豆鹏飞, 杜修力, 等. 液化自由场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 Ch Sh, 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)
- [52] 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 Ch Sh, 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)
- [53] Xu Ch Sh, Dou P F, Du X L, et al. Large shaking table tests of pile-supported structures in different ground conditions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 139(9-12): 106307.
- [54] Xu Ch Sh, Dou P F, Du X L, et al. Seismic performance of pile group-structure system in liquefiable and non-liquefiable soil from large-scale shake table tests [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 138(9-12): 106299.
- [55] Fiegel G L, Kutter B L. Liquefaction-induced lateral spreading of mildly sloping ground[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2236-2243.
- [56] Taboada-Urtuzuástegui V M, Dobry R. Centrifuge modeling of earthquake-induced lateral spreading in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(12): 1195-1206.
- [57] Sharp M K, Dobry R, Abdoun T H. Liquefaction centrifuge modeling of sands of different permeability [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1083-1091.
- [58] Kutter B L, Manzari M T, Zeghal M, et al. Proposed outline for LEAP verification and validation processes [C]//Proceedings of Fourth International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster mitigation and Rehabilitation. Kyoto, Japan: CRC Press, 2014.
- [59] Zhou Y G, Sun Z B, Chen Y M. Zhejiang University benchmark centrifuge test for LEAP-GWU-2015 and liquefaction responses of a sloping ground[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 698-713.
- [60] Kokkali P, Abdoun T H, Zeghal M. Physical modeling of soil liquefaction: Overview of LEAP production test 1 at Rensselaer Polytechnic Institute[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 629-649.
- [61] McVay M, Casper R, Shang T I. Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(5): 436-441.
- [62] McVay M, Zhang L M, Molnit T, et al. Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(10): 1016-1026.
- [63] Imamura S, Hagiwara T, Tsukamoto Y, et al. Response of pile groups against seismically induced lateral flow in centrifuge model tests [J]. Soils and Foundations, 2004, 44(3): 39-55.
- [64] Haigh S K, Madabhushi S P G. Centrifuge modelling of lateral spreading past pile foundations [C]//International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Newfoundland, Canada: [s.n.], 2002.
- [65] Abdoun T, Dobry R, O'Rourke T D, et al. Pile response to lateral spreads: centrifuge modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(10): 869-878.
- [66] Brandenburg S J, Boulanger R W, Kutter B L, et al. Load transfer between pile groups and laterally spreading ground during earthquakes [C]//13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver. B. C., Canada: [s.n.], 2004.
- [67] Brandenburg S J, Boulanger R W, Kutter B L, et al. Behavior of pile foundations in laterally spreading ground during centrifuge tests [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1378-1391.
- [68] Chang D, Boulanger R W, Kutter B L, et al. Inertia

- and spreading load combinations of soil-pile-structure system during liquefaction-induced lateral spreading in centrifuge tests [C] // Proceedings of the 16th International Conference on Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka, Japan: [s.n.], 2005.
- [69] Knappett J A, Madabhushi S P. Liquefaction-induced settlement of pile groups in liquefiable and laterally spreading soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(11): 1609-1618.
- [70] González L, Abdoun T, Dobry R. Effect of soil permeability on centrifuge modeling of pile response to lateral spreading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(1): 62-73.
- [71] 汪明武, Tobita T, Iai S. 倾斜液化场地桩基地震响应离心机试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10): 2012-2017.
Wang M W, Tobita T, Iai S. Dynamic centrifuge tests of seismic responses of pile foundations in inclined liquefiable soils [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2012-2017. (in Chinese)
- [72] 王睿, 张建民, 张嘎. 侧向流动地基单桩基础离心机振动台试验研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(10): 98-105.
Wang R, Zhang J M, Zhang G. Centrifuge shaking table tests on single pile in lateral spreading soil [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 98-105.
- [73] Berrill J, Yasuda S. Liquefaction and piled foundations: some issues [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2002, 6(Sup 1): 1-41.
- [74] Yoshida N, Tazoh T, Wakamatsu K, et al. Causes of Showa Bridge collapse in the 1964 Niigata earthquake based on eyewitness testimony [J]. *Soils and Foundations*, 2007, 47(6): 1075-1087.
- [75] Bhattacharya S, Madabhushi S P G, Bolton M D. An alternative mechanism of pile failure in liquefiable deposits during earthquakes [J]. *Géotechnique*, 2004, 54(3): 203-213.
- [76] 景立平, 王绍博, 张荣祥. 砂土液化诱发的地面侧移机理研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 1996, 16(3): 128-136.
Jing L P, Wang Sh B, Zhang R X. Study on mechanism of ground lateral deformation induced by liquefaction [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1996, 16(3): 128-136. (in Chinese)
- [77] 蔡晓光, 范丽远. 地震液化引起地面侧向大变形研究评述 [J]. *防灾科技学院学报*, 2010, 12(1): 11-16.
Cai X G, Fan L Y. Review of study on liquefaction-induced lateral spreading of ground [J]. *Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology*, 2010, 12(1): 11-16. (in Chinese)
- [78] El S U, Zeghal M, Dobry R, et al. Micromechanical aspects of liquefaction-induced lateral spreading [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2010, 10(5): 190-201.
- [79] 周恩全, 朱晓冬, 陆建飞, 等. 基于VOF方法的砂土液化后流动变形分析 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(4): 485-491.
Zhou E Q, Zhu X D, Lu J F, et al. Flow deformation analysis of post-liquefaction sand based on VOF method [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 39(4): 485-491. (in Chinese)
- [80] Martinelli M, Rohe A, Soga K. Modeling dike failure using the material point method [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 175: 341-348.
- [81] 张洪武, 王鲲鹏. 基于物质点方法饱和和多孔介质动力学模拟(III)——两相物质点方法 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(4): 507-513.
Zhang H W, Wang K P. Material point method for dynamic analysis of saturated porous media (III): two-phase material point method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(4): 507-513. (in Chinese)
- [82] Liu G R, Liu M B. Smoothed particle hydrodynamics—a meshfree particle method [M]. New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2003.
- [83] 黄雨, 郝亮, 谢攀, 等. 土体流动大变形的SPH数值模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(10): 1520-1524.
Huang Y, Hao L, Xie P, et al. Numerical simulation of large deformation of soil flow based on SPH method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(10): 1520-1524. (in Chinese)
- [84] Huang Y, Zhang W J, Mao W W, et al. Flow analysis of liquefied soils based on smoothed particle hydrodynamics [J]. *Natural Hazards*, 2011, 59(3): 1547-1560.
- [85] Elgamal A W, Yang Zh H. Numerical modeling of liquefaction-induced lateral spreading [C] // Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand: [s.n.], 2000.
- [86] Ghasemi-Fare O, Pak A. Numerical investigation of the effects of geometric and seismic parameters on liquefaction-induced lateral spreading [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 89: 233-247.
- [87] Phillips C, Hashash Y M A, Olson S M, et al. Significance of small strain damping and dilation parameters in numerical modeling of free-field lateral spreading centrifuge tests [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 42: 161-176.
- [88] 王豪, 高广运, 王禹. 地震荷载作用下可液化微倾场地侧向变形研究 [J]. *工程地质学报*, 2016, 24(增1): 85-92.

- Wang H, Gao G Y, Wang Y. Study on lateral spreading of liquefiable and inclined ground under earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 24(Sup 1): 85-92. (in Chinese)
- [89] Valsamis A I, Bouckovalas G D, Dimitriadi V. Numerical evaluation of lateral spreading displacements in layered soils [C] // *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Thessaloniki, Greece: ISSMGE. 2007.
- [90] Valsamis A I, Bouckovalas G D, Papadimitriou A G. Parametric investigation of lateral spreading of gently sloping liquefied ground [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(6): 490-508.
- [91] Armstrong R J. Numerical analysis of LEAP centrifuge tests using a practice-based approach [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113: 793-803.
- [92] 陈育民, 高星, 刘汉龙. 砂土液化流动变形的简化方法 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1567-1573.
Chen Y M, Gao X, Liu H L. Simplified method of flow deformation induced by liquefied sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1567-1573. (in Chinese)
- [93] O'Rourke T D, Meyersohn W D, Shiba Y, et al. Evaluation of pile response to liquefaction-induced lateral spread [C] // *Proceeding of the 5th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction*. Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research, 1994: 457-478.
- [94] Chaloulos Y K, Bouckovalas G D, Karamitros D K. Pile response in submerged lateral spreads: Common pitfalls of numerical and physical modeling techniques [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 55: 275-287.
- [95] 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.
- [96] Li G, Motamed R. Numerical modeling of pile group response subjected to liquefaction-induced large ground deformations in E-Defense shake table test [C] // *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Christchurch, New Zealand: [s.n.], 2015: 173.
- [97] Wang X W, Luo F Y, Su Zh Y, et al. Efficient finite element model for seismic response estimation of piles and soils in liquefied and laterally spreading ground considering shear localization [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(6): 06016039.
- [98] Nasr J, Khosravifar A. The effects of long-duration subduction earthquakes on inelastic behavior of bridge pile foundations subjected to liquefaction-induced lateral spreading [M] // *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V: Liquefaction Triggering, Consequences, and Mitigation*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018: 617-625.
- [99] 王晓伟, 李闯, 叶爱君, 等. 可液化河谷场地简支梁桥的地震反应分析 [J]. *中国公路学报*, 2016, 29(4): 85-95.
Wang X W, Li Ch, Ye A J, et al. Seismic demand analysis of a simply supported girder bridge in liquefied or non-liquefaction ground [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(4): 85-95. (in Chinese)
- [100] 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.
- [101] Lu J Ch, Elgamal A, Yan L, et al. Large-scale numerical modeling in geotechnical earthquake engineering [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2011, 11(6): 490-503.
- [102] 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1): 180-184.
Tang L, Ling X Zh, Elgamal A. 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(Sup 1): 180-184. (in Chinese)
- [103] 刘春辉, 唐亮, 凌贤长. 液化侧扩流场地桥梁群桩效应分析 [J]. *地震工程学报*, 2015, 37(2): 298-303.
Liu Ch H, Tang L, Ling X Zh. Analysis of the bridge pile group effect in liquefaction-induced lateral spreading sites [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(2): 298-303. (in Chinese)
- [104] Wang R, Fu P Ch, Zhang J M. Finite element model for piles in liquefiable ground [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 72: 1-14.
- [105] Su L, Wan H P, Li Y, et al. Soil-pile-quay wall system with liquefaction-induced lateral spreading: experimental investigation, numerical simulation, and global sensitivity analysis [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(11): 04018087.
- [106] Su L, Wan H P, Luo Y Zh, et al. Seismic performance assessment of a pile-supported wharf retrofitted with different slope strengthening strategies [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 129(Sup 1): 105903.
- [107] Zhang X R, Yang Z J. Numerical analyses of pile performance in laterally spreading frozen ground crust over-

- lying liquefiable soils [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2018, 17(3): 491-499.
- [108] Qiu Zh J, Ebeido A, Almutairi A, et al. Aspects of bridge-ground seismic response and liquefaction-induced deformations [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2020, 49: 375-393.
- [109] 汪明武, 李丽. 液化侧向流动中近邻土坡桩基性状分析 [C]// 第二届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集. 长沙: 湖南大学期刊社, 2008: 87-91.
- [110] 邵琪, 唐小微, 李宏. 液化砂土地基侧向流动对群桩作用的数值分析 [J]. *建筑科学*, 2012, 28(增1): 16-19, 28.
- Shao Q, Tang X W, Li H. Numerical analysis of soil-4-pile interaction in lateral spreading of liquefied ground [J]. *Building Science*, 2012, 28(Sup 1): 16-19, 28. (in Chinese)
- [111] 文艳, 周恩全, 陆建飞, 等. 可液化倾斜场地端承单桩地震响应三维数值模拟 [J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 33(1): 113-120.
- Wen Y, Zhou E Q, Lu J F, et al. Three-dimensional numerical simulation of seismic responses of single end bearing piles in inclined liquefiable site [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 33(1): 113-120. (in Chinese)
- [112] McGann C R, Arduino P, Mackenzie-Helnwein P. Applicability of conventional py relations to the analysis of piles in laterally spreading soil [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(6): 557-567.
- [113] Elgamal A, Yan L J, Yang Zh H, et al. Three-dimensional seismic response of Humboldt Bay bridge-foundation-ground system [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(7): 1165-1176.
- [114] Boulanger R W, Kutter B L, Brandenberg S J, et al. Pile foundations in liquefied and laterally spreading ground during earthquakes: centrifuge experiments & analyses [R]. Davis: [s.n.], 2003.
- [115] 赵密. 黏弹性人工边界及其与透射人工边界的比较研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
- Zhao M. Study of the viscous-spring boundary and the transmitting boundary [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004.
- [116] Modaressi H, Benzenati I. An absorbing boundary element for dynamic analysis of two-phase media [C]// Tenth World Conference on Earthquake Engineering. Barkema. Rotterdam: [s.n.], 1992: 1157-1163.
- [117] Modaressi H, Benzenati I. Paraxial approximation for poroelastic media [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1994, 13(2): 117-129.
- [118] Akiyoshi T, Fuchida K, Fang H L. Absorbing boundary conditions for dynamic analysis of fluid-saturated porous media [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1994, 13(6): 387-397.
- [119] Akiyoshi T, Fang H L, Fuchida K, et al. A non-linear seismic response analysis method for saturated soil-structure system with absorbing boundary [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1996, 20(5): 307-329.
- [120] Akiyoshi T, Sun X, Fuchida K. General absorbing boundary conditions for dynamic analysis of fluid-saturated porous media [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1998, 17(6): 397-406.
- [121] 刘光磊, 宋二祥. 饱和无限地基数值模拟的黏弹性传输边界 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(12): 2128-2133.
- Liu G L, Song E X. Visco-elastic transmitting boundary for numerical analysis of infinite saturated soil foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2128-2133. (in Chinese)
- [122] 杜修力, 李立云. 饱和多孔介质近场波动分析的一种黏弹性人工边界 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 575-581.
- Du X L, Li L Y. A viscous-spring artificial boundary for near-field wave analysis in saturated porous media [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(2): 575-581. (in Chinese)
- [123] Wang Z H, Zhao C G, Dong L. An approximate spring dashpot artificial boundary for transient wave analysis of fluid-saturated porous media [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(1): 199-210.
- [124] 王国军, 赵成刚. 流体饱和多孔介质黏弹性动力人工边界 [J]. *世界地震工程*, 2007, 23(3): 54-59.
- Wang G J, Zhao Ch G. Viscous-spring dynamical artificial boundary for saturated porous media [J]. *World Earthquake Engineering*, 2007, 23(3): 54-59. (in Chinese)
- [125] Li P, Song E X. A high-order time-domain transmitting boundary for cylindrical wave propagation problems in unbounded saturated poroelastic media [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 48: 48-62.
- [126] Li P, Song E X. A viscous-spring transmitting boundary for cylindrical wave propagation in saturated poroelastic media [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 65: 269-283.
- [127] Degrande G, De Roeck G. An absorbing boundary condition for wave propagation in saturated poroelastic media—Part I: Formulation and efficiency evaluation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1993, 12(7): 411-421.
- [128] Degrande G, De Roeck G. An absorbing boundary condition for wave propagation in saturated poroelastic me-

- dia—Part II: Finite element formulation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1993, 12(7): 423-432.
- [129] Gajo A, Saetta A, Vitaliani R. Silent boundary conditions for wave propagation in saturated porous media [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1996, 20(4): 253-273.
- [130] Zerfa Z, Loret B. A viscous boundary for transient analyses of saturated porous media [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2004, 33(1): 89-110.
- [131] Xu Ch Sh, Song J, Du X L, et al. A local artificial-boundary condition for simulating transient wave radiation in fluid-saturated porous media of infinite domains [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2017, 112(6): 529-552.
- [132] Zhao Ch G, Li W H, Wang J T. An explicit finite element method for Biot dynamic formulation in fluid-saturated porous media and its application to a rigid foundation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282(3-5): 1169-1181.
- [133] Wang J T, Zhang C H, Du X L. An explicit integration scheme for solving dynamic problems of solid and porous media [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2008, 12(2): 293-311.
- [134] Simon B R, Wu J S S, Zienkiewicz O C, et al. Evaluation of $u-w$ and $u-\pi$ finite element methods for the dynamic response of saturated porous media using one-dimensional models[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1986, 10(5): 461-482.
- [135] Prevost J H. Wave propagation in fluid-saturated porous media: an efficient finite element procedure[J]. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1985, 4(4): 183-202.
- [136] Zienkiewicz O C, Leung K H, Hinton K. Liquefaction and permanent deformation under dynamic conditions—numerical solution and constitutive relations[M]. London: John Wiley & Sons Ltd, 1982: 71-103.
- [137] Simon B R, Zienkiewicz O C, Paul D K. An analytical solution for the transient response of saturated porous elastic solids[J]. *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, 8(4): 381-398.
- [138] Park K C. Stabilization of partitioned solution procedure for pore fluid-soil interaction analysis [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1983, 19(11): 1669-1673.
- [139] Zienkiewicz O C, Paul D K, Chan A H C. Unconditionally stable staggered solution procedure for soil-pore fluid interaction problems [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1988, 26(5): 1039-1055.
- [140] Huang M S, Zienkiewicz O C. New unconditionally stable staggered solution procedures for coupled soil-pore fluid dynamic problems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1998, 43(6): 1029-1052.
- [141] Babuska I. Error-bounds for finite element method [J]. *Numerische Mathematik*, 1971, 16(4): 322-333.
- [142] Brezzi F. On the existence, uniqueness and approximation of saddle-point problems arising from Lagrangian multipliers[J]. *Revue Française D'automatique, Informatique, Recherche Opérationnelle. Analyse Numérique*, 1974, 8(2): 129-151.
- [143] Zienkiewicz O C, Huang M S, Wu J, et al. A new algorithm for the coupled soil-pore fluid problem [J]. *Shock and Vibration*, 1993, 1(1): 3-14.
- [144] Huang M S, Wu S, Zienkiewicz O C. Incompressible or nearly incompressible soil dynamic behaviour—a new staggered algorithm to circumvent restrictions of mixed formulation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(2): 169-179.
- [145] Huang M S, Yue Z Q, Tham L G, et al. On the stable finite element procedures for dynamic problems of saturated porous media[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(9): 1421-1450.
- [146] Zienkiewicz O C, Huang M S, Pastor M. Computational soil dynamics—a new algorithm for drained and undrained conditions [C] // *International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Rotterdam Netherlands: [s.n.], 1994: 47-59.
- [147] Park T, Tak M. A new coupled analysis for nearly incompressible and impermeable saturated porous media on mixed finite element method: I. Proposed method [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2010, 14(1): 7-16.
- [148] 朱媛媛, 胡育佳, 仲政, 等. 桩基-流体饱和土体耦合系统的动态响应分析 [J]. *工程力学*, 2016, 33(3): 169-178.
Zhu Y Y, Hu Y J, Zhong Zh, et al. Dynamic response of a pile-fluid-saturated-soil coupled system [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(3): 169-178. (in Chinese)
- [149] Markert B, Heider Y, Ehlers W. Comparison of monolithic and splitting solution schemes for dynamic porous media problems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2010, 82(11): 1341-1383.
- [150] Xu C S, Song J, Du X L, et al. A completely explicit finite element method for solving dynamic up equations of fluid-saturated porous media [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 97: 364-376.

- [151] Cubrinovski M, Ishihara K. Simplified method for analysis of piles undergoing lateral spreading in liquefied soils [J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44 (5) : 119-133.
- [152] Haskell J J M, Cubrinovski M, Bradley B A. Sensitivity analysis of simplified methods for the design of piles in laterally spreading soils [C] // NZSEE Conference. Christchurch: [s.n.], 2009.
- [153] Juimarongrit T, Ashford S A. Soil-pile response to blast-induced lateral spreading. II: analysis and assessment of the p - y method [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(2): 163-172.
- [154] Brandenberg S J, Boulanger R W, Kutter B L, et al. Static pushover analyses of pile groups in liquefied and laterally spreading ground in centrifuge tests [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(9): 1055-1066.
- [155] Xie Y, Zhang J, Huo Y. Simplified drift demand prediction of bridges under liquefaction-induced lateral spreading [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(8) : 04018053.
- [156] Dash S R, Bhattacharya S, Blakeborough A. Bending-buckling interaction as a failure mechanism of piles in liquefiable soils [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(1/2): 32-39.
- [157] 张建民, 王刚. 考虑地基液化后大变形的桩-土动力相互作用分析 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(3): 429-432.
Zhang J M, Wang G. Pile-soil dynamic interaction analysis considering large post-liquefaction ground deformation [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(3): 429-432. (in Chinese)
- [158] 郭璇, 于威威. 液化滑移地层桩基础破坏机理分析 [J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(3): 715-719.
Guo X, Yu W W. Analysis damage mechanism of pile foundation in liquefaction layers [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(3) : 715-719. (in Chinese)
- [159] Dobry R, Abdoun T, O'Rourke T D, et al. Single piles in lateral spreads: Field bending moment evaluation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(10): 879-889.
- [160] Tasiopoulou P, Gerolymos N, Tazoh T, et al. Pile-group response to large soil displacements and liquefaction: centrifuge experiments versus a physically simplified analysis [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(2): 223-233.
- [161] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [162] 公路工程抗震设计规范: JTG B02—2013 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [163] 城市桥梁抗震设计规范: CJJ 166—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [164] 构筑物抗震设计规范: GB 50191—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [165] Japan Road Association (JRA). Specifications for highway bridges, part V: seismic design [S]. Tokyo, Japan: Public Works Research Institute and Civil Engineering Research Laboratory, 2002. (in Japanese)
- [166] Railway Technical Research Institute (RTRI). Design standard for railway facilities-seismic design [S]. Tokyo: Railway Technical Research Institute, 1999. (in Japanese)
- [167] Architectural Institute of Japan (AIJ). Recommendations for design of building foundations [S]. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 2001. (in Japanese)
- [168] MCEER/ATC. Recommended LRFD guidelines for the seismic design of highway bridge. MCEER/ATC 49 [S]. New York: Federal Highway Administration, 2003.

(本文责编:池莹莹)