柴少峰,王兰民,蒲小武,等.第17届世界地震工程大会岩土地震工程相关领域研究进展综述[J].地震工程学报,2022,44(6):1332-1344.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220903002

CHAI Shaofeng, WANG Lanmin, PU Xiaowu, et al. Recent progress in the field of geotechnical earthquake engineering from the 17th World Conference on Earthquake Engineering[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(6): 1332-1344. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220903002

第17届世界地震工程大会岩土地震工程 相关领域研究进展综述

柴少峰^{1,2}, 王兰民², 蒲小武², 许世阳^{1,2}, 马星宇¹

(1. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 中国地震局/甘肃省黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 第17届世界地震工程大会于2021年9月27日至10月2日在日本仙台召开。考虑新冠疫情, 此次大会的举办采取线上与线下结合的方式, 笔者线上参加了会议。论文简要介绍此次大会的概况, 通过分析大会相关交流报告和论文内容, 对岩土地震工程研究领域的砂土液化灾害、地震作用下斜坡破坏、土-结构相互作用、地面破坏及场地地震安全、地面运动5个分会专题的研究进展进行综述。以期与国内同行分享本次大会在岩土地震工程及其我国有重大需求相关领域的最新成果和发展趋势。

关键词: 世界地震工程大会; 岩土地震工程; 新进展; 斜坡破坏; 土结相互作用; 地面运动

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)06-1332-13

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220903002

Recent progress in the field of geotechnical earthquake engineering from the 17th World Conference on Earthquake Engineering

CHAI Shaofeng^{1,2}, WANG Lanmin², PU Xiaowu², XU Shiyang^{1,2}, MA Xingyu¹

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of China Earthquake Administration & Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE) was held in Sendai, Japan, from September 27 to October 2, 2021. Owing to the impact of the COVID-19 pandemic, the conference was hybrid, combining online and offline attendees. The authors participated in the conference online. This study shares the latest achievements and development trends in

收稿日期: 2022-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1939209); 地震科技星火计划资助项目(XH20058Y)

第一作者简介: 柴少峰(1986-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事岩土地震工程与地震模拟振动台试验技术研究。

E-mail: chaishaofeng520@163.com.

通信作者: 王兰民(1960-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事黄土动力学与岩土地震工程方面的研究工作。

E-mail: wanglm@gdszj.gov.cn.

geotechnical earthquake engineering and related fields discussed at the conference. Recent progress in geotechnical earthquake engineering was reviewed by analyzing relevant conference presentations and papers reviewing various topics, including sand liquefaction disasters, slope failure under earthquake, soil-structure interaction, ground failure and seismic safety of sites, ground motion.

Keywords: World Conference on Earthquake Engineering; geotechnical earthquake engineering; recent progress; slope failure; soil structure interaction; ground motion

0 引言

世界地震工程大会始办于 1956 年,由国际地震工程协会(IAEE)主办,每 4 年召开一次,是地震工程领域最有影响力的国际学术会议。第 17 届世界地震工程大会(17th WCEE)于 2021 年 9 月 27 日至 10 月 2 日在日本仙台国际会议中心召开。本次大会由国际地震工程协会主办,日本地震工学会承办。参会的 67 个国家代表中,日本、中国、美国、意大利分别以参会代表占比 32.78%、12.16%、11.97%、5.27% 位居本届代表人数前四位。大会共接受论文 2 583 篇,交流了大会特邀报告 7 个(keynote),主题邀请报告 9 个,大会共设 25 个普通专题分会(COS)、43 个特别专题分会(SOS),92 个项目专题分会,大会共交流报告 190 个。受新冠疫情影响,报告以线上和线下结合的形式进行,其中线上口头报告 107 个。

会议交流内容涉及的主题为:(1)近年来地震的经验教训;(2)工程地震,包括活动断层和古地震研究、震源特性、灾害评估、地面运动、地震台网及监测、地震波传播路径和场地效应、场地和破坏调查;(3)结构抗震性能,包括设计地震动、抗震设计与设计规范、建筑、桥梁和基础设施、生命线工程、能源设施和核电站隔震和振动控制、设备和管道系统、试验和物理模型、抗震性态设计实例研究;(4)结构评估与加固,包括抗震设计和设计规范、建筑、桥梁和特殊结构、传统结构、非结构件、试验和物理模型、抗震加固实例;(5)岩土地震工程,包括边坡破坏,地面破坏、液化和地基改良、土-结相互作用、浅基础和深基础、试验和物理模型;(6)海啸灾害评估,包括波的传播、海啸导致的破坏;(7)防灾和应急管理,包括损失评估、快速结构评估、应急响应、人类行为、管理政策、早期预警等;(8)社会和经济影响,包括影响和间接后果、意识和防范、公众政策、恢复和韧性、经济和保险政策、风险交流、教育和宣传、抗震性能评估实例等;(9)地震损失和风险评估,包括风险和脆弱性、损失评估、风险评估、数字模型和应用、地震保险;

(10) 创新技术,包括遥感和无人机、AI 和大数据分析、新计算科学等。

本文就岩土地震工程和工程地震研究领域的砂土液化、斜坡地震破坏、土-结相互作用、地面破坏与场地地震安全、地面运动等 5 个相关专题分会的最新研究进展和动向分述如下。

1 砂土液化

本专题涉及的口头交流报告共 21 个,大会按地震砂土液化灾害、砂土液化灾害的预防和模拟技术、地震引发的滑坡灾害形成机制及液化风险评价等 3 个专题进行交流。

1.1 地震砂土液化灾害

该专题共有 8 个口头报告。口头报告的主要内容包括:日本名古屋大学的 T. Yoshikawa(4b-0051)等针对 2011 年日本 9.0 级地震造成沿海地区大范围的液化灾害,利用土-水-气三相耦合有限变形分析程序,对余震引起液化扩展损伤的机理进行研究。研究表明,在地震力的作用下,地下水位下饱和和土体在不排水条件下受到循环剪切作用;土体的剪缩导致超孔隙水压力的产生。当地震持时较长时,在地震作用期间以及地震后均会出现固结排水现象,并伴有塑性体积压缩,这使得孔隙水从饱和和土体向非饱和土运动,土体的饱和区域扩大。当土体在这种状态下遭受余震时,由于液化面积变大,导致液化破坏范围扩大。挪威岩土工程研究所的 R. Stelzer(4b-0007)等以 NGA-West 2 数据库中的 5 840 条双向地震动为研究对象,采用单一 WFC 法计算循环荷载的等效振次(n_{eq}),研究了峰值计数、能级交叉、均值交叉和雨流计数等 4 种循环计数法(CCM)对 n_{eq} 的影响。结果表明,所选的 CCM 对 n_{eq} 的估计有显著影响,且无论选用哪种 CCM,滤波和地震动处理均会对 n_{eq} 的估计产生影响。在此基础上,给出了将一个 CCM 计算的 n_{eq} 转换为不同 CCM 计算的 n_{eq} 的方程。日本铁道综合技术研究所的 M. Yamamoto(4b-0027)等基于时域非线性地震

动反应分析的土体变形试验,对基于耗散能评价液化势的有效性进行了研究。试验方法包括应变控制的1个循环阶段试验(1CSTs)、恒定应变循环试验(CSCTs)两个试验阶段。基于1CSTs、CSCTs和混合地基响应模拟结果,表明基于耗散能的评价方法能正确评估土体的液化势,并可通过归一化累积的耗散能量来确定剪应变水平和加载历史对累积耗散能与超孔隙水压力增加之间的关系。美国加州大学洛杉矶分校的K.S. Hudson(4b-0043)等对组建新一代液化数据库(NGL)中实验室的原因以及该数据库的组织模式进行了介绍。NGL数据库的目标是通过提供客观数据来支持模型构建。上一代液化数据库主要提供液化的现场案例及其影响,但由于在判定灾害是否由液化引起时可能会出现误判现象,且从现场灾害中提取的信息不足以支撑一些液化风险性评估模型的数据需要,因此在原有数据库的基础上,增加了实验室数据以满足模型构建的需要。实验室组件被内置到NGL数据库框架中,该数据库可以使用结构化查询语言(SQL)进行查询。日本东北大学的M. Jiang(4b-0028)等利用3D DEM技术对SHV波应变条件和瑞利波应变条件进行了一系列模拟试验,研究旨在揭示瑞利波对饱和颗粒材料抗液化性能的影响及其作用机理。结果表明,两种应变条件下的液化行为有显著差异。在相同的初始状态和循环累积等效剪应变的条件下,瑞利波应变条件下试样孔隙水压力的发展明显快于SHV波应变,而试件的抗液化能力明显低于SHV波应变条件。这表明在瑞利波应变条件下,试样的结构体系更容易被破坏。中国地震局工程力学研究所的孙锐(4b-0011)等利用动三轴试验仪,对不同相对密度的饱和砂土进行等压固结、不同等幅动应力作用下的液化试验,研究了孔隙水压力对饱和砂土循环最大剪切模量和循环极限剪应力的影响方式和规律。结果表明,循环最大剪切模量比和循环极限剪应力随孔压比的增大而减小。在孔压增加条件下,砂土循环最大剪切模量与孔压比的关系可表示为独立于砂土类型和相对密度的线性关系,孔压比等于循环最大剪切模量的相对减小量。循环极限剪应力与孔压比的关系不仅可以表示为与砂土类型和相对密度有关的二次曲线,还可简化为与砂土类型和相对密度无关的线性关系,此时孔压比等于循环极限剪应力的相对减小量。新西兰奥克兰大学的M. Zakerinia(4b-0030)等通过两种数值模拟方法(FLAC中的PM4砂土模型和OpenSees中的应力

密度模型)对一维自由场场地响应进行模拟,并将临界位置处的加速度、孔隙水压力和位移与离心机试验结果进行对比,对OpenSees中实现的应力密度模型在预测涉及液化的自由场场地响应中的效果进行了评估。结果表明,应力密度模型为中等PRI(Port Island)运动提供了较为真实的孔隙水压力,当PRI运动较小时,应力密度模型的误差较大。同时,在中等PRI运动中,应力密度模型的结果相较于小规模运动,在加速度时程、孔隙水压力和光谱响应等方面的模拟结果有所改善。新西兰奥克兰大学的T.Khansari(4b-0038)等基于坎特伯雷地震序列期间新西兰基督城实测超孔隙水压力数据,利用有限差分软件FLAC进行的一维有效应力场地响应分析,对PM4砂土液化本构模型的适用性进行验证。结果表明,加速度峰值在地表出现的时间与显著超孔隙水压力形成的时间相对应。与记录的孔隙水压力相比,PM4砂土模型在预测超孔隙水压力的产生方面表现良好。自由场体积应变和由此产生的沉降量较小,与其他数值研究的观测结果一致。这表明PM4砂土液化本构模型具有较好的适用性。

这一专题分会反映出的新进展与新动向可归纳为:

(1) 随着全球范围内液化实例的大规模丰富,利用已有的液化灾害数据库和观测数据对液化机理和预测模型进行研究成为新的动向,其新进展表现在:余震引起的液化扩展损伤是由于饱和土体中的孔隙水向非饱和土体扩散运动的结果;给出了不同循环计数法计算循环荷载的等效振次的方程;补充试验数据的数据库可满足构建不同液化分析模型的需要;从超孔隙水压力和体应变的时程验证了PM4砂土液化本构模型的实用性。

(2) 利用数值模拟软件和改进的液化本构模型对砂土液化灾害进行模拟研究仍然是砂土液化研究的重要途径。其进展表现在:揭示了瑞利波应变条件下试样孔隙水压力的发展明显快于SHV波应变,饱和试样更容易被破坏;应力密度模型对加速度时程、孔隙水压力和频谱响应等方面的模拟结果有所改善;PM4砂土模型预测超孔隙水压力方面表现良好,且自由场体积应变和由此产生的沉降量与观测结果一致。

(3) 土动力学试验在液化评价方法和土体动力参数研究方面取得了新的进展,具体表现在:基于应变控制的循环阶段试验(1CSTs)、恒定应变循环试验(CSCTs)和混合地基响应模拟结果,耗散能评价

方法能够正确评估土体的液化势;循环极限剪应力与孔压比的关系不仅可以表示为与砂土类型和相对密度有关的二次曲线,当孔压比等于循环极限剪应力的相对减小量时,两者之间的关系可简化为线性关系。

1.2 砂土液化灾害的预防技术

该专题共有 7 个口头报告。口头报告的主要内容包 括:日本东京大学的 R.R. Vargas(4b-0013)等基于 LEAP 数据库,对“应变空间多机制模型”在不同密度和输入地震动下模拟侧向扩展的能力进行了验证和评估。研究表明,由于模型参数较多,数值模拟输入参数的可变性应基于模拟的抗液化强度曲线(LRC)的潜在变化,而不是个别参数的变化。根据土体的复杂特性、地质条件和勘探数据的质量,LRC 将随着场地的不同而产生变化。通过将计算位移与相关估计结果(基于 48 次离心机试验)进行了比较,表明该模型在试验土体密度 $D_r = 50\%$ 、 60% 、 70% 和 80% 中具有较好的效果。日本大学的 N. Sento(4b-0009)等通过振动台试验,对作用在饱和松砂中埋藏管道上的超孔隙水压力进行了测定,以此为基础评价其上浮力,提出了抗上浮安全系数,并将试验值与现行实际设计估算值进行了比较。结果表明,最大有效孔压比在管顶处接近于 0,在管底处则接近为 1。通过作用在管道上超孔隙水压力评价的上浮力大约是理论方法估算值的 2 倍,且当抗上浮安全系数低于 1 时,埋管向上移动。震动时的最小抗上浮安全系数约为理论方法估算抗上浮安全系数的 3 倍。日本东京机电大学的 S. Yasuda(4b-0012)等介绍了 2011 年日本 9.0 级地震后,日本研究实施“城市液化预防工程”的进展。工程的主要措施是通过降低居民住宅区的地下水位来主动预防地震液化灾害的发生。根据日本国土交通省(MLIT)相关研究,在已知土体液化指数的基础上,地下水位降至 3 m 及以下的木质结构房屋的损伤趋势由 C(造成严重损害的可能性极高)、B3(造成严重损害的可能性相对较低)转变为 B2、B1(造成严重损害的可能性相对更低),由此液化预防工程将抗液化示范区域的地下水位标准确定为 3 m。且现场原位测试表明,在降低地下水位至 3 m 的过程中,地表沉降量很小。因此降低地下水位对可提高房屋密集的居民区和储罐、仓库密集的工业区的抗液化能力,可在此类地区进行推广。美国波特兰州立大学的 D. Moug(4b-0047)等对微生物诱导土体去饱和作用(MID)现场试验进行了介绍。在 MID 方法中,采用

一种由硝酸钙和醋酸钙组成的混合溶液来处理土体,以刺激土体中本身存在的反硝化细菌。反硝化细菌会产生氮气用于置换水分,从而降低土体饱和度。科研人员向中心注水井注入醋酸钙和硝酸钙溶液,同时从距离注水井 3.5 m 处等间距的 4 口周边抽水井收集地下水。通过跨孔法 P 波波速测试和 SCPT 测试对土体去饱和度进行监测。试验结果表明,处理后土体的 P 波波速明显下降,土体呈现去饱和的效果。日本福井大学的 M. Yoshida(4b-0055)等介绍了一种基于水压消散法的排水功能测井(通过在原木中心和表面上打孔制作而成),采用小规模振动台试验,通过与无排水功能测井测试结果进行比较,以评估排水测井的有效性。通过常水头渗透试验得到,排水测井中原木的渗透系数超过碎石排水法中的碎石。振动台试验结果表明,排水测井可以降低超孔隙水压力的积累速率,增加其耗散速率。法国巴黎萨克雷大学的 C. Khalil(4b-0054)等利用基于层状地基/岩层剖面的路堤二维有限元程序(GEFDyn),建立了弹塑性多机制土体运动模型。通过此模型对微生物灌浆加固后堤坝以及未采取加固措施的堤坝进行数值模拟分析,以评估微生物灌浆加固效果。坝体损伤以坝顶沉降表示。结果表明,在同等条件下,采用微生物灌浆改进技术后的坝体,坝顶沉降较小。表明微生物灌浆改进技术有助于坝体抗震。日本东京工业大学的 R. Kumar(4b-0001)等利用离心机试验,研究了液化对经碎石柱处理后基础结构的影响。同时,利用离心机试验结果对采用 OpenSees 框架中 PDMY02 弹塑性本构模型数值模拟的有效性进行验证。结果表明,在长周期内,经过碎石柱处理后地基和未处理过地基的地面位移谱都比施加在地基处的地震动位移谱要大。经过碎石柱处理后地基地面位移谱小于未处理过地基的地面位移谱。地面位移谱相对于实际震动的放大幅度与地面平均沉降有关。位移谱放大幅度越大,地面平均沉降越大。随机结果还表明,根据入射波的传播和相关的地面液化程度,峰值位移(PGD)可能会发生显著变化,因此应考虑设计地震位移需求。

这一专题分会反映出的新进展与新动向主要为预防液化灾害的工程和技术相关研究。其新进展主要有:

(1) 应变空间多机制模型对密实处理技术抗液化侧向扩展具有较好的评估效果;

(2) 基于振动台试验实测的超孔隙水压力定义

了抗上浮安全系数,试验结果表明理论方法低估了管道的抗上浮安全系数;

(3) 日本提出了人工控制降低地下水位的抗液化技术,并在房屋密集的居民区和储罐、仓库密集的工业区进行了示范,取得了良好的效果;

(4) 微生物诱导土体去饱和方法可降低土体饱和度,从而降低液化灾害发生的风险;

(5) 排水测井可以降低超孔隙水压力的积累速率,增加超孔隙水压力消散速率;

(6) 微生物灌浆加固技术有助于坝体抗震;碎石柱基础地面位移谱小于未处理过地基的地面位移谱,具有较好的抗液化效果。

1.3 地震引发的滑坡灾害形成机制及液化风险评价

该专题共有6个口头报告。口头报告的主要内容包:新西兰坎特伯雷大学的 Misko Cubrinovski (001B07-01)等介绍了两种对工程结构和社区危害极大的土体液化灾害,填海造陆后土体液化以及城市土体液化。通过近期新西兰地震中的案例,阐述了液化的特点和对土体及结构的危害,分析了惠灵顿港砾石填料的液化及细-粉砂组分对级配良好的砾石填料液化性能的影响。通过对克赖斯特彻奇市55个液化灾害实例(从无液化到严重液化)分析,阐明了不同土体层间交叉作用的重要性和可液化土体的系统响应机制。结果表明,造成惠灵顿港液化的原因在于其砾石填料的低密度以及细-粉砂组分主导了级配良好的砾石填料的循环特性。垂直连续可液化砂土组成的土体,系统响应机制会加剧液化的严重性,而由可液化层和不可液化层组成的相互交叉组成的土体,则会减轻液化灾害。新加坡奥雅纳公司的 R. Lagesse(4b-0003)等介绍了2018年帕鲁7.5级地震发生后,英国地震工程现场调查队(EEF-IT)和印度尼西亚苏门答腊班达亚齐的 Syiah Kuala 大学海啸与减灾研究中心(TDMRC)组成的联合调查组对大规模地面破坏的调查结果,并对 Balaroa、Petobo 以及 Sidera 三个大规模地震滑坡的破坏机制、影响因素以及运移特征进行分析。调查结果表明,三个大规模滑坡均为低角度土体液化诱发的碎屑流,由于其含水量较大,故流动性极强。其成因与水文地质条件、地形条件以及人为因素的相互作用有关。日本爱媛大学的 K. Ono(4b-0052)等通过现场调查、测试及室内试验,对2018年帕鲁7.5级地震引发 Sibalaya 地区滑坡灾害的形成机制进行研究。通过现场调查、测试确定了滑坡的最大滑距、运移特征以及液化层位。调查表明,地震后滑坡北侧

运动时间较长,最大滑距为410 m。许多建筑物几乎完好无损,这表明一定厚度的土体处于整体移动状态。通过对开挖沟壁的直接观测和动力触探试验,确定液化层位为砾石砂层。室内液化试验也证实砾石砂层在帕鲁地震中可产生液化现象,但室内不排水剪切试验显示,试样并未出现明显流动性,表明此滑坡灾害不能只用液化层受力运动解释,还需进一步研究。泰国清迈大学的 S. Sethabouppha (4b-0031)利用动力圆锥贯入试验(KPT)对土层液化势进行评价,以探讨KPT试验替代SPT试验的可能性。通过在2014年清莱地震中发生的8个液化点和4个未液化点进行KPT试验,将KPT试验得到的NKPT值转换为NSPT值,并根据土体分类的结果,利用 Idriss 和 Boulanger 2014年提出的抗液化安全系数计算程序进行计算,所得计算结果较为合理。相较于SPT试验,KPT试验具有体积小、重量轻、工具简单、成本相对低廉等优势,因此在SPT试验受限的情况下,可以用KPT试验对其进行替代。但KPT试验仪器也不能穿过坚硬的土体,且工作范围较小的缺点,因此可根据具体问题对两种试验方法进行使用。墨西哥国立自治大学的 M. Ordaz (4b-0026)等在概率地震危险性分析(PSHA)框架内引入概率液化危险性分析(PLHA),其中地震环境是用事件来描述的,而非多重积分。基于事件描述,可以更容易理解常规液化方法和概率处理之间的相互作用。从PLHA的结果中可以知道液化发生的频率和判别依据。最后,将概率液化危险性分析(PLHA)集成到现代的概率地震危险性分析(PSHA)程序,并将其命名为R-CRISIS。同时提出了初步的土体液化判别依据。其在一定条件下,可以在不需要进行充分PLHA分析的情况下就能对某一土壤剖面液化年发生概率有较为合理的预测。英国谢菲尔德大学的 I. Sianko(4b-0056)等提出了一种基于蒙特卡罗(Monte-Carlo)方法的概率液化危险性分析程序(PLHA),并在土耳其的阿达帕扎勒地区对其进行验证。研究表明,与传统的液化估算方法相比,PLHA方法能够更完整、准确地预测给定场地的液化势。由于概率液化危险性分析方法考虑了在预期的重现期内影响研究区域的所有可能事件,因此PLHA相对于确定性液化危险性分析,在预测某一地区未来一段时间内的液化风险更具有优势。决策者和设计人员可以利用PLHA程序得到的PLHA图和液化概率风险曲线,对阿达帕扎勒地区的预期液化风险进行评估。

这一专题分会反映出的新进展与新动向可归纳为:

(1) 新西兰地震在克赖斯特彻奇市引起的大范围场地液化和帕鲁地震引发的大规模液化滑坡成为近年来国际岩土地震工程界研究的热点问题。在此方面的新进展包括:含细-粉砂的低密度砾石填料尽管其级配良好,仍然可发生液化;帕鲁地震引起的三个大规模滑坡均为低角度土体液化诱发的碎屑流,其成因与水文地质条件、地形条件以及人为因素的相互作用有关;也有专家研究表明帕鲁地震大规模液化滑坡存在土层整体移动特征,其滑移机制不能只用液化层受力运动来解释。

(2) 在 SPT 试验受限的情况下,可以用 KPT 试验对其进行替代。

(3) 将概率方法引入到土体液化危险性分析中,新方法可以在不需要充分 PLHA 分析的情况下就能对某一土壤剖面液化年发生概率进行较合理的估计;利用 PLHA 图和液化概率风险曲线可对区域液化风险进行评估。

2 斜坡地震破坏

该专题有 7 个口头报告。口头报告主要涉及如下内容:日本东京大学的 K. Konagai(4a-0002)等基于 2018 年 9 月 6 日北海道 6.6 级地震诱发地震滑坡调查,探讨了滑坡体几何特征与滑距的相关性。结果表明,2018 年北海道地震多处滑坡的坡高 H 与原坡在水平面上的投影 X_1 、滑动距离 $X_1 + X_2$ 之间存在相似关系。香港科技大学 Z. W. Chen(4a-0015)等基于三维地形物理模型的数值计算,研究了三维地形的地震动放大效应。基于研究结果,提出了一种评估同震滑坡灾害新方法。东京工业大学 M. Kamiyama(4a-0008)等基于 GEONET, GNSS 地球观测网络的强震动加速度数据,研究了同震地应力变化与斜坡土层结构破坏之间的关系。研究表明,针对造成地震破坏的地震力的分析,需要同时关注地震加速度运动与大地测量效应。日本大学 K. Saito(4a-0006)等通过离心机试验,研究了地震触发海底滑坡破坏机制。研究表明,海底斜坡滑动面由较浅深度处的变形产生,并且随着地震振动加速度的增加而变深。日本防卫大学 N. Shinoda(4a-0011)等基于数值计算方法,分析不同类型铁路路堤在强震动下的易损性,提出了一种获取铁路路堤设计参数的脆弱性曲线方程。日本国土馆大学 T. Hashimoto(4f-0010)等通过大型振动台试验,研

究了石墙在地震作用下的坍塌机理,分析了石墙模型在施加不同抗震加固措施的振动响应,提出了一种有效的石墙抗震加固方法。北达科他大学 I. H. P. Mamaghani(4a-0007)基于离散有限元方法,研究了离散有限元方法对未加固砌体结构稳定性分析的适用性,结果表明,离散有限元是对砌体结构稳定性研究的一种有效方法。

这一专题分会反映出的新进展与动向可归纳为:

(1) 通过地震滑坡现场调查,给出了基于坡高和斜坡水平面投影的滑距预测模型;

(2) 通过对强震动观测数据分析,提出了基于斜坡场地三维地形地震动放大效应的同震滑坡灾害评估新方法;

(3) 海底地震滑坡研究成为一个新动向和前沿课题,海底斜坡滑动面由较浅深度处的变形产生,地震动强度越大,滑动面越深;

(4) 通过数值分析或振动台试验等手段,提出了一种获取铁路路堤设计参数的脆弱性曲线方程、基于不同加固措施的石墙抗震加固方法和评价砌体结构抗震稳定性的离散元方法,为相应构筑物易损性评价和加固提供了科学依据。

3 土-结相互作用

土-结构相互作用仍然是本次大会岩土地震工程领域的热点之一,大会安排了 3 个分会,涉及土-桩-结构体系及地震响应、土-结相互作用及抗震性能、土-结构动力相互作用分析方法等,共交流了 22 个口头报告。

3.1 土-桩-结构体系及地震响应

该分会交流了 8 个口头报告。Y. Otsuka(4c-0028)等利用日本最大的振动台 E-Defense 进行了大型土-桩-结构体系的液化试验,对三维有限元模型分析土-桩-结构体系抗液化性能的有效性进行了验证,结果表明,三维有限元模型的计算结果与土体和结构中密集测量的加速度和孔隙水压力实验数据一致性较好,验证了三维有限元模型的有效性。T. Okumura(4c-0040)等利用离心机振动台试验研究了软土地基的非线性力学性质,对某板形建筑桩基进行了 50g 离心加速度下的两次振动模型试验。研究表明,由于砂土液化和砂土路基反应较大,使地面的固有周期增加。在相同的输入振动强度下,上部结构的惯性力被减弱,但砂土液化引起的整个桩身弯矩比黏土地基大。台湾成功大学 Y. Y. Ko(4c-

0010)利用柔性剪切箱开展了可液化土中群桩地震反应的振动台试验,验证了剪切箱柔性边界的有效性,同时研究得出在振幅为 50 gal 的正弦激励下,地面试样上半部分达到初始液化,而在振幅为 75 gal 的试验中,几乎整个地面都液化了。京都大学 A. Sahare(4d-0006)介绍了不同斜坡条件下液化引起的群桩横向扩展的机制,采用有限元程序“FLIP ROSE”中的应变空间多机制模型进行数值分析。对考虑单桩和 2×2 群桩条件的 4 种不同桩基础在 5° 和 10° 倾斜地表下的运动学相互作用进行了数值分析。利用所有实例计算结果研究了在不同扩展条件下,由周围土体引起的侧向应力对桩表面产生的不同侧向位移和弯矩。研究发现,在较大的侧向扩展事件中,振动初期产生较大的侧向应力,导致塑性铰在破坏前沿桩长提前形成。即在地震过程中及之后土体动力特性发生显著变化,从而对群桩基础的动力相互作用进行了研究。京都大学 G. Adapa(4e-0014)通过控制路堤上游的水位,在路堤模型上进行动态离心试验模拟两种不同路基内部饱和程度和饱和区,研究了相同加载工况下路堤的变形,得出结论:路堤的动力响应在很大程度上取决于振动前路堤不同位置的饱和程度和路堤的实际密度。智利迪萨罗洛大学的 G. Candia(4c-0016),利用数值模拟地铁隧道的地震易损性,研究使用一种基于性态的方法来估计隧道设计中使用的临界工程需求参数(如衬砌内力、直径应变、地面变形参数等)的平均超越率。其开发了一套新的 EDP 脆弱性函数,利用有限元模型(2D)和中密土双轨圆形隧道的动力分析,推导了脆弱性函数;采用谐波激励下的圆形隧道动态离心试验结果、砂土室内试验结果和弹性理论结果对模型参数进行了验证。墨西哥国立自治大学工程研究所 J.M. Mayoral(4e-0016)选取墨西哥城某在建地铁车站作为地震测点,建立了隧道建筑布局的三维有限差分模型,研究刚性土中隧道与建筑物的地震相互作用效应并给出了数值模拟结果。日本关东学院大学 N. Yoshida(4f-0002),提出并讨论了地下结构地震反应分析中多支撑激励问题的计算公式。将土-结构相互作用模型分解为包括地下结构和地面结构,通过两个案例验证了该计算方法的适用性。

这一专题分会的新进展与新动向可以归纳为:

(1) $1g$ 重力振动台和离心机振动台试验仍为土-桩-结构体系、软土地基、可液化土中群桩地基、路堤动力响应和抗液化性能等研究的主要手段,其

新进展表现在:利用大型振动台试验验证了三维有限元模拟分析土-桩-结构体系抗液化性能的有效性;在相同的输入振动强度下,砂土液化引起的桩身弯矩比黏土地基大;利用剪切箱开展可液化土中群桩地震反应试验可有效消除边界效应的影响,试体模型随着地震动强度的增大上半部分初始液化可发展到几乎整个地面;振动前路堤不同位置的饱和程度和路堤的实际密度在很大程度上决定了路堤的动力响应。

(2) 通过应变空间多机制模型有限元分析,得出振动初期产生的较大侧向应力导致塑性铰在破坏前沿桩长提前形成;基于性态的方法来估计隧道设计中使用的临界工程需求参数,开发了新的 EDP 脆弱性函数,利用有限元模型和动力分析推导了脆弱性函数,并用振动台和室内试验对模型参数进行了验证;给出了刚性土中隧道与建筑物的地震相互作用效应及数值模拟结果。

(3) 提出并讨论了地下结构地震反应分析中多支撑激励问题的计算公式。

3.2 土-结相互作用对抗震性能的影响

该专题有 6 个口头报告。口头报告主要涉及如下内容:清华大学土木工程安全与耐久性教育部重点实验室 Y. Tian(4c-0009)进行了复杂地形下场地-城市相互作用的振动台试验与数值模拟,结合复杂地形进行了 7 组振动台试验,研究了不同地形、建筑物、建筑群结构和输入地震动对复杂场地-城市交互作用(SCI)效应的影响。基于试验结果,验证了所提出的 SCI 效应数值耦合方案的可靠性。通过参数分析和实例分析,说明了考虑复杂地形的 SCI 效应。伊朗德黑兰塔比阿特莫达勒斯大学土木与环境工程院 M. Ansari(4c-0034)展示了土-桩-结构相互作用对高层建筑动力性能影响的试验。将一个 15 层钢筋混凝土建筑简化为具有两种类型实心(即刚性)和条形(即柔性)桩帽基础的 5 层建筑,通过 $1:22$ 的几何相似比,将原型建筑的所有构件按比例缩小,利用加州州立大学弗雷斯诺分校的振动台设备,对三个测试单元进行了一系列振动台试验。结果表明,与基础嵌固结构相比,桩-土-结构相互作用会增加桩-桩结构的层间位移。此外,采用条形承台可减小结构层间位移,其研究结果可为上部结构设计合适的承台,提高抗震性能提供参考。滨田竹中研究与发展研究所 J. Hamada(4c-0038)介绍了大型桩筏基础深层搅拌混凝土墙支撑隔震办公楼的地震观测结果,在地震观测记录的基础上研究了桩

筏基础的抗震性能。通过对建立在软黏性土壤下液化砂层上的一栋 12 层采用了网格状深层搅拌混凝土墙的独立办公楼进行了 170 多个地震事件的观测,依据建筑的加速度、桩动截面力和筏板下动土压力观测,结果表明桩顶处(GL-8.5 m)轴向应变与桩中深处(GL-20 m)轴向应变基本一致。桩顶处弯曲应变比中间深处弯曲应变要小得多。证明了采用网格状深复合墙减小了桩顶弯矩。希腊 NTUA 土木工程学院 E.Garini 等(4c-0061)研究了强震作用下相邻建筑物地基土-基础-结构的相互作用。重点研究 19 层的广场建筑与布加勒斯特圣约瑟夫大教堂的相互作用。教堂建在广场上面,下面有一个嵌入的四层地下室和下面的桩。两个结构都建立在坚硬黏土和沙层上,总深度 42 m,地下水位较浅。通过建立一个二维有限元模型,对广场建筑和教堂建筑体系模型施加 1977 年 7.7 级 Vrancea 地震波,结果以加速度和位移时程曲线的形式呈现,同时给出了塑性变形的等值线,并对教堂单独振动时的反应和相邻建筑与教堂相互作用时的反应进行了比较。佛罗里达大学土木、环境与建筑工程系 J.A. Mercado (4c-0029)通过引入频率相关的弹簧和阻尼器来模拟土体刚度和阻尼特性,研究了结构的周期延长特性。在 OpenSees 中开发了典型建筑模型对影响高层建筑周期延长特性的主要变量进行参数化研究,包括建筑物的固有周期、有效结构高度、结构长宽比、支撑土的有效剪切波速等。其研究结果对高层建筑抗震设计中土在结构地震反应中的作用具有一定的参考价值。D. Nakamizo(4c-0052)介绍了考虑土-结构相互作用的地震设计荷载评估方法及实例研究,基于能量平衡方程,提出了一种评估结构设计中减少土-结相互作用(Soil-Structure Interaction)效果的方法。该方法生成 SSI 的响应缩减系数,由惯性相互作用和运动学相互作用两部分组成,基于该系数提出了直接基础、桩基础和有滑移直接基础的 SSI 评价方法。从工程的角度对有效评估建筑结构设计地震设计荷载具有重要的参考意义。

这一专题分会反映出的新进展与动向可归纳为:

(1) 随着数值模拟软件的丰富和成熟,数值模拟研究仍是与振动台试验配合研究土-桩-结构体系、复杂场地-城市交互作用、土-桩-结构相互作用对高层建筑动力性能影响等的重要手段。其新进展表现在:验证了振动台试验和数值模拟耦合方案对 SCI 效应研究的可靠性,分析了不同地形、建筑群结

构、输入地震动等因素对复杂场地-城市相互作用(SCI)效应的影响;明确了与基础嵌固结构相比,桩-土-结构相互作用会增加桩-桩结构的层间位移。而采用条形承台可减小结构层间位移;对教堂单独振动时的地基反应和相邻建筑与教堂相互作用时的反应进行了比较。

(2) 利用震动观测记录对桩筏基础抗震性能与土-桩-结构相互作用对高层建筑动力性能的影响研究等成为最新进展的前沿亮点。其新进展表现在:采用网格状深复合墙减小了桩顶弯矩;利用模型试验证明地基-结构相互作用延长建筑物的周期和增大阻尼。

(3) 基于能量平衡方程,提出了一种评估结构设计中减少土-结相互作用的方法,可从工程的角度对建筑结构设计地震设计荷载进行较合理的估算。

3.3 土-结构动力相互作用分析方法及应用

该专题有 8 个口头报告。口头报告主要涉及如下内容:印度坎普尔理工学院的 Burnwal(4c-0041)等,通过振动台试验和非线性有限元分析,研究了土工合成增强砂层的土-结构相互作用行为。通过建立一个三层抗弯钢架的数值模型,采用二维平面应变的方法,在 OpenSees 有限元框架中进行分析。同时采用具有非线性材料模型“压力依赖多屈服”的 4 节点 4 单元对土工合成材料加筋恒河砂进行建模。考虑到土-结构相互作用的影响,在试验中设置了不同的基脚宽度和边界条件(柔性和刚性基础)。除了有无土工合成材料外,同时也考虑了土工合成材料层厚度、土工合成材料顶层深度、土工合成材料长度、材料模型、建模方法、与土的相互作用等参数的影响,为抗震设计与分析提供依据,并将数值研究结果与印度坎普尔理工学院建筑缩尺模型系列振动台试验进行了比较和验证。欧洲地震工程培训和研究中心的 Cavalieri(4c-0002)等,建立了一种新的土-结构相互作用模型,探讨了其对建筑物脆弱性函数的影响。利用结构图建立了包含主要非结构构件的系统多自由度数值模型,以研究并推导脆性函数。同时,为减少推导脆性函数的计算工作量,建立了新的土-结构相互作用模型,采用简化的单自由度等效系统方法来表示每种类型的结构系统。印度鲁尔基理工学院的 Bharathi(4d-0011)等,研究了地震作用下垂直桩与斜桩、单桩与群桩的峰值位移,发现斜桩较垂直桩更优,群桩优于单桩,而斜群桩优于垂直群桩。东京工业大学的 Tamura(4c-0060)等,基于

动态离心试验,探讨了地震作用下地基梁刚度和桩端条件对桩性能的影响。进行了土-桩-上部结构模型的动态离心试验,在离心加速度为 $40g$ 的条件下进行,使用离心机试验,以基础梁的抗弯刚度和桩端条件作为试验参数。研究表明,在高刚度基础梁和固定桩端条件下,桩身位置引起的桩端弯矩差异相对较小。无论桩端条件如何,当基础梁刚度较小时桩端弯矩在中间位置最大。当桩端自由且上部结构惯性较大时后排的弯矩变小。EAFIT 大学的 Montoya-Noguera(4c-0027),在 Aburrá Valley 大都市区应用了一种新的地震小区划方法,探讨了土-结构相互作用与土壤非线性对结构性能评估的影响。通过蒙特卡罗模拟和一维波传播的等效线性分析,得到地表频谱加速度与出露岩石的频谱加速度的比值(即平均土壤放大因子),以此来识别 Aburrá Valley 大都市区所有冲积层的总体特征。塞萨洛尼亚里士多德大学的 Vratsikidis(4e-0020)等,通过环境噪声测量、自由和强制振动测试,研究了系统的动力特性和土-地基结构相互作用效应。在位于希腊北部的 EuroProteas 原型结构中进行了一系列环境噪声测量、自由振动和强迫振动测试,应用不同的数据解释方法,估计了系统的柔性周期增长和阻尼增大,并研究了其非线性动态行为。试验表明,地基-结构相互作用的周期延长和阻尼增大效应明显,系统的谐振频率比数值计算的谐振频率更低。Kobori 研究综合公司的 Kadota(4c-0017)等,提出了一种能确保挡土墙体完整性的施工和加固方法。根据 2016 年的熊本地震损伤调查结果,确定了固定砌块墙的高度和施工方向对损伤程度的影响,其内部砂浆强度及其完整性对其抗震性能有至关重要的影响。从有助于建立设计或施工具体措施的角度出发,针对固定砌块墙的脆弱性进行试验和模拟。结果表明,即使回填砂浆强度很低,由砌块与砂浆构成的挡土墙也不易发生垮塌等严重破坏,可作为一种确保墙体完整性的施工和加固方法,以避免挡土墙倒塌。休斯顿大学的 Moores(4e-0015)等,提出了周期阻隔材料理论,并开展了固频连续正弦波试验,分析了周期阻隔的振动衰减机理。将沟槽型波障与一维周期材料相结合,开发了一种侵入式周期阻隔系统。利用德克萨斯大学的实验设施,采用扫频、谐波、地震波等多种输入波,进行被动隔震试验。试验表明,在水平交叉线方向的激励下,设计的周期阻隔在理论频带间隙内有明显的衰减,周期阻隔对地面响应、加载距离对周期阻隔性能均有显著影响。

土-结构相互作用仍然是本次大会岩土地震工程领域的热点之一。这一专题分会的新进展与新动向可以归纳为四个方面:

(1) 振动台试验和数值模拟相结合的方法是研究土-结构相互作用的有效手段。其新进展表现在:从沉降控制角度,连续黏性模型(CVB)比连续刚性边界模型(CRB)更适合模拟土-基础系统的地震反应。

(2) 建立了一种基于建筑物脆弱性函数的土-结构相互作用模型;从抗震性能角度,斜桩较垂直桩更优,群桩优于单桩,而斜群桩优于垂直群桩;高刚度基础梁和固定桩端条件下,桩身位置引起的桩端弯矩差异相对较小。

(3) 研究了地基-结构相互作用对振动传播的影响和新型隔震措施。其新进展表现在:提出了一种评估结构设计中减少土-结相互作用效应的方法;地基-结构相互作用的周期延长和阻尼增大效应明显,系统的谐振频率比数值计算的固有谐振频率更低;提出了一种能确保挡土墙体完整性的施工和加固方法;开发了基于周期性材料的侵入式周期阻隔系统并验证了其隔振效果与隔振距离。

(4) 提出了一种基于地表频谱加速度与出露基岩频谱加速度比,评估土-结构相互作用和土壤非线性对结构性能影响的地震小区划方法。

4 地面破坏及场地地震安全

该专题有 8 个口头报告。口头报告主要涉及如下内容:日本大成建设株式会社 K. Haba(4b-0058)等通过数值模拟方法,计算得出了 2014 年日本长野县北部地震地表破裂过程,同时分析了断层岩体材料的不确定性对地表断裂的影响。研究表明,高性能计算有限元方法可以对各种模型和初始/边界条件进行分析,适用于考虑不确定性地表断层位移的概率评估。日本电力中央研究所 M. Sawada(4b-0034)等通过数值模拟方法,模拟了 2016 年熊本地震地表破裂过程,开发了一项评估地表破裂位移的并行有限元程序。研究表明,该程序可以对主断裂的滑动分布进行预测。不列颠哥伦比亚大学 M. Wesolowski(4e-0010)等基于 X 射线显微 CT 扫描方法,分析泥沙样品微结构特征。基于研究结果,提出了一种基于 X 射线显微 CT 扫描方法确定泥沙微颗粒结构的方法。印度尼西亚万隆理工学院 R. Mikhail(4f-0009)等基于日本学者 Imamura and Furuta 提出的 v_{s30} 地表地震动放大系数方法,将该方法应运于印度尼西亚全国地震动参数区划图的绘

制中。研究结果表明,该方法可以根据地表高程数据(DEM)计算得到地表地震动放大系数,并应用于区域地震动参数计算中。日本铁道综合技术研究所 T. Kanzawa(4b-0025)等基于数值计算方法,对桩基支撑的桥墩的地震响应进行了振动分析。基于研究结果,提出了一种桥墩抗震设计中动态变形特性的测试方法,并验证了该测试方法的适用性。加泰罗尼亚技术大学 F. López-Almansa(4c-0015)等基于西格玛点的卡尔曼滤波方法,对地表地震加速进行逆向分析。基于研究结果,提出了一种根据地表地震加速度值反推深部加速度值的非线性反卷积方法。北马其顿共和国地震工程与工程地震研究所 K. Edip(4c-0039)等基于数值模拟方法,分析了地震波在近场与远场传播的边界效应。基于研究结果,提出了一种针对地震波传播的边界效应的有限元与无限元的耦合计算方法。南京航空航天大学 S.L. CHEN(4c-0004)等基于有限元数值模拟方法,分析了海水-基岩海盆和海水-饱和海盆模型在纵波垂直入射下的响应。基于研究结果,提出了一种地震波入射海域地震波在近场散射的模拟方法。

这一专题分会的主要目标是通过数值分析、振动台试验及室内岩土试验等手段,探索了地震波传播边界效应、地震波在海盆中垂直入射下的响应、根据地表高程数据计算地表地震动放大系数的方法,根据地表地震加速反演不同深度的地震加速度的方法,为场地地震安全评价提供理论方法。

这一专题分会反应出的新进展与动向可归纳为:

(1) 通过有限元数值模拟方法,研究了地震地表破裂机制,提出了针对不确定性的地表断层位移的概率评估模型;

(2) 通过显微扫描方法,提出了一种基于 X 射线显微 CT 扫描方法确定泥沙微颗粒结构的方法;

(3) 针对地表地震动效应,提出了一种全球地震动参数区划图的绘制方法和一种根据地表地震加速度值反推深部加速度值的非线性反卷积方法,针对海底地震动效应,提出了地震波入射海域在近场散射的一种模拟方法;

(4) 基于数值计算方法,对地表建(构)筑物的地震响应进行了振动分析,针对建(构)筑物在抗震设计中动态变形特性的测试,提出了一种桥墩抗震设计中动态变形特性的测试方法。

5 地面运动

地面运动研究设置了 2 个口头分会,一个侧重

于地面运动预测,另一个侧重强震记录数据库及其服务与应用。共有 13 个口头报告。

5.1 地面运动预测

该专题共有 7 个口头报告。主要内容包括:M. Hoshiba(1d-0049)针对 2011 年日本“3·11 大地震”(M_w9.0)期间地震预警系统(EEW)因大尺度断层破裂导致的远距地震动预测低估和多次余震同时发生造成系统混淆而出现的地震动预测高估等问题,提出了一种新的地震预警方法,并将这种方法命名为“数值震动预测”。该方法应用数据融合技术精确估计当前波场分布,然后通过地震波传播模拟来预测随时间演进的波场。该方法除了估计地震波能量强度空间分布外,还实时估计地震波传播方向的空间分布。该方法不依赖于震源位置和震级等信息来预测地震动,因此即使断层破裂尺度较大或同时发生多个地震事件,也可以精确地预测地震动。2016 年日本 Kumamoto 地震(M_w7.1)后约 37 s,距离震中 70 km 外的 EEW 系统远程触发,该方法很好地预测了地震引发的强烈地面运动。Toru Ishii 和 Atsuko Oana(1d-0010)利用考虑震中方向性的机器学习方法,针对特定场地的地面运动模型开展了研究。收集东京关东平原及周边地区的水平地面运动记录作为训练数据,采用了“梯度增强决策树”机器学习方法,以峰值地面加速度 PGA、伪速度响应谱_pS_v和速度响应持续谱 TS_v为目标变量,选择矩震级 M_w、震源深度 H、震源距 X 和震中方位角 Δ 等作为输入特征参数,在随机重新排列一个特征参数而其他特征参数保持不变条件下,根据目标变量评价精度的变化程度来检验特征参数对目标变量的影响。研究发现对于 PGA、_pS_v和 TS_v,评估值与观测值比值的平均值几乎为 1,由此可见场地运动模型可以很好地再现观测值,但 TS_v比 PGA 或 _pS_v评价更为准确;震中方位角 Δ 对 TS_v的影响很大,几乎与 M_w、H 和 X 的影响一样或更大。由于评价模型考虑了传统预测方程中没有考虑的震中方位和持时,因此有助于定性和定量分析依赖于场地位置和周期的地震动特征,这种半自动评价模型今后有望反映出三维地震波传播特性差异。机器学习中大量的训练数据和进一步的数据插值及外推是必要的,特别是对于评估大地震、长持时、强地面运动。Atsuko Oana(1d-0037)等基于机器学习,对日本关东地面运动模型进行了研究。作者使用了日本关东地区国家地球科学与灾害预防研究所 K-NET 台站 138 个强震观测记录,分别测试了 PGA (cm/s²)、

5%阻尼 pS_V (cm/s)和几个周期的5%阻尼 TS_V (s)等目标变量,选用矩震级 M_w 、震源深度 H (km)、震源距 X (km)、震中方向 Δ (度)、基岩面深度 D_{28} (m)和表层30 m内平均剪切波速度 $A_{v_{S_{30}}}$ (m/s)作为机器学习的特征量,提出了基于梯度增强决策树算法的地面运动估算模型。结果表明, PGA 与 M_w 或 X 的关系和传统地面运动预测方程的计算一致,但对相同 M_w 和 X , pS_V ($T=1$ s)的幅度随震中方向 Δ 的变化而不同,这说明要建立先进的地面运动预测模型,就必须更多考虑区域特征。R. Ramkrishnan(1d-0013)等针对傅里叶变换(FT)、短时间傅里叶变换(STFT)和小波变换(WT)等技术在处理地震动这一非平稳信号方面的不足,采用了线性联合时频分析(LJTFA)方法中的Gabor变换来处理地震动数据,并用Gabor扩展来合成地震动。首先,从K-Net和Kik-Net强震台网数据库中收集了日本各地23次地震动记录时程,根据震级和震源距进行了分类和偏差校正;然后应用Gabor变换对地震动数据进行了时频分析;最后应用Gabor扩展和平均Gabor振幅系数重构并合成了新的地震动时程。合成后的地震动与实际记录相关性很高,且消除了不必要的频率分量和噪声,合成地震动反应谱与实际地震动反应谱相比结果可靠,且能更好地表现地震动特征和频率成分。该方法可以应用于监测台站和实际地震记录较少的地区开展结构抗震分析、设计及其他地震研究。Z X Liu(1d-0039)针对蒙特卡洛模拟方法中的传统谱表示方法(SRM)和本征正交分解法(POD)模拟生成随机地震动在概率密度水平上描述随机场概率信息的不足开展改进研究。首先基于多支点单分量完全非平稳地面运动场随机模型和相干函数矩阵,导出了多支点多分量完全非平稳地面运动随机场的统一谱分解表达,通过引入随机函数作为正交随机变量的约束,实现了多支点多分量非平稳地面运动的降维仿真,仅用两个基本随机变量即可准确地描述概率密度水平上的随机地面运动场。然后,根据多分量地面运动强度包络函数参数相关性的回归结果,提出了“中国地震动参数区划图”中 I_0 土层场地的三分量地震动四段强度包络函数参数值,最后基于松岛模型、四段强度调制函数、Clough-Penzien时变功率谱和复合相干函数模型生成了多支点、多分量完全非平稳地面运动加速度过程的代表性样本。该方案结合概率密度演化法(PDEM),可对复杂工程结构进行随机动力响应精确分析和可靠性评估。S. Midorika-

wa(1d-0025)等对1923年日本关东地震Ewing地震仪东京记录图进行了数字化以解释关东大地震东京的地面运动特征。地震记录图因记录器出格造成出现了不连续的4个记录线,考虑到两个水平分量和一个垂直分量轨迹臂长曲率不同,因此将三个分量记录从4个轨迹系列中区分开来。数字化后的水平记录显示,SW-NE和SE-NW分量的最大振幅分别为20 cm(周期为13 s处)和40 cm(周期7 s处),该结果与同一地点饱和Imamura地震图的解释基本一致。为了更定量地揭示东京关东地震的地面运动,需要进一步修复记录出格部分和进行仪器校正等研究工作。A. Mikami(1e-0008)等应用自动编码器机器学习方法对GNSS观测数据计算的最大剪切应变时序进行了回顾分析,其主要目的是研究该方法是否能够捕捉到地震前兆信息。本研究涉及2016年日本Kumamoto的 M_w 6.2和 M_w 7.0两次地震,自动编码器学习了从2011年Tohoku地震到2016年Kumamoto地震发生前几年的应变数据,假设该时段数据没有地震异常。然后,以该时段所有应变数据为输入,自动编码器重新产生输出结果,输出数据与原始数据的差值称为重构误差,假设重构误差与最大剪切应变数据中的异常有关。研究结果表明,在地震发生前,重构误差在同震大变形区显著增加,而在较小的同震变形区则不显著。因此,机器学习技术应用于地壳应变的时间变化分析可有效检测到地震前兆。

这一专题分会反映出的新进展与新动向可归纳为三个方面:

(1) 应用数据融合、机器学习与时频分析等方法技术在地震动的预测方面,其新进展表现在:开发了基于数据融合技术的“数值震动预测”方法,不依赖于震源位置和震级等信息即可实时估计传播方向上地震动的空间分布;“梯度增强决策树”机器学习方法对速度持时谱 TS_V 的预测结果相较 PGA 、 pS_V 更为准确,震中方位角对地震动参数预测结果的影响和震级、震源深度、震中距一样或更大;时频分析方法中的Gabor扩展合成的地震动与实际记录相关性很高,且消除了不必要的频率分量和噪声;基于蒙特卡洛方法中的SRM和POD的改进方法,可实现多支点多分量非平稳地面运动的降维仿真。

(2) 通过对日本关东大地震东京地区历史强震记录资料的数字化,定量揭示了关东大地震东京地区的地震动特征。

(3) 应用机器学习方法开展了基于GNSS资料

的地壳应变的时变分析,发现重构误差可有效检测到地震前兆信息。

5.2 强震记录数据库及其服务与应用

日本国家地球科学与灾害韧性研究所的 S. Aoi (1e-0004) 等基于日本气象厅 (JMA) 地震预警系统 (EEW) 提供的震源距、震级和地面运动方程 (GMPE) 开发了一个实时长周期地面运动预测系统 (LPGMs)。当 JMA 的 EEW 系统因地震被激活, LPGMs 就会基于全国地震网络获得的实时观测数据向用户提供预测信息。但根据日本的《气象服务法》,地震地面运动实时预测信息不得向公众开放,因此国家地球科学与灾害韧性研究所 (NIED) 进行实验性演示,以便向目标用户提供长期地面运动预测信息。在演示中,信息会根据各种目的自动处理,如电梯控制和向建筑管理人员发出警报,并提供能在地图上显示信息的 web 服务。NIED 后续还将扩大实验演示范围,以建立更好利用 LPGM 信息的有效方法。E. Schiappapietra (1d-0028) 等对地震动强度的空间相关性开展研究,首先统计地震动参数的空间相关性,如 PGA 、 PGV 、 PGD 、 SA 、 CAV 和 I_a , 并与其他现有模型进行了比较,目的是:(1) 识别影响相关结构的最大因素;(2) 量化不同事件和区域之间相关长度的可变性;(3) 根据地面运动预测方程 (GMPEs) 得到的残差对空间相关模型进行校准,分析了事件和地点校正残差的空间相关性,并研究确定了地震动强度空间依赖的因素。研究工作使用了 2016—2017 年意大利中部地震序列数据库,包括在 5 个月内发生的 9 次 $M_w \geq 5.0$ 地震,因为这些数据在相同区域,消除一些不确定性和评估事件之间空间变异性。研究初步结果有助于提供一个更准确的地震动强度图像,从而可以改进地震灾害损失模型,促进地震风险评估模型的发展。任叶飞 (1d-0084) 等介绍了构建中国强震动记录档案文件数据库 (Flatfile) 的概念和目的。主要研究进展为:(1) 我国 2007—2018 年获取的 2 270 次地震约 12 200 条强震动记录可为中国 Flatfile 构建提供数据支撑。(2) 给出了编制中国 Flatfile 的架构内容及其数据复核方法与编制标准。内容包括:事件、震源、台站、波形等元数据和源-场距离指标、强度测量等相关数据。(3) 提出了数据处理的流程与方案。作者设计了详细的流程图以找出高通滤波的最优拐角频率值,其判据涉及低频傅里叶谱幅值、信噪比、噪声窗内位移、速度和位移时程等参量。(4) 提出了场地数据库的构建方案。其方法包括钻孔数据、场地

分类与 H/V 谱比值的经验关系、 v_{S30} 与坡度范围的经验模型等三个方面。从而为我国强震动记录档案文件数据库 (Flatfile) 的编制提供了科学依据。F. Gatti (1d-0083) 等用合成地震动对日本 Kashiwazaki-Kariwa 核电站反应堆厂房瞬态结构响应的不确定性和灵敏度进行了研究。首先基于地震模拟器生成具有物理基础的 0~5 Hz 频率地震动,然后基于神经网络生成宽带 (0~30 Hz) 地震动。采用弹性 SSI (土-结构相互作用) 模型来表示结构构件,并在其基础上施加合成地震动。通过执行 200 次蒙特卡罗模拟,以评估最终结构响应的变化。链式分析的结果表明:由于合成高保真度数据驱动的预测方法对随机波动和数值分散的敏感性,因此采用这种预测方法会极大地影响结构响应,对核电厂等关键结构的设计和风险评估产生巨大影响。但这种方法为在综合不确定性量化框架下开发合成宽带地震动发生器提供了新思路。英国伦敦大学学院的 C. Huang (1d-0066) 等提出了模拟地震动特定地区验证的两级框架。第一级框架是基于已有地震动记录信号的比较,第二级框架是基于地面运动模型 (GMM) 的比较,使用经验 GMMs 作为基准进行验证。根据 2012 年 5 月 29 日意大利埃米利亚-罗马纳 6.0 级地震模拟的非弹性峰值位移 (S_{di}) 和等效循环次数 (N_e) 对两级框架进行验证。研究表明,单自由度非线性系统在模拟地面运动下的 S_{di} 值通常低于记录值和经验 GMMs 值,特别是短周期振动。 N_e 值略微低于记录值和经验 GMMs 值,但 N_e 在低频和低频模拟方法之间的过渡频带被高估,这可归因于低频和低频模拟地震动合成的能量在物理上不相容。此外,基于 GMM 的对比表明,特定区域 GMM 比通用 GMM 具有更高的预测能力,可以用于特定区域的模拟地震动验证。该文所提出的验证框架可以帮助进一步确保模拟地面运动的有效性,为基础构件抗震设计和地震风险评估提供参考依据。印度古瓦哈提技术学院的 N. Borah (1h-0004) 等针对印度东北地震 (EQ) 目录在去聚类 (删除前震和余震) 后地震数量显著减少这一现象,开展了去聚类对地震目录完整性的影响研究。首先采用广泛使用的动态窗对印度北主震事件进行识别,对去聚类前后的地震目录进行对比分析以检查去聚类的效果。此外,还分析了两个目录完整部分每年的累积地震数量。可以观察到,尽管 EQ 目录自 1950 年以来是完整的,但去聚类后地震目录中 EQ 累积数量显著减少。为了支持这种减少,该文给出了两

个观察结果。第一项观察将较大事件的发生与附近震源的EQ触发现象联系起来,而第二个观察表明,如果震源之间距离较近,在去聚类时可能定义为独立或不独立事件。因此,对每个震源的最大潜力以及该区域的地震活动可能被低估。上述结论通过8个震源和两个EQ事件(1950年和1988年)进行了验证。因此,在对目录进行去簇时,应该重视震源的相对位置,并在去簇之前评价震源发震潜力。

这一专题分会反映出的新进展与新动向可归纳为:

(1)在强震记录及其应用方面的新进展表现在:日本NIED研发了长周期地震动预测系统,当地震预警系统被地震被触发后该系统就会基于实时观测数据向特定用户提供长周期地震动预测信息;地震动强度的空间相关性研究结果助于提供更准确的地震动强度图像,从而可以改进地震灾害损失评估模型。

(2)在强震数据库的构建方面,相关研究给出了编制中国强震记录和强震台站数据库的内容架构、数据复核方法与编制标准。

(3)在强震数据资料的验证及数据处理方面的进展主要表现在:高保真度数据驱动的地震动预测方法会极大地影响结构的地震动响应,对核电站等关键结构的设计和风险评估产生巨大影响;提出了可用于特定区域的模拟地震动验证的两级框架,该验证框架可进一步确保模拟地面运动的有效性;在对地震目录进行去聚类时,应该重视震源的相对位置,并在去簇之前评价震源发震潜力。

6 结语

本届世界地震工程大会受到全球新冠病毒疫情的影响,会议采取线上线下方式举行,会议取得了巨大成功。本次大会共提交论文2 583篇,线上线下参会代表超过3 000人,会议采取大会特邀报告、邀请报告、普通专题分会、特别专题分会、项目专题分会的方式进行了交流。反映了在地震工程领域最新研究和工程实践的成果,可以看出本届大会是一次规模宏大、涉及领域广泛、学术水平高、反映进展全面的学术交流大会,日本地震学会高度重视大会组织,并做了大量、细致、有效的会议组织工作,尤其是在如此多线上视频参会的情况下,为各个分会的顺畅交流提供了良好的技术保障,同时为了使全球不同时区的参会代表都能够分时共享大会的交流报

告,组委会还专门将所有报告视频在网上保留至2021年12月底。大会对促进国际地震工程领域科技创新与工程实践的进步发挥了重大积极作用。

岩土地震工程领域的最新进展和研究动向主要集中于砂土液化、斜坡地震破坏,土-结相互作用,地面破坏与场地地震安全、地面运动研究等5个方面,其中砂土液化仍然是岩土地震工程领域的研究热点。在此领域的亮点进展可归纳为如下七个方面:(1)通过已发生的液化灾害实例进一步验证已有的液化评估模型与方法,提出了改进的方案;(2)提出了砂土液化的主动预防方法与技术,涉及到主动降低控制地下水位、排水测井控制土体饱和度、微生物诱导去饱和和作用(MID)等方法;(3)通过对2018年帕鲁7.5级地震引发的大规模低角度滑坡进行现场调查、测试及室内试验,确定其滑动机制为砂砾石层液化诱发的碎屑流;(4)验证了动力圆锥贯入试验(CPT)试验对土层液化势进行评价的有效性及其与SPT试验的优缺点,进而探讨了概率液化危险性分析(PLHA)的优势与应用前景;(5)基于地震诱发滑坡的现场调查、三维数值模拟、强震动观测、离心机试验、振动台试验提出了斜坡稳定性评价的新方法;(6)对大型土-桩-结构体系的抗液化性能与群桩基础动力相互作用研究,考虑不同地形、建筑群结构、输入地震动等因素对复杂场址-城市相互作用(SCI)效应的研究,利用地震观测记录对桩筏基础抗震性能与土-桩-结构相互作用对高层建筑动力性能的影响等成为前沿亮点;(7)在强震地面运动研究方面利用数据融合技术、机器学习、时频分析中的各种变换技术,提出了新的预测技术和方法。

说明:文中作者后面括号中编号为论文集中文章编号,如(4b-0051)。文后参考文献仅列会议论文集[1],文章中评述和引用的报告和论文共87篇,如读者对相关论文感兴趣可根据文章编号查阅相关论文。

致谢:衷心感谢中国地震局国际合作司、甘肃省地震局(中国地震局兰州地震研究所)和中国地震局工程力学研究所为作者线上参加本次大会提供的大力支持。

参考文献(References)

- [1] The Japan Association for Earthquake Engineering (JAEE). Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Sendai, Japan, 2021.