

王兰民,夏坤,刘琨,等.第16届欧洲地震工程大会:岩土地震工程研究进展与动向综述[J].地震工程学报,2018,40(6):1133-1152.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1133

WANG Lanmin, XIA Kun, LIU Kun, et al. A Review of Research Trends and Progress in Geotechnical Earthquake Engineering: the 16<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1133-1152. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1133

## 第16届欧洲地震工程大会： 岩土地震工程研究进展与动向综述

王兰民<sup>1,2</sup>, 夏坤<sup>1,2</sup>, 刘琨<sup>1,2</sup>, 王谦<sup>1,2</sup>, 贾鹏<sup>1,3</sup>, 柴少峰<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;  
3. 中铁成都轨道交通健康管理技术有限公司, 四川 成都 610032)

**摘要:**第16届欧洲地震工程大会于2018年6月18—22日在希腊塞萨洛尼基市召开,笔者全程参加了本次大会。本文简要介绍了大会的概况,通过对大会相关交流报告和论文的分析,重点对地震危险性、工程地震和强地面运动,土动力学,场地效应与小区划研究,岩土地震工程等4个主题分会和“欧洲—中国地震工程与风险合作”1个专题分会的相关研究进展进行了综述,并阐述了欧洲抗震设计规范(Eurocode8)推广应用与修订、韧性城市、新近地震启示、大尺度地震工程试验装备和土-基础-结构相互作用等方面的研究动向。可为我国相关领域研究提供参考。

**关键词:**第16届;欧洲地震工程大会;岩土地震工程;土动力学;研究进展与动向

**中图分类号:** TU435

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2018)06-1133-20

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1133

## A Review of Research Trends and Progress in Geotechnical Earthquake Engineering: the 16<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering

WANG Lanmin<sup>1,2</sup>, XIA Kun<sup>1,2</sup>, LIU Kun<sup>1,2</sup>, WANG Qian<sup>1,2</sup>, JIA Peng<sup>1,3</sup>, CHAI Shaofeng<sup>1,2</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Key Lab of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. China Railway Chengdu Rail Transit Health Management Technology Co., Ltd., Chengdu 610032, Sichuan, China)

**Abstract:** The 16<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering was held in Thessaloniki, Greece, June 18—22, 2018. In this paper, general information disseminated at the conference is briefly introduced. Recent research progress in four topics is summarized: (1) seismic hazard, engineering seismology, and strong ground motion; (2) soil dynamics, site effects, and microzonation studies; (3) geotechnical earthquake engineering; and, (4) EU-China cooperation in earthquake engineering and risk. Moreover, the trends in application and revision of Eurocode-8; resil-

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51478444)

第一作者简介: 王兰民(1960),男,陕西蒲城人,博士,研究员,博士生导师,主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究工作。

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

ient cities, community and infrastructures; lessons from recent earthquakes; large scale facilities for earthquake engineering purpose, and soil-foundation-structure interaction, are discussed. The authors expect the paper may provide a valuable reference for related research fields in our country.

**Keywords:** the 16<sup>th</sup>; European Conference on Earthquake Engineering; geotechnical earthquake engineering; soil dynamics; research trends and progress

## 0 引言

第 16 届欧洲地震工程大会于 2018 年 6 月 18—22 日在希腊塞萨洛尼基市塞萨洛尼基音乐厅召开,会期 5 天。本届大会由欧洲地震工程协会主办,希腊地震工程协会承办,塞萨洛尼基·亚里士多德大学协办,SYMVOLI 会议文化管理有限公司承办会务。大会设置了 24 个主题 64 个分会(Sessions)和 23 个专题分会(Special Sessions)的交流,主题包括地震危险性、工程地震和强地面运动;土动力学;场地效应与小区划研究;岩土地震工程;土-基础-结构相互作用;结构性态设计;室内、现场试验与结构健康监测;大尺度地震工程设施;钢筋混凝土建筑物的抗震设计与分析;钢结构抗震设计与分析;石建筑物抗震设计与分析;桥梁抗震设计与分析;特殊结构抗震设计与分析;结构抗震改建与加固;海啸与结构和基础设施的风险评估;历史遗迹的抗震性能与翻建;主动与被动结构控制系统;生命线地震工程;重大建筑物、基础设施、多功能系统和工业设施的风险评估;地震损失评估与减轻的经济和社会模型;民防与地震风险减轻政策和方法;欧洲规范 8 与抗震设计规范;近期地震启示;基于新一代、性态和韧性设计的结构与系统。大会交流了 4 个特邀报告、1 个第五届尼古拉斯·安布拉斯讲座报告、30 个邀请报告、899 个口头报告、411 个展板报告以及 1978 年塞萨洛尼基地震纪念分会的报告。来自 67 个国家的 1 500 多位代表参加了大会,其中,91.6% 为国际代表,328 人为新科学家和研究者。大会接收摘要 2 000 多篇,论文共 1 331 篇,其中,提交论文最多的前十一个国家为意大利(13%)、日本(9%)、希腊(8.4%)、英国(8.4%)、土耳其(5%)、法国(4.8%)、瑞士(4.3%)、中国(4.1%)、美国(3.8%)、德国(2.6%)及伊朗(2.6%)。

按照参计划,笔者重点亲自参与了地震危险性、工程地震和强地面运动,土动力学,场地效应与小区划研究,岩土地震工程等 4 个主题分会和“欧洲—中国地震工程与风险合作”1 个专题分会的交流。本文对岩土地震工程领域分会交流报告及其相

关论文反映出的主要进展进行了综述,以期为我国相关研究提供借鉴。

## 1 地震危险性、工程地震和强地面运动

该主题是本届大会第一个主题,也是报告和论文最多的几个主题之一。该主题在会上设有 4 个主题报告,6 个分会场共 49 个口头报告。这一主题分会的主要目标是为了满足基于性态抗震设计的设计地震动需求,考虑大地震的关联性、余震序列的破坏性,以更科学的概率分布模型,更全面的强震动记录及更先进的数据处理方法,来获取更准确的设计地震动参数。此外,该主题也反映出以往地震危险性分析都是以国界为边界的局限性,强调了地区地震活动的整体性与关联性,显示出在此方面已经开始地区合作的动向。

主题报告涉及如下内容:英国 John Douglas 教授对地震危险性分析中的逻辑树方法进行了改进,赋予了各潜在震源一个可变的贡献量,使其随着地震记录的累积而自动跟进,并用欧洲地震实例验证了该方法。德国 Fabrice Cotton 教授利用傅里叶域上的广义反演方法获取了影响地震动危险性分析不确定性的影响因素。美国 Aspasia Zerva 教授针对生命线工程提出了地震动空间变异性的的重要性,主要研究了地震动转动分量、土结相互作用引起的地震输入改变等影响。意大利 Roberto Paolucci 教授建立了一个三维地震波数值模拟模型,可用于地震危险性分析,并对伊斯坦布尔地震进行了案例分析。

在第一分会场,意大利 Ezio Faccioli 针对意大利北部地震危险性分析的 SIGMA 项目进行了综合验证。希腊 Christos Karakostas 介绍了 2013 年布设于希腊 Lefkas 市的超密集强震台网,并分析了多次地震的强震动空间变异性。伊朗 Touraj Taghikhany 利用近断层地震动的非平稳随机模型建立了伊朗西北大不里士市的近断层拟合地震动。俄罗斯 Dmitry Melkov 教授介绍了一种基于小波分析的人造地震波合成技术。美国 Pablo Heresi 博士生介绍了一种新的峰值非线性位移地震动预测模型。

在第二分会场,意大利 Chiara Smerzini 建立了一种三维数值模拟方法,研究近断层地震动空间变异性。希腊 Basil Margaris 统计了希腊台网记录的 1973—2015 年间所有的强震记录,并且收集了所有台站的场地剪切波速数据。新西兰 Karim Tarbali 博士介绍了新西兰正在开展的地震危险性概率分析项目“Cybershake NZ”。美国 Luis Ceferino 博士生建立了一种地震断层破裂模型。中国 Weiping Wen 博士研究了主震、余震序列地震动转动分量对建筑物的破坏机理。阿尔及利亚 Nouredine Bourahla 教授利用神经网络方法系统研究了影响地表峰值加速度的决定因素。日本 Atsushi Nozu 所长介绍了一种在日本应用较多的伪点源模型,该模型参数较少、简单、且能准确计算目标场地地震动参数。伊朗 Majid Mahood 验证了一种利用单条地震记录 P 波预测震级和震中距的方法,该方法可用于地震预警。意大利 Claudio Amadio 教授提出,为满足基于性态的建筑物抗震设计需求,使用多场景地震危险性分析方法,以获取更可靠的地震输入。法国 Cedric Giry 对法国 19 世纪之前的历史地震进行了震级重新评估。

在第三分会场,墨西哥 Mario Ordaz 教授考虑到拉丁美洲及加勒比海域国家历来都是各自完成本国地震危险性分析工作,他首次跨国界对整个地区进行了 PSHA 分析。意大利 Francesca Pacor 做了近场地震动记录的一个统计,分析了震源机制对近场地震动特征的影响。伊朗 Behnam Maleki-Asayesh 博士生研究了伊朗高原东南部和西北部地震爆发对方断层应力的影响。哥伦比亚 Juan Reyes 开展了该国首都波哥大市(深软覆盖层)的三维地震动模拟工作。马其顿 Zoran Milutinovic 教授介绍了西巴尔干国家地震危险性项目(BSHAP),该项目成果地震动区划图将用于欧洲抗震规范 8。土耳其 Shaghayegh Karimzadeh Naghshineh 利用土耳其埃尔津詹 1992 年  $M_w 6.6$  地震资料对无强震记录的 1939 年  $M_s 8.0$  地震进行了建模。意大利 Francesca Bozzoni 利用地震动记录建立了意大利南部小地震衰减关系。意大利 Lucia Luzi 建立了一个欧洲地震动数据库,该数据库震源信息、传播距离、场地条件一应俱全,以便于所有工程地震学家做相关研究工作。美国 Robert Edward Kayen 教授对 2016 年意大利中部地震地表断裂进行了无人机三维地形扫描及地面激光扫描,研究了该地震独特的地表破裂过程。

在第四分会场,意大利 Robin Gee 介绍了全球地震风险模型项目(GEM)的进展。美国 Pablo Heresi 博士生研究了设计反应谱的获取方法,认为应考虑不同地震对同一场地的反应谱变异性,而不是只简单的以震级、距离等几个参数计算。意大利 Giovanni Lanzano 分析了欧洲地震动数据库,得出几个适用于欧洲的地震动预测模型。英国灾害分析师 Gordon Woo 指出,由于大地震发生之间偶尔的关联性,地震活动性的泊松模型不再适用。毕加索 Eugenio Chioccarelli 与上述认识类似,指出余震序列取决于主震震级,也不符合泊松分布,但是对建筑物破坏却起着重要作用,因此他回顾了余震危险性概率分析方法(APSHA, 2009),并以意大利震例验证了该方法。中国任叶飞博士研究了汶川地震之后 5 年内的余震序列。印度 Mukat Lal Sharma 研究了喜马拉雅地区地震发生的条件概率,同样证明泊松分布的不足。俄罗斯地球物理研究所的 Dmitry Melkov 教授以复杂概率地震危险性评估方法,研究了北奥塞梯—阿拉尼亚地震危险性区划图。英国 Deyu Ming 提出了一种具有空间相关性的地震动模型的一级估计算法。法国 Elif Oral 博士后基于近场地震动记录的稀缺,建立了一种包括运动破裂和有限断层效应的三维谱元近源效应建模方法。

在第五分会场,法国 Pierre-Yves BARD 针对塞萨洛尼基市附近的欧洲工程地震试验场,对比了全概率随机方法与卷积分析方法这两种地震危险性分析方法对场地效应整合的效果,结果表明前者可反映场地效应的更大变化。沙特阿拉伯 Vladimir SOKOLOV 介绍了对阿拉伯半岛开展概率地震危险性分析的输入数据、分析程序和计算结果。意大利 Mariano Angelo ZANINI 博士建议了一种基于可靠性的概率地震危险性评估方法,已解决在结构设计中考虑极罕遇地震的问题。伊朗 Majid MAHOOD 副教授利用 14 个台组成的一个区域台阵浅源地震观测资料,研究了德黑兰地区岩石圈的衰减参数( $Q_c$  and  $Q_s$ ),并给出了频率相依的计算公式。意大利 Cecilia I. NIEVAS 介绍了在抗震设计中使用多方向设定谱方法的目的,使工程结构的抗震性能不受入射波方向影响。日本 Tadanobu SATO 教授研究了地震动相位的随机过程及其固有特征,提出了可模拟更真实地震动相位的方法。阿尔及利亚 Faouzi GHERBOUDJ 利用经验格林函数方法对 2003 年 Bumerdes 6.8 级地震及 5.7 级强余震的地面运动进行了模拟,取得了与观测记录吻合较好的结



果。英国 Panagiotis MERGOS 基于遗传算法提出了强震记录的多目标优选方法,该方法既可选出谱匹配性好的强震动记录,也可很好地考虑工程结构的抗震条件。罗马尼亚 Emil Sever GEORGESCU 回顾总结了布加勒斯特建筑研究所对 1977 年 3 月 4 日 Vrance 地震的研究,认为罗马尼亚在地震烈度估计、局部地质条件对地震动的影响、地震波的传播规律等方面有了长足的进展。德国 Friedemann WENZEL 教授针对概率性分析方法提出了补充的区域风险量化的评估矩阵,可为城市管理者提供地震灾害风险的全面描述。意大利 Alberto MICHELINI 介绍了新一代意大利版 SHAKEMAPS,即 2006 年意大利基于美国 USGS 的 Shakemap 研发的意大利版 SHAKEMAPS,目前的升级版吸纳了意大利的最新研究成果和强震动记录数据。

在第六分会场,德国 Graeme Weatherill 教授基于最近强震动记录的极大丰富,提出构建新的欧洲地震动预测方法及模型。希腊 Anastasia Kiratzi 教授利用 2017 年希腊科斯岛—土耳其博德鲁姆  $M_w 6.6$  地震近场地震动记录,分析得出断层倾角及倾角极性是控制近场地震动量级的主要因素。意大利 Maria Infantino 博士生应用 Roberto Paolucci 教授建立的三维地震波数值模拟模型,验证了意大利北部、希腊塞萨洛尼基、中国北京、土耳其伊斯坦布尔等历史地震记录。伊朗 Saeed Soltani 博士生利用地脉动测试,证明德黑兰北部地脉动与里海波浪无关。英国 Ilya Sianko 对土耳其马尔马拉地区地震危险性分析结果进行了验证,证明通用的地震危险性概率分析方法(PSHA)对强震记录较少的发展中国家是适用的。哈尔滨工业大学的翟长海教授提出了一种基于显著半周期的脉冲类地震动识别算法。土耳其 FiratSonerAlici 针对基于性态的抗震设计要求,对大量强震动记录进行了地震输入能量分析。美国 Bingming Shen-Tu 应用最新的活动断裂地质信息、GPS 数据的运动模拟应变率和所有可用的历史地震数据,对亚美尼亚及其周边地区进行了地震危险性分析。罗马尼亚 Paul Olteanu 博士生对罗马尼亚平原进行了位移反应谱值的预测。

## 2 土动力学

土动力学是本届大会的第二个主题,但由于该主题只包括了土和复合土动力特性试验研究和液化机理等较窄的范围,因此口头报告只安排了 1 个分会,共交流了 12 个报告。该主题的主要目标为:研

究天然土和复合土的动力特性参数及其计算公式,为土体动力反应计算提供更准确的参数和动力学模型;研究土体液化、变形规律,寻求更科学合理的评价方法;研究复合土的动力特性,改善土体的抗震性能。该主题涉及内容如下。

Vasiliki TSAPARLI 等基于简化的经验液化评估程序的局限性,通过数值证明是由 P 波的物理机制来完成传播和液化,并借助分析基督城中许多台站的记录来验证该机制,进一步分析地层和岩石露头的垂直记录,提出了垂直加速度可能是导致水平地面液化的另一个因素。Angelos TSINARIS 等考虑到广泛的剪切应变振幅,通过单调三轴试验、共振柱试验和循环三轴试验研究了橡胶含量对轻质火山土/粒状橡胶混合物的强度和动力响应的影响,提出了轻质火山土/橡胶混合物的弹性模量和剪切强度随着橡胶增加而降低,同时,给出了广泛应用的 Mohr-Coulomb 破坏准则的修改形式。Muhammad UMAR 等通过对流动型山体滑坡的实地调查,对原状和重塑火山土进行了单调和循环不排水三轴和大应变扭剪试验,提出了 Aso 浮石土具有流动破坏的趋势,其特征是在受到单调剪切时大剪切应变的突然破坏,并提出在循环剪切应力条件下,随着大剪切应变的快速发展,超孔隙水压力逐渐增大是流动破坏的前兆。Julijana BOJADJIEVA 等基于三轴和模型试验,对 SKOPJE 沙进行了 14 个动三轴负荷控制循环试验和 3 个连续振动台试验,提出了天然冲积砂对孔隙参数高度敏感,在特定的应力条件下可以证明液化势和变形的发展。Ke LIANG 等采用 GCTS 三轴仪对不同相对密度的南海南沙岛饱和珊瑚砂在不同围压应力水平下进行了一系列不排水多级应变控制循环三轴试验,分析了剪切模量  $G$ 、小应变剪切模量  $G_0$ 、剪切模量比  $G/G_0$  和阻尼比  $D$  对珊瑚砂的影响,结果表明珊瑚砂的剪切模量和阻尼比与砂质土有显著差异,提出了一系列经验公式用于预测珊瑚砂的  $G_0$ 、 $G/G_0$  和  $D$ 。Eliane YOUSSEF 等通过在 FLAC<sup>2D</sup> 软件中对 MASW 程序进行建模来研究土壤空间变异性对分散曲线的影响,提出并分析了横向土壤变化的影响,即水平自相关距离( $\theta_x$ )和变异系数(COV)对物理实现的选择。Siavash MANAFI KHAJEH PASHA 等通过对砾石-轮胎混合料(GTCM)进行了一系列固结不排水循环三轴试验,研究了砾石含量和有效围压对 GTCM 动力特性和抗液化性能的影响,提出了初始剪切模量和抗液化性能受 GTCM 砾石含量的高度

影响,且 GTCM 样品在低围压下具有较高的抗液化性能,提出了一个新的经验公式,将 GTCM 试样中最大和最小孔隙比与砾石含量相关联。BR MADHUSUDHAN 等利用循环简单剪切试验研究了干砂-橡胶轮胎碎片混合料的动力特性,与相同测试条件下进行的循环三轴试验的结果相比较,评估了剪切模量和阻尼比等动力特性,确定了加载循环次数对剪切模量和阻尼比的影响,展示了砂和橡胶轮胎碎片混合物作为低层建筑物隔震材料的潜力。Keisuke ISHIKAWA 等通过对液化地区居民进行问卷调查,分析该地区地下水位分布与土壤,并进行了有效应力分析,通过简单的模型试验验证了液化引起的超孔隙水压力传播对基础结构变形行为的影响,提出了复垦土壤和全新世砂层产生的超孔隙水压力扩散到上层,在有效应力损失的余震中,木材房屋由于液化而下沉倾斜。Juan BERNAL-SANCHEZ 等研究了橡胶-土壤混合物(ShRm)中大剪切应变振幅(0.05%~1%)的动力特性,评估了橡胶百分比、尺寸比、剪切应变幅度和循环次数的影响,提出了 ShRm 的动力特性受到应变振幅周期数的影响,添加 30%的碎橡胶颗粒显著增加了砂粒抵抗循环荷载的能力,导致强度和阻尼比的降低。Sijia LI 等研究了两种类型的混合异步吸收层,用于再现无界介质中的弹性波传播,即 Kosloff 吸收层和 Rayleigh 吸收层,用 Lamb 的测试说明 HA-Kosloff 和 HA-PML 两种方法在准确性和 CPU 时间方面的效率并分析了差异。Konstantinos KASSAS 等基于循环简单剪切试验(DSS),确定了小应变剪切模量及其随着剪切应变的增加而减小。

### 3 场地效应与小区划研究

该主题是本届大会设置的第三个主题,口头交流的报告包括 1 个主题报告和 4 场分会报告的 40 个口头报告。该主题主要目标为:研究认识场地条件对地震动加速度峰值和频谱影响的规律,特别是对地震动的放大效应,提出更全面、更准确的场地放大效应评估方法;研究局部场地抗震性能评价的各种方法,使小区划分依据和指标更加科学合理。具体交流内容如下。

Sinan Akkar 教授所做的主题报告结合概率性地震危险性分析方法和近断层地震方向效应模型,提出弹性地震设计反应谱修正方案,并进一步分析了方向性效应对设计谱放大系数的影响规律。

Chiara Felicetta 等认为场地地层和地貌形态会

影响场地类别划分,根据欧洲规范(Eurocode 8)将基岩场地直接划分为 A 类场地将影响其他类场地地面运动预测方程的准确性,他们基于地质、地貌形态和地球物理等参数提出六个基岩参考场地的划分指标,重新划分意大利用于提出地面运动方程的 A 类场地,提出基岩参考场地新的地面运动预测方程。Saburoh MIDORIKAWA 教授等基于 2011 年日本大地震强震记录提出场地非线性放大模型,通过分析土层-基岩台站加速度反应谱不同周期段谱比评价场地放大效应,研究表明场地非线性放大系数是等效剪切波速  $v_s(30)$  和基岩参考台站峰值加速度的函数,发现软土-中软土场地非线性效应明显弱于半经验方法给出的结果。CASHIMA (Cadache seismic hazard integrated multidisciplinary assessment)项目旨在推进特定场地地震危险分析方法在中低地震活动性地区应用,Fabrice HOLLENDER 博士等总结了该项目已有成果,但由于中低地震活动区地震数据有限,严格的基岩参考场地难以选取,标准地面运动预测方法难以满足要求。项目基于 Kik-net 强震台网数据校正强震台站场地放大系数,考虑台网环境与欧洲场地的相关性,只要基岩场地地面运动方程不断更新,特定场地地震危险性分析方法就可以运用到中低地震活动区内。Gheorghe MĂRMUREANU 博士等利用强震数据谱加速度比定性研究场地非线性地震反应,发现放大因子随着输入地震震级的增加而减小,谱加速度比和土层非线性是震级的函数。

Sara TOUHAMI 采用三维谱单元法模拟希腊凯法利尼亚岛 4.6 级地震近场地震动,通过对比无地形水平成层模型与实际地形模型计算结果,定性分析地形地貌条件对地震动预测方程的影响,地形在地震动预测方程中是难以量化的。在所研究的场地中,考虑三维地层结构和场地条件,能够反映震害的局部效应。Jingxiong WANG 博士等利用谱单元法分析 SV 波面内入射情况下斜坡地形场地地面运动放大效应,考虑斜坡角、坡高、介质波速和入射角对坡顶坡底地震动的影响,发现坡顶垂直放大随着坡高和倾角的增大而增大,入射角影响坡面地震动分布形态。Evangelia SKIADA 博士等采用时域有限元方法分析峡谷场地在双向地震作用下的场地反应,选取 30 个强震记录和 1 个脉冲波进行参数化分析,与单向输入分析对比发现,地形不规则对场地地面反应的影响更加合理。Stefan Florin BALAN 等分析土层沉积条件对场地非线性地震反应的影响发

现,场地效应并不完全是非线性效应的临界值问题,地震发震特征影响非线性场地效应。Susumu OHNO 副教授等基于三维有限单元方法对日本东北部仙台盆地长周期地面运动的方向性效应进行研究,通过对盆地东部和北部的两次强震进行模拟发现,东部地震情况下地震动 S 震相幅值大于其他震相,长周期地震动集中在盆地南部,北部地震情况下面波震相幅值大于 S 震相,长周期地震动沿盆地边缘从南到北分布,与强震观测结果一致,但是地震动峰值位置发生偏移,需要对盆地结构模型做更进一步调整。Karim YOUSEFI-BAVIL 等采用地球物理勘察、岩土工程勘察等多手段分析构建土耳其高烈度地震危险区盆地三维结构模型,包括 29 处主动、被动微震监测,14 处电法测深和 30 处钻孔勘察,高密度面波勘察和微震阵列勘察可获取高分辨率一维波速剖面,电测深可确定基岩埋深,微震  $H/V$  法确定场地卓越周期,结合钻孔数据和三维高程模型建立完整场地结构模型,为进一步研究场地效应和地震危险性区划提供重要依据。Elias EL HABER 博士采用有限差分和统计分析方法研究近地表岩土波速二维变化对地面运动空间分布的影响规律,假设波速场为二维稳态随机场,波速统计自相关距离度量场地各向异性程度,分析发现场地波速变异系数明显控制场地地震反应分析结果,其次是波速水平自相关距离,滞后一致性分析表明长周期地震响应存在明显空间一致性,与体波、面波传播特性有关。Carlos GORDO-MONSO 副教授研究了 2011 年 5 月发生在西班牙东南部 5.1 级地震,再次证实近断层地震动有明显的方向性脉冲效应,其震害明显高于断层其他方向,他研究发现该地震特征周期在 0.6 s 的方向性脉冲引起超过预期的高强度地面运动,造成小震级大震害。通过对比简单脉冲和强震记录的反应谱提取地震动脉冲效应,给出近断层方向性速度脉冲在概率地震危险性分析和建筑抗震设计规范中的应用思路。Valeria SOTO 等结合 2012 年 2 月智利莫勒地震震害分布、地球物理勘察和数值计算研究了该地区场地效应,结果表明,建筑物震害分布在一个约 1 km 长的狭窄区域表明可能存在局部地震放大效应。受损建筑物的带状分布可能与盆地深度(一维场地放大)有关,而盆地形状影响较小。Yogendra SINGH 博士基于有限单元法对规则三角形山体进行参数化分析,通过与自由场地震反应分析对比给出三角形山体的地形放大系数,最后给出地形效应引起的谱放大函数。Costas

Papazachos 等针对天然气管线工程沿线剪切波速评价提出了快速可靠测试方案,在前期设计阶段进行单台微震监测,采用  $H/V$  获取一维波速剖面,这种方法极其适用于管线工程,波速剖面的评估和地面响应分析的结果证明了所提方法的有效性。Antonio COSTANZO 等采用微震监测评估意大利圣施洗约翰教堂场地及结构的地震反应,为其加固提供可靠的地震危险性分析结果;分析发现教堂附近自由场地的谱比卓越周期与教堂结构响应周期接近,而附近的塔楼结构周期则偏离场地周期,震害现象也证实了这一结果。

Gabriel BERNAL 工程师等以波哥大特区为例,建立三维地层结构模型,结合岩土勘察数据给出区域物理参数随机分布特征,形成区域性格化场地,基于节点进行一维地震反应分析,地震输入考虑震源和路径的随机性,最后给出不同发震周期的地震危险性灾害曲线。该模型适用于波哥大的地震危险性评价和震后自动震害评估系统的建设。Emeline MAUFROY 副教授等以 2016 年意大利 6.0 级地震为例提出了快速评价小尺度范围内场地地形效应评价技术。以往研究表明地震动放大的地形表面曲率与地震波长存在较好的线性关系,若场地波速结构已知,地表曲率与频率的关系就能够表征场地地震动放大作用。作者通过对比频率-尺度曲率和结构震害分布发现存在较好的空间相关性,以此可快速评价小范围场地地震效应。Konstantia MAKRA 等基于深沉积盆地强震观测和微动监测数据评估场地放大效应,从微震数据中提取面波频散曲线并反演一维波速结构,进而进行地震反应计算,发现基于反演模型的理论计算结果相比现场监测放大作用出现在高频段,表明场地覆盖层厚度较大。Kazuya MITSUJI 教授利用微震观测数据评估山形盆地局部场地效应及不规则基岩面对地震动特征的影响,微震谱比分析显示盆地西部、北部软土地特征频率在 1 Hz,而盆地西部边缘达到 2.0~6.0 Hz,南部在 2.0 Hz 左右,对比发现基于特征频率和覆盖层厚度给出的平均波速与标贯试验给出波速相关性较好,微震谱比幅值与强震观测结果也较为一致,表明高密度微震监测与强震观测数据能够更加精确地评估山形盆地的场地动力特征。Achilleas G. PAPADIMITRIOU 副教授采用有限差分法分析基岩形态对沉积山谷场地地表弹性反应频谱的影响,通过控制沉积覆盖层二维长宽比分别模拟狭窄、正常、宽广河谷场地,研究发现窄河谷中部短周期放



大明显,正常河谷中部放大周期接近建筑结构共振特性,而宽河谷边缘出现明显的放大效应,与以往震害及强震观测结果一致。Chuanbin ZHU 博士利用非线性数值计算方法研究盆地场地基岩沉积层界面形态对地震动放大和持续时间的影响,采用反应谱放大因子表征盆地场地的二维效应,对于河谷场地放大因子位于 1.3~1.8 区间,放大周期在 0.1 s 到最深土层的一维特征周期。Ioannis GRENDAS 博士生等利用 Gauss-Newton 方法对希腊地区 136 个地震数据进行反演,获取震源、路径和场地对地震动的影响,给出矩震级、拐角频率、品质因子、几何衰减因子、场地传递函数等参数估计,发现反演参数稳定,与以往研究结果相符,场地传递函数和谱比结果一致性较好,说明这种非参考台站方法对于场地效应评估较为可靠。Charalampos KKALLAS 研究生等采用随机有限断层方法模拟希腊 1956 年阿莫尔戈斯 7.4 级地震,同时引入包括坡度、高程、波长等影响地形放大效应的参数,考虑地形的模拟结果与观测结果相关性较好,有效解释了本次地震极震区震害分布情况。Marios ANTHYMIDIS 等利用微震监测构建希腊塞萨洛尼基市区三维波速模型,通过与相应剖面面波勘察结果对比发现,主动源地球物理方法与被动方法具有稳定的一致性结果,局部反演结果的差异可能与两种方法的空间尺度和竖向分辨率有关。Kiana HASHEMI 等以希腊北部塞萨洛尼基区域为例研究一维、二维和三维数值方法对场地效应分析的影响,并与强震记录分析结果进行对比,分析发现二维与三维计算给出的放大函数在低频段较为一致,认为考虑发震断层和精细结构模型的三维计算可以给出与观测结果相一致的放大函数估算值。Ahmed BOUDGHENE STAMBOULI 博士生等采用径向基函数神经网络模型定量研究二维场地效应相对一维场地的强化因子,发现 SH 波的强化因子明显大于 SV 波,其次地形地貌条件影响较大,对于河谷场地最大值出现在河谷中央,河谷边缘出现局部化效应,而岩土力学参数对强化因子影响较小。Elena Bouzoni 等研究了人工开挖河道和堆土山体对局部场地效应的影响,采用有限单元法对典型地形和岩性场地进行不同强震计算,发现影响区域与场地条件有关,在河道附近存在明显的反射波场,放大因子与场地条件和地震动特征关系密切,河道 10 m 以内的峰值速度放大系数为 1.3, 40 m 放大系数为 1.1。

Angelo AMOROSI 副教授对意大利南部博维

诺市区场地采用不同数值方法估计场地效应,局部场地效应是地层、地形地貌和地震动共同作用的结果,浅河谷场地放大规律仅与地层条件有关,一维、二维和三维计算结果相似,而对于窄河谷三维计算结果明显大于其他分析方法,多维计算能够对场地效应进行不同角度的分析,特别是在地震观测数据较少的区域。LIQUEFACT 项目旨在为欧洲国家提供一种低精度快速评估液化风险的方法, Sadik OZTOPRAK 副教授等以恰纳卡莱市区为测试验证场地,通过收集历史地震液化数据、地质、地形地貌和地震数据,全面调查区域内六个典型场地相关信息,发现该区域地震液化风险极高,证实了在该区域所采用的传统、现代物探技术可以运用在整个项目实施过程中。Adriana CUBIDES 等利用多道瞬态面波、折射微震和标贯试验确定场地结构条件,基于确定性和不确定性方法分析区域液化风险,发现中低密实度的粗粒土具有较高的液化风险,而细粒土的液化风险只有 12.3%,该地区将近 85% 的区域存在较高的液化风险。Richard TRIPE 工程师等通过收集北爱尔兰某核电站附近区域不同勘察方法给出的波速资料,提出了定量评价波速数据的统计方法,不同的地球物理测试方法给出的波速数据离散性较大,采用多测试技术监测岩质场地的波速数据,给出地震波速剖面的上限、下限和最佳估计,满足 ASCE4-16 的技术要求。Grace CAMPBELL 等针对西非地区地震活动形势开展了活断层探测、更新地震目录等工作,初步构建西非地区震源模型,由于部分活断层变形研究不够深入,且历史地震记录相对较短,震源研究结果还不满足地震危险性分析使用,有待进一步的研究。Elin Asta OLAFSDOTTIR 博士等开发了基于 matlab 的多道瞬态面波分析开源软件,功能包括频散分析、频散曲线合成和反演分析三个模块,通过与其他软件比较和现场测试对比,该软件切实可用。Eleni KOUFOUDI 博士等利用有限差分方法研究表面地形和坝-岩相互作用对地面运动空间分布的影响,通过对河谷场地及大坝结构动力响应的参数化分析发现河谷斜坡越陡地震动幅值和相位变化越大,河谷内结构体的存在增加了地表地震动的响应强度,同时说明简化模型的不足,需要进一步研究大坝蓄水的影响。Mustafa K. KOÇKAR 博士针对土耳其低烈度区发生中强地震造成的严重破坏展开研究,重新评估强震台站剪切波速并分类,给出地震峰值加速度衰减关系,计算不同类别场地加速度反应谱和放大因子,并与当地抗

震设计规范对比分析,阐述震害严重的原因。Ket-an BAJAJ 等对发生在印度北方邦区域的地震展开场地效应研究,结合主动、被动多道面波测试给出深部波速剖面 and 等效波速,选取世界范围内地震动作为输入,通过地震反应分析计算发现 E、D、C 和 B 类场地放大系数分别为 2.35、1.82、1.5 和 1.23,以上工作可为印度深沉积场地设计反应谱发展提供依据。Michele Placido Antonio GATTO 博士生等为了研究改性残料的对比对振动幅值和频谱的影响,设计了一个小尺度试验研究波的传播,同时进行相应的有限单元数值计算,发现实验结果与模拟结果一致性较高,为进一步研究大尺度改性土体地震响应研究提供了基础。Rose Line SPACAGNA 等基于圆锥触探试验数据提出了大尺度范围内液化灾害空间分布快速评价方法,并以意大利 2012 年爱玛利亚—罗马尼亚 6.2 级地震为例,液化分析结果与震害现象一致,圆锥触探数据的 GIS 分析能够给出液化地层的上部和底部,统计结果解释了液化与古河道演化之间的关系。

#### 4 岩土地震工程

该主题为大会的第四个主题,共设 4 个分会场、46 个口头报告,是大会口头报告和论文最多的几个主题之一。该主题主要目标为:研究岩土体支挡、地基、基础等抗震设计的理论、方法和技术,特别是近海工程、地下工程和交通工程等新型结构涉及土工抗震的各种方法和技术;研究土体改良的技术与评价方法,提高土体地震稳定性和抗液化、震陷和侧向大变形的能力。具体涉及内容如下。

Amir M. Kaynia 教授做了“近海岸工程中的岩土地震工程问题”的主题报告。近年来很多工程开始从近海岸向深海迈进,给岩土工程设计带来了不小的挑战,他列举了近海岸和海底工程中岩土抗震设计存在的问题,介绍了一些新的方法和解决方案,例如浅水和深水结构与设施的建设问题,海洋平台的基础、海底管道和其他海底设施的岩土工程抗震设计。论述了在海洋设施抗震设计中如何引入辐射阻尼和非线性土-结构相互作用,介绍了海底斜坡地震稳定性的几个关键问题。

第一分会场内容涉及双排桩板桩墙、隧道、高拱坝动力响应、液化势评估、液化导致的建筑不均匀沉降评估、砾石土液化等问题。Srikanth S C MAD-ABHUSHI 等利用离心机试验和数值计算对双排桩板桩墙的动力性能进行了研究,结果表明数值计

算和离心机试验具有一致性。但是实验中发现土体的循环硬化是比较明显的,这种行为是难以通过数值计算来模拟的。作者通过研究认识到了两种方法的优缺点,为全面认识双排桩板桩墙的动力性能铺平了道路。Maryam MASSAH FARD 等对近海岸建筑桩基础在波浪循环荷载作用下桩周土的液化势进行了分析,考虑了模型尺寸和桩径的影响,结果表明桩径的增大虽然会增加桩基受到的波浪荷载,但也会显著降低桩周土的液化势,该研究结果可为同类工程决定最优桩径提供一定的指导。Polyxeni KALLIOGLOU 等对剪切模量和阻尼比随剪切应变变化对土层地震反应分析的影响进行了分析,对考虑不同  $G/G_{\max}-\gamma-DT$  曲线、不同塑性土、不同输入地震动的参数化一维等效线性响应结果进行分析,发现不同的  $G/G_{\max}-\gamma-DT$  曲线会产生截然不同的地震响应,特别是对于中低塑性土。Georgios KAMPAS 等对隧道地震响应分析中一维等效线性土体本构的适用性进行了分析。隧道模型基于智利圣地亚哥的马蹄形地铁隧道,采用喷射混凝土本构模型,地震动输入采用 KOBE 波,土体本构采用线弹性、摩尔库伦、一维等效线性土体本构以及硬化土本构。计算时重点对隧道衬砌内力和隧道周边地震动改变进行了研究,结果显示四种本构情况下,隧道衬砌内力以及土体加速度放大效应有很大不同,最后作者指出线弹性和摩尔库伦本构对于地下建筑的抗震分析是不适用的,在高重现周期情况下,一维等效线性土体本构结果与硬化土本构结果类似。Maroua HAMMAMI 等运用谱元法对高拱坝结构体系的动力响应进行了分析,分析中考虑了随机波动材料的特性以及不同库水位条件的影响。结果表明材料非均质性可以改变结构的力学特性,作者认为收缩缝在强地震动作用下会表现出非线性特性,其地震设计问题是一个难点。OnurEKLI 等对永久性支护设计中场地地震危险性分析进行了解释。Kemal EDIP 等对一个土石坝进行了水土耦合地震动力响应分析,结果显示:地震作用会使坝体孔隙压力以及位移增大,特别是大坝上游部分。当地震波峰过后,由于孔隙压力的减小,坝体位移会显著增加。另外作者还研究了不同频谱特性的地震波对坝体的影响,发现坝体上游处产生的地震永久位移会导致坝体的整体垮塌。Fernando GÓMEZ-MARTÍNEZ 等针对当前液化导致的建筑物差异沉降评价方法存在的一些问题,如:只考虑土体参数特征,而不考虑结构刚度的影响,开展了一些研究工



作。作者建立了一些土-结构相互作用的平面刚架有限元模型,并且考虑了土结构刚度比和独立基础下的土体刚度折减效应,通过线性参数化分析得到了不同地震作用下基础差异沉降需要的构件相对弯曲条件。Lowell CABANGON 等对一浅埋隧道进行了多向地震三维有限元分析,场地中土主要为黏土,其本构模型采用剑桥模型,对三维有限元模型结果和二维有限元模型结果进行了对比分析,并且对单向地震波输入和多向耦合地震波输入的情况进行了对比,结果显示:由于地震波在隧道纵向的耗散,三维有限元方法计算的隧道衬砌横向内力要小于二维的结果,对于隧道衬砌纵向的内力,二维有限元方法则不能计算,有可能会低估隧道衬砌的地震力,因此三维有限元方法分析此类问题还是很有优势的。袁晓铭等对 2018 年汶川地震中发生的大规模砾石土液化现象进行了说明与分析,汶川地震震害调查发现 92 处共  $3\,000\text{ km}^2$  的地区发生了砾石土液化现象,这种砾石土很疏松,但是剪切波速可以达到  $133\sim 267\text{ m/s}$ ,修正后的值为  $154\sim 314\text{ m/s}$ ,最后作者指出发生液化的必要条件为:上覆土至少为  $0.5\text{ m}$ ,且上部非饱和土区域不能超过  $2\text{ m}$  厚。Mohamed I.S. ELMASRY 等对打入桩的水平承载力进行了分析研究,桩承载力的计算主要依靠三个参数:土体黏聚力  $c$ 、单位重度  $\gamma$  以及桩的竖向承载力  $V$ 。基于现场试验,得出了桩的水平承载力计算公式。

第二分会场共有 12 个口头报告,报告内容涉及海洋风机系统、边坡、海堤抗震研究与评估,液化地基评估与处理以及对地震动孔隙水压的计算等。Maria ANTONIOU 等对一种新型的海洋风机系统抗震性能进行了分析研究,这种风机系统与传统的大体积基础系统不同,其侧向承载力由四根锚固锚碇上的拉索提供。结果显示该系统在地震作用下表现良好,各项位移均较小,且拉索性能也满足要求。需要注意的是,为了防止累积沉降的发生,需要对加强中心塔的基础进行加强;随着振动的持续,拉索拉力也会逐渐松弛,对这点需要关注。Burak AKBAŞ 等利用边坡几何尺寸、土体强度参数、水平拟静力系数( $k_h$ )等条件,提出了新的评价边坡地震安全系数  $FS_{ps}$  的经验方法。作者提出新的评价方法主要有两个公式,第一个公式主要用于边坡的静态安全系数结果缺失的情况,第二个公式主要使用静态安全系数  $FS_{st}$ 、水平拟静力系数  $k_h$ 、以及新定义的参数  $A$  来进行计算。为了方便设计,作者将第二种方法

的参数化设计列到表格中,对于初算来说是非常有用的。英国学者 Stavroula KONTOE 等针对这个问题,首先研究了流固耦合作用对场地垂直响应的影响,这为理解在场地土体内部发生的剪切和压缩变形机制奠定了基础。其次,作者对某场地建立了三维有限元模型,土体本构采用循环非线性通用本构模型,这个本构可以对剪切和压缩模量的退化进行独立校准。将计算结果与传统的方法进行对比,结果表明了新模型的优越性,揭示了剪切和压缩变形非线性相互作用的机理。最后,对孔隙流体压缩性的参数研究表明,精确地模拟地下水位的位置以及相关的孔隙流体压缩性比较重要。Eiji KOHAMA 等提出了一种海堤抗震加固的改进梳状板桩墙方案,并用振动台试验和有限元方法检验了其抗震性能,通过试验和计算得出:梳状板桩墙几乎没有产生竖向位移,因此采用梳状板桩墙改造后的海堤,在地震发生后仍具有防止波浪和风暴潮泛滥的作用,数值计算结果与试验结果一致。Kazuya MITSUJI 等对一个安装了各种测震仪器的五层 RC 框架隔震建筑物的观测记录进行了介绍,测得地表最大峰值加速度为  $46\text{ cm/s}^2$ ,地表东西向地震记录的主频为  $2.6\text{ Hz}$ ,南北向为  $2.2\text{ Hz}$ 。地面和地基土压力的相关性表明,在几乎所有的频率范围内(最高  $10\text{ Hz}$ )都具有较高的相干性。地表和地基的相干函数在高频范围内趋于减小。通过与阴雨日土压力的比较,探讨了降雨与静止土压力的关系,土压力在大雨后数小时趋于增加,停雨后逐渐恢复到原来的值。Anna CHIARADONNA 等对 2012 年 5 月 20 日发生在意大利北部地区的 6.1 级地震产生的大规模液化现象进行了数值模拟计算,得出了一些初步的动力分析结果,且计算结果与现场观测到现象较为一致。Carlo CAUZZI 等将国际通用的液化评价方法进行校准,使其能够应用到瑞士。最终目标是确定最佳的经验模型,以提供中到强地震后实时的液化预测和评估。Gonzalo BARRIOS 等通过大型振动台试验对液化土对浅基础的影响进行了研究,对基础下方土体的加速度响应以及超孔压进行了监测,用激光位移传感器来测量剪切箱中土体的流动,基础的沉降和加速度也得到了记录,台面输入不同频率的简谐波,作者对单独的基础和六个独立基础组成的基础群进行了对比分析,结果表明,单独的基础下方的土体加速度要更大一些,基础沉降、土体位移与加速度都跟加载简谐波的频率以及基础的数量关系密切。Shoichi NAKAI 等针对 2011 年日本东北

地震震害调查发现,在同一场地只有一些建筑桩基础受到了损坏,而主要是由于这些建筑坐落于冲击河谷地带,对这一现象用有限元法对此进行了分析计算,得出:桩基础的弯矩分布随建筑布局或者地震加载方向的变化而变化,在冲积河谷中心建筑物的桩的弯矩大于周围建筑物的桩的弯矩。Nick TRAYLEN 等对树脂注浆处理液化场地进行了试验,选取了三个场地作为注浆试验地,用 CPT、跨孔试验、扁铲侧胀试验等测试手段对改进前后的试验场地土体力学性能进行了测试,检查注入的材料对土体密度和刚度、抗液化性能的影响,结果显示这种方法可以很好地提高土体的物理力学性能。Cigdem Yilmaz 等以葡萄牙为例,对评估由于液化位移造成的地震损失的三种不同方法进行了探究,对液化沉降、水平扩展,以及由于地面位移引起的地震损失进行了计算,并绘制成灾害区划图。三种方法中 EPOLLS-Regional 模型给出的估计偏大,HAZUS 程序则估计较小。作者将三种模型通过组合,并通过概率方法计算地震损失,效果比较不错。Ziad KTEICH 等提出了两种计算地震作用下孔压积累的方法,并用这种方法来估计震陷,在第一种计算方法中,考虑到剪切应变和孔隙压力的增加,将孔隙压力模型结合到传统的等效线性计算方法中。第二种方法则可以计算孔压累积的最大值,且耗时也比较短,该方法还可以显示孔压增长以及沉降累积的全过程。将这两种方法用于 2011 年日本浦安大地震中,计算结果与现场观测到的结果比较吻合。

第三分会场共有 10 个口头报告,报告内容涉及码头、边坡、柔性挡墙的抗震评价与计算,断层对路堤的影响,液化对建筑物影响的评价等。Eleni PETALA 等研究了正常的断层破裂传播对建立在单层土上的公路路堤的影响。通过差分软件做了一系列参数化分析(包括断层特征、土体材料特性等),量化破裂传播过程中路堤的破坏。结果显示断层破裂扩散通过堤坝时会导致很大的变形,且堤坝的压实度会严重减少。Denis LEBOEUF 对一种松砂进行了共振柱试验研究,主要目的是为研究其在动载条件下的非线性应变发展及液化行为以及确定其小应变剪切模量,并研究应变幅值对该土动力特性的影响。通过试验结果分析,作者认为:土体液化是由不断增加的循环剪切应变所引起的土体微观结构的不稳定性(崩塌)的结果,这种不稳定性可以在超孔隙压力比低于 100% 的情况下发生。Mario MARTINELLI 等对某离心机试验做了数值计算分析,采

用两个本构模型 PM4Sand 和 UBCSand,将计算结果与离心机试验结果进行对比。分析表明,在 PM4Sand 本构模型成功地计算了离心试验中观察到的孔压消散和孔隙重分布的过程。UBCSand 只与 shake10 较为吻合,其孔隙重分布不太明显。但是对于较强的地震动,试验结果与数值计算结果则不太一致。Akihiko KONDO 等利用现有结构对码头结构进行抗震加固改造,利用模型试验和数值分析方法对该加固改造结构进行相应的评价分析。振动台结果表明,改进后的码头具有与标准码头模型一样的抗震性能,现有的桩通过支柱构件向新桩传递荷载,减小了桩的最大弯矩。数值计算结果表明,新桩的弯曲刚度比为 1、支柱构件的弯曲刚度比大于 1 是最好的组合。Nikos GEROLYMOS 等提出了一种用于校准最近开发的砂土本构模型(TA-GER 模型)的关键参数的方法。修改后的模型无需重新调整参数的值便可以灵活满足排水和不排水条件,且与文献中的液化强度比、剪切模量和阻尼比曲线一致。Stefania GOBBI 等用数值模拟研究了液化对结构的影响,所用软件为 OpenSees,对一个住宅建筑和土堤进行了分析讨论,得出了一些有价值的结论。

Andreas STOECKLIN 等用程序模拟了海底斜坡在地震动力作用下的泥沙淤积过程。结果表明,对于正常固结的斜坡,地震往往引起靠近海底的应变积累;对于超固结斜坡则不同,地震作用会在一定深度处产生局部应变,导致潜在的非浅层滑动。该程序可用于海底斜坡沉积不同阶段的地震安全评价。Susumu YASUDA 等对广岛市和东京 Kita-Senju 地区未来地震中液化对木屋结构的危害进行了估算,对该地区的液化强度比(CSR)以及循环剪应力比(CSS)进行了评价。对木屋的地震评价基于日本提出的 MLIT 方法,这个方法采用两个参数:液化势  $PL$  和非液化层厚度  $H_1$ ,结果发现,在这两个地区的很多地方的木屋结构都有破坏的可能性,由于地下水深度的不同,这两个地区的灾害风险图也有所不同。Christos KOUTSANTONAKIS 等提出了一种计算柔性挡墙地震响应的简化方法,挡墙采用欧拉伯努利梁模拟,分为悬臂和上部铰接两种情况,假定垂直动应力为 0,并采用改进的 Vlasov-Leontiev 模型,得到求解控制方程,推导得出了土体侧向位移以及动土压力,结果表明,对于悬臂式挡土墙,即使挡墙产生很小的挠曲变化也会使主动土压力显著降低,计算得到的结果与现有的方法一致,是

一种更简单的弹性动力学解决方案。SANGEETA 等用加权叠加法对地震滑坡危险等级进行了分类,岩土输入参数总共有四个:坡角、坡向、归一化植被指数(NDVI)以及区域地震活动性,通过相应的分析评价得到了滑坡危险区划图,将危险等级分为了 5 类,分别为:VLH(很低)、LH(低)、MH(中等)、HH(高)、VHH(很高)。作者的相关工作对于减轻地震滑坡灾害有很大的意义。

第四分会场共有 11 个口头报告,报告内容涉及高塑性黏土非线性计算分析、火山岩沉积土微结构分析、液化对基础的影响分析、液化与地下结构的相互作用等。Orestis ADAMIDIS 等对建立在可液化砂土地基上浅基础的地震转动响应进行了研究,作者通过六个离心机试验,给出了基础的弯矩-转角滞回圈以及其转动刚度,试验中考虑了不同结构重量、不同液化土层深度的影响,得出了一些有意义的结论。Juan Manuel MAYORAL 等针对高塑性黏土一般忽略其动力非线性行为的问题,对高塑性黏土地场地响应进行了有限元分析计算,计算表明,如果场地经历较大的地震动(重现周期 125 年以上),场地土会表现出很明显的非线性,相关地震实例也验证了这个结论。另外作者还对高塑性黏土的动力响应实验室结果进行了介绍,指出高塑性黏土的参考剪应变  $\gamma_r$  似乎是一个更好的表征土体模量退化及阻尼曲线的参数。Efthymios APOSTOLOU 等人针对素混凝土桩常用于处理液化,其地震易损性需要进行评估这一问题做了相应的离心机试验,选择合适的可液化土,试验模型的建立考虑尺寸效应,在土层中布置孔压计、加速度计、差动式位移传感器等,通过试验发现:素混凝土桩与钢筋混凝土桩的能效类似,但是在中等强度的地震中就会产生折断现象,最后,作者指出将混凝土强度标号或者桩径提高 2~3 倍可避免折断的现象。Ayşe EDİŇÇLİLER 等对两种高速铁路路基加固技术的抗震性能进行了分析研究,作者建立了有限元模型来对比两种加固技术(两种加固技术分别为土工合成材料和废弃轮胎包裹物加固技术)的效果,结果发现:废弃轮胎包裹物加固技术对水平位移的控制效果不太好,但是该技术可以很好地控制路基的竖向位移。土工合成材料在各方面的表现是比较良好的。Jean-Claude GRESS 等利用原位测试和实验室数据,得出了求解  $G_{\max}$  的方法,以及给出了  $G$  随  $\gamma$  变化的规律。Yusuke KANAI 等针对日本某大地震液化与土体固结历史密切相关的现象进行了分析,作者重点研

究了长期固结的影响和由地面围压变化引起的超固结历史的影响。对不同密度和细粒含量的砂土进行动三轴试验。结果发现,随着固结和超固结历史增长,液化强度随之增加,这是因为随着固结期的延长,剪切时产生的超孔隙水压力被抑制所致。Konstantinos N. BAZAİOS 等研究了上部结构的惯性对坐落于可液化砂土中的浅基础的影响,假定在基础和液化砂层之间有一个具有足够抗剪强度和厚度不可液化的土层,采用 FLAC<sup>3D</sup> 进行模拟,上部结构假定为一个单自由度系统,土体采用 NTUA-Sand 本构模型,参数分析集中于单个 SSI 参数的影响,如结构-基础系统的频率特性、自由场土体的频率特性、地震激励的主频。结果显示虽然干燥土体中 SSI 效应是系统的和重要的,但是在液化中却对系统影响较小。Panos DAKOULAS 等用有效应力方法对希腊某码头岸墙的抗震性能进行了研究,该岸墙高 14.3 m,墙背填充砂砾石填土,通过原位试验获取填土的物理力学特性,通过加载 5 种地震波来获取其抗震性能,对墙后填土的相对密度进行了参数化研究,计算得到了不同工况下填土中超孔隙水压力的发展和岸壁的永久水平位移、沉降和倾斜。Yousuke OHYA 等通过振动台试验研究了地下结构与液化相互作用引起的地面沉降机理,试验发现:与远离地下结构的其他区域相比,靠近地下结构的土体最大偏剪应变和累积应变明显要大,且地面沉降分布与其分布相对应,最后作者指出 2011 年仙台机场的局部沉降破坏是由液化与地下结构的相互作用引起的。Alessia VECCHIETTI 等针对 menta 大坝提出了一种评价大坝易损性的方法,这个方法基于多自由度等效结构的概念,通过这个方法,可以获得坝顶位移的发生概率,这些信息有助于决策过程和风险管理。

Wa Ode SUMARTINI 等对 2016 年日本熊本地震引起九州阿苏火山实验室附近的大滑坡成因进行了调查研究。他通过对滑坡场地出现的火山岩沉积物的微结构特征进行扫描电镜分析发现,沉积土具有由可破碎材料组成的泡状结构,在地震中发生液化,导致了滑坡的形成。

## 5 欧洲—中国地震工程与风险合作

欧洲—中国地震工程与风险合作交流专题分会是本次大会 23 个专题分会中的第一个,安排在第一天下午的交流议程中,会场为大会主会场,体现了本届大会组委会对中欧合作的重视。该分会由本届大



会主席、新任欧洲地震工程协会主席 Pitilakis 教授提议,由中方主席张建民、王兰民、孙柏涛、吕西林、张鸿儒教授和欧方主席 Kyriaris Pitilakis、Alberto Pavese、Georgios Tsionis 教授共同组织,王兰民教授、Alberto Pavese 教授、Georgios Tsionis 教授等三人共同主持了该专题分会交流,12 人做了口头报告,其中中方报告 9 个,欧方报告 3 个。该专题目标为:交流梳理中欧双方已经完成或正在实施的合作研究项目的进展与成果,探讨进一步开展双边合作的潜在领域、研究内容、途径和可能性,为推进欧洲与中国在地震工程领域的进一步合作创造机会和平台。

在该专题分会报告中,吕西林教授等对同济大学与欧洲相关组织在地震工程领域的合作进行了介绍。2003 年同济大学土木工程减灾国家重点实验室与 ELSA 实验室、联合研究中心和欧盟委员会开展了新型预制混凝土结构抗震性能合作研究。2012 年该实验室与欧洲地震工程培训和研究中心、意大利先进研究院等签订了开展抗震轴承、隔震器和阻尼器实验研究的合作协议。这些研究已经为一带一路建设提供支撑。王兰民等介绍了黄土地震工程研究的新进展和中欧合作的情况,2008 年以来,中国地震局兰州地震研究所与英国地质调查局、俄罗斯科学院环境与土木工程研究所、希腊塞萨洛尼基亚里士多德大学岩土地震工程研究所在黄土场地放大效应、滑坡、液化、震陷等方面的合作研究进展,2014 年以来,中国地震局兰州地震研究所与希腊塞萨洛尼基亚里士多德大学岩土地震工程研究所在黄土场地放大效应和黄土动力特性合作研究的进展。Ilario MAZZIERI 教授等介绍了近场地震动在大城市地区地震危险性分析中的作用,他介绍了对基于物理模拟(PBS)做出的一大组代表性数字情景的检验情况,以便用破裂过程、地震波传播和三维复杂构造来限定近断层几公里范围内的地震动。并计划对北京地区进行这种数字地震破坏情景模拟,他认为:(1)北京市区靠近已经填图的强震发震断层;(2)该地区土的岩土特征已有较好的描述;(3)深部沉积构造已经被可靠地重建。重点通过考虑合适的易损性曲线对高层建筑进行分级和上述基于物理的情景模拟,将给出北京在 6.5~7.3 级地震发生时,不同的断层破裂情景造成北京地区的震害情景以及不同破坏状态的变化。温瑞智教授等介绍了在中国抗震设计规范中对真实地震动记录的选取方法,他基于美国太平洋地震工程研究中心新一代地震动衰减项目

西部第一版强震动数据库(NGAWest1)和中国国家强震动观测台网数据库(NSMONS,2007—2015)构建了强震动选取数据库,研究提供了 3 种最常用的设计谱和 5 条美国西部强震动记录与 2 条中国强震动记录的真实强震动组合,这一结果对应于少震地区Ⅱ类场地Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度设防水平,可为工程师直接提供非线性时程分析的输入波。黄晨和英国 Carmine GALASSO 教授等基于中国地震数据中心和中国地震局提供的震中距在 250 km 范围内记录,推导出了四川省新的强震动预测方程,该方程可预测水平峰值加速度( $PGA$ )、5 s 周期的水平谱加速度( $S_a$ )和显著持时( $D_{55-95}$ )。李长龙(音译)和意大利 Marco PAGANI 博士、瑞士 Laurentiu DANCUI 博士在全球地震模型基金会(GEM)和中国地震局的合作框架下,对中亚—中东地震模型和中国地震模型在天山地区的危险性分析结果进行了对比分析。进而重构部分潜在震源,重新计算有关地震活动性参数,使用协调模型,给出了天山地区的概率性地震危险性分析结果,结果表明天山绝大部分地区 50 年 10%超越概率下的水平峰值加速度( $PGA$ )在  $0.2g \sim 0.3g$ ,中—巴走廊的巴基斯坦北部地区的地震危险性最高。王睿博士代表张建民院士介绍了正在报批的中国地下工程抗震设计规范的有关概念和方法,指出中国目前 30 多个城市建设地铁,对地下结构抗震设计规范有重大需求,报批的规范考虑了不同重要等级地下结构的性态水平、不同类型场地地震反应计算方法与场地效应、场地液化和震陷的判别与处理、地下结构变形允许值的估算等。孙柏涛等介绍了中国大陆建筑物抗震能力的分布。该项研究首先通过对中国大陆 26 个省 400 个调查区几千栋样板建筑物的调查,获得了建筑物抗震能力的主要影响因素;第二步,按照其抗震能力将中国大陆分为 12 类地区,研究每一个地区不同建筑结构抗震能力的差异;第三步,对不同地区不同建筑结构的地震易损性矩阵进行分类,最后考虑各个区域  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  网格内的每一种建筑在不同烈度下的平均地震破坏指数,计算中国大陆的结构抗震能力指数,基于 ArcGIS 软件给出建筑物抗震能力分布。Linghui Zhou 和英国 Carmine GALASSO 教授等介绍了中国面向地震危险性的韧性学校项目(CROSSH)的主要成果,包括:(1)基于新分析模型的物理易损性评估方法及其在四川省北川羌族自治县的应用;(2)对通过学校建筑物抗震加固和减轻灾害风险教育,强化学校地震韧性的初步调查。Chi-

ara CASAROTTI 博士等以意大利中部地震后的现场支撑活动为例,介绍了欧洲中心基金会与地震应急的情况。总部位于意大利帕维亚的欧洲中心基金会成立于 2005 年,该基金会作为国家民防部专家中心,为减轻地震风险提供预防、准备和应急响应方面的科技支撑,通过项目引导、真实和模拟环境下的演练、震后应急部署等方式,管理一个地震应急的复杂技术支撑系统。基于 2009 年以来意大利主要地震事件,报告人充分肯定了该系统无容置疑的潜力,同时也指出其在服务和应急管理的技术层面需要改进的地方。张鸿儒教授介绍中国铁路工程抗震设计由简单的静力方法到现代性能化设计方法的发展历程,现行铁路工程(包括高铁)抗震设计规范对线路、桥梁、路堤和隧道的设计理念、战略、方法和步骤,讨论了高速铁路地震预警的研究进展。

通过该专题交流,中欧同行对近年来双方的合作交流进展和可能的领域有了较全面的了解,为其后的合作讨论会和开展下一步合作奠定了基础。

## 6 相关领域进展与亮点

本届大会除了上述笔者参与交流的 4 个主题和 1 个专题方面的新进展外,在欧洲结构抗震设计规范(Eurocode8)的强制性推广实施与第二代欧洲规范的修订、韧性城市与设施建设、新近地震的启示、土-基础-结构相互作用等方面的热点研究值得关注。现分述如下。

### 6.1 Eurocode8 在欧洲成员国得到较好的推广实施,第二代规范的修订受到普遍重视

现行的欧洲建筑规范(Eurocodes)是 2007 年 5 月由欧洲标准化委员会出版的,欧洲结构抗震设计规范(Eurocode8)是其中的一个组成部分。这次出版是欧盟在建筑方面实现标准化的重大里程碑,因为它为欧盟成员国引入了建筑物及建设工程设计的统一技术规定和标准。欧洲规范在成员国的全面实施要求在 2012 年全部完成,这一过程包括国家部分的编制和出版,国家条款的采用,有冲突的国家标准的取消等。本届大会设置了 1 个一般分会场和 1 个专题分会场分别交流欧洲结构抗震设计规范(Eurocode8)的实施情况和第二代抗震规范的修订情况。其目标为总结交流欧洲抗震设计规范在成员国实施的情况,为进一步推动全面落实提供依据;对该规范修订内容进行交流咨询,力图将其修订为国际领先的抗震设计规范。

Adamantia ATHANASOPOULOU 介绍了欧

盟委员会在 2014—2015 年对欧洲抗震设计规范(Eurocode 8)在各成员国和挪威实施情况的调查结果,调查结果表明,国家确定参数(NDP)的推荐值已有将近 3/4 被接受,其后对 Eurocode 8 的国家实施通过进一步协调,将可全面完成。而目前影响其实施的主要因素有两个,一是欧洲规范国家实施的现行途径,既是自愿接受的国家标准,又是在监管框架之下的;二是各个国家的地震活动性与其制定颁布 Eurocode 8 国家附录的必要性。

为了与欧洲 2020 智能、可持续、包容性增长战略相一致,标准化在支持全球化时代的工业政策方面发挥着重要作用。欧洲规范在其成员国的全面实施将有利于消除欧盟内部建筑产品和服务市场国家之间的障碍,同时有利于“建设部门和企业可持续竞争力战略”实施,全面提升欧盟市场的竞争力。从这个角度出发,欧洲规范被认为是加速欧盟各个国家和地区监管一致性过程和培育欧洲建筑企业全球竞争力的一个重要工具。欧盟委员会联合研究中心自 1992 年以来一直为欧洲规范提供科技支撑,2015 年起已延伸到欧洲可持续建筑的政策与标准,支持欧洲规范的制定、培训、协调、实施、国际推介和发展等方面。欧盟委员会的下一个目标就是要使欧洲规范成为世界上最先进的结构设计技术规范。为此,一个旨在编制第二代欧洲规范的项目(M/515 EN (2012))已经开始实施,该项目计划 2020 年完成。在本届大会的“欧洲规范 8 第二代的发展”专题分会上交流了 6 个主题报告和 13 个一般口头报告。

主题报告内容包括: Pierre Bernard Labbe 教授详细介绍了欧洲规范 8 中第 1 部分-总则的修订内容,及修订过程中考虑的关键问题,给出了具体修订的说明情况。Andreas J. Kappos 教授全面介绍了欧洲规范 8 发展过程中的面临的主要挑战、使用过程中存在的问题和修订的关键变化。Andre Rene Plumier 教授针对规范中建筑结构体系相关部分的修订内容做了详细介绍,给出了设计延性的定义与分类方法,并对前一版中没有涉及到的结构系统设计条款做了更为清晰和简单的规定。Alain Pecker 教授指出了原规范第 5 部分——岩土工程及处理技术条文的不足之处,及当前版本中缺乏并应补充的相关内容,重点介绍了考虑地震作用的岩土工程技术处理方法,提供了地震荷载和处理技术中所需的参数和这些参数的确定方法。Paolo Franchin 副教授提出了一种基于抗力分项系数的极限状态设计模型,该模型方法通过对不确定性因素的影响分析,进

而确定建筑结构的安全性能,该成果已在规范第 3 部分对现有结构的地震评估和改造中被采纳。Sreeram Reddy Kotha 博士通过对日本 588 个良好的强地震记录的研究分析,提出了应用谱分析法从经验场放大作用进行场地分类的方法,通过与现有的规范的对比与评估后,进一步提出了一种经过修正的场地分类方法。

口头报告主要涉及如下内容:欧盟委员会联合研究中心的 Adamantia Athanasopoulou 项目主任介绍了欧盟成员国和挪威在 2014—2015 年实施和使用欧洲规范 8 的具体情况。Matjaz Dolsek 助理研究员提出了风险目标安全因素和运动状态因素的理论背景,并通过两个钢筋混凝土框架建筑的安全检查,证明了风险目标安全系数方法在欧洲规范中使用的可行性。Sergios Befas 工程师介绍了场地对强地面运动响应的实际与预测的研究结果,分析了欧洲规范 8 中场地类别为 B 和 C 类时的场地放大效应和基于不同阻抗和厚度的场地分类方法。Rola Assi 副教授针对建筑物中受地震加速度影响,反应较为敏感部分——非结构构件的抗震性能进行了评价,对建筑物随楼层高度变化时加速度分布进行了可靠的预测。Laurentiu Danciu 教授将不同土壤类别的伪加速度响应谱与瑞士地震设计规范指定的设计谱的进行对比,给出了地震地面运动和地震设计谱形状参数的统计分析结果。欧洲标准化委员会前董事长 Renzo Medeot 教授介绍了新的欧洲规范制定和修订的过程、目的,阐述了其有待修订的标准,并列举了世界范围内的一些应用。Dionysis Biskinis 教授给出了考虑循环横向荷载作用下的快速控制钢筋混凝土构件变形能力模型,为规范中钢筋混凝土结构的抗震安全性能控制与鉴定等相关条文的修订提供了新的思路。Mohammed Matallah 介绍了欧洲规范 8 中对框架建筑结构扭转能力大小的评定方法,指出了计算动量扭转曲线存在的主要问题,提出了改进的框架建筑结构扭转效应计算公式。Aram Soroushian 工程师详细介绍了新西兰地震规范的非线性时程分析规定条文,指出了其存在的主要问题,提出了两种克服缺点的方法,并将该方法与欧洲规范 8 及其他地震规范进行了对比。Radu Pascu 教授创建了名为“SEISMOCODE”的地震设计规范数字平台,将罗马尼亚地方规范与新欧洲规范进行了很好的衔接,为土木工程专业设计人员,特别是为结构设计师提供了一个在线终身学习平台。皇家研究院的 Mario Ordaz 教授从概率

地震危险性分析的角度,给出了一个既不降低地震的安全性,又实用且具有成本效益的用于估算最优地震动设计参数的方法,该方法现在正在墨西哥使用,而哥伦比亚预计将在未来的建筑规范修订中考虑采纳。法国地基建公司的 Gustavo Pereira 首席工程师对欧洲规范 8 中第 5 部分——抗震防护结构规定条文使用过程中存在问题进行了阐述,并提出了基于伪静态分析的改进方法。Emmanouil A. Vougioukas 讲师通过结构单轴实验对欧洲规范中结构非弹性分析的经验关系进行了对比与验证,从变形性和延性等方面建立了一种量化的结构构件双向弯曲性能的分析方法,用于分析结构构件的非弹性质性。

这一专题分会的主要目标是总结原欧洲规范 8 在欧盟各国的使用情况,提出规范存在的问题,找出仍缺少而需进一步补充的内容,欧洲规范 8 第 2 代具体改进的主要内容,以及改进规定条文在具体工程中如何使用等问题。

## 6.2 韧性城市、社区和基础设施研究成为国际地震工程研究的一个热点

本届大会 24 个主题的最后一个是涉及到韧性城市,即“基于新一代、性态和韧性的结构与系统设计”。这一主题没有设置主题分会,但设置了 3 个主题报告和 3 个专题分会。这些主题和专题的目的在于交流统一对韧性城市、社区和工程的认识,推动欧洲各成员国提高抗震韧性的理论研究和技术应用。这些报告交流分会受到了与会相关代表的重视和关注,同时也反映出抗震韧性城市和工程研究已是国际地震工程领域研究的一个热点问题。

3 个主题报告分别为 Paolo Franchin 教授做的“面向韧性社区的研究需求”,Bozidar Stojadinovic 教授做的“基于韧性的社区设计”,Bijan Khazai 教授做的“城市灾害韧性的测量与管理”。这些报告内容表明,以往韧性方面的绝大多数文献都研究韧性评估问题,现在是从分析转向设计和研发增强韧性所需工具的时候了。韧性增强,这一风险减轻的近亲,应该至少以广义的概念加到一个系统尺度的设计中。韧性常常与社区伴生,而社区就是一个系统。从系统的角度触发,韧性社区的研究需求主要体现在易损性减轻、基础设施系统模型、损失评估、基于韧性的设计和应急管理等方面。Bijan Khazai 教授提出建设一个灾害韧性的城市意味着认识社区的抗灾能力和决策者主动地适应、应对和改变潜在威胁。城市韧性需要考虑多维概念、多水平的可见性和高



度的动态。不同的指标框架依赖于测量韧性所预设的指标体系和受益者,这些指标体系忽略了针对具体地点或地理上次级城市环境的动态调整指标的需求。为此,他介绍了测量和监测城市本身韧性的方法。灾害风险与韧性指数(DRRI)方法已经发展了 15 年之久,并在世界各地不同城市实施,以支撑相关人员进行灾害风险管理 with 决策。DRRI 方法基于城市灾害风险指数(UDRI)与韧性性能积分卡方法(RPS)的组合,联手作为一套指标以建立综合城市风险的初始诊断标准,并跟踪在城市组织、功能、操作和发展体系与过程方面主流风险减轻方法的进步或不足。

会上交流的报告还介绍了相关国家和地区在韧性城市建设和研究方面的进展情况。Juan Carlos 教授介绍了智利的进展,智利总统在 2015 年要求一个专家组为灾害韧性制定国家战略(CREDEN)。该战略制定工作已于 2016 年 12 月完成,其主要目标有两个,一方面提供改善科学技术工作所需的投入,使智利成为一个更具韧性的国家,从而减少灾害的重要影响。另一方面根据其独特的条件,将智利转变为抗灾能力的创新中心。该战略还提出了五个有利条件和 14 个任务组成的 R&D + i(Innovation)路线图。该项工作表明,灾害也可以从更积极的观点来看待,比如可作为增长和发展的机会。在这种背景下,智利被视为 R&D + i 在韧性方面的“天然实验室”。Andre SCHWARZ 等人研究分析了 1995 年破坏性地震对希腊 Aigio 城市发展的影响,进行了三次建筑调查。这种长期评估可在 20 年的时间框架内对计划的重建措施和实际城市转型进行比较。在每次调查中,查找出欧洲 Macroseismic Scale 1998(EMS-98)的漏洞类别。多灾种分析结果表明,缺乏综合方法和地震工程与城市规划之间的跨学科合作会导致重建过程的不足,并产生了新的风险,这些风险来自城市转型。为此,提出了设计一个内城的城市翻新项目和积极的城市扩张土地管理来减轻多灾害风险的建议。Nisrine MAKHOUL 介绍了 Byblos 城市韧性的特性和 2016 年推出的弹性战略。旨在减轻与物理、经济、环境、政治和社会方面有关的压力,提出城市应急、预防和恢复计划以及加强民防的措施。Jack GUO 等人通过对马尼拉学校的研究后,提出了一种多建筑组合的地震风险和性能评估方法,该方法将特定建筑物的易损性扩展到更一般的由经济损失和恢复时间决定的损失分配函数。Mohammad ATRACHALI 等人提出了

一种新的韧性指标体系,进而建立了一种用于量化地震城市韧性的新模型,该体系包括 37 个指标、13 个主题领域和 5 个分支模型,目前已经在伊朗南部的基什岛实施。最后值得一提的是,通过与美国专家交流了解到,目前美国国家标准研究院组织资助了一个 2 000 万美元的研究项目,专门研究韧性城市建设中的科学与技术问题,以推进韧性城市建设。

### 6.3 新近地震的启示更加广泛和多维度

新近地震的启示为本届大会的主题之一,但论文较少,因此大会只设置了一个分会场。该主题目标为交流近期发生的意大利中部地震、爱琴海东部海域地震、日本熊本地震、智利地震、厄瓜多尔地震等造成的结构和设施破坏情况、震害特征、破坏机制、应急响应等方面的经验和启示。该主题报告反映出研究的领域和启示更加广泛和多维度,直接着眼于对抗震设计规范的检验与改进、震灾的情景模拟、应急决策的经验、震区人员的健康、学校医院和社区地震灾害风险的综合减轻等成为新的动向,这可能是韧性城市建设理念开拓了人们的视野。

Gabriele FIORENTINO 等对意大利中部地震灾区进行实地考察,确定了震中区大部分建筑物的破坏程度,脆弱因素和崩塌机制,对地震灾区破坏状况进行概述,绘制了震区 Accumoli 和 Arquata del Tronto 两个城镇的破坏地图。Celine DUJARRIC 等介绍了法国地震工程协会(AFPS)震后调查的组织架构和现场调查获得反馈信息的方法,将震后调查反馈信息构成数据库,为欧洲地震工程规范修订提供依据。Christos PAPAIOANNOU 等针对 2017 年夏季爱琴海东部海域发生的两次强地震,分析了震区房屋的破坏程度、现场条件与场地效应,提出了此次地震与安纳托利亚和爱琴海板块之间的过渡区延伸导致构造断裂有关,造成了财产损失和人员失踪。Koichi KUSUNOKI 等通过对日本熊本震区房屋破坏程度进行研究,提出了三个推测,即:(1)建筑物的有效输入地震动小于预期,(2)建筑物比预期强,(3)地基或地面被破坏;并通过从仪器测量的加速度,现场调查以及开发的实验测试数据库来验证这些推测,分析了受损建筑与破坏建筑之间的差异。Masahiro KURATA 等通过对日本熊本地震后多所医院的撤离情况进行调查分析,发现了决定医院撤离的三大原因:(1)结构安全,(2)水系统设施的损坏,(3)区域停止供水;提出医院撤离时没有时间等待结构工程师的评估和缺水对医疗服务至关重要,并显示了医院建筑中水基础设施各种可能的故

障模式。Mina SUGINO 等通过由多个参数定义的脉冲波形提出了一种脉冲式地震动的简化表征方法,该方法能够将单个地面运动自动表征为几个具有多个脉冲周期的 Gabor 小波,并将该种表征方法应用于日本熊本县的脉冲式地震动,提出了每个地震动的特征在于两个脉冲状波形,其脉冲周期约为 1 s 和 3 s,定量揭示脉冲波形的速度幅值和持续时间因地区而异。Mark SCORER 等对厄瓜多尔西北部沿海省份 Esmeraldas 和 Manabi 的地震灾区进行实地调查和灾害评估,调查专注于社区城市建筑和学校教育设施,提供了表明建筑设计和施工不足之处的地震破坏证据,记录了相关经验教训和需要改进的领域。Yuko SERIKAWA 等通过对日本熊本地震中液化引起的房屋和建筑物倾斜调查测量,提出倾斜度与房屋和建筑物的类型有关,并提出倾斜的房屋引发了居民的健康问题,包括头痛、背痛、头晕和拖曳感。Mehdi ZARE 通过对伊朗东北部法里曼县地震灾区的实地调查,评估了该区域的灾害分布与地震强度,并对伊朗强震网络 (ISMN) 报道的这次地震的强震记录进行了处理和分析,提出 Doghaleh 村以 VII 度最高烈度受到最大破坏,最高  $PGA = 125 \text{ cm/s}^2$  对应于位于距离震中 53 km 的 Nasr Abad 站。Masanori ISHIHARA 等通过日本气象厅调查地震破坏的东北和关东地区的河堤,分析了这些河堤的破坏率、破坏长度和最大加速度,地震烈度值、地震外力和地面条件的关系,提出严重破坏的原因是由于强烈的地震动而引发的地基和堤体液化。智利从 2017 年开始采用基于性态的设计方法, Betzabeth SUQUILLO 等介绍了智利基于性态设计的建议计算程序 (PBD), 验证了通过实验测试和数值计算规定的每一性态水准极限值的有效性,而每一性态水准与允许的破坏水平相关联。然后,利用智利性态计算程序和震前的结构参数对一栋住宅楼进行了抗震性能评价,这栋楼在 2010 年 Maule 地震中遭受到破坏。结果表明,对于直接居住性能水平和附加变形性能水平来说,梁和墙损伤程度都是较小的。

#### 6.4 土-基础-结构相互作用研究需求多样化, 研究范围拓展

土-基础-结构相互作用是本届大会的第五个主题,也是大会安排分会场所报告较多的主题,反映出此方面研究需求多样化和研究范围拓展的趋势,论文数量显著增加。该主题目标为交流基础方案的组合、场地-城市效应 (SCI)、土-结构相互作用理论与

分析方法、液化场地土结构相互作用、特殊设施和地下洞室等方面的最新进展,为土-结构相互作用分析和设计提供理论和方法。大会安排了该主题 1 个主题报告和 4 个口头报告分会场,共 40 个口头报告做了交流。

Alain Pecker 教授做了“复杂土条件下基础的抗震设计:实例分析”的主题报告。地震多发区的大型土木建设工程常常面临着基础抗震设计的挑战,要求基础能够抵抗很大的地震力且能够保持上部结构功能完好。对于这种情况,传统工程常常采用桩基础来处理,然而端承桩并不总是可行的,且桩基础也有其他一些弊病,因此其应用也受到一定限制。近年来很多替代性的创新解决方案往往是以下至少两种基础方案的组合:浅基础,土壤改良,沉箱,桩基础等。该主题报告详细介绍了传统基础设计方案的利弊,并以实际工程为例说明了如何用组合方案消除不利影响,同时能保证施工便利和设计安全。

第一分会场共有 6 个报告。突出的新动向为多个报告研究城市化和城市建筑物对场地地震动带来的影响[场地-城市相互作用 (SCI)]。涉及意大利罗马、希腊北部、希腊列夫卡斯岛地区、摩纳哥近海岸等地区,还有报告介绍了对欧洲一些地区基底有空洞的建筑动力响应分析研究成果。Chiara VARONE 教授等以罗马 Fosso di Vallerano 地区为例,计算了该地区城市建筑物与场地土的动力相互作用,在计算前用小震记录校准了该地区非常复杂的地质环境,评价了不同类型既有建筑的结构特征和动力特性。建立场地-城市二维有限元模型,评估了近十年来城市化进程导致的场地响应变化情况。结果表明,城市冲积河谷各种填埋场地建筑物基础下的地震动放大效应由于建筑物的存在而发生了明显的减小。Athanasios VRATSIKIDIS 等对一种叫 EuroProteas 的结构做了一系列原型试验,这种结构形式的特点是刚性结构坐落于软土地基上。试验内容包括环境噪声测量、很大范围加载频率和加载幅值下的自由和强迫振动测试。这些实验数据构成了一个数据库,为评估基于原型试验的土-结构相互作用效应研究提供了便利。Christos KARA-KOSTAS 等为了研究列夫卡斯岛地区 R/C 框架结构的土-结构动力相互作用规律,选取了该地区一栋在 2012 年建成的建筑,该建筑由一个地下室和地上两层楼组成,在每层楼的楼板上都布置有三分向传感器用来观测地震响应。在距该建筑 40 km 处的一个市政建筑和自由场中也埋设了相应的传感器。

这些传感器采集到了 2014 年 1 月 26 日 6.1 级地震和 2 月 3 日 6.0 级地震的丰富数据。进而对该建筑建立了三维有限元模型,采用子结构法进行计算,并与实测值进行对比。结果发现:数值计算的地震响应结果比真实地震记录要大,主要是由于计算得到的响应在 2~4 Hz 频率范围比真实记录丰富;结构地下室的记录地震响应无论是加速度峰值还是反应谱值均比附近场地的自由场记录值小。Reza TAHERZADEH 等学者对摩纳哥近海岸的一些建筑进行了土-结构非线性动力相互作用分析计算,包括土-箱基动力相互作用分析、土-桩基础-箱基动力相互作用分析、土-桩基础-箱基-上部结构动力相互作用分析。作者用 Zsoil 软件建立了近海岸建筑的二维有限元模型,土体采用硬化土本构模型,发现:计算得到的动土压力比 Mononobe-Okabe 土压力公式计算得到的数值大很多;上部结构越刚,计算得到的土压力越大;另外发现上部结构会形成一个新的振源,并因此使箱基产生附加土压力。历史悠久的城市中心建筑物下方往往有很多空洞或者砌体地下洞室。为了研究这些地下洞室对建筑物的影响,Annachiara PIRO 工程师以一些欧洲典型的砌体结构为例,建立土-地基-结构二维有限差分模型,变化量为土体、结构参数,例如改变土体参数或者结构层数,总共对 234 种工况进行了计算,基于这些计算结果,建立了一个简化的双曲回归模型。定义了土-地基-结构系统的相对刚度参数,并且考虑了地下水位和洞室的影响。该方法可在同类工程中得到广泛应用。

第二分会场共有 12 个口头报告,主要为土-结构动力相互作用一些新的理论计算方法与研究进展,涉及土-结构动力相互作用下减隔震体系的研究、地面环境振动对建筑物影响的研究、不规则建筑物 SSI 效应的研究等内容。Romeo TOMEIO 等通过算例对计算土-结构运动相互作用效应的子结构法和直接法进行了对比,结果表明两种方法在计算时区别很大,主要是因为两种方法中整体阻尼表征的不同所致。Athanasios AGALIANOS 等对桥梁的两种摇摆式隔震支座(第一种为将摇摆式隔震支座布置在桥墩和基础之间,也叫桥墩摇摆式隔震支座;第二种为将摇摆式隔震块布置在基础和地基之间,也叫基础摇摆式隔震支座)进行了对比。选用一个位于深厚黏土层场地的不对称 5 跨连续梁立交桥作为算例,建立桥面-地基-桥墩-土三维有限元模型,输入地震波选择了 20 条超设计水准的地震记录,对

该模型分别进行静力弹塑性分析和动力非线性时程分析,结果显示传统桥梁、桥墩摇摆式隔震支座和基础摇摆式隔震支座的最大位移比分别为 0.30 m、1.90 m 和 3 m。对于同一尺寸形状的桥梁,传统设计的桥梁在一半的地震激励作用下发生了倒塌,即使在设计地震动激励下,传统设计的桥梁也会产生不可忽略的残余位移;桥墩摇摆式隔震支座只有在 4 条地震激励下发生了倒塌;基础摇摆式隔震支座则在所有工况下都没有发生倒塌。老旧建筑会表现出拍效应,拍效应的产生会使建筑结构产生低周循环疲劳现象,有些会使居民产生不适,Dario RINALDIS 等为了研究产生拍效应建筑的响应特点,在一个建筑中布置加速度、速度传感器,对环境振动和受迫振动响应进行量测,测试数据可以显示建筑的健康状态,揭示其动力特性,最后发现了建筑物的拍效应并对其进行了分析。Gonzalo BARRIOS 对具有不同自振频率的单自由度建筑群进行了振动台试验,模型放置在装满砂土的层状剪切箱中,地震波采用 2010 年 Darfield 地震和 2011 年 Canterbury 地震记录,结果发现地震作用下,建筑群的基础转动比单个建筑的基础转动要小,说明如果按照单个建筑设计而不考虑周边建筑群的影响,会产生不精确的结果。Dimitris KARAMITROS 针对 1993 年 Richards 提出的滑块法对于大震的震陷预测基本准确,但是对于小震的情况则过于保守的情况,提出了一种新的水平刚性滑块法,该方法假定只有滑块发生水平滑动时才会产生竖向沉降,该模型为临界加速度比的整个范围提供了更可靠的结果,因为它能够捕捉“粘滑”和“滑移-滑移”行为。Marianna LOLI 提出了一种可用于抵抗逆断层破坏的混合基础,并用三维数值方法进行了验证。这种基础按照摇摆式隔震基础进行设计,但是它能够转移断层破裂并充分闲置基础周围的土体,从而达到限制永久变形的效果。在实验中考虑了两种结构相对于断层不同位置的情况,试验和数值计算结果也较为一致。Fernando LOPEZ-CABALLERO 等建立了一个位于成层土场地中的八层钢筋混凝土建筑的非线性弹塑性模型,目的是为了评估土体的非线性行为对结构地震响应的影响以及对结构震害进行评估,得出了一些有意义的结论。Manthos PAPADOPOULOS 等对环境地面振动作用下不确定局部场地条件对建筑物响应的影响进行了研究,建立了随机动力荷载下土-结构相互作用问题的完整有限元模型,入射波在有限元模型中的传播通过对土



体位移场的分解实现,土体的不确定性对结构响应的影 响通过蒙特卡洛方法进行模拟。作者通过具体算例研究了建筑物的地基类型对结构响应的影 响。结果显示地基土的不确定性既影响入射波场,又影响土-结构耦合系统的动刚度。大体量、不规则建筑物的 SSI 效应是非常显著的,Athanasios TZIMOU-LIS 等对 FDA(动力频谱分析方法)、E-N2(2015 年 Fajfar 等人基于反应谱法和静力弹塑性分析法提出的方法)和 ME-N2(作者提出的扩展方法)三种方法的基本原理进行了介绍,并将 ME-N2 方法运用于计算某不规则核电站结构中,通过与非线性直接积分时程分析法结果比较发现,对于扭转效应,作者提出的方法更加真实,对于不规则的大体量建筑物,ME-N2 方法可作为一种替代的抗震设计与评价方法。Damoun TAESERI 等对干砂中受水平、竖向力以及弯矩作用下的浅埋基础的埋置效应( $0 < D/B < 1$ )进行了离心机试验(六组模型)和相应的有限元分析,最后结果以交互图的形式显示。对相应的破坏包络线进行了更新,使其能够扩展到评估  $0 < D/B < 1$  的浅埋基础。Jinghua ZHANG 等学者针对隧道与竖井接头部位在地震作用下的薄弱易损性,通过三维有限元法以及振动台试验对这一部位的地震动动力响应进行分析,两种方法结果均表明隧道与竖井接头部位是地震易损部位,需要对这一部位进行关注。

第三分会场共有 12 个口头报告,涉及桩-土动力相互作用的理论计算方法、试验研究以及桩-土-结构相互作用的新进展等内容。在计算水平受荷桩基础响应时,一般将其假设为 winkler 地基梁,计算的精度主要受模量选取的限制,模量选取的主要影响因素有桩土系统的几何形状和刚度、桩的边界条件、加荷情况等。George ANOYATIS 等对现有的 winkler 模量适用性进行了分析说明,并提出了一种新的频率相关的模量表达式,该表达式可以同时适用于惯性和运动相互作用分析,该模型的正确性通过现有的一些模型进行了验证。Eva AGAPAKI 等提出了一种新的计算均质土中弹性桩动力响应的解法。这种新方法涉及三个土体参数,并且可以计算桩头三种约束条件下的解,与经典的单参数模型相比,所提出的方法对横向受荷桩弯矩幅值的计算进行了优化,特别是对于低桩-土刚度比的情况。另外还给出了运动相互作用系数的合理结果。相对于经典的模型来说,该方法的求解难度和复杂性也没有明显的提高,因为运动微分方程的最高阶数并没有

改变。为了研究低至中等地震活动区(英国)桩-土运动相互作用的意义,探究在什么情况下需要考虑运动相互作用荷载。Aslan S. HOKMABADI 等在研究中考虑了土层刚度截然不同的土层情况,并且定义了桩承载力比例极限的概念。为了能够适应相似工况的设计,先期进行了相应的参数分析,结果表明当土比较硬时,运动相互作用结果与按照惯性力计算的结果无明显差别,在设计时可不考虑桩土运动相互作用,但是当土比较软或者存在软硬土交界时,则需要考虑运动相互作用的影响。Vasiliki G. TERZI 等利用有限元法对地基上两个相邻的埋入式条形基础的相互作用进行了研究。基础-土-基础的相互作用关系用阻抗矩阵表示。结果表明,当  $S/L$  ( $S$  为两个基础之间的距离, $L$  为每个基础的宽度)较小时,相邻基础的相互影响是不可忽略的。Amir VAFAEI 等针对传统规范在计算桩基础地震响应时不考虑其隆起的情况,建立了一个桩-土-结构相互作用的模型,该模型上部结构由一根柱子和一个质量点组成,结构放置于刚性基础上,基础下方的桩基础由 winkler 弹簧模拟,此时假定弹簧仅受拉压力的作用,因此作者定义了一个新的无量纲参数——抗拉指数,用来评估桩基础的抗拉承载力。对该体系进行弹塑性分析,结果表明:当抗拉指数较低时,桩土结构体系的位移比会增大,层间位移角会减少。Hiroto NAKAGAWA 等采用振动台试验和三维有限元方法对 IPF 桩基础(桩顶未与承台连接)进行了地震动力分析,结果表明:IPF 桩基础可以降低建筑的响应和桩头位置处的应力,桩身动力响应和建筑响应与输入地震动的幅值呈线性关系。桩-土接触的宏单元模型确定的关键是其塑性本构方程的确定,破坏面在桩与土体之间的复杂相互作用的模拟中起着至关重要的作用。Noussaiba GRAINE 等针对这个问题,通过极限分析软件 OPTUM G3,计算均匀黏性土中刚性桩破坏荷载的上限和下限解。最后结果通过归一化的破坏面通过  $M-H$  (弯矩-水平荷载)图表示,并且推到了破坏面的闭合解。Youssef ABBOUD 等基于地震动参数,建立了一个预测地震中结构损伤的模型。作者通过对一个单层框架结构进行研究,加载的地震波都是一些比较有名的地震记录,通过有限元法来进行结构建模,用宏单元来模拟土-结构相互作用。针对基础的抗震研究,作者提出了相应的损伤准则,建立了损伤准则与地震动参数之间的关系,并且考虑了土体动力非线性影 响。作者认为地震加速度峰值

PGA 和潜在破坏性因素对所研究结构的地震响应有重大影响。2011 年法国执行了新的地震区划,抗震设防标准得到了提高,由于法国 70% 的电都是核电,因此开发实用而有效的核电站地基基础抗震设计方法变得非常重要。有鉴于此,法国学者 Youssef ABOUD 等建立了一个三维宏单元模型,用来评估筏板基础的地震响应行为,并且用这个数值工具来评估一个设计地震加速度峰值为  $0.4g$  的核电厂附属建筑的地震安全性,分析中可以考虑土体的动力参数变化情况,对筏板基础随时间变化的变形、位移规律进行了研究分析。Irene GEORGIOU 等对近海岸风机单桩基础和导管架基础的受力机理进行了对比分析,然后对正常和极限状态下的地震受力情况进行了计算。结果显示刚性导管架基础在地震和风荷载作用下的表现更好,其基础转角更小。Theodora MAKRYPIDI 等对多种土-结构相互作用的抗震设计方法进行了评估分类,此外还用四个无量纲参数对桩-土结构体系进行了参数化分析。作者以一个工业建筑为例,对其结构响应例如抗拔系数、楼层反应谱进行了分析计算,将所获的结果用雷达图直观显示,主要研究结果已经编制为相应的规范。Navid YEGANEH 等为了探究气候变化对高层建筑地震响应的影响,建立了一个土-结构相互作用的三维有限差分模型,上部结构为一 20 层的钢筋混凝土框架结构。通过将表层 4 m 的土体饱和度设置为 5%、17.5%、60% 以及 100% 来表征气候变化的影响,土体本构采用小应变剪切模型,结果表明地震中的天气变化(降雨)对于上部结构地震破坏影响比较大,需要防范于未然。

第四分会场共有 11 个口头报告,涉及液化场地中 SSI 效应研究特殊结构如风电、储液罐、比萨斜塔等建筑 SSI 效应的研究和对浅基础、埋置基础地震响应评价的新方法等内容。Fiona HUGHES 等通过振动台试验,对可液化土场地中带地下室的结构进行了研究,结果发现,当场地土还没有完全液化时,基底地震动峰值并没有发生放大和衰减,频率成分也没有明显变化,但是当地基土完全液化时,地震波则产生了衰减现象,由于地下室的存在,结构底的支承压力比较小,可以使基底完全液化,使得结构自然隔离,但是如果地下室不存在,结构底部竖向应力较大,可能会使结构得到损坏。Maxim MILLEN 等提出了一种可以评估液化场地建筑性能的程序,这个程序是在一个可考虑桩-土-结构相互作用的位移评估程序上改进得来的,可将其拓展

到可考虑场地液化的效应。该程序对土体、场地、结构都做了一定的假设,后续需要作进一步的研究工作。Dimitris PITILAKIS 等对一个典型的二维抗弯 RC 框架结构进行了计算评估,在计算中考虑了土体非线性和 SSI 效应,对不同土层条件、地震水平等条件下的性能都进行了分析。结果表明,与线性方法相比,考虑 SSI 效应在研究中的大多数情况下是不利的。Emmanouil KIRTAS 等对 Kalochori 地区一些储液罐的动力特性进行了研究,这些储液罐在经历地震后,其上的传感器记录到了很多动力响应,其振动周期特性通过这些记录进行识别,并用规范的表达式进行计算对比,另外作者还用数值计算对地震记录进行补充和验证分析,对基础固定和柔性地基两种情况分别进行了考虑,得出了很多结论。Zsuzsa B. PAP 等对不同土-结构相互作用的建模方法可能导致的误差进行了对比分析,发现在一般设计中忽略的共振效应可以显著提高地震荷载。作者在考虑到这种影响的情况下重新定义了设计参数的范围。Sander MEIJERS 等用有限元法对一个简单的建筑进行非线性时程分析,基底加载 7 条人工地震波,场地土主要为砂土和黏土,土体本构采用 Hardin-Drnevich 模型。将全有限元模型的计算结果与简化的二自由度系统结果进行对比,结果发现简化的二自由度系统结果可能会偏离全有限元模型结果,另外,作者还对复杂频率响应分析中的地基参数进行了敏感性分析。Philipp MICHEL 等对风电在风荷载作用下的土-结构相互作用效应进行了研究,利用子结构法将整个系统分为结构和土体模型,风机模型通过有限元法建立,土体采用边界元法建立,计算发现整体模型的固有频率在 0.2 Hz 左右,主要取决于土体的刚度。Kensuke Shimane 等学者提出了一种计算埋置基础的简化圆锥模型。Peter RANGELOW 等对软土场地中由 430 根群桩基础支撑的核电站进行了地震下土-结构相互作用分析,在该文中,作者对群桩基础阻抗的确定、基桩之间相互作用的恰当建模、以及饱和软土中大泊松比的影响进行了详细分析与说明,另外,作者还对整体分析的方法和技术进行了分析和讨论。J. Paul SMITH-PARDO 提出了一种用强度、刚度、变形能力来评价浅基础振动响应的简单方法,基础强度是通过将梅耶霍夫的等效基础宽度概念扩展而来的,基础刚度通过作者先前提出的数值模型来描述,按比例缩放的基础模型的实验结果来描述变形能力。最后得出了一些很有意义的结论。George

Mylonakis 经过试验和数值计算分析认为比萨斜塔不倒的原因归功于土-结构相互作用,由于比萨斜塔所在场地土体比较松软,塔与柔软的地基土相结合,使结构的振动特性得到了大幅度的改变,从而使塔与地震运动不产生共振,保证了比萨斜塔在历次地震中的安全性。

### 6.5 地震工程大尺度设施提供了更好的试验模拟条件

地震工程大尺度设施是本届大会设置的主题之一,该主题只举行了一个分会场的交流,共有 7 个口头报告。该主题目标为:交流大型振动台、离心机、伪动力试验设施以及大型计算模拟系统建设和使用的情况,寻求更加真实、更加准确的地震工程大尺度试验设施和技术等。总的来看,大尺度、复杂模拟、多自由度运动、大型数值分析并行成为目前地震工程试验研究的方向。

Giuseppe 博士介绍了苏黎世联邦理工学院结构工程实验室新建的一种可模拟 6 自由度的多轴预装配式试验台系统(MAST),该系统在混合模拟试验时在保证试验精度和试验成本的同时,可以实现旋转和直线等多自由度运动。系统采用模块化的刚十字联结轴装载 6 自由度样品。最大试样尺寸可达  $15.12\text{ m} \times 11.52\text{ m}$ ,小尺寸试样为  $15.12\text{ m} \times 11.52\text{ m}$ 。最后提出建设混合模式控制和工作负载自平衡的控制系统是该设备应用中面临的挑战。Tatjana 教授用全尺寸的振动台强震试验验证了典型的中欧设计中安装在钢筋混凝土预浇建筑物上外挂板的动力响应,试验对比了摇摆和固定外挂板动力响应的差异。Louizos 博士运用运动硬化和相关流动准则的非线弹性本构模型,通过数值计算研究两个非替代基底墙的地震响应和下部基底土行为。通过数值分析验证离心机试验,证明加速度时程,加速度、速度和位移谱、无量纲壁矩分布和动态土压力结果和其他学者的离心机试验研究结果一致,具有一定的实用性。孙成江教授运用改进的分层壳模型分析了超高层建筑的弹塑性时间历程,并用 opensee 开源程序和 SAP2000 软件对比分析结果,研究了不同层壳模型对 258 m 框架-核心-筒超高层建筑的全局和

局部响应的影响,总结了框架柱、耦合梁和加固层与整体结构破坏的关系。Dimitris 教授等将文献和准则中计算系统阻尼的方法应用于大尺寸模型自由和强制振动测试中获得的实验数据,以验证它们并计算系统的阻尼比,研究发现来自基础和土的相互作用及衰减阻尼的迟滞现象都对系统阻尼有很大影响。Agnese 教授通过对带有水平包层板的预制结构伪动力试验,证实了水平外挂板的响应与裸架和垂直板的响应差异甚大,由于配置的不同,质量和刚度随之改变,从而改变了整个结构的响应。并总结得出水平板相对于垂直板以更复杂的方式影响整体结构的动态响应。

## 7 结语

本届大会是一次规模大、涉及领域广、学术水平高、反映进展全面、成功圆满的欧洲地震工程大会,大会主席、希腊塞萨洛尼基亚里士多德大学 Pitilakis 教授高度重视大会组织工作,希腊地震工程协会、亚里士多德大学和会议公司做了大量、细致、有效的会议组织工作。据大会闭幕式上 Pitilakis 主席报告,大会会讯的邮寄名单达到 3 万多人,论文提交用户 3 000 多个,印制会议手册和议程 26 万多页,上传照片 5 000 多张,98%对会议议程的要求得到了满足。本届大会组委会好的做法值得我们借鉴。本届大会受到了欧洲之外相关国家的普遍重视,在参会的 67 个国家代表中,欧洲之外的日本、中国、美国、伊朗分别以参会代表占比 9%、4.1%、3.8%、2.6%分别位居代表人数第二、第八、第九位、第十一位,大会对推动欧洲和国际地震工程研究和工程实践领域的学术交流与合作发挥了重大的积极作用。

致谢:在本文第一作者此次出国参会过程中,中国地震局及国际合作司领导给予了及时指导和大力支持,中国地震局兰州地震研究所领导和外事办公室给予积极支持和协助,在此一并表示衷心的感谢!

## 参考文献(References)

- [1] The European Association For Earthquake Engineering (EAEE).Proceedings of 16<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering[C].Thessaloniki,Greece2018.