

王兰民,夏坤,董林,等.第 16 届世界地震工程大会有关报告研究进展综述[J].地震工程学报,2017,39(2):0381-0394.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0381
WANG Lan-min, XIA Kun, DONG Lin, et al. Summarization of the Related Research Progress of the 16th World Conference on Earthquake Engineering[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 0381-0394. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0381

第 16 届世界地震工程大会有关报告研究进展综述^①

王兰民^{1,2}, 夏坤^{1,2}, 董林^{1,2}, 刘琨^{1,2}, 王谦^{1,2}

(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)

摘要:第 16 届世界地震工程大会于 2017 年 1 月 9—13 日在智利圣地亚哥市召开。大会主题为:“快速恢复—地震工程新挑战”。经中国地震局批准,在国际合作司的大力支持和指导下,自己有幸赴智利圣地亚哥市参加了第 16 届世界地震工程大会。本论文对会议概况做了简介,对其中 3 个大会特邀报告、2 场辩论会和 12 个专题分会报告内容进行了综述,并与读者分享了我个人的体会和思考。论文综述涉及的 3 个大会特邀报告题目分别为“快速恢复:地震工程的下一个挑战”、“钢筋混凝土建筑物抗震设计中快速恢复的探索——智利的实践”和“长持时地震动对土液化灾害的作用”;2 场辩论会主题分别为“性能设计:是承诺还是陷阱?”和“抗震设防要求规定:概率性与确定性”;12 个专题分会主题包括:结构倒塌概率的评估,改善发展中国家住房地震安全的非技术战略,近期破坏性地震(包括 2015 年尼泊尔地震)的现场调查与分析,深基础的土-结构相互作用,地面破坏与液化,地震引起的天然斜坡滑坡,岩土室内试验和现场试验,城市层面的地震危害性、危险性与地震风险管理,快速恢复,地震风险经济与保险,城市的未来:今天规划明天的地震风险,管理政策等。

关键词:地震工程;世界大会;快速恢复;会议综述

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)02-0381-14

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0381

Summarization of the Related Research Progress of the 16th World Conference on Earthquake Engineering

WANG Lan-min^{1,2}, XIA Kun^{1,2}, DONG Lin^{1,2}, LIU Kun^{1,2}, WANG Qian^{1,2}

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

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

Abstract: The 16th World Conference on Earthquake Engineering was held in Santiago, Chile in January 9—13, 2017. The theme of this conference is “Resilience, the new challenge in earthquake engineering”. The author had the honor to participate in this Conference. This paper gives a brief introduction to the general program of the conference, which includes 3 invited lectures, 2 debates

① 收稿日期: 2017-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(批准号: No.51478444)

作者简介: 王兰民(1960—), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, 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.

and 12 parallel sessions of special topics, and lastly shares the author's personal experience and thinking. These 3 invited lectures titled "Resilience, the new challenge in earthquake engineering", "The quest for resilience in seismic design of RC buildings: The Chilean practice", "Effects of Long-Duration Motions on Soil Liquefaction Hazards". And these 2 debates about "Performance-Based Design: Promises and Pitfalls?", "Prescription of Seismic Demands: Probabilistic vs. Deterministic". And those 12 parallel sessions include topics: Assessment of the probability of structural collapse, Non-technical strategy on improving housing seismic safety in developing countries, Field investigation and Analysis of recent destructive earthquakes including 2015 Nepal earthquakes, Soil-structure interaction of deep foundation, Ground failure liquefaction, Earthquake-induced landslides in natural slopes, Geotechnical laboratory test and in-situ test, Seismic hazard, risk and earthquake risk management at city level, Resilience, Earthquake risk economy and insurance, The future of the city: planning for future earthquake risk, Management policies, etc.

Key words: earthquake engineering, world conference, resilience, conference summarization

1 会议概况

第16届世界地震工程大会于2017年1月9—13日在智利圣地亚哥市石屋会议中心(Casa Piedra Convention Center)召开。大会主题为：“快速恢复—地震工程新挑战”。本次大会由国际地震工程协会主办,智利地震学与地震工程协会承办,智利政府官方网站、美国地震工程研究所和智利大学国家地震中心等三家机构为大会合作伙伴,瓦尔帕莱索天主教大学、费德里科圣玛丽亚科技大学、工程大学工程系、智利大学物理与数学科学系和智利土木结构工程协会等5个单位为共同组织单位。40家公司为大会提供赞助,并在会场展区展出了自己的技术服务产品或仪器产品。来自世界各个国家和地区、相关国际组织的官员、专家和学者2493人参加会议,大会安排了5个特邀主题报告、2场辩论专题报告、4个邀请报告,大会共设43个普通专题、111个特别专题,以及3个特别纪念专题。本届大会共接受论文2130篇,其中口头报告1509个、展板报告637个。加上陪同人员,参会人员达到3000多人。我国有30多位代表参加了会议。本文第一作者在会上做了口头报告。

本次大会与历届世界地震工程大会相比,是规模较大、层次最高、设置专题最多、会议交流内容最为广泛、口头报告人数最多、影响力最大的大会之一。大会开幕式简短而充满学术氛围,在1月9日上午8:30举行的开幕式上,首先由大会组委会主席、智利大学Rodolfo Saragoni教授致欢迎词,国际地震工程协会执行副主席、日本京都大学Masayoshi Nakashima教授致辞,国际地震工程协会主席、印度理工学院Sudhir K.Jain教授因病未能亲自出席大会,但在开幕式上做了视频讲话。他强调世界地震工程大会自从1956年创办以来,每4年举办一次,它为知识、思想、研究成果和实践经验的全球交流和相互学习提供了重要场所。他指出,随着世界人口的增长和发展扩张,地震风险持续增长,共享我们的知识和经验,与各个不同国家的同行交流沟通,将有助于一道致力于减轻这种风险。这次智利同行为我们在圣地亚哥这样一个充满生机和令人激动的城市精心筹办了本次大会,并给我们提供了学习他们第一手重建经验的机会,相信参会的各位科学家、工程师、建筑师、规划者和政策官员都能够喜欢本次大会,并预祝本次大会圆满成功。半个小时开幕式之后,紧接着安排了第一个大会特邀报告。

oshi Nakashima教授致辞,国际地震工程协会主席、印度理工学院Sudhir K.Jain教授因病未能亲自出席大会,但在开幕式上做了视频讲话。他强调世界地震工程大会自从1956年创办以来,每4年举办一次,它为知识、思想、研究成果和实践经验的全球交流和相互学习提供了重要场所。他指出,随着世界人口的增长和发展扩张,地震风险持续增长,共享我们的知识和经验,与各个不同国家的同行交流沟通,将有助于一道致力于减轻这种风险。这次智利同行为我们在圣地亚哥这样一个充满生机和令人激动的城市精心筹办了本次大会,并给我们提供了学习他们第一手重建经验的机会,相信参会的各位科学家、工程师、建筑师、规划者和政策官员都能够喜欢本次大会,并预祝本次大会圆满成功。半个小时开幕式之后,紧接着安排了第一个大会特邀报告。

2 相关报告的研究进展

2.1 特邀报告

(1) 特邀报告1:“快速恢复:地震工程的下一个挑战”。

加州大学伯克利分校S.Mahin教授在大会开幕式之后紧接着做特邀报告,报告的题目呼应本次大会的主题,在大会文件中为“通过设计实现快速恢复;以结构工程的角度”;实际大会报告时的题目为“快速恢复:地震工程的下一个挑战”。因此,该报告最为重要,最受关注,听众最多。他在报告中指出,地震工程的进步主要由城市化、建筑学、地震事件所驱动,同时新的设计工具和技术、经济发展和住户、

业主和公众期望也起到了推动作用。对于世界各地近期地震的响应,人们更多地关注什么样的性能目标对于可能遭受强烈地震地面振动的建筑物和其他结构是合适的。通过大量震例检验,认识到当前地震工程面临两个方面的挑战:第一方面是改善和扩展基于性能的地震工程概念,使工程师能够自信地选择性能增强的结构系统和非结构组件;第二个方面的挑战就是快速恢复,以便地震之后设施功能正常,可以继续使用。这不仅要求结构功能正常,而且各种各样的网络和服务也要正常运营。

他回顾了结构抗震分析的发展历程,从计算尺和计算器的验算模拟,到试验模拟,再到计算机数值模拟,设计的数值模型越来越大,越来越复杂,这样的模拟结果能不能相信?通过41个专家团队参加的测评结果表明,相对误差达到38%。如何提高模拟精度?人们又提出并开展了试验与计算同步进行的混合试验模拟。报告中介绍了针对钢支撑结构和核电厂隔震开展大型振动台试验和计算模拟混合试验的情况。同时他认为观测是检验结构抗震能力的直接方法,它可揭示出设计规范、工程质量和施工中的问题。通过对土耳其、日本、中国大地震震害的调查观测发现,对于发展中国家和小概率大震事件发生的地区,保障生命安全是重大问题。建筑规范是公共安全的最低标准,它的目的是结构抗御地震地面运动作用的设计和建设的最低要求,现在不仅要限定结构的破坏,保持使用功能,而且要保护结构免受重大破坏,避免人员死亡。

研究表明,脆性结构不利于抗震,具有延性的结构是抗震安全的,但成本昂贵且难于维修。单体破坏的建筑物对原认为安全的周边建(构)筑物安全性具有负面的影响,投入较小的结构构件造成人员伤亡很小,而投入较大的非结构单元和室内财产造成人员伤亡占了多数。因此,不应孤立地只考虑结构问题,而应该从灾害与灾难的角度来考虑它。自然灾害可以造成广泛的中等到严重破坏,这些破坏如果只影响到一个社区的响应和恢复能力,那它只是灾害。而广泛的破坏如果给一个城市和一个国家的幸福与活力造成长期持续的社会、经济和文化影响,这就由灾害转变成了灾难。为了防止灾害转变为灾难,这就需要建设快速恢复社区。快速恢复社区必须为市民、组织和企业提供装备、设施和服务,以便他们在大震和余震之后具有就地避难的能力。没有

这个能力,社区恢复将会很慢。

一个社区持续不断的功能取决于供给侧、顾客、生命线系统、设施与设备、交通、金融、家庭等许多方面,是一个系统工程。这可以通过“安全+”的方法来实现。“安全+”的方法可以使震后检查和维修的投入最少,中断时间最短。“安全+”方法是安全+两个途径。一个途径是减少震后中断,加速正常运行恢复。这就要求系统要知道破坏部位,易于检查,便于维修;系统侧向位移要最小化,加速度要最小化,残余位移要最小化。另一个途径是超出最低安全标准的性能设计。这一设计将着重关注伤亡、中断时间、成本(初始投入、维护、维修)和投入回报。Mahin教授通过调查一些快速恢复设计理念,针对部分预应力自中心钢筋混凝土柱、基础、隔震、附加阻尼器等的振动台试验测试,重新审视了上述目标实现的效果。同时介绍了美国国科会自然灾害工程研究设施的概况,其中全新仿真测试解决方案Sim-Center可用于评估多种灾害作用下各种结构改善快速恢复特性的情况。

最后,他总结提出了地震工程下一个挑战的5个方面:①提出可靠和经济有效的方法,评估与减轻结构和生命线系统现有财产的易损性;②研究开发坚固稳定的结构,使其对结构特性和地震动特性不敏感;③提出改良的基于性能的工程方法,确保遭遇显著地震后,对维持功能更加自信;找出可靠和低成本的方法,防止罕遇地震事件发生时结构倒塌;④快速恢复需要考虑社区,而不是单体设施;⑤迎接这些挑战仅靠一个人或一个部门是不够的,必须要有促进合作的工具。

(2)特邀报告2:“钢筋混凝土建筑物抗震设计中快速恢复的探索——智利的实践”。

第二个特邀报告为智利大学Rene Lagos土木工程师所做的“钢筋混凝土建筑物抗震设计中快速恢复的探索——智利的实践”。他先介绍了1570—2015年智利发生的31次7级以上地震的震中和烈度分布,平均每15年一次,最大地震为1960年5月22日的Valdivia 9.5级地震。因此智利的建筑物抗震设计假定在建筑物使用寿命期内,至少遭受一次大震。通过对2010年2月27日Maule 8.8级地震造成的建筑物震害情况的调查统计,分析说明了抗震设计的主要问题和解决途径。此次地震在调查区造成的地震动影响为475年一遇,调查给出

了1985—2009年建设的10 000栋3~9层及以上建筑物在不同烈度区(V~IX度区)内的数量以及破坏、倒塌的数量。从抗震性能水平:完全运行、运行、生命安全、近乎倒塌;地震风险水平:频遇地震(43年)、偶遇地震(72年)、罕遇地震(475年)、非常罕遇(975年);性能指数:0.002、0.005、0.015、0.025;结合智利抗震设计规范 NCh433 的抗震设防要求,所进行的结构抗震性能分析表明,要同时减少结构破坏、非结构破坏和室内物品破坏,用传统结构是不可能的,而用抗震保护系统是可能的。进而提出了通过增加结构刚度来增强抗震性能的战略。他提出从结构、人、社会三个角度提出可接受的抗震性能水平,用性能指数设计控制建筑物的性能目标。然后他介绍了智利在结构抗震设计方面的实践经验教训。结果表明:①成功的抗震性能始于对结构系统的选择,因为50%严重破坏的建筑物被归因于能够避免的结构原因,另外50%被归因于地基土的分类,导致了比预期大的位移需求;②对设计规范执行情况的高强制性审查是十分必要的,因为它可对结构的框架、砖石填充、混凝土剪力墙、二重体系抗震措施的设计进行审查,确保性能目标能够实现;③475年一遇的抗震设计经受了智利2010年8.8级地震的检验,既能保障生命安全,又能保障运行性能,达到了快速恢复目标。报告最后展示了智利经受了地震考验的7栋28层(109 m)~62层(300 m)圣地亚哥标志性商业中心大厦、隔震住宅楼和太阳能热电厂的抗震设计。

(3) 特邀报告3:“长持时地震动对土液化灾害的作用”。

第三个特邀报告为美国华盛顿大学 Steve L. Kramer 教授所做的“长持时地震动对土液化灾害的作用”。他在报告中指出,液化在世界各地地震中造成了大量的破坏,室内试验和实例现场调查对于认识液化土特性的复杂机理、评价液化势和液化灾害经验方法的发展发挥了有价值的作用。但传统的室内试验对地震荷载进行了简化,现场实例对大范围的场地条件来讲又是稀少的。然而近期的瞬态加载模式室内试验可以使土遭受实际的地震作用,试验研究揭示出土对不同幅值加载循环响应的复杂性,同时证实土的变形对液化后加载的依赖性。这些试验结果和大震液化实例数据库综合分析表明,很有必要对长持时地震动作用下液化灾害评价进行

研究。他在报告中评论了可液化土特性和特长持时地震动对可液化土特性的影响,描述了在液化灾害评价中考虑液化时间的框架,这个框架可以将荷载分解为液化触发前分量和液化出发后分量,可以用不同的地震动强度测量来描述液化触发和后果。而液化后果与液化触发后地震动强度的相关性可以用于改善对液化土反应预测的精度,降低不确定性。这样的方法有利于液化的评价。

2.2 辩论会报告

(1) 第一场辩论会:“性态设计:是承诺还是陷阱?”

辩论会是历届世界地震工程大会的亮点之一。本届大会安排了两场辩论会,第一场辩论会于1月9日举办,论题是关于基于性态抗震设计理论。辩论会正方为 Farzad Naeim 教授,反方为 Polat Gulkan 教授。

Farzad Naeim 教授是地震工程研究中心(EE-RI)的名誉会员,负责领导该中心震后考察团队,完成了台湾1999、伊朗2004及智利2010地震震害调查。Polat Gulkan 教授于1996—2004年担任国际地震工程协会(IAEE)董事,并于2004年被提名为该协会执行副总裁,2010—2014年担任总裁。双方就目前基于性态抗震设计理论的优缺点展开辩论。

基于性态的抗震设计理论研究已有20余年。1995年美国加州结构工程师协会的VISION 2000委员会提出了基于性态的抗震工程(performance-based seismic engineering,简称PBSE)。所谓PBSE就是从项目的提出开始直到建筑寿命结束的全过程,它包括地震危险性分析、性态水平和性能目标选择、场地适应性决策、概念设计、初步设计、最终设计、设计可行性检查,设计重复检查、施工质量保证和建筑物寿命期内的维护,每一步都是性态工程成功的关键,必须达到与选择的性态目标相适应的水平。

抗震性态设计或基于性态的抗震设计是指,旨在使所设计和建造的工程结构能在各种可能遇到的地震作用下,其反应和破坏性态均在设计预期的范围内,从而在最经济的条件下,设计出在最不利的极限荷载下能继续确保工程结构的功能;不仅能保证生命安全,而且能确保经济损失最少。就其实质来讲,基于性态的设计是一种企图对地震破坏进行半定量控制的设计。如果想用一句话来概括性态设

计,那就是:设计建筑物性态的设计或设计建筑物反应的设计。为什么要强调设计性态或性态的设计呢?因为只有通过控制结构(包括它的构件和部件)的性态,即其破坏或反应,才能最终确定结构的性能或抗震能力,并最终实现确保功能之目的。

在建筑物的寿命期内破坏性地震通常不经常发生。在技术上要把建筑物设计成能抵御这种极端的地震使之不发生破坏是完全可以做得到的,但一般认为这样做是极不经济而又不必要的。因此抗震设计的思想经多年的演变就形成一种共识:经抗震设计的绝大多数建筑物在遇到破坏性地震时,容许其出现一定的破坏,但应确保生命安全,这就成为工程抗震设计的一个主要任务,而且已经作为一种传统的设计思想承袭下来。多年来的震害经验也表明,对大多数经过抗震设计的结构来讲,其震害可以控制在一定范围内以致能有效地减少生命损失,这一点已为广大结构工程师所接受。

目前世界各国普遍采用的抗震设计理论是多级设计的思想,如“小震不坏”、“中震可修”、“大震不倒”。依此设计思想设计的建筑结构在遇到破坏性地震时允许出现一定破坏,但主体结构不能倒塌,以确保生命安全。多年来的经验表明,这一点基本上可以做到。

然而在总结近来一些震级并不算太大的地震震害时,人们却惊讶地发现,在地震中的人员伤亡确实很少,但经济损失却大得惊人。例如:1989 年的 Loma Prieta($M7.1$)地震,伤亡数百人,经济损失为 150 亿美元;1994 年的 Northridge($M6.7$)地震,伤亡数百人,经济损失约为 200 亿美元;1995 年的日本阪神($M7.1$)地震,死亡 5 500 多人,经济损失高达 1 000 亿美元,而震后恢复重建工作耗资又将近 1 000 亿美元。

那么,在地震强度不太大的情况下为什么会造成如此巨大的经济损失呢?研究表明,引起这种现象的原因主要是由于建筑结构的破坏使得结构的各项功能受到了巨大影响。

因此以目前这种基于生命安全的性态水准进行设计和建造的房屋显然不能满足社会和公众对结构抗震设计的需求,抗震设计还应该使结构的功能在地震发生时能够得到某种程度的保障,也就是说,使得抗震设计能够既经济又可靠地保证建筑结构的功用地震作用下不致丧失乃至不受影响。这就是

基于性态抗震设计的理念。

在本次辩论会上,正方 Farzad Naeim 教授认为基于性态的抗震设计方法是在设计和施工过程中都能可靠地预测该结构物在未来地震作用下的人员安全、财产损失。他用 PPT 介绍了什么是基于性态的抗震设计,为什么我们要用它,它的优点与不足。他阐述了高层建筑、核心筒建筑等复杂建筑类型的需求,使 PBSD 方法日益流行。大型计算机的出现,使非线性计算成为可能。地震危险性分析的准确性至关重要,近来的研究使其日益精确。最后他强调了虽然该方法仍有诸多不足,但它却帮助我们认识到新的问题。他介绍了 PBSD 方法的发展过程,认为和结构设计理论的进化一样,PBSD 方法也在逐步完善。

反方 Polat Gulkan 教授则认为,现阶段人们对 PBSD 方法评价过高。他首先用一个图展示了人们的认知,他将认知分为:知道、不知道、困惑、以为知道实为不知道、意识到难以获知。接下来他提出地震危险性分析可靠性太低,人们还不能完全认识地球。基于抗震设计理论的数值分析,无法取代试验,试验结果才是衡量设计理论的标杆。现阶段所有抗震理论都与实际情况有出入,但出入大小我们都无从获知。最后,他强调了建筑物在设计与施工阶段之间的微笑差别,可能就会造成预期结果的显著差异。毕竟施工与设计之间不可能完全一致。

本次辩论会,对基于性态的抗震设计理念进行了研究背景分析、研究现状介绍以及现阶段我们面临的严峻挑战。目前在我国已经出台了相关规范。由中国地震局工程力学研究所、中国建筑科学研究院和哈尔滨工业大学主编的《建筑工程抗震性态设计通则(试用)》(CECS160:2004),于 2004 年 5 月 25 日由中国工程建设标准化协会批准,作为一本自愿采用的标准,推荐给工程技术人员和相关研究者使用。

本次大会举办此次辩论会,使广大工程技术人员与研究者对基于性态的抗震设计方法的认识更全面,存在的问题更了解。在将来的工程设计与研究工作中更能抓住重点,以便于提高工程抗震性能以及改进结构抗震设计方法。

(2) 第二场辩论会:“抗震设防要求规定:概率性与确定性”。

大会于 1 月 10 日举办了第二场辩论会,论题为

地震危险性分析确定性方法与概率性方法孰优孰劣。辩论会正方为 Nicolas Luco 博士,倾向于概率性方法;反方为 Hiroshi Kawase 教授,认为确定性方法才是未来的趋势。

Nicolas Luco 博士是美国地质调查局的结构工程师,擅长结构抗震设计与损失评估,他负责完成了美国地震灾害区划图编图项目的抗震设计和损失评估任务。他的学历包括一个加州大学伯克利分校土木工程专业的博士和一个斯坦福大学统计学专业的硕士。

Hiroshi Kawase 教授就职于日本京都大学,拥有日本第一级建筑师执照。主要成就有:应用地脉动检测地下构筑物的专利,发现 1995 年阪神地震重灾害的致灾原因,地震危险性分析方法,建筑物震害预测。

地震危险性分析是根据区域范围内地震活动状况和地质构造环境评价目标场地未来某一段时间内可能遭受的地震动危险性程度。目前所采用的地震危险性方法主要有两种:即确定性地震危险性分析方法(DSHA)和概率地震危险性分析方法(PSHA)。

确定性地震危险性分析方法是根据地震地质构造背景、历史地震和地震烈度衰减关系等资料估计某一区域未来遭遇的地震烈度水平,并以确定的数值表达。确定性地震危险性分析方法最早见于上世纪 50 年代初的《全苏地震区域划分图》,该图采用历史地震统计的方法,结合各个地区的地震地质构造条件,将已遭遇的地震烈度作适当延长和拓展,确定区域范围内的地震危险性。美国则依据地震能流密度来确定各个地区的地震危险性。至 20 世纪 80 年代,日本松田时彦等人以日本列岛活断层资料为基础绘制了全日本地震危险性图,该图描述了全日本列岛 5 度(相当于 MM 烈度表的 8 度)以上地震的期望平均间隔。

我国前两代地震区划图也采用确定性方法编制。第一代区划图在 1956 年前后编制,该图的编制采用历史地震重演和地质构造类比原则,其技术路线与苏联 50 年代初的地震区划图相近,该图首次反应了我国不同地区地震烈度分布,不足之处在于没有赋予明确的时间概念,某些地区烈度值偏高。1977 年编制的二代区划图在一代图的基础上提出了具有时间概念的烈度区划,它以确定性方法给出

了未来百年内一般场地条件下可能遭受的最大烈度,被正式作为中、小工程抗震设防的依据。目前,确定性方法在我国主要用于评定某些特殊工程(如核电厂)厂址的设计基准地震动。

经典的概率性地震危险性分析(PSHA)方法在 1968 年由 Conell 提出,该方法只适用于点源模型的地震危险性分析,主要强调地震发生的随机性和不确定性。1976 年美国 Algermissen 和 Perkins 在 Cornell 点源模型的基础上作了进一步改进,提出了断层破裂模型,并编制了 50 年超越概率 10% 的基岩水平地震动区划图,该图被美国 ATC(Applied Technology Council)所采纳,应用于美国抗震规范(ATC-3)。1985 年 Bashshenelal 根据加拿大地区的地质构造条件和地震活动性,采用 PSHA 法编制了加拿大地震区划图,图中标出了加拿大地区年超越概率为 0.2% 的水平峰值加速度和水平峰值速度值。Erdik 等人于 1986 年发表的土耳其地震区划图也是采用 PSHA 方法,以复发周期为 225 年、475 年和 10 000 年为目标的最大地震烈度最大水平峰值加速度等值线图。1990 年 Reiter 在《Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights》一书中,对概率地震危险性分析方法的基本程序作了具体的概括,之后,该方法被国际上广泛接受,世界许多国家相继效法使用,PSHA 方法在此基础上也得到不断地改进。1995 年 Frankel 考虑到对美国东部地震构造认识的局限性,开始使用圆形空间光滑地震活动性的方法确定美国东部的地震危险性,该方法摒弃了地震构造单元,直接根据地震目录统计网格化单元($0.1^\circ \times 0.1^\circ$)上地震活动率,利用圆形高斯光滑函数处理累计地震活动率,以点源模型评价地震危险性。圆形空间光滑模型强调历史地震重演,但并未考虑中强地震活动空间分布与构造断裂的空间相关性。2003 年 Lapajne 等对该方法进行了改进,采用断层导向性的椭圆平滑方法,使评价地震活动性参数显得更加合理。该方法在世界各国的地震危险性分析工作中得到广泛应用。美国 2008 年的地震危险性图(NSHM, 2008)就采用了空间光滑模型假设,地震活动的空间不均匀性通过采用网格($0.1^\circ \times 0.1^\circ$)上地震频数的光滑分布来表征。2014 年美国最新地震区划图在保留了原有高斯平滑模型的基础上,又提出了近邻型自适应平滑模型(nearest-neighbor-type adaptive smoothing model),用以更

好地表征背景震源区地震活动性。

在本次辩论会上, 正方 Nicolas Luco 博士指出, 从 1997 年以来, 美国抗震规范的基岩水平地震动区划图都是结合确定性方法与概率性方法推导求出的。美国的风险目标最大化地震反应谱加速度 MCE_R (risk-targeted maximum considered earthquake spectral response acceleration), 就是取的确定性方法与概率性方法计算结果的较小值。另外 Luco 博士指出地震危险性分析确定性方法也要用到概率性方法的地震重现期概念, 即确定性方法不能独立于概率性方法之外。Luco 博士还指出确定性方法面临的挑战在于如何确定潜在震源未来的震级, 并例举很多 8 级以上地震的发震断层, 在震前都不像是会发生这么大地震的。最后 Luco 博士认为, 地震危险性分析方法所提供的概率性地震动结果正好可以与建筑物在使用期内倒塌或功能失效的概率相呼应, 可供预测一个建筑物在使用周期内的概率性的性态估计。

反方 Hiroshi Kawase 教授, 首先用 1995 年兵库县南部 $M_w 6.9$ 地震与 2016 年熊本 $M_w 7.0$ 地震两次较大的震害为例, 发现近断层附件记录地震动都大于区划图上该地区的设计值, 而区划图是用地震危险性分析概率性方法获取的, 即概率性方法分析结果偏于危险。接下来 Hiroshi Kawase 教授尝试用概率性方法里的指标离散值来控制危险性分析的各个参数, 以取得确定性的危险性分析结果。然而结果证明, 所有的分析都是想象中的东西, 很难说与现实的差距有多大。最后 Hiroshi Kawase 教授提出要用实际地震动记录来作为地震输入的设想, 认为实际地震动记录更符合性态设计中非线性考虑的物理意义, 并且由于地震记录的极大丰富和计算能力的迅速提高, 用多条实际地震动记录作为结构设计的地震输入已不难做到。

本次辩论会, 对地震危险性分析确定性方法及概率性方法的优缺点、现阶段的研究现状、各方法面临的挑战与机遇都进行了非常全面的展示。两种方法相互之间既有区别, 又有联系, 很难将二者完全区分。并且概率性方法虽被重视多年, 仍然无法全面取代确定性方法。例如我国核电厂厂址的地震危险性分析就要用确定性方法。因此两种方法都需要发展, 且任一方法的进步都会促进另一方法的发展。

2.3 专题分会报告

(1) 结构倒塌概率的评估

该专题有 8 个口头报告, 主要涉及如下内容: 同济大学的李杰教授指出了随机地震动对大型钢筋混凝土结构非线性的影响, 强调了在结构倒塌分析中必须重视结构损伤演化与地震动随机性的耦合效应。日本住友铁与金属公司的 Suzuki 博士通过大量钢框架房屋地震倒塌风险评估试验, 总结了不同类型钢柱在循环荷载作用下的滞回性能。美国斯坦福大学 Miranda 副教授以及他们的团队指出了在结构地震倒塌概率的评估中, 要用多个地震记录、两级强度, 并且地震动的卓越周期应尽量覆盖一个宽的范围, 而不是仅仅在结构自振周期附近。北京交通大学的卢晓讲师以北京某 528 m 超高层建筑为实例, 演示了地震倒塌分析作为抗震优化设计的新方法。加拿大英属哥伦比亚大学的 Zadeh 博士以基于性态概念的设计方法模拟了考虑土-结相互作用的整体式桥台桥梁倒塌分析, 证实了不考虑土会低估桥梁倒塌风险。东京工业大学的 Kasai 教授通过一个全尺寸的四层钢结构建筑在不同地震输入下的反应, 总结了建筑物在倒塌过程中的能量输入和耗散机理。伊利诺伊斯大学香槟分校的 Sizemore 博士介绍了在美国广泛使用的低延展性的钢支撑框架, 通过大量地震倒塌性分析给出了其在未来地震中倒塌的风险。里海大学的 Tahmasebi 博士后将建筑物地震倒塌分析分为系统级、子系统级和构件级三个层次, 以损伤场景分析来确定建筑物倒塌、拆除或局部修补的应对措施。

这一专题分会的主要目标是对不同类型建筑物倒塌分析的主要影响因素做一个全新的梳理, 通过试验对各类型构件力学性能进行更深的考察, 并基于上述结论提出更优的抗震设计方法。

(2) 改善发展中国家住房地震安全的非技术战略

该专题有 5 个口头报告, 主要涉及如下内容: 剑桥大学的 Spence 教授回顾了 1960 年代以来, 历次大震震后科学考察对全球住房地震安全的主要贡献, 并总结了当今震后考察的新技术以及强调了各国考察团队合作交流的重要性。美国地震工程研究中心的 Ortiz-Millan 博士全面介绍了世界房屋百科全书的建立过程、数据来源、数据构成以及应用价值。新西兰惠灵顿维多利亚大学 Charleson 副教授介绍了世界房屋百科全书, 指出了现阶段该组织存在的主要问题, 并就发展中国家住房地震安全提出

了若干意见。印度工程科学技术研究所的 Mitra 教授介绍了印度存在大量低成本、不安全住房的现状,分析了导致这种现状的原因,并提出相关改进意见。日本的 Imai 建筑师以日本从木结构房屋不考虑抗震设防到进入正式的规范设计框架内的经验,给发展中国家各种不设防房屋今后的改善处理提供参考。

这一专题分会的主要目标是借鉴发达国家的经验教训,总结震后考察的方法、意义,结合世界房屋百科全书,提出联合多种组织、合作交流,使发展中国家不安全住房数据库充分完善,并针对不同类型房屋给出治理意见。

(3) 近期破坏性地震(包括 2015 年尼泊尔地震)的现场调查与分析

该专题有 8 个口头报告,主要涉及如下内容:宫本茂国际有限公司的 Miyamoto 总裁介绍了 2015 年尼泊尔地震对首都加德满都众多中层房屋的影响,提出应用地震阻尼器对现代房屋进行抗震加固的措施。中国地震局工程力学研究所的林旭川副研究员对尼泊尔地震中众多的自建混凝土框架建筑物进行了震害统计,提出了改进相关设计和施工方法的建议。尼泊尔国家地震技术协会的 Guragain 副主席,详细统计了本次地震中不同类型建筑物的破坏比例、导致破坏的关键因素,并以此提出各类建筑物修复意见及改进相关设计、施工方法。葡萄牙波尔图大学的 Varum 教授,对尼泊尔地震中钢筋混凝土结构物的表现,尤其是框架填充墙的表现进行了研究。中国地震局工程力学研究所的黄勇副研究员对尼泊尔地震中的水力发电厂及公路系统进行了震害考察,并与汶川地震中相应震害进行了对比。尼泊尔工程学院的 Rajan Suwal 高级讲师通过对加德满都谷地周围 64 个建筑物的快速视觉损伤评估,收集了损坏建筑物的数据库,找出了这些建筑物的失败教训。智利天主教大学的 Rivera 助理研究员介绍了 2015 年智利伊亚佩尔大地震后,智利国家综合自然灾害管理研究中心开展的相关震后考察及海啸防治工作。日本九州大学的 Shigefuji 助理教授对尼泊尔地震中加德满都谷地长周期地震动的特征进行了研究。

这一专题分会的主要目标是利用新技术对震后考察方法进行改进,通过统计对比各类型建筑物的震害,对震后及类似地区的建筑物修复、抗震加固,

新建建筑物的设计、施工提供指导意见。

(4) 深基础的土-结构相互作用

该专题有 8 个口头报告,主要涉及如下内容:日本大林公司的 Shoji 工程师基于全尺寸桩基模型水平荷载试验,探讨了旧桩重新利用的可能性。日本竹中研究与发展中心首席研究员 Shigeno 以东京某基础隔震建筑物,研究桩筏基础网格状深层水泥搅拌墙在大震作用下的表现。法国里昂大学的 Boutin 教授进行了土-结多重相互作用的理论分析与振动台试验研究,相关结果无论对于特定的工程场地或整个城市场地动力分析都有借鉴价值。希腊佩特雷大学的 Karatzia 博士提出了一种减小桩承式桥墩地震力的新方法。日本大阪大学的 Hirose 博士通过振动台试验及数值模拟,分析了在地震作用下群桩基础,桩-土相互作用的作用机理及机制。加州大学伯克利分校的 Luque 博士及 Bray 教授对新西兰坎特伯雷地震中基督城某建于故河道之上的办公楼进行了动力作用下的数值模拟,结果与实际震害相当吻合。意大利贝内文托大学的 Durante 博士利用振动台试验研究了土-桩-结构之间的相互作用,取得了更为接近实际情况的试验结果。加州大学尔湾分校的 Anoyatis 博士建立了一种地震荷载作用下桩对土作用的分析模型。

这一专题分会的主要目标是通过数值分析及振动台试验等手段,探索更接近真实情况的土-结动力相互作用分析方法,对深基础建筑物的抗震设计,提供指导意见。

(5) 地面破坏与液化

该专题共有 13 个口头报告,涉及内容包括:C. Davis 等针对 2010—2011 年坎特伯雷地震序列对新西兰克萊斯特彻奇市及周边数次洪涝灾害的影响,基于在淹没区收集的资料,根据震后地形资料分 6 种情况评估了液化喷出水的体积,并由基于激光雷达的地面震前与震后数值高程模型计算液化滑移体积,分析证明了洪水的主要来源为液化喷出的水,首次对液化导致的洪涝灾害进行的研究。R. Sun 等提出了含液化夹层场地卓越频率的解析解,并将真实水平场地简化为三质点体系,得到了液化导致的场地自振频率减小率及其主要影响因素;液化层与上覆非液化层的厚度比及液化层与下伏非液化层的厚度比对场地自振频率减小率的影响显著。K. Ishikawa 针对 2011 年日本 9.0 级地震造成的低烈度区

蒲安市 85% 以上区域的严重地震液化现象,基于地形调查结果建立了典型土层剖面模型,考虑主震及强余震的长时效应及区域液化强度对巨大板间地震引起的液化进行了预测,并通过现场考察结果证实了预测结果的正确性。T. Matsumaru 等选取 2011 年日本 9.0 级地震中破坏的一铁路调车场建立数值模型,通过一维、二维、三维条件下 5 种工况的反应分析,研究了液化层强度和厚度分布特征对地面变形的影响,通过一系列的有效应力分析解释了地震引起不规则地面变形的原因。Jae-Soon Choi 基于韩国 110 000 个场地的液化势评价结果,编制了包含土壤分类、简化液化势评估和液化指数的 EXCEL 自动计算程序,得到了 PGA 范围为 $0.06g \sim 0.38g$ 的韩国地震液化危险性实时区划图,研究结果可为韩国等少震国家的建筑抗震安全性提供参考。F. Lopez-Caballero 等通过建立二元混合模型,研究了改良处理附加空间变异性的土体与天然土体之间由于液化导致沉降的影响,发现改良处理后的区域可认为是存在非线性关系的两相混合体,土的力学性能与输入条件对该非线性关系存在显著的影响。L. Miranda 等通过数值方法,修正了 Manzari-Dafalias 模型,通过数值模拟分析了砂土三轴不排水单调剪切试验中的参数灵敏度,并通过数值模拟的方法,分析了震前与震后砂土不排水循环扭剪试验中的参数灵敏度,对三种不同循环振次下部分响应参数随模型参数的变化规律进行了估计。X. Karatzia 等通过对桩基桥墩的桩顶部增加由 EPS 土工泡沫等黏弹性材料组层的环装带,提出了一种新的桩基桥墩隔震方法,并基于反应谱方法对桩头作用力进行了确定。G. Tryon 等通过对 2010 年智利 $M_w 8.8$ Maule 地震中两个典型横向扩展实例的分析,说明了 5 种不同的经验模型方法预测大震横向扩展变形的优势和局限性,并对增加模型预测精确性的方法提出了建议。H. Hirose 等通过建立丰浦砂— 5×5 群桩模型进行振动台试验,研究了桩周土体的非线性力学性能,并通过三维有限元地震反应分析研究了非线性土-桩相互作用体系对群桩基上层建筑性能的影响,结果表明群桩中位于角落的桩的桩周横向作用力及桩头弯矩最大,随着输入加速度水平的增加,群桩桩头弯矩逐渐趋于平衡。K. Tokimatsu 等采用现场调查和伪静力弹塑性分析方法,研究了 2011 年日本 9.0 级地震中单桩基础、 $2 \times$

2 群桩基础及大群桩基础的破坏情况,结果表明所有的单桩和 2×2 群桩基础在液化层底部的位置产生破坏,其最大横向位移超过 60 cm,而大群桩基础均未产生破坏;桩的极限弯矩和桩头约束使得不同类型的桩基础的抗震性能具有显著的差异性。A. King 等针对坎特伯雷地震序列导致的地震液化灾害破坏情况,通过综合地貌特征、地层厚度、地下水埋深和近地表土层组成和密度剖面对地震液化灾害进行识别,并基于 GIS 的潜在液化灾害损失评估建立了新西兰北岛霍克斯湾地区的地震液化风险评价模型。M. Maharjan 对 2015 年尼泊尔地震及余震导致的加德满都河谷地区的液化及液化灾害进行了研究,结果表明 2015 年尼泊尔地震及余震在加德满都河谷地区造成了大量的砂沸、横向扩展和地面破坏,由于盆地放大效应的影响,液化导致的地面破坏多位于加德满都盆地边缘;地震中没有产生大的地面破坏主要与可液化土层处于临界液化状态及地下水位有关。

(6) 地震引起的天然斜坡滑坡

该专题涉及 8 个口头报告,我也在此专题做了口头报告。该专题口头报告内容如下:我本人第一个做了“地震和降雨耦合作用下黄土边坡破坏机理与预测”的口头报告,该报告结合 2013 年岷漳地震中典型滑坡案例,针对不同工况对地震降雨耦合机制进行振动台试验分析,并通过模糊信息处理得出滑坡的滑距和影响区域范围预测方法,最后为地震降雨耦合提供了工程抗震安全设计方法。研究表明地震作用使得黄土的抗剪强度显著降低,并使得黄土产生垂直裂缝,从而有利于降雨下渗,加速土体破坏。地震后的持续降雨或强降雨对黄土滑坡具有强烈的促进作用。A. Yamamoto 等提出了一种新的地震诱发斜坡破坏风险评估方法,该方法基于三维有限元反应分析及三维地形测量技术,其基岩地震动输入由统计格林函数估计。通过该方法与传统一维地震小区划方法对 2000 年 Tottori-Ken-Seibu 地震风险性进行评估验算,揭示了地震诱发斜坡破坏评估方法的发展趋势及三维地形测量技术在地震地震诱发斜坡破坏风险评估中的重要性。K. E. Allstadt 等基于 USGS 现有的实时地震信息软件,提出了地震滑坡及液化灾害的集成化损失评估方法。J. S. Yang 等利用高分辨率航空影像对鲁甸地震造成的山体滑坡进行分析,判断诱发滑坡的影响因素,建立

分段线性模型并选取线性拟合指标,结果表明滑坡密度取决于模型因子的选取,模型分析结果与滑坡实际分布相关系数较高,对于预测滑坡分布具有较好的适用性。A.Serey 等利用卫星图像判读识别位于 $32.8^{\circ}\sim 38.5^{\circ}\text{S}$ 间的美国主要山脉滑坡影像,库存显示 1 160 个滑坡,其中 800 个集中分布在主山脉附近,并且发现俯冲地震导致的滑坡数量低于浅层地震触发的滑坡。Naveen James 等基于 GIS 和层次分析法,综合地震、降雨等多方面滑坡影响因素提出了全面的滑坡评估方法,对中印边界的 Sikkim 滑坡进行了定量风险评估并提供了综合的滑坡灾害危险性区划图,并有针对性地指出了现今滑坡危险性评价中存在的不足。G.Montalva 等通过环境振动记录对 2010 年智利马乌莱地震导致的砂岩滑坡进行分析,利用地震层析成像获取表层土体内部剪切波速的横纵向变化,利用光谱比估计系统与土体上层主要特征频率,全方位考虑了导致滑坡的所有参数与变量,从而更有效地表征了岩石内部的非均质性和动态性能。U.Kleinbrod 等考虑地震作用对完整岩体内部结构及亚稳态岩质滑坡重新活动的影响,通过现场勘测及数值模拟,考虑了斜坡失稳机制、物质条件、构造背景和活动程度等多种因素,研究了潜在岩质滑坡的地震响应。结果表明地震动在岩体的不稳定部分存在显著的放大效应,其最大放大方向与岩体中的张裂隙方向垂直,且与测量得到的变形方向一致;数值模型分析结果与现场勘测结果吻合较好。

(7) 岩土室内试验和现场试验

该专题共有 8 个口头报告,其内容如下:A. Soysa 等考虑天然土在循环荷载作用下塑性指数 (PI) 对观测结果的影响,对循环荷载作用下天然细粒土的动力特性进行了系统的试验研究,结果表明随着循环次数的增加,超孔隙水压和剪切应变随着土塑性指数的增加而减小。L.M. Wotherspoon 等通过在新西兰克莱斯特彻奇市一些场地的砂层到砂质粉土中安置了相似面积置换率的碎石桩进行全尺寸现场测试,对安装浅埋碎石桩导致的土体固化程度进行了评价,发现场地中安置碎石桩的部分的压缩波速具有显著的降低。S.Li 等考虑土与结构的相互作用,选择 1999 年集集地震动记录作为输入,研究了苏通斜拉桥在不同断层区域遭受近断层地震动时的地震响应,发现在三组区域中近断层地震动的

特性与斜拉桥的动力响应具有明显的相关性,并提出了适用于超跨度桥体系的近断层场地运动的强度参数的选取方法。B.Kirar 等通过一系列共振柱试验对 Solani 砂在小应变条件下的动剪切模量和阻尼比特性进行了研究,得出了相对密度和围压在小剪切应变范围 ($0.001\%\sim 0.1\%$) 内对 Solani 砂的动力特性的影响,结果表明两个参数对 Solani 砂的动剪切模量具有显著的影响,而对其阻尼比的影响不明显。Abhishek Kumar 等收集了 30 种世界范围内的地震动记录,运用等效线性方法对由砂土和黏土单独组成土柱的地震响应进行了分析,给出了不同地震动作用下土体在特定应变水平下的动力特性,并指出地震作用下土体的应变是输入地震动的水平峰值加速度 (PHA) 和覆盖层的厚度的函数。基于研究地震灾害得出的 PHA 值和调查得到的土体覆盖层厚度,可以根据文中提出的相关关系确定应变值。T.T.Nhan 等通过使用多向循环简单剪切试验仪器对正常固结的北九州黏土样品 (塑性指数 $I_p=63.8$) 进行单向和多向循环剪切,得到了循环剪切诱发孔隙水压力 (U_{dyn}) 和应变 ($\epsilon_v, \%$) 的变化规律,提出了不排水循环剪切后的压缩阶段,单向循环剪切压缩指数和多向循环剪切压缩指数与原始压缩指数的关系,并指出通过这些指数可以预测高塑性黏土在循环剪切下的沉降。H.Matsuda 等对正常固结的高岭土、东京湾黏土和北九州黏土进行了不排水单向和多向循环动单剪试验,通过分析归一化的孔隙水压力比和循环剪切后的大变形,研究了循环剪切方向对不排水循环剪切过程中孔隙水压力积累和循环剪切后大变形的影响,发现黏土的 Atterberg 极限 (塑性指数) 越高,循环剪切方向对孔隙水压力和沉降变化的影响越小。T.G. Sitharam 等基于大量的现场试验和室内试验,通过分析土的颗粒组成、液限和 CPT 数据,对也门西部某近海场地海相沉积土的液化敏感性进行了详细评价,基于评价结果对该场地的可液化土层进行了判别。

(8) 城市层面的地震危害性、危险性与地震风险管理

该专题共 8 个口头报告,主要内容包括:Pettersen 等利用三种不同的灾害模型,研究了南美洲大陆地震灾害与风险的敏感性,其结果有利于理解不同模型计算过程中的非确定性;与 2010 年 USGS 南美地震灾害图比较可以发现,人口数据及对人口

的估计数量会抬高地震动水平。Ceferino 等利用先前提出的地震灾区医疗卫生需求评估方法,对 1974 年 Lima 地震设定条件下的人员受伤、医疗资源需求、区域分布等可能性做了估算,其结果表明该评估思路及方法的适用性及可行性。Paolucci 等利用三维基于物理的地震设定方法,开展了伊斯坦布尔的地震风险评估研究,获得了 0~25 Hz 的宽频带地震动模拟数据,包括对不同断层位错模型和震级的影响分析;其结果可作为进一步概率性或确定性地震灾害评价方法的数据基础。Aguirre 等利用 HAZUS-MH 方法模拟设定地震条件下的智利北部海港城市伊基克的可能灾害,其结果确定性地给出了建筑物、人员、基础设施等可能受到的损伤情况。Schwarz 等针对 1995 年 Aigio 地震,利用地震后十年以及最近 2013 年的建筑物调查数据,开展了灾后重建的长期评估研究;其结果揭示了城市社会化过程与发展环境的内在联系,综合灾害风险防范应当利用设计在城市发展过程中予以考虑,而不是利用灾害去鞭策。Tahiri 等利用地震小区划方法,借助城区建筑物与地基之间的共振效应分析,开展了城市规划过程中建筑物既有沉降或新沉降预测的研究工作;其结果对城市规划阶段确定建筑、结构系统及材料、高度范围等的适宜区域具有重要意义。Benito 等为修订西班牙建筑规范开展了新的地震灾害评估工作,其中对近些年来的地质学、地震学、强地面运动等新数据和新方法做了着重考虑,同时考虑了 2011 年 Lorca 地震的灾害情况;其所得地震灾害图得到了西班牙地震学界的认可。Kuroiwa 等联合引入城市物理体量与社会经济因素,研究城市灾害风险减轻的严峻问题;其结果并未局限于某一个城市,具有较为广泛的实用意义。

(9) 快速恢复

该专题共 6 个口头报告,内容包括:Indirli 详细介绍了“可恢复的欧洲”计划,该计划集中于利用综合方法开展社会恢复性评价,涉及安全性、健全性、适应能力、稳定性、可持续性、自然保护等方面。Perry 等以圣弗朗西斯科高风险设计的发展过程为例,分析了现代社会中责任动力违约如何背离汉谟拉比法典的简单正义公约,尤其是责任动力违约如何在现代高层建筑(30 层以上或高度超过 135 m)的背景下逐渐发生;其结果以现代法律角度解释了设计专业人士如何降低所在机构由于设计的结构在

强地震或灾难性地震甚至可预见到的地震中受损而可能遭受死刑牵连的风险。Gibson 等基于手机获取震前震后信息的可能性,提出了一个初步的用于地震管理的情景认知框架,可包括准备、响应和恢复等阶段;其结果可以预期,该框架有助于开发更为有效的用于结构与关键地下结构风险评估方法和管理体系。Dorka 等利用极大地震引发的多类灾害事件(地震动、滑坡、海啸、火灾)及可接受与不可接受损伤状态的定义,分析给出了公路网络中桥梁健全性的评价图;其结果表明在仅考虑地震动时,若桥梁预选结构适当,桥梁的不可接受损伤状态可被忽略。Bozza 等将城市理解为物理与社会共存的复杂体系,开展了城市中心应对不同等级地震灾害的应对能力及健全性等评价研究,提出的方法包括两类可恢复性评价指标,前者反映了独立的地震事件之后灾害的初始状态,而后者则依赖于它。Sadashiva 等利用优化了的基于 GIS 的风险评估工具,对不同破坏等级的地质或水文灾害袭扰下的高速公路的中断状态做了分析评价;其结果对有效提升高速公路的可恢复性具有明显作用,可有效降低高速公路网系统的中断风险。

(10) 地震风险经济与保险

该专题共 7 个口头报告,主要内容包括:Krimgold 等利用由世界银行获得的相关资料,分析了建筑规范性能在地震灾害损失减轻方面的贡献;其结果显示在低或中等收入国家中建筑规范性能的提升或者仅是关键因素方面的考虑,即使地震灾害的风险大大降低。Ghafory-Ashtiany 等对伊朗国家建筑规范做了综述,并由此总结了目前的挑战以及今后的发展方向;其结果表明,有关规定的分布和普及率并不统一,是影响抗震效果的主要原因;在提升建筑地震安全性的经济防护政策中,引入综合评价与分级体系的发展思想,将是一个有效的解决方案。Arendt 等对尼泊尔国家建筑规范的发展历史做了详细评述,其中包括 2015 年尼泊尔地震对该规范的影响分析。Claude 等基于保险产业在地震灾后恢复过程中的重要作用,分析了地震风险对保险投资组合所需的金融储备的影响;其结果表明以静态方式设置金融储备的局限性,在 2010 年 Maule 地震之后,智利保险协会开始使用自己的模型计算可能所需的最大储备数额。Vecchio 等针对 2009 年 L'Aquila 地震造成的钢筋混凝土建筑的破坏情

况,研究对比了实际损失与预测损失之间的差异;虽然实际损失与预测损失之间较为接近,不过强烈依赖于模型所需的基础数据,针对该模型的进一步改善仍为必要。Wald 等基于地震后金融决策制定如何使用或决定于近实时地震信息的分析,尝试更好地理解所涉工具需要的基础数据;其结果显示,更为快速、准确的震后数据使得金融决策的风险管理更具可控性,设定的或历史的地震及其灾害等分布图件资料有利于灾损模型的校准和回馈优化。Brocardo 等利用与诱发的地震活动性有关的度量参数,分析了生命安全的适当度量参数、评价对比风险安全度量的稳定性数学框架、风险度量可能误差的上限,其结果有助于理解既定的地震活动性条件与作为风险控制理论一部分的个体和社会风险度量之间的关联。

(11) 城市的未来:今天规划明天的地震风险

该专题共 8 个口头报告,内容如下。Booth 基于地震环境下社会能力的影响因素分析,开展了技术因素、其他因素(社会、文化、政治)等因素在有效应对地震过程中不同作用的研究;其结果有助于地震工程师借助更广泛的、非技术背景来权衡解决他们所面临的、需要发展的技术问题。Heresi 等利用一体式设计理念,开展了量化评价城市地震可恢复能力的新策略研究,给出了在需求地震工程加固区域的基于性态原则的概率性评价方法;其结果揭示了有效的策略应当考虑若干原则问题,例如对于短周期结构,应增强其刚度与强度以显著降低其位移设计需求;较低的位移要求,能够有效遏制破坏风险;加固近源地震房屋使之与距离较远的常规房屋具有相近的破坏风险。Burton 等针对地震可恢复能力的评价指标深入分析,建立了评价可用房屋的即时损失与依赖于时间的恢复能力的概念性框架;其结果对深入理解城市灾害可恢复性,能够提供如何获取有效信息及所需工具的解决手段。Abad 等以 La Paz 市为例,基于地震灾害文献综述与分析,研究了城市地震风险的准备问题;其结果涉及区域断层的潜在地震可能性、简化的地震灾害确定性分析,以及在城市规划角度上现存地震风险性问题。Gulkan 利用确定性与概率性基本方法,开展了伊斯坦布尔的地震灾害评价研究工作,给出了地震动峰值加速度区划图;其结果的设定地震由隐伏断裂的一次或多次破裂模拟构成;概率性评价方法使用了

平滑分格的地震活动性、断层等两类地震震源模型。Shrestha 等利用分层系统抽样的简单随机抽样方法,基于人的风险观念的改变分析,开展了如何强化推进建筑规范应用性的研究工作,及其与地震风险观念、地震风险降低等减灾问题的关联;其结果为理解地震风险减轻的关键要素以及如何将之纳入人的风险观念的演进过程具有参考意义。Kattan 等针对 Santa Tecla 城市的特殊性开展了地震风险的概率性评估工作,其结果考虑了区域条件影响下谱加速度与预估幅值的地震灾害,对城市区划时不同土类的区分对待具有指示性作用。Gaspar-Escribano 等基于地震灾害评价的关联分析,较为详细地介绍了 Merisur 项目中城市地震风险评价的相关方法与工作细节;其结果对如何系统化地理解城市地震灾害、给出有效的地震灾害定量评价方法以及使其结果尽可能实用化具有参考意义。

(12) 管理政策

该专题共 8 个口头报告,主要内容如下:Takatsu 等基于信息获取、分享及管理理念分析,开展了地震灾害下设备性能评估模拟系统的相关研究工作;其结果对应对特大地震的有效信息缺乏以及如何做到非关联信息的有效共享等问题具有指示性的参考意义。Numada 等利用地方政府应对灾害的标准响应程序,开发了灾害响应模拟的“BOSS”系统;其结果显示,在历史灾害资料足够的情况下,该系统能够演示未来相近灾害的全部过程,涉及人、房屋、工业、法律、土地等诸多方面。Fico 等基于 2009 年 L'Aquila 地震的实例分析,利用公共拨款数据,阐述了重建参量模型 USRC 的功能构成与结构特点;该模型可以评估地震及建筑易损性可能造成的最大重建所需,也包括历史建筑维护所需的潜在经费。Inoue 等为了解决灾害风险管理的人力资源不足的问题,基于项目管理的概念,开展了综合灾害管理矩阵研究工作;该系统可提供有效涵盖灾害测算的应对计划,将可能成为依据社会、环境条件等实现政策制定与有效管理的强有力工具。Pavlicic 等为应对 Montenegro 不断增长的自然灾害,开展了灾害风险与易损性管理的方法研究工作;其结果显示,如何确定减灾风险降低循环、鼓励社会不同群体参与度及协作性等可能存在的差距,是实现有效降低自然灾害风险的关键。Blondet 等利用尼龙绳加固土坯房屋的振动台试验,开展了如何做好该类型房屋抗震

培训的研究工作,包括提高土坯房屋建筑方法指导与培训的社会经验、已有成功案例的困难分析及成功所得;其结果在相似的地震灾害风险高发条件下的地区具有应用意义。

3 体会与思考

通过在第16届世界地震工程大会上的5天交流和对会议论文集的研读,自己主要有以下3方面体会和思考:

(1) 地震地面运动研究仍然是当前国际地震工程研究主要热点领域之一。

本届世界地震工程大会接受的论文,除了结构抗震之外,地震地面运动方面的论文最多,共有6场专题分会与地面运动相关。其中4场地面运动专题分会、1场场地放大效应专题分会和1场盆地效应专题分会。研究进展主要体现在地面运动预测方程、盆地效应及其在风险量化中的应用、场地条件与地震动特征等方面。①在地面运动预测方程研究方面,基于大震数据提出了基于场地放大和地震波相位特征的强地面运动模拟方法,同时给出了新的震源模型。通过引入散射脉冲响应函数提出新的地震动预测方法,能够较好地预测地震动持时。美国地质调查局(USGS)和建筑抗震安全委员会(BSSC)联合实施的项目(Project '17)提出的13个议题,旨在推动建设工程师和USGS科学家在下一代地震设计区划图研发过程中相互协作。②在场地放大效应研究方面,通过井下台阵三分量地震记录,评价了在不同地质条件、地震强度和地下水位条件下地震波水平、坚直传播的差异性。利用地表-地下地震台数据分析发现,钻孔平均PGA放大系数分布在2~20之间,充分说明大地震能够引起沉积地层的场地放大效应。油气开采引起的人工地震作用下软土地具有一定的减震效应,能够减低地表PGA40%左右,并对建筑结构抗震设计中采用的反应谱参数和形状产生影响。研究发现在场地放大预测方程中S波阻抗比更为有效,进而给出场地参数和放大系数之间的相关系数和误差估计方程。③在盆地效应及其在风险量化中的应用方面,提出了在泰国曼谷及其周边地区考虑深盆地效应的设计谱加速度方法。通过分析尼泊尔7.8级地震序列的主震和三次余震事件,显示出非线性效应和由于盆地效应导致的长周期能量放大。还有学者研究表明,仅仅需要

在浅盆地边缘地带考虑盆地效应并进行加速度校正,盆地边缘带的宽度是盆地深度的1.2~1.5倍。分析还表明,2010年1月27日智利中部地震在Marga盆地造成的建筑结构集中破坏现象可能与盆地底部形状有关。④在场地条件与地面运动特征研究方面,日本在Iwaki市用16组密集阵列脉动传感器评估场地放大因子和面波传播特性。结果表明,在地震高活动性区域调查场地结构模型,密集阵列脉动数据和强震数据相结合可视为一种强大的调查方法。对不同地震动选择方法对特殊钢框架结构抗震性能评估影响的分析表明,ASCE/SEI 41建筑标准可采用CMS作为地震动选择与标定方法。脉动与强震数据的H/V谱比分析可以确定场地类型与场地特征频率或者场地卓越周期之间的关系。我国学者通过与ShakeMap系统烈度关系进行对比,发现中国地震烈度关系模型在地震灾害评估和抗震设计方面是保守的。

(2) 智利在工程抗震领域取得实践成就和理论成果得到了国际同行的普遍肯定和赞赏。

本届世界地震工程大会在智利召开,在大会上安排智利专家做特邀报告,介绍智利在结构性能抗震设计方面的实践成就和理论成果,会后对智利圣地亚哥市标志性超高层建筑和地下工程的考察,平均每15年一次大震强震对于智利工程抗震性能的检验,无不得到与会地震工程专家和政府官员的热情赞赏和充分肯定。

由于纳斯卡板块向南美洲板块每年以6.5~7 cm的速度高速俯冲,南美洲西海岸一直是强震多发地带,智利在频繁遭受大震强震考验的过程中,形成了成功应对大震的成功做法和经验,这对于我国的防震减灾工作具有重要的借鉴价值。①编制科学合理的抗震设防要求。智利全国地震区划图给出的抗震设防地震动参数既考虑了抗倒塌的基本目标,又考虑了快速恢复的要求。经过大震检验,绝大多数建筑物和基础设施不易造成人员伤亡和功能长时中断的灾难。②智利建筑设计规范高度重视性能设计理念、工程规划布局、抗震构造措施、减隔震技术、增加结构延性以及安全的非结构部件等在抗震设计和施工中的应用,以实现建(构)筑物的抗倒塌和快速恢复能力。③对工程规划、设计和施工的严格监管。智利所有建筑工程,包括民宅在建设之前都必须由专业机构进行设计。工程建设过程中严格的监

督贯穿始终。例如房屋动工前,由结构工程师和岩土工程师现场查看场地勘察情况,确定新房地基开挖深度;查验所用水泥、低碳钢的型号以及钢板的厚度等是否严格遵守了设计标准?地基施工时,专业人员查看所用钢筋的粗度和分布的密度;浇筑混凝土前,监督人员都会拿走几小箱样品,送实验室检测,查看混凝土的强度能否达到设计要求;快竣工时,设计人员必须亲临工地展开全面查验。一系列的监督流程十分繁琐,而且耗时很长,但确保了每一个工程都达到了抗震设防要求。④完善的事后追责制度。地震后,智利政府专门聘请了美国的调查人员对建筑是否存在质量问题展开调查。建筑物倒塌破坏造成伤亡人员的家属通过诉讼程序,分别起诉建筑施工方和开发商。一旦法官确认建筑物确实存在质量问题,被告可能会被判刑及面临巨额罚款。正是因为有了这样的事后追责机制,才能保证一整套抗震法规能够实施到位。⑤社会公众具有较强的防震意识。由于经历地震较多,智利公众防震意识较强,并且积累了丰富的应急避震和自救互救的经验。智利政府高度重视防震减灾宣传教育和应急演练,政府、企业、学校等每年按照规定至少组织进行3次地震逃生演练,使社会公众牢固树立防震意识,掌握防震常识。

(3) 多种灾害综合防御成为工程防灾研究与实践的新动向。

习近平总书记在视察唐山时的重要讲话提出了防灾减灾“两个坚持”、“三个转变”的新思想和新要

求,其中“从应对单一灾种向综合减灾转变”的新要求在本届大会交流报告中得到了体现。本届大会报告中,由许多防灾工程设计与施工考虑了两种或多种灾害的预防。有将地震与火灾综合考虑进行预防设计的,有将地震与海啸、洪水预防综合考虑进行设计,也有将滑坡、泥石流等地质灾害与地震灾害综合考虑设计预防的。例如智利近海地区的建筑物在抗震设计中同时考虑了预防海啸的设计,这些建筑物不但经受住了2015年9月17日8.3级地震的考验,而且也经受住了随后地震引发海啸高达3.11 m大浪的袭击。这种多灾种综合预防的工程设计收到了良好的减灾实效和经济效益。我国在贯彻落实习近平总书记防灾减灾救灾新思想新要求中,应借鉴国外在多灾种综合预防的工程设计新理论和新技术,同时,从综合减灾的角度出发,进一步完善自然灾害防御法规制度和标准化体系,建立完善自然灾害防御机制和体制,全面提升我国综合防御自然灾害的能力。

致谢:本文作者赴智利圣地亚哥参加第16届世界地震工程大会得到了中国地震局领导和国际合作司领导、同志们的大力支持和指导,甘肃省地震局外事办公室给予了积极的协助,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- [1] Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 2016.