

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.023

## 第二届全国青年工程风险分析和控制研讨会简讯

李典庆<sup>1</sup>, 曹子君<sup>1</sup>, 张洁<sup>2</sup>, 张璐璐<sup>3</sup>, 郑文棠<sup>4</sup>, 朱鸿鹄<sup>5</sup>, 张华<sup>6</sup>

(1. 武汉大学, 武汉 430072; 2. 同济大学, 上海 200092; 3. 上海交通大学, 上海 200240;

4. 《南方能源建设》编辑部, 广州 510663; 5. 南京大学, 南京 210093; 6. 三峡大学, 宜昌 443002)

**摘要:** [目的]为推动工程风险管理与保险相关的新理论和新技术发展, 为青年学者提供学术交流平台, 第二届全国青年工程风险分析和控制研讨会于2018年3月30日—31日在武汉召开。[方法]会议由中国土木工程学会工程风险与保险研究分会主办, 武汉大学、中国地质大学(武汉)、国家重点研发计划项目(2017YFC1501300)和国际土力学与岩土工程学会 TC304 工程风险评价与管理技术委员会共同承办。[结果]会议探讨了国际前沿的工程风险分析与控制理论和方法进展, 促进了工程风险领域青年学者间的交流和合作。[结论]会议对推动我国工程灾害防治与风险控制学科的发展具有重要意义。

**关键词:** 工程风险; 风险控制; 风险分析; 地质灾害

中图分类号: F284

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0140-09

## An Overview of the 2<sup>nd</sup> National Young Researchers Symposium on Engineering Risk Analysis and Management

LI Dianqing<sup>1</sup>, CAO Zijun<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, ZHANG Lulu<sup>3</sup>, ZHENG Wentang<sup>4</sup>, ZHU Honghu<sup>5</sup>, ZHANG Hua<sup>6</sup>

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 4. Editorial Board of Southern Energy Construction, Guangzhou 510663, China; 5. Nanjing University, Nanjing 210093, China; 6. China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** [Introduction] The 2nd National Young Researchers Symposium on Engineering Risk Analysis and Management was held in Wuhan on March 30—31, 2018, aiming to promote development of new theories and technologies on engineering risk management and insurance and to provide a forum for academic communication for young researchers. [Method] The symposium was co-hosted by the Engineering Risk and Insurance Research Branch of China Civil Engineering Society, Wuhan University, China University of Geosciences (Wuhan), the National Key R&D Project (2017YFC1501300) and International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering TC304 (Engineering Practice of Risk Assessment and Management Committee). [Result] The major themes of the symposium include cutting-edge studies on theories and methods for engineering risk assessment and control. The symposium provides a great opportunity to young researchers in the engineering risk field to exchange ideas and to establish corporation with one another. [Conclusion] This is of great significance to the advancing in the field of engineering disaster prevention and risk control in China.

**Key words:** engineering risk; risk control; risk analysis; geological hazard

近年来我国经济快速发展, 一大批土木、水利、交通、市政等工程开工建设。在工程设计、建设、运营、管理阶段存在多种风险因素, 工程风险

分析和控制问题已成为公众关注的焦点。我国地铁、大坝、海上风电、保险等行业已经或正在制定相关的风险评估指南和规范, 对工程风险基础理论和应用研究存在巨大的需求。最近, 国际标准化组织颁布了最新版的《结构可靠度统一准则 ISO 2394: 2015》, 将基于可靠度与风险的岩土工程设计方法正式纳入国际标准, 推动了岩土工程可靠度设计与

收稿日期: 2018-07-13 修回日期: 2018-07-26

基金项目: 国家重点研发计划项目“基于演化过程的滑坡防治关键技术及标准化体系”(2017YFC1501300)

风险控制理论的实用化进程。由中国土木工程学会工程风险与保险研究分会主办的“第二届全国青年工程风险分析和控制研讨会”于2018年3月30日—31日在武汉召开,旨在深入探讨工程风险分析和控制领域的关键科学问题和工程技术难题,促进领域内学术交流,共同推进工程风险分析和研究领域新理论、新方法和新技术的发展。

## 1 会议开幕式

会议开幕式在武汉市洪山宾馆举行,由武汉大学水利水电学院副院长李典庆教授主持,中国土木工程学会工程风险与保险研究分会张洁副秘书长宣读黄宏伟理事长的贺信,武汉大学水利水电学院黄介生院长致欢迎词。开幕式上同时举行了武汉大学工程风险与防灾研究所揭牌仪式,黄介生院长宣布武汉大学工程风险与防灾研究所正式成立,同时宣布聘请中国水利水电科学研究院陈祖煜院士为研究所名誉所长,水利水电学院李典庆教授担任所长。新加坡工程院院士、新加坡国立大学副校长方国光(Phoon Kok Kwang)教授、水利水电学院院长黄介生教授、新加坡南洋理工大学刘墨光(Low Bak Kong)教授、香港科技大学张利民教授、香港城市大学王宇教授、同济大学陈建兵教授、中国地质大学(武汉)工程学院副院长王亮清教授、武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室主任卢文波教授、水利水电学院吴运卿副院长等嘉宾共同出席了开幕式。

## 2 会议主题报告

组委会邀请了我国可靠度理论、不确定性分析、地质灾害、地下工程灾害、海洋工程和环境工程等领域的优秀青年科学家,通过深入的学术交流与讨论,推动了工程风险与其他领域的交叉发展,为青年科学家的合作创造了机会。来自新加坡国立大学、南洋理工大学、香港科技大学、香港理工大学、香港城市大学、浙江大学、同济大学、中国能源建设集团广东省电力设计研究院等单位的140余名代表参会,其中国家杰青、长江学者、优青、青年长江、青年千人等40余人。以方国光教授为代表的23位专家作了特邀报告,介绍了其研究工作的最新成果及前瞻性思考,报告围绕工程结构可靠度理论、岩土工程安全风险管理与保险、水利水电

工程风险评估与风险管理、工程风险管理标准等9个议题展开讨论,内容涵盖了水利水电、地下空间、交通工程等行业。此外,各位专家与业界代表还就技术创新和产学研合作等话题开展了热烈讨论。

### 2.1 方国光谈“将大数据引入岩土工程设计”

方国光(Phoon Kok Kwang),新加坡国立大学教授、博导,现任新加坡国立大学副校长,新加坡工程院院士,国家千人计划专家,新加坡国立大学首席教授,美国土木工程师学会 ASCE Fellow,国家杰出青年基金 B 类获得者。专家观点:岩土数据来源广泛,当数据较多时,如何在忽略数据所代表物理过程的情况下,直接从数据中反复“学习”,对岩土工程的可靠性、风险及其可恢复性进行设计和评估是亟待解决的科学问题。方国光院士在阐述岩土场地勘察所遇到的多源信息(如标准贯入试验 SPT、静力触探试验 CPT、十字板剪切试验 VST 数据等测试参数)与设计参数之间的相关性基础上,以公开发表与正在收集的岩土数据为例,概述了岩土数据的特点,并借用“MUSIC”来凝练岩土数据的类型,强调从人工智能的角度深入理解岩土数据,重视以“智能”工程的观点来阐释岩土数据的用途。同时,方院士介绍了目前所建立的多维土体参数数据库的特征、规模与广泛性,以 CLAY/5/345 数据库为例提出多维土体参数联合概率分布的构造过程,为解决如何根据具有“MUSIC”特点的数据估计多维联合分布参数这一挑战性问题提供了有效途径,以瑞典 Lilla Mellösa 完备粘土数据为例,利用 Gibbs 抽样手段,揭示了融合不同数据后参数的演化过程及蕴含的信息价值,提出了混合概率密度函数的概念;结合台北稀疏、不完备的数据,证明了给定稀疏数据条件下,混合结果趋近于全球数据,并指出若数据丰富,则特定场地信息占主导地位,混合结果接近于场地信息,强调了由此带来的“特定场地”挑战。最后,介绍了所开发的网页版土体特性手册 SPM2 软件,供岩土工程人员免费使用。

### 2.2 刘墨光谈“基于一次可靠度方法的可靠度设计中荷载-抗力的二元性和敏感性信息”

刘墨光(Low Bak Kong),南洋理工大学教授、博导,美国土木工程师学会 ASCE Fellow。专家观点:刘墨光教授基于一次可靠度方法的物理意义,

从直观的扩展椭圆面视角和最可能失效点(即设计验算点)两方面介绍了基于一次可靠度方法的可靠度设计。通过基于表单环境的重力式挡土墙和钢板桩算例说明了基于一次可靠度方法的可靠度设计中荷载-抗力的二元性和敏感性信息。刘墨光教授给出了基于一次可靠度方法的可靠度设计的适用范围:(1)为失效概率极高的问题提供预警;(2)确定满足目标可靠度指标(低失效概率)的设计方案;(3)比较不同设计方案的相对可靠性;(4)为可靠度设计提供参数相关性和设计空间自相关性信息;(5)为欧洲规范 EC7 中没有覆盖的设计区间提供设计方法;(6)不同设计工况下参数敏感性不同时对 EC7 有补充作用;(8)考虑参数相关性的设计中对 EC7 有补充作用;(9)设计参数具有的稳定-不稳定二元性的设计中对 EC7 有补充作用;(10)考虑土体重度参数不确定性时对分项系数设计方法有补充作用。最后,刘墨光教授指出:分项系数设计方法中基于表单环境的可靠度设计的应用将越来越广泛,除了可靠度指标和失效概率外,基于一次可靠度方法的可靠度设计还能提供其它对设计十分有价值的信息。

### 2.3 张利民谈“粤港澳大湾区城市灾害与风险管理”

张利民,香港科技大学教授、博导,教育部长江学者讲座教授,美国土木工程师学会 ASCE Fellow,国家杰出青年基金 B 类获得者。专家观点:粤港澳大湾区覆盖 5.6 万  $\text{km}^2$ ,包含 9 座城市和 2 个特别行政区,涉及 7 000 万人口的生命财产与安全,是世界上最主要海湾地区之一,经常受风暴、风暴潮、洪涝(潜在受灾人数均居全球第一)以及地震、海啸等灾害的侵扰与威胁。在《深化粤港澳合作推进大湾区建设框架协议》签署的大背景下,对粤港澳大湾区城市灾害进行建模、评估与风险管理至关重要。张利民教授介绍了香港边坡安全系统的压力测试框架,识别极端环境关键暴雨场景,评估山体滑坡、泥石流、山洪等影响范围及边坡系统响应,分析多灾害后果及其引起的风险,不断提高、量化、评估风险管理策略,以提高整体边坡安全系统的可恢复性能力。通过开发大湾区城市灾害模拟系统,建立多尺度多风险模型评价和量化边坡系统响应及影响尺度,采用基于分布单元的深度集成水工力学模型来捕捉流域尺度上由降雨诱发的泥石流

侵蚀、沉积和其他灾害效应的变化过程,并与基于计算流体力学(CFD)和离散元模型(DEM)耦合模拟的颗粒-流体相互作用与影响的研究结果相互校核与验证。最后,张利民教授以粤港澳大湾区珠江流域 2005 年 6 月洪水为例对大湾区最大洪水深度、最大洪水速度等进行模拟,并探讨了风暴潮的潜在影响。

### 2.4 王宇谈“压缩感知在地质岩土数据分析模拟中的应用”

王宇,香港城市大学副教授、博导,美国土木工程师学会香港分会前主席。专家观点:在岩土与结构工程风险与可靠性分析中,随机场模型的应用越来越广泛,识别随机场参数(如均值,标准差,相关长度)通常需要大量的测量数据。王宇教授指出在工程实际中测量数据通常十分有限、稀疏,难以准确识别随机场参数,给随机场理论在地质岩土工程中的实际应用中造成了极大的困难。压缩感知是一种信号处理方法,该方法只需利用信号的部分信息便可重构完整信号,在医学影像设备和 JPEG 图像压缩技术中得到广泛应用。王宇教授提出基于贝叶斯理论的压缩感知方法(BCS),并结合 Karhunen-Loève(K-L)展开技术,直接利用稀疏数据反演土体参数剖面,模拟土体参数空间变异性。该研究为稀疏的空间变异地质岩土数据分析提供了一个崭新思路和方法。贝叶斯压缩感知法不仅提供数据的最优分析结果,还能量化分析结果的不确定性。基于 BCS-KL 法,随机场样本能够直接从稀疏测量的地质岩土数据产生,避免了随机场参数识别不准确的问题,这为地质岩土的生产实践中应用随机场理论提供了一个直接使用的方法。

### 2.5 陈建兵谈“结构灾害随机动力响应概率密度演化与抗灾整体可靠性”

陈建兵,同济大学教授、博导,国家杰出青年科学基金获得者。专家观点:中国是世界上受地震、风灾等强烈自然灾害影响最大的国家之一,工程结构在重大灾害中损伤、破坏和倒塌是造成人员伤亡和财产损失的关键原因。考虑随机性与非线性的耦合,进行工程结构整体可靠性设计,是保障工程结构安全的基石。随机性在复杂结构中的传播规律,是结构整体可靠性分析的核心科学问题。同时,非线性与随机动力作用的综合影响,导致工程结构受灾破坏模式发生多种多样的变化,对工程结

构整体抗灾可靠性设计提出了重大挑战。陈建兵教授基于概率守恒原理,提出了广义概率密度演化方程,结合动力方程,为分别在物理空间和概率空间内求解随机动力系统提供了可能,并建立了具有坚实数学基础的概率密度演化理论求解的误差估计理论,基于上述理论开发了应用工具包 PDEM 分析系统 V3.0。同时,该研究考虑了多尺度条件下概率密度演化理论的应用,在结构灾害随机反应分析中实现了应力、应变等局部量和结构变形、内力等宏观量的同时精细化反映。陈建兵教授指出将经典的结构整体可靠度分析问题转化为具有明确物理意义的等价极值分布问题,考虑了不同失效模式的相关性信息,反映了不同失效模式的竞争机制,并采用该方法对大型海上风电结构进行了整体可靠性分析。

## 2.6 薛翊国谈“海底隧道施工期地质灾害及防灾研究进展”

薛翊国,山东大学教授、博导,国家优秀青年科学基金获得者。专家观点:世界上不同跨海区域之间的联系方式主要有三种:轮渡、桥梁和海底隧道。轮渡受气象条件影响大,不能直连,人员物资转运困难;桥梁同样受跨度、水流、气象条件、地震的影响较大;不同于上述两种联系方式,海底隧道不仅直接连通陆地,而且受气象条件影响小,具有很强的抗震性能和战备意义;因此,海底隧道近年来备受关注。薛翊国教授指出海底隧道工程在建设过程中主要有如下四个难点:(1)工程水文地质复杂,海上精确勘察难度大;(2)水量补给无限(连接太平洋),施工风险极高;(3)海水腐蚀性强,结构耐久性要求高;(4)隧道呈V字形,排水量控制要求高。因此,在海底隧道施工中极易发生塌方、突水等典型地质灾害。薛翊国教授建立了一套工程类比与数值计算相结合确定最小岩石覆盖厚度的方法,研究了各种影响因素对确定最小岩石覆盖厚度的影响,并提出了相关判别准则,在青岛胶州湾海底隧道与厦门翔安海底隧道成功应用。同时,该研究发现明晰隧址区地质条件是开展超前地质预报的首要问题。隧道施工期地质工作程序主要包括风险靶段分级、掌子面素描、高清晰数码照相、平面地质图绘制,三维地质模型构建等,而且数据解译是准确预报的关键,预报方法的选择要根据各种预报仪器的特点及现场的地质及工程条件进

行优化选择。

## 2.7 李利平谈“隧道围岩巨石垮塌机理与监测预警进展”

李利平,山东大学教授,博导,国家优秀青年科学基金获得者,国家(万人计划)青年拔尖人才。专家观点:我国已成为世界公认的隧道建设规模和难度最大的国家,至2020年底,我国铁路、公路隧道总长度将突破4万km。隧道建设过程中遭遇大量非连续体,如断层、层理、节理等,这种不连续地质体相互交切往往导致严重地质灾害。巨石垮塌是结构面与临空面形成的孤立岩块垮落的结构失稳现象,其占IV级围岩失稳总量的36%,III级围岩的62%,II级围岩的75%。据不完全统计,2005年至今发生巨石垮落灾害300余起,导致大量人员伤亡、设备砸毁、交通堵塞等恶劣事故。李利平教授指出巨石垮塌具有体量小、数量多、瞬发性强、伤亡率高的特点,巨石识别、预测、预警已成为隧道工程亟待解决的关键问题。李利平教授提出了确定性、半确定、非确定性三类巨石孕灾模式,揭示了隧道致塌巨石的空间赋存特征;并设计了隧道巨石垮塌风险空间方位图,解决了巨石垮塌易发部位的确定问题。该研究选用双目摄影测量系统突破了采集模式转换问题,针对隧道施工全过程进行光照、粉尘等参数跟踪监控,实现了岩体隧道施工全过程环境参数定量化表征,实现了隧道地质编录、危石识别、围岩分级的有效集成。此外,研发了隧道巨石垮塌数控模拟试验系统,并联合“JULI-JHG”公司,在港沟隧道开展岩体测振现场试验,证明了固有频率监测对于巨石失稳态势的预测作用。

## 2.8 卢朝辉谈“高阶矩结构可靠度理论研究新进展”

卢朝辉,中南大学教授、博导,国家优秀青年科学基金获得者。专家观点:为了定量描述工程结构所受荷载与环境作用以及结构性能、结构计算模型等的不确定性,业已发展了基于概率论的结构可靠度分析方法。常用的可靠度方法包括一次可靠度方法(First Order Reliability Method, FORM)、二次可靠度方法(Second Order Reliability Method, SORM)、高阶矩方法(Methods of High Order Moment, MHOM)、概率密度演化方法(Probability Density Evolution Method, PDEM)以及蒙特卡洛模

拟方法 (Monte Carlo Simulation, MCS) 等。这些可靠度分析方法中, 通常假定基本随机变量的概率分布是已知的。然而在实际工程中, 随机变量的概率分布往往是未知的, 而且随着统计数据的更新, 随机变量的概率分布及分布参数也将更新。利用基本随机变量的统计数据, 可以很方便得到其前四阶矩包括均值、标准差、偏度和峰度。卢朝辉教授基于随机变量的前四阶矩, 发展了将任意随机变量表示为标准正态随机变量的一元三次多项式的显式表达 ( $u-x$  变换), 提出了完整单调的四阶矩正态变换 ( $x-u$  变换), 并将单一随机变量四阶矩正态变换扩展至相关随机向量的四阶矩正态变换; 提出了基于该变换的立方正态分布; 基于四阶矩正态变换及其逆变换, 发展了信息不完备条件下的 FORM、SORM 和 MCS 可靠度分析方法; 基于点估计和立方正态分布, 发展了考虑随机变量分布参数不确定性的可靠度分析方法。上述研究形成了信息不完备和信息更新条件下的高阶矩结构可靠度分析方法体系。

## 2.9 陈朝辉谈“考虑参数空间变异性的边坡稳定可靠性有限元极限分析”

陈朝晖, 重庆大学教授、博导, 建筑力学研究所所长。专家观点: 当土性参数空间变异性较大时, 极限平衡法得到的滑移面不尽合理。陈朝晖教授阐述了基于广义变分原理的有限元极限分析方法, 采用混合有限元方法, 构筑了线性应力三角形单元与线性速度三角形单元, 结合强度折减法与线性规划算法, 建立了边坡稳定安全系数上下限分析方法, 分析了土的抗剪强度参数空间变异性对边坡稳定性的影响, 并与三种典型极限平衡法进行了对比。结果表明, FELA 方法可有效搜索边坡临界滑移面, 计算安全系数的严格上下限。对于简单均质边坡, 有限元极限分析与极限平衡法结果接近, 极限平衡法结果大多位于极限分析的上下限内; 对于空间变异性较大的边坡, 有限元极限分析法可以有效搜索多种可能的临界滑移面, 而极限平衡法则存在显著偏差, 且往往高估滑坡风险。强度参数的空间变异性还导致边坡安全系数分布形式变化显著, 仅采用安全系数无法体现这一变化。根据安全系数的分布形式, 建议了土性参数设计值取值方法。

## 2.10 翟越谈“智能安全装备与信息化管理系统”

翟越, 长安大学教授、博导, 安全工程系主任。专家观点: 翟越教授构建了具备“感知层、网

络层、应用层”的综合建筑工程项目施工安全监测与管理系统。“感知层”包括智能安全帽、智能安全鞋等防护和监测操作人员身体机能、工作环境以及建筑防护设备设施的变形和荷载监测装置, 结合 RFID 标签等技术, 实现现场检测操作人员身体状态, 操作空间的环境状态以及操作对象的理化状态等数据信息。“网络层”主要是通过 WIFI 等无线通讯技术将区域现场的设备进行现场互联互通, 再利用某一现场的 GPRS/3G 无线路由器将信息感知层的各种数据通过网络传输到服务器数据中心, 进而实现现场各信息的实时准确传输至后台数据管理控制中心, 并对数据进行整合、汇总和必要的信息处理; 数据监控中心和现场传感器通过无线通信来传输和交换数据, 数据可分为上行和下行两部分。上行数据是由检测终端向监控中心传输数据, 主要包括: 现场点的采样的传感器信号, 采样时间点、实时位置等信息; 下行数据是由监控中心向现场点发送的数据, 主要为指令信息、时间、调度信息等。“应用层”把感知层采集的工地现场信息, 根据不同功能模块的需求进行智能化处理, 实现工地设备管理、操作工人资质认证、考勤统计、身体状态和工作环境实时监督管理。

## 2.11 董优谈“基于风险与可恢复性的桥梁结构多灾害评估与加固”

董优, 香港理工大学助理教授、博导。专家观点: 根据联合国灾害报告, 2011 年的全球内自然灾害 (例如地震、洪水) 导致直接经济损失 3 660 亿美元。这些令人震惊的统计数字强调了防灾减灾对于当今社会的重要性与必要性。此外, 在灾害发生后需要利用道路、桥梁等基础设施来辅助撤离以及支援助灾区域。因此, 基础设施在防灾减灾方面有着重要的作用。在中国, 地震是常见的自然灾害, 本研究着重评估地震作用下全寿命周期内桥梁的性能。桥梁在生命周期内会遭受恶劣的环境条件, 结构本身的性能也会随着时间退化, 从而增加了桥梁在地震下的易损性, 使得桥梁在地震下的失效概率增加。董优教授研究了材料以及结构退化对于灾害风险以及全寿命周期内的损失的影响, 并确定相关参数对桥梁易损性以及损失的影响规律。灾害作用下基础设施的可恢复/韧性研究是灾害评估过程中的另外一个重要指标, 它反应了结构在极端事件下的表现性能和恢复速度。可恢复性通常包含强健

度、迅速性、冗余等几个要素。可恢复性这一概念为决策者提供了评估基础设施承受灾害能力和灾后恢复能力的量化依据。本研究考虑了在桥梁全生命周期内,地震作用下桥梁的时变易损性、风险、损失和可恢复/韧性,为防灾减灾以及抗震设计提供一定的理论基础。

## 2.12 元国凯谈“广东省海上风电场建设风险识别与控制”

元国凯,中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司风能技术中心副主任,设计总工程师,海工结构技术组组长,高级工程师。专家观点:广东省地处我国东南沿海,拥有4 114 km 海岸线和42万 km<sup>2</sup> 海域,100 m 高度平均风速7 m/s 以上。全省海域大于等于3 m/s 的风速全年出现时间约7 200~8 200 h,有效风力出现时间百分率可达82%~93%,可利用有效风速小时数较高。综合湍流强度、强风湍流强度( $\geq 15$  m/s)和主导风向湍流强度一般不超过0.10,湍流强度较低。2017—2030年,广东省在近海浅水区(35 m 水深以内)规划海上风电场址15个,装机容量9.85 GW,近海深水区(35~50 m 水深)规划海上风电场址8个,装机容量57 GW。因此,海上风电场建设风险识别与控制具有重要的意义。然后,分别从海上风电场建设的开发阶段、执行阶段、运行维护阶段和退役阶段分析了风险识别的因素及相应的风险应对措施。最后,从海洋岩土勘察、海浪冲刷、 $p$ - $y$  曲线和新型基础型的角度讨论了海上风电场建设的若干思考。

## 2.13 康飞谈“基于实测气温的大坝安全监控智能模型”

康飞,大连理工大学副教授。专家观点:大坝安全监测系统是了解大坝运行状况的耳目,而监控模型是大坝安全监测系统的核心,大坝监测资料的采集—处理—分析—预测,能够定性、定量地评估大坝的健康状况。传统的混凝土坝安全监控模型用谐波函数来表达温度效应,不能够反映不同年度气温变化对大坝响应的影响。康飞教授提出一种基于长期气温监测资料和机器学习理论的大坝变形预报模型。分析对比了径向基网络(RBF)、极限学习机(ELM)、最小二乘支持向量机(LSSVM)、高斯过程回归(RBF)等多种机器学习方法在大坝安全监控方面的性能。对不同的温度影响因子集进行了比较

研究。以某混凝土重力坝第32号坝段坝顶水平位移安全监控建模为例,对所提出的基于实测气温资料的安全监控智能模型进行验证。结果表明,GPR、ELM、RBF、LSSVM等智能模型用于大坝安全监控建模是有效的,精度优于统计回归模型,尤其是采用气温资料,影响因子较多的情况。所引入的机器学习理论能够有效的从长期气温资料中挖掘出温度效应对大坝变形的影响,模型精度较传统基于谐波函数的大坝变形监控模型提高了30%~40%。所提出模型仅增加了气温因子,无需在大坝内部或表面安装传感器,提供了一种简单、实用、高精度的大坝安全监控建模方法。

## 2.14 吕庆谈“基于响应面方法的岩石地下开挖可靠性评价”

吕庆,浙江大学教授,防灾工程研究所所长助理。专家观点:公路、铁路、水利水电、矿山等各种重大基础设施建设迫切需要新建大量隧道、地下洞室等岩石地下工程。地下岩石工程因其所处环境的复杂性且受各种因素的影响,使其存在极大的不确定性和变异性。吕庆教授指出如何考虑各种不确定性因素的影响是隧道安全稳定评价亟需解决的关键问题之一。基于概率统计的可靠度方法为定量的考虑各种不确定性因素及其参数变异性的影响提供了可能。目前,常用的可靠度方法包括近似方法,如一次可靠度法和二次可靠度法,和模拟方法,如蒙特卡洛模拟。这些方法要么需要显式表达的功能函数,要么计算量大、效率低,使得直接的地下岩石工程可靠度分析存在困难。为此,通过响应面法构建代理模型,为岩石地下开挖的可靠度分析提供了新的思路。考虑隧道支护与围岩相互作用,提出了圆形隧道的围岩变形与支护安全对应的功能函数;通过构建多项式响应面,提出了基于多项式响应面的隧道可靠度分析的一阶可靠度法和二阶可靠度法;针对隧道多失效模式的特性,研究了隧道系统可靠度分析方法;为提高响应面的拟合精度,构建了人工神经网络响应面和移动最小二乘响应面;针对隧道支护设计与优化,构建了基于响应面法的隧道开挖概率设计优化模型,得到了支护与围岩相互作用下的最优设计。

## 2.15 李锦辉谈“极端海洋荷载下平台基础的承载力包络面研究”

李锦辉,哈尔滨工业大学(深圳)教授,博导。

专家观点：海洋平台桩靴基础的承载力评估是钻井平台稳定性的关键问题。然而，海底土层分布复杂，海洋平台需承受风暴、海浪、自重等多元随机荷载的作用。因此，研究复杂海床中平台基础在多元极端海洋荷载作用下的承载力和失效机理非常重要。本研究通过发展随机有限元方法研究复杂海床中极端荷载作用下平台桩靴基础的承载力问题。首先结合随机场理论与非线性有限元发展随机有限元方法，考虑海洋粘土不排水抗剪强度的随机场特征，通过随机有限元分析获得了桩靴竖向、水平向和弯矩向承载力系数随位移的变化，将其与正常固结均质土中承载力进行对比，分析了空间变异性粘土中桩靴周围地基土位移矢量图和等效塑性应变云图与正常固结均质土结果的差异，并且研究了粘土变异性对其失效机理的影响。利用固定位移比加载法获得空间变异性土体中的桩靴承载力失效包络面，建立了空间变异性粘土中桩靴在多向荷载作用下的承载力包络面模型。研究结果显示正常固结均质土中桩靴周围地基土的失效回流机理是轴对称和完全局部化的，但是空间变异性粘土中，桩靴周围地基土的失效回流机理不再是对称分布，而且会随着不排水抗剪强度的空间变异性而改变。考虑粘土不排水抗剪强度空间变异性后的桩靴竖向、水平向和弯矩向承载力系数均小于正常固结均质土结果，即地基土的空间变异性将会降低地基承载力。空间变异性粘土中50%置信度的失效包络面与正常固结均质土中得到的承载力失效包络面接近，如果工程设计中直接采用正常固结均质土不排水抗剪强度作为设计强度参数，将只有50%的信心可以保证桩靴是安全的。

## 2.16 仇文岗谈“MARS(多元自适应回归样条)算法在岩土大数据中的应用”

仇文岗，重庆大学教授、博导，重庆大学“百人计划”学者，青年千人计划入选者。专家观点：大数据岩土问题具有变量多、数据组大、变量相互作用影响以及高度非线性的特征。仇文岗教授创造性地将多元自适应回归样条算法(MARS)用于模拟非线性和多维关系的岩土问题。MARS是一种自适应处理高维散乱数据的非线性回归方法，以样条函数的张量积作为基函数，分为前向过程，后向剪枝与模型选取三个步骤。前向过程会产生很多基函数，得到一个过拟合的模型；后向剪枝过程就是去

掉多余基函数的过程，同时保障模型的精确度，最后在众多的模型中选取最优模型。仇文岗教授基于大量岩土数据，通过MARS对地震液化的判断以及桩的可打性两个岩土案例进行了研究，结果验证了MARS在模拟非线性和多维关系的岩土问题中的可行性及高效性，并且该方法具有准确划分数据区域、无需较强的模型假设、数据驱动的建模过程、确定变量的贡献度、较好的模型解释能力等优点，尤其适合于多数据组的多变量的复杂岩土工程问题以及岩土工程监测问题。

## 2.17 姬建谈“地震响应下的边坡稳定性概率分析方法”

姬建，河海大学教授、博导，河海大学岩土工程科学研究所副所长，青年千人计划入选者。专家观点：我国地震频发而基础工程量巨大，因此边坡工程在地震响应下的失稳破坏及其防灾理论一直是岩土工程领域的重点研究内容。地震边坡的稳定性评价需要综合考虑地震破坏模式和地震永久位移量。姬建教授指出地震荷载是一个高度的随机过程，同时岩土体材料的力学特性存在天然的随机性和空间变异性等不确定性特征，进一步增加了地震边坡稳定性评价的不确定性，导致大量的边坡在其破坏机理未被充分认知的情况下进行抗震设计、施工和服役，埋下了严重的安全隐患。姬建教授以土质边坡抗震防灾为研究对象，通过对地震边坡失稳机理的基本理论比较和数值模拟方法相结合的研究手段，进一步明确土质边坡在地震响应下的破坏模式和失稳机理，并分析典型土质边坡力学参数的不确定性和空间变异性规律，基于一次可靠度方法对地震边坡的稳定性进行概率分析，为地震响应下的边坡稳定性概率预测和灾害控制提供理论依据和技术支持。

## 2.18 龚文平谈“考虑地质模型不确定性的盾构隧道纵向结构性能分析”

龚文平，中国地质大学(武汉)特任教授，青年千人计划入选者。专家观点：受岩土体沉积历史等因素影响，岩土体类型与岩土体参数存在明显的空间变异性，其空间相关性随着相互间距离的增加而逐渐减弱；同时实际工程实施过程中，通常只能取得少量钻孔资料以及岩土样本进行室内或现场试验。考虑工程地质模型(岩土体种类与岩土体参数)自身的空间变异性与工程地质勘查资



料的有限性,工程地质模型构建存在较大不确定性,因此随机场理论广泛运用于岩土工程性能分析。盾构隧道为长纵向结构,地质模型构建的不确定性对盾构隧道纵向结构性能的影响尤为严重。龚文平教授介绍了考虑地质模型不确定性的盾构隧道纵向结构性能分析方法,包括以下几个方面:(1)针对普通随机场的构建过程无法考虑工程地质钻孔处岩土体参数对随机场构建的约束作用,介绍了条件随机场理论并指出需采用条件随机场理论进行工程地质模型的构建;(2)针对当前盾构隧道结构性能分析普通采用典型横断面分析方法,无法考虑纵向结构行为与横向结构行为之间的耦合作用,介绍了一种简化的盾构隧道纵向结构性能分析方法,该方法采用一维弹性地基梁进行隧道纵向结构行为分析,然后将隧道纵向结构行为对隧道横向结构行为的影响简化为附加力作用进行隧道横断面结构行为分析;(3)结合条件随机场理论与提出盾构隧道纵向结构性能分析方法,提出了考虑地质模型不确定性的盾构隧道纵向结构性能不确定性分析方法;(4)基于某具体案例分析,对所提出的盾构隧道纵向结构性能不确定性分析方法进行了验证。

### 2.19 徐耀谈“基于贝叶斯网络的高心墙坝溃坝概率计算方法研究”

徐耀,中国水科院北京中水科海利信息技术有限公司副总经理,高级工程师。专家观点:我国已建成12座100m以上高心墙堆石坝。高心墙坝在设计标准和施工质量上都高于中小型坝,如何科学地计算高心墙坝的渗透破坏概率是亟待解决的问题。徐耀高工提出了基于贝叶斯网络参数学习的高心墙坝溃坝概率分析方法:即以中小型坝的贝叶斯网络及其(条件)概率为先验信息,通过学习12座高心墙坝案例信息,得到高心墙坝溃坝概率分析模型,该模型具有优点:(1)解决了大型高心墙坝案例稀少的问题。传统方法计算溃坝概率时需要大量的统计资料,很难应用于只有少量数据的高心墙坝的溃坝概率分析。基于贝叶斯网络参数学习的方法将中小坝模型和少量高坝案例信息有机结合,从理论上解决了案例稀少的问题;(2)充分利用了中小型坝贝叶斯网络信息。虽然大型高心墙坝具有高水头、大体积、强应力等特点,但中小型破坏机理和各因素之间的作用关系可以为大型高坝提供借鉴和

参考。因此,在案例稀少的情况下,综合考虑中小型坝的作用关系和大型高坝的案例信息不失为一种可行方案;(3)允许考虑缺失信息的案例。传统统计分析方法很难考虑部分缺失数据的案例,通常将这部分数据舍弃,然而高心墙坝案例本来就稀少,舍弃这部分信息将使概率分析变得更加艰难。如出现病险症状的大型高心墙坝案例数仅为10个,其中4个案例缺少部分数据。贝叶斯网络的参数学习可以采用EM-learning算法从理论上解决存在缺失信息的问题;(4)能够灵活地处理先验和后验信息的相互关系。贝叶斯网络参数学习的灵活性体现在两个方面:其一,用于更新学习的案例数可以灵活选取,只要有1个案例就能学习1个,案例数越多,越接近真实情况;其二,先验信息和证据信息之间的关系权重可以灵活选取,将中小型坝的先验信息的权重适当降低,突出高心墙坝案例信息的价值,有效解决了中小型坝和大型高坝之间的权重不等的关系。

### 2.20 李长冬谈“三峡库区秭归盆地滑坡易发性评价与防控技术”

李长冬,中国地质大学(武汉)教授、博导,院长助理。专家观点:三峡库区秭归盆地地区侏罗系易滑地层分布广泛,滑坡比较发育,亟需开展该地区滑坡易发性评价与防控研究。在秭归盆地区域资料系统收集和滑坡野外调查的基础上,研究了秭归盆地滑坡地质灾害空间分布特征,分析了工程地质条件对滑坡发育的影响,揭示了研究区滑坡的成因机制。综合考虑影响滑坡稳定性的环境因素和岩土体的工程地质条件,选择关键影响因子,对各个影响因子分组进行了量化分析,开展了研究区滑坡易发性评价。针对研究区侏罗系易滑地层岩性组合特征,提出了多层复杂滑床地层中抗滑桩优化设计方法,确定了抗滑桩合理布设范围以及最优的抗滑桩截面尺寸、桩间距和嵌固深度等关键设计参数。研究成果为三峡库区秭归盆地滑坡防治提供依据。

### 2.21 彭铭谈“基于贝叶斯网络的岩土工程风险分析—以边坡和堤坝工程为例”

彭铭,同济大学副教授。专家观点:人工智能围棋软件AlphaGo的成功证实了基于神经网络深度学习的巨大潜能,启发和鼓舞了各领域关于大数据和深度学习的研究和实践。然而美国工程院院士、Google工程师Jeff Dean强调了深度学习



技术的前提就是拥有大量数据,这给该技术在岩土工程中的应用带来瓶颈。因为岩土工程不仅数据有限,而且同类型工程的岩土体和结构参数都千差万别。虽然存在数据有限的缺点,但岩土工程有大量的力学计算理论。因此,找到一种智能学习方法能有效结合力学计算理论和有限的统计数据是切实可行的途径,贝叶斯网络具备这样的功能。贝叶斯网络是由 Pearl 与 1988 年提出的概率推理方法,是解决具有不确定性和相关性的复杂系统的有力工具。贝叶斯网络用于解决岩土工程问题的基本思路是:首先基于岩土工程物理力学原理建立岩土体参数和所需指标的逻辑关系网;其次采用力学计算理论,并考虑模型不确定性和参数不确定性,建立贝叶斯网络的先验概率分布;基于贝叶斯原理将统计数据输入贝叶斯网络完成参数学习,进而得到更适合具体岩土工程的分析模型;最后得到所需指标的概率分布。将贝叶斯网络应用于岩土工程可以解决如下问题:(1)考虑大量因素及其相互作用关系的复杂问题。贝叶斯网络通过逻辑影响关系即可建立各因素之间的相互关系,并采用条件概率分布量化其相互影响关系,得到复杂问题定量分析模型;(2)具有部分缺省信息的少量统计数据的参数学习问题。贝叶斯网络可以通过整合岩土工程物理力学原理建立先验概率分布,再将统计数据输入即可得到考虑所需工程岩土参数的分析模型,其中采用碎权更新的 EM-learning 算法修补缺省数据;(3)基于多源监测信息融合的岩土工程安全评价。贝叶斯网络可以通过力学原理影响关系,将不同类型的参数和不同力学机理的关系整合成一个网络,通过输入多点多类型的监测信息更新岩土体力学参数,进而更真实地分析和评价工程安全性能。

## 2.22 黎学优谈“基于监测数据的土质边坡失效模式甄别”

黎学优,中山大学副教授。专家观点:由于地质条件的复杂性及土体参数的空间变异性,土质边坡一般具有多个潜在滑裂面(失效模式)。甄别土质边坡的失效模式是滑坡风险管控的关键环节之一。本研究提出一种基于数据驱动的边坡可靠度分析方法,利用监测数据甄别土质边坡的失效模式。首先,基于滑裂面的重要性及相关性,从大量的潜在滑裂面中识别出有限的代表性失效模式。其次,对

于各种代表性失效模式,利用“马尔科夫链-随机场”法,高效地生成大量边坡样本,并利用这些样本,学习边坡在各种代表性失效模式下的变形模式。最后,应用贝叶斯识别法,基于实测的边坡变形数据,甄别出边坡最可能失效模式。利用上述方法,本研究分析了一个具有多个表面位移测点的双层土质边坡。结果表明,该法能有效地利用位移监测数据甄别边坡的失效模式。随着数据量的增加,失效模式识别的准确率越高。此外,所提方法还可用于优化监测点的布置方案,以提高边坡监测的经济性和实用性。

## 2.23 刘勇谈“土体空间变异性对边坡稳定安全系数的影响”

刘勇,武汉大学教授、博导,青年千人计划入选者。专家观点:安全系数是边坡稳定性评估的一个重要指标,具有重要的工程意义。刘勇教授指出土性参数具有一定的空间变异性,而传统的解析算法求解边坡稳定安全系数通常基于均匀土体的假设。本研究考虑在土性参数具有空间变异性的前提下,采用修正线性估计法生成二维和三维随机场反演土性参数的空间变异性,通过有限元强度折减法,直接求出滑裂面位置与边坡稳定安全系数。利用蒙特卡罗模拟法,得出边坡稳定安全系数的统计特性。二维和三维有限元模拟结果均表明,土性参数的空间变异性会降低边坡的稳定安全系数,引发滑坡所需的能量较小,基于均匀土体假设的边坡稳定安全系数偏于不保守。由于自然边坡和工程边坡中均面临土性非均匀性问题,所以本研究成果具有广泛的工程背景和较强的实际指导意义。

## 3 会议闭幕式

会议闭幕式由中国土木工程学会工程风险与保险研究分会副秘书长张洁主持,并作大会总结。本次会议是专门为全国工程灾害与风险控制及相关领域的青年学者打造的一次交流盛会,是中国土木工程学会工程风险与保险研究分会的又一重要官方学术交流平台。经过一天紧张有序、广泛深入的学习,会议取得了圆满成功,各行业学者之间进行了广泛的交流,建立了深厚的友谊,促进了国内工程风险领域青年学者和各单位间的合作,推动了我国工程灾害与风险控制科学的发展。

(上转第 119 页 Continued on Page 119)

- [6] 宋瑞宏, 倪新跃, 郑晓林, 等. 我国气垫带式输送机的现状与发展 [J]. 常州大学学报(自然科学版), 2006, 18(2): 61-64.  
SONG R H, NI X Y, ZHENG X L, et al. Current situation and development of air cushion belt conveyor [J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2006, 18(2): 61-64.
- [7] 张琦, 文灿湘. 第二代气垫带式输送机的研制 [J]. 华电技术, 2008, 30(9): 33-38.  
ZHANG Q, WEN C X. The development of second-generation air cushion belt conveyor [J]. Huadian Technology, 2008, 30(9): 33-38.
- [8] 宋伟刚, 彭兆行. 气垫带式输送机的设计与计算(I)——气垫带式输送机的发展概况、种类及特点 [J]. 矿山机械, 1994(6): 12-15.  
SONG W G, PENG Z X. Design and calculation of air cushion belt conveyor (1)—development, types and characteristics [J]. Mine Machinery, 1994(6): 12-15.
- [9] RAVIKUMAR M, CHATTOPADHYAY A. Integral analysis of conveyor pulley using finite element method [J]. Computers & Structures, 1999, 71(3): 303-332.
- [10] GUO S, LIU J, LI Z R, et al. Experimental research on air film formation behavior of air cushion belt conveyor with stable load [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1424-1434.
- [11] REED J N, MILES S J. High-speed conveyor junction based on an air-jet floatation technique [J]. Mechatronic, 2004, 14(6): 685-699.
- [12] NUTTALL A, LODEWIJKS G. Traction versus slip in a wheel-driven belt conveyor [J]. Mechanism & Machine Theory, 2006, 41(11): 1336-1345.
- [13] 付婷. 气垫带式输送机的发展现状和应用 [J]. 科技信息, 2008(9): 429-430.

FU T. Development status and application of air cushion belt conveyor [J]. Technical Information, 2008(9): 429-430.

- [14] 路伟, 罗进, 张化强, 等. 气垫带式输送机在焦化厂中的应用 [J]. 机械工程与自动化, 2011(4): 199-200.  
LU W, LUO J, ZHANG H Q, et al. Application of air-cushion belt conveyor in coking plant [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011(4): 199-200.
- [15] 文婷, 文灿湘, 刘新代. 第二代全气垫带式输送机在锦州港的应用 [J]. 粮食流通技术, 2008(2): 16-21.  
WEN T, WEN C X, LIU X D. Application of the second generation of complete air-cushion belt conveyor in Jinzhou port [J]. Grain Distribution Technology, 2008(2): 16-21.

#### 作者简介:



ZENG B

曾兵(通信作者)

1985-, 男, 江西丰城人, 高级工程师, 重庆大学动力工程及工程热物理专业博士, 主要从事火电厂物料输送设计及垃圾发电设计管理工作(e-mail) zengbing@gedi.com.cn。

陈炎临

1961-, 男, 辽宁沈阳人, 工程师, 主要从事火电厂物料输送设计工作(e-mail) chenyanlin@gedi.com.cn。

罗宇东

1967-, 男, 广东梅县人, 上海交通大学热能工程专业学士, 教授级高级工程师, 从事火电厂物料输送设计及设计管理工作(e-mail) luoyudong@gedi.com.cn。

(责任编辑 郑文棠)

(下接第 148 页 Continued from Page 148)

#### 作者简介:



LI D Q

李典庆

1975-, 男, 湖北十堰人, 武汉大学水利水电学院副院长, 二级教授, 博士生导师, 上海交通大学博士, 主要从事水利水电工程风险评估与灾害防治、工程结构可靠性与安全控制等方面的研究工作(e-mail) dianqing@whu.edu.cn。

曹子君(通信作者)

1987-, 男, 山东临沂人, 武汉大学水利水电学院水利工程系副主任, 副教授, 博士生导师, 香港城市大学博士, 主要从事水利水电岩土工程不确定性定量分析、可靠度分析与设计理论、风险评估方法等方面的研究工作(e-mail) zijuncao@whu.edu.cn。

(责任编辑: 高春萌)