

· 科学论坛 ·

# 水工岩土工程可靠度与风险控制领域基础研究回顾与展望

李典庆<sup>1,2\*</sup> 唐小松<sup>1,2</sup>

1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072
2. 武汉大学 工程风险与防灾研究所, 武汉 430072

**[摘要]** 水工岩土工程可靠度与风险控制是一个具有高度学科交叉性的研究领域,该研究可以系统地考虑岩土结构物设计、施工、运维等阶段所涉及的诸多不确定性因素,从而实现岩土结构物全生命周期的安全控制。本文首先统计分析了1997—2019年度该领域国家自然科学基金“面青地”项目的资助情况。其次,对该领域的主要研究进展、代表性成果进行了总结和分析。最后对该领域研究的关键科学问题和未来研究方向提出了4点建议。

**[关键词]** 基础研究;可靠度;风险控制;水工岩土工程

根据我国《工程结构可靠性设计统一标准》<sup>[1]</sup>中对可靠性的定义,可靠性是指结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力。用来度量可靠性的指标称为可靠度,结构可靠度是结构可靠性的概率度量,其定义为结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。反之,结构不能完成预定功能的概率称为失效概率 $P_f$ 。用以度量结构可靠度的数值指标是可靠指标 $\beta$ ,可靠指标与失效概率之间关系为 $P_f=1-\Phi(\beta)$ ,式中 $\Phi$ 为标准正态累积分布函数。

可靠性的定义最早是在20世纪40年代提出,主要用于军事领域评估武器、装备的质量或寿命。1950年前后,美国在多个领域发起了一系列相关项目计划,如美国电子设备可靠性咨询委员会(AGREE)的组建成立,极大地推动了可靠性理论的发展以及在工业界的应用<sup>[2]</sup>。20世纪60年代以来,工程结构可靠性研究开始逐渐成为一个独立的研究领域。简而言之,工程结构可靠性理论就是研究如何合理地处理结构工程设计、分析与决策过程中的不确定性因素,并从概率的角度研究工程的安全性和适用性问题。与传统的安全系数设计方法相比,该理论能够定量地考虑各种不确定性因素对工程安全的影响。随着工程结构可靠性理论研究日益完



**李典庆** 水资源与水电工程科学国家重点实验室主任、武汉大学水利水电学院副院长。国家杰出青年科学基金获得者、国家“万人计划”领军人才、国务院政府特殊津贴专家、2019年爱思唯尔(Elsevier)中国高被引科学家。长期从事水工岩土工程可靠性与风险控制、水利水电工程灾害防治理论与技术方面的研究工作。发表SCI论文100余篇,SCI引用3000余次。获国际岩土工程安全学会突出贡献奖、教育部和湖北省自然科学一等奖。

善的同时,多部结构可靠性设计规范开始修订编制,如国际标准化组织颁布的《结构可靠性设计一般原则》(ISO2394)<sup>[3]</sup>、国内住房和城乡建设部颁布的《工程结构可靠性设计统一标准》。此外,一系列国际和国内学术会议相继举行,如每4年一次的“国际结构安全和可靠度学术会议(ICOSSAR)”和“国际土木工程中统计学与概率论的应用学术会议(ICASP)”,每2年一次的“国际岩土工程安全与风险学术会议(ISGSR)”和“国际可靠性工程与风险管理学术会议(ISRERM)”以及国内召开的“全国工程结构可靠性理论、方法与应用学术会议”“全国工程风险与保险研究学术研讨会”等。

岩土工程学科是力学、地学与工程和环境学科交叉形成的,由土力学、岩石力学、工程地质以及相

收稿日期:2020-03-29;修回日期:2020-11-04

\* 通信作者,Email: dianqing@whu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(52042902)的资助。

应的工程技术所组成的学科分支。与传统的土力学固结理论、有效应力原理、边坡稳定性分析、地基处理技术、地下洞室稳定性分析等研究相比,岩土工程可靠性理论研究虽然起步较晚,但是对岩土结构物如边坡、坝基、地下洞室安全分析十分重要。在结构工程设计中,工程师面对的混凝土、钢材等是人工材料,材质相对均匀,材料类型和结构型式可选、可控,计算分析的边界条件相对明确。与传统的结构工程(如钢结构、钢筋混凝土结构)相比,岩土材料都是由地质作用自然形成的岩体和土体,其性质不可选、不可控,只能通过有限的勘探数据去估计,不可避免存在一定程度的不确定性。岩土工程不确定性主要包括地质条件不确定性(如地层变异性)和岩土体物理力学参数不确定性(如参数本身固有的变异性、采用经验公式根据直接测量参数估计设计参数时引入的转换模型不确定性以及试验数据有限带来的统计不确定性)。此外,岩土工程不确定性还来源于复杂的荷载环境、施工条件以及对岩土体变形破坏机理认识不清所导致的计算模型不确定性等<sup>[4,5]</sup>。这些广泛存在的不确定性因素是岩土工程进行可靠度分析与风险控制的内在驱动力。

近年来,水工岩土工程可靠度与风险控制研究在国内进展较快,并对工程实践产生了显著的影响。如以陈祖煜、高大钊、祝玉学、包承纲等为代表的学者们认为,岩土工程应采用考虑不确定性因素的可靠度分析与设计方法<sup>[6-9]</sup>。越来越多的规范和手册已开始将基于可靠性理论的设计方法作为推荐的设计方法,如住房和城乡建设部颁布的《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》<sup>[10]</sup>;《水利水电工程边坡设计规范》<sup>[11]</sup>也明确建议对安全级别较高的边坡应进行可靠度设计;《建筑地基基础设计规范》<sup>[12]</sup>也规定按概率极限状态设计,考虑承载力和正常使用两种极限状态,并采用分项系数和标准值的实用设计表达式。另一方面,国内定期举行的相关学术会议如“全国工程风险与保险研究学术研讨会”“全国青年工程风险分析和控制研讨会”等,展示了该领域研究的最新进展与成果,探讨了相关学科的未来发展方向,为该领域的理论、方法与技术发展和工程应用提供了契机。党的十九大报告指出:要瞄准世界科技前沿,强化基础研究,实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破;突出关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠覆性技术创新。水工岩土工程可靠度与风险控制研究为国家重大基础设施建设、“一带一路”等战略任务实施提供理论和技术支撑。

本文首先对水工岩土工程可靠度与风险控制领域受到国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)资助的项目情况进行分析,然后对该领域的主要研究进展和代表性成果进行总结,最后对该领域研究的关键科学问题和未来研究方向提出建议。需要指出的是,由于从自然科学基金委网站仅可获得 1997 年以来的项目资助情况,且 1997 年以前与此研究相关的项目资助非常少,因此本文所涉及的所有项目获批时间均在 1997—2019 年之间。为了使分析结果更具代表性,主要分析“面青地”项目(包括面上项目、青年科学基金项目 and 地区科学基金项目三类项目)。此外,资助项目代码主要是 D0705、E0806、E0907、E0908 及其三级学科代码(上述代码系 2019 年工程与材料科学部申请代码变更前后的申请代码)。

## 1 项目资助情况

根据自然科学基金委官网查询的数据,截至 2019 年度,在水工岩土工程可靠度与风险控制领域累计资助面上项目 44 项、青年科学基金项目 44 项、地区科学基金项目 2 项,三类项目共 90 项,累计批准经费超过 3 500 万元,资助情况如图 1 所示。可以看出,在 1997—2007 年间水工岩土工程可靠度与风险控制领域获资助项目极少,平均一年不到 1 项,在 2008—2013 年间资助项目开始逐渐增多。在 2013 年后资助项目数量显著增加,每三年约有 30 个项目获得资助,平均每年支持 10 个项目,且三年总资助金额均超过了 1 000 万元,说明该领域的相关研究越发活跃且潜力巨大。

图 2 给出了 1997—2019 年该领域获资助项目按学科代码分布情况。这里要说明的是,申请代码统计严格按照申请书中选择的代码,二级代码和三

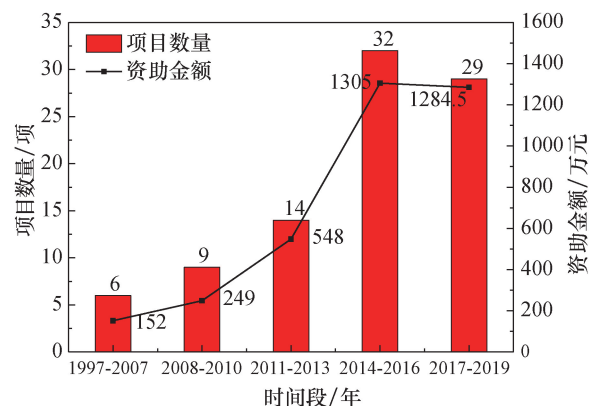


图 1 1997—2019 年该领域资助项目的数量与金额

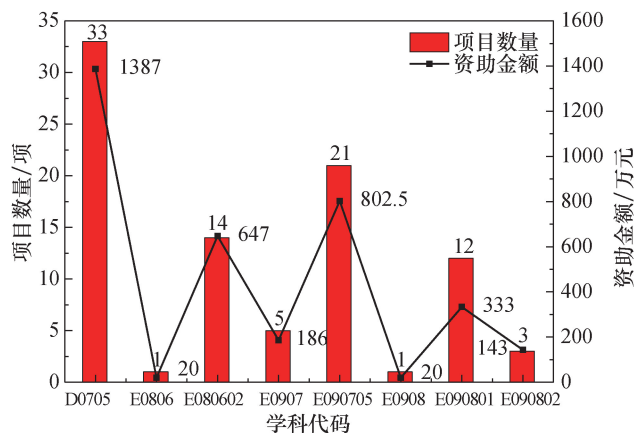


图2 1997—2019年该领域资助项目按学科代码分布情况

级代码分开统计。可见,工程地质环境与灾害(D0705)对应的项目数量最多,共33项,占36.7%,批准经费为1387.0万元;二级代码中的岩土力学与岩土工程(E0907)及其三级代码岩土体应力变形及灾害(E090705)次之,分别有5项和21项,两者共占28.9%,资助总金额为988.5万元;二级代码岩土与基础工程(E0806)及其三级代码岩土工程减灾(E080602)对应的项目分别有1项和14项,共占16.7%,资助总金额为667.0万元;二级代码水工结构和材料及施工(E0908)及其三级代码水工结构动静力性能分析与控制(E090801)和水工结构实验、观测与分析(E090802)相关项目数量为16项,占17.8%。总的来说,可靠度研究与破坏后果严重的工程地质灾害结合较为紧密,风险控制的需求较大。

图3展示了1997—2019年该领域获资助项目按研究内容的分布情况。由于项目间存在研究内容的交叉,难以做严格的区分,该划分结果尽量区分不同项目的核心研究内容。总体看来,大量的项目聚

焦边坡可靠度问题,总数达42项,占46.7%。可能的原因是边坡稳定性分析是岩土结构物典型问题,且边坡可靠度研究在国内外开展得较早,积累的文献和资料相对较多。因此,本文根据不同研究重点对边坡可靠度问题进行了细分。综合来看,降雨和地震等荷载作用下的边坡可靠度问题吸引了广泛研究兴趣;更多的获批项目在研究边坡可靠度的同时也注重了考虑边坡失效后果的定量风险评估问题;隧道与地下工程有关的资助项目也逐渐增多,为“一带一路”建设奠定坚实基础。

1997—2019年,共有41家单位在该领域获得基金资助项目。其中只有武汉大学1家单位获得10项以上资助项目,有5家单位获得4项以上资助项目,按获批项目数多少分别是武汉大学(13项)、中国地质大学(武汉)(6项)、同济大学(5项)、河海大学(5项)、上海交通大学(4项),项目数占36.7%,资助经费总额占38.9%。另有8家单位获得3项资助项目,在此不详细介绍。

上述研究单位在该领域的研究各有特色和侧重。武汉大学相关研究团队所获项目数量较多,在岩土体参数不确定性表征、岩土结构物可靠度设计、高效可靠度分析与风险评估方法等方面研究成果较为丰富;中国地质大学(武汉)获批项目数排第2位,主要以青年基金项目为主,在边坡抗震可靠度、考虑土体参数和地质模型不确定性的滑坡演化与变形预测方面取得了较多成果;同济大学在堰塞湖坝风险分析和土体液化风险评价等方面成果突出;河海大学则在地震作用下的滑坡风险评价方面的研究成果较多;上海交通大学着重关注概率反演分析与降雨作用下的岩土工程可靠度方面的研究工作。

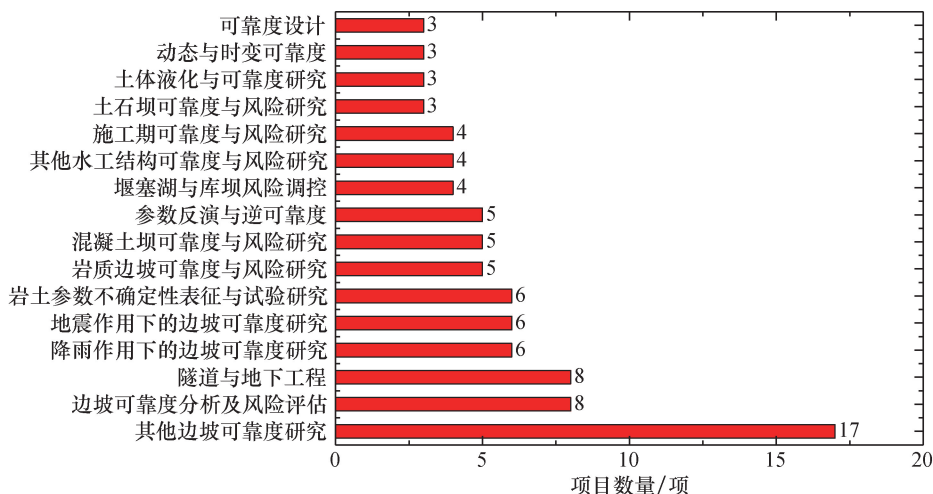


图3 1997—2019年该领域资助项目按研究内容的分布情况

## 2 研究进展与代表性成果

### 2.1 研究进展

#### (1) 岩土体参数不确定性表征日趋成熟

岩土体参数不确定性表征需要大量的数据,如现场或室内试验数据,获取数据主要依靠有效的场地勘察和现场数据解译。然而,现场数据解译往往较为困难,原因在于岩土材料在随时间沉积和演化过程中所存在的固有变异性。此外,受技术经济条件限制,可获得的岩土体参数数据往往有限,导致岩土体参数统计分析中存在统计不确定性。因此,基于已有的岩土体参数数据库,充分借鉴岩土工程实践经验,结合概率与统计学科的理论、方法对岩土体参数的不确定性进行有效表征十分必要。在这方面,一系列研究工作极大地促进了该目标的实现。随机场理论的应用与发展实现了对岩土体参数在空间位置变化的有效刻画,克服了传统可靠度研究中常用的表征岩土体参数的随机变量模型的局限性。贝叶斯方法被成功应用到直接量化特定场地的固有变异性,可结合国内外已经建立的岩土体参数数据库与有限的勘察或监测样本,解决小样本情况下特定场地参数统计特征的估计问题,同时可系统地考虑其他的认知不确定性,如不同土工试验获取的岩土体参数间相互转换时涉及到的转换模型不确定性、数值分析中的计算模型不确定性。Bootstrap 方法的应用则从频率学派的角度量化了小样本情况下岩土体参数的统计不确定性。Copula 函数的引入提高了岩土体参数多维概率建模的灵活性,为小样本条件下岩土体参数多维分布模型建模奠定了理论基础。在众多统计方法应用发展的同时,大量试验研究获得的数据也为岩土体参数的概率建模提供验证和对比。

#### (2) 复杂荷载条件下可靠度研究逐步深入

岩土工程可靠度研究从仅考虑静态、单一不确定性荷载条件(如材料自重)到包含更具有一般性的动态、多种不确定性荷载(如降雨和地震)是研究不断深化的必然结果。降雨条件下的可靠度研究逐渐深入:这方面考虑多种材料参数空间变异性的随机渗流分析成为主流,考虑参数空间变异性的非饱和土坡失稳机理的研究日益深入,一维随机渗流场逐渐向二维和三维空间随机渗流场扩展。地震作用下的可靠度研究日渐增多:这方面地震动的随机模拟技术逐渐发展,概率危险性分析框架以超越概率的思想为岩土工程可靠度评价提供了更有效的表述,

对地震动与岩土体参数不确定性在结构概率分析中的考虑更加系统,考虑地震荷载系数不确定性的拟静力法逐渐向考虑随机地震波的数值方法(如有限元法)转变,对考虑不确定性因素的土体液化问题研究日益受到重视。

#### (3) 高效可靠度分析方法不断发展

对于单一失效模式且具有显式功能函数的简单岩土工程可靠度问题,传统的统计矩法和一阶可靠度方法(FORM)等往往可以得到精度较高的近似解,但这些方法的局限性在于不适用于分析复杂可靠度问题。蒙特卡洛模拟方法(MCS)虽然概念简单,但对于小失效概率问题来说其效率极低,为了得到足够精度的可靠度结果,MCS 往往需要大量的抽样次数。一方面,随着对岩土体参数不确定性的不断认知与有效表征,基于随机场理论和多元分布模型来对参数的空间建模往往会引入大量的随机变量。另一方面,数值计算方法和计算机处理能力的不断发展,也极大地促进了可靠度研究中对岩土弹塑性本构模型和复杂失效模式的考虑。为此,研究人员提出了一系列高效的可靠度分析方法,以解决复杂、高维的岩土工程可靠度问题,按研究思路大致分为两类:思路之一是减少确定性分析模型的计算次数,一般来说是采用高效代理模型去逼近原始模型(如土石坝渗流分析和边坡稳定分析的有限元法),将复杂的隐式功能函数用等效显式功能函数去近似,在建立显式功能函数时需要进行少量的复杂原始模型计算,但是在进行可靠度分析时不需要再进行复杂原始模型计算,从而提高可靠度分析的效率。而且一旦建立了显式功能函数,以 FORM 为代表的简单可靠度计算方法即可用于可靠度计算。作为代理模型的典型代表之一,非侵入式随机有限元法的提出实现了随机分析和确定性分析的一体化;与传统的二阶多项式响应面法相比,以人工神经网络和支持向量机等为代表的机器学习方法有效地提高了对真实模型逼近的精确性;多重响应面法为求解多失效模式岩土结构物的系统可靠度问题提供了一种有效的分析工具。另一种思路是直接减少抽样的次数,重要性抽样法和子集模拟法等是这一思路的代表性方法,即根据样本分布特性减少不必要的抽样次数从而实现高效可靠度分析。近年来逐渐有研究工作在代理模型的基础上采用高效抽样方法,也就是同时利用上述两种思路的优点来进一步提高可靠度分析效率。可靠度设计可认为是可靠度分析的逆过程,其工程优化的本质对计算效率的要求自

然更高。以上高效可靠度分析方法的发展也极大地推动了可靠度设计方法的发展,进而促进了可靠性理论在岩土工程设计与分析中的应用。

#### (4) 风险评估与控制研究日渐重视

参考可靠度的定义,可将风险定义为“结构在规定的时间内,在规定的条件下,不能完成预定功能的概率以及由此产生的不利后果”。不难看出,可靠度分析是风险评估的一部分。由可靠度研究拓展到风险研究,进一步达到技术与经济指标的结合是必然趋势,这也可从该领域获批项目的名称变化得到体现。风险识别的需求促进了对岩土结构物可能失效模式识别技术的发展;对失效模式的考虑更加全面,单一失效模式逐渐向复杂多失效模式转变;贝叶斯方法、K均值聚类算法等方法应用于识别代表性失效模式。此外,失效后果评估方法逐步成熟:由单一结构破坏尺度发展到对人员伤亡、经济损失、社会及环境影响等多方面因素的考虑;动态风险评估在经济水平、监测技术发展的推动下,开始贯穿结构的施工期、服役期等各个阶段;基于风险评估结果进行控制、预防或减小风险的研究不断增多,对岩土结构物设计与施工过程中如何有效控制风险并降低成本起到了一定的指导作用。

## 2.2 代表性成果

在自然科学基金委的持续资助下,该研究领域取得了一系列具有较高学术价值和应用前景的研究成果,这些成果进一步深化了对地质与岩土材料不确定性的认知,同时发展了岩土工程可靠度与风险分析的方法和框架,形成了各类灾害条件下的应急管理 with 风险决策体系,上述成果引起了国内外同行的广泛关注,极大地提升了我国在该研究领域的国际影响力。这里简述部分代表性成果。

上海交通大学相关研究团队基于贝叶斯理论和马尔科夫链蒙特卡洛模拟方法,发展了一套贝叶斯概率反分析框架,建立了边坡可靠度分析中土体参数统计特征的更新方法;实现了由场地测量的土体孔隙水压力数据对土体水力参数的不确定性量化,阐明了水力参数不确定性对降雨入渗作用下边坡稳定预测的影响;揭示了场地测量的土体孔隙水压力数据分布对土体参数不确定性量化及降雨入渗作用下边坡稳定预测模型的影响;利用随机有限元法阐明了土体参数空间变异性和不同土体参数间互相关性对波浪作用下海床响应及土体瞬时液化的影响;基于随机场生成技术和流变耦合作用数值建模,揭

示了土体变形参数与渗流参数空间变异性对非饱和土固结的影响<sup>[13-18]</sup>。

河海大学相关研究团队提出了考虑时间累计效应的贝叶斯参数优化反演法,实现了大体积混凝土不稳定温度场热学参数的随机反演<sup>[19]</sup>。建议了基于可靠性理论的水工钢闸门设计公式,通过与传统容许应力法比较阐明了各自的优缺点,为相关规范修订提供了参考<sup>[20]</sup>。提出一种简化迭代算法以改进一阶可靠度方法,可与常见的数值分析软件结合以实现较为高效的岩土工程可靠度分析;提出将改进一阶可靠度方法应用于逆向可靠度分析,实现了较为高效的岩土工程可靠度设计;结合极限平衡法和 Newmark 滑块理论,发展了一种地震作用下边坡位移的计算方法,通过一阶可靠度方法研究了土体参数不确定性对动力边坡可靠度分析的影响<sup>[21-23]</sup>。阐明了地震动方向性对概率地震滑坡危险性分析的影响,建立了考虑地震动脉冲影响的经验滑坡位移预测模型;揭示了边坡滑面以下土层条件对地震作用下滑动体动力响应分析和滑动位移的影响,建立了考虑不同土层条件作用的等效地震动参数经验预测模型<sup>[24,25]</sup>。

同济大学相关研究团队引入克里金法构建边坡稳定安全系数的代理模型,实现了高效的边坡系统可靠度分析;发展了一种加固边坡系统可靠度分析方法,阐明了边坡滑动面分布与土体参数不确定性对加固桩最优布置的影响;实现了对降雨入渗过程中边坡可靠度的动态估计;提出了一种概率方法刻画液化势评价半经验模型的区域间变异性,建议通过区域土体液化数据校准传统的半经验模型;发展了一种构建地震动地面加速度峰值和地震矩震级之间联合概率分布的新方法,用以评估土体液化作用下的结构物风险<sup>[26-30]</sup>。通过对大量溃坝案例的汇编与分析,系统总结了大坝失效的机制、过程和结果,建议了大坝风险评估和应急管理决策方法;基于贝叶斯网络对红石岩堰塞坝进行了定量风险评估,建议了控制堰塞坝溃坝风险的决策方法;通过大尺度波浪水槽试验,揭示了上游水位和波浪高度对堰塞坝坝体侵蚀破坏模式及孔隙水压力变化的影响<sup>[31-33]</sup>。

中国地质大学(武汉)相关研究团队揭示了汶川地震中高速远程滑坡的形成机制,为该类滑坡的识别提供了有效参考,并提出了一种考虑能量—时间分布特征的动力可靠度分析方法;利用地面核磁共

振技术和场地试验估计的土体饱和渗透系数空间分布特性,阐明了该参数空间变异性对三峡库岸堆积层滑坡失稳机制的影响;结合 Bootstrap、人工神经网络和机器学习机方法提出了一种滑坡变形的概率预测方法,实现了对三峡库区堆积层滑坡变形值的区间预测;采用 Bootstrap 方法量化了土体抗剪强度参数的统计不确定性,实现了对三峡库区藕塘边坡的可靠度区间估计;提出将预测的滑坡变形考虑为刚体变形、块体内变形和残余变形之和,运用条件随机场在残余变形计算中考虑了地质不确定性;探究了地层不确定性对加固型边坡可靠度分析与设计的影响,展示了基于可靠性理论的抗滑桩优化设计;发展了一次矩方法,实现了对考虑土体初始孔隙水压力和渗透系数空间变异性的降雨入渗斜坡的高效可靠度分析<sup>[34-40]</sup>。

武汉大学相关研究团队提出了基于 Copula 函数的岩土体参数联合概率分布模型构建方法,探究了不完备概率信息条件下表征岩土体参数互相关结构的 Copula 函数对岩土结构物可靠度的影响规律,阐明了不完备概率信息条件下岩土结构物可靠度计算结果不唯一的根本原因;建立了基于贝叶斯理论的岩土工程不确定性量化框架,实现了考虑多源信息的岩土体参数不确定性量化与更新;提出了模拟大尺度三维随机场的逐步协方差分解法,从理论上证明了其与传统方法的等价性,实现了多变量、大尺度三维岩土体空间变异性的模拟;提出了含相关非正态变量可靠度分析的随机响应面法、考虑土体参数空间变异性的边坡可靠度分析多重响应面法和非侵入式随机有限元法,极大地提高了复杂边坡系统可靠度的计算效率;发展了基于子集模拟的边坡风险评估的高效随机有限元法,显著提高了随机有限元风险评估的计算效率以及失效样本的产生能力;提出了三维边坡协同式风险评估方法,实现了不同尺度有限元分析模型的协同利用,为实际复杂工程边坡风险评估提供了有效的分析工具;揭示了土岩混合边坡中两相介质的随机性与分布情况对边坡失效模式及其稳定安全系数统计特征的影响;提出了广义可靠指标相对安全率,克服了现有可靠指标相对安全率仅适用于正态和对数正态分布的局限性,拓宽了相对安全率准则的应用范围。提出了一种有效考虑地震动参数区域统计特征的多场地地震波挑选方法,克服了传统方法仅适用于单个场地的局限,可应用于区域尺度的地质灾害或结构风险

评估<sup>[41-55]</sup>。

### 3 关键科学问题与未来研究方向

#### 3.1 岩土工程数据分析与不确定性表征

岩土体参数不确定性表征是岩土工程可靠度分析与风险控制的重要基础,试验数据不足是制约岩土体参数不确定性表征的瓶颈问题。在岩土工程实践中,岩土体参数试验数据通常表现出以下 3 方面特点:(1) 某单一工程场地的试验数据非常有限,导致岩土体参数的确定具有较大的统计不确定性;(2) 除了特定场地或单一工程试验数据外,既有工程经验或勘探报告记录了大量类似场地或工程的试验数据;(3) 随着监测技术和数据传输技术的发展,可获取海量的岩土结构物荷载和响应(如水位、孔隙水压力、应力、位移等)监测数据。据此,凝练出以下 3 个关键科学问题:(1) 有限试验数据条件下岩土体参数的不确定性统计规律;(2) 如何利用类似场地或工程的试验数据降低岩土体参数的统计不确定性;(3) 如何利用海量的监测数据更新岩土体参数的不确定性。

针对上述关键科学问题,岩土工程数据分析与不确定性表征亟需开展的研究方向包括:(1) 基于有限试验数据的岩土体参数统计不确定性表征方法,岩土体参数统计不确定性对岩土工程可靠度与风险的影响规律;(2) 区域或全球岩土体参数数据库的建立(如国际土力学与岩土工程学会 ISSMGE 的 TC304 技术委员会网站上发布的岩土体参数数据库),研究有效结合特定场地或单一工程试验数据和类似场地或工程试验数据的算法,降低岩土体参数的统计不确定性;(3) 利用人工智能(机器学习)和大数据处理技术<sup>[56]</sup>解译海量的岩土结构物荷载和响应的监测数据,实时更新和预测岩土工程的可靠度与风险。近年来,ISSMGE 专门成立了“机器学习与大数据技术委员会(TC309: Machine Learning and Big Data)”,以促进机器学习与大数据处理技术在岩土工程中的应用。受此推动,一系列关于机器学习与大数据处理技术在岩土工程中应用的研究成果陆续发表,主要涉及贝叶斯学习<sup>[57-59]</sup>、梯度提升机<sup>[60-61]</sup>、深度神经网络<sup>[62-66]</sup>、主成分分析<sup>[67]</sup>等多种智能算法。(4) 利用物联网技术将不同工程的监测数据互联互通,实现岩土工程可靠度与风险的更新和预测。

#### 3.2 岩土工程可靠度分析与设计

不确定性条件下岩土工程结构响应具有随机

性,岩土工程可靠度分析与设计方法为合理地评价岩土工程结构可靠性以及设计决策提供了一种有效的工具,它是国际岩土工程可靠度与风险控制领域的热点问题。长期以来,岩土工程可靠度与风险控制主要针对小尺度、简化的岩土工程问题(如二维边坡稳定性分析)开展了大量的研究,对于赋存环境、荷载工况和地质条件复杂的大尺度岩土工程问题的研究十分有限<sup>[68, 69]</sup>,亟需加强相关研究以推动岩土工程可靠度理论在实际工程问题应用中的实用性;既有岩土工程可靠度分析研究通常只关注某个时刻的静态可靠度问题,目前对岩土工程结构的时变可靠度问题缺乏深入研究,然而时变可靠度问题在岩土工程实践中广泛存在(如考虑地震动作用的岩土工程可靠度分析、基于时序监测数据的岩土工程可靠度动态更新等),因此亟需建立有效的岩土工程时变可靠度分析理论和方法<sup>[70]</sup>;目前对岩土工程单体结构的可靠度开展了深入的研究,但是极少研究考虑多个结构(如隧洞和基础、埋地输水管道与既有建筑物)相互作用的岩土工程系统可靠度问题,对此类复杂岩土工程系统的随机响应机制缺乏认知,难以实现有效的系统可靠性控制;岩土工程可靠度设计是实现可靠性控制的重要途径,然而由于不同岩土工程结构的受力特点、极限状态和设计工况十分复杂,目前尚缺乏具有广泛适用性的岩土工程可靠度设计理论、方法与工具<sup>[71-72]</sup>。上述研究涉及的关键科学问题主要包括:(1)大尺度岩土工程结构可靠度高效分析;(2)岩土工程结构时变可靠度分析;(3)复杂岩土工程结构系统随机响应机制;(4)岩土工程结构可靠度设计理论与控制标准。

综上所述,在岩土工程可靠度分析与设计方面亟需开展以下4个方面的研究工作:(1)不确定性条件下大尺度岩土工程问题的可靠度应用研究,建立不同应用场景下典型岩土工程可靠度分析案例库,为岩土工程可靠度分析研究提供基准化参考;(2)针对岩土工程时变可靠度问题的关键难点,研究岩土工程时变可靠度分析理论和方法,为岩土工程时变可靠度分析和控制提供有效工具;(3)围绕复杂岩土工程结构系统可靠度问题,提出涉及多个岩土工程结构的系统可靠度分析方法与控制标准,为考虑不同岩土工程结构间相互作用的多结构系统可靠度分析与控制开辟有效途径;(4)针对岩土工程结构设计的特点,建立一套完备的岩土工程可靠度设计理论、方法和工具,用以推动岩土工程可靠度设计理论发展与工程应用研究。

### 3.3 岩土工程风险评估与控制

岩土工程可靠度分析的研究对象是工程结构本身的稳定性水平,风险评估则进一步涵盖失效后果,综合评估结构失稳破坏后造成的人员伤亡、经济损失以及社会和环境的影响等,并给出有效的风险控制措施和应急预案。虽然国内外学者围绕岩土工程风险评估开展了大量研究<sup>[31, 73, 74]</sup>,但是大部分研究成果是针对中小型工程项目,且风险源的辨识、风险指标的确定等关键步骤主要依靠专家经验,风险评估理论依据有待加强。随着高土石坝和大型隧洞等大型复杂工程项目日益增多,岩土工程风险评估与控制方面的研究仍面临诸多挑战性难题。首先,岩土工程具有隐蔽性、时空变异性和不确定性等特点,在复杂工程中常出现重大风险源甄别难度大、风险估测精度低等情况,突发险情(如涌水突泥)致使风险等级上升或风险源发生重大变化的现象在工程施工阶段屡见不鲜。其次,外部致灾因素(如地震、降雨和台风等)突发性强、作用机理复杂且诱发多灾害同时发生的可能性大,极大增加了承灾体易损性定量评估的难度。岩土工程风险评估的核心是研究损失的不确定性<sup>[75]</sup>,多灾害条件下承灾体易损性定量预测成为了制约相关工程风险评估的瓶颈问题,亟需发展和完善多灾害条件下岩土工程风险评估定量预测。此外,岩土工程施工阶段的风险直接涉及到施工人员的安全,近年来国家相关部门高度重视施工阶段的安全风险评估并开始逐步试行行业风险评估指南与导则<sup>[76-78]</sup>,然而施工建设过程中存在管理缺陷、操作偏差、施工设备老化、施工材料不达标等诸多不确定性因素,仅有少量研究探讨了部分施工风险源的定量表征<sup>[79, 80]</sup>,施工不确定性与施工安全风险之间的关系有待深入研究。岩土工程风险评估与控制的目标是能够有效规避、降低和控制工程风险,岩土工程风险控制涉及不同岩土工程措施(例如地基加固、边坡锚杆等)、岩土工程监测与风险控制方法,然而目前在风险控制的硬件设备(如阻尼器等)、控制理论以及应急预案等方面还缺乏深入研究。基于上述难题凝练出4个关键科学问题:(1)如何根据勘察资料和施工环境等有限信息建立风险源辨识方法,有效甄别重大风险源;(2)多灾害条件下岩土工程承灾体易损性评估方法与相应风险控制标准;(3)如何科学表征各类施工不确定性并定量评估其对施工安全风险的影响;(4)如何发展硬件装备及研究风险控制理论以主动规避、降低和控制岩土工程结构风险。

因此,岩土工程风险评估与控制方面的重点研究内容包括:(1) 针对工程项目现场勘察资料和其它已知参数,综合利用大数据理论、机器学习和专家既有工程经验等手段建立一套完备的岩土工程风险源辨识方法体系,有效甄别重大风险源,提高风险估测精度,并建立重大风险源与专项风险评估档案;(2) 基于物理力学机理和多源观测数据,分析多灾害条件下岩土工程结构的失效模式,提高工程承灾体易损性预测精度,并进一步研究和完善风险评估指标体系,建立多灾害条件下岩土工程风险预警与风险控制标准;(3) 结合可靠度理论,量化施工不确定性对岩土工程结构响应的影响,厘清施工不确定性与施工安全风险的定量关系,为施工阶段防灾减灾提供理论依据和技术支撑;(4) 针对重大风险源,发展能够控制岩土工程结构风险的硬件装备,提出针对不同风险水平的控制方法,并建立系统的岩土工程风险控制理论。

### 3.4 研究成果在工程实践中的应用

传统的岩土工程设计主要采用基于确定性分析的安全系数设计方法,某些工况下可能导致偏于保守或不安全的设计。随着可靠度研究理论和方法的进步,可靠度设计方法日益受到岩土工程师的关注。目前岩土工程设计仍以安全系数设计方法为主,虽然相关设计规范逐步增加了可靠度设计方法的内容,如对于安全级别较高的岩土结构物一般要求采用确定性和半概率分项系数两种设计方法校核其安全储备。然而,不可否认的是,当前阶段基于可靠度与风险控制理论的设计方法在与实践的结合上仍有欠缺,存在着不确定性难以表征、所需标定参数较多、岩土工程分析模型不唯一、可靠度算法复杂等问题,一定程度上阻碍了研究成果在工程实践中的具体应用。另一方面,通用可靠度计算机软件的开发是促进可靠性理论走向实践的重要途径。目前国内外具有代表性的可靠度分析软件包括 NESSUS(美国)、UNIPASS(美国)、COSSAN-X(德国)、PROBAN(挪威)、UQLAB(瑞士)、NIGPA(中国)、WHUNISFEM(中国)等。与商业化程度高的有限元分析软件相比,可靠度计算机软件普遍存在标准不一致、开放性不够、可开发性不强、前后处理薄弱、普及程度不高等问题。总体来说,可靠度计算机软件方面国外要远远领先于国内,国内一些可靠度分析软件更多的是个别研究团队自行开发使用,基本不具有商业推广性。针对上述问题,建议在未来研究中注重基础理论创新的同时,更要侧重于理论与实践

相结合,加大具有自主知识产权的可靠度分析与风险控制计算机软件的开发力度,而且软件要便于广大工程设计人员使用,从而推广可靠度分析与设计、风险控制在工程实践中的应用。

### 参 考 文 献

- [1] GB 50153—2008, 工程结构可靠度设计统一标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] Clement LM. Reliability of military electronic equipment. *Journal of the British Institution of Radio Engineers*, 1956, 16(9): 488—495.
- [3] ISO2394: 2015, General principles on reliability for structures. International Organization for Standardization, Switzerland, 2015.
- [4] 张璐璐, 张洁, 徐耀, 等. 岩土工程可靠度理论. 上海: 同济大学出版社, 2011.
- [5] 李典庆, 唐小松, 曹子君. 基于 ISO2394 的岩土工程可靠度设计. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [6] 陈祖煜. 建立在相对安全率准则基础上的岩土工程可靠度分析与安全判据. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 521—544.
- [7] Macedo J, Bray J, Abrahamson N, et al. Performance-based probabilistic seismic slope displacement procedure. *Earthquake Spectra*, 2018, 34(2): 673—695.
- [8] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理、方法、程序. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 陈祖煜. 水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [10] GB 50199—2013, 水利水电工程结构可靠性设计统一标准. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [11] SL 386—2007, 水利水电工程边坡设计规范. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [12] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [13] Zhang LL, Zhang J, Zhang LM, et al. Back analysis of slope failure with Markov chain Monte Carlo simulation. *Computers and Geotechnics*, 2010, 37(7—8): 905—912.
- [14] Zhang LL, Zuo ZB, Ye GL, et al. Probabilistic parameter estimation and predictive uncertainty based on field measurements for unsaturated soil slope. *Computers and Geotechnics*, 2013, 48: 72—81.
- [15] Zhang LL, Zheng YF, Zhang LM, et al. Probabilistic model calibration for soil slope under rainfall: effects of measurement duration and frequency in field monitoring. *Géotechnique*, 2014, 64(5): 365—378.



- [16] Zhang LL, Cheng Y, Li JH, et al. Wave-induced oscillatory response in a randomly heterogeneous porous seabed. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 116—127.
- [17] Peng XY, Zhang LL, Jeng DS, et al. Effects of cross-correlated multiple spatially random soil properties on wave-induced oscillatory seabed response. *Applied Ocean Research*, 2017, 62: 57—69.
- [18] Cheng Y, Zhang LL, Li JH, et al. Consolidation in spatially random unsaturated soils based on coupled flow-deformation simulation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2017, 41 (5): 682—706.
- [19] 刘宁, 张剑, 赵新铭. 大体积混凝土结构热学参数随机反演方法初探. *工程力学*, 2003, 20(5): 114—120.
- [20] 周建方, 高冉. 水工钢闸门可靠度设计建议公式. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(1): 1—6.
- [21] Ji J, Zhang CS, Gao YF, et al. Effect of 2D spatial variability on slope reliability: a simplified FORM analysis. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(6): 1631—1638.
- [22] Ji J, Zhang CS, Gao YF, et al. Reliability-based design for geotechnical engineering: an inverse FORM approach for practice. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111: 22—29.
- [23] Ji J, Zhang WJ, Zhang F, et al. Reliability analysis on permanent displacement of earth slopes using the simplified bishop method. *Computers and Geotechnics*, 2020, 117: 103286.
- [24] Song J, Gao YF, Feng TG. Probabilistic assessment of earthquake-induced landslide hazard including the effects of ground motion directionality. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 105: 83—102.
- [25] Song J, Gao YF, Feng TG, et al. Effect of site condition below slip surface on prediction of equivalent seismic loading parameters and sliding displacement. *Engineering Geology*, 2018, 242: 169—183.
- [26] Zhang J, Huang HW, Phoon KK. Application of the Kriging-based response surface method to the system reliability of soil slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 139(4): 651—655.
- [27] Zhang J, Wang H, Huang HW, et al. System reliability analysis of soil slopes stabilized with piles. *Engineering Geology*, 2017, 229: 45—52.
- [28] Zhang J, Huang HW, Zhang LM, et al. Probabilistic prediction of rainfall-induced slope failure using a mechanics-based model. *Engineering Geology*, 2014, 168: 129—140.
- [29] Zhang J, Juang CH, Martin JR, et al. Inter-region variability of Robertson and Wride method for liquefaction hazard analysis. *Engineering Geology*, 2016, 203: 191—203.
- [30] Zhang J, Chen FY, Juang CH, et al. Developing joint distribution of  $a_{max}$  and  $M_w$  of seismic loading for performance-based assessment of liquefaction induced structural damage. *Engineering Geology*, 2018, 232: 1—11.
- [31] Zhang LM, Peng M, Chang DS, et al. Dam failure mechanisms and risk assessment. New York: John Wiley and Sons, 2016.
- [32] Shi ZM, Xiong X, Peng M, et al. Risk assessment and mitigation for the Hongshiyuan landslide dam triggered by the 2014 Ludian earthquake in Yunnan, China. *Landslides*, 2017, 14(1): 269—285.
- [33] Peng M, Jiang QL, Zhang QZ, et al. Stability analysis of landslide dams under surge action based on large-scale flume experiments. *Engineering Geology*, 2019: 105191.
- [34] Tang HM, Liu X, Hu XL, et al. Evaluation of landslide mechanisms characterized by high-speed mass ejection and long-run-out based on events following the Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*, 2015, 194: 12—24.
- [35] Zhang S, Xiahou YS, Tang HM, et al. Study on the spatially variable saturated hydraulic conductivity and deformation behavior of accumulation reservoir landslide based on surface nuclear magnetic resonance survey. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 7290640.
- [36] Ma JW, Tang HM, Liu X, et al. Probabilistic forecasting of landslide displacement accounting for epistemic uncertainty: a case study in the Three Gorges Reservoir area, China. *Landslides*, 2018, 15(6): 1145—1153.
- [37] Ma JW, Su AJ, Zhang JR, et al. Reliability analysis for a large and complex landslide in the three gorges reservoir area (China) based on incomplete information. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 181—196.
- [38] Gong WP, Tang HM, Wang H, et al. Probabilistic analysis and design of stabilizing piles in slope considering stratigraphic uncertainty. *Engineering Geology*, 2019, 259: 105162.
- [39] Tang HM, Gong WP, Li CD, et al. A new framework for characterizing landslide deformation: a case study of the Yu-Kai highway landslide in Guizhou, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(6): 4291—4309.
- [40] Cai JS, Yeh TCJ, Yan EC, et al. Importance of variability in initial soil moisture and rainfalls on slope stability. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 265—278.
- [41] Cao ZJ, Wang Y, Li DQ. Site-specific characterization of soil properties using multiple measurements from different test procedures at different locations- A Bayesian sequential updating approach. *Engineering Geology*, 2016, 211: 150—161.

- [42] Cao ZJ, Zheng S, Li DQ, et al. Bayesian identification of soil stratigraphy based on soil behaviour type index. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 56(4): 570—586.
- [43] Tang XS, Li DQ, Rong G, et al. Impact of copula selection on geotechnical reliability under incomplete probability information. *Computers and Geotechnics*, 2013, 49: 264—278.
- [44] Wang MX, Tang XS, Li DQ, et al. Subset simulation for efficient slope reliability analysis involving copula-based cross-correlated random fields. *Computers and Geotechnics*, 2020, 118: 103326.
- [45] Li DQ, Xiao T, Zhang LM, et al. Stepwise covariance matrix decomposition for efficient simulation of multivariate large-scale three-dimensional random fields. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 68: 169—181.
- [46] Li DQ, Chen YF, Lu WB, et al. Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(1): 58—68.
- [47] Jiang SH, Li DQ, Zhang LM, et al. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method. *Engineering Geology*, 2014, 168: 120—128.
- [48] Li DQ, Jiang SH, Cao ZJ, et al. A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties. *Engineering Geology*, 2015, 187: 60—72.
- [49] Li DQ, Xiao T, Cao ZJ, et al. Enhancement of random finite element method in reliability analysis and risk assessment of soil slopes using Subset Simulation. *Landslides*, 2016, 13(2): 293—303.
- [50] Li DQ, Xiao T, Cao ZJ, et al. Efficient and consistent reliability analysis of soil slope stability using both limit equilibrium analysis and finite element analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(9—10): 5216—5229.
- [51] Liu Y, Zhang WG, Zhang L, et al. Probabilistic stability analyses of undrained slopes by 3D random fields and finite element methods. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(6): 1657—1664.
- [52] Liu Y, Xiao HW, Yao K, et al. Rock-soil slope stability analysis by two-phase random media and finite elements. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(6): 1649—1655.
- [53] 李典庆, 周强, 曹子君. 基于广义可靠指标相对安全率的岩土工程设计安全判据. *岩土力学*, 2019, 40(10): 3977—3986.
- [54] Du WQ, Long S, Ning CL. An algorithm for selecting spatially correlated ground motions at multiple sites under scenario earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019, doi:10.1080/13632469.2019.1688736.
- [55] Tang XS, Li DQ, Wang XG, et al. Statistical characterization of shear strength parameters of rock mass for hydropower projects in China. *Engineering Geology*, 2018, 245: 258—265.
- [56] Zhang WG, Ching JY, Goh ATC, et al. Big data and machine learning in geoscience and geoengineering: Introduction. *Geoscience Frontiers*, 2020, doi:10.1016/j.gsf.2020.05.006.
- [57] Li JH, Hu P, Uzielli M, et al. Bayesian prediction of peak resistance of a spudcan penetrating sand-over-clay. *Géotechnique*, 2018, 68(10): 905—917.
- [58] Zhang J, Hu JZ, Li X, et al. Bayesian network based machine learning for design of pile foundations. *Automation in Construction*, 2020, 118: 103295.
- [59] Zheng S, Zhu YX, Li DQ, et al. Probabilistic outlier detection for sparse multivariate geotechnical site investigation data using Bayesian learning. *Geoscience Frontiers*, 2020, doi:10.1016/j.gsf.2020.03.017.
- [60] Zhang WG, Wu CZ, Zhong HY, et al. Prediction of undrained shear strength using extreme gradient boosting and random forest based on Bayesian optimization. *Geoscience Frontiers*, 2020, doi:10.1016/j.gsf.2020.03.007.
- [61] Wang MX, Huang DR, Wang G, et al. SS-XGBoost: A machine learning framework for predicting Newmark sliding displacements of slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, 146(9): 04020074.
- [62] Liu ZQ, Guo D, Lacasse S, et al. Algorithms for intelligent prediction of landslide displacements. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2020, 21(6): 412—429.
- [63] Li JH, Li PX, Guo D, et al. Advanced prediction of tunnel boring machine performance based on big data. *Geoscience Frontiers*, 2020, doi:10.1016/j.gsf.2020.02.011.
- [64] Wang HJ, Zhang LM, Yin KS, et al. Landslide identification using machine learning. *Geoscience Frontiers*, 2020, doi:10.1016/j.gsf.2020.02.012.
- [65] Wei X, Zhang LL, Yang HQ, et al. Machine learning for pore-water pressure time-series prediction: Application of recurrent neural networks. *Geoscience Frontiers*, 2020, doi:10.1016/j.gsf.2020.04.011.
- [66] Huang FM, Zhang J, Zhou CB, et al. A deep learning algorithm using a fully connected sparse autoencoder neural network for landslide susceptibility prediction. *Landslides*, 2020, 17(1): 217—229.
- [67] Su HZ, Wen ZP, Ren J. A kernel principal component analysis-based approach for determining the spatial warning domain of dam safety. *Soft Computing*, 2020, doi:10.1007/s00500-020-04845-4.

- [68] Li DQ, Jiang SH, Cao ZJ, et al. Efficient 3-D reliability analysis of the 530 m high abutment slope at Jinping I Hydropower Station during construction. *Engineering Geology*, 2015, 195: 269—281.
- [69] Xiao T, Li DQ, Cao ZJ, et al. Three-dimensional slope reliability and risk assessment using auxiliary random finite element method. *Computers and Geotechnics*, 2016, 79: 146—158.
- [70] Pang R, Xu B, Kong XJ, et al. Seismic reliability assessment of earth-rockfill dam slopes considering strain-softening of rockfill based on generalized probability density evolution method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 107: 96—107.
- [71] Phoon KK, Retief JV, Ching JY, et al. Some observations on ISO2394: 2015 Annex D (Reliability of Geotechnical Structures). *Structural Safety*, 2016, 62: 24—33.
- [72] Cao ZJ, Gao GH, Li DQ, et al. Values of Monte Carlo samples for geotechnical reliability-based design. 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2019), Taipei, Taiwan, December 11—13, 2019.
- [73] Ali A, Huang JS, Lyamin AV, et al. Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes. *Engineering Geology*, 2014, 179: 102—116.
- [74] 李典庆, 肖特, 曹子君, 等. 基于高效随机有限元法的边坡风险评估. *岩土力学*, 2016, 37(7): 1994—2003.
- [75] 于汐, 薄景山, 唐彦东. 风险与重大岩土工程风险基本概念研究. *自然灾害学报*, 2019, 28(6): 110—118.
- [76] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南(试行). 2011.
- [77] 交通运输部安全与质量监督管理局. 高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南(试行). 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [78] 水利部办公厅. 水利部办公厅关于印发水利水电工程施工危险源辨识与风险评价导则(试行)的通知. 中华人民共和国水利部公报, 2018, 4: 32—46.
- [79] Liu Y, Hu J, Xiao H, et al. Effects of material and drilling uncertainties on artificial ground freezing of cement-admixed soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(12): 1659—1671.
- [80] 王海刚, 于同生. 考虑注浆压力不确定性对盾构施工引起地表沉降的影响. *土木工程与管理学报*, 2019, 36(4): 102—107.

## Review and Prospect of Basic Research in the Field of Reliability and Risk Mitigation in Hydraulic Geotechnical Engineering

Li Dianqing<sup>1,2\*</sup>      Tang Xiaosong<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072

2. Institute of Engineering Risk and Disaster Prevention, Wuhan University, Wuhan 430072

**Abstract** The field of reliability and risk mitigation for geotechnical structures is highly interdisciplinary, which can systematically incorporate various uncertainties involved in the design, construction and operation of geotechnical structures so as to ensure the life cycle safety of geotechnical structures. In this study, a review on the NSFC funding in the field of reliability and risk mitigation in geotechnical engineering is firstly conducted. Then, the research progress and representative achievements in this field are summarized. Finally, a total of four suggestions on the existing key scientific problems and future research highlights are presented.

**Keywords** basic research; reliability; risk mitigation; hydraulic geotechnical engineering

(责任编辑 张强)

\* Corresponding Author, Email: dianqing@whu.edu.cn