

· 科学论坛 ·

水工岩土工程灾害风险防控研究现状与展望

李典庆^{1*} 李锦辉² 张璐璐³ 唐小松¹

1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072
2. 哈尔滨工业大学(深圳) 深圳市土木工程智能结构系统重点实验室, 深圳 518055
3. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

[摘要] 水工岩土工程在其全生命周期范围内面临多种灾害和灾害链的威胁。科学认知、描述、预测、评价和控制灾害, 确保工程与人民生命财产安全, 是水工岩土工程灾害风险防控学科的主要任务。本文针对该学科的研究现状和发展战略开展了系统性研究。首先, 给出了该学科的定义和特点并归纳了其学科树的树干和分支。其次, 从学科树的8个树干出发对该学科的研究现状和存在的问题进行了总结和分析。最后, 对该学科的研究前沿与未来发展方向提出了4点建议。

[关键词] 水工岩土工程; 灾害; 风险防控; 现状与展望; 学科树

1 水工岩土工程灾害风险防控学科的内涵及特点

水工是水利水电工程的简称, 是以工程力学、水文学等为基础, 研究水利水电工程建设相关的基本理论及工程设计、施工管理方法, 研究消除水灾、科学利用水资源及水能资源的综合性学科。水工岩土工程专门研究水利水电工程建设中的岩土工程问题, 如枢纽区高陡边坡、坝基、地下洞室等的变形与稳定性问题。国家自然科学基金委员会直到2020年才正式将E0905学科命名为水工岩土工程学科(图1)。水工岩土工程灾害风险防控学科则是以岩土力学和不确定性分析方法为基础, 研究水工岩土体介质及环境作用的不确定性特征、水工岩土工程灾变规律及其风险防控理论与技术的一门学科。综合运用力学、地质学、数学、计算科学、数据科学、环境科学、决策科学等多学科理论与方法, 研究岩土体灾害及其效应, 分析评估灾害对工程设施、生命财产、环境等造成的风险, 建立水工岩土工程风险防控的科学理论和工程技术。

本学科主要面向水利水电工程等领域的勘察、设计、建造、运营、维护全生命周期中工程设施和人



李典庆 现任水资源工程与调度全国重点实验室主任, 国家杰出青年科学基金获得者, 国务院政府特殊津贴专家。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, 获国际岩土工程安全学会突出贡献奖(GEOSNet Award)、教育部自然科学奖一等奖(排名第一)、湖北省自然科学奖一等奖(排名第一)等奖励。

员安全的重大需求, 采用理论研究、数值建模与计算、试验验证、现场监测、智能数据分析等方法, 研究水工岩土体及其赋存环境的不确定性特征、水工岩土结构物的灾害响应机制及其随机性表征、水工岩土工程灾害的风险评价和控制理论与技术, 保障工程安全。本学科的特点主要有:

- (1) 研究内容的独特性。本学科的研究对象是水工岩土体灾害及其效应, 其不确定性强、隐蔽性高、时空演化规律复杂、致灾后果严重, 使得本学科的研究内容独具特点, 包括: 1) 灾害赋存环境的识别和表征, 包括地质和水文条件、岩土体工程特性、地震洪水等极端作用的不确定性规律和统计特征;
- 2) 灾害易发性与灾变机制, 包括潜在灾害的辨识、

收稿日期: 2022-12-13; 修回日期: 2023-06-08

* 通信作者, Email: dianqing@whu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(U2240211)的资助。



图1 水工岩土工程学科在国家自然科学基金项目指南中的演化过程

风险因素的不确定性传递规律、灾害(链)发生发展全过程、多种灾害间的相互影响等;3) 灾害的风险评估,包括致灾因子危险性识别、灾害与承灾体的相互作用机制分析、承灾体安全性能演化、承灾体的脆弱性分析和后果评估、风险定量分析等,其中承灾体脆弱性包括承灾体的暴露性、敏感性和易损性;4) 灾害的风险控制与风险管理,包括风险接受准则、减轻灾害风险的工程措施和非工程措施、灾害监测与预警、风险管理与决策、灾害应急处置等。

(2) 研究对象的不确定性。与钢筋、混凝土等人工材料相比,岩土体是天然材料,它具有更强的固有变异性,尤其是由地质环境演化引起的空间变异性。复杂赋存环境和有限场地勘察信息使得岩土体材料的统计不确定性更突出。岩土工程规模巨大,既涉及宏观、细观、微观等不同尺度,也涉及到岩土、水、结构等不同对象,以及连续、离散等不同介质,计算模型的不确定性更复杂。岩土工程性能受施工工艺与施工过程影响很大,人为不确定性更显著。

(3) 研究问题的复杂性。与传统的岩土力学与岩土工程研究的问题相比,岩土工程灾害风险防控不仅需要研究岩土体稳定、变形、渗流等经典科学问题,还要研究岩土体的破坏过程、破坏后的运动过程以及对承灾体的损毁过程(图2)。同时,水荷载是贯穿水工岩土工程的显著特征,如隧道涌水、雾化边坡、坝基渗流等。因此对研究理论的深度和广度提

出了更高的要求。研究问题的复杂性使得本学科需要吸收和融入力学、地质学、地理学、数学、计算科学、数据科学、人工智能等学科的最新研究成果。从应急管理学的角度,水工岩土工程灾害风险防控还需进一步涉及管理学及决策科学等人文社会科学。

(4) 灾害后果的严重性。与单体建筑物破坏引起的灾害不同,水工岩土工程灾害常以灾害链形式出现,具有典型的灾害群发效应及叠加放大效应。如暴雨或地震诱发滑坡,滑坡堵江形成堰塞坝,坝体溃决引起洪水,洪水导致下游水电站以及桥梁房屋损毁等。例如2018年10月10日金沙江白格堰塞坝的溃决影响范围达700余公里,横跨西藏、四川、云南三省(自治区、直辖市),数十万人生命财产安全遭受威胁,其灾害风险举国关注。水工岩土工程灾害发生的尺度大、影响范围广、灾害后果严重,相应的风险评估与风险控制方法难度大。



图2 水工岩土工程灾害风险防控学科研究内容

2 学科前沿与学科树

我国已成为世界水利水电工程建设的中心,许多世界水平的巨型水利工程出现在我国,这些工程建设规模巨大、地质条件复杂、失效后果严重、建设难度和高效安全运行要求已全面超过世界水平,同时对水利水电工程灾害风险防控提出了严峻的挑战。水工岩土工程学科近年来发展迅速,但是由于岩土体及其赋存环境的复杂性,并受限于目前的研究手段和技术水平,水利水电工程领域的岩土工程灾害时有发生,如大范围渗透破坏、大型滑坡、大体积塌方、大面积沉降、岩爆、突水突泥及突气等,造成重大人员伤亡和经济损失,水工岩土工程灾害风险防控学科亟需加强前瞻性的基础研究。

根据国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲

要布局,在深海、深地、深空等工程领域,面向非常规岩土体(深海土、深地岩体、太空岩土体等)在复杂环境条件下(高水压、高地应力、高地震烈度、极温、真空、低重力等)的灾害,岩土工程灾害风险防控学科将面临更大挑战。根据国家发展战略需求,结合现代科学技术进步和未来发展趋势,将本学科主要研究内容分为以下 8 个部分,具体通过学科树的形式来直观表达,包括以下 8 个树干:(1) 水工岩土工程灾害赋存环境与表征;(2) 水工岩土工程灾变机制与演化过程;(3) 灾害的易发性分析;(4) 灾害的后果分析;(5) 灾害的风险分析与风险评估;(6) 灾害的风险控制与风险管理;(7) 灾害控制决策评价与应急管理;(8) 水工岩土工程结构抗灾韧性提升。

图 3 详细列举了 8 个树干对应的分支,并依据此学科树对水工岩土工程灾害风险防控学科 8 个领

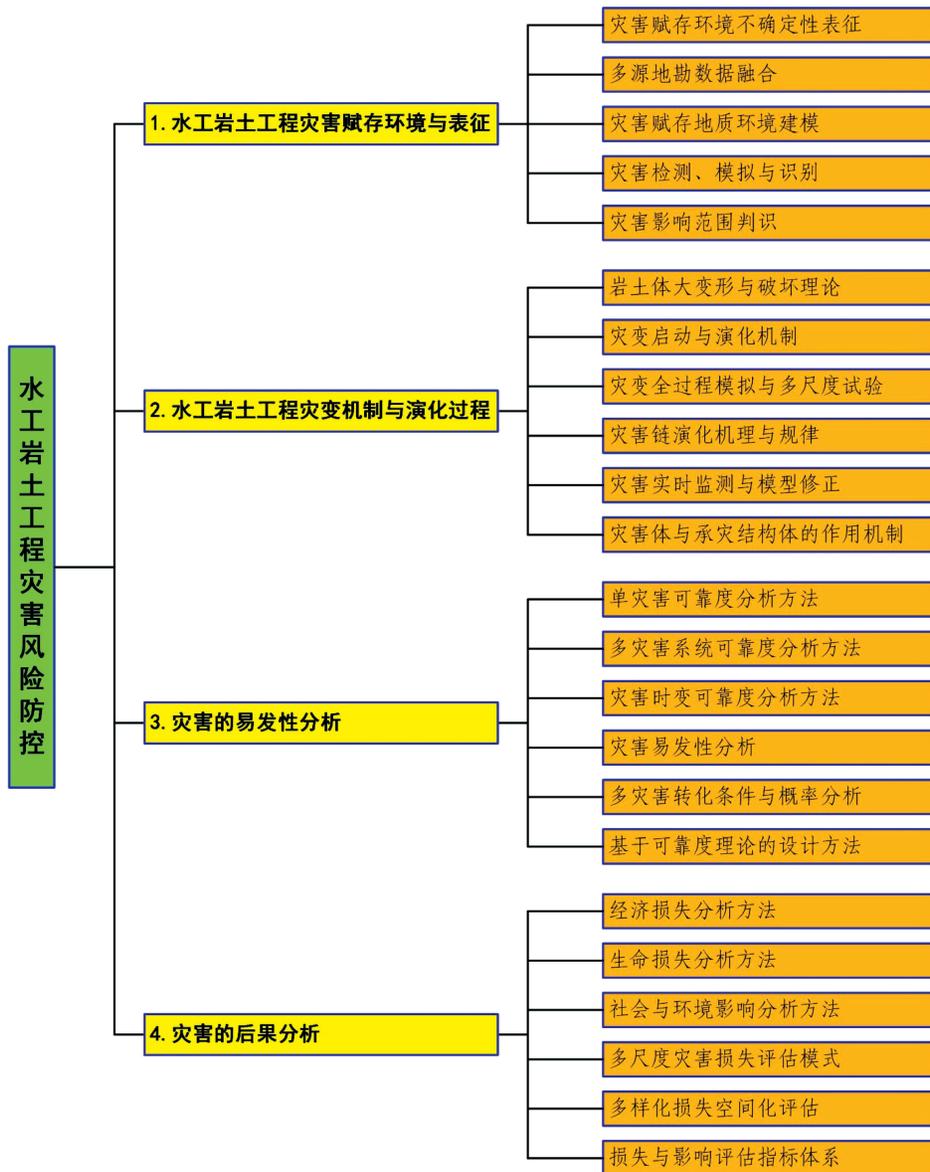


图 3 水工岩土工程灾害风险防控学科树

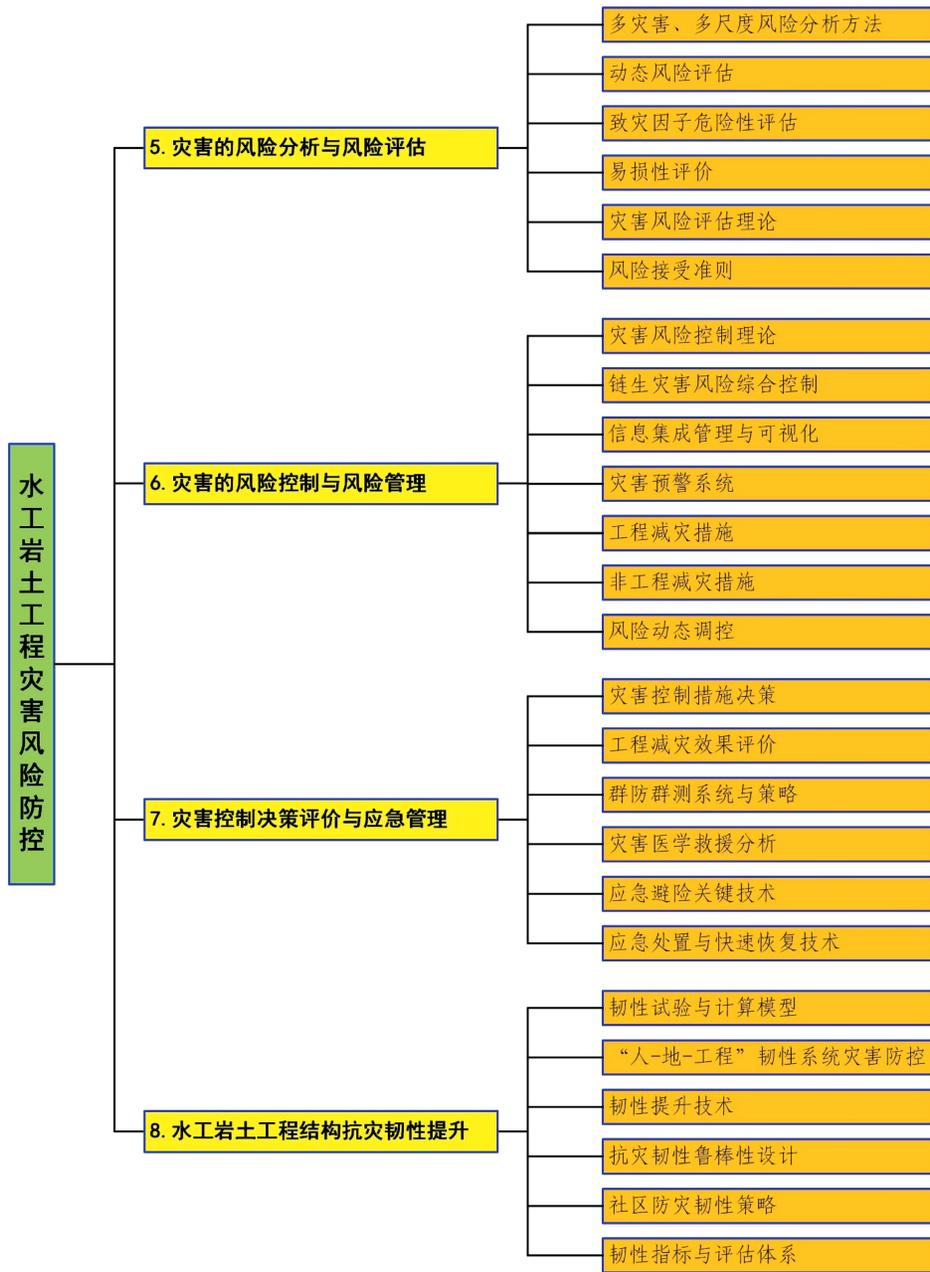


图3 水工岩土工程灾害风险防控学科树(续)

域开展了“学科发展战略研究”，提出了相关领域的优先研究方向的建议。

3 研究现状

3.1 水工岩土工程灾害赋存环境与表征

对灾害赋存环境进行准确识别和表征是水工岩土工程灾害风险评估与防控的重要前提。由于地质环境的隐蔽性、地质构造和岩性特征的复杂性以及“三高三强”(高地应力、高地温、高水压、强扰动、强时效和强流变)的环境特殊性,水工岩土工程灾害赋存环境的识别和表征涉及多种不确定性,主要包括:因地层界面分界不清和岩土体不均匀性引起的地层

不确定性、风化搬运沉积等荷载历史作用引起的岩土体参数的固有空间变异性^[1, 2]、采用经验公式估计参数和计算时采用的简化力学模型等引入的模型不确定性^[3, 4]、有限的现场和室内试验数据带来的统计不确定性^[5]、设计施工缺陷和不当管理引起的管理不确定性等^[6]。

目前,在灾害赋存环境的识别方面,受工程勘察测试技术、分析手段及经济成本等条件限制,复杂地质赋存环境的识别的难度仍然较大;虽然现代化监测设备可以获得海量监测数据,但尚缺少有效的赋存环境识别分析模型。在灾害赋存环境的表征方面,以随机变量和随机场模型、地质统计学理论、大

数据技术和贝叶斯理论等为基础的水工岩土工程赋存环境不确定性表征方法快速发展,在岩土体参数的固有空间变异性、地层不确定性、模型不确定性和统计不确定性表征方面都取得了新的进展^[4, 6, 7],其中代表性的有:基于 Copula 函数、分层贝叶斯模型和多维相关性等理论形成了一系列的多变量联合概率分布函数建模方法,有效地量化了材料参数的互相关性^[8]。提出了马尔可夫随机场模型和耦合马尔可夫链模型等方法,有效地表征了岩土地层不确定性、Bootstrap 和压缩感知等统计方法为岩土体参数统计不确定性量化提供了新的手段^[2]。以贝叶斯理论为主流的模型不确定性表征方法合理地解决了参数估计的转换模型不确定性表征问题^[9]。

灾害赋存环境以灾害所发生的地质、水文环境为主体,该环境所承受的地震、降雨、库水位波动、洪水、台风、波浪、海流冲刷和开挖扰动等外荷载作用也存在显著的不确定性^[10]。传统的水工岩土工程灾害风险评估研究仅考虑了静态、单一的不确定性荷载条件,动态、复杂荷载的不确定性近年来逐渐受到关注,概率与统计学、随机过程和机器学习等的发展为表征复杂外荷载的不确定性奠定了坚实的基础,但关于灾害链的复杂外荷载作用的不确定性量化表征研究尚处于起步阶段。

3.2 水工岩土工程灾变机制与演化过程

对岩土工程灾变机制与演化过程的科学认识是水工岩土工程灾害风险评估与防控的核心。对于不同的研究对象,其理论研究都取得了较为丰富的成果。在土石坝和堤防方面,渗透破坏形式及其临界水力条件的判别等方面成果丰富,提出了一系列溃决过程预测的参数和物理模型^[11],并对崩岸进行了系统研究,分析了其形成过程以及影响因素^[12]。在边坡工程方面,研究集中于库岸边坡的失稳破坏机制和稳定性评价方法^[13],获得了不同类型滑坡体在库水位变化期间稳定性变化规律。在水工隧洞方面,提出了隧洞围岩失稳突水的判别准则和隧道突涌水安全厚度计算方法^[14, 15],揭示了深部硬岩隧洞开挖诱发压致拉裂的破坏机制^[16, 17]。在地下空间与地下结构方面,软弱土结构性与施工扰动问题已得到了充分关注,地下结构的地震诱发动力灾变机理取得了一定进展^[18]。在港口码头方面,现有研究集中在码头结构抗震灾害,研究了土体液化对码头结构抗震的影响^[19]。在海岸防波堤方面,研究集中在物理荷载、化学腐蚀和生物作用下的灾变机理,并逐渐关注到多因素耦合作用和灾变演化过程^[20]。

在数值模拟方法方面,分析方法逐步从传统连续介质分析方法发展到非连续分析方法^[21, 22],研究内容从单一因素诱发的灾害演变过程扩展到多场环境相互作用下的破坏过程^[23]。在试验方法方面,岩土体破裂演化过程的可视化观测试验技术取得了初步进展,例如,钻孔摄像被应用于岩石工程松动圈破裂观测和地质勘探等^[24],微震监测也逐步应用到了地下工程安全监测^[25]。在物理模型试验方面,通过相似模型试验系统研究了多因素耦合作用下岩土体的变形破坏规律^[26],加深了对致灾机理和灾变演化过程的认知,为水工岩土工程灾害控制提供了一定的理论依据。随着研究手段、测试技术和分析方法的快速发展,传统的基于灾变状态的研究内容逐步扩展到灾害孕育演化过程研究,目前对于复杂赋存环境、多致灾因素耦合作用下水工岩土工程结构灾变机制及全过程演化规律有待进一步研究。

3.3 灾害的易发性分析

易发性分析通过分析历史灾害事件与地形地质环境等条件的关系对未来灾害事件的发生进行预测,其基本研究方法包括:基于知识(Knowledge-based)、基于物理(Physics-based)和基于数据(Data-driven)的方法^[27]。在水工岩土工程中,灾害易发性分析主要针对水工岩土构筑物建设和运维过程中可能出现的灾害类型、等级、乃至发生位置和破坏程度等进行分析和预测,从而制定合理的灾害防治策略^[28]。

现有的易发性研究以区域性地质灾害(滑坡为主)易发性评价的成果最为丰富,其研究重点集中在评价因子、评价单元以及评价模型/方法三方面,其中评价模型/方法为核心^[29]。在地理信息系统、遥感等技术的支撑下,易发性分析逐渐由定性分析发展到半定量和定量评价,以机器学习方法为代表的基于数据驱动的方法正成为该领域的重要研究方向^[30]。单体边坡工程灾害的易发性评价一般以灾害机理为基础,采用基于物理的确定性分析方法或可靠度分析方法得到相应的易发性评价指标。与单体边坡工程类似,在地下洞室和隧洞工程易发性分析方面,现有研究主要针对单个地下洞室或隧洞^[31]。由于水利水电工程的地下洞室和隧洞的灾害易发性与具体工程的地质条件、灾害类型及孕灾环境密切相关,现有的灾害易发性研究受到地下工程灾变机理复杂性的限制,主要采用与灾害机理相关的各类经验指标或理论判据进行易发性的估测与

判定,以定性分析方法为主,定量分析方法正在发展中,特别是硬岩脆性破坏和软岩大变形易发性评价方面仍需开展系统研究^[32]。现场监测是地下洞室和隧洞工程灾害易发性评估的重要手段,主要是采用微重力法、电磁辐射法、声发射法、电阻法及微震监测等技术手段获取特定物理量的变化,通过监测信息与岩体状态及灾害孕育演化过程的联系,将其作为灾害发生的前兆信息开展灾害易发性预测,但目前这方面的工作仍以单一物理量为主,基于多信息融合的灾害易发性分析方法才刚刚起步^[33]。

3.4 灾害的后果分析

水工岩土工程风险与灾害发生的概率和灾害的后果密切相关^[34, 35]。在灾害后果分析中,易损性分析衡量灾害强度与承灾体的损伤程度之间的关系,是灾害后果分析的关键内容之一。早期易损性分析多采用专家经验判断法进行,该方法简便,但主观性强,对专家经验依赖性强,导致不同专家可能提供截然不同的评定结果^[36]。为了弥补专家经验法的不足,基于历史灾害数据的统计分析法在易损性分析中逐渐获得了重视^[37]。但这一类方法对历史灾害数据具有很强的依赖性,为确保易损性分析结果的有效性,往往需要投入大量资源来获取真实可靠的数据,从而建立可靠的易损性数据库。即便如此,所建立的数据库可能仍具有明显的区域性,因而对于缺乏高质量灾害数据的水工岩土工程灾害问题,这一方法很难直接应用。为了克服获得可靠数据的困难,一些学者通过开展模型试验和数值分析,研究基于模型试验和数值分析的易损性函数建立方法^[38, 39]。与模型试验相比,数值分析方法在成本上更具优势。此外,由于易损性分析所关注的岩土体失稳后的物理过程具有明显的大变形特征,近年来一些学者已开始将大变形数值分析引入到水工岩土工程灾害的易损性分析研究^[40-42]。

水工岩土工程灾害时空分布范围广,影响巨大,其后果主要包括人员伤亡、经济损失、环境后果、社会后果、政治后果等多个维度^[43-45]。但现有研究主要聚焦于人员伤亡和直接经济损失。例如,通过研究溃坝洪水演进过程,分析溃坝灾害引发的人员伤亡和受灾区域的直接经济损失^[46];通过滑坡的滑动距离分析,对其引发的人员伤亡后果进行评估^[47]。近年来,水工岩土工程灾害引发的间接损失也逐渐引起学界重视,一些学者研究了岩土地质灾害对生命线工程扰动、进而对国民经济系统产生扰动、引发间接经济损失的过程^[48],但该类研究还非常少见。

总体来说,灾害后果分析研究相对滞后,导致水工岩土工程灾害的风险研究成果还不足以支撑实际工程灾害风险评估的需求。

3.5 灾害的风险分析与风险评估

风险分析与风险评估是水工岩土工程灾害风险防控的核心内容。现有研究主要将单一灾害作为研究对象。对于发生物理过程清晰、力学模型较为完善的灾害(如滑坡、泥石流),已建立了相应的定量风险分析与评估方法,形成了一系列风险评估标准、规范及导则^[35, 49-53];对于破坏机理复杂、破坏过程很难用力学模型准确描述的灾害(如隧道突水突泥、岩爆、大坝大面积渗透等),主要采用半定量风险分析方法^[54-56]。对不同研究对象,其研究的重点和深度也有着较大的差别。例如在土石坝方面,研究集中在溃坝模式识别、概率计算、损失分析以及风险标准制定等方面,对于重点工程,建设管理模式逐渐向风险管理转变^[57-59]。在边坡方面,主要集中在边坡失效概率计算方法和风险分析与评估方法,基于风险评估结果进行边坡工程安全控制方面也有部分成果发表。考虑现场监测可有效减小不确定性,基于监测数据的动态风险分析与评估逐步得到重视^[60-63],以基于贝叶斯原理的风险动态更新方法的发展相对成熟^[64]。在水工隧洞、地下洞室、堤防、港口码头方面,当前研究以风险评估框架和定性/半定量风险评估为主^[65, 66],成果主要为力学机制研究基础上的岩土结构物可靠度分析以及施工风险等级划分^[7];在防波堤方面,风险评估研究相对滞后,主要聚焦于灾害后果分析^[67]。

除单体工程灾害外,水工岩土工程灾害也可以群发型、复合型、灾害链的形式发生在一定区域内。在群发型灾害方面,学者也开展了一系列探索,其中以降雨诱发浅层滑坡和地震作用下滑坡风险评估的研究最为成熟;在复合型灾害方面,降雨引发山区泥石流及洪涝灾害已取得一定进展;在灾害链方面,溃坝引发洪水、滑坡引发涌浪等成果较为丰富,其它形式的灾害链研究较少。总体而言,水工岩土工程区域群发型、复合型、灾害链等方面的研究尚处于起步阶段。

3.6 灾害的风险控制与风险管理

风险控制与风险管理是在风险分析与评估的基础上,采用工程或非工程措施降低生命、经济损失和社会环境影响的行为。从整体上来看,工程风险控制与管理经历了所依据的性能指标从安全系数到可靠指标和风险再到可恢复性,方法上从定性/半定量

到量的发展历程^[62]。早期一般通过提高安全系数来规避和降低风险,达到风险控制的目的。基于可靠度指标的风险控制与管理能够定量地考虑不确定性^[68],基于定量风险指标的风险控制与管理则进一步地考虑了灾害后果和损失^[7],可系统地实现工程措施和方案的优选。近年来,随着巨灾频发,人们更关注工程的鲁棒性和可恢复性,基于可恢复性的风险控制与管理逐渐成为研究热点^[69]。在效益评价方面,以往一般基于案例研究、统计数据或经验公式对工程措施进行效益评价,近年来易损性试验技术也开始起步。非工程措施主要包括政策、制度、法律、宣传、保险、预警等软措施,大多难以定量评价效果,在实际工程中一般以专家意见、规范条文的方式管理。

不同研究对象所关注的热点存在一定差异。其中,土石坝风险控制与管理的重点是病险坝诊断与加固技术,近年来流域范围内梯级水电站系统风险防控问题得到重视。在边坡方面,单体边坡的风险控制与管理研究相对成熟,并逐渐进入全生命周期动态风险监控与可恢复性防治阶段。随着西南地区梯级水电站大规模建设,区域性地质灾害特别是灾害链问题对水工岩土工程风险控制和管理提出了新挑战,但目前这方面研究极为欠缺。在隧洞、地下空间与地下结构方面,工程各阶段已有一些风险控制与管理的规范和标准,但未考虑全过程的风险传递与系统管控。此外,深埋长隧道的高温、高地应力、高地震烈度等三高风险控制技术还存在严重不足。在堤防、港口码头,有关岸坡防护、地基加固、结构检测与修复等方面已取得了丰硕的成果,但工程材料长期性能演化和极端荷载仍是挑战。总体而言,当前研究主要针对常规灾害,还需要在极端灾害风险防控、全生命周期安全性能保障和智能风险控制领域开展深入研究。

3.7 灾害控制决策评价与应急管理

水工岩土工程灾害控制的决策是指根据预期效果、潜在问题和影响来规划、制定和实施减灾措施,评价指对实施效果的客观分析和评估,应急管理则主要包括应急预案编制、应急处置、恢复重建等内容。当前研究大多以单一灾种、单个工程为对象,主要依赖工程经验进行决策,基本不涉及系统的决策评价理论和方法;应急管理方面主要集中在应急预案的制定,以定性为主、定量为辅,且不同工程间差异显著。重大工程的应急预案通常包括定量决策,可操作性强,而中小工程的应急预案则多为文字性

的描述,在实际工程中作用有限。其中,在边坡方面,国内外研究集中在工程减灾措施的比选及优化,一般以安全系数、抗滑力增加量、变形等指标对实施效果进行评价^[70, 71];在堤坝方面,基于故障树的决策模型较为成熟,基于监测数据和风险评估的决策方法开始起步^[72-77]。边坡和堤坝的应急管理研究较为成熟,制定了一系列应急预案指导性文件和标准,规定了应急处置思路、原则和主要工程措施^[51, 52]。在地下工程方面,现有研究一般针对施工期,通过超前探测和预报^[76],结合引排水和注浆等具体工程措施来控制灾害^[77],应急管理研究主要为针对涌水、地震灾害的应急疏散流程,决策理论和方法方面的成果较少,缺乏定量的效果评估指标体系,实施效果评价几乎空白。

总体而言,灾害控制决策评价理论与方法发展缓慢,应急管理理论研究与实践相结合的程度也亟待提高,应充分借鉴其它学科相关成果,加快发展水工岩土工程灾害控制决策理论和应急管理技术。

3.8 水工岩土工程结构抗灾韧性提升

根据联合国《2015—2030 年仙台减轻灾害风险框架》,韧性工程强调工程抵御、吸收、适应灾害影响和灾后复原的能力^[78, 79]。建设韧性工程,使之在灾害冲击作用下损失小、适应能力强、恢复时间短,是减灾的最终目标。当前,防灾减灾工作模式逐渐向韧性发展方向转型,相关的工作集中在建筑结构抗震韧性方面,主要包括单体结构抗震韧性的功能评估理论研究,可恢复功能结构等韧性提升技术也有一些成果^[80, 81],形成了美国 FEMA-P58 设计标准^[82]、英国的建筑抗震韧性指数评估体系 REDi^[83]和我国《建筑抗震韧性评价标准》^[84]。在水工岩土工程领域,与韧性有关研究几乎为空白,主要为边坡工程的鲁棒性分析和评价研究,也有零星的工程适应性和可恢复性方面的研究,包括:提高地下结构的抗震适应性的耗能元件、提升地震可恢复性的隧道管片记忆合金、码头水工结构物的减隔震韧性提升方法等^[85, 86]。因此,迫切需要研究水工岩土工程韧性评估理论,形成各类研究对象和不同灾种对应的韧性标准,研发可恢复功能结构新体系及设计理论,以满足国家可持续发展的战略需求。

4 存在的问题

尽管水工岩土工程灾害风险防控学科在上述 8 个方面取得了一些可喜的进展,但是在灾害监测预

警、演化机理、数值模拟、风险评估、控制决策、标准规范等方面仍存在诸多不足,下面分述如下:

(1) 缺乏广域水工岩土工程勘探、监测技术以及数据共享机制。目前地质调查手段较为单一,主要依赖常规的“点”监测技术,亟需发展复杂地质环境的精细探测、多元监测感知技术、空天地一体“面”技术。同时,缺乏有效的信息共享机制,比如水工岩土工程数据和案例收集、存储和共享的标准规范和平台,不仅使得灾害数据库构建困难,也使得已建的数据库存在信息不完备、指标体系和数据标准不统一等问题。

(2) 复杂地质环境下水工岩土体变形破坏演化规律尚不清晰。强扰动下岩土体变形破坏的宏细观力学行为和演化规律、岩土体力学行为与灾变触发机制的关系、水—土和水—岩相互作用、岩土体—结构动力相互作用尚未明确;水力作用、地震作用、灾害源动力冲击及施工扰动等的相互作用和联合影响不清晰;缺少岩土体多场、多相、多尺度赋存环境的识别理论和表征方法,岩土体变形破坏演化与孕灾环境特征的关系不清楚,导致难以有效地解释特殊灾变现象,灾变状态判据也难以建立。

(3) 水工岩土工程灾害易发性指标体系还处于起步阶段,评价方法有待进一步发展。水工岩土工程灾害发生和监测数据的统计特征难以明确,灾害等级与灾害发生概率间的对应关系难以建立,灾害易发性指标体系不尽客观和科学;灾害易发性模型的表现优劣和有效性受研究区域、数据样本、评估指标和方法等影响,缺乏兼顾效率和精度平衡的评价策略;考虑多致灾因素耦合作用、灾害动态演化和灾害链的易发性评价研究不足^[87]。

(4) 全生命周期的动态风险评估和实时预警技术还不成熟。目前缺少直接有效的方法量化管理不确定性因素,导致灾害风险分析与工程实际应用脱节;施工前的灾害易发性预测、施工期间的风险评估、现场监测和风险管控的联动体系尚未建立,风险动态评价和实时预警技术仍需研究。

(5) 现有数值模拟技术无法满足工程需求。现有数值模拟方法存在计算量大、计算稳定性和收敛性等问题,在水工岩土工程灾变机制和演化过程、灾害易发性分析和后果评价研究中需应对灾变演化、相场耦合、岩土体与结构相互作用、复杂灾害场景、概率与不确定性建模等挑战,难以高效和及时地提供定量风险评估结果,无法满足工程实际需求,亟需研发巨灾模拟器。

(6) 水工岩土工程灾害风险评价指标不统一、不全面。现有研究对同一工程对象不同灾害类型的风险评价指标难以统一,后果评价主要集中在直接损失上,灾害引发的间接经济损失、环境后果、社会后果、政治后果等可能远超其直接经济损失,不考虑间接损失将严重低估水工岩土工程灾害的总体风险。

(7) 风险控制决策以定性分析为主,缺乏定量方法。当前水工岩土工程灾害风险控制决策与应急处置仍基本停留在定性层面,主要依赖专家或技术人员的经验,将定性分析结果凭经验进行分类,然后运用层次分析法或模糊综合评判等方法将定性结果半定量化,与灾害内在机制机理脱节,也不能有效考虑实时监测信息的影响,总体来说缺乏科学有效的定量决策理论与方法。

(8) 侧重单一灾害的风险,忽视了复合型灾害风险。目前研究大多以单个工程或单一类型灾害为研究对象,忽略了灾害的群发效应和叠加效应及链生机制。随着水利工程往超常规体量和复杂化方向发展,如何针对流域水工程系统的复合型灾害和灾害链进行风险评估决策与应急处置尚未得到足够重视。

(9) 传统水工岩土结构设计方法注重安全性,对韧性考虑不足。近年来,可恢复性控制理论与韧性技术已率先应用于地上结构抗震韧性控制等方面,适用于水工岩土工程的韧性提升理论与技术有待进一步研究。

(10) 理论研究与工程实践联系不紧密,相关规范和标准缺失。目前提出的理论、方法和模型主要出现在期刊、专著等学术刊物,适用于工程实践的系统理论方法与软件较为缺乏,最新研究成果未纳入相关规范与标准,缺乏水工岩土工程灾害风险控制与管理、决策与应急的相关规范标准。

5 研究前沿与未来发展方向

围绕国家重大水利水电工程建设呈现的新趋势,水工岩土工程灾害风险防控领域研究前沿和未来发展方向如下:

(1) 复杂孕灾环境的探测、表征与可视化

水工岩土工程灾害风险评估和控制领域的发展长期受限于复杂的孕灾环境,灾害赋存环境识别与表征是灾害风险评估和控制的基础。当前工程地质调查手段较为单一,主要依赖常规的“点”监测技术,亟需发展复杂地质环境的精细探测、多元监测感知

技术、空—天—地一体化的“面”技术。同时,缺乏有效的信息共享机制,未形成数据和案例收集、存储和共享的标准规范和合作平台,造成灾害数据库构建困难,已建的数据库信息不完备、指标体系和数据标准不统一等问题。可视化技术目前主要集中于三维地质建模、虚拟现实和增强现实等技术在地质领域及采矿领域的应用,如何发展和应用可视化技术解决水工岩土工程中的隐蔽灾害问题需要进一步研究。因此,亟需研发新型高保真取样技术和综合勘探技术,发展赋存环境表征理论、方法和可视化技术,提出灾害赋存环境适应性评价方法,研究灾害链的赋存环境早期识别技术,为灾害风险评估与决策提供科学依据。

(2) 基于人工智能的灾害风险评价和智能诊断方法

当前复杂地质环境下的水工岩土体变形破坏演化规律尚不清晰,特别是在强扰动下岩土体变形破坏的宏细观力学行为和演化规律,水力作用、地震作用、灾害源动力冲击及施工扰动等的联合影响,岩土体变形破坏演化与孕灾环境特征的关系等方面还存在严重不足,导致灾变状态判据难以建立。同时受现有数值模拟技术的限制,难以高效及时给出易发性和风险评估结果,无法满足实际需求。因此,发展基于机器学习和大数据的风险智能分析技术,针对监测数据的多维度、多尺度和多类别的特性研发风险智能识别和预警装备,实现工程病害的智能诊断和风险智能预测和控制成为当前的迫切需要。同时,应构建多源异质数据的灾害与应急预案数据库,进行灾害事件情景推演,根据突发事件与历史案例的匹配程度,评估应急响应方案的适用性,并快速生成有效的应急响应计划,指导应急管理与应急处置。

(3) 流域范围复合型灾害的链生机制与风险评估决策

现有研究大多以单个工程或单一类型灾害为研究对象,忽略了灾害的群发效应和叠加效应及链生机制。随着水利工程往超常规体量和复杂化方向发展,如何针对流域范围的不同类型承灾体,从单个结构走向整个工程,再从整个工程走向流域水工程系统,针对复合型灾害和灾害链开展风险评估决策与应急处置是当前的重大挑战。为此,应考虑极端气象事件下灾害链式作用的影响,发展复合型灾害的系统风险评估决策理论与方法,揭示复合型灾害的链生机制、传递过程、风险叠加放大效应,建立水工

程系统灾害风险管理体系。

(4) 水工岩土结构物韧性提升理论与技术

传统水工岩土结构设计方法注重安全性,灾害防治理念尚处于被动设计阶段,普遍存在重灾害预测轻灾害适应、重安全评估轻灾后恢复的问题,极端工况条件下可导致灾后恢复困难、工程被迫重建的结果。因此,亟需开展适用于水工岩土工程的韧性提升理论与技术研究,考虑灾前一灾中一灾后水工岩土结构物韧性防灾能力,提出水工岩土结构物韧性分析方法和评估模型,建立水工岩土结构整体性韧性评价与分级标准,提出水工岩土结构物韧性实时监测指标体系和评价准则,发展水工岩土结构物全寿命周期韧性提升技术。

致谢 本文得到中国科学院武汉岩土力学研究所潘鹏志教授、重庆大学仇文岗教授、天津大学周海祚教授、同济大学张洁教授、彭铭教授、中国地质大学(武汉)龚文平教授、南昌大学蒋水华教授的帮助,特此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Li J, Cassidy MJ, Huang J, et al. Probabilistic identification of soil stratification. *Geotechnique*, 2016, 66(1): 16—26.
- [2] Li Z, Wang XR, Wang H, et al. Quantifying stratigraphic uncertainties by stochastic simulation techniques based on Markov random field. *Engineering Geology*, 2016, 201: 106—122.
- [3] Phoon KK, Kulhawy FH. Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(4): 612—624.
- [4] 李典庆, 蒋水华. 边坡可靠度非侵入式随机分析方法. 北京: 科学出版社, 2016.
- [5] Ching J, Phoon KK, Wu TJ. Spatial correlation for transformation uncertainty and its applications. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2016, 10(4): 294—311.
- [6] Phoon KK, Retief JV, Ching J, et al. Some observations on ISO2394: 2015 annex D (reliability of geotechnical structures). *Structural Safety*, 2016, 62: 24—33.
- [7] 李典庆, 唐小松. 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. *中国科学基金*, 2021, 35(3): 440—450.
- [8] 李典庆, 唐小松, 周创兵, 等. 基于 Copula 函数的并联结构系统可靠度分析. *工程力学*, 2014, 31(8): 32—40.
- [9] Baecher GB, Christian JT. *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. New York: Wiley, 2003.

- [10] Tang GP, Huang JS, Sheng DC, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under random rainfall patterns. *Engineering Geology*, 2018, 245: 322—332.
- [11] Yin YZ, Cui YF, Tang Y, et al. Solid-fluid sequentially coupled simulation of internal erosion of soils due to seepage. *Granular Matter*, 2021, 23(2): 20.
- [12] Chang DS, Zhang LM. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(9): 1454—1467.
- [13] 刘新荣, 景瑞, 缪露莉, 等. 巫山段消落带岸坡库岸再造模式及典型案例分析. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(7): 1321—1332.
- [14] 李利平, 李术才, 石少帅, 等. 岩体突水通道形成过程中应力—渗流—损伤多场耦合机制. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(2): 232—238.
- [15] 李利平, 李术才, 石少帅, 等. 基于应力—渗流—损伤耦合效应的断层活化突水机制研究. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S1): 3295—3304.
- [16] Feng XT, Kong R, Yang CX, et al. A three-dimensional failure criterion for hard rocks under true triaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(1): 103—111.
- [17] Gao YH, Feng XT, Zhang XW, et al. Characteristic stress levels and brittle fracturing of hard rocks subjected to true triaxial compression with low minimum principal stress. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(12): 3681—3697.
- [18] 崔臻, 盛谦, 冷先伦, 等. 大型地下洞室群地震动力灾变研究综述. *防灾减灾工程学报*, 2013, 33(5): 606—616.
- [19] Souri M, Khosravifar A, Dickenson S, et al. Effects of long duration earthquakes on the interaction of inertial and liquefaction-induced kinematic demands on pile-supported wharves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 154: 107155.
- [20] Pillai K, Etemad-Shahidi A, Lemckert C. Wave overtopping at berm breakwaters: review and sensitivity analysis of prediction models. *Coastal Engineering*, 2017, 120: 1—21.
- [21] 张国新, 李海枫, 黄涛. 三维不连续变形分析理论及其在岩质边坡工程中的应用. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 2116—2126.
- [22] Pan PZ, Yan F, Feng XT, et al. Modeling of an excavation-induced rock fracturing process from continuity to discontinuity. *Engineering Analysis With Boundary Elements*, 2019, 106: 286—299.
- [23] Feng XT, Pan PZ, Wang ZF, et al. Development of Cellular Automata Software for Engineering Rockmass Fracturing Processes// Barla M, Di Donna A, Sterpi D. *International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Cham: Springer, 2021: 62—74.
- [24] 秦英译, 王川婴. 前视井下电视和数字钻孔摄像在工程中的应用. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S1): 2834—2840.
- [25] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 275—283.
- [26] 张艳博, 刘祥鑫, 梁正召, 等. 基于多物理场参数变化的花岗岩巷道岩爆前兆模拟实验研究. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1347—1357.
- [27] Zhou XZ, Wen HJ, Zhang YL, et al. Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(5): 101211.
- [28] Wang HJ, Zhang LM, Yin KS, et al. Landslide identification using machine learning. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(1): 351—364.
- [29] 胡凯衡, 崔鹏, 韩用顺, 等. 基于聚类和最大似然法的汶川灾区泥石流滑坡易发性评价. *中国水土保持科学*, 2012, 10(1): 12—18.
- [30] Carrara A, Crosta G, Frattini P. Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, 2008, 94(3/4): 353—378.
- [31] Moayedi H, Mehrabi M, Mosallanezhad M, et al. Modification of landslide susceptibility mapping using optimized PSO-ANN technique. *Engineering With Computers*, 2019, 35(3): 967—984.
- [32] 邱士利, 冯夏庭, 江权, 等. 深埋隧洞应变型岩爆倾向性评估的新数值指标研究. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(10): 2007—2017.
- [33] 李术才, 徐飞, 李利平, 等. 隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1366—1376.
- [34] Zhang LL, Li JH, Li X, et al. *Rainfall-induced soil slope failure: stability analysis and probabilistic assessment*. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [35] 王涛, 吴树仁, 石菊松. 国际滑坡风险评估与管理指南研究综述. *地质通报*, 2009, 28(8): 1006—1019.
- [36] Marvi MT. A review of flood damage analysis for a building structure and contents. *Natural Hazards*, 2020, 102(3): 967—995.
- [37] Reese S, Bradley BA, Bind J, et al. Empirical building fragilities from observed damage in the 2009 South Pacific tsunami. *Earth-Science Reviews*, 2011, 107(1/2): 156—173.
- [38] Lind N, Hartford D, Assaf H. Hydrodynamic models of human stability in a flood. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(1): 89—96.
- [39] Douglas J. Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7(2): 283—288.

- [40] Liu X, Wang Y, Li DQ. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111: 301—312.
- [41] Yerro A, Soga K, Bray J. Runout evaluation of Oso landslide with the material point method. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(9): 1304—1317.
- [42] Chen YM, Zhang LL, Wei X, et al. Debris-flow-induced damage assessment for a submarine pipeline network in regional-scale natural terrain. *Engineering Geology*, 2022, 311: 106917.
- [43] 殷坤龙, 张桂荣, 陈丽霞. 滑坡灾害风险分析. 北京: 科学出版社, 2010.
- [44] 黄崇福. 自然灾害风险评价: 理论与实践. 北京: 科学出版社, 2005.
- [45] Dai FC, Lee CF, Ngai YY. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 2002, 64(1): 65—87.
- [46] Peng M, Zhang LM. Analysis of human risks due to dam-break floods—part 1: a new model based on Bayesian networks. *Natural Hazards*, 2012, 64(1): 903—933.
- [47] Lu M, Zhang J, Zhang LL, et al. Assessing the annual risk of vehicles being hit by a rainfall-induced landslide: a case study on Kennedy Road in Wan Chai, Hong Kong. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2020, 20(6): 1833—1846.
- [48] Zhang J, Lu M, Zhang LL, et al. Assessing indirect economic losses of landslides along highways. *Natural Hazards*, 2021, 106(3): 2775—2796.
- [49] Corominas J, Westen C, Frattini P, et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73(2): 209—263.
- [50] Fell R, Hartford D. Landslide risk management// Cruden D, Fell R. *Landslide Risk Assessment*. Rotterdam: Balkema, 1997, 51—109.
- [51] 中华人民共和国水利部. SL/Z 720-2015 水库大坝安全管理应急预案编制导则. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [52] 中国电力企业联合会. T/CEC 179-2018 大中型水电站地质灾害预警及应急管理技术规范. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [53] 中国地质灾害防治工程行业协会. T/CAGHP 023-2018 突发地质灾害应急监测预警技术指南. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- [54] 赵国飞, 江政儒, 丁勇, 等. 防洪堤失事风险分析及风险评估研究. *中国水运(下半月)*, 2010, 10(11): 182—184.
- [55] 顾冲时, 苏怀智, 刘何雅. 大坝服役风险分析与管理研究述评. *水利学报*, 2018, 49(1): 26—35.
- [56] 李术才, 许振浩, 杜毓超. 隧道突水突泥致灾系统与孕灾评判. 北京: 科学出版社, 2019.
- [57] Walker B, Davies W, Wilson G. Practice note guidelines for landslide risk management. *Australian Geomechanics*, 2007, 42(1): 64—109.
- [58] Degen Eskesen S, Tengborg P, Kampmann J, et al. Guidelines for tunnelling risk management; international tunnelling association, working group No. 2. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(3): 217—237.
- [59] Peng M, Zhang LM. Dynamic decision making for dam-break emergency management—Part 1: theoretical framework. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(2): 425—437.
- [60] 黄润秋, 许强, 汤明高, 等. 脉诊山体隐疾—大型滑坡的天—空—地—内多源立体观(探)测、识别与预警. *科技纵横*, 2017(3): 60—62.
- [61] 李术才, 李利平, 石少帅. 隧道突涌水监测方法与预警技术. 上海: 上海科学技术出版社, 2019.
- [62] 唐亚明, 张茂省, 薛强, 等. 滑坡监测预警国内外研究现状及评述. *地质论评*, 2012, 58(3): 533—541.
- [63] 殷跃平, 吴树仁. 滑坡监测预警与应急防治技术研究. 北京: 科学出版社, 2012.
- [64] Zhang LM, Xu Y, Jia JS, et al. Diagnosis of embankment dam distresses using Bayesian networks. Part I. Global-level characteristics based on a dam distress database. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(11): 1630—1644.
- [65] 徐卫亚, 邢万波, 魏文白, 等. 堤防失事风险分析和风险管理研究. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 47—55.
- [66] Lyapichev YP. Methods of analysis and risk assessment of accidents of hydraulic structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2019, 15(4): 327—336.
- [67] Wang LP, Huang GL, Chen ZS, et al. Risk analysis and assessment of overtopping concerning sea dikes in the case of storm surge. *China Ocean Engineering*, 2014, 28(4): 479—487.
- [68] 周创兵, 李典庆. 暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展. *地球科学进展*, 2009, 24(5): 477—487.
- [69] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性. *工程力学*, 2019, 36(6): 1—12.
- [70] Liu ZQ, Guo D, Lacasse S, et al. Algorithms for intelligent prediction of landslide displacements. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2020, 21(6): 412—429.
- [71] 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.
- [72] 范天印, 汪小刚. 土石坝险情特征与应急处置. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [73] 许强, 汤明高, 黄润秋. 大型滑坡监测预警与应急处置(第二版). 北京: 科学出版社, 2020.
- [74] 殷跃平, 黄波林, 张枝华, 等. 三峡工程库区地质灾害防治. 北京: 科学出版社, 2022.

- [75] Fenton GA, Griffiths DV. Risk Assessment in Geotechnical Engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [76] 李术才. 隧道突水突泥灾害源超前地质预报理论与方法. 北京: 科学出版社, 2015.
- [77] 黄宏伟, 朱琳, 谢雄耀. 上海地铁 11 号线关键节点工可阶段工程风险评估. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1103—1107.
- [78] Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733—752.
- [79] Ayyub BM. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making. Risk Analysis, 2014, 34(2): 340—355.
- [80] 杨静, 李大鹏, 翟长海, 等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题. 中国科学基金, 2019, 33(5): 525—532.
- [81] 吕西林, 周颖, 陈聪. 可恢复功能抗震结构新体系研究进展. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 130—139.
- [82] Federal Emergency Management Agency. National disaster recovery framework. Washington DC: FEMA, 2011.
- [83] Almufti I, Wollford MR. REDi resilience-based earthquake design rating system. London: Arup, 2013.
- [84] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 38591-2020 建筑抗震韧性评价标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [85] Blockley D, Agarwal J, Godfrey P. Infrastructure resilience for high-impact low-chance risks. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 2012, 165(6): 13—19.
- [86] Huang HW, Zhang DM. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: characterization and field application. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 301—312.
- [87] 仇文岗, 顾鑫, 刘汉龙, 等. 基于贝叶斯更新的非饱和土坡参数概率反演及变形预测. 岩土力学, 2022, 43(4): 1112—1122.

Research Status and Prospect of Risk Control of Hazards in Hydraulic Geotechnical Engineering

Dianqing Li^{1*} Jinhui Li² Lulu Zhang³ Xiaosong Tang¹

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

2. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Structure System in Civil Engineering,

Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055

3. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240

Abstract Multiple hazards and hazard chains threaten the safety of geotechnical structures throughout their life cycles. Scientific cognition, description, prediction, evaluation and control of hazards, and ensuring the safety of engineering and people's lives and property are the main tasks of the discipline of risk prevention and control of hazards in hydraulic geotechnical engineering. This paper systematically studies the research status and development strategy of this discipline. First, the definition and characteristics of the discipline are given and the trunks and branches of the discipline tree are summarized. Second, starting from the eight trunks of the discipline tree, the research status and existing problems of the discipline are summarized and analyzed. Finally, four suggestions are put forward on the research frontier and future development direction of the discipline.

Keywords hydraulic geotechnical engineering; hazard; risk prevention and control; research status and prospect; discipline tree

(责任编辑 崔国增 张强)

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