

“十三五”国家重点图书出版规划项目

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧

隧道突涌水 监测方法与预警技术

李术才 李利平 石少帅 著



复杂地质与环境条件下
隧道建设关键技术
丛书

编委会主任 钱七虎



上海科学技术出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧



复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书

隧道突涌水 监测方法与预警技术

李术才 李利平 石少帅

著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

隧道突涌水监测方法与预警技术 / 李术才, 李利平,
石少帅著. —上海: 上海科学技术出版社, 2019.5
(复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书)
ISBN 978-7-5478-4327-7

I. ①隧… II. ①李… ②李… ③石… III. ①隧道工
程—突水—监测 ②隧道工程—突水—预警 IV.
①U453.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 021231 号

隧道突涌水监测方法与预警技术

李术才 李利平 石少帅 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海盛通时代印刷有限公司印刷
开本 787×1092 1/16 印张 14 插页 4
字数 280 千字
2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-5478-4327-7/U·78
定价: 95.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

本书共 8 章,分别总结、分析了隧道突涌水监测方法与预警技术的发展历程、技术现状、存在的问题和发展趋势;归纳、划分了隧道突涌水灾害的两种典型破坏模式,提出了隧道突涌水灾害的地质及地球物理场前兆信息特征;针对隔水岩体渐进破坏突涌水类型,研制了真三轴地质力学模拟试验系统,揭示了突涌水的灾变演化机制与突涌水前兆多元信息演化规律;针对充填结构渗透失稳突涌水类型,研制了充填结构渗透失稳突涌水模拟试验系统,重点介绍了充填体性态演化过程与前兆信息临界特征;针对隧道突涌水灾害监测,提出了实时监测的物理基础与设计方法,介绍了隧道突涌水模式识别模型及演化态势动态预测方法;基于突涌水前兆多元信息融合分析方法,建立了以微震为载体融合多元信息的实时监测技术,构建了突涌水多元信息监测与预警系统,阐述了系统架构、软件设计及其使用方法;最后精选了代表性工程案例,详细介绍了隧道突涌水监测方法与预警技术的现场应用情况。

* 本书中带“*”符号的插图可扫描封底二维码查看相应彩图。

本书可作为高等院校土木、岩土、交通、水利水电、矿山、地质等专业教师和高年级学生、研究生的参考书,也可作为相关工程领域的技术人员提供参考。

重大工程建设关键技术研究

总主编

孙 钧 同济大学教授,中国科学院院士

学术顾问

邱大洪 大连理工大学教授,中国科学院院士

钱七虎 中国人民解放军陆军工程大学教授,中国工程院院士

郑皆连 广西大学教授,中国工程院院士

陈政清 湖南大学教授,中国工程院院士

吴志强 同济大学教授,中国工程院院士

王 平 西南交通大学教授

刘斯宏 河海大学教授

杨东援 同济大学教授

复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书

编委会

主 任

钱七虎

委 员(以姓氏笔画为序)

王守慧 石振明 石新栋 朱雁飞

刘 浩 孙 钧 李术才 李利平

李晓军 杨志豪 吴惠明 吴德兴

陈 健 周文波 洪开荣 姚占虎

黄宏伟 曹文宏 曹国侯 龚 剑

蒋树屏 解东升

总 序

近年来,我国各项基础设施建设的发展如火如荼,“一带一路”建设持续推进,许多重大工程项目如雨后春笋般蓬勃兴建,诸如三峡工程、青藏铁路、南水北调、三纵四横高铁网、港珠澳大桥、上海中心大厦,以及由我国援建的雅万高铁、中老铁路、中泰铁路、瓜达尔港、比雷埃夫斯港,等等,不一而足。毋庸置疑,我国已成为世界上建设重大工程最多的国家之一。这些重大工程项目就其建设规模、技术难度和资金投入等而言,不仅在国内,即使在全球范围也都位居前茅,甚至名列世界第一。在这些工程的建设过程中涌现的一系列重大关键性技术难题,通过分析探索创新,很多都得到了很好的优化和解决,有的甚至在原来的理论、技术基础上创造出了新的技术手段和方法,申请了大量的技术专利。例如,632 m 的上海中心大厦,作为世界最高的绿色建筑,其建设在超高层设计、绿色施工、施工监理、建筑信息化模型(BIM)技术等多方面取得了多项科研成果,申请到 8 项发明专利、授权 12 项实用新型技术。仅在结构工程方面,就应用到了超深基坑支护技术、超高泵送混凝土技术、复杂钢结构安装技术以及结构裂缝控制技术等多项创新性的技术革新成果,有的达到了世界水平。这些优化、突破和创新,对我国工程技术人员将是非常宝贵的参考和借鉴。

在 2016 年 3 月初召开的全国人大全体会议期间,很多代表谈到,极大量的技术创新与发展是“十三五”时期我国宏观经济实现战略性调整的一项关键性驱动因素,是实现国



家总体布局下全面发展的根本支撑和关键动力。

同时,在新一轮科技革命的机遇面前,也只有在关键核心技术上一个个地进行创新突破,才能实现社会生产力的全面跃升,使我国的科研成果和工程技术掌控两者的水平和能力尽早、尽快地全面进入发达国家行列,从而在国际上不断提升技术竞争力,而国力将更加强大!当前,许多工程技术创新得到了广泛的认可,但在创新成果的推广应用中却还存在不少问题。在重大工程建设领域,关键工程技术难题在实践中得到突破和解决后,需要把新的理论或方法进一步梳理总结,再一次地广泛应用于生产实践,反过来又将再次推动技术的更进一步的创新和发展,是为技术的可持续发展之巨大推动力。将创新成果进行系统总结,出版一套有分量的技术专著是最有成效的一个方面。这也是出版“重大工程建设关键技术研究”丛书的意义之所在。以推广学术上的创新为主要目标,“重大工程建设关键技术研究”丛书主要具有以下几方面的特色:

1. 聚焦重大工程和关键项目。目前,我国基础设施建设在各个领域蓬勃开展,各类工程项目不断上马,从项目体量和技术难度的角度,我们选择了若干重大工程和关键项目,以此为基础,总结其中的专业理论和专业技术使之编纂成书。由于各类工程涉及领域和专业门类众多,专业学科之间又有相互交叉和融合,难以单用某个专业来设定系列丛书,所以仍然以工程大类为基本主线,初步拟定了隧道与地下工程、桥梁工程、铁道工程、公路工程、超高层与大型公共建筑、水利工程、港口工程、城市规划与建筑共八个领域撰写成系列丛书,基本涵盖了我国工程建设的主要领域,以期为未来的重大工程建设提供专业技术参考指导。由于涉及领域和专业多,技术相互之间既有相通之处,也存在各自间的不同,在交叉技术领域又根据具体情况做了处理,以避免内容上的重复和脱节。

2. 突出共性技术和创新成果,侧重应用技术理论化。系列丛书围绕近年来重大工程中出现的一系列关键技术难题,以项目取得的创新成果和技术突破为基础,有针对性地梳理各个系列中的共性、关键或有重大推广价值的技术经验和科研成果,从技术方法和工程实践经验的角度进行深入、系统而又详尽的分析和阐述,为同类难题的解决和技术的提高提供切实的理论依据和应用参考。在“复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书”(钱七虎院士任编委会主任)中,对当前隧道与地下工程施工建设中出现的关键问题进行了系统阐述并形成相应的专业技术理论体系,包括深长隧道重大突涌水灾害预测预警与风险控制、盾构工程遇地层软硬不均与极软地层的处理、类矩形盾构法、水下盾构隧道、地面出入式盾构法隧道、特长公路隧道、隧道地质三维探测、盾构隧道病

害快速检测、隧道及地下工程数字化、软岩大变形隧道新型锚固材料等,使得关键问题在研究中得到了不同程度的解决和在后续工程中的有效实施。

3. 注重工程实用价值。系列丛书涉及的技术成果要求在国内已多次采用,实践证明是可靠的、有效的,有的还获得了技术专利。系列丛书强调以理论为引领,以应用为重点,以案例为说明,所有技术成果均要求以工程项目为背景,以生产实践为依托,使丛书既富有学术内涵,又具有重要的工程应用价值。如“长大桥梁建养关键技术丛书”(郑皆连院士任编委会主任、陈政清院士任副主任),围绕特大跨度悬索桥、跨海长大桥梁、多塔斜拉桥、特大跨径钢管混凝土拱桥、大跨度人行桥、大比例变宽度空间索面悬索桥等重大桥梁工程,聚焦长大桥梁的设计创新理论、施工创新技术、建设难点的技术突破、桥梁结构健康监测与状态评估、运营期维修养护等,主要内容包括大型钢管混凝土结构真空辅助灌注技术、大比例变宽度空间索面悬索桥体系、新型电涡流阻尼减振技术、长大桥梁的缆索吊装和斜拉扣挂施工、超大型深水基础超高组合桥塔、变形智能监测、基于BIM的建养一体化等。这些技术的提出以重大工程建设项目为依托,包括合江长江一桥、合江长江二桥、巫山长江大桥、桂广铁路南盘江大桥、张家界大峡谷桥、西堠门大桥、嘉绍大桥、港珠澳大桥、虎门二桥等,书中对涉及具体工程案例的相关内容进行了详尽分析,具有很好的应用参考价值。

4. 聚焦热点,关注风险分析、防灾减灾、健康检测、工程数字化等近年来出现的新兴分支学科。在绿色、可持续发展原则指导下,近年来基础设施建设领域的技术创新在节能减排、低碳环保、绿色土木、风险分析、防灾减灾、健康检测(远程无线视频监控)、工程使用全生命周期内的安全与经济、可靠性和耐久性、施工技术组织与管理、数字化等方面均有较多成果和实例说明,系列丛书在这些方面也都有一定体现,以求尽可能地发挥丛书对推动重大工程建设的长期、绿色、可持续发展的作用。

5. 设立开放式框架。由于上述的一些特性,使系列丛书各分册的进展快慢不一,所以采用了开放式框架,并在后续系列丛书各分册的设定上,采用灵活的分阶段付梓出版的方式。

6. 主编作者具备一流学术水平,从而为丛书内容的学术质量打下了坚实的基础。各个系列丛书的主编均是该领域的学术权威,在该领域具有重要的学术地位和影响力。如陈政清教授,中国工程院院士,“985”工程首席科学家,桥梁结构与风工程专家;郑皆连教授,中国工程院院士,桥梁设计施工专家;钱七虎教授,中国工程院院士,防护与地



下工程专家;吴志强教授,中国工程院院士,城市规划与建设专家;等等。而参与写作的主要作者都是活跃在我国基础设施建设科研、教育和工程的一线人员,承担过重大工程建设项目或国家级重大科研项目,他们主要来自中铁隧道局集团有限公司、中交隧道工程局有限公司、中铁十四局集团有限公司、中交第一公路工程局有限公司、青岛地铁集团有限公司、上海城建集团、中交公路规划设计院有限公司、陆军研究院工程设计研究所、招商局重庆交通科研设计院有限公司、天津城建集团有限公司、浙江省交通规划设计研究院、江苏交通科学研究院有限公司、同济大学、河海大学、西南交通大学、湖南大学、山东大学等。各位专家在承担繁重的工程建设和科研教学任务之余,奉献了自己的智慧、学识和汗水,为我国的工程技术进步做出了贡献,在此谨代表丛书总编委对各位的辛劳表示衷心的感谢和敬意。

当前,不仅国内的各项基础建设事业方兴未艾,在“一带一路”倡议下,我国在海外的重大工程项目建设也正蓬勃发展,对高水平工程科技的需求日益迫切。相信系列丛书的出版能为我国重大工程建设的开展和创新科技的进步提供一定的助力。

孙 钧

2017年12月,于上海

孙钧先生,同济大学一级荣誉教授,中国科学院资深院士,岩土力学与工程国内外知名专家。“重大工程建设关键技术研究”系列丛书总主编。

序

进入 21 世纪以来,随着经济的持续发展、综合国力的不断提升及高新技术的不断应用,我国隧道及地下工程得到了前所未有的迅速发展。我国已成为世界上隧道及地下工程规模最大、数量最多、地质条件和结构形式最复杂、修建技术发展速度最快的国家。同时,随着城市地铁建设力度的不断加大,跨江越海隧道工程数量不断增加,国家的重点建设项目如长距离供水、水下交通、西气东输等工程都将涉及穿越江河的问题,铁路、公路、市政、供水、供气、防洪、水电等隧道工程的建设都使隧道的数量大幅度增多。

在隧道建设技术方面,高速铁路隧道技术体系已基本形成;艰险山区复杂地质条件长大隧道建造技术不断取得进步;大断面软弱围岩隧道建造技术取得了很大进展;城市大跨浅埋隧道、越江跨河水下隧道的建造技术都已取得突破;隧道掘进机研发与制造取得了很大进步,这些都标志着我国隧道建设技术达到了一个新的发展水平。尤其是我国幅员辽阔,地质条件复杂,极端复杂的地质条件是制约隧道安全、高效建设的主要因素,是公认的隧道建设难点。依托一大批重难点工程,如青藏铁路关角隧道、兰渝铁路西秦岭隧道、港珠澳大桥沉管隧道、大瑞铁路高黎贡山隧道、武汉三阳路长江隧道等的相继贯通,我国在隧道及地下工程尤其是复杂地质与环境条件下的隧道工程建设方面,取得了很大成就和较多创新成果。为此,针对地形与地貌类型复杂、地质构造复杂、岩土体工程地质不良等复杂地质条件,以重难



点工程的突破创新成果为基础,丛书编委会与上海科学技术出版社共同策划了本丛书。

丛书从地质探测、预警与风险控制、设计、施工、数字化应用等角度,系统梳理了山岭、水下、软硬不均地层等复杂地质与环境条件下隧道的建设关键技术,以学术专著的形式,介绍了近年来在复杂地质隧道建设过程中形成的创新成果和核心技术。丛书中涉及和介绍的创新成果与技术在国内属于领先水平,有的已形成具有自主知识产权的核心技术,且均已在重大工程中得到了应用,使得丛书具有前沿性、原创性、创新性、引领性的特点。例如,洪开荣的《软硬不均与极软地层盾构处理技术》,从理论上、技术上、工程案例上阐述软硬不均地层与水下隧道极软地层的盾构处理技术,代表了软硬不均地层隧道及地下工程的最新理论与实践;曹国侯、刘浩的《隧道地质三维探测技术》,依托作者主持的科研项目“国防工程地质预测及质量无损检测系统”,并结合团队多年的研究和应用成果,全面介绍了隧道复杂地质地球物理探测的新理论、新方法与新技术;李术才的《隧道突涌水监测方法与预警技术》,依托国家重大科研仪器设备研制专项“用于掘进机施工的隧道不良地质定量超前预报综合地球物理探测仪器”、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“隧道突水突泥机理与灾害控制”等重大科研项目,介绍了在复杂地质隧道突水突泥灾害源超前预报技术及其在大型隧道工程中的应用;等等。丛书中涉及的工程应用案例还包括四川成兰铁路跃龙门隧道、济南黄河隧道工程、鄂西高速齐岳山隧道、青岛胶州湾隧道、南京长江隧道、武汉地铁8号线过江隧道等一批重难点工程。

在国家大力推进“一带一路”建设、实施创新驱动发展战略、建设交通强国的战略背景下,希望丛书的出版不仅能够更好地总结上述技术成果、推动创新技术的推广应用,更希望能在基础理论研究和共性关键技术的突破方面起到促进作用,在技术创新模式的培育、专业人才的培养方面能够起到积极的作用。丛书在研讨策划、组织、编写和审稿的过程中得到了相关大型企业、高校、研究机构和学会、协会的大力支持,许多专家在百忙之中给丛书提出了很多非常好的建议和想法,在此一并表示感谢。

2018年8月

钱七虎先生,中国人民解放军陆军工程大学教授,中国工程院院士。“复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书”编委会主任。

前 言

21 世纪是全球地下空间开发的时代。随着我国经济建设高速发展及一系列宏伟战略的实施,交通、水电等国家基础设施工程建设进入蓬勃发展期,相继实施了南水北调、滇中引水、川藏铁路等一批重大工程,我国隧道与地下工程的建设数量、规模及难度已高居世界首位。然而,由于我国地势西高东低、地形地貌多变、地层条件复杂,隧道建设面临的技术挑战堪为世界之最。施工中极易发生突水突泥等重大地质灾害,并诱发水资源枯竭、地表塌陷等一系列环境问题,严重影响人员与工程建设安全,造成重大经济损失和恶劣社会影响,同时也较大程度上制约了地下工程建设向更深、更快、更安全方向发展。

长期以来,隧道重大突涌水灾害处于被动防治局面,其重要原因在于人们对突涌水发生机理的认识不够深入,缺乏有效指导隧道突涌水灾害预测预警和防治的系统理论及方法。尤其对于重大突涌水灾害,其动力灾变演化过程极端复杂,难以真正做到实时监测和有效预警。因此,作者及团队针对重大突涌水灾害被动防治局面,围绕监测方法、预警技术和现场实践方面开展了十余年的深入研究,取得了系统性的创新成果,为隧道重大地质灾害主动防控提供了新的技术途径和实用方法。

隧道突水突泥往往是由于掌子面前方赋存断层、破碎带、溶洞等重大地质灾害源。早在 2002 年,作者带领研究小组开展隧道超前地质预报技术研究,结合湖北沪蓉西高速



公路、青岛胶州湾海底隧道等重难点工程,开展了隧道超前预报理论、技术和仪器研究,破解了突水突泥灾害源定位定量预报难题。灾害源定位定量预报是监测预警的先决条件。在灾害源准确探明的情况下,掌子面与灾害源之间的防突结构是突水突泥灾害发生的最后屏障,如何掌握其状态演化是监测预警的核心难题。2008年,作者组建攻关小组,承担交通运输部西部交通科技建设项目,依托三峡翻坝高速公路等工程,重点开展高风险岩溶隧道不良地质预报与风险控制研究,清晰揭示了地下水和施工双重扰动下防突结构破坏突涌水的灾变演化机理,发现了灾害源地球物理场响应特征和防突结构破坏过程多元信息演化规律,建立了突水突泥灾害源防突结构的最小安全厚度确定方法,并将其应用于指导施工。2009—2011年,以湖北宜巴高速公路、保宜高速公路等工程为依托,开展高风险岩溶隧道突水突泥风险评估与施工许可机制研究,认识到防突结构存在破裂通道空间定位与突涌水态势时间预测问题,重点解决了隧道突水突泥风险动态评估与临灾预警难题。2012年,在国家自然科学基金等项目资助下,作者及团队成员围绕突涌水机理、前兆规律及预警方法,开展了多类型传感器、多元信息融合分析软件及实时监测预警平台研发工作,取得了阶段性进展。2013—2017年,课题组重点依托四川成兰铁路跃龙门隧道、湖北利万高速齐岳山隧道等工程,开展隧道突涌水灾害实时监测方法与预警技术研究,搭建了多个现场监测系统与预警平台,结合现场试验,从工程中发现问题的,提炼科学问题和技术难题,再回到工程中验证、应用和推广,构建了隧道施工风险动态评估与安全决策平台,在重庆快速路一横线控制节点工程、京沪高速济南连接线工程、滨莱高速改扩建工程等隧道工程中推广应用。然而,由于隧道重大突涌水灾害的复杂演化过程,其监测预警技术涉及岩石力学、地质学、地球物理学、信息学、计算机科学及软件工程等多学科交叉研究领域,涉及面广、研究难度大,仍有许多研究工作需要进一步开展。

本书共8章,详细介绍隧道突涌水监测预警的技术现状、自主研究与成果应用。第1章主要阐述突涌水监测预警的发展历程、技术瓶颈与发展趋势;第2章梳理了典型的突涌水灾害案例,归纳、划分了隧道突涌水灾害的两种典型破坏模式,提出了隧道突涌水灾害的地质及地球物理场前兆信息特征;第3章针对隔水岩体渐进破坏突涌水类型,研制了真三轴地质力学模拟试验系统,揭示了隔水岩体渐进破坏突涌水的灾变演化机制与突涌水前兆多元信息演化规律;第4章针对充填结构渗透失稳突涌水类型,介绍了充填结构渗透失稳突涌水模拟试验系统,揭示了充填体性态演化过程与前兆信息临界

特征;第5章针对隧道突涌水灾害监测,提出了实时监测的物理基础与设计方法,建立了防突结构岩体破坏演化性态判别方法;第6章针对突涌水灾害预测,提出了突涌水前兆多元信息演化模式及融合分析方法,重点介绍了突涌水模式识别模型及演化态势预测方法;第7章针对突涌水灾害预警,基于突涌水前兆多元信息融合分析方法,建立了以微震为载体融合多元信息的实时监测技术,构建了突涌水多元信息监测与预警系统,详细阐述了系统架构、软件设计及其使用方法;第8章精选了代表性工程案例,详细介绍了隧道突涌水监测方法与预警技术的现场应用情况。本书是作者和团队人员多年来在该领域研究成果的总结,希望能为隧道地质灾害主动防控提供较为有益的参考和借鉴。

感谢国家973项目(2013CB036000)、国家重大科研仪器设备研制专项(51327802)、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51722904)、山东省自然科学基金项目(JQ201611)对相关研究给予的资助。感谢课题组成员张庆松、李树忱、薛翊国、林春金、刘斌、张霄、刘人太、许振浩、周宗青、王旌、刘洪亮等多年来的共同努力,以及多位研究生在理论研究、模型试验及现场应用中所做的持续贡献。感谢王俊涛、梁金宝等教授级高工对本书相关技术研究给予的支持。对于为本研究提供现场试验的合作单位和工程技术人员,在此一并表示衷心的感谢。

由于著者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,恳请广大专家和读者批评指正。

作 者

2019年1月于济南

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	隧道突涌水监测预警作用和意义	1
1.2	隧道突涌水灾害研究现状与存在的问题	3
1.2.1	隧道突涌水地质特征方面	4
1.2.2	隧道突涌水前兆信息方面	9
1.2.3	隧道突涌水监测预警方面	12
1.2.4	存在的问题	13
1.3	发展趋势	14
第 2 章	隧道突涌水地质模式与前兆信息	16
2.1	防突结构破坏模式与特征	16
2.1.1	隔水岩体渐进破坏突涌水特征	21
2.1.2	充填结构渗透失稳突涌水特征	24
2.2	灾害源地质结构模式	27
2.2.1	无补给型静储量含水致灾构造	29
2.2.2	强补给型动储量含水致灾构造	29
2.2.3	弱补给型静-动储量含水致灾构造	30
2.3	隧道突涌水灾害施工前兆信息	31
2.3.1	地质前兆信息	31
2.3.2	地球物理场前兆信息	34
第 3 章	隔水岩体渐进破坏突涌水前兆信息演化规律	42
3.1	隔水岩体渐进破坏突涌水模拟试验系统	42



- 3.1.1 总体设计思路 / 42
- 3.1.2 伸缩组合式试验台架 / 44
- 3.1.3 真三轴加载与控制系统 / 46
- 3.1.4 多元信息实时监测方法 / 52
- 3.2 水力耦合岩体渐进破坏模拟试验 / 54
 - 3.2.1 模拟工程概况 / 54
 - 3.2.2 流固耦合相似材料 / 56
 - 3.2.3 试验思路与设计 / 60
 - 3.2.4 试验方法与实施 / 61
- 3.3 隔水岩体渐进破坏突涌水前兆信息演化规律 / 64
 - 3.3.1 突涌水灾变过程分析 / 64
 - 3.3.2 岩体破坏突涌水应力场演化 / 65
 - 3.3.3 岩体破坏突涌水位移场演化 / 66
 - 3.3.4 岩体破坏突涌水渗流场演化 / 68
 - 3.3.5 多元信息融合分析与敏感性辨识 / 69

第4章 充填结构渗透失稳突涌水前兆信息演化规律 71

- 4.1 充填结构渗透失稳突涌水模型试验系统 / 71
 - 4.1.1 总体设计思路 / 71
 - 4.1.2 旋式可视试验系统 / 73
 - 4.1.3 水压加载与实时监测系统 / 74
- 4.2 充填体渗透破坏突涌水演化模拟试验 / 75
 - 4.2.1 模拟工程概况 / 75
 - 4.2.2 试验相似材料 / 77
 - 4.2.3 试验设计与实施 / 81
- 4.3 充填体渗透破坏突涌水前兆多元信息演化规律 / 82
 - 4.3.1 灾变过程水-砂涌出量演化规律 / 82
 - 4.3.2 充填体孔隙率演化规律 / 83
 - 4.3.3 充填体渗透特性演化规律 / 84
 - 4.3.4 多元信息融合与临界特征点识别 / 86