

构造应力环境浅埋取水隧洞 监测检测评价

——以渤海红沿河核电站取水隧洞工程为例

芮勇勤 杨 斌 李 伟 林晓华 王 斌 著



东北大学出版社
Northeastern University Press

国家重大核电建设项目（红沿河核电站取水导流工程）

国家自然科学基金重点科学基金项目（51034005）

新疆生产建设兵团科技支疆项目（2012AB009，2012BA005）

构造应力环境浅埋取水隧洞 监测检测评价

——以渤海红沿河核电站取水隧洞工程为例

芮勇勤 杨 斌 李 伟 林晓华 王 斌 著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 芮勇勤 杨 斌 李 伟 林晓华 王 斌 2015

图书在版编目 (CIP) 数据

构造应力环境浅埋取水隧洞监测检测评价: 以渤海红沿河核电站取水隧洞工程为例/芮勇勤等著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5517-1159-3

I. ①构… II. ①芮… III. ①核电站—取水—浅埋隧道—监测 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 297603 号

内 容 提 要

本书以构造应力环境浅埋取水隧洞监测检测评价为研究背景, 开展隧道围岩构造地应力判别及其稳定性影响分析, 构造地应力影响隧道开挖支护, 隧洞爆破振速测试分析, 隧洞开挖支护爆破振动数值模拟, 爆破振动相邻隧洞施工影响分析, 隧道开挖支护施工围岩松动圈探测分析, 岗丘冲沟地貌隧道开挖支护力学特性分析, 隧道施工过程监控量测分析, 取水隧洞施工方案与组织等方面的研究。本书成果在工程中进行广泛应用, 还需深入研究; 同时开展的研究可供相关领域工程技术人员教学、研究学习参考。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 0265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

Web: <http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 13.5

字 数: 334 千字

出版时间: 2015 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2015 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 王兆元

责任校对: 铁 力

封面设计: 刘江旻

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1159-3

定 价: 55.00 元

序

近年来,土木工程建设中大量的隧道和地下工程开发与利用,有力地推进了和谐社会的快速发展与建设,取得了显著的经济效益和社会效益。隧道和地下工程技术可以开发利用地壳潜在资源,进而更能满足工程便利、节能、环保、安全和经济的要求。但是,复杂的地质条件,使隧道技术工艺的发展与隧道工程建设的发展存在一定程度的不协调,在隧道建设中容易出现掉块、塌方等隧道灾害。构造地应力是影响隧道围岩稳定的主要因素,对确定隧道开挖支护有很大的影响。

针对构造地应力等影响的隧道开挖支护问题,《构造应力环境浅埋取水隧洞监测检测评价》依托辽宁红沿河核电站隧洞施工工程,利用有限元软件进行构造地应力影响下的隧洞围岩开挖支护的稳定性数值模拟分析,得出不同构造地应力作用下的隧洞开挖和初支围岩的变形规律,揭示了不同应力场围岩应力分布特征,以及不同应力场围岩位移分布特征;根据相似理论,开展了物理模型试验,通过模拟构造地应力对隧洞围岩稳定性的影响,认识了构造地应力作用下隧洞围岩支护的变形破坏规律,以及构造地应力作用下的破坏模式;同时,与数值模拟分析成果互为认证,验证了施工设计的可靠性和施工方案的合理性。在获得隧洞施工中掌子面多个关键技术参数的基础上,利用岩体基本质量指标(BQ)、巴顿岩体质量指标(Q)分级和岩体地质力学指标值(RMR)评价方法,进行了围岩级别分类的动态分析与评价,确立了合理的支护类型和施工参数。数值分析与模型试验方法的相互结合,是研究基于构造地应力影响隧洞开挖支护力学特性的一次尝试,为构造地应力影响的隧道开挖支护提供了参考,辅助设计施工,降低隧洞施工的风险和加快隧洞施工的进度。

在红沿河核电站工程施工建设中,存在大量的海下、地下工程开挖,诸如导流工程和取水隧洞开挖等。特别是地下取排水隧洞工程得到了广泛的应用。钻爆法作为隧洞开挖的一种主要施工方法,施工中存在爆破振动对邻近隧洞、衬砌、PX 泵房、边坡和导流工程稳定的影响。因此,研究爆破振动对地下隧洞群的影响,不仅具有重要的理论意义,同时也具有重要的工程意义。以红沿河核电站取水群洞为研究背景,利用数值模拟方法,结合现场爆破施工技术要求等,对该隧洞的施工过程进行研究,获取隧洞围岩振速分布与衰减规律,以便控制喷射混凝土的安全距离。以动力学理论和岩石的爆破破坏理论为基础,得到了开挖塑性区与最大主应力分布,并研究了不同围岩类型下隧洞爆破的最大单段药量控制技术。同时,更进一步研究了隧洞动力开挖对邻近隧洞的影响,分析了不同围岩类型下隧洞开挖所造成的隧洞围岩的应力、位移和振动速度分布与衰减情况。分析和验算不同围岩类型下 3、4 号隧洞开挖爆破对 1、2 号隧洞运行的影响。通过爆破振动分析,在按常规方法进行隧洞施工时,其控制点振动速度均在《爆破安全规程》规定的允许范围之内,隧洞爆破施工对邻近隧洞运行的影响可以忽略。

结合 CA-CB-PX 系统隧洞工程,利用探地雷达探测技术针对不同围岩段进行测试,统计了不同围岩段松动圈的厚度,同时利用传统的超声波测试技术测试隧洞围岩松动圈,并认证了探地雷达探测结果;根据探地雷达技术探测的隧洞围岩松动圈厚度值,为隧洞围岩支护优化设计提供了重要参考。利用有限元软件对不同地貌地层隧洞围岩进行开挖支护数值模拟,利用监测技术分析了隧洞围岩力学、变形特性;同时,针对隧洞经过节理裂隙密集带的情况,提出对其地表注浆加固的处治措施,处治效果良好。

针对隧洞施工过程中的监控量测,开展了不同围岩监测数据的处理与分析,得出了相应的变形规律,进行了信息反馈与设计优化,并指导了施工。综合围岩松动圈厚度值、数

值模拟结果和监控量测的结果，验证了隧洞围岩支护的稳定性，表明设计参数可靠、施工方法合理。

在本书的编写过程中，借鉴了一些相关的施工设计、现场管理和软件应用资料，受益匪浅，在此对原作者深表感谢！

特别感谢中广核工程有限公司、中国电力工程顾问集团东北电力设计院、中隧集团辽宁红沿河核电项目部、长沙理工大学交通运输工程学院、东北大学资源与土木工程学院给予的支持和帮助。

同时，赵红军、吴艳娟、刘书智、张旭旭等研究生在本书编写过程中给予帮助，在此一并表示感谢！

最后，希望《构造应力环境浅埋取水隧洞监测检测评价》一书，在实际工程的设计、分析和仿真等方面，能给予广大读者启迪和帮助。

由于编著者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在疏漏和错误之处，恳请读者不吝赐教。

著 者

2015 年 1 月 8 日于望湖苑

目 录

第 1 章	构造应力环境浅埋取水隧洞监测检测评价研究背景	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的、意义	3
1.3	国内外研究现状	5
1.4	依托工程	11
1.5	研究思路启示	19
1.6	研究的主要内容及技术路线	21
第 2 章	隧道围岩构造地应力判别及其稳定性影响分析	23
2.1	构造地应力对隧道围岩稳定性的影响	24
2.2	构造地应力影响隧道围岩稳定性的分析方法	26
2.3	三种方法的互相验证的关系	29
2.4	模型试验方法与设计	29
2.5	模型制作与测试系统	30
2.6	模型试验结果分析	32
2.7	数值模拟分析模型的建立与围岩物理力学参数	38
2.8	数值模拟计算结果与分析	38
2.9	本章小结	62
第 3 章	构造地应力影响隧道开挖支护	63
3.1	隧道开挖支护设计中初始地应力的考虑	63
3.2	构造地应力条件下隧道围岩稳定性分级与开挖支护考虑	64
3.3	构造地应力影响下的不同围岩隧道开挖支护参数建议	70
3.4	本章小结	74
第 4 章	隧洞爆破振速测试分析	77
4.1	爆破振动作用下隧洞稳定性的计算方法	77
4.2	爆破振动破坏的主要判据	77
4.2	针对爆破振动的控制措施与环境技术要求	80
4.3	爆破振动监测	82
4.3	爆破振动监测结果及分析	84
4.4	本章小结	86
第 5 章	隧洞开挖支护爆破振动数值模拟	87
5.1	FLAC ^{3D} 动力计算的主要步骤	87
5.2	爆破冲击荷载	87
5.3	取水隧洞爆破参数	90
5.4	隧洞爆破施工的数值模拟及分析	90
5.5	数值模拟结果及分析	92
5.6	爆破荷载作用初衬极限动态设计方法	100
5.7	本章小结	105

第 6 章 爆破振动相邻隧洞施工影响分析	107
6.1 隧洞爆破开挖对邻近隧洞的影响	107
6.2 隧洞群爆破动力分析	115
6.3 本章小结	118
第 7 章 隧道围岩松动圈探测与施工监控量测方法	119
7.1 探地雷达探测原理与方法	119
7.2 超声波测试原理与方法	124
7.3 隧道施工监控量测方法	126
7.4 本章小结	128
第 8 章 隧道开挖支护施工围岩松动圈探测分析	129
8.1 探地雷达松动圈探测方案	129
8.2 探地雷达松动圈探测结果与分析	149
8.3 围岩松动圈超声波测试与探地雷达探测成果认证	150
8.4 本章小结	152
第 9 章 岗丘冲沟地貌隧道开挖支护力学特性分析	153
9.1 隧道开挖支护模型建立与材料物理力学参数选取	153
9.2 中等风化围岩隧道开挖支护力学特性分析	154
9.3 强风化围岩隧道开挖支护力学特性分析	161
9.4 岗丘地貌倾斜节理裂隙密集带隧道开挖支护力学特性分析	168
9.5 冲沟地貌陡倾节理裂隙密集带隧道开挖支护力学特性分析	171
9.6 本章小结	175
第 10 章 隧道施工过程监控量测分析	177
10.1 监控量测依据与监测布置	177
10.2 监测数据分析	178
10.3 隧道开挖不排水情况有限元强度折减稳定性分析	184
10.4 隧道开挖排水情况有限元强度折减稳定性分析	185
10.5 本章小结	186
第 11 章 取水隧洞施工方案与组织	187
11.1 开挖及支护	187
11.2 出渣与衬砌	189
11.3 初期支护设计	190
11.4 隧洞围岩分级与评价	191
11.5 隧洞围岩类别与支护类型	193
11.6 隧洞施工组织	194
11.7 本章小结	202
第 12 章 结论与展望	203
12.1 主要研究结论	203
12.2 主要研究成果	205
12.3 未来工作展望	205
参考文献	207

第 1 章 构造应力环境浅埋取水隧洞监测 检测评价研究背景

1.1 研究背景

我国正处于社会经济快速发展的重要时期,在国民经济结构中,基础建设一直占有举足轻重的重要地位。近年来,在土木工程建设的各种技术领域中,隧道和地下工程技术显得十分突出,越来越得到广泛的运用,取得了良好的经济效益和社会效益。地下工程技术用以开发地壳潜在的资源,进而更能满足工程的便利、节能、环保、安全和经济的要求^[1]。我国广大工程技术人员已经做出了大量的努力和杰出的贡献,取得了举世瞩目的成就^[2]。随着经济的持续快速稳定发展,科学技术不断更新飞跃,大量隧道建设促进了研究的深入。同时,隧道的发展保证了我国经济快速持续的发展,满足了发展核电事业的迫切需要。我国逐步成为世界上隧道和地下工程最多、最复杂、发展速度最快的国家。由于城市的发展,而我国的土地资源十分有限^[3],地下工程尤其是隧道工程引起了人们广泛的关注,这就进一步提高了对隧道安全、经济的要求,促进了隧道工程的施工设计的快速发展。水利水电隧道主要由水工隧洞和地下厂房两大部分组成,水工隧洞主要包括引水隧洞,导流隧洞,泄洪隧洞等,地下厂房指不过水的地下洞室。自 20 世纪 70 年代中期以后,先后建成了一大批著名的水电工程,如二滩水电站、黄河小浪底、葛洲坝、世界最大的水电工程长江三峡工程,这些重大工程顺利建设标志着在水利水电系统地下工程和隧道建设已达到或接近世界先进水平^[4]。在世界范围内,核电站得到了迅速发展,美、英、法、日、德等发达国家延长核电机组使用期,并进行核电站扩建、机组扩容;一些新兴的发展中国家如印度、中国等大量进行建设核电站(见图 1.1)^[3]。我国计划从 2009 年起陆续开工建设 11 个核电机组,随着这些工程的加速推进,我国的核电建设将进入快速发展期。核电被称为是当今最现实的能大规模发展的替代能源。在未来,我国已经批准建设 24 个核电机组,总装机容量 2500 多万千瓦。核能是我国科学发展观,可持续发展能源领域的重要方面,经过十余年的发展,中国的核电正向批量化发展阶段过渡。近期,国家有关部门提出到 2020 年核电占全国电力总装机容量的 5%左右(4000 万千瓦)宏伟目标^[5]。“十二五”规划中,核能发电比例从“十一五”规划的 2%~3%上调到 5%。内地发电一直以火电为主,而要实现节能减排目标,需要发展包括核电在内等清洁能源。中国内地正在运行的有浙江秦山、广东大亚湾、岭澳和江苏田湾 4 个核电站,在建核电站有 12 个,并且已在 16 个省市中初步选定 51 个准备建设的核电厂址(见图 1.2)。地应力对岩土开挖的变形与破坏十分明显。由在岩体中地壳构造运动所产生的构造应力和由上覆岩体的重量产生的自重应力等产生了岩体地应力。当开挖时,应力重分布形成围岩应力。围岩应力是研究洞室安全和围岩稳定性的重要因素,在开挖以后,破坏了岩体的原始平衡状态,应力的重分布、围岩不断变形。岩石应力达到极限强度而出现裂缝或剪切位移,在自重作用下甚至会产生大量塌落,出现“冒顶”现象。

国内的相关文献资料中经常有关于隧道灾害的报道,隧道灾害后果严重,危害巨大。由地质灾害而引起的开挖停工短则几个月,长则半年甚至几年,严重影响了经济效益,造成不良的社会影响。而在治理此类灾害时,往往是应急处理,缺乏综合规律性指导。如此多的隧道地质灾害还在继续上演,见表 1.1。



图 1.1 世界核电站分布图

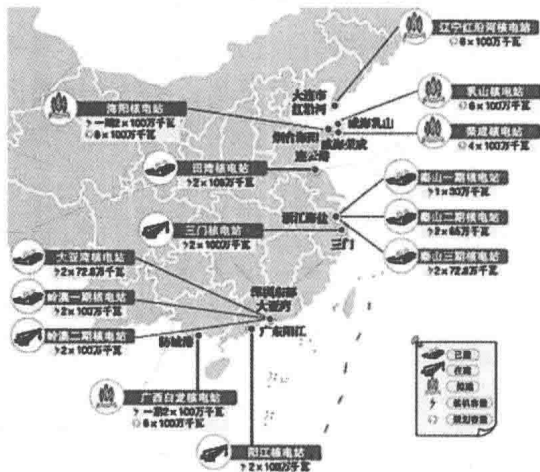


图 1.2 中国大陆沿海核电站分布图（局部图）

表 1.1 构造地应力引起的隧道灾害

隧道名称	发生的灾害
成昆线全线有 427 座隧道，总长 341km	施工开挖期间约有 25%隧道发生过大型坍方，有多座隧道出现了塌陷、岩爆等灾害
穿越于地形、地质条件复杂的秦岭、大巴山、云贵高原等山区的宝成、襄渝、贵昆、湘黔、枝柳等线铁路都修建了大量的隧道工程	这些隧道在建设和运营中都发生过规模不等的坍方，许多隧道洞身也遭受偏压以及地表塌陷等地质灾害
衡广复线、大秦铁路等也有许多隧道	这些隧道都出现了较严重的地质灾害
军都山隧道	破碎段施工中发生罕见的地下泥砂石流和大量坍方灾害
目前国内最长的公路隧道华蓥山隧道穿越了煤层断层、石油气层、高地应力区等复杂地层	隧道开挖中遭遇涌水、涌泥、瓦斯突出、断层坍塌、岩爆及大变形等地质灾害
川藏公路的二郎山隧道	高地应力引起的岩爆、中梁山隧道与给云山隧道开挖不到一年发生较大坍塌 8 次

用核能发电的特点就是清洁高效，在 2015 年红沿河核电站的 4 台百万千瓦级核电机组每年发电，减少了 1000 万 t 煤炭消耗，减少 2400 万 t 二氧化碳、23 万 t 二氧化硫、15 万 t 氮氧化物的排放，其节能减排的效果是非常明显的。当然，核电站的安全问题也一直受到社会各界的关注，其实只要核电站的工作人员把各项工作做好，不要有太大的疏忽。核污染等一些危害还是不容易发生的。目前，中国已经有 7 个可以运行发电的核电站，有 11 个正在建设的核电站，25 个将要设计建设的核电站。位于浙江省嘉兴的秦山核电站也是我国第一个建成的核电站，它在 1984 年开建，在 2003 年全部建成。现在还在为浙江电网源源不断的提供电源。

1.2 研究目的、意义

2011 年 3 月 11 日,日本东北部和关东首都圈发生里氏 9 级强震,并引发海啸,日本福岛第一核电站发生放射性物质泄漏事故(见图 1.3)。我国立即组织对核设施进行全面安全检查。通过全面细致的安全评估,切实排查安全隐患,采取相关措施,确保绝对安全。全面审查在建核电站。用最先进的标准对所有在建核电站进行安全评估,存在隐患的坚决整改,不符合安全标准的立即停止建设。严格审批新上核电项目。抓紧编制核安全规划,调整完善核电发展中长期规划,核安全规划批准前,暂停审批核电项目包括已开展前期工作的项目。



2011 年 3 月 16 日日本福岛第一核电站情况
图中 2 号和 3 号反应堆仍然在冒出蒸汽,
1 号、3 号、4 号反应堆厂房已经遭到破坏



卫星图片显示日本福岛第一核电站情况

图 1.3 日本福岛核电站

红沿河核电站取水隧道 1 号隧道在强风化片麻岩、破碎中等风化花岗岩捕虏体中已经发生掌子面工作区掉块、塌方各 1 次,3 号隧道在四组节理切割的破碎中等风化花岗岩中的掌子面发生一次塌方事件,隧道掉块、塌方已经得到及时、妥善的处置。

1 号隧道在 384m(里程 581m)处,掌子面处于破碎、中等风化花岗岩与强风化片麻岩过渡段,岩性为中等风化花岗岩和强风化片麻岩捕虏体(根据掌子面情况,片麻岩约占整个掌子面的 50%~80%),中等风化片麻岩裂隙较发育,呈碎裂状(由于该段裂隙较发育,节理裂隙已无法统计),且在掌子面局部见渗水或滴水现象,水量甚微。工作面拱顶临空间距 1.6m,冒顶高度约 3.5m,纵向长度约 5.0m,横向约 4.0m,塌方约 50m³,隧道产生冒顶塌方详见图 1.4 和图 1.5 所示。



1 号隧道洞顶出现强风化片麻岩捕虏体
(近景、镜向 NW)



1 号隧道掌子面出现片麻岩
捕虏体(远景、镜向 N)



1 号隧道掌子面出现
片麻岩捕虏体(远景、镜向 N)

图 1.4 隧道冒顶塌方

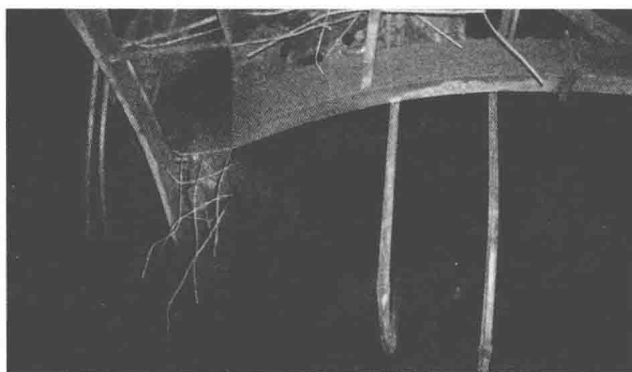


图 1.5 隧道工作面拱顶冒落塌方超前小导管被拉拔拖出情况

由爆破振动引起的地下隧洞的安全事故时有发生:在石赧峪水库定向爆破筑坝时,爆后导致距离爆源最近地段,沿隧洞西壁(近爆源壁)普遍塌帮,有的整片塌落,全洞总塌方量约 $10\sim 15\text{m}^3$,给工程带来不利影响;1988年渡口铁厂渣线半壁路堑爆破工程(装药75t),严重破坏了附近的九道拐铁路隧道,损坏123m,总塌方量约 300km^3 ,使铁路停运42天,经济损失达数百万元;露天采场频繁的爆破振动是造成废石运输平硐失稳的主要因素;二滩水电站地下厂房施工中,洞室周围因爆破开挖引起的松动区约有 $6\sim 7\text{m}$ 深,半松动区约为 $7\sim 13\text{m}^{[3]}$,由于爆破振动的影响,存在局部岩石脱落现象,爆破引起的隧道危害如图1.6。



(a) 隧洞塌方



(b) 衬砌脱落

图 1.6 爆破引起的隧道灾害

在现代地下工程开挖施工中,为了充分发挥围岩自身的承载能力,确保围岩的稳定,已普遍采用对距离爆破工作面很近的已成型围岩表面适时进行喷射混凝土的支护手段。大量工程实例表明,爆破产生的瞬态冲击和振动效应,对邻近爆破区(有混凝土喷层)会产生不同程度的破坏影响,我国《水工建筑物地下开挖工程施工技术规范》(DL-T 5099-1999)^[4]对此有严格的要求,该规范中规定:混凝土喷射后至下一循环放炮的时间,应通过试验确定,一般不小于4h;放炮后应对混凝土进行检查,如出现裂纹,应调整放炮间隔时间或爆破参数。因此,严格控制爆破施工对混凝土喷层的影响是隧洞施工中的重要技术问题之一。

在地下工程施工中,经常会遇到相邻隧洞一起施工或者相邻隧洞一前一后施工的情况。这样就会存在隧洞爆破开挖的时候,对既有的隧洞的爆破振动影响的问题。一种情况是在隧洞钻爆开挖工程中,爆破振动对既有隧洞断面的岩壁的影响;还有一种情况就是在既有隧洞衬砌或是衬砌完成的时候,爆破振动对既有隧洞混凝土衬砌结构的损伤甚至破坏。如果不能解决好这个问题,将会影响到隧洞的安全,延长隧洞的施工工期,给工程留下安全隐患。越来越多的地下工程在施工过程中都涉及有关地下结构的抗动载能力、地下结构在

爆破振动荷载作用下的动态响应等一系列研究课题，它们对地下工程的设计、施工等有着工程指导意义和理论研究价值。应用数值分析方法探讨邻近工程施工产生的爆破振动对隧洞围岩稳定影响是解决该问题的一种重要而有效的研究手段，通过数值分析爆破振动对隧洞自身和邻近隧洞围岩和衬砌的动力响应，并对影响隧洞围岩应力场的因素进行讨论，为合理调整施工方案、完善爆破参数及支护设计提供理论依据。

隧道围岩的开挖必然破坏原岩应力状态。大量的工程实测分析表明，在隧道开挖之后，围岩松动圈的存在是一个普遍现象。在隧道开挖之前，岩体处于三向应力平衡状态，开挖后围岩原有的三向应力平衡状态被破坏，主要表现在两个方面：一方面，应力重新分布，切向应力增加，并产生应力集中；径向应力降低，洞室周边处应力达到零；另一方面，围岩受力状态由三向变成近似两向，岩石强度下降，如果集中应力值小于或等于下降后的岩石强度，围岩将处于弹性状态，围岩可自稳，不存在隧道支护问题；相反，如果集中应力值大于下降后的岩石强度，围岩将发生破裂，这种破裂将从周边开始逐渐向围岩深部扩展，直至达到另一新的三向应力平衡状态为止，此时围岩中出现一个破裂带，这个破裂带称为围岩松动圈，它有一个发生、发展和稳定的过程，稳定后的松动圈厚度值反映了围岩应力、围岩强度等共同作用的结果，其外是塑性极限平衡区及弹性区。工程实践证明，围岩松动圈支护理论抓住了支护的主要对象，其分类方法和所确定的支护形式和参数与现场实际符合，取得了显著的技术、经济与社会效益，从而应用越来越广泛。然而，如果使用该理论对洞室进行合理有效的支护，最关键的是要预先知道被支护洞室的松动圈厚度值。到目前为止，松动圈厚度值仍由现场实测确定，传统情况下是使用超声波测试技术，该方法这不仅费事费时，较难把握，而且费用昂贵，从而限制了松动圈理论的进一步推广应用。因此，研究如何快速准确地获取松动圈厚度值已是势在必行的工作。随着科学技术的进步，对隧道围岩松动圈进行无损探测，利用定量化的指标来评价隧道的实际状况进行科学的评价，对理论的应用推广和实际工程效益非常必要。探地雷达技术(Ground Penetrating Radar, GPR)是一种先进的快捷、高精度、连续并且实时成像显示地下结构剖面无损探测技术，它在隧道工程围岩松动圈探测中正迅速发展，表现出了强大的生命力。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 地应力的认识

地应力是储蓄在地层中的应力，即未受工程扰动的天然应力。地应力来自地壳构造运动而产生的应力、上覆岩层的自重作用岩体自重产生的内应力、地形势与剥蚀作用引起的应力、封闭应力。地应力是地质历史时期中逐渐形成的，主要是重力场和构造应力综合作用的结果。自重应力是在重力场作用下岩体自重产生的内应力。构造应力是由于构造运动而产生的地应力，构造应力的作用效果有地层运动和对地层的应变和变形，构造应力基本的特征是较高的水平应力，主要有：①水平应力大于垂直应力。②各相异性明显，垂直于褶皱走向的水平压应力比垂直方向上的应力大得多。③通过遗留下的构造形迹可以辨认和确定应力场各个时期的特点和历次变化的情况。

1.3.2 地应力场的研究

初始地应力场是日积月累而形成的，产生地应力的原因是十分复杂的，至今还不十分清楚其产生的确切原因。因此，人们对地应力的认识是一个漫长的历史过程。

(1) 地应力的假设

1905—1921 年, 瑞士学者海姆(Haim)^[6]首先提出地应力的概念, 他观察了大量隧道的围岩的工作状态, 创造了静水压力学说: 垂直应力与埋深、隧道顶的岩体重量有关, 且与水平应力相等。1925—1926 年, 前苏联金尼克(Jinnet)根据弹性理论, 分析得出垂直应力 $=\gamma H$ 、水平应力 $=\mu\gamma H/(1-\mu)\gamma H$ (γ —岩体重, μ —泊松比, H —深度)。

海姆、金尼克的理论都没有考虑构成应力, 是建立在假设只有自重应力的基础上, 海姆的理论是金尼克的理论的一种情况($\mu=0.5$), 在地势平坦、构造应力不突出的地方, 这一理论符合实际的情况, 因此他们的理论长期广泛应用于工程设计中, 长达半个世纪。1926 年, 中国地质学家李四光曾经多次指出, 由于地球旋转尤其角动量(与旋转速度周期性变化有关)造成许多地质条件下的水平应力可能远远超过垂直应力, 李四光把地球自动调节自转速度变化的作用称为“大陆车闸作用”, 他的预言, 后来被世界上许多地区的地应力测试结果证实了。

(2) 地应力的实测

在斯堪地那维亚半岛, 哈斯特(Hast.N)^[5]从 1951 年开始进行大量的地应力测试, 随后加拿大、美国、南非、澳大利亚等国也大量地开展了地应力测试的工作。一些岩石力学国际会议及国际大坝会议也涉及地应力测量问题。1969 年, “岩体内应力测定”国际讨论会在里斯本召开, 1976 年 8 月在澳大利亚悉尼召开了“岩体内应力的研究——应力测定的进展”讨论会, 1977 年 4 月在苏黎世召开了“岩石力学现场测量”国际讨论会。20 世纪 70 年代以来, 我国建设了大量的大型水利采矿等工程, 给地应力的研究提供了条件, 国家地震局、武汉岩石研究所等分别对大型水利水电工程(如大型水利水电工程鲁布革、万家寨、二滩、龙羊峡拉西瓦、小浪底、小湾、万家寨、三峡、采矿区金川矿区^[7-14])进行了大量的富有成效的地应力测量研究, 为工程的顺利完成打下了基础。

1.3.3 地应力场测试与分析方法

一般情况下, 地应力值通过现场实测取得, 但是因为实测费用昂贵、时间长、现场试验条件有限等原因, 测点样本有限且代表性不强。如果能得到较为准确的地应力, 可以进一步采取不同侧压比来模拟地应力场进行必要的设计、施工安全分析。现场实测方面, 20 世纪 70 年代加拿大^[15]修建的买加电站厂房, 采用的是实测法, 实测数值如下: 垂直应力 $\delta_v=5.52\sim 8.23\text{MPa}$ 、水平应力 $\delta_H=5.52\sim 11.03\text{MPa}$, 因而 $\delta_v/\delta_H=1.0\sim 1.5$ 。在工程洞群围岩稳定数值分析时, 把实测值以均布荷载移的形式置于外边界, 分别对侧压比为 1 及 1.5 两个种情况进行有限元分析。

采用数值计算与单个实测值相拟合, 20 世纪 80 年代日本^[16]石田毅等人在建抽水蓄能电站时, 采取埋设法和孔底法进行了地应力的研究, 通过多组地应力测试, 经过用最小二乘法的分析对比选出具有代表性实测地应力, 并且选取了足够大的计算域, 进行平面有限元分析。石田毅等人利用分析应力场进一步解释应力值, 进行有限元分析。随着重大工程的建设, 我国提出了一些新的研究地应力的方法。具体方法有: 边界荷载调整法、有限元数学模型多元回归分析法、应力函数法等。中科院武汉岩土力学所丰定详^[17]提出边界荷载调整法, 在给定求解域的边界上, 调整边界的应力场和重力场, 反复调整边界载荷求出地应力场, 使得给定的测点处的应力计算值与实测地应力值近似到一定精度, 这个应力场作为所求应力场。

有限元数学模型多元回归分析法。1982年,天津大学郭怀志教授等提出用有限元数学模型多元回归分析的方法来计算模拟地应力场^[18]根据地形地质勘测、试验资料确立建立地应力与特定因素多元回归方程,进而确定有限元计算模式,把可能形成初始地应力场的因素,通过数理统计方法使残差平方和达到最小。求解过程中,进行筛选特定因素,以取得回归方程中各待定系数的唯一解。

应力函数法。1984年,张有天教授提出^[19]根据地应力场分布和弹性理论,进一步利用多项式应力函数,根据实测应力值及地表边界条件,在给定的观测点上,使该函数计算应力值与实测值相拟合,对应力场进行趋势分析。

三维初始应力场反演与应力函数拟合方法。肖明教授提出^[20]根据地应力实测资料、山体的地形状况以及岩体的地质构造、力学性质等因素,利用三维弹塑性有限元,进行从其地形地貌的演变过程去追溯初始应力场的形成的分期开挖计算,然后根据数值解对反演计算初始应力场,用三维正交多项式拟合计算出三维应力函数^[21]。

1.3.4 爆破振动对开挖隧洞影响

关于隧洞掘进爆破地震效应的研究,国内外有关学者主要是结合爆破振动现场测试和实验室试验,利用概率统计的方法对爆破地震波的传播规律及其对地下建筑物的影响进行了较为全面的研究,取得了一些区域性特定岩土介质的爆破地震衰减规律的经验公式和一些较为有效的隔震和减震措施;同时探讨分析了爆破地震波传播的影响因素,对地震波与结构之间的相互作用机理也进行了一定程度的研究。

由于爆破地震传播介质的复杂性和不确定性,目前主要以地面质点振动速度或峰值加速度等为测试参数,研究爆破地面振动及爆破地震波的衰减规律,在对观测资料统计分析的基础上,建立了以萨氏公式为参考的区域性的经验公式,反映了爆破地震波参数随药量、距离、地形参数和地质条件的衰减规律。

C.A.科泽列夫等^[5]认为,在爆区和被保护目标之间是否存在采空洞室,对地面建筑物的影响是不一样的。根据实测数据,得到了如下规律:在爆区与被保护目标之间未有采空区隔开,其位置处于半径 $R < 1000\text{m}$ 的半球面外边界时:

$$V = 145K_{y-B}K_aK_r \left(\frac{R_\Phi}{\sqrt[3]{1.5q_{cr}}} \right)^{-1.034} \quad (1.1)$$

在爆区与被保护目标之间有采空间隔开,其位置处于半径 $R < 1000\text{m}$ 半球面外边界时:

$$V = 207K_{y-B}K_aK_r \left(\frac{R_\Phi}{\sqrt[3]{1.5q_{cr}}} \right)^{-1.55} \quad (1.2)$$

式中: K_{y-B} —和爆破条件有关的系数; K_a —考虑爆区相对于被保护目标方向的系数; K_r —考虑与表层土厚度相关的土壤振动增强系数。

由于受到表面波和反射波的影响,地表测点比地下测点振动幅值要大。表面波仅沿地表传播,影响深度仅约一个波长深度,随地下深度增加不是等速率变化,而呈指数衰减,波能集中在界面附近,近地表处衰减快,随深度增加衰减变慢。文献[6]指出,地震波随地下深度变化的衰减规律为:地表测点振动大,衰减快,地下测点与地表相比,振动小,衰减慢。随着深度增加,振动波在地下向周围扩散的能量损耗也逐渐增加。

地下振动加速度与地表值的经验关系式为^[7]:

$$\text{水平方向: } \alpha_{\text{地下}} = \alpha_{\text{地表}} e^{-2h/\lambda}; \text{ 垂直方向: } \alpha_{\text{地下}} = \alpha_{\text{地表}} e^{-13h/\lambda} \quad (1.3)$$

式中: h —从地表算起的地下深度, m; λ —面波波长, m。

Heelan^[8]采用叠加法计算了柱状洞室受有限长荷载作用下的动力响应。White^[9]采用互易定理也计算推导出细长洞室受低频有限长荷载作用时的动力响应。Abo-zhen^[10]指出了Heelan推导的误差,利用Laplace和Fourier变换研究了柱状洞室受有限长爆炸荷载作用时的动力响应,并给出了小洞径、低频荷载作用下的解析解。阳生权^[11]提出了爆破地震累积效应的概念,并应用断裂力学和损伤力学的理论,初步研究地下工程爆破过程中的爆破地震累积效应。李玉民等^[12]在实测数据的基础上,得到如下结论:地下工程产生的地面水平振动的主频较接近于建筑物的自振频率,与垂向振动相比更易与建筑物产生共振。同时指出,100ms微差间隔爆破不会产生叠加现象,25ms微差间隔则会产生波形叠加。王民寿等^[13]同时也指出:岩体岩性和构造的各向异性,决定了爆破振动的动力响应存在各向异性,使得等药量、等测距实测质点振速和振动频率是不相同的。

李铮与朱瑞赓等^[14、15]根据应力波理论和岩体动力强度与隧道所受动、静应力之和相平衡的条件,推导出爆破振动影响下处于弹性状态的无衬砌隧道出现裂隙、局部崩塌及大面积坍塌时岩土介质质点振动速度峰值临界值计算公式。边克信^[16]和林学文与欧阳戡等^[17]在分析和论述爆破地震对地下构筑物的破坏作用和破坏特征的基础上,制定出评价爆破振动对井巷稳定性的方法和标准。吴从根^[18]根据弹性振动理论推导出适应于弹性岩体的最大速度和最大应力计算公式。杨升田等^[19]观测发现地下洞室不同部位质点加速度峰值分布规律各异,并统计分析得到爆破地震波作用下岩土介质质点振动加速度峰值与比例距离、介质动力特征、药量和爆破方式的经验关系式以及地下洞室受临近洞室爆破影响的振动衰减规律经验公式。楼伪寿^[20]主要针对地下核爆炸观测研究中得到的质点振动位移随爆心距的衰减规律,在分析岩土结构构造性质对爆破地震波传播的影响时,指出由于岩体结构构造之复杂,少量的地运动动力学参数的测量结果很难直接反映真实的地运动动力学参数的规律。而刘兴昌^[21]则指出,地下洞室的爆破对建筑物不但有区别于天然地震波的高频影响,还存在冲击波的作用。由于冲击波沿基本封闭的地下洞室管状传播,传播、反射条件十分复杂,无露天爆破的扩散效应,对建筑物的质点振动速度影响极大,特别是对于类似岩壁梁的条状结构,不能排除整体振动的可能。

朱瑞赓等^[22]探讨和归纳了反映高程的爆破地震波的衰减规律的经验公式。杨桂桐^[23]和杨永琦等^[24]指出了岩土岩介质的动力特征,特别是岩性和构造决定爆破地震波的传播特性和衰减规律,并强调了土岩介质内部与地表振动效应的本质区别,认为地表振动效应比土岩介质体内部的要大,以及一定高度范围内振动具有放大效应。张志呈^[25]研究表明,爆破地震波的传播方向和质点振动速度峰值等值线导向系数受地形地质等因素的影响,并呈椭圆分布的趋势。文献[26]认为,不论地形多么复杂,地形的变化可以用高程的变化(高程差)近似表示,并且发现,高程差值为25~104m时,岩石中的水平方向的质点加速度增大1.23~3.04倍,垂直方向增大3.26~3.80倍。在表土中,水平方向增大1.18~1.53倍,垂直方向增大1.32~1.79倍。

1.3.5 爆破振动对邻近隧洞的影响

在爆破开挖对既有隧道的规律的研究中,也取得了一定的进展。就目前的情况来看,国内外在相邻隧道施工技术方面进行的研究,均偏重于现场振动监测分析,而进行理论分析的较少。刘慧等^[27]指出:目前所采用的地下建筑物的地震应力状态的准静应力法,对近距爆破作用下隧道的动态响应问题并不适用。在波动力学中,爆炸应力波在传播过程中与地下结构物相互作用的问题,可以看作无限介质中弹性波在孔洞周边绕衍所引起的动

应力集中问题,对这一问题的研究始于20世纪50—60年代,主要有波函数展开法、复变函数法以及积分方程法、摄动法等。文献[28]表明,只有当反射面足够大(指洞室的特征尺寸,如洞径)并且波的作用时间不小于几个毫秒时,拉断临界速度才符合一维应力波理论所代表的强度极限和强度破坏理论;如药包很小,即使反射足够大,反射波引起的质点速度比临界速度大很多时,也不会观察到破坏现象:当自由面很小时,即使质点速度很大,作用时间很长,仍不会观察到破坏现象。Baorn等^[29]利用波函数展开法研究了弹性介质中圆柱形孔洞对压力波的散射问题;Lofcher^[30]研究了压力波散射作用下柱形岩石洞室的破坏机理。Miklowitz^[31]对平面压力脉冲与圆柱形洞室的相互作用进行了较深入的研究。由于适用于波函数展开法和积分变换方法的坐标系统极其有限,Mow等^[32]将摄动法引入波动力学中,计算了充满流体的洞室的动应力问题:对于瞬态波与地下洞室相互作用的研究,可以使用Fourier综合技术将结构中的稳态动应力状态转换到“时域”,实现地下结构在受随时间变化的任意应力波作用之下的动力分析。杨年华等^[33]分析了近距离爆破造成的隧道周边振动场分布规律,指出最大振动速度出现在爆破振动波正入射部位的墙壁和拱部,墙脚点振动速度较小,背爆侧振速只有迎爆侧1/25。刘加尧^[34]从开挖顺序、掏槽形式、循环进尺的确定,微差爆破的使用以及周边空孔的设置等方面进行了探讨,提出了减震的新措施。另一方面,随着计算机应用的迅猛发展和有限元、边界元等在力学计算中日益广泛、深入的应用,系统地研究爆破作用下隧道围岩的动应力场的分布规律及动静应力场的叠加作用机理成为可能。赵以贤等^[35]应用有限元方法分析了爆炸荷载作用下地下结构拱形结构与土介质的动力相互作用问题,并指出弹性解与弹塑性解的差别较大,建议地下结构不宜采用弹性解。钟放庆等^[36]利用广义反射、透射系数矩阵和离散波数方法,计算了水平分层花岗岩介质中近场速度垂直分量波形,并通过对实测波形的拟合,得到了地下爆炸激发的地震震源函数。卢文波等^[37]通过对爆破地震波传播过程的衰减规律的研究,提出了由典型单孔爆破实测振动波形来确定常规生产爆破情况下,爆源中、远区的爆破振动场的模拟方法。

贾光辉等^[38]采用非线性有限元分析手段,对爆破地震波对地下结构物的影响进行了数值模拟,得出两个主要结果:介质质点振动速度的传播规律(有效峰值持续时间,随传播距离的增大呈增大趋势);结构响应特征(垂直振动是爆破地震波作用下结构振动的主要成分)。杨升田等^[39]运用动态有限元法分析了某一地下岩洞在附近一空腔耦合的条形爆源的作用下(主要针对爆炸荷载波形)岩洞的动力反应。李铮等^[40]运用动态有限元法对爆炸应力波作用下岩洞的动力稳定性问题进行了一系列的研究。谭忠盛等^[41]采用有限元法分析了复线隧道掘进施工中,爆破振动对既有隧道的影响,得出了各振动参数的时间历程。随着高速大容量计算机的出现,数值方法已经被用于模拟更为复杂的工程问题。

总之,对于隧道掘进爆破振动作用及安全影响这一问题,需要从爆炸应力波参数作用于岩石的条件以及洞室结构特性等多方面综合考虑,进行更深入的动力计算分析和结构动力模型研究,特别是探讨爆破设计参数与爆破方式的影响,从而弄清隧道掘进爆破振动传播规律及对地下和地上结构破坏的实质,提出合理的安全影响分析方法。

1.3.6 围岩松动圈声波测试方法

岩体声波测试方法是利用声波作为信息载体,测量声波在岩体内传播的波速、振幅、频率、相位等特征,来研究岩体的物理力学性质、构造及应力状态的方法。在岩体中,超声波的传播速度与岩体的密度及弹性常数有关,受岩体结构构造、地下水、应力状态的影响。

响, 波速随岩体裂隙发育而降低, 随应力增大而加快。通过测试超声波在巷道围岩一定深度范围内的传播速度, 根据波速的变化, 就可以判定围岩的松动范围。

超声波方法测试松动圈的主要优点是测试技术成熟可靠, 原理简单, 仪器可重复使用; 缺点是工作量大, 抗干扰性差。超声波测试时需要注水耦合, 当围岩比较破碎、破裂岩体波速与水的波速差别不大时, 不能明显判断松动圈范围^[12]。

1.3.7 围岩松动圈多点位移计量测方法

松动范围内岩石由于破裂缝的产生与扩展, 碎胀变形较深部未松动围岩的变形量要大, 通过在钻孔中不同深度安设围岩内位移测点, 观测围岩内位移的变化趋势, 变形速度及变形量突然增大的区域即为松动圈的边界^[12]。

多点位移计量测法的优点是测试数据可靠, 测试原理明确, 操作简单; 缺点是观测工作量大, 仪器费用高, 测试精度较低, 监测时间长。多点位移计量测法适用于变形量大的软岩。对于变形量小的围岩, 由于其精度有限, 难以采用该方法^[12-14]。

1.3.8 围岩松动圈探地雷达测试方法

探地雷达利用主频为 $10^6 \sim 10^9 \text{Hz}$ 波段的电磁波, 以宽频带短脉冲的形式, 由地面通过天线发射器发送至地下, 经地下目的体或地层的界面发射后返回地面, 被雷达天线接收器所接收, 通过对所接收的雷达信号进行处理和图像解译, 达到探测前方目标体的目的^[13]。对采集的数据进行编辑、处理, 可得到不同形式的探地雷达剖面, 对探地雷达剖面进行解释, 即可得到所测结果。工作原理如图 1.7 所示。

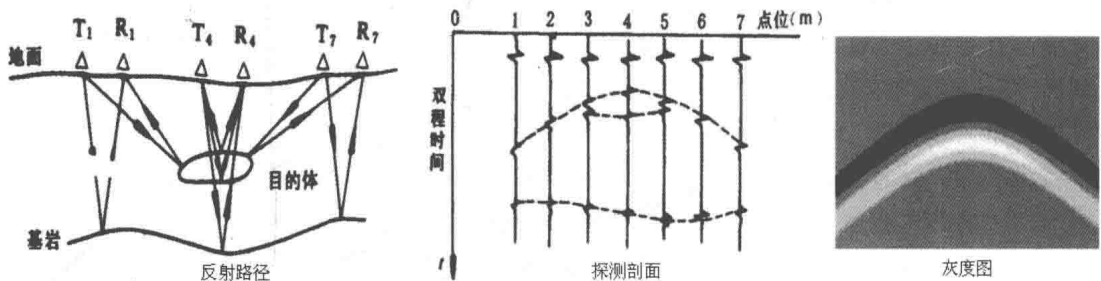


图 1.7 探地雷达工作原理图

探地雷达探测法的优点是: 不需钻孔, 精度、效率和分辨率较高, 操作简单, 抗干扰, 剖面直观, 适应能力强; 缺点是仪器昂贵^[12, 15-30]。探地雷达探测法适用广泛, 可用于围岩的含水层、裂隙带、断层等灾害隐患的探测, 围岩超前地质预报等。

1.3.9 围岩松动圈其他探测方法

(1) 地震波法。地震波在不同性质岩石或同一岩层中传播时, 由于岩石强度、孔隙度、裂隙、密度的差异, 具有不同的速度。其波速测试原理是直接利用总波的到时拟合曲线, 进行岩层速度对比与判断。目前, 国内研制的矿井智能资源探测仪, 设有专门的松动圈测试功能。地震波法的优点是测试在围岩纵向进行, 测试隧道围岩范围大, 数据可靠、快速; 缺点是仪器较贵, 探头布置、仪器安装困难^[12]。地震波法在日本应用较多, 国内应用较少。

(2) 渗透法。当岩体有较多裂隙生成和发展时, 渗透率将变大, 找出渗透率大的范围就能测试出松动圈范围。其优点是测试原理简单; 缺点是对软岩和遇水膨胀的岩层, 测试难度大, 工作量大^[12]。