

深埋长大隧道施工 风险分析与控制技术研究

赵延喜 著

中国建筑工业出版社

深埋长大隧道施工 风险分析与控制技术研究

赵延喜 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

深埋长大隧道施工风险分析与控制技术研究/赵延喜
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 9
ISBN 978-7-112-22660-3

I. ①深… II. ①赵… III. ①深埋隧道-长大隧道-隧道施工-风险分析-研究②深埋隧道-长大隧道-隧道施工-风险管理-研究 IV. ①U459. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 205405 号

本书是作者课题研究的成果总结。全书共包括: 绪论、深埋长大隧道施工风险识别研究、深埋长大隧道施工风险估计研究、深埋长大隧道施工风险评价研究、深埋长大隧道施工风险应对研究、超长水底隧道火灾及结构安全风险评估等内容。

全书适合隧道工程专业的施工、设计、科研等专业人员阅读。

责任编辑: 张伯熙

责任校对: 王 瑞

深埋长大隧道施工风险分析与控制技术研究

赵延喜 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 14 字数: 242 千字

2018 年 8 月第一版 2018 年 8 月第一次印刷

定价: 65.00 元

ISBN 978-7-112-22660-3

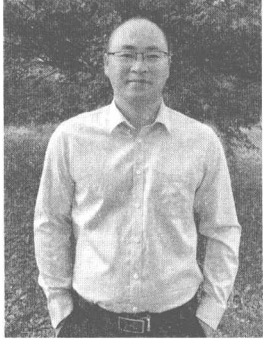
(32774)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

作者简介



赵延喜，1980年11月生，河南南阳人，河海大学博士，东南大学博士后，国家注册土木（岩土）工程师、一级注册建造师。现任南京工程学院市政工程系主任，岩土及地下工程学科带头人。

主要从事岩土工程、隧道与地下结构风险分析和地下工程与周边环境相互影响等相关的教学与科研工作。目前，已参与国家自然科学基金项目2项，主要完成国家“十一五”科技支撑计划项目1项，主持江苏省自然科学基金项目1项、校级项目2项，同时主持和参与多项横向课题。已在《Advances in Civil Engineering》、《岩土力学》、《岩石力学与工程学报》、《中国矿业大学学报》等期刊上发表学术论文20余篇，其中被SCI、EI检索论文7篇。主编教材1本，授权专利4项。2016年受资助赴美国德州大学阿灵顿（UTA）分校访学，现兼任全国高等学校城市地下空间工程专业规划教材编委会委员。

前 言

随着我国经济建设进程的加快，为解决在能源、交通、矿产等方面的极大需求，在地形、地貌及地质条件复杂的西部地区，修建了越来越多的深埋长大隧道，在隧道建设过程中面临极大风险。目前风险分析与管理理论在工程中得到了大量应用，取得了巨大成就，许多方法已经比较成熟，如概率风险分析等。在这方面，国外研究较早且应用广泛，在国内，风险技术也逐渐得到了业界的普遍认可。对于深埋隧道工程，目前的研究比较倾向于风险管理，即通过定性方法对隧道前期工作、合同、设计、施工等各个阶段遇到的风险进行分析、评价，还未形成比较系统的定性定量分析方法。特别是对于深埋长大隧道施工风险研究较少，对于施工过程中的失效模式、失效机理、系统综合失事风险、风险接受准则等研究更少。

开展深埋长大隧道施工风险研究，研究其主要失效模式及机理，对隧道施工风险识别、风险估计、风险评价模型及系统综合风险进行分析、评价，为风险决策、预警提供支持，具有重要的理论价值和学术意义。有鉴于此，徐卫亚教授成功申请了国家科技支撑计划课题“西线超长隧道TBM施工关键技术问题研究(2006BAB04A06)”，针对上述问题的研究意义进行了阐述。自此，在徐卫亚教授的指导下，本书作者完成了“深埋长大隧道TBM施工风险理论研究及其工程应用”博士学位论文的课题研究，温森博士和徐茜硕士也结合该课题相继完成了学位论文。为了让该课题能够继续研究，本书作者于2009年完成博士学位论文内容的研究后，相继成功地申请了江苏省自然科学基金和南京工程学院校级科研基金的资助，继续开展隧道建设过程风险理论及其工程应用的研究。因此，该专著的主要研究成果参考了徐卫亚教授、加上温森博士（现就职于河南大学）和徐茜硕士在研究生学习期间及毕业后工作期间的部分研究成果。在此，作者对一系列课题资助的相关部门一并表示感谢！同时，作者以此专著的出版对徐卫亚教授给以本课题开创性的指导工作和大力支持表示深深的感谢！

在本书涉及的课题研究过程中，得到了江苏省自然科学基金项目

(BK20150726)、南京工程学院高层次引进人才科研启动基金项目(YKJ201430)、江苏省学位与研究生教育学会立项课题(XYH032)的资助,得到了天津城建大学刘中宪教授的支持和鼓励。本书的出版也得到了南京工程学院科技处、人事处、建筑工程学院的大力支持,对此表示衷心的感谢!

作者虽长期从事隧道工程风险分析领域的科学研究与工程实践,但限于知识面的局限性,书中难免存在缺点和错误之处,敬请读者批评赐教指正。

赵延喜

2018年7月于南京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景和意义	1
1.2 国内外工程风险研究现状	2
1.3 国内外隧道工程风险研究现状	5
1.4 研究课题的提出及本书研究内容	7
第 2 章 深埋长大隧道施工风险识别研究	9
2.1 引言	9
2.2 风险发生机理及风险识别.....	10
2.3 深埋长大隧道施工风险识别研究.....	15
2.4 深埋长大隧道风险识别主要内容.....	17
2.5 国内外隧道施工灾害统计.....	18
2.6 深埋长大隧道施工风险失效模式研究.....	20
2.7 基于 FTA-AHP 的隧道施工风险识别模型	22
2.8 隧道破坏对 TBM 施工的影响	40
2.9 本章小结.....	42
第 3 章 深埋长大隧道施工风险估计研究	43
3.1 引言.....	43
3.2 风险率计算模型构建基本理论.....	44
3.3 隧道施工时涌水风险概率分析.....	45
3.4 隧道施工时岩爆风险概率分析.....	51
3.5 隧道施工 TBM 被困风险概率分析	81
3.6 板裂结构围岩破坏风险研究	102
3.7 软岩挤压变形破坏风险	114
3.8 基于模糊概率的深埋隧道风险概率计算模型	122
3.9 隧道施工时高地温风险概率分析	126
3.10 隧道施工时有害气体风险分析.....	134
3.11 隧道施工时塌方风险分析.....	141

3.12	隧道施工时通风风险分析	143
3.13	隧道施工 TBM 选型风险分析	144
3.14	隧道施工时地震影响风险分析	148
3.15	单元洞段隧道施工风险综合风险率模型	149
3.16	深埋隧道失事风险概率求解方法研究	149
3.17	隧道施工风险失事后果估计模型研究	151
3.18	本章小结	154
第 4 章	深埋长大隧道施工风险评价研究	155
4.1	引言	155
4.2	国内外风险接受准则研究现状及不足	156
4.3	基于深埋长大隧道施工的风险接受准则	159
4.4	基于模糊综合评判的 TBM 施工风险评价模型	169
4.5	风险预警	179
4.6	本章小结	179
第 5 章	深埋长大隧道施工风险应对研究	181
5.1	引言	181
5.2	常用的风险应对方法	181
5.3	深埋长大隧道施工风险处置措施	182
5.4	本章小结	187
第 6 章	超长水底隧道火灾及结构安全风险评估	188
6.1	引言	188
6.2	火灾风险分析	189
6.3	逃生分析	191
6.4	火灾风险度分析	194
6.5	消防安全水平分析	195
6.6	基于有限元法的隧道结构安全性评价	196
6.7	本章小结	202
	参考文献	204

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景和意义

随着我国经济建设进程的加快，为解决在能源、交通、矿产等方面的极大需求，在地形、地貌及地质条件复杂的西部地区，修建了越来越多的深埋长大隧道。如锦屏二级水电站引水隧道，全长约 17.10km，最大埋深 2525m。目前，深埋隧道的施工方法主要有钻爆法（Drill Blast, DB）、隧道掘进机法（Tunnel Boring Machine, TBM）及二者相结合的方法。由于 TBM 具有快速、高效等施工优点，在工程中得到越来越多的应用。但是 TBM 对于地质适应性较差，由于工程区的地理条件特殊，掘进过程中不良的地质条件易导致大量灾害发生，如高压涌水、岩溶、断层、膨胀岩、高地应力等，以及 TBM 选型失误、通风设备选择不当等，这些不确定的因素都将成为引发隧道工程事故的风险因子，严重威胁掘进机的安全与工程的顺利进行，导致各类风险事故发生，例如：

1987 年，位于意大利—奥地利边界的戈森萨斯隧道，当导坑掘进到 1284m 时，发生了坍塌，大量地下水涌入，直接导致掘进机后配套系统部分被埋，使得工程停工两个月。

1975 年，法国 Coche 输水隧道施工过程中，在断层处发生大涌水，长达 100 多米隧道受淹，清理隧道和掘进机花费 8 个月时间。

我国天生桥二级水电站引水隧道在施工中，多次发生岩爆、涌水、塌方、大变形等地质灾害。

1999 年，我国引黄工程南干线 5 号隧道南段施工的掘进机，遇到天然大溶洞而被迫停机，处理工作花费 10 天时间。在南干线 7 号隧道掘进过程中，磨沟岭断层遇到大范围的破碎带，拱顶发生严重坍塌，大块岩体将刀盘和护盾卡住而被迫停机，处理工作花费 3 个月。

2006 年，我国大伙房引水工程掘进机通过不良地质地段，岩体非常破碎，多次塌方，刀盘埋入，出现多次停机事故。

由此可见，深埋长大隧道 TBM 施工存在着高风险。

当前，欧美国家在隧道工程的风险管理方面走在前列，我国也取得了部分成果，但对于深埋长大隧道 TBM 施工风险，无论国内或国外都仅仅是从定性方面进行初步的探讨，缺乏系统的研究和定量的分析。因此将风险理论运用于深埋长大隧道 TBM 的施工过程中，对 TBM 施工进行风险分析、风险评价以及风险管理，无疑是工程安全与稳定的充分条件和必要保障，对于深埋长大隧道工程的施工安全具有十分重要意义。

深埋长大隧道工程的所有问题最终都归结于围岩变形及围岩稳定性，如果隧道围岩变形过大，或者围岩不稳定，必然导致工程失效，深埋长大隧道围岩变形与稳定性问题严重地影响着工程的技术可行性和经济合理性。而且，埋深的增加使得高地应力问题日益突出，例如，拉西瓦水电站地下厂房洞室群最大主应力为 29.7MPa；锦屏一级水电站地下厂房区最大主应力值达到 37.5MPa；锦屏二级水电站的引水隧道实测最大主应力值高达 42.4MPa；南水北调西线工程隧道埋深最大埋深达到 1150m，开挖时可能会遇到 40.0MPa 左右的高水平挤压应力。

由于深埋隧道在施工过程中存在大量的不确定性因素，一切不确定性因素是风险存在的根源。TBM 施工是个极其复杂的系统工程，不确定性不可避免，使得隧道存在失事和破坏的风险，严重影响 TBM 施工顺利进行。基于此，将风险理论应用于 TBM 施工中，对 TBM 施工系统进行风险分析和风险评价，开展深埋长大隧道 TBM 施工风险研究，研究不同洞段 TBM 施工失效模式及其机理，研究其对 TBM 施工的影响，深入分析不同失效模式风险计算模型及系统综合风险，为风险处理、风险决策、预警提供支持，具有重要的理论价值和学术意义。

1.2 国内外工程风险研究现状

1. 风险的概念

风险有许多定义，风险是由不确定性因素产生的某种程度损失的机会，风险包括的范围很广，涉及经济、安全、社会等各个领域，不同的领域所指的风险是不同的。但基本上风险包括两个方面：风险事件发生的概率和该事件导致的后果。即：风险 = 概率 × 后果。

风险分析是通过对施工中存在的风险进行识别、对风险概率和后果进

行估计的过程，风险管理则是通过研究风险识别、风险估计、风险评价、风险处理与决策、风险监控，完成对整个风险的管理，是一个系统的流程，图 1.2-1 为一般风险管理流程。

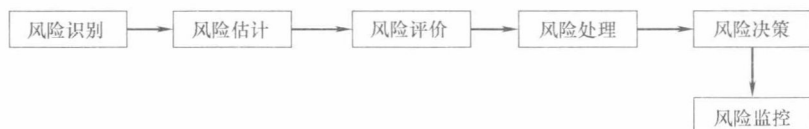


图 1.2-1 风险管理流程

目前主要的风险分析方法有：定性分析法、定量分析法、定性定量综合分析法。定性分析法主要是结合专家调查，专家依靠自身的经验，对风险发生概率和损失进行定性打分，虽然方便，但难以准确量化，主要的方法包括：智暴法、德尔菲法、外推法、安全检查表法等。

定量法主要依靠试验数据或历史统计数据，通过建立数学模型，采用不确定分析方法，对分析进行准确量化，又可称为概率风险分析法 (Probability Risk Analysis, PRA)，但现实中数据收集往往比较困难，且计算过程复杂。定量分析法主要有：蒙特卡罗法、敏感性分析法、随机有限元法等。

为了解决定性方法和定量方法的缺点，可采用定性定量相结合的方法来进行风险分析，该方法有两种：定性半定量法，如风险矩阵分析法、层次分析法、模糊综合评价法；定量半定性法，如 CIM 模型和影响图法等。

2. 国内外工程风险研究现状

国外将风险分析技术引入到工程应用的时间较早，已经在工程实践中得到大量应用，许多学者也根据不同的工程实例，从不同方面提出了相应的研究方法、分析模型。风险分析其实是对不确定性的研究，R. G. van der Vegt (2018)^[1]对澳大利亚液化天然气的风险管理和风险治理过程进行了回顾性分析。R. G. van der Vegt (2017)^[2]针对地震工程的风险，提出了风险管理框架。H. S. B. Duzgun 等 (2002)^[3]通过深入研究不连续岩体剪切强度中存在的不确定性，提出了一个用于估计岩质边坡非连续剪切强度的不确定性分析模型。H. S. B. Duzguna & K. K. Panthi (2004, 2007)^[4-5]研究了工程中存在的确定性。V. Kreinovich & S. A. Ferson (2004)^[6]认为处理不确定性问题时，往往需要大量的数据，但是在现实中缺少足够的统计数据，因此，提出了一个新的黑箱技术来处理工

程中遇到的不确定性。Azm S. Al-Homouda&Najat Tanash (2004)^[7]考虑到堤防坝基的不确定性、空间的可变性、抗剪强度参数的相关性以及孔隙水压力的不确定性,提出了一个评价大坝稳定性的三维可靠度边坡分析模型。T. Nilsena&T. Avenb (2003)^[8]分析了风险分析中的模型不确定性,并对模型不确定性进行了准确定义,提出了如何量化模型不确定性的方法。Abdallah I. Husein Malkawi 等 (2000)^[9]分别采用两种不确定分析方法,即一次二阶矩法和蒙特卡洛法来分析边坡稳定的可靠度,并与常规的四种极限平衡方法进行对比,得出了有益的结论。其他学者也针对可靠度、模糊数学在工程中的应用进行了分析^[10-17]。

Jason Michael Woodruf (2005)^[18]认为英国的健康和安全风险半定量评价与实际存在差异,建议不去量化风险,而是考察风险是否落入不可容忍区、可容忍区,或可接受区,用相应的准则去评价这些风险。风险评价是制定决策的必要步骤,合理的风险评价方法可以减少业主的花费,Freija H. van Duijne 等 (2008)^[19]详细分析了风险管理的前期阶段,并说明了风险管理后面阶段的难点,提出了比较合理的风险管理准则。为了改善意大利和奥地利之间的交通,修建了连接 Fortezza 和 Innsbruck 的隧道,由于该地区地质条件复杂,Andrea Bistacchia 等 (2008)^[20]建立了一个分析该隧道变形稳定的三维不确定性地质模型。Qihu Qian 和 Peng Lin (2016)^[21]对中国地下工程安全风险管理的进展、挑战与对策进行了分析。Hou Zhiqiang 和 Zeng Yamei (2016)^[22]对港口工程重大危险源风险评估技术进行了研究。

传统的失效模式和后果分析方法(FMEA)需要准确确定各失效模式的发生概率、严重程度及可被检测程度,事实上很难在操作中实现^[23-36]。因此 Ying-ming Wang 等 (2008)^[37]提出用模糊权重几何平均数来描述这些参数,并用一个数值案例来证明其实用性。Matthew J. Purvis (2008)等^[38]将水位视为不确定性因子,提出一个用于估计沿海发生洪水风险概率的计算方法。中国香港地区的 Tuen Mun Road 高速公路扩宽工程存在岩质高边坡,要求进行风险设计,将不同截面的可接受风险水平、不同边坡破坏模式考虑到边坡安全设计中,R. J. Pine&W. J. Roberds (2005)^[39]介绍了相关设计方法。对于风险接受准则、风险应对方法,很多学者也做出了有益的尝试^[40-104]。

张弛等 (2013)^[105]以深基坑施工为例,基于模糊数学的相关理论建立了深基坑施工对周边环境影响的模糊风险评估模型。井文君等

(2012)^[106]基于可靠度方法对盐岩地下储气库腔体收缩风险进行了分析。冯平等(2007)^[107]以可靠度为基础,计算了串联系统引水工程交叉建筑物的综合风险,并以南水北调中线工程河北省北段为例进行了分析。徐卫亚等(2006)^[108]建立了超标洪水下堤防失事风险概率综合模型,并提出了相关计算方法。姚怡文等(2007)^[109]采用模糊综合评定法与可信性风险分析方研究了非开挖工程的总体风险。王多全(2007)^[110]研究了风险管理在建筑现场安全管理中的实际应用。陈在铁(2006)^[111]建立了基于结构可靠度理论的高拱坝失效概率故障树模型。龙小梅和陈龙珠(2005)^[112]应用故障树分析法对基坑排桩支护结构体系和放坡开挖体系进行了研究。也有的学者在建筑工程深基坑、地震等方面进行了探索^[113-118]。王宏伟等(2007)^[119]将全面风险管理理念引入到大型工程项目管理中。徐卫亚等(2006)^[120]对堤防失事风险分析和风险管理进行了研究。廖少明等(2006)^[121]以地铁基坑工程大量监测数据为基础,通过数据挖掘方法提供了一种发现和控制工程风险的办法。姜树海和范子武(2007)^[122]以渗流随机量的时变特性分析为例,论证了采用 Bayes 方法对时变随机量进行定量评估的可行性和适用性。对于可靠度的研究,也有许多成果^[123-125]。何锡兴等(2006)^[126]对上海某深基坑采用 WBS 与故障树法建立风险清单,采用模糊综合评判模型进行风险评估。边亦海和黄宏伟(2006)^[127]对深基坑开挖引起的建筑物破坏开展了风险评估。张贵金和徐卫亚(2005)^[128]对岩土工程存在的风险进行了分析,研究了岩土工程不确定性的根源及分析方法、降低不确定性的途径等。

1.3 国内外隧道工程风险研究现状

国外进行隧道工程风险研究较早。Cardarelli 等(2003)^[129]利用综合的地质方法对隧道稳定性进行了评价。A. C. W. M. Vrouwenvelder & A. H. M. Krom(2004)^[130]对隧道结构易出现的灾害和后果进行了详细分析研究。H. Einstein 等(1994)^[131]对瑞士 Alder 隧道工程风险进行了分析。H. H. Einstein(1996)^[132]对岩石工程中遇到的风险进行了分析,并基于相应的案例进行了应用说明。

而在国内虽然对于隧道工程风险研究较晚,但也取得了很多成果。张生学(1994)^[133]研究了宜(昌)万(州)铁路岩溶隧道施工中存在的风险

险。安政翔和季玉国 (1994)^[134]对大型泥水盾构隧道施工安全与施工风险进行详细全面分析,指出了存在的施工安全风险。周红波等 (1994)^[135]结合上海地铁7号线工程,对地铁盾构法隧道工程建设风险进行了识别,研究了盾构法隧道些典型风险的应对措施。陈亮等 (1994)^[136]结合盾构隧道施工风险管理软件的研发情况,对数据库的概念模型、物理模型设计工作进行了详细描述。田林钢和吴迪利 (1994)^[137]采用层次分析法对南水北调中线工程西甘池隧道施工风险进行了分析。

隧道及地下工程建设风险管理的主要难点、风险分类及影响要素众多^[138-144]。陈龙和黄宏伟 (1994)^[145]通过统计数据对软土地铁盾构隧道施工期所产生的事故损失进行了统计分析。张贵金和杨松林 (1994)^[146]以南水北调西线工程深埋大直径无压引水隧道为例,研究了围岩流变风险。王玉喜 (1994)^[147]研究了大包电气化改造六座新建双线铁路隧道工程的安全风险。毛儒 (1994)^[148]介绍了国外隧道工程风险分析的方法和措施。胡群芳和黄宏伟 (1994)^[149]分析和讨论了隧道及地下工程风险接受准则制定方法,建立了统一的风险接受准则计算模型。黄宏伟 (1994)^[150]针对隧道及地下工程建设中的特点,对风险的定义、风险发生的机理、目前国内外研究进展、当前实施风险管理中存在的主要问题、以及风险管理研究的发展等进行了讨论。郭明香等 (1994)^[151]针对静态风险分析中存在的缺陷,提出了实现动态分析的方法。张云飞和赵云胜 (1994)^[152]从动态系统风险管理的观点出发,建立了隧道施工期的风险管理体系。路美丽等 (1994)^[153]对隧道与地下工程风险评估方法进行了分析探讨。周建昆和吴坚 (1994)^[154]利用事故树理论分析了岩石公路隧道塌方风险。张少夏和黄宏伟 (1994)^[155]针对影响隧道工期的风险事件进行了定性定量分析。王燕等 (1994)^[156]利用故障树模型对钻爆法施工隧道塌方风险进行了分析。朱合华等 (1994)^[157]运用风险分析方法,分析了饱和软土地层中施工管幕法隧道时在管幕顶进精度、管幕顶进阻力等方面存在的风险,得出了工程的总体风险水平。闫玉茹等 (1994)^[158]对大连湾海底隧道钻爆法施工风险进行了评估,并提出了相应的建议。侯艳娟和张顶立 (1994)^[159]利用模糊数学综合评价法对浅埋大跨隧道穿越复杂建筑物安全风险进行了分析和评估。姚浩等 (1994)^[160]采用模糊综合评价模型,对软土地区土压式盾构掘进施工风险进行了研究。付磊等 (1994)^[161]运用层次分析风险评估法,对隧道工程可行性研究阶段的地质风险进行了评估。陈龙和黄宏伟 (1994)^[162]借鉴日本等国家20年来有关

岩石隧道事故灾害的统计资料,对目前岩石隧道建设过程中的风险因素进行了分析。赵延喜等(2015)^[163]对南水北调西线工程深埋隧洞岩爆风险进行了分析及预测。赵延喜和徐卫亚(2010)^[164]采用模糊随机方法,推导出了大变形隧洞稳定的模糊概率模型。温森等(2014)^[165]对隧洞变形引起的TBM施工事故综合风险进行了深入分析。

1.4 研究课题的提出及本书研究内容

1. 研究课题的提出

通过对国内外风险分析与管理技术在不同工程中应用的理论与方法的回顾,对隧道工程风险分析与管理的内容、方法、模型研究进展的详细综述与分析,可以看出风险分析与管理理论已经在工程中得到大量应用,取得了巨大的成就,许多方法已经比较成熟。相比较来说,国外研究较早且应用广泛,在国内,风险技术也逐渐得到了业界的普遍认可。对于隧道工程,目前的研究比较倾向于风险管理,即通过定性的方法对隧道前期工作、合同、设计、施工等各个阶段遇到的风险进行分析、评价,研究各风险承担者的责任和应对措施,还未形成比较系统的定性定量分析方法。特别是对于深埋长大隧道的施工风险研究较少,对于施工系统失效模式、失效机理、系统综合失事风险、风险接受准则等的研究更少。

深埋长大隧道施工风险研究存在的不足:

(1) 仅是针对工程某一段进行研究,缺乏基于TBM施工的深埋隧道施工风险理论研究。

(2) 不同岩性组合失效模式及失效机理研究成果较少。

(3) 不同岩性组合失效概率及失事后果理论缺乏研究。

(4) 隧道施工的风险接受准则及风险评价理论研究比较匮乏。

2. 本书主要内容

针对深埋长大隧道建设过程中存在的风险,尤其是施工中存在的风险,基于风险理论的基本原理,对深埋长大隧道施工风险理论进行较为系统的研究,主要从以下几个方面展开研究:

第2章研究了深埋长大隧道施工风险识别理论。给出了深埋长大隧道施工风险的定义,研究施工风险的来源。通过收集整理国内外隧道施工地质灾害,结合工程特殊的环境,初步识别出TBM施工主要风险。依据失

效模式分析，提出深埋长大隧道施工系统最大可能失效模式。提出以故障树方法（Fault Tree Analysis, FTA）对施工中遇到的风险进行识别，运用层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）确定主要风险因子，为进一步风险分析及类似工程风险识别提供参考依据。

第3章研究了深埋长大隧道施工风险估计模型与理论。基于可靠度理论，分别建立了深埋长大隧道施工中各分项失效模式的风险概率模型。基于故障树分析的“或门”和“与门”，建立了单元洞段综合失事风险概率模型。根据本书研究对象，提出了风险概率计算方法。针对现有风险后果损失估计的不足，考虑TBM施工特点，对TBM施工风险后果损失进行划分，提出基于TBM施工的风险后果损失估计综合模型。

第4章对深埋长大隧道施工风险综合评价方法进行了研究。通过深入研究国内外风险接受准则并分析其不足，提出风险概率分级标准，风险损失分级标准，并根据风险矩阵法，提出基于TBM施工的定性定量相结合的风险接受准则及风险决策方法。针对施工过程中存在的大量不确定性因素，采用层次分析法（AHP）计算各风险因子权重，利用模糊集法确定风险等级的隶属函数，提出基于层次分析—模糊综合评判的TBM施工风险评价方法。

第5章介绍了深埋长大隧道施工风险处置措施。具体给出了TBM施工过程中岩爆、涌水、大变形、塌方、高地温、有害气体和膨胀围岩等的规避或减缓措施。工程中常用的风险应对措施有：风险规避、风险转移、风险缓解、风险自留和风险利用，以及它们的组合，可以为TBM施工提供参考。

第6章介绍了超长水底隧道火灾风险及运营安全风险。以江苏地区苏锡常南部高速公路跨太湖段全隧方案为例，分析了隧道运营通风、疏散及防灾风险，从工程设计角度系统考虑通道建设防灾需求。为了分析隧道结构的安全性，以江苏南京长江隧道为例，对隧道标准段进行了整体计算，确定其内力分布及承载能力，研究结果表明，隧道结构安全风险在可控范围。

第 2 章 深埋长大隧道施工风险识别研究

2.1 引言

风险识别 (Risk Identification) 是风险管理的第一步,是指在风险事件发生前运用各种方法系统地认识面临的各种风险以及风险事件发生的潜在原因。由于风险具有隐蔽性、复杂性、多变性,所以风险识别非常复杂且艰巨。在工程风险管理中,风险识别是最基础,也是非常关键的环节,在大多数情况下风险不是显而易见的,其往往隐藏在工程项目实施的各个环节,或被种种假象掩盖。如果识别不全面,则风险分析起不到应有的效果,很容易酿成工程风险事故。深埋长大隧道施工从准备到工程竣工时刻都存在风险,识别工作的好坏将直接影响对风险的估计和评价,进而影响决策者对风险的回避和防范措施,关系到整个项目的成败,在识别中应尽量做到不漏项,同时又重点突出。

风险源的研究实质上是对研究对象的不确定性进行研究,一切不确定性因素是事物存在风险的根源。不确定性通常用来描述对某事件或人的确定性的匮乏程度,它包含随机性 (Random)、模糊性 (Fuzzy)、灰色性 (Grey) 以及未确知性 (Uncertainty),它广泛存在于工程系统中,是工程系统本质特性之一。不确定性知识的表示及其度量方法对风险的辨识、风险的估计有着重要意义,不确定性分类很复杂,从不同角度会产生不同的不确定性分类。但总的来说,不确定性可以有两个来源:一是自然过程的固有变异性,即固有不确定性;二是知识的不完备性,即认知不确定性。这种分类亦可分别称为客观不确定性和主观不确定性。表 2.1-1 为描述不确定性的术语。

描述不确定性分类术语

表 2.1-1

变异类型来源	描述术语	变异类型来源	描述术语
固有不确定性	偶然不确定性 外部不确定性 客观不确定性 随机不确定性	认知不确定性	知识不确定性 函数不确定性 内部不确定性 主观不确定性