

复杂地质条件下特长大 断面隧道安全 及灾变控制理论与方法



刘春原 高岭 李建朋◎著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Theory and method for safety and catastrophic control of
extra-large cross-section tunnels under complex
geological conditions

复杂地质条件下特长大断面隧道安全
及灾变控制理论与方法

刘春原 高 岭 李建朋 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书共6章,内容包括:绪论、隧道围岩 MARKOV 随机过程分析、隧道围岩大变形预测预报与失稳判据研究、复杂地质条件下隧道支护结构的时效可靠性、隧道塌方风险因素分析与塌方风险评价方法、岩爆预测方法研究。

本书可供从事隧道与地下工程勘察、设计、施工、科研、管理的人员使用,同时,可作为高等院校隧道工程及相关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂地质条件下特长大断面隧道安全及灾变控制理论与方法/刘春原,高岭,李建朋著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.2

ISBN 978-7-114-15129-3

I. ①复… II. ①刘… ②高… ③李… III. ①复杂地层—特长隧道—大断面地下建筑物—安全控制技术 IV. ①U455.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 256215 号

书 名:复杂地质条件下特长大断面隧道安全及灾变控制理论与方法

著 者:刘春原 高 岭 李建朋

责任编辑:刘永芬 张江成

责任校对:刘 芹

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.75

字 数:248千

版 次:2019年2月 第1版

印 次:2019年2月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-15129-3

定 价:40.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

进入 21 世纪以来,我国隧道工程发展十分迅猛,已成为世界隧道及地下工程建设规模和建设速度第一大国。随着隧道工程数量与开挖难度不断增加,围岩大变形、塌方、岩爆、涌突水等隧道工程地质灾害也屡见不鲜。关于隧道工程地质灾害的预警与控制研究,国内外的许多学者和工程师进行了大量的探索,但由于隧道工程地质灾害成因机制复杂,影响因素众多,还有许多有待解决和研究的问题,包括隧道围岩地层状态随机过程实现方法、隧道围岩大变形预测预报与失稳判据研究、隧道支护结构时效可靠性研究、隧道塌方风险评价方法、岩爆等级预测方法等。近十几年来,作者一直致力于隧道工程防灾减灾研究和工程实践,取得了一些成功的经验,本书的内容就是对这些工作较为全面的阶段性总结。

作者依托岳家沟隧道建设实践,针对隧道围岩状态随机分布规律和隧道地质灾害预警方法等科学问题,研究提出了基于 Markov 随机链模型的隧道围岩地层状态随机过程实现方法、隧道围岩大变形预测预报与失稳判据、隧道支护结构时效可靠性分析方法、隧道塌方影响因素分析与塌方风险评价方法、岩爆等级预测方法等复杂地质条件下隧道安全及灾变控制理论与方法,并给出了应用实例。以上成果不仅丰富了隧道围岩稳定性评价领域的研究理论,而且对于相关从业人员具有较好的参考价值。

全书共分 6 章:第 1 章绪论,系统阐述了地层状态随机过程实现方法与应用和隧道地质灾害预警方法的国内外研究现状。第 2 章基于 Markov 链基本理论,研究提出了隧道围岩 Markov 随机过程分析方法,为便于使用还编写了相应软件程序,最后通过工程实例验证了所提出方法的可行性与有效性。第 3 章以岳家沟隧道为研究对象,基于岳家沟隧道围岩的岩性特征、岩体结构特征等工程地质条件和地质超前预报资料,采用 3DEC 离散元软件建模模拟了塌方段围岩劣化过程;为预测隧道大变形失稳提供判据,提出了修正的应力强度比法,采用参数弱化的方法,建立了不同围岩等级、不同埋深情况下的隧道围岩变形控制基准。第 4 章围绕隧道大变形与塌陷现象的模拟分析问题,采用考虑蠕变变形的隧道大变形有限元计算方法分析了岳家沟隧道典型塌方洞段的围岩变形破坏特征,分析了围岩蠕变对支护结构应力与位移的影响效应以及岳家沟隧道支护结构的时效破坏概率特征。第 5 章采用 SPSS 软件对导致隧道塌方的影响因素进行分析,获得了其主要影响因素排序,介绍了风险评估的基本理论和评估流程,以岳家沟隧道为例,分别采用风险矩阵法和可拓判别法对岳家沟隧道衬砌结构安全风险进行了评定。第 6 章围绕岩爆预测方法,基于云模型和突变级数法基本理论,提出了两种新的岩爆预测方法,并通过工程实例验证了新提出预测方法的可行性与有效性。

本书由河北工业大学刘春原教授对全书进行统稿,第1章由河北省交通规划设计院高岭教授级高级工程师编写,第2章由叶亭和李金龙编写,第3章由徐良玉和高岭编写,第4章由宋建康和李建朋编写,第5章由范佳慧和高岭编写,第6章由河北省交通规划设计院李建朋博士编写,另外李建朋博士还对全书进行了审校。

本书承蒙国家科技奖评审专家、国务院特贴专家、交通运输部公路工程施工评标专家库专家、河北省交通规划设计院专业总工程师母焕胜先生在百忙之中审阅书稿,并提出了宝贵意见和建议,作者在此表示衷心的感谢!

囿于作者水平,本书还存在缺点和不足,希望广大读者批评指正。

作者
2018年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 选题的背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书的主要研究内容与技术路线	9
第 2 章 隧道围岩 Markov 随机过程分析	13
2.1 引言	13
2.2 Markov 随机过程原理	13
2.3 地层岩性分布状态的 Markov 预测模型	18
2.4 基于 Markov 理论的地层岩性分布状态预测方法	24
2.5 隧道围岩 Markov 随机过程分析的软件开发	28
2.6 工程应用	32
2.7 本章小结	38
第 3 章 隧道围岩大变形预测预报与失稳判据研究	39
3.1 引言	39
3.2 隧道围岩大变形理论及预测预报系统	39
3.3 岳家沟隧道围岩特征分析	44
3.4 岳家沟隧道围岩大变形塌方数值模拟分析	54
3.5 岳家沟隧道围岩失稳判据研究	70
第 4 章 复杂地质条件下隧道支护结构的时效可靠性	82
4.1 引言	82
4.2 隧道支护结构时效破坏概率计算方法	82
4.3 支护结构时效可靠性 ABAQUS 数值模拟分析	88
4.4 本章小结	105
第 5 章 隧道塌方风险因素分析与塌方风险评价方法	106
5.1 引言	106
5.2 隧道塌方影响因素识别	106
5.3 隧道塌方影响因素相关性分析与判定	108
5.4 隧道塌方影响因素排序	119
5.5 隧道工程风险管理基本理论	129
5.6 基于风险矩阵法的岳家沟隧道工程风险评估	135

5.7 基于可拓方程法的岳家沟隧道工程风险评估	139
5.8 本章小结	145
第6章 岩爆预测方法研究	147
6.1 引言	147
6.2 基于权重反分析与云模型的岩爆预测方法	147
6.3 岩爆等级预测的突变级数法	153
6.4 本章小结	159
参考文献	160

第 1 章 绪 论

1.1 选题的背景和意义

进入 21 世纪以来,我国隧道工程发展十分迅猛,在“2015 中国(上海)隧道与地下工程技术研讨会”上,中国土木工程学会隧道及地下工程分会公布的统计表明,我国已成为世界隧道及地下工程建设规模和建设速度第一大国。根据我国交通运输部每年公布的《公路水运交通行业发展统计公报》的统计数据,从 2010 到 2015 年全国公路隧道建设增量每年的增幅均在 20% 以上,截至 2015 年底,全国公路隧道为 14006 处,1268.39 万 m,比上年末增加 1602 处,192.72 万 m,其中特长隧道 744 处,329.89 万 m,长隧道 3138 处,537.68 万 m。

随着国内外交通事业的持续发展,越来越多的里程长、断面大、埋深大的公路隧道需要建设。表 1-1 为作者统计到的部分长大隧道。隧道与地下工程建设是一项系统庞大且风险较高的建设工程,由于其致灾风险因素来源多样,且具有高度不确定性和隐蔽性,导致塌方、大变形、岩爆、涌突水等工程灾害屡见不鲜。这些复杂多变的风险源给隧道工程的按期完工造成巨大压力,对参建人员的人身安全和机械设备安全带来极大威胁。

部分长大隧道

表 1-1

使用类别	隧道名称	所在国家	隧道长度(km)
铁路隧道	Seikan	日本	53.9
	Vereina	瑞士	19.1
	Appenine	意大利	18.5
	秦岭隧道	中国	18.4
	Furko	瑞士	15.4
	Santomerco	意大利	15.0
	Macadonald	加拿大	14.6
	大瑶山	中国	14.3
公路隧道	阿尔贝格	奥地利	14.0
	坪林	中国台湾	12.9
	勃朗峰	意大利	11.6
	关越	日本	11.1

塌方是隧道工程施工过程中最为常见的典型事故之一。国家安全生产监督管理总局统计资料显示,2010至2016年间,我国隧道工程建设事故发生多达28起之多,造成施工人员死亡和失踪143人、受伤58人。隧道塌方是所有事故类型中死伤最为严重的,占伤亡总人数的一半还多。而实际工程中有限的勘测点和钻孔资料不能完全真实反映隧道工程地质情况,尤其是在复杂地质条件下,常会导致设计支护类型与实际要求不匹配,进而导致围岩塌方事故时有发生。因支护结构强度不够引起的塌方,常常会封死隧道,将人、机械堵在洞内,因此,此类塌方更具危害性。

岩爆是高地应力条件下隧道工程开挖过程中遇到的另外一种常见的动力失稳现象,多表现为片状剥落、严重片帮,有的伴有声响与岩片弹射。岩爆破坏力巨大,且具有突发性,常常会造成工期延误、设备损失和人员伤亡,因而,与岩爆相关的研究一直是地下岩石工程领域的研究热点之一。

隧道工程中的地质灾害一旦发生,易导致重大人员伤亡、经济损失以及工期延误,严重威胁社会稳定与经济发展。因此研究复杂地质条件下隧道安全及灾变控制理论与方法具有重要意义。

为达到减少和预防隧道工程地质灾害的目的,本书围绕隧道围岩状态随机分布规律和隧道地质灾害预警方法等科学问题,在以下几个方面开展了探索与研究:

- (1)隧道围岩地层状态随机过程实现方法与应用;
- (2)隧道围岩大变形预测预报与失稳判据研究;
- (3)隧道支护结构时效可靠性研究;
- (4)隧道塌方影响因素分析与塌方风险评价方法;
- (5)岩爆等级预测方法。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地层状态随机过程实现方法与应用研究

隧道建设所依托的地质体经历了长时间地质作用,显示出明显的随机特性。隧道及地下工程施工的地质条件、水文信息及边界约束条件等是前期工程风险分析评估、工程设计、施工方法决策最基本的依据,因此,区域地层状态分布研究越来越重要。

国内外很多学者对地层分布的不确定性进行了大量研究,并提出了系统的理论结构。其不确定性主要包括:①地质的不确定性(Geologic Uncertainty);②地质的空间变异性(Geologic Variability)。Barla和Pelizza系统地分析了隧道及工程建设过程中需要考虑的地质情况不确定性,其中包括4个方面,见表1-2。Casagrande认为风险分析是一种用来分析和评估工程实践中由于诸多无法预知因素和不确定性导致的结构失效可能性的必要手段。Heinz D指出,隧道受勘察技术以及其他制约因素的影响,不能完全搞清楚隧道周边的地质情况,这也增加了隧道设计和施工的难度,大大提高了隧道灾变事故的可能性。实际上,勘察的不彻底性和局限性以及地下工程的不可预知性是隧道工程地质灾害成灾致灾的主要因素之一。

地质情况不确定性表现

表 1-2

地质状态类别	不确定性具体表现
地层	土层空间分布规律 地下工程上覆土层厚度 不同土体的物理与力学性质 岩土切削搅拌后的流动性、黏性和变形 各种不良地质情况
水文	岩土的渗透性、含水率、流向与流速 水位、水压和水的冲刷力 水的腐蚀性 水的补给来源
其他障碍物	建筑或其他结构物基础 各种管线设施 废弃构筑物 其他孤立物,如孤石或江底沉船
构筑物及环境设施	地面构筑物的使用年限、结构类型、基础类型和文物价值 构筑物与隧道及地下工程之间的空间关系 地面周围的道路设施 周围环境状况和居住的人群

Lumb 在 1966 年进行了大量试验,首次对土体参数变异性进行深入研究,获得很多有价值的研究成果,并在 1975 年提出土体参数的空间变异性概念,之后研究学者逐渐认识到土体参数之间的相关性问题。Einstein. H. H 教授在 1974 年撰写的《隧道成本模型的地质模型》文章中,用风险评价方法来研究硬岩地质条件下的施工与投资之间的关系。Van-marcke 在 1977 年通过建立岩土体剖面的随机场模型,用波动范围描述地质体参数的空间变异性,在 1983 年完善了随机场理论。Matheron 在 1962 年尝试利用地质统计学来研究地质体参数空间变异性问题。Soulie 在 1983 证明了地质统计分析可以有效解决土体参数变异性,将地质统计理论应用于地质体物性参数的空间变异性研究中。Wolff 和 Harr 在 1987 年提出了根据已有的统计资料并结合地层的地质成因进行地层空间变异性分析。Harr 在大量研究中发现,即使拥有详细的地质勘查资料,也不足以形象评价地质体的空间变异性问题。Rackwitz 等讨论了概率建模解决岩土体变异性评价中需要注意的问题。

分析以上研究成果可知,由于传统方法无法反映岩体的随机分布特征,研究人员围绕地层状态和参数的空间变异性开展了大量研究,取得了不少有价值的成果。然而,针对 Markov 链地层预测模型,主要是对大范围区域地层岩相组合进行模拟预测,对隧道围岩岩性或破碎状态的模拟预测则比较少见。

此外,丰富的物探资料可以在空间大区域范围内反映出地质构造体特征和岩性变化

规律,如何充分利用物探资料改善基于空间变异性的隧道地层模型的精确度也值得深入探讨。

1.2.2 隧道围岩大变形的预测预报与失稳判据

隧道围岩大变形的预测是隧道大变形研究中最重要内容,尽管这方面的研究已经积累了一些研究成果,然而,这方面的研究仍然是大变形研究领域中最薄弱的环节。目前,隧道围岩大变形的预测方法总结起来有挤出预测和膨胀预测两大类。

(1) 挤出预测

挤出预测主要有两种:一是以某个固定的参数值作为预测判据,如 Muirwood(1972)提出的坚固系数、Saari(1984)提出的切向应变等;二是以某些理论力学解来探求围岩的应力-应变关系,如 Nydan 的应力-切向相对应应变预测等。

Muirwood(1972)提出用坚固系数来预测隧道围岩稳定性(挤出),坚固系数被定义为单轴抗压强度和上覆围岩自重应力的比值。后来,这一参数在日本被用来进行隧道围岩的挤出预测(Nakano,1979)。我国学者采用的类似系数为应力强度比,即最大主应力、围岩切应力或垂直主应力与单轴抗压强度的比值。

Saari(1982)提出用隧道的切应变来识别和预测岩石挤出,发生挤出的临界应变值为1%。Saari把挤出现象视为岩石的弹-黏-塑性行为,并以此为基础进行了一些数值分析,对某些特殊情况给出了收敛解。但是,它的模型没有考虑应变过程中介质强度的衰减(Aydan,1993)。

Tanimoto(1984)把挤出归结于围岩的弹-塑性行为,并根据应变-软化基本定律,提出了用来估计围岩应变的弹-塑性解。他认为,当岩石变形达到残余塑性状态(流动状态)时,便会发生挤出。

Aydan等(1993)在对日本已经发生大变形的隧道进行广泛调查的基础上,根据单轴压缩或低约束压力条件下得出的岩石应力-应变曲线特征,提出了利用切向相对应应变来预测围岩挤出潜势(Squeezing Potential)的方法。调查内容包括以下四个方面:

- ①围岩物理力学特征;
- ②地质条件、初始地应力状态、埋深、隧道几何特征(断面形状及尺寸);
- ③地下水、开挖掘进速度及支护体系;
- ④围岩膨胀所需要的时间、支护结构的断裂及毁坏情况。

调查隧道的围岩物理力学特征(参数)均被表示为与单轴抗压强度的关系。除了天然含水率外,大变形隧道围岩的重度、泊松比、弹性波波速、弹性模量及摩擦角与单轴抗压强度之间均具有较好的相关性。考虑到一些学者已经提出的挤出判别标准及其他参数,Aydan将大变形隧道的围岩特征综合表示为:

- ①坚固系数应小于2,挤出发生的时间与坚固系数有关,该系数越小,则挤出越快;
- ②围岩切应变应该大于1%;
- ③岩石含水率一般应大于25%,但对于岩石挤出而言,空隙度比含水率重要得多,因为随着空隙度增大,岩石强度会迅速衰减;
- ④隧道围岩多为成层的沉积岩,岩层中一般含有具有膨胀特性的黏土矿物。

Aydan 等认为,实验室条件下,岩石对单轴压缩的响应,即应力-应变关系,与开挖条件下隧道围岩的响应具有相似性,并以此为基础提出了一套预测和识别大变形的的方法。将岩石和土在单轴压缩或低约束围压条件下的应力-应变曲线模型化,对于一个完整的试验过程,可以假定岩石变形经历以下 5 个阶段。

①弹性阶段:岩石的行为几乎是线性的,无可见裂隙;

②硬化阶段:显微破裂开始发生,破裂方向通常与最大荷载方向一致;

③屈服阶段:超过应力-应变曲线的峰值后,微裂纹趋于连通,并出现宏观破裂;

④弱化阶段:宏观裂隙扩展,并在最不利的方向成组出现;

⑤流动状态:宏观破裂在最不利方向完全联通,构成滑面或滑带,破碎的材料沿这些平面发生流动。

根据室内或现场单轴或(低围压)三轴试验中岩石所表现出的 5 个状态,可以对隧道围岩的挤出潜势和程度进行分类。

(2) 膨胀预测

1914 年, Wiesmann 首次研究了瑞士 Hauenstein 隧道的膨胀预测问题。此后,各种各样的分析预测模型被相继提出。Einstein(1972)、Crob(1972)、Kovari(1987,1988)等提出的简化分析方法都是建立在应变仅沿着隧底以下的垂直对称轴发生这一假设的基础上的。这些分析方法可以为结构设计提供一定的依据,但不能解释所观察到的全部变形现象,也不能预测变形的全过程。

此后,Wittke 等(1976)、Cysel(1977,1987)及 Frohlich(1986)等,将膨胀问题视为连续介质力学问题,形成完善的应力-应变关系,这些关系和平衡方程及兼容性方程一起构成了解决特定边界和初始条件下的膨胀问题的理论框架。

Anagnostou(1993)认为,连续力学介质模型将膨胀视为一种纯粹的应力分析问题,在模拟实际观测到的隧道膨胀变形方面存在不足,不能解释隧底变形而拱部和边墙无变形现象,并提出了一个更为完善的膨胀岩模拟和预测模型。该模型的理论要点包括以下几方面的内容。

①考虑(地下)水的运动:合理的膨胀岩隧道计算模型应该考虑(地下)水的运动,渗流方程必须和应力分析方程同时考虑。在这样的水-力耦合模型中,位移场取决于水头场,当然也就与边界条件密切相关。由于边界条件的不对称,隧底和拱顶的水头分布应该是不同的,这样就使得模拟边墙和拱顶稳定条件下的底鼓成为可能。

②应力-应变关系:膨胀岩可以用满足 M-C 破坏准则的弹性-完全塑性材料来模拟,但是由于标准的线弹性或完全塑性的模型不能模拟实际变形的某些重要特征,一般的弹-塑性材料的应力-应变关系被拓展到容许膨胀的各向异性与应力之间的对数关系等。

综上所述,目前在地应力场特征及高地应力问题研究方面已取得重要进展,已认识到地应力(尤其是高地应力)是地下工程稳定性的重要的影响、控制和制约因素,是地下洞室稳定性评价和工程对策的重要依据之一;在围岩大变形的形成机制及类型划分方面也进行了有益的探索;已经认识到工程岩体的本质-不连续性和各向异性,并采用非线性、非连续以及流变学来研究和解决地下洞室稳定性方面的诸多问题,包括变形破坏机制、围岩动态变形规律和支护设计等。综观目前的研究,还存在一些需要进一步探讨的问题。

1.2.3 隧道支护结构可靠性分析与失稳风险评价

1983年, Matsuo 和 Kawamura 用概率的概念计算了松散岩体支护系统的失效概率, 进而确定了最优设计方案; 1984年 Dershowitz 和 Einstein 提出用概率法解决隧道或边坡岩石楔体的稳定性分析问题; 1989年 Shigeyuki Kohno 对隧道支护结构的可靠度进行了分析, 并提出隧道支护体系可靠度的概念及分析方法; 1991年, 美国的 A. Longinow, A. H-S. Ang, L. A. Twisdaie 等人在研究人防工程结构可靠性时, 就动载作用下防护结构可靠性的设计理论做了大量的工作, 并提出了 RDBF 可靠性设计方法; 1999年, Kok-Kwang Phoon 和 Fred H. Kulhawy 提出了分析地下结构监测中的内在随机性、量测误差和尺寸效应等的不确定性的方法; 2000年, N. O. Nawari 和 R. Liang 提出用模糊方法估计岩土参数的标准值; 2001年, Andrzej SPark, Chan-Hee 及 Oiala Peter 等在地下工程方面做了一些工作, 并提出地下结构的可靠度水平应高于地面结构的见解; E. Laso, M. S. Gomez Lera 和 E. Alareon 等人采用基于连续介质模式的响应面法对 II 类围岩衬砌结构进行了可靠度计算分析。2002年, Mitechell 在其著作《基于最可能失效点法的风险评估与风险不确定性分析》中提出了最可能失效点法, 这是一种新的风险评估方法。2003年, M. H. Faber 在其《土木工程中的风险与安全》书中系统阐述了风险分析常用的方法和其在土木工程中的应用。2004年, McFest-Smith 提出 MS 风险评价体系。剑桥大学的 Salazar G. F 将不确定性的影响和工程造价联系起来, 提出了一种考虑不确定因素和隧道工程造价之间的风险评价方法。国际隧道协会(ITA, 2004) 丹麦学者西蒙德(Semen Degn Eskesen) 和滕博格(Per Tengborg) 等通过深入研究和系统总结, 提出了隧道工程风险评估和管理参照标准和研究方法, 于 2004年 5 月在《国际隧道》杂志上出版了《隧道工程风险管理指南》, 为隧道及地下工程的风险研究树立了一座里程碑, 标志着隧道及地下工程的风险研究进入了新阶段。2006年国际隧道协会在韩国首尔召开了年会, 重点讨论隧道及地下工程的风险与安全。

我国在隧道工程可靠度研究方面起步较晚。1987年 9 月, 在重庆建筑工程学院召开的“全国地下空间开发及利用”学术会上, 景诗庭在会上作了“对开展地下结构可靠度设计研究的浅见”的交流报告。此文后来刊登在《地下空间》1988年第一期。该文认为开展地下结构可靠度设计是很有必要的。该文对地下结构当前通用的集中设计模型如何处理承载能力和正常使用两种极限状态提出设想, 并且呼吁抓紧理论上的准备和动员大批力量进行资料的调查统计。

1990年河北省岩石力学与工程学会成立大会论文报告会上, 景诗庭教授作了“隧道衬砌经验设计的深化和提高”的报告。报告认为当前地下结构设计仍以工程类比的经验设计为主, 随着地下工程设计理论和施工技术的发展, 工程类比也应深化和提高, 途径就是引用概率理论。从宏观出发, 从围岩类别判别准确的概率和各种工程参数的随机性, 从实测变形和隧道稳定的相互关系等方面, 把新奥法的动态设计过程与概率方法结合起来。

随后西南交通大学关宝树教授发表的《隧道结构可靠度研究的几点建议》, 北方交通大学张弥教授 1988年发表的文章《铁路隧道按可靠度理论设计的方法初探》, 长沙铁道学院宋振熊教授 1990年发表的文章《按可靠性理论修订隧道规范的当议》等, 显著推动了可靠度在隧道工程中的应用研究。

为了实现隧道衬砌可靠度设计,找出设计中几个主要随机变量的统计特征成为关键因素。为此铁道部建设司在20世纪90年代初立项开展以下五项基础性研究工作:

- ①深埋隧道荷载统计特征的研究,承担单位:西南交通大学;
- ②浅埋(含偏压)隧道荷载统计特征及结构可靠度分析研究,承担单位:兰州铁道学院。
- ③铁路明洞荷载统计特征研究,承担单位:北方交通大学;
- ④隧道衬砌混凝土偏压构件强度统计特征及抗力计算公式的试验研究,承担单位:石家庄铁道学院;
- ⑤铁路隧道衬砌几何尺寸变异性的结构可靠度分析,承担单位:长沙铁道学院。

上述5个专题中,第①、④、⑤专题的成果是分析铁路深埋隧道整体式衬砌可靠度所必需的。第②、④、⑤专题的成果是分析铁路浅埋和偏压隧道整体式衬砌可靠度所必需的。第③、④则是分析铁路拱形明洞衬砌可靠度所需。1991年5月铁道部建设司组织专家对该课题进行了评定验收,并将研究内容纳入《铁路工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50216—1994)中。

1997年,铁道部建设司针对新奥法施工时依据监控量测结果判别隧道稳定性中存在的问题,立项开展“隧道稳定性位移判别准则研究”,由石家庄铁道学院主持、北方交通大学参加,两家单位共同完成。该成果提出了“极限位移”概念和确定方法,考虑了各参数及量测结果的变异性,应用随机有限元等工具进行了围岩参数反分析。

随后我国众多专家、学者就隧道结构可靠度做了大量的研究和探讨。关宝树(1988)利用数量化理论和模糊数学方法,提出了铁路隧道围岩分类的预测和判定标准,后来又完成了隧道施工中围岩分级方法的研究。

朱永全、景诗庭、张清根据隧道施工监测的离散试验结果,采用 Monte-Carlo 有限元随机反分析,反推地层参数和原始地应力分布的随机值。反推参数的结果不仅给出了其均值,还给出了参数的标准差和分布类型,使得反演结果为隧道结构稳定性和可靠性分析提供了必要数据。

徐军、郑颖人等采用极限应变准则作为极限状态方程,运用改进的 JC 方法分析了地下隧洞稳定的可靠度。基于可靠度指标的几何涵义,运用遗传算法原理,提出了计算岩土工程可靠指标和设计验算点的全局优化算法。随后采用基于数值模拟和函数连分式渐进法的工程结构可靠度分析方法,对圆形无支护洞室进行了计算。

景诗庭、宋玉香、吴康宝总结了20世纪90年代石家庄铁道学院在地下结构概率极限状态设计方面的研究成果,研究成果包括可行性研究、基础性研究、实用设计研究等不同阶段所提出的各项具体建议、计算公式和各种系数。这些成果大部分都被新修订的《铁路隧道设计规范》所采用。

杨林德、萧蕤探讨了复合支护的极限状态,并提出了后期支护在某一截面上的内力超过其承载能力时结构即失效的模式;采用了定值有限元与函数连分式渐进法相结合的方法计算可靠度,并在计算中同时考虑了随机变量的相关性和不同的概率分布。鉴于支护时机对复合支护的受力状态有较大的影响,提出了将支护时机作为随机变量引入可靠度计算的方法。

朱永全、张素敏、景诗庭阐述了隧道支护系统极限位移的意义,系统介绍了初期支护

及有限位移的确定方法;采用连续体模型,按铁路隧道衬砌标准设计采用的断面形式和材料参数,对各级围岩中不同埋深条件下铁路隧道初期支护极限位移进行计算模拟,并对计算结果进行统计处理;与允许位移进行比较,单、双线断面相对位移分开,拱顶下沉、拱脚水平位移和墙脚水平位移分别设置不同判据,采用修订前《铁路隧道设计规范》所列的埋深档次,确定档次范围值,最后综合确定出一套适用当今铁路隧道位移判别的极限位移数据。

李志华、康海贵针对隧道初期支护结构可靠度几何优化模型搜索区域大而可行区域小,目标约束为隐式形式的特点,提出了基于改进遗传算法的可靠度计算方法。

侯公羽、韩茹、黄祥忠以大瑶山隧道基础数据为计算依据,以隧道初次衬砌作为研究对象,采用“地层-结构模型”分析了衬砌在极限承载能力作用下的可靠度。利用响应面法计算了隧道初次衬砌的功能函数;根据所计算的内力值分析了作用效应的统计特征和抗力的统计特征,通过一次二阶矩法计算初次衬砌的可靠指标,并用 MATLAB 软件加以实现;最后,利用校准法给出了Ⅲ级围岩初次衬砌的目标可靠指标值。

综合分析以上研究成果,可以得出以下结论:

(1)以上研究成果均以研究可靠性分析方法为重点,由于受到计算软件的局限,目前以新奥法施工的隧道支护结构可靠性分析仍处于起步阶段,国内采用新奥法施工的深埋软弱围岩隧道中支护结构可靠性方面的研究较少。因此对山岭隧道应该在理论及实际应用方面拓展研究的深度与广度,完善山岭隧道风险分析体制。除此之外,目前国内在山岭隧道风险研究领域所取得的成果基本上都是针对隧道运营阶段,而隧道勘察前期、设计阶段的系统性研究很少。

(2)目前针对隧道开挖时掌子面的塌方进行了大量的研究,而针对掌子面后方已初期支护段的塌方研究很少,而且多是从施工和自然地质环境角度来探究其发生的原因,并给出了塌方预防措施以及发生此类塌方后的处理措施,从衬砌结构安全性方面进行研究,探索其塌方原因的成果则较为少见。现阶段针对隧道衬砌结构安全风险评估相关研究大都是在其围岩状态固定的基础上进行的,并没有考虑隧道掌子面推进过程中已初期支护段围岩劣化的行为,常使评估结果偏于乐观,因此往往造成对衬砌结构安全重视不够,以致造成严重后果。

(3)传统的隧道结构可靠性理论认为,当隧道唯一确定时,其作用效应 R 和结构抗力 S 均为定值,也就是说它们是不随时间的变化而变化的。如果不考虑岩土体的各种特性与时间的相关性,即岩土体的黏性特征,就隧道围岩应力调整和向洞内的收敛变形而言,认为隧道在成洞的瞬间就已全部完成。因而,如果成洞时的应力或收敛变形不超过规定的允许值,只要毛洞开挖后瞬时不坍塌,洞室以后将被认为是永远稳定的,其变形也不会进一步发展。这显然与隧道的工程实践不相符合,因为很多塌方事故是在开挖支护完成一段时间之后才发生。事实上,长期观察和量测结果都表明,隧洞开挖之后,毛洞在刚成形时往往是稳定的,但洞周围岩的变形随着时间的推移而不断发展,经过一定的时间后当毛洞的变形达到一定的量值后毛洞才可能失稳或坍塌破坏。工程实践、实测和试验均已证明,围岩的长期变形呈流变型。因此,要对隧道围岩与支护结构的相互作用进行切合工程实际的研究,就必须考虑隧道围岩的蠕变特性。而对围岩及支护体可靠性的研究,应立足在时间的变化过程中,即研究支护结构的“时效可靠性”。

(4)作为隧道工程风险管理中最重要的一环,风险评估主要是评估风险发生的概率以及风险可能产生的后果。而由于传统的隧道工程可靠性主要是研究某一时刻的可靠性,即隧道开挖或支护完成瞬间的隧道工程的可靠性,传统的隧道工程风险管理也主要依据施工完成瞬间风险发生的概率及其产生的损失来对风险进行评估。事实上,隧道工程的可靠性具有时效特性,失效概率会随着时间逐渐增大,导致隧道工程的风险等级也逐渐增大。在隧道施工过程中,应做好现场监控量测工作,不断对风险等级进行重新评估,当风险等级增大时应采取必要措施,避免发生塌方事故。

1.2.4 岩爆预测预报方法

近年来,学者们先后提出了模糊综合评判法、距离判别分析法、可拓评判法、灰色归类法、投影寻踪法以及神经网络法等岩爆等级预测方法,这些方法均属多指标综合评价方法,克服了单一指标的片面性,但在综合考虑岩爆等级预测评判过程的随机性与模糊性方面存在不足。在岩爆等级预测评判过程中,一方面因岩层地质条件复杂、测试仪器误差与操作人员水平等因素,使得评价因子的实测值存在或多或少的随机性误差;另一方面,实践中常常出现多个评价因子的实测值不能同时满足某一等级标准的“亦此亦彼”的模糊现象。为综合考虑上述随机性与模糊性,李德毅院士提出的云模型已被引入到岩爆等级预测评价工作中。对于多指标综合评价方法而言,合理的赋权方法十分重要。然而,现有的岩爆等级预测云模型中多采用简单等值权重或基于专家经验获得权重,使得云模型评价结果受到较大的主观性因素的干扰,影响了其预测准确率,因此有必要对云模型因子的客观赋权方法进一步研究。此外,由于现有岩爆预测的多指标综合评判法多存在指标权重确定困难问题,因此也有必要探索一种不需事先确定指标权重的岩爆预测方法。

1.3 本书的主要研究内容与技术路线

1.3.1 隧道围岩地层状态随机过程实现方法与应用

地层岩土体是一个无限大的样本母体,在漫长的沉积与地质构造作用下致使地层岩土层状态分布及风化程度等特征呈现明显的空间随机变异性。本书在分析地层状态不确定性的基础上,综合利用地质钻孔资料及物理勘探资料,通过地质数据统计及数据整合,将独立分散的地质勘察成果资料转换为可应用的有效数据。应用 Markov 随机链模型,考虑实际地质状况及地层随机变异性问题,最大限度地实现隧道围岩岩性状态精确预测模拟,并验证模拟结果的准确性,进而分析围岩的劣化问题,为以后的开挖做好预测,奠定基础。

结合实际工程,选取张石高速公路涞源(张保界)至曲阳(保石界)、涞源至涞水段(K45+000~K126+541.1)对待模拟区段进行地质体岩性分布状态建模,验证模型可靠性之后,结合地质钻孔数据对岳家沟隧道右线(进口桩号 RK73+444,出口桩号 RK77+503,右线隧道长 4059m,位于河北省易县紫荆关镇白家庄村与三铺村之间)隧道围岩进行全隧道围岩风化破

碎情况模拟预测,结合地质超前预报综合分析,评价隧道开挖地层空间不确定性导致的隧道塌方风险。

1.3.2 隧道围岩大变形分析预测方法与支护结构失稳判据研究

本书将依托岳家沟隧道开展围岩大变形与塌方分析方法探讨,研究提出围岩大变形预测预报方法和围岩变形控制标准。在科学性、实用性、解决工程实际问题的思想指导下,在对工程结构可靠度和风险分析的相关理论研究基础上,在以下几个方面开展研究:

(1)主要针对位于隧道施工掌子面后方的衬砌结构的安全风险进行分析,以达到最大限度避免衬砌失效事故的发生。

(2)分析围岩的蠕变特性以及在蠕变过程中围岩与支护结构的相互作用,对衰减蠕变与非衰减蠕变这两种蠕变变形形式进行介绍。从位移的角度定义支护结构的时效破坏概率,同时介绍极限位移的计算方法。

(3)参考国内外已有的研究成果,建立合理的风险评估模型,将风险评估转化为对可靠度指标的计算与失效后果指标的分析,并运用此评估模型对实际工程进行安全风险评估。

1.3.3 隧道塌方影响因素研究

根据以上分析,对于隧道塌方,首先要做的是找到导致隧道塌方的主要影响因素。对于河北地区的公路隧道来说,隧道塌方的影响因素主要分为四大类,分别是工程地质条件、支护设计、开挖方案以及其他因素。应用软件 SPSS 中的相关性对这四类影响因素进行分析,按照相关性的要求两两拟合,进行相关性判定,通过回归分析法加以判定,得到回归函数。剔除存在关系的变量,得到独立自变量。若因素都存在因果关系,则会影响因素识别,应重新选择因素。

在得到独立因素后,我们需要做的是分析这些因素,在众多的因素中找到主要因素和次要因素,进而完成因素排序与风险评价。层次分析法是较为常用的风险评价方法之一,该法简单实用,可以直观看出层次逻辑关系,能直接找到问题所在。层次分析法结合其他方法共同使用,已有较多的研究成果,但是因素的权重值确立仍然是依赖于专家打分。目前对于层次分析法中比例标度的选择有近十种方法,10/10-18/2 标度的性能最好,最适宜于精确的权值计算,而标度的选择依赖于专家进行打分,这不仅会有较大的人为主观性,同时由于经常使用专家打分会对其造成困扰。所以在对已知大量数据进行处理时,本书按照数据落在的区域以及分布频率进行划分区间,并运用 MATLAB 模块按照排列组合方法进行矩阵计算、验证一致性,获得比例标度最恰当的一组,初步可以得到风险源的排序。根据正交试验设计法,按照国家标准、规范进行风险等级划分,进行风险源排序,将层次-正交法结合起来使用,通过正交试验证明所得风险源排序是正确的。

在得到因素的排序后,通过工程实例验证得到的结果是否正确。由于有回归关系的两个因素之间存在联系,可以通过其中一个间接判断另一个,以避免重复工作,剔除因变量。在与实际工程验证后,对于得到的一、二级风险指标,采取相对应的防治技术,从而实现针对