

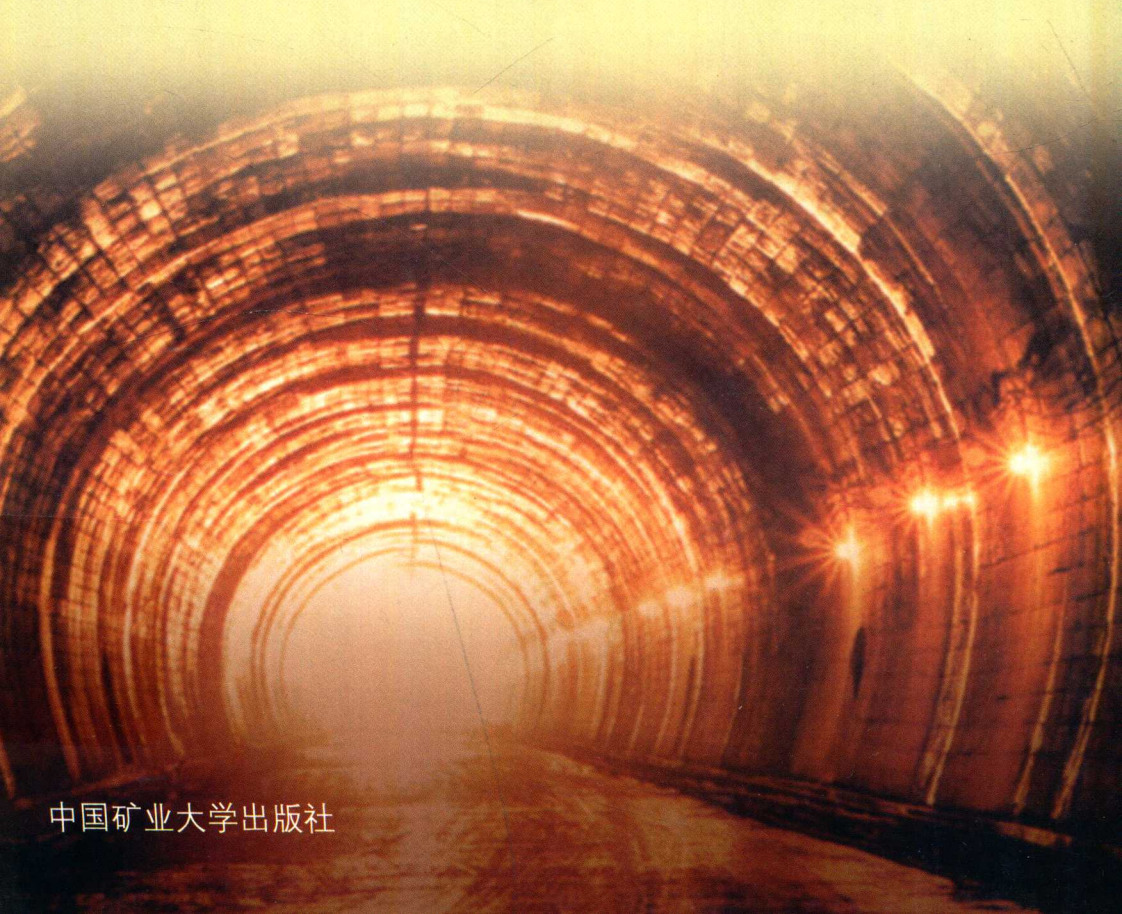
国家自然科学基金项目 (51309222,41572263)

江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20130193)

高等学校博士学科点专项科研基金 (20130095120016)

公路隧道软弱围岩塌方 机理及预测方法

王迎超 著



中国矿业大学出版社

国家自然科学基金项目(51309222,41572263)

江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20130193)

高等学校博士学科点专项科研基金(20130095120016)

公路隧道软弱围岩塌方 机理及预测方法

王迎超 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以山岭隧道软弱破碎围岩塌方灾害为研究对象,系统研究了其影响因素和发生机理,并详细介绍了隧道洞口浅埋段塌方的时空预测模型和洞身深埋段塌方范围确定方法,为我国隧道及地下工程软弱围岩稳定控制、保障施工安全、避免塌方灾害威胁提供了可借鉴的经验。

本书可供隧道工程专业及相关专业的高等院校教师和高年级本科生、研究生以及相关学科的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道软弱围岩塌方机理及预测方法/王迎超著.

徐州:中国矿业大学出版社,2015.10

ISBN 978-7-5646-2790-4

I. ①公… II. ①王… III. ①公路隧道—围岩—塌方—研究 IV. ①U458.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 231036 号

书 名 公路隧道软弱围岩塌方机理及预测方法

著 者 王迎超

责任编辑 李 敬 吴学兵

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 11.25 字数 215 千字

版次印次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

21 世纪是隧道工程大建设的时代,进入 21 世纪 10 多年来,我国公路网交通逐渐向崇山峻岭穿越,向离岸深水延伸。截至 2013 年年底,我国已有公路隧道 11 359 座,总长 9 606 km。进入新世纪以来,公路隧道年均增长率高达 20%,且有逐年增速加快的趋势,我国已成为世界上公路隧道最多、最复杂、发展最快的国家。在隧道建设过程中,由于工程地质水文地质条件的复杂性,容易引发各种地质灾害,如岩爆、突水突泥、围岩掉块、塌方等,其中围岩塌方灾害是最常见的工程灾害,一方面容易造成重大经济损失,另一方面极大威胁现场施工人员的人身安全。

国内外学者在围岩塌方灾害方面开展了大量研究,通过理论分析、数值方法、室内模型试验等研究手段,研究围岩塌方机制、预测预防和处治方法,取得较好的研究成果。但由于隧道软弱围岩塌方具有成因复杂和非线性特征,目前在塌方灾害研究中存在诸多问题,同时受施工人员知识水平和认识水平的限制,致使塌方事故层出不穷。因此,研究隧道软弱破碎围岩的渐进性破坏机理,探索有效的防灾方法,是隧道工程界亟待解决的科学难题。

本书的主要内容来自作者攻读博士学位期间和近年来的主要研究成果。针对公路隧道建设中的软弱围岩塌方问题,本书采用数值模拟和理论分析为主要研究手段,结合现场调查和监控量测,研究塌方发生机制和预防措施,探索有效的预测方法。本书共分为八章内容:第 1 章,对国内外相关研究进行综述,指出存在的问题。第 2 章,运用层次分析法,研究塌方影响因素的敏感性。第 3 章,开展隧道塌方范围的压力拱理论研究,分析不同应力场下潜在塌方范围。第 4 章,探索新的围岩分级方法,建立有效的围岩失稳风险预警模型。第 5 章,分析隧道不同分部开挖工法对围岩稳定性的影响。第 6 章,研

究断层破碎带对围岩稳定性的影响及塌方处治方案优化思路,探讨山岭隧道复合式衬砌在围岩蠕变过程中的受力规律。第7章,揭示山岭隧道出洞口塌方机制,并提出相应处治措施。基于突变理论,分析降雨对浅埋隧道塌方的影响,提出隧道衬砌结构工作状态评价方法。第8章,分析隧道塌方预测研究现状,建立隧道出洞口塌方的时空预测模型。

本书在写作过程中,参考了大量国内外专家学者的重要著作和文献资料,在此谨向全部参考文献的作者表示衷心的感谢! 特别感谢我的博士生导师浙江大学尚岳全教授和博士后导师中国矿业大学靖洪文教授,感谢你们的指导! 另外,硕士研究生吴俊浩为本书第5章的数值模拟工作做出了重要贡献,硕士研究生李勇良、李亚博和尹鑫为本书中插图的制作做出了贡献。

本书的出版还得到了国家自然科学基金青年基金项目(项目批准号:51309222)、国家自然科学基金面上项目(项目批准号:41572263)、江苏省自然科学基金青年基金项目(项目批准号:BK20130193)、高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助项目(项目批准号:20130095120016)、中国博士后科学基金面上项目(项目批准号:20110491475)、中央高校基本科研业务费专项资金(项目批准号:2014QNB37)和中国矿业大学实验室开放基金(项目批准号:2014201)的资助,作者在此一并致谢。限于作者水平,书中难免存在疏漏和不足,敬请各位同人批评指正。

由于公路隧道工程地质条件和水文地质条件的复杂性,软弱围岩塌方灾害具有显著的非线性特性,关于塌方的预测预警与控制的相关研究成果的适用性还需要进行大量深入的研究,许多问题有待进一步深入探索,研究成果还需要大量的工程实践进行验证和完善,期待今后与专业人士进行交流和探讨,完善和深化相关研究内容和研究成果。

著 者

2015年9月

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景与意义	1
1.2	国内外研究现状	3
1.3	塌方灾害研究中存在的问题	17
1.4	研究目标和研究内容	18
2	隧道塌方影响因素敏感性分析与塌方类型划分	20
2.1	塌方的主要影响因素	20
2.2	塌方影响因素的敏感性层次分析	23
2.3	塌方的类型划分	29
2.4	山岭隧道塌方实例分析	30
2.5	本章小结	33
3	隧道塌方范围的压力拱理论分析	34
3.1	压力拱研究现状	34
3.2	压力拱的概念	35
3.3	地应力为静水压力下深埋圆形隧道的压力拱	35
3.4	地应力为双向常应力下深埋圆形隧道的压力拱	36
3.5	地应力与深度成正比下深埋圆形隧道的压力拱	39
3.6	本章小结	45
4	基于围岩分级的山岭隧道塌方风险评价	47
4.1	隧道围岩级别与塌方风险的关系	47
4.2	基于特尔菲-理想点法的隧道围岩分级模型	49
4.3	基于集对分析理论的隧道围岩分级模型	55
4.4	基于功效系数法的隧道围岩失稳风险预警模型	63
4.5	本章小结	68

5	分部开挖工法不同施工顺序对软弱破碎围岩稳定性的影响研究	70
5.1	隧道施工动态数值模拟	70
5.2	单一工法模拟结果分析	74
5.3	不同工法模拟结果对比	77
5.4	本章小结	82
6	断层破碎带引起隧道塌方机制及防治措施	84
6.1	断层破碎带对隧道围岩稳定性影响的数值分析	85
6.2	穿越隧道塌体的施工方案优化	95
6.3	断层破碎带地区隧道复合式衬砌受力规律分析	103
6.4	本章小结	111
7	山岭隧道出洞口塌方机制及预防措施	113
7.1	工程背景	113
7.2	隧道出洞口塌方机制的三维弹塑性有限元分析	115
7.3	降雨对浅埋隧道塌方的影响分析	122
7.4	隧道出洞口支护结构稳定性评价	133
7.5	本章小结	141
8	山岭隧道出洞口松散围岩塌方时空预测	143
8.1	隧道出洞口塌方判据及空间位置预测	144
8.2	隧道塌方时间预测的灰色-协同理论模型	146
8.3	工程验证	150
8.4	本章小结	152
	参考文献	153

1 绪 论

1.1 研究背景与意义

我国是一个人多地少的国家,山地面积约占国土面积的 $2/3$ 。为了满足社会与经济发展日益增长的需求,必须大力发展交通建设,因此不可避免地要修建大量山岭隧道。截至 2013 年年底,我国已有公路隧道 11 359 座,总长 9 606 km。进入新世纪以来,公路隧道年均增长率高达 20%,且有逐年增速加快的趋势。随着隧道建设数量的增加,隧道长度也不断突破,如山西省宁武县及原平市境内的长梁山隧道长 12.78 km,西汉高速公路秦岭终南山隧道长 18 km。与此同时,越来越多的大断面隧道不断涌现,如贵州大阁山隧道(宽 21.04 m、高 11.45 m)、深圳雅宝隧道(宽 21.24 m、高 15.52 m)、沈大高速韩家岭隧道(宽 21.24 m、高 15.52 m)等。

山岭隧道建设过程中,塌方是最为常见的工程灾害,约占各类重大地质灾害出现概率的 90%以上^[1]。塌方一旦发生,一方面造成工期延误、机械设备毁坏、工程费用增加和施工企业信誉降低等严重后果,另一方面对现场施工人员的生命安全构成巨大威胁。随着我国高速公路建设的蓬勃发展,隧道施工中所遇到的塌方灾害越来越多,每年投入到塌方治理的费用呈逐年增加趋势,塌方的机制和防治问题引起人们的极大关注。

塌方灾害已给国家的工程建设造成不良影响,以下是国内外塌方的典型案例。成渝高速公路缙云山隧道在施工过程中,曾先后发生 5 次较大规模的塌方,其中在 1992 年 7 月 11 日发生的 4 号塌方最大,坍塌高度 18~25 m,塌方数量 4 000~5 000 m³,严重延误了该隧道的建设工期^[2]。1996 年 2 月 28 日,位于福建省境内国道 104 线的飞鸾岭隧道发生冒顶大型塌方,地表形成 9.0 m×15.0 m 的凹形漏斗,塌方高度达 32.0 m,塌方数量为 3 760 m³,塌方处理耗时两个月^[3]。2006 年 4 月 4 日,某高速公路白鹤隧道洞顶发生塌方事故,钢拱架和台车同时压毁,造成一死一伤。海南环岛高速公路大茅隧道塌方造成了特大人身伤亡事故,严重影响了该隧道的衬砌、防水质量及运营安全^[4]。武吉高速公路九岭山隧道是大庆至广州国家高速公路的重要控制性工程,当隧道开挖至

ZK102+217 时发生塌方,滑塌范围高约 19 m、宽约 13 m,塌方量为 4 000 m³。2007 年 7 月 7 日,贵阳市金阳新区小平坝河排污隧道工程内发生大型塌方事故,致 4 人死亡、4 人受伤。2007 年 7 月 11 日,甘肃平定高速公路第七标段静宁隧道发生冒顶塌方,致使隧道上方的 4 户村民房屋倒塌,造成 3 人当场死亡、5 人受伤。2009 年 3 月 17 日,江苏连云港东疏港高速公路隧道塌方,造成 3 人死亡、4 人受伤。2009 年 7 月 19 日晚 8 点半左右,由中铁三局桥隧公司襄渝二线经理部承建的杨家沟隧道发生塌方事故,造成 2 人死亡。2009 年 11 月 24 日,湖北郧县境内一在建隧道发生塌方,致 5 死 6 伤。2010 年 1 月 16 日,在建的南宁至广州高速铁路广东云安隧道发生塌方,造成 5 人死亡、4 人受伤、1 人被埋失踪。北土耳其 Dranaz 特长隧道在建设过程中发生塌方事故,受塌方影响,掌子面后方 30 m 范围内初期支护发生 110 mm 大变形,工期延误两个半月^[5]。2004 年 8 月 3 日,印度北部一隧道发生塌方事故,造成 12 人死亡、8 人受伤。1990 年 2 月,日本 Oyamano 隧道发生大范围塌方事故,造成巨大经济损失。据统计,日本在 1984~1997 年 14 年间,在隧道施工过程中死亡 220 人,其中因塌方造成的死亡占 26%^[6]。

山岭隧道所处的工程环境千变万化,从目前发生的塌方事故看,许多是由一些特殊的工程地质条件引起的。例如,隧道穿越断层破碎带时,由于围岩稳定性差,容易发生塌方事故。2005 年 10 月 29 日,某高速公路乌竹岭隧道右洞在穿越断层破碎带 F8 时发生特大塌方,开挖台车全部被压毁,塌方体在洞内延伸 20 多米,塌方处理时间达半年之久,严重延误了隧道建设工期。另外,在隧道进出洞口时,由于第四系松散覆盖层比较厚,也容易引发塌方事故。2006 年 4 月 19 日,位于某高速公路金华段的马鞍山隧道在出洞口发生冒顶塌方,延误工期 3 个月,使工程投资大大增加。2008 年 1 月 27 日,黄衢南高速公路大枫坑口隧道在进洞口发生塌方,严重影响了施工进度。

从上面的塌方案例可以看出,作为一种突发性灾害,塌方往往造成不良的社会影响。因此,开展山岭隧道塌方机制研究,尤其对一定工程地质条件下的特殊塌方类型开展研究,总结围岩变形破坏机理,准确评价围岩稳定状态,合理评估塌方风险,对塌方进行准确的时空预测,预知其发生的空间位置和时间,是迫切需要解决的问题。只有对塌方进行深入研究,才能在施工过程中提前采取工程预防措施,减少塌方所造成的损失。研究山岭隧道塌方机制,提出合理的防灾方法,可以为评价隧道塌方风险奠定理论基础,为隧道衬砌结构的设计和塌方治理提供技术保证,为准确预测隧道塌方提供分析方法,为正确判断隧道围岩构成塌方灾害的可能性提供科学依据。因此,本书的研究成果对山岭隧道塌方事故的预防与治理将具有重要的理论价值并产生重大的社会效益。

1.2 国内外研究现状

塌方^[1]是指围岩失稳而造成的突发性坍塌、堆塌、崩塌等破坏性地质灾害,常发生于断层破碎带、膨胀岩(土)第四系松散岩层、不整合接触面、侵入岩接触带及岩体结构面不利组合地段。由于自然地质条件的复杂性和其他各种不确定性因素的影响,使得塌方的发生机理不甚明朗。许多国内外学者已对塌方机制及其防治方法开展相关研究,归纳一下,主要有以下6个方面:① 塌方的调查与统计及影响因素分析;② 塌方机制的模拟研究;③ 塌方机制的非线性理论研究;④ 围岩分类研究;⑤ 塌方预测研究;⑥ 塌方防治方法研究。

1.2.1 塌方的调查与统计及影响因素分析

1.2.1.1 现场调查分析现状

塌方发生后,通过现场调查分析可以获得第一手资料,准确了解塌方的范围、形状、塌穴的地质构造,对于查明塌方发生的原因具有举足轻重的作用。目前国内外已经就塌方现场调查方法进行了广泛的研究。通过现场调查分析,总结塌方破坏模式,分析塌方原因(张继芳,1987^[7];钱康,1996^[8];郑德学等,1999^[9];张忠超,2003^[10];董世琪等,2006^[11];吴硕等,2007^[12];陈秋南等,2009^[13];喻军等,2009^[14];A. Oliver, 1995^[15]),提升了人们对隧道塌方过程(Türkmen, 2003^[16])的认识水平。对特殊围岩环境下塌方机理的系统深入研究,更是广泛关注,结合现场调查,分析膨胀性黏土中隧道塌方原因(Selmer, 1989^[17], 1990^[18];Leichnetz, 1990^[19]),研究隧道入口塌方机理(Kunjayyappa, 1994^[20]),探讨隧道掌子面塌方事故发育规律(A. Greeman, 1995^[21])。

通过现场调查不但可以了解塌方发生的原因,而且可以对塌方的类型进行划分,便于针对不同类型的塌方,提出相应工程治理措施。郑玉欣(1999)^[22]通过调查分析,将塌方归纳为5种形态,共包括16种不同类型,并提出隧道塌方的相应防治方法。塌方有不同的表现特征,J. H. Shin等(2006)^[23]结合大量塌方案例的调查分析资料,提出不同塌方破坏机制下的特征:① 爆破后立即塌方;② 地下水和破碎岩土体一起涌入形成塌方;③ 隧道埋深比较浅或掌子面工程地质条件差引发塌方;④ 当隧道上半断面开挖后首先在隧道的拱肩部位发生塌方。

虽然通过现场调查可以直观分析塌方的原因,但只限于对于塌方问题面上的认识,对于更深层次的机理研究,还应结合其他一些研究手段进行深入分析。

1.2.1.2 塌方影响因素分析现状

导致塌方的原因很多,可以概况为两大类:一是自然因素,即地质状态、受力状态、地下水变化等;二是人为因素,即不适当的设计或不适当的施工作业方法等。这两大类影响因素,也可以细分为地质因素、设计因素、施工因素和认识因素四个方面(刘旭,2007^[24])。

塌方影响因素众多,许多学者采用统计分析方法,分析各因素对塌方的影响,找出主要影响因素。在这方面研究中,以同济大学汪成兵等(2008)^[25]贡献最为显著,他通过文献查阅及现场调研,统计分析了大量隧洞塌方工程实例,指出地质条件、隧道埋深、隧道断面形式及大小、地下(表)水、爆破扰动、施工措施是隧道塌方的主要影响因素,并采用隧道塌方高度、隧道埋深、地表陷穴宽度等与隧道跨度的比值以及破裂角作为表征隧道塌方程度的参量,全面分析了上述因素对隧道塌方的影响。窦万和(1988)^[26]通过 40 多个工程 117 个塌方实例的调查统计,分析塌方影响因素,探讨围岩塌方的特点、规律及其破坏机理。另外,在统计分析的基础上,引用一些新的方法和理论,如范例推理(李钊,2009^[27])、事故树(韩守信等,2009^[28])等,可以对塌方影响因素进行深入研究,找出导致塌方事故的根本原因。

国内许多学者和隧道工程师从具体工程案例出发,分析塌方的主要特征及其与各影响因素之间的关系。例如,赵东等(2002)^[29]对青沟渠隧道施工过程中断层情况和塌方相互关系进行研究,分析了塌方断裂面的特征和塌方发生次数与施工的关系。

在塌方的影响因素中,水是不容忽视的一个重要因素,水的软化、浸泡、冲刷、溶解等作用加剧岩体的失稳和坍塌。另外,如果遇到岩层软硬相间或有软弱夹层的岩体,在水作用下,软弱面的强度大为降低,将发生滑塌。地下水与塌方之间存在内在联系(高新强等,2005^[30];马长青等,2007^[31]),施工过程中控制地下水和把握喷射混凝土的质量(Tseng,2001^[32])对控制隧道塌方具有重要意义。

从已有的研究看,很多学者都进行了塌方影响因素的分析,通过各种方法寻找最主要因素,提出相应的处治措施。但是,对于塌方影响因素的敏感性层次分析还比较少。另外,降雨和断层破碎带对塌方的影响还有待深入研究。

1.2.2 塌方机制的模拟研究现状

1.2.2.1 物理模型试验研究现状

隧道物理模型试验是研究隧道工程的一个重要手段,由于物理模型是真实

的物理实体,能够真实、直观地反映隧道开挖过程中围岩各方面的变化,因此有其独有的优势。地质力学模型试验是20世纪60年代中后期意大利结构及模型试验研究所提出的,用于研究岩体变形破坏机制和结构的整体稳定问题的模型试验技术。国内外关于隧道工程的地质力学模型试验曾做过不少工作,主要集中在4个方面:①不同围岩条件、不同工法对隧道围岩的影响;②围岩特性及加固的模型试验;③构造应力、地质构造对围岩稳定性的影响;④隧道围岩的破坏试验。其中,隧道整体破坏试验对于揭示塌方机理具有重要作用。

在国外,首先使用离心机研究隧道围岩稳定性问题。1931年,Bucky^[33]首次使用离心机模型研究采矿中的围岩稳定性。1965年,Ramberg等^[34]采用离心模型试验,模拟隧道在静态开挖下围岩的稳定性,指出离心模型试验在岩石力学研究中的巨大潜力。美国加州Lawrence Livermore国家实验室通过离心模型试验,采用水囊卸载法对地下洞穴的塌落机理和塌落过程进行了研究。20世纪70年代以后,许多国外学者在隧道塌方的离心模型试验方面进行了一些有益探索,研究砂中浅埋隧道的塌方机制(Atkinson等,1975^[35],1977^[36]),分析岩质浅埋隧道的变形破坏机理(Egger等,1979^[37])和非黏性土中隧道掌子面的稳定性(Chambon等,1994^[38]),模拟塌方发展过程,探讨软土中开挖隧道时的围岩稳定性和拱效应(C. J. Lee等,2006^[39]),确定单拱隧道和分离式隧道的土拱边界。

离心模型试验有其自身的特点,但也存在不足,因此国外一些学者也进行了塌方的地质力学模型试验研究。通过地质力学模型试验,概括没有支护的圆形地下洞室可能的破坏模式(Detournay等,1988^[40]),研究岩体的自承效应,模拟岩体的破坏过程(V. V. Nazimko等,1997^[41]),分析浅埋隧道稳定性和渐进性破坏过程(Sterpi D等,2004^[42])。2004年,Seokwon等^[43]采用室内地质力学模型试验和数值分析相结合的手段,研究了断层和软弱夹层对隧道围岩稳定性的影响,研究表明,随隧洞与断层距离的减小,变形量和塑性区增大,断层位于隧道上方导致的拱顶位移大于断层位于隧道左帮时的拱顶位移,当存在软弱夹层时,隧道两帮的变形量较大。

国内在隧道塌方的室内物理模拟试验方面也开展了一些有益工作。钟新樵(1996)^[44]开展了偏压条件下不同开挖方法的对比试验,研究不同情况下偏压隧道的变形破坏发展过程。任伟中(1997)^[45]采用大比尺结构模型,分析节理对洞室围岩变形破坏的影响及锚杆对节理围岩的锚固效应。周小文等(1999^[46,47],2002^[48])通过离心模型试验,研究了砂层稳定与破坏的机理。王戌平(2004)^[49]采用特定的河砂作为模型材料,模拟了破碎围岩隧道在遇水情况下衬砌的受力变化规律及岩体的破坏过程。郑国江(2006)^[50]通过物理模型试验,研究了侧压

力系数分别为 0.5、1.0、1.5 时软弱围岩中连拱隧道的破坏形态及破坏过程。汪成兵(2007)^[51]建立了隧道围岩渐进性破坏机理模型试验方法,总结分析了不同塌方破坏类型的渐进性发展过程、塌方破坏过程中围岩应力及位移变化规律。栗伟(2008)^[52]结合隧道典型破坏断面底摩擦试验,揭示塌方过程与破坏机理。汪成兵等(2009)^[53]采用模型试验方法,研究了Ⅳ级围岩条件下隧道开挖后,因降雨引起的隧道塌方。

室内物理模型试验研究虽然可以较真实地反映围岩变形破坏过程,但是由于模型试验建模困难,需耗费大量的人力物力,且要满足严格的边界条件和相似条件,因此在采用模型试验进行塌方机制研究时,困难重重。

1.2.2.2 数值分析研究现状

由于岩体是一种复杂的地球介质,应用数值模拟方法可考虑其各向异性、复杂的边界条件、不连续性及随时间变化特性,因此数值模拟方法日益广泛地应用于岩体工程分析的各个方面^[54]。随着计算机技术的发展,隧道围岩稳定性的数值分析方法取得了长足进步,目前广泛应用在隧道塌方问题分析的主要有有限单元法(FEM)、离散单元法(DEM)和非连续变形分析方法(DDA)。

(1) 有限单元法

有限单元法(FEM)是从 20 世纪 50 年代开始盛行的,解决了大量的岩土工程问题。到 60 年代中期,随着岩土力学尤其是本构理论研究的发展,地下工程结构分析进入以有限元法为代表的数值分析时期。80 年代后,有限元被广泛应用于隧道工程围岩稳定性研究中,取得大量研究成果。

在采用有限元分析隧道围岩破坏机制方面,国外学者进行了一些研究。Sloan 等^[55]在 1991 年使用有限单元法,分析了土体中方形隧道的稳定性。Sterpi D(2002)^[56]通过建立二维和三维有限元计算模型,对浅埋隧道稳定性和渐进性破坏过程进行了数值模拟分析。Singh 等(2002)^[57]采用有限元数值模拟,研究了煤柱间顶板稳定性问题。Callari C(2004)^[58]提出了一种改进有限元方法,分析浅埋隧道应变局部化现象及其从隧道周边向地表的扩展过程,研究了开挖进度对应变局部化、开挖产生的位移及隧道稳定性的影响。Morris 等(2006)^[59]将有限元和离散元相结合,研究了地下工程围岩的破裂过程。

在国内,对于塌方的有限元模拟分析起步较晚,20 世纪 90 年代后,国内一些学者开始采用有限元分析围岩变形破坏机制。姜功良(1998)^[60]应用极限分析理论的上限原理及有限元法,揭示浅埋软土隧道的破坏机制。Zhu 等(2003)^[61]建立系统的有限元模拟方法,综合考虑岩体条件和施工影响,分析隧道的稳定性,预测岩体变形。秦昊等(2006)^[62]采用 FLAC^{2D} 软件模拟软弱顶板

巷道围岩变形破坏全过程,得到围岩应力场、塑性区分布情况及破坏特征的变化规律。李志勇等(2007)^[63]模拟隧道施工力学行为,从围岩塑性区分布、位移情况以及锚杆和混凝土衬砌内力分布情况分析隧道变形和坍塌发生的原因。汪宏等(2009)^[64]使用 ANSYS 程序,模拟分析隧道变形和进洞时坍塌发生的原因。陈修和等(2009)^[65]采用二维数值模型,对不同岩性条件下通透式拱梁隧道围岩的破坏模式进行探讨。隧道洞口塌方是一种常见的塌方类型,如浙江省某高速公路马鞍山隧道出洞口塌方^[66]、黄衢南高速公路大枫坑口隧道进洞口塌方等,已有研究表明,采用有限元数值模拟方法,可以很好地揭示该类塌方的发生机理。

由东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的岩石失稳与破裂分析软件 RFPA,在分析岩体变形破坏方面应用也比较广泛。该软件是基于有限元理论和全新的材料破裂过程算法思想,用于研究岩石等固体材料从细观损伤到宏观破坏的全部过程^[67]。目前国内外已经运用岩石破裂与失稳过程分析软件就隧道围岩变形破坏问题进行了广泛的研究,模拟层状岩体中洞室围岩的层裂及破坏过程(张晓春等,2002^[68]),分析岩石剪切破裂过程(芮勇勤等,2002^[69]),研究基本的隧道工程断面在不同荷载条件下的破坏过程及破坏模式(赵兴东等,2004^[70]; Zhu 等,2005^[71]),揭示大倾角煤层开采过程中的顶板变形和破坏规律(石永生等,2006^[72]),分析节理岩体中不同节理倾角和侧压力系数对隧道稳定性的影响(P. Jia,2008^[73]),研究具有不同倾角层状软弱结构面岩体中隧道的变形破坏特征(贾蓬等,2006^[74])。另外,Tang 等(2002)^[75]使用 RFPA^{2D} 软件,建立了一个流体-应力-损伤(FSD)组合模型,研究岩体破坏机制。李琰庆等(2008)^[76]运用 RFPA^{2D} 软件对四种不同均质度系数围岩的破坏过程进行了数值模拟。

(2) 离散单元法

离散单元法(DEM)^[77]是由 Cundall 于 1971 年提出的,也像有限单元法一样将分析域划分成单元,即块体单元,但单元由于受结构面等不连续面的控制,在以后的运动中,单元之间可以相互接触也可以相互分离,在单元之间的约束下应用牛顿第二定律描述各个单元的运动。它用显式解法,不用求解大型方程组,用中点有限差分方程近似地对运动方程进行积分计算,并假设块体在运动时动能转化为热能而耗散掉。1974 年出现成熟的二维程序,1985 年离散元三维程序趋于成熟,并用于岩体的变形破坏分析中。

在使用离散单元法分析塌方机制方面,已有不少国外学者进行了大量研究。Hakuno 等(1991)^[78]采用离散元方法,模拟分析了动力作用下塌方问题。Fakhimi 等(2002)^[79]使用 PFC^{2D} 离散元软件模拟分析了地下洞室围岩的破坏过程,并将模拟结果与物理模型试验结果进行了对比。Hsu 等(2004)^[80]使用

UDEC 软件分析了不同夹层结构对软岩隧道破坏模式的影响。Lin 等(2009)^[81]结合台湾 Syueshan 隧道中由于大量涌水导致的塌方事故,使用 UDEC 软件,探讨了破碎岩体中隧道开挖前后水力传导系数的变化规律。R. Alejano 等(2008)^[82]采用离散元与经验稳定性判别以及解析法相结合,分析了地下洞室开挖过程中层状岩体的变形破坏机制。Hao 等(2005)^[83]使用离散元软件 UDEC,研究了断层对地下洞室围岩稳定的影响,确立了由断层引起的塑性区面积、最大变形量与断层参数的关系式。

20 世纪 80 年代中期,王泳嘉教授将离散单元法引入我国,并研制开发了“3D 离散元软件 TRUDEC”。国内许多学者将离散单元方法用于隧道工程中,解决了诸多实际问题。王贵君(2004)^[84]应用离散单元法对节理裂隙岩体中不同埋深无支护暗挖隧洞的稳定性及其机理进行了数值分析。孙萍等(2005)^[85]采用离散单元法对秦岭 III 号隧道塌方过程进行二维数值仿真模拟,得出隧道顶部和侧壁块体的塌落距离、塌落轨迹及隧道塌方量。马海君(2007)^[86]结合离散元方法和现场监控量测,对双向六车道隧道大断面塌方进行分析。秦昊等(2008)^[87]采用非连续离散元软件 3DEC,对应力波扰动作用下巷道围岩破坏形态进行了有效的数值模拟,得出不同情况下巷道围岩破坏的形态及区域范围等特征。王吉亮等(2008)^[88]采用离散单元法对隧道塌方运动全过程进行模拟,将隧道塌方的全过程划分为裂隙启动扩展阶段、裂隙变速扩展阶段、裂隙加速扩展阶段、塌落阶段和塌落完成阶段 5 个阶段。

(3) 非连续变形分析方法

非连续变形分析方法(DDA)^[89, 90]是由美籍华人石根华提出的一种新的数值模拟方法。该方法充分考虑了岩体的复杂性,将结构面所切割而成的块体作为分析单元,将动力学与静力学统一起来,用最小势能原理把块体单元之间的接触问题和块体单元本身的变形问题统一到矩阵中求解,具有完备的运动学理论、严格的平衡假定和正确的能量消耗。DDA 类似于离散元,但又与离散元有本质区别,离散元中的块体一般为刚体,属于力法范畴,而 DDA 的块体为变形体,属于位移解法的范畴。

自 1986 年 DDA 方法问世以来,已在岩土工程各领域得到广泛应用。该方法是解释隧道塌方机制的较好手段,Lanru Jing(1998)^[91]采用 DDA 方法对浅埋隧道围岩稳定性进行分析,成功模拟出隧道围岩的破坏过程。Kim 等(2006)^[92]将 DDA 方法进行改进,并结合朝鲜 Unju 隧道工程实例分析了水、开挖顺序和支护对围岩稳定性的影响。Tsesarsky 等(2006)^[93]使用 DDA 分析了地下洞室的稳定性,重点研究了岩体变形与节理间距和内摩擦角的关系,指出洞室的松弛区域主要受节理间距控制。Zuo 等(2009)^[94]利用 DDA 和 3-D 物探技术,分析

了中国北部一煤矿塌方的原因。马亢(2009)^[95]采用非连续变形方法 DDA 和连续介质计算相结合,对隧道工程塌方稳定性进行研究。苏永华等(2004)^[96]以块体理论为基础,考虑岩体结构面几何参数和力学参数的随机性,研究了块裂岩体地下结构围岩稳定随机分析方法。张清等(1989)^[97]利用关键块理论,在已确定块体移动最大范围的基础上,进一步确定可能滑动块体在隧道断面上的具体位置。邬爱清(2006)^[98]应用非连续变形分析方法对复杂地质条件下地下厂房围岩的变形与破坏特征开展研究,研究表明,围岩的破坏可表现为因局部块体的崩落所引起的整个洞室围岩的破坏。在相同岩体结构条件下,降低结构面强度参数,洞室围岩可以从变形稳定状态发展到不稳定状态,围岩的失稳主要表现为因围岩大变形引起的失稳。

1.2.3 塌方机制的非线性理论研究现状

塌方灾害是山岭隧道建设过程中的普遍灾害,是隧道工程领域的主要研究内容之一,长久以来,主要采用现场调查、资料统计和常规数值分析方法对其进行研究。近年来,人们逐渐认识到塌方灾害的发生具有突发性,围岩稳定性系统属于一个非线性系统,因此开始尝试采用非线性理论揭示围岩变形破坏机制。耗散结构论、协同学、突变理论、混沌理论、分形理论等非线性系统科学方法是解决岩土工程问题的较好方法,已广泛应用在滑坡、地震、岩爆等灾害的研究中,并取得良好效果。

目前在应用非线性理论进行塌方机制问题的研究中,使用最多的是突变理论,突变理论注重研究系统状态发生突变时外界的控制条件,主要阐述非线性系统如何从连续渐变状态走向系统性质的突变。该理论由法国巴黎高级科学院雷内·托姆(R. Thom)教授于 1972 年创立^[99],后来英国数学家 E. C. Zeeman^[100]等进行了改进和完善。国外学者首先运用突变理论解决了许多实际问题,如分析高斯度量空间中图像的深层结构(Kuijper, 1993^[101]),研究火山爆发、相变和断层运动(Henley, 1976^[102]),解释大陆架的沉积过程(John 等, 1976^[103]),探讨地震灾害的发生机制(H. Peter, 1979^[104]; Liu 等, 1989^[105]; Yin 等, 1994^[106]),并建立滑坡的尖点突变模型,分析滑坡的形成过程(Miao, 1988^[107]; Qin 等, 2001^[108, 109])。

国内外学者结合隧道塌方的特点,运用突变理论揭示塌方机制,开展了许多有益的研究工作。Germanovich 等(1995)^[110]应用尖点突变模型从静态和准静态的角度定性或定量分析了岩体失稳破坏过程。蔡美峰等(1997)^[111]借助突变理论导出了岩体工程开挖系统失稳破坏的能量突变准则。李造鼎等(1997)^[112]将灰色理论和突变理论相结合,以能量阈值作为破坏准则,建立了岩土动态开挖

的灰色突变模型。许传华(2004)^[113-115]应用熵及突变论等非线性科学理论揭示了岩体失稳过程和破坏机理。闫长斌等(2006)^[116]、祝云华等(2009)^[117]建立了深埋硬岩隧道失稳的尖点突变模型,导出了围岩失稳的力学判据条件。Yan 等(2006)^[118]应用突变理论,分析了爆破震动诱发交叠型地下洞室群失稳的动力机制。付成华等(2008)^[119]将能量突变判据、熵突变判据、位移模突变判据、洞周屈服区面积突变判据和广义黏塑性剪应变突变判据 5 种判据应用于某地下洞室断面,对围岩系统的稳定性进行分析,判别其发生失稳的可能性。王心飞等(2008)^[120]建立隧道发生塌方失稳的突变模型,较好地解释了隧道穿越软弱围岩时拱顶常发生大范围塌方的现象。刘春等(2008)^[121]结合现场拱顶下沉实测资料,利用突变理论,建立了隧道开挖围岩失稳的尖点突变模型。石杰红(2009)^[122]采用熵突变准则选取分析了围岩稳定性,并与数值模拟计算结果相比较。

从前人的研究可以发现,突变理论在隧道塌方机制分析方面得到了较好应用,取得了许多可喜的研究成果,但是对于浅埋隧道,尤其是对于降雨作用下浅埋隧道塌方机制的突变理论研究还鲜见报道。

1.2.4 围岩分类研究现状

塌方是隧道围岩失稳破坏的一种表现形式,山岭隧道施工中,人们最为关心的是发生塌方灾害的风险有多大。采用风险理论(王燕等,2009^[123])或建立山岭隧道塌方风险评估模型(周峰,2008^[124])对塌方风险进行评价是比较好的研究思路,但前提是必须要有大量的塌方统计资料,这在实际隧道工程建设中是比较难办到的。因此,目前的研究成果还不能广泛应用于工程实践,尚不能很好地指导现场隧道工程建设,塌方灾害未能得到有效预防。

山岭隧道塌方风险评价问题是目前的热门研究课题。塌方风险如果排除人为因素(野蛮施工、管理不当等)的影响,归根结蒂还是围岩的稳定性问题。围岩稳定性评价方法很多,如围岩分类方法、赤平投影分析法、解析分析法、数值模拟法、模型试验法和反馈分析法等^[125]。目前山岭隧道施工中常用围岩分类(或分级)来评价围岩的稳定性。隧道围岩分类主要是通过对洞室围岩类型的确定来评价围岩的稳定程度,实际上就是应用工程类比法对围岩稳定性进行评价。围岩的分类可以使工程师了解岩体的工程地质特性,并根据岩体分类来研究岩体变形和破坏的规律,从而达到预防围岩破坏和加固岩体的目的,对于准确评估塌方风险具有重要意义。

国内外围岩分类、分级从 Terzaghi 最早提出发展至今,分类方法有上百种之多。这些围岩分级方法可以分为定性、定量、定性与定量相结合 3 种。随着监