



UIDAO WENDINGXING PINGJIA YU TAFANG YUJING

隧道稳定性评价与塌方预警

刘学增 俞文生 著



NLIC 2970702985



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

隧道稳定性评价与塌方预警

刘学增 俞文生 著



NLIC 2970702985



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要阐述了公路隧道的稳定性评价和塌方预警的研究方法和研究成果。从流变试验、动态反演理论、时空效应、监控量测数据的统计分析等角度重点探讨了两车道公路隧道稳定性的评价方法和指标,并基于安全评价方法和围岩变形监测建立了隧道塌方预警体系。

本书可供隧道工程施工、设计和监测技术人员使用,亦可作为高等院校相关专业的研究生辅导教材和教师的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道稳定性评价与塌方预警/刘学增,俞文生著.

—上海:同济大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-5608-4423-7

I. ①隧… II. ①刘… ②俞… III. ①隧道—稳定性—研究 ②隧道—塌方—研究 IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 173891 号

隧道稳定性评价与塌方预警

刘学增 俞文生 著

责任编辑 高晓辉 助理编辑 赵泽毓 责任校对 杨江淮 封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×960 mm 1/16

印 张 18.75

印 数 1—2 100

字 数 375 000

版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4423-7

定 价 46.00 元

前 言

至 2008 年底,我国公路隧道总数已达 5 426 座,共 319 万延米,相继建成了全长 5.4 千米的雁门关隧道,全长 7 千米的雪峰山隧道,全长 18 千米、长度位居世界第二的陕西秦岭终南山隧道。随着我国公路隧道新奥法施工技术的日益成熟,穿越复杂地质条件隧道的相关设计理论和修筑工艺取得了一定的成果,但大量工程实践表明,公路隧道的动态施工和管理水平远不能满足要求,监测数据的反馈滞后于隧道施工,而且技术人员对于监测数据所反映的信息也不敏感,隧道受力和变形已经出现异常却未及时采取处置措施,致使出现较多隧道工程事故。

针对隧道的安全问题,本书主要研究了隧道稳定性评价方法和塌方预警方法。先从流变试验解决隧道围岩的本构模型和流变性态问题,据此采用黏弹性反分析方法确定隧道围岩参数并实现隧道变形的动态反馈和预测,再结合监控量测、时空效应分析形成隧道稳定性评价的一整套方法,确立稳定性评价量化指标。隧道塌方预警则是综合模糊评价方法和监测数据分析,建立了隧道事前预警、事中预警的塌方动态预警系统。本书在第 2 章首先介绍了不同围岩级别凝灰熔岩、花岗岩和板岩的流变特性试验,通过流变试验结果分析和模型辨识,掌握围岩的变形特性和力学参数,获得不同级别围岩的流变规律、流变模型及流变参数。第 3 章基于流变试验模型,结合黏弹性位移反分析着重探讨了围岩流变参数和动态反馈预测等问题。第 4 章分析和统计了大量隧道监测数据,初步确定不同级别、不同施工方法的围岩变形和稳定规律,其中重点研究了围岩变形随时间与空间的发展和稳定规律,研究建立了隧道稳定性评价标准。第 5 章采用安全评价和监测报警的方法,建立隧道塌方动态预警体系,对施工前可能发生的隧道塌方事故进行风险源预测,对施工中有隧道塌方风险的断面实施动态跟踪。

由于公路隧道地质、水文、自然条件的不断变化,隧道稳定性评价和塌方预警的研究成果的适用性还要依靠大量工作的验证和改进,许多问题有待进

一步深入研究,期待今后与专业人士交流与探讨,完善和深化相关研究内容和研究成果。

本书的研究成果及出版受到江西省交通厅武宁至吉安高速公路项目办公室的资助,武吉项目办的凌宏亿主任、王运金总工一直鼎力协助,作者在此深表谢意。本人的研究生周敏、苏京伟在编写过程中做了大量工作,同时也得到了同济大学隧道及地下建筑工程研究所朱合华教授、丁文其教授的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。因作者水平和时间有限,书中难免出现纰漏,恳请读者予以批评和指正。

作 者

2010年1月于上海

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 公路隧道施工常见安全事故调查和存在的主要问题	1
1.1.1 公路隧道施工常见安全事故调查和分析	1
1.1.2 公路隧道施工存在的主要问题	6
1.2 国内外研究现状	8
1.2.1 隧道围岩变形的时空效应	8
1.2.2 隧道变形稳定性评价方法	19
1.2.3 公路隧道稳定性评价指标	21
1.2.4 公路隧道塌方预警方法	28
1.2.5 公路隧道安全预警指标	29
1.3 研究内容及解决的关键问题	30
第 2 章 隧道围岩流变特性的试验研究	32
2.1 概述	32
2.2 岩石的流变试验	43
2.2.1 围岩分级	43
2.2.2 流变试验的岩样概况	44
2.2.3 流变试验设备	46
2.2.4 流变试验实施步骤	46
2.2.5 岩石流变试验加载方案	47
2.3 II 级围岩	50
2.3.1 凝灰熔岩	50
2.3.2 花岗岩	52
2.4 III 级围岩	56
2.4.1 凝灰熔岩	56
2.4.2 板岩	57
2.5 IV 级围岩	61
2.5.1 凝灰熔岩	61

2.5.2	板岩	62
2.6	V级围岩	65
2.6.1	凝灰熔岩	65
2.6.2	板岩	69
2.7	岩石流变特性分析	73
第3章	结合施工过程的黏弹性动态增量反演分析	76
3.1	隧道施工监控量测	76
3.1.1	位移量测信息	76
3.1.2	压力量测信息	78
3.1.3	应变量测信息	79
3.2	黏弹性动态增量反演分析方法	79
3.2.1	黏弹性位移反分析的模型及本构方程	80
3.2.2	黏弹性体的有限元解析	82
3.2.3	施工过程的模拟	87
3.2.4	反分析中的优化方法	87
3.2.5	黏弹性位移反分析软件	89
3.3	改进的自适应遗传算法	90
3.3.1	自适应遗传算法的改进	90
3.3.2	算法验证及参数敏感性分析	93
3.3.3	工程应用	97
3.4	结合隧道施工过程的反演分析	103
3.4.1	凝灰熔岩隧道的增量反演分析	103
3.4.2	花岗岩隧道的增量反演分析	111
3.4.3	板岩隧道的增量反演分析	113
3.5	基于监控量测数据的动态预测分析方法	117
3.6	隧道二衬结构的合理施作时间	120
第4章	隧道稳定性评价方法与评价指标	126
4.1	隧道围岩变形影响因素分析	127
4.1.1	隧道围岩变形影响因素	127
4.1.2	基于正交试验的影响因素分析	132
4.2	围岩变形与围岩级别的关系	141
4.2.1	隧道围岩变形稳定判断依据	141
4.2.2	隧道围岩变形监测数据统计	142

4.2.3 拱顶下沉与围岩级别的关系	144
4.2.4 周边收敛位移与围岩级别的关系	149
4.3 不同级别围岩隧道开挖空间效应分析	159
4.3.1 基于隧道施工监测数据的空间效应分析	161
4.3.2 隧道施工过程三维空间模拟计算	166
4.4 不同级别围岩隧道施工时间效应分析	173
4.4.1 基于隧道施工监测数据的时间效应分析	174
4.4.2 不同级别围岩变形时间效应计算	180
4.5 公路隧道围岩压力的特性分析	182
4.5.1 竖向围岩压力分布特性	183
4.5.2 侧向压力的分布特性	187
4.5.3 实测二衬压力分析	188
4.6 公路隧道施工围岩变形稳定性评价标准	188
4.6.1 公路隧道围岩稳定性评价指标的确定	189
4.6.2 公路隧道围岩稳定性评价体系	191
第5章 公路隧道塌方预警体系	198
5.1 公路隧道塌方事故统计分析	199
5.1.1 公路隧道塌方安全事故	199
5.1.2 公路隧道塌方分类统计	210
5.1.3 公路隧道塌方的影响因素统计分析	210
5.2 公路隧道塌方安全评价方法与指标	214
5.2.1 公路隧道塌方安全评价方法	214
5.2.2 公路隧道塌方安全评价关键指标体系	218
5.3 公路隧道塌方安全预警体系	234
5.3.1 安全评价指标体系量化	234
5.3.2 塌方安全预警体系	240
5.4 基于监控量测的公路隧道塌方变形预警	252
5.4.1 隧道变形监测曲线分析	252
5.4.2 隧道塌方变形数据统计分析	261
5.4.3 隧道塌方变形预警标准	270
5.5 公路隧道塌方动态预警体系	273
主要参考文献	281

第 1 章 绪 论

1.1 公路隧道施工常见安全事故调查和存在的主要问题

我国是一个多山岭的国家,山丘区面积占全国总面积的 75%。为加快国民经济建设,交通基础设施建设逐步加快,特别是随着西部大开发战略的进一步实施,将高速公路建设推向高潮,因此公路隧道在未来几十年内将不断增多。至 2008 年底,我国公路隧道总数已达 5 426 座,共 319 万延米,是世界上公路隧道最多的国家之一。我国公路隧道建设起步较晚,虽然在设计理论和修建技术方面取得了一定的研究成果,但大量工程实践表明,我国公路隧道建设中还存在许多安全隐患,一些工程技术问题仍有待于进一步研究并在实践中去解决。

1.1.1 公路隧道施工常见安全事故调查和分析

隧道作为地下工程,其施工是个复杂的过程,由于地质条件的不断变化,任一阶段、任一环节都有可能出现安全问题。常见的隧道施工安全事故有塌方、大变形、岩爆、涌水突泥、瓦斯泄漏等。

1. 塌方

塌方是最为常见、比较典型的一种事故。造成塌方的原因多种多样,有地质上的突发因素,也有人们认识上的因素,但归根结底,地质因素是决定性的,加强施工地质工作是避免和防止塌方事故发生的根本手段。

大梅沙隧道是深圳盐田到坝岗高速公路的重要控制工程,隧道设计为双线隧道,左右洞长分别为 1 505 m 和 1 520 m。两洞基本平行,轴线中心距离基本为 40 m。隧道直接穿越求水岭,为海岸低底山,海拔 354 m,属于花岗岩风化剥蚀地貌,由于受地质构造影响,山势陡峻,地形高差大。地面坡度一般在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间,地表植被茂密,灌木丛生。1992 年 8 月 31 日夜,当施工至 IIK329+123~IIK329+138 段时发生塌方,塌方持续 3 d 后暂稳定,处理中又发生更大塌方。塌方段为岩溶角砾状灰岩,受地质构造交错揉捻而破坏严重。综合监测信息可知,初期支护在拱顶和侧面均受到较大的压力。在外界环境恶化,持续的地表降水顺层间面浸润,加强了地下水渗透力,引起岩体湿胀、软化、结构疏松,出现一定范围内的岩体

与母岩分离,并逐渐沉落。在边墙开挖导致初期支护中的钢支撑基脚悬空而未及时浇注混凝土加固的情况下,增长的围岩压力便使围岩向隧道内产生过量位移,当其达到一定位移限值时便突然发生失稳。

飞鸾岭隧道位于福建省境内国道 104 福州市至宁德市之间,公路双线隧道,开挖面积为 82.4 m^2 ,全长 $3\,155 \text{ m}$ 。1996 年 2 月 28 日,飞鸾岭隧道南段洞口附近发生塌方。开始时围岩出现声响,喷层出现裂纹,随后裂缝逐渐扩大,其中最大的一条长达 $6\sim 7 \text{ m}$,宽度达 $1\sim 2 \text{ cm}$,斜穿拱顶至起拱点,最后形成冒顶塌方,地表形成 $9.0 \text{ m}\times 15.0 \text{ m}$ 的凹形漏斗,在坍口周围 35 m 半径范围内出现大量裂缝,塌方高度 32 m ,塌方量 $3\,760 \text{ m}^3$ 。塌方段围岩等级为 V 级全风化花岗岩,结构松散,其结合力主要依靠砂粒之间的摩擦力,整体稳定性极差;地下水丰富,隧道底部和上部均有渗水。针对这样的地质条件,施工中没有采取适当的超前支护措施,如管棚、预注浆加固等;另外,台阶法施工时,上台阶的格栅拱架直接落在砂土层中,拱脚不稳,易引起下沉,从而导致整个初期支护的整体稳定性下降。

那沙岭隧道为江西武宁至吉安高速公路上的一座隧道,隧道全长 462 m 。隧址区处于九岭隆起变质岩丘陵区,地形起伏大,植被发育,地貌有山间冲积小盆地、山脊以及山间冲沟等,其中山脊呈近南北走向,与隧道轴线呈大角度相交。2007 年 5 月 19 日隧道右洞施工至 $\text{YK}123+788.5$ 时,出现一较大滑层,先后出现两次较大范围的塌方。初次冒落围岩大约有 100 m^3 ,并有渗水现象。在地下水的影响下塌穴迅速扩大,塌高 $4\sim 8 \text{ m}$,纵长约 8 m ,宽 $8\sim 11 \text{ m}$,塌体完全堵住洞身。损坏型钢拱架 6 榀,该段初期支护全部破坏。塌方处为 IV, V 级围岩的交界带,此处千枚状板岩揉皱强烈,裂隙、节理、板理发育,岩体较破碎。未开挖前密实度较高,一经开挖,出现一较大滑层,岩体层面光滑,没有自身承载力,围岩失稳导致塌方。而且施工阶段连续降雨,地表水丰富,通过裂隙进入岩体,顶板淋水量增大,在地下水的软化、浸泡、冲蚀、溶解下加剧了岩体失稳,加速了层间移动。

2. 大变形

根据国内外隧道施工的实践总结,在下述条件下,施工过程中可能会发生大变形:①挤压性围岩的挤压变形;②膨胀性围岩的膨胀变形;③断层破碎带的松弛变形;④高地应力条件下软弱围岩的大变形等。他们的共同特征是:断面缩小、基脚下沉、拱腰开裂、基底鼓起等。变形初期不仅变形的绝对值很大,而且位移速度也很大。

陶恩(Tauern)隧道 1970—1975 年修建于奥地利,为双向行驶的公路隧道(单洞),全长 $6\,400 \text{ m}$,埋深 $600\sim 1\,000 \text{ m}$ 。新奥法(NATM)的鼻祖 Rabcewicz 教授亲自主持该隧道的设计并参加施工。陶恩隧道在施工过程中,在千枚岩和绿泥石地段发生了大变形,产生了 50 cm (一般)及 120 cm (最大)的位移,最大位移速度达

20 cm/d,是世界上第一座知名的大变形隧道。发生大变形地段围岩强度低,抗压强度为 0.4~1.6 MPa;而该地段的原始地应力较高,可达到 16~27 MPa。施工中采用长 4 m 锚杆,厚 25 cm 喷混凝土,TH36@75 钢架的初期支护,支护刚度较弱。

木栅隧道位于台湾北部第二高速公路上,隧道穿越台北市南郊的木栅山区,全长 1 875 m,为三车道公路隧道(断面 150 m²)。木栅隧道在通过潭湾大断层时,发生了大变形,拱顶下沉 150 cm 以上,边墙内挤 70 cm,大变形长度达 205 m。发生大变形地段为与隧道斜交的断层破碎带,岩石以黏土为主,围岩强度低,抗压强度为 0.2 MPa。而且施工中初期支护仅采用常规的锚喷支护,支护刚度不足,故产生了严重的大变形。

江西泰和至井冈山高速公路碧溪隧道设计为上、下行分离式隧道,左线长 940 m,右线长 1 212 m,两隧道轴线间距 50 m,隧道建筑限界净宽 9.75 m,净高 5.0 m。隧道区内基岩受多期构造影响,局部断裂构造带十分发育,岩石破碎,裂隙水量十分丰富,连通性好,且直接受地表水补给。2004 年 4 月 17 日,碧溪隧道 ZK41+670~ZK41+730 地段上半断面初期支护喷射混凝土开始出现环向裂纹、裂缝,缝宽 0.5~1.5 cm,局部块状脱落,经量测拱顶最大下沉量达 54.8 cm,周边收敛最大量达 53.9 cm,严重侵入二衬界限。隧道通过岩层主要为黏土、泥岩、碳质页岩。4 月 26 日以后连降大暴雨,因岩石破碎,裂隙发育,地下水直接受地表水补给,致使围岩进一步软化,呈现软塑、流塑状,自稳能力下降。对 ZK41+670~ZK41+730 围岩判定欠准确,当该段围岩整体性、稳定性差,涌水量大情况下,仍按原设计进行初期支护,故不能满足要求。

十漫(湖北十堰至陕西漫川关)高速公路火车岭隧道是一条长大隧道,其结构为一座上、下行分离式的双向四车道高速公路隧道,跨度 12 m,左幅长 1 425 m,右幅分为两段,长度分别为 140 m 和 1 211 m。2005 年 3 月火车岭隧道施工右幅 YK53+900~YK53+990 洞段时即出现大变形现象,表现为洞内已经施工好的钢支撑出现环向裂缝,喷射混凝土体出现严重的掉块现象,临时加固边墙出现 2~8 mm 不等的裂缝,并出现严重的周边收敛和拱顶下沉,拱顶下沉均大于 100 mm,最大沉降变形可达 1 600 mm。火车岭隧道围岩(如绢云母石英片岩和绿泥石英片岩)都属于典型性的膨胀性岩体。此外,受断裂破碎带影响,褶皱发育,岩体破碎,是地下水的主要贮藏、渗流带。

3. 岩爆

岩爆是高地应力区公路隧道等地下工程开挖过程中,因开挖卸荷引起洞室周边围岩产生应力集中作用,储存于围岩体中的大量弹性应变能突然释放且产生爆裂松脱、剥落(离)、弹射甚至抛掷现象的一种动力失稳施工地质灾害。岩爆是由地层岩性、地质构造、水文条件、围岩应力状态、地下工程布置、施工等多种因素综合

作用的结果,其中岩性和围岩应力是必要条件,施工为触发条件。

川藏公路二郎山越岭隧道是“九五”期间国家投资建设的特长公路隧道,隧道全长 4 176 m,最大埋深达 770 m;断面净宽 9 m、净高 5 m,为单洞双车道。隧道采用钻爆法施工,先期施工平导。二郎山公路隧道 1996 年 6 月开工,施工中先后共发生 200 多次岩爆现象,岩爆发生时,虽伴有不同程度的声响,但弹射微弱。一般距掌子面 3 倍洞径范围内的岩爆活动最为频繁,随后则逐渐减少,岩爆随时间的延续均有向深部发展的趋势。岩爆发生级别较高洞段的岩性主要是硬脆性的砂岩、石英砂岩,其次为砂质泥岩以及泥岩软质岩层内的泥灰岩、砂岩、粉砂岩硬脆性夹层。岩样平均单轴抗压强度达 62.29 MPa,岩体表面十分干燥,并具有似烘干样光泽。隧道光面爆破时效果不好,且施工采用全断面开挖,应力未得到逐级释放。

台缙高速公路苍岭隧道设计为双洞分离式单向双车道特长公路隧道,双洞中心间距 40 m,双线全长 15 141 m,其中左洞 7 536 m,右洞 7 605 m,隧道最大埋深 768 m,处于深埋高地应力条件下。隧道穿越的主要地层岩性有花岗斑岩、熔结凝灰岩,区内构造较为简单。苍岭隧道左右洞在施工掘进过程中,随着进入深埋高应力区,岩爆活动相继频繁发生。岩爆发生时,不同程度的噼啪声、撕裂声频繁,围岩表层呈薄片状及薄透镜状松脱、剥离,局部地段出现少量弹射及已喷射混凝土再次脱落现象。左右洞连续发生岩爆的区段共计近 20 段,长度 20~200 m 不等。隧道开挖中发现岩爆段岩性较单一,主要为熔结凝灰岩,受构造运动影响轻微,完整性好,节理裂隙不发育,隧道区内以构造应力为主,应力大小为 11.5~15.7 MPa。岩爆一般发生在隧道加宽段与横通道连接的位置。且岩爆与时间有关,有些岩爆段虽已经施作完初期喷锚支护,但随着时间推移,岩爆有继续发展的趋势。

后岗隧道为温州市绕城高速公路北线上一单向行车三车道双洞隧道,全长 2 360 m,最大埋深 230 m,隧道穿越丘陵地区,峰高坡陡,坡面植被茂盛,陡坡处基岩裸露。隧道设计断面为三心圆拱形,净高 9.1 m,净宽 16.7 m,为低扁平率大跨度隧道。后岗隧道在爆破开挖后 30 min 左右发生岩爆,围岩发出炸裂声响,同时有中厚边薄状不规则片状岩块自洞壁弹出,声响大,接着从左边拱部位围岩表面剥落较大的岩块,最终形成倒三角凹坑,深度约为 1 m,整个岩爆持续时间超过 2 h。岩爆段围岩为致密坚硬、完整性较好的熔结凝灰岩,单轴饱和抗压强度为 100.4 MPa,岩体完整性系数为 0.59~0.77。据现场观察,岩爆段爆破效果不好,围岩表面凹凸不平。

4. 涌水突泥

隧道突发性地质灾害(涌水、突泥)的形成必须具备三个基本条件:①特殊的地质构造基础;②丰富的地下水源和足够的填充物质条件;③人为的开挖扰动激活。而隧道工程中的突发性地质灾害大多与地质构造有关,特别是与断层和岩溶分

布有关。

通渝隧道位于重庆市开县与城口交界的雪宝山地区,属“八小时重庆”省道城黔路的控制工程。隧道为单洞二车道双向行驶公路隧道,全长4 279 m。隧址区岩层主要为石灰岩,占隧道围岩的70%左右,岩溶发育,特别是地表浅部溶蚀洼地、落水洞、漏斗成片出现,再加上隧址区处于向斜地质构造,极利于地下水的汇集,且汇集的地下水形成岩溶水。2004年2月22日上午,正在施工的通渝隧道K21+780右侧溶洞处突然发生涌水,涌水带出大量泥砂形成猛烈的涌突泥,瞬间造成约100 m长的隧道被淹没,坍塌方量5 000 m³以上,冲毁了已架好的钢拱架和喷射混凝土层,淹没了施工设备,造成了巨大的财产损失和人员伤亡。节理与层理之间是近于垂直且与隧道轴线近于平行,在有地下水作用时,节理中的水楔作用加强,而隧道埋深越大,静水压力也越大。发生突涌的地段围岩的溶蚀以顺层溶蚀为特点,而溶洞的发育是由灰岩的层面溶蚀形成的,溶洞中的黄色黏土及砾石系长期从向斜底部淤积而成。隧道爆破作业施工频繁,爆破振动对水饱和黄黏土的塑化、液化提供了条件,而且隧道开挖时没有施作仰拱。

五指山隧道为国道213线沐新路控制性工程。隧道位于四川盆地南部的沐川县与屏山县的交界处,为五指山越岭隧道。隧道全长3 911 m,最大埋深约为790 m。2005年7月25日五指山隧道出口段掘进至K30+900时遇特大地下水涌,掌子面处涌水量在短期内由12 000 t/d上升至35 000 t/d,掌子面日流量稳定在35 000~42 000 t/d,高峰时达到50 000 t/d,隧道出口洞口流量高峰时达到66 000 t/d,长时间无明显的衰减或增大趋势,持续时间达4个月。发生涌水突泥可能是因为,在隧道埋深超过600 m时,山体内部存在较大裂隙带,地表水可以在短期内渗透至600 m深的隧道掌子面。

5. 瓦斯泄漏

在瓦斯隧道的施工过程中,由于存在着瓦斯涌出和爆炸的隐患,一些先进的隧道施工技术和成熟的施工方法的应用受到一定的限制。瓦斯是一种无色、无味、无臭的混合气体,主要成分是烷烃,遇明火容易发生爆炸。瓦斯以自由气体状态存在于煤层或围岩的裂缝、孔隙之中,其量的大小主要决定于贮存空间的体积、压力和温度。瓦斯放出是地层中的瓦斯在地应力作用下沿岩体构造裂隙外漏的表现。归纳起来,发生瓦斯涌出有三个主要因素:地应力、瓦斯和围岩结构,而地应力和围岩中瓦斯的存是在引起瓦斯涌出的主要因素。

中梁山隧道位于成渝高速公路上,为双洞双车道隧道,左洞长3 165 m,右洞长3 108 m,横穿中梁山背斜。隧道在导坑掘进中,打炮眼、放炮和通风导致瓦斯涌出量分别为3~5 m³/min, 6~7 m³/min, 1~2 m³/min;而导坑内瓦斯浓度一般为0.2%~0.5%,有时达1%以上。大量瓦斯通过溶隙、裂隙在导坑预先得释放。

因此,虽然超前钻孔孔口瓦斯浓度高达 10% 以上,但整个掘进工作面在通风前瓦斯浓度仅为 0.2%~0.3%。该隧道通过二叠系统龙潭组,煤层均为优质无烟煤,瓦斯平均含量为 $30 \text{ m}^3/\text{t}$,最大相对涌出量达 $181.09 \text{ m}^3/\text{t}$,最大绝对涌出量为 $50 \text{ m}^3/\text{t}$,瓦斯压力达 4 MPa。长期以来,一部分煤层瓦斯沿断层、溶洞及溶隙及裂隙向相邻岩层空隙释放和转移,且受中梁山背斜构造影响,大量瓦斯存在于相邻岩层的节理裂隙之中。

华蓥山隧道位于广渝高速公路广安至邻水之间,处于华蓥山脉中段,地面高程一般为 450~1 200 m,相对高差 800 m 以上,地表为北东向展布的条状岩溶山地和岩溶槽谷为主的岩溶地貌。隧道全断面揭煤时最大瓦斯涌出量为 $17.68 \text{ m}^3/\text{min}$,炮后正常瓦斯涌出量为 $5.7 \text{ m}^3/\text{min}$;小断面揭煤时最大瓦斯涌出量为 $3.66 \text{ m}^3/\text{min}$,炮后正常瓦斯涌出量为 $1.36 \text{ m}^3/\text{min}$ 。煤层有突出的危险(倾出、压出类型)。该隧道穿过二叠系龙潭组煤系地层,主要煤层 K_1 为复合煤层,总厚度 3.75 m,煤层走向与隧道夹角 86° ,倾角 60° ,瓦斯压力 1.87 MPa,瓦斯含量 $8.94 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

1.1.2 公路隧道施工存在的主要问题

从列举的隧道施工安全事故来看,大部分事故发生的原因主要有:

(1) 地质判断技术、手段和方法的不完善

掌握围岩地质条件是隧道施工的基础。由于前期勘察条件的限制等因素的影响,缺乏有效的围岩地质勘探数据。隧道施工过程中不能完全依赖于地质人员所获得的勘察结果,应根据施工揭露出来的围岩状态而采取合理的支护参数,以防止事故发生。但是隧道施工人员往往缺乏对地质的认识,未根据开挖出来的掌子面和监控量测数据有效的对围岩进行评价,从而导致工程施工事故屡见不鲜。

(2) 隧道施工方法和施工水平有待改善

根据新奥法理论,隧道施工中要尽量减少对围岩的扰动,充分发挥围岩的自稳能力。但目前隧道施工超欠挖严重的现象仍普遍存在,致使围岩稳定性受到影响而发生工程事故。针对软弱破碎围岩,在自承能力较差的情况下,隧道的开挖、支护和加固方法都十分关键,然而开挖方法的选择、支护加固方式和时间的控制,都应具体问题具体分析,这在隧道施工过程中往往难以把握。对于不良地质条件下的隧道施工,如地下水、高地应力等,处理措施也是因工程而异,没有统一借鉴的方法。事实证明,施工队伍的素质和管理水平极大的影响到隧道施工的安全,隧道施工质量的好坏直接与施工人员相关。但目前施工工人普遍技术较低,管理水平又得不到保证,常常盲目追求施工进度和效益而忽视施工质量和隧道安全。而且现阶段对施工过程中工程质量检测手段和方法认识不足,对施工质量不能很好控制,从而使隧道安全进一步难以保障。

(3) 动态施工与管理不足

山岭隧道强调动态施工,即掌握隧道围岩地质条件、隧道施工对围岩影响的动态变化过程。监控量测是动态施工的基础,通过监测、地质超前预报等手段及时跟踪围岩的变化信息,因此隧道动态施工受到监控量测技术和质量的限制。目前监控量测数据反馈给隧道施工和设计的及时性和有效性也有待于提高,监控量测数据的反馈往往滞后于隧道施工,而隧道施工不参照监测结果盲目的赶工期;对于监测数据异常情况的处理,常因应变能力不强致使隧道安全状况进一步恶化。最近一些隧道工程利用通信、计算机、网络等技术,将隧道设计、施工和量测信息集成在一个管理系统中,全面掌控隧道施工过程中的动态变化信息,实现了真正的“动态施工”管理。然而这种类似的动态施工管理体系未得到普遍的应用。

解决隧道工程施工安全问题的方法还要从大量工程实践中摸索和探求。结合实际工程,从动态施工的角度出发,掌握隧道施工全过程围岩变形和受力情况、研究隧道稳定性评价方法和评价指标对隧道现场施工具有指导意义。长期以来,隧道围岩稳定性评价及其指标的研究一直是地下工程研究者关注的重要课题,伴随着高速公路隧道的发展,对复杂地层条件下围岩变形稳定性评价及其指标的研究也成为一个新的课题。据统计,隧道工程开挖过程中由于围岩变形过大或者失稳引起的事故发生率一般占总事故发生率的50%还多。实践也证明,许多公路隧道发生塌方、大变形等安全事故,其根本原因是围岩的稳定性不满足要求,从而迫使施工中断,并投入巨大的人力、物力来处理,既拖延工期又造成经济损失。隧道施工过程中塌方事故枚不胜数,造成施工困难、机械损毁以至人员伤亡,后果十分严重。而有关塌方机理需要开展进一步的研究,隧道施工中对塌方事故的预警和防治都比较困难。因此,对高速公路隧道的围岩变形受力特征、稳定性评价及塌方预警的研究,是一项非常紧迫、重要,并带有学科前沿性质的工作。

从隧道稳定性评价和塌方预警等方面开展综合研究较具实用性,对提高隧道修筑技术水平、加快施工进度、减少隧道灾害、保证施工安全都具有重要意义,表现在:

(1) 提高动态施工和管理水平

建立的隧道变形稳定评价标准对监测数据进行分析,可加强监测数据的管理,有效反馈给隧道施工和设计,对围岩变形异常及时预警,提高施工的安全性。

(2) 加强隧道工程预防安全事故的能力

稳定性分析和隧道塌方预警研究,从稳定和失稳两个方面探讨隧道施工安全,将隧道施工中发生大的灾害事故防患于未然。所取得的成果可广泛应用于公路隧道工程实际,将大大节约工程造价,具有巨大的市场需求和较好的推广应用价值,为推动我国交通建设的发展也将起到积极作用。

1.2 国内外研究现状

公路隧道稳定性评价和安全预警主要涉及到围岩变形的时空效应分析,隧道稳定性评价方法与指标的确定,以及隧道塌方安全预警技术,下文将介绍国内外相关方面的研究现状。

1.2.1 隧道围岩变形的时空效应

隧道围岩变形的时空效应是一个综合概念,包括变形空间效应和变形时间效应两个范畴。空间效应指的是隧道掘进过程中,由于受到开挖面的约束,使开挖面附近的围岩不能立即释放其全部瞬时弹性位移。这是开挖面推进过程中,由于空间变化所引起的一种围岩变形特性。时间效应则主要表现为围岩变形随时间而改变的性质,这是围岩具有流变性的体现。

根据围岩变形速率,岩石隧道围岩变形一般可划分为三个阶段,即急剧变形阶段、稳定变形阶段和流变阶段,如图 1-1 所示。其中 AC 段围岩变形呈现增长和急剧增长的特点,是急剧变形阶段(S_1); CD 段是稳定变形阶段(S_2); D 点之后围岩变形一般趋于稳定,是流变阶段(S_3)。①A 点位于水平轴 0 点左侧,即隧道开挖还没到达量测断面时,量测断面的围岩就已经开始变形。B 表示隧道开挖到达测

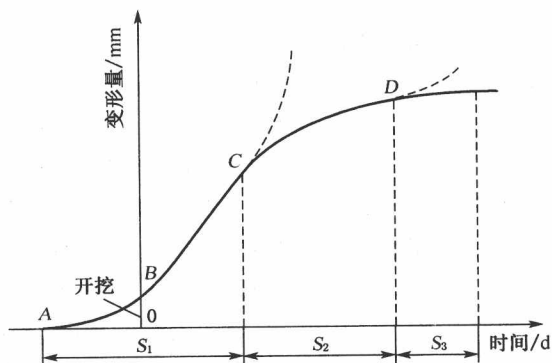


图 1-1 围岩变形全过程

量面时,该处的累计变形量。对于中等坚硬完整以上的岩石隧道,此时累计变形量通常可达到总变形量的 30% 左右。②C 点时围岩变形速率开始明显减小,围岩的自稳能力明显发挥作用。对于软弱围岩,则有赖于初期支护的作用。③D 点之后的变形以流变为主(时间效应),变形速率与 B 点附近相比已降低 1~2 个数量级,通常选择在 D 点以后施作二次衬砌。此时变形量一般可达到总变形量的 80%~95%。④图中虚线表示围岩变形过大,隧道发生破坏。其中 C 点处表示初次支护太弱而发生破坏,D 点处则表示二次衬砌不及时,围岩流变没有得到有效控制而发生破坏。

空间效应是围岩变形随开挖空间变化的特点,该效应通常发生在围岩变形的

S_1 段。时间效应则是围岩变形随时间改变而改变的性质,时间效应发生在围岩变形的 S_3 段及以后,而 S_2 段则为两者过渡段。图 1-1 的围岩变形全过程曲线是一个概化的模型,具体实测变形曲线受到多种因素影响,通常表现出复杂的不同形态。

1. 岩体的空间效应

在岩石地层中开挖隧道,伴随着开挖面向前推进,如何尽可能地减少对岩体初始应力的扰动,从而使围岩处于相对稳定状态,这是一个非常复杂的问题。由于开挖面的空间约束作用,洞室开挖后围岩应力释放不是在瞬间完成,而是受到开挖面的影响,应力逐步释放,直到开挖面空间约束效应完全消失,围岩应力才得以全部释放。

对于平面问题,目前考虑开挖面支撑的空间效应的研究较多。Panet 引入释放系数来模拟开挖引起的围岩弹性应力变化,此后,按“释放荷载”计算开挖空间效应的概念已逐渐为人们所接受。于学馥等建议在平面应变法中采用释放系数模拟隧道施工过程。J. Sulem 提出可以将开挖面约束效应等效为洞周的虚拟支撑力作用,因为掘进端面的存在仅对有限的局部范围的围岩产生影响,根据圣维南原理可将端面约束用边界附加的支撑力系来等效。朱合华、孙钧进而将 J. Sulem 提出的虚拟支撑力法推广为广义虚拟支撑力法,将释放系数法向前发展了一步。释放系数法通过不同施工过程的“释放荷载”的施加,将隧道施工过程的复杂三维问题通过二维平面来反映,使得分析过程大为简化。朱维申和何满潮利用洞壁径向位移释放系数反映开挖面径向“虚拟支撑力”的释放。

随着计算机技术的快速发展,对隧道施工力学行为的模拟也由最初的二维、二维半发展为三维施工过程模拟。近年来模拟隧道开挖过程中围岩与支护结构相互作用的三维计算及施工特性研究已较多。G. Swoboda 和 A.Abu-krisa 用三维有限元模拟了 TBM 推进过程中的地层受力和变形情况。G. Galli 等对隧道三维施工过程进行了数值模拟,研究了围岩和衬砌随施工推进的相互作用关系。余健等人应用有限元程序对隧道施工全过程进行三维弹塑性数值模拟,从而得出该段某一指定横断面上各点围岩沉降及水平位移随开挖过程的变化规律和数值大小。计算结果表明,对沉降和水平位移影响最大的是在指定段前后各 3 m 的范围内,约占其总量的 $2/3$,而上台阶开挖的影响又明显大于下台阶开挖;在掌子面未开挖之前,围岩沉降和水平位移均已完成 40% 左右;从横断面上看,围岩位移比较明显的区域主要集中在距洞壁 3~5 m 处。晏启祥等人采用三维快速有限差分软件,以软岩小净距隧道在不同施工方式下达到稳定后围岩和复合衬砌的力学效应为对象,重点分析不同施工方式下锚杆、喷射混凝土层的受力特点,以及洞周围岩特征点的变形和应力。对推荐的施工方式,分析了锚杆轴力、喷射混凝土层弯矩随开挖顺序的变化过程。